



## SISTEMI DI COPERTURE INNOVATIVE NEI CONTESTI ANTICHI

ANNALISA LANZA VOLPE

AREA 08 - SSD ICAR 12 - Tecnologia dell'Architettura

TUTOR: Prof. Walter Emanuele Angelico (Università degli Studi di Palermo)

CO-TUTOR: Dott. Ing. Rolf-Dieter Lieb

(I.F.I. Institut für Industrieaerodynamik GmbH, Aachen University of Applied Sciences)



Any full or partial reproduction of this thesis is allowed provided that  
the citation source is disclosed.

---

Università degli Studi di Palermo  
Dipartimento di Architettura  
Dottorato di Ricerca in “Recupero dei Contesti Antichi e Processi Innovativi nell’Architettura”  
XXIV Ciclo  
Coordinatore del Dottorato: Prof. Giuseppe De Giovanni

Settore scientifico disciplinare di appartenenza:  
ICAR 12 - Tecnologia dell’architettura

Tutor:  
Prof. Arch. Walter Emanuele Angelico  
(Università degli Studi di Palermo)

Co- tutor:  
Prof. Maria Clara Ruggieri  
(Università degli Studi di Palermo)

Dott. Ing. Rolf-Dieter Lieb  
(I.F.I. Institut für Industrieaerodynamik GmbH, Aachen University of Applied Sciences)

ANNALISA LANZA VOLPE

**SISTEMI DI COPERTURE INNOVATIVE NEI CONTESTI ANTICHI**

2011-2013

## INDICE

<b>INTRODUZIONE/ INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>1. La copertura dei siti archeologici: storia ed evoluzione.....</b>	<b>9</b>
<b>1.0. Abstract - Protective structures on archaeological sites: history and development</b>	<b>9</b>
1.1. Le origini.....	10
1.2. Il dibattito internazionale.....	15
<b>2. Requisiti delle coperture su aree archeologiche.....</b>	<b>23</b>
<b>2.0. Abstract. Requirements for covering structures on archaeological sites.....</b>	<b>23</b>
2.1. Esigenze, qualità e requisiti.....	24
2.1.1. Esigenze per i reperti e requisiti delle coperture.....	24
2.1.2. Esigenze per i fruitori e requisiti delle coperture.....	27
<b>3. Analisi di coperture trasparenti realizzate su aree archeologiche.....</b>	<b>33</b>
<b>3.0. Abstract. Analysis of transparent covering structures on archaeological sites....</b>	<b>33</b>
3.1. Schedatura delle coperture.....	34
<b>Francia</b>	
1. Sito neolitico Petit – Paulmy.....	37
<b>Germania</b>	
2. Antiche terme romane di Badenweiler.....	39
3. Ruederi della porta romana Limestor a Dalkingen.....	43
<b>Grecia</b>	
4. Resti archeologici presso la Banca Nazionale di Grecia.....	47
<b>Irlanda</b>	
5. Cappella della Cattedrale di St Fachnan.....	49
<b>Italia</b>	
6. Anfiteatro romano di Cividate Camuno.....	53
7. Resti archeologici a piazza Toscano.....	55
8. Castello di Legnano.....	59
9. Castello di Juval.....	63
10. Municipium romano di Opitergium.....	67

11. Domus del chirurgo a Rimini.....	69
12. Sito archeologico di piazza Sant'Anna a Teramo.....	73
13. Rovine della Cattedrale paleocristiana di Torino.....	75
<b>Norvegia</b>	
14. Rovine della Cattedrale medievale di Hamar.....	77
<b>Regno Unito</b>	
15. Sueno's Stone.....	81
<b>Spagna</b>	
16. Domus dei mosaici dell'antica Asturica Augusta.....	83
17. Resti della chiesa di Santa Maria la Real de Almodena.....	85
18. Sito archeologico de la Almoina.....	87
19. Rovine del teatro di Caesaraugusta.....	91
<b>Ungheria</b>	
20. Cella Septichora del cimitero paleocristiano di Pécs.....	95
<b>4. Coperture e involucri trasparenti.....</b>	<b>99</b>
<b>4.0. Abstract. Covering structures and transparent enclosures.....</b>	<b>99</b>
4.1. Il vetro.....	101
4.1.1. Proprietà.....	103
4.1.2. Classi composizionali.....	104
4.1.3. Produzione, lavorazioni e finiture del vetro piano.....	105
4.2. Caratteristiche energetiche.....	108
4.2.1. Lo spettro elettromagnetico e lo spettro solare.....	108
4.2.2. Il percorso della radiazione solare verso gli ambienti vetrati.....	112
4.2.3. I flussi energetici attraverso il vetro.....	114
4.2.4. Le prestazioni energetiche del vetro.....	117
4.2.4.1. Controllo solare, selettività spettrale e selettività angolare.....	120
4.3. Lavorazioni per il miglioramento delle caratteristiche del vetro.....	125
4.3.1. L'associazione del vetro con altri materiali.....	125
4.3.1.1. Vetro stratificato o laminato.....	126
4.3.1.2. Vetrocamera o vetro isolante.....	133
4.3.1.3. Vetro con coating.....	141
- Vetro riflettente.....	143
- Vetro basso-emissivo (low-E).....	145
4.3.2. La modifica della composizione dei vetri.....	153
4.3.2.1. Vetro colorato.....	153
4.3.3. La trasformazione della superficie del vetro.....	161
4.3.3.1. Vetro serigrafato.....	161
4.4. Strutture di supporto dei vetri.....	167

---

<b>5. Qualità comunicativa e museografica.....</b>	<b>175</b>
<b>5.0. Abstract. Communication and museological quality.....</b>	<b>175</b>
5.1. La capacità comunicativa e museografica del vetro.....	176
5.1.1. La trasparenza.....	176
5.1.2. La trasmissione di luce naturale.....	185
5.1.3. La resa estetica.....	189
5.2. Le motivazioni comunicative della trasparenza.....	190
5.2.1. Esigenze simboliche ed evocative.....	190
5.2.2. Esigenze di relazione.....	193
5.2.3. Esigenze estetico – emozionali.....	196
5.2.4. Riconoscibilità dell'intervento.....	196
<b>6. Rapporto fra condizioni climatiche, materiale impiegato per la copertura e natura dei reperti</b>	<b>201</b>
<b>6.0. Abstract. Relationship between climatic conditions, material for covering structures and archaeological finds.....</b>	<b>201</b>
6.1. Analisi climatica – ambientale.....	202
6.1.1. Il clima.....	202
6.1.2 Il microclima.....	204
6.1.2.1. Temperatura.....	204
6.1.2.2. Umidità.....	206
6.1.2.3 Ventilazione.....	207
6.2. Degrado dei materiali a causa delle radiazioni solari.....	209
6.2.1. Parametri fisici e chimici.....	210
6.2.1.1. Luce.....	210
6.2.1.2. Temperatura e umidità.....	216
6.2.2. Parametri biologici.....	218
6.2.3. Materiali dei reperti.....	218
6.2.4. Standard per la conservazione.....	221
6.2.4.1 Le leggi in Italia.....	222
6.2.4.2. Le norme tecniche nazionali e internazionali.....	223
6.2.5. Comfort ambientale e conservazione.....	231
6.2.5.1. Valori di riferimento per assicurare le condizioni ottimali di conservazione dei manufatti.....	238
6.2.5.2. Vincoli conservativi relativi all'esposizione a fonti luminose.....	241
<b>7. Simulazione di modelli di copertura in vetro.....</b>	<b>245</b>
<b>7.0. Abstract. Simulation models of glass covering structures.....</b>	<b>245</b>
7.1. Metodi di calcolo e simulazioni energetiche.....	247
7.2. Metodologia di dimensionamento delle aperture.....	249
7.2.1. Applicazione del metodo semplificato di calcolo.....	254

7.2.1.1. Dati di input.....	254
7.2.1.2. Risultati.....	255
7.3. Simulazioni fluidodinamiche/ Fluid dynamic simulations.....	260
7.3.1. Validazione delle simulazioni/ Validation of simulations.....	260
7.3.2. Analisi dei risultati/ Results analysis.....	270
7.3.3. Limiti delle simulazioni/ Limitation of the simulations.....	276
<b>8. Linee guida per la progettazione di coperture archeologiche in vetro.....</b>	<b>283</b>
<b>8.0 Abstract. Guidelines for design of archaeological glass covering structures.....</b>	<b>283</b>
8.1. I parametri/ The parameters.....	284
8.2. Luce/ Light.....	287
8.3. Temperatura e umidità/ Temperature and humidity.....	290
8.3.1. Clima (ubicazione ed esposizione)/ Climate (location and exposure).....	294
8.3.2. Tipo di spazio/ Type of space.....	295
8.3.3. Tipo di controllo microclimatico/ Type of microclimatic control.....	298
8.3.4. Tipologia di vetro ed eventuale schermatura.....	300
/Type of glass and possible shading device.....	301
- Prestazioni energetiche del vetro/ Energy performance of glazing.....	301
- Vetro ad alte prestazioni/ High - performance glazing.....	304/ 303
- Schermature/ Shading devices.....	309
8.4. Limiti dei sistemi vetrati nei siti archeologici.....	312
8.5. Protezione dalle radiazioni fornita dal vetro.....	318
8.6. Conclusioni/ Conclusions.....	322
<b>BIBLIOGRAFIA/ REFERENCES.....</b>	<b>326</b>

## INTRODUZIONE/ INTRODUCTION

La scelta di conservare nel loro contesto originario anche i manufatti più fragili ha favorito la diffusione dei musei archeologici *in situ*, con interventi finalizzati alla conservazione dei resti archeologici. Il museo archeologico rappresenta una particolare tipologia in grado di raccontare la storia attraverso i suoi ruderi. Non si tratta, quindi, di un museo che possiede caratteristiche tipologiche e funzionali che rispondono alle codificate regole museografiche e di allestimento. Proprio per questo la sistemazione e l'apertura al pubblico dei siti archeologici sono oggetto di riflessioni, dibattiti e collaborazioni interdisciplinari. Musealizzare un sito archeologico significa assicurarne la conservazione, valorizzarlo nel suo contesto, proteggerlo e nello stesso tempo creare le migliori condizioni di fruizione da parte della collettività. Un nodo centrale della questione è costituito dalle coperture, di cui i vecchi manufatti sono quasi sempre privi.

La ricerca è indirizzata al tema delle coperture in vetro a protezione di siti archeologici. Tale scelta è stata influenzata dalla considerazione che gli ultimi decenni sono stati caratterizzati da un incremento delle coperture trasparenti protettive e da una crescita costante del dibattito culturale nell'ambito della conservazione dei siti

*The decision to preserve, in their original context, even the most fragile artefacts has favoured the spread of archaeological museums in situ, through interventions geared towards the preservation of archaeological remains. The archaeological museum represents a particular typology capable of narrating history through its finds and remains; it is not a museum with typological and functional characteristics, responding to codified museum-graphical and display rules. The lay-out and the opening of archaeological sites to the general public in recent years have been the object of discussion, debate and interdisciplinary collaboration. Transforming an archaeological site into a museum means ensuring its preservation, valorizing it in its context, protecting it and, at the same time, creating the best conditions for its enjoyment by the general public. Covering structures represent a crucial element simply because ancient structures almost always seem to lack them.*

*This research tackles the issue of glass covering structures as protection for archaeological sites. The choice of this subject was influenced by the following considerations: the last decades have been characterized by an increase in protective transparent covering structures; the use of protective co-*

stessi; inoltre, dal punto di vista termico, la tipologia di copertura interamente vetrata può essere considerata un caso estremo che comprende tutti gli altri casi di coperture semitrasparenti e opache; altro elemento è rappresentato dalla grande evoluzione tecnologica del vetro che ha favorito la realizzazione di numerose coperture vetrate a protezione di scavi archeologici e di reperti, orientate a garantire caratteristiche di riconoscibilità e reversibilità. Il vetro presenta numerosi vantaggi come l'apparente leggerezza e la trasparenza. Esso inoltre ha subito, a seguito del progredire della tecnica, un sostanziale miglioramento prestazionale che ha consentito di superare i suoi limiti tanto da renderne possibile l'impiego negli interventi di conservazione e restauro di contesti storici senza particolari problemi in rapporto alle condizioni climatiche. I miglioramenti prestazionali hanno interessato anche altri aspetti quali il comportamento meccanico, tanto da renderlo un materiale di affidabile resistenza (tempra, indurimento, lastre stratificate, ecc.), le migliorate modalità di produzione/lavorazione che lo rendono più facilmente adattabile alle diverse esigenze architettoniche e funzionali (lastre di grandi dimensioni, lastre stratificate curve, ecc.) e la diffusione di procedimenti costruttivi che ne esaltano, grazie all'esilità ed esiguità dei sostegni, le peculiarità di leggerezza e trasparenza.

### **Problematiche**

Il patrimonio archeologico è spesso costituito da complessi vulnerabili, con rivestimenti pavimentali e parietali molto delicati o con materiali deperibili. Per tutelare tale patrimonio, il progettista deve occuparsi di di-

*vering structures in archaeological contexts and what constitutes their design has been, and continues to be, a highly debated subject among experts around the world; constant innovation in glass continues to increase its possibilities in architecture. This has favored the construction of many glass covering structures as protection for archaeological excavations and finds, geared towards ensuring recognition and reversibility. The material has many advantages, such as apparent lightness and transparency and, as a result of technical progress, it has also undergone significant improvements in performance, overcoming certain limitations. So now it is possible to use glass in the conservation and restoration of historical contexts without particular difficulties due to climatic conditions. Improvements in performance have also concerned other aspects (such as mechanical behavior) which have rendered it a material of reliable strength (tempering, hardening, laminated sheets, etc.), better production/processing methods that enable it to adapt to different architectural and functional needs (large sheets, curved laminated sheets, etc.) and the diffusion of manufacturing processes that enhance lightness and transparency, thanks to the few thin supports.*

### **The problem**

*Ruins and archaeological sites are vulnerable items, often characterized by non-durable materials or very fragile coatings on floors and walls. The protection of archaeological sites involves various aspects:*

*- preservation: remains can be safeguarded by periodic restoration, which sometimes proves insufficient in protecting them*

versi aspetti:

- conservazione: i beni sono custoditi destinando loro restauri periodici che, talvolta, si rivelano insufficienti a proteggerli dal degrado e non possono essere ripetuti con eccessiva frequenza;

- valorizzazione: le rovine possono costituire luoghi idonei ad accogliere iniziative culturali e attrattive turistico commerciali;

- fruizione: l'accesso al pubblico deve essere adeguatamente organizzato e predisposto, in modo da determinare condizioni favorevoli per la migliore visita e da consentire la comprensione dei valori presenti.

La scelta di coprire deve essere valutata accuratamente: comporta una riflessione sulla sua reale necessità e richiede un'attenta progettazione dal punto di vista architettonico, tecnologico e fisico tecnico. In particolare, il tema delle coperture in vetro rappresenta un ambito di sperimentazione molto complesso dal punto di vista tecnologico. L'uso del vetro in ambito archeologico pone problematiche che riguardano la protezione, la conservazione, la fruizione e la messa in valore. Particolarmente rilevanti sono le questioni relative alle condizioni climatiche che possono risultare dannose per i reperti. In passato, sono state progettate e costruite diverse coperture senza seguire condizioni adeguate che hanno portato a interventi inappropriati che non solo non hanno fornito la protezione necessaria, ma hanno anche creato un danno accelerato, con la formazione di microclimi aggressivi per i reperti da conservare. Basta pensare al teatro greco di Eraclea Minoa in Sicilia dove le sedute della cavea, di un morbido calcare marnoso, negli anni Sessanta sono state protette dalla pioggia con lastre di perspex

*from degradation and which also cannot be often repeated;*

- *valorization: the ruins can be appropriate places for cultural activity and tourism;*

- *public utilization: this needs to be properly organized and arranged so as to determine favorable conditions for ideal visiting, but also to consent understanding of the values in question.*

*With regard to preservation, the decision to cover ruins needs to be carefully weighed up; it entails reflection on the objective need and demands judicious design from the architectural, technological and physical points of view. It represents a considerable change that should in no way clash with conservation of the finds, considering them as a part of an authentic historical document. In particular, the issue of glass shelters denotes a field of experimentation that, from a technological point of view, is very complex. Several aspects are involved: protection, preservation, enhancement of ruins and public use. The issues related to climatic conditions are particularly significant because the resultant climate may be potentially harmful to the artifacts. In the past, many covering structures were designed and built without following proper terms of reference; this often resulted in inappropriate interventions that not only did not provide the necessary protection, but hastened damage, by creating harsh microclimates around the elements to be preserved. One need merely think of the Greek theatre of Eraclea Minoa (Sicily), where, in the sixties, the seats of the cavea (made of soft, marly limestone) were protected from the rain using closely-aligned perspex sheets, causing a greenhouse effect, which then encouraged robust organic growth. The case of the co-*

poste molto vicine ad esse, provocando un effetto serra che ha favorito una forte crescita di piante infestanti. Un altro esempio sul quale si continua a dibattere da diversi anni è rappresentato dal sito archeologico della Villa del Casale di Piazza Armerina in Sicilia: la copertura in materiale traslucido realizzata nel 1957 ha provocato effetto serra e fenomeni di condensa, con conseguenti danni alle figurazioni musive presenti in essa.

### **Ipotesi**

Attraverso una corretta progettazione delle coperture in vetro è possibile ottenere temperature adeguate per la conservazione dei reperti e per il comfort dei visitatori, attraverso soluzioni che permettono in estate una temperatura dell'aria interna simile a quella esterna e che sfruttano in inverno il favorevole apporto solare.

### **Domande poste dalla ricerca**

Nello studio si darà risposta alle seguenti domande:

- Perché realizzare una copertura vetrata su area archeologica?
- Quali sono i limiti dell'utilizzo delle coperture vetrate nei contesti storici?
- Quali sono i vetri oggi disponibili e che prestazioni hanno?
- Qual è l'influenza delle coperture in vetro sull'ambiente interno?
- Quali sono i mezzi (normative, strumenti, software) di cui può avvalersi un progettista?
- Come controllare il microclima all'interno di un ambiente vetrato?
- Quali sono i principi di progettazione per ottenere coperture in vetro efficienti per la

*covering structure of Villa del Casale in Piazza Armerina (Sicily) is also well-known; in 1957 perspex and glass were used to cover the finds without an adequate study of the micro-climate, and as a consequence the paintings and the mosaics have been keenly affected.*

### **Research hypothesis**

*Appropriate temperatures for the preservation of finds and for the comfort of visitors can be achieved through proper design of glass covering structures, with solutions that allow a reduction in the gap between indoor and outdoor temperatures in summer and take advantage of favorable solar heat gains during the winter months.*

### **Research questions**

*The following questions will be tackled in this study:*

- *Why build a glass covering structure on an archaeological site?*
- *What are the limitations of glass covering structures in historical contexts?*
- *Which are the glazing solutions available today and how do they work?*
- *How do glass covering structures influence the indoor environment?*
- *What are the instruments (regulations, software, etc.) available to designers?*
- *Which are the design principles for creating efficient glass covering structures for artifact preservation and visitor comfort?*

### **Importance of the research**

*The archaeological heritage must be protected and enhanced at the same time. When the decision has been taken to cover a site, the designer can choose from a wide*

conservazione dei reperti e per il comfort dei visitatori?

### **Importanza della ricerca**

Il patrimonio archeologico deve essere tutelato e valorizzato allo stesso tempo. Nei siti da proteggere con coperture, il progettista può scegliere tra una vasta gamma di materiali; per valutare la possibilità dell'uso del vetro deve conoscere potenzialità, limiti e strategie in modo da ottenere soluzioni adeguate. Lo studio permetterà di fornire suggerimenti per un'appropriata progettazione. Da diversi anni ricercatori si occupano di protezione dei siti archeologici, fornendo principi di progettazione e linee guida. Inoltre, numerose sono le ricerche che mediante l'uso di simulazioni energetiche si concentrano su particolari misure passive di risparmio energetico. Tuttavia, vi è una mancanza di studi che riguardano in particolare l'impiego delle coperture in vetro e le soluzioni possibili per migliorare tale impiego. Ciò risulta particolarmente importante in contesti da proteggere come quelli archeologici. La ricerca mette in evidenza le varie problematiche progettuali coinvolte, nel tentativo di trovare soluzioni per migliorare la progettazione ambientale e il comfort.

### **Obiettivi**

Con tale ricerca s'intende contribuire alla progettazione di soluzioni appropriate in grado di soddisfare le esigenze di tipo climatico – ambientale essenziali ai fini della protezione, della conservazione, della fruizione e della valorizzazione, verificando il rapporto fra natura dei reperti, soluzioni impiegate e condizioni microclimatiche. Finalità della ricerca è quella di comparare

*range of materials, typologies, ventilation strategies, etc. and in order to be able to assess the possibilities of glass and to obtain suitable solutions he must know potential limitations and strategies. The study tries to suggest appropriate design choices. For several years now research has been going on into protection of archaeological sites, providing design principles and guidelines. In addition, there has been extensive research about energy simulations focusing on various passive energy saving measures. However, there has been a lack of research into glass covering structures with suggestions regarding possible solutions for their improvement. This is of critical importance in archaeological contexts and this research sheds light on the various issues involved in design, in an attempt to improve environmental design and enhance conditions of comfort.*

### **Research objectives**

*The aim of this research is to develop some basic design criteria for glass covering structures as protection for archaeological ruins, looking at problems such as security, preservation, utilization, valorization and the relationship between ruins, covering structures and microclimatic conditions. The main objective of this study is to assess and compare types of protection for archaeological sites, to understand the effectiveness of the solutions in certain emblematic interventions, with regard to conditions of comfort, and how to protect the items from the elements (sun, rain, etc.). Other specific objectives of the study are as follows:*

*- to increase knowledge of the functionality of existing, glass covering structures by*

diverse soluzioni progettuali e cogliere in alcuni interventi emblematici l'efficacia della soluzione, sia per quanto riguarda le condizioni di comfort sia nei confronti della protezione dei reperti dagli agenti atmosferici (sole, pioggia, ecc.). Altri specifici obiettivi dello studio sono:

- ampliare le conoscenze riguardo la funzionalità di interventi di protezione in vetro esistenti verificando l'efficienza e l'adeguatezza ai luoghi per giungere a una classificazione delle diverse tipologie di intervento;
- valutare la progettazione di coperture in siti opportunamente scelti, avvalendosi di una modellistica di simulazione che consenta una verifica a priori dell'efficienza delle nuove installazioni;
- definire i parametri e le caratteristiche progettuali delle strutture di protezione architettonica, in modo da pervenire a un "manuale" per l'intervento progettuale, capace di indirizzare tecnicamente e criticamente.

### Metodologia

Al fine di raggiungere gli obiettivi, per testare l'ipotesi e rispondere alle domande formulate, la ricerca si articola in tre fasi principali: raccolta dei dati; codifica e analisi dei vari parametri fisici coinvolti; sintesi delle analisi e interpretazione dei risultati. Ogni fase risulta interdependente e collegata alle altre. La ricerca è stata effettuata utilizzando un approccio analitico: un ampio studio dei casi esistenti, delle caratteristiche dei diversi tipi di vetro, dei danni creati dal sole sui materiali e della letteratura su rendimento termico e clima nella progettazione avviene come sfondo teorico. Essa si basa su fonti teoriche, quali ricerche, testi di conferenze e studi precedenti ma si avvale anche di con-

- verifying the site's efficiency and adequacy*
  - *to develop a classification of the types of protection for archaeological sites;*
  - *to evaluate the design of covering structures on appropriately chosen sites, using simulation modeling that allows designers to check in advance the efficiency of the new constructions;*
  - *to define parameters and design characteristics of the protective structures, so as to create a "manual" for project intervention, geared towards technical and critical guidance.*

### Methodology

*In order to achieve the objectives of the research, to test the research hypothesis and to answer the research questions, this research is divided into three main stages: collection of data, coding and analysis of the various physical parameters involved, summary of the analysis and interpretation of results. The phases are interdependent and connected to each other. The research was carried out using an analytical approach: an extensive study of existing cases, the characteristics of different types of glass, damage caused by the sun on materials and a literature review regarding thermal performance and the climate, provides a theoretical background. The research took advantage of theoretical sources such as research reviews, conference papers and previous studies; contacts with professionals and institutions were also exploited and checks, field measurements and simulation processes using computerized programs were carried out. Archaeological glass covering structures were analyzed in different climates and with different geometric shapes, propor-*

tatti con professionisti e istituzioni, di verifiche e misurazioni sul campo e di processi di simulazione mediante software. Sono state analizzate coperture archeologiche in vetro in diversi climi e con diverse forme geometriche, proporzioni e orientamenti. I risultati ottenuti sono stati quindi valutati per giungere alla definizione delle linee guida.

### **Limiti della ricerca**

Poiché si tratta di circostanze molto particolari e quasi sempre differenti non è possibile avere soluzioni univoche a causa del numero dei parametri coinvolti; ogni sito archeologico è infatti un caso molto particolare che va analizzato e studiato approfonditamente con un team di esperti in varie discipline.

### **Struttura**

La tesi si articola in otto capitoli.

Nel capitolo 1 è stato affrontato lo studio storico delle coperture a partire dalla nascita del problema della protezione fino all'attuale dibattito internazionale.

Nel capitolo 2 si è passati allo studio dei requisiti che devono avere le coperture sulla base di esigenze dei reperti e dei fruitori.

Nel capitolo 3 è stata effettuata l'analisi di siti archeologici in Europa che presentano coperture in materiali trasparenti e che costituiscono un repertorio esemplificativo di casi realizzati.

Il capitolo 4 è stato dedicato all'analisi e al confronto delle prestazioni dei vari tipi di vetro.

Nel capitolo 5 sono stati analizzati gli aspetti museografici e comunicativi dell'impiego del vetro.

Il capitolo 6 è dedicato all'analisi del rap-

*tions and orientations. The results obtained were then evaluated in order to lay down guidelines.*

### **Limitations**

*It is not possible to achieve universal solutions since the requirements are very special and the number of parameters involved and their interactions are wide-ranging; in fact every archaeological site is a very special case, to be analyzed and studied best in collaboration with a team of experts from various disciplines.*

### **Organization**

*The thesis is divided into eight chapters as summarized below:*

*Chapter 1 introduces a historical overview of covering structures in archaeological areas from the origins of the issue of protection to the current international debate.*

*Chapter 2 studies the requirements that covering structures must possess, on the basis of the needs of the archaeological items and the users.*

*Chapter 3 presents an analysis of archaeological sites in Europe that have transparent covering structures.*

*Chapter 4 is devoted to analysis and comparison of the performance of various types of glass.*

*Chapter 5 discusses the museological and communicative aspects of the use of glass.*

*Chapter 6 is devoted to analysis of the relationship between climatic conditions, material used for the covering structures and the requisites for the archaeological items: climatic environment analysis, analysis of weather damage (especially by solar radiation)*

porto fra condizioni climatiche, materiale impiegato per la copertura e natura dei reperti: dall'analisi climatica ambientale, attraverso l'analisi dei danni provocati dagli agenti atmosferici (in particolar modo per effetto delle radiazioni solari) sui materiali che si trovano più frequentemente nei siti archeologici (materiali lapidei, pigmenti, legno, ecc.), fino alla definizione dei parametri del comfort ambientale e degli standard conservativi.

Nel capitolo 7 si passa allo studio su varie tipologie, articolato in varie fasi: comprensione dei principi, scelta delle condizioni al contorno, prove e validazione dei risultati, studio dei parametri.

Il capitolo 8 conclusivo riassume i risultati ottenuti attraverso l'elaborazione di linee guida riguardanti le esigenze di tipo climatico – ambientale delle coperture vetrate.

## **Strumenti**

Per la ricerca sono stati utilizzati i seguenti strumenti:

1. Software per l'applicazione sperimentale della modellistica di simulazione fluidodinamica computazionale (FDS), al fine di studiare l'efficienza della ventilazione;

2. Apparecchiature (Istituto I.F.I., Institut für Industrieaerodynamik, Aachen) per il monitoraggio microclimatico dei luoghi (Dalkingen e Badenweiler, in Germania) e per valutarne le caratteristiche termofisiche;

3. Campioni in vetro per la verifica prestazionale della trasparenza di lastre di vetro serigrafato (Ricerca PRIN 2008, Università di Palermo).

*on archaeological materials (stone materials, pigments, wood, etc.), definition of comfort parameters and environmental conservation standards.*

*Chapter 7 studies various types of covering structures in several stages: understanding of principles, data analysis criteria, computer modeling, choice of boundary conditions, testing and validation of the results, parameter analysis.*

*The final chapter 8 summarizes the results obtained by developing guidelines regarding the climatic-environmental requisites of glass covering structures.*

## **Research instruments**

*For the research, the following instruments were used:*

*1. Software for experimental application of computational fluid dynamics modeling (FDS), in order to analyze the efficiency of natural ventilation;*

*2. Microclimatic monitoring systems (I.F.I. Institut für Industrieaerodynamik, Aachen) for on-site measuring (Dalkingen and Badenweiler, Germany) and for assessing thermo-physical properties;*

*3. Glass samples for testing transparency of silk screened glass sheets (PRIN 2008, University of Palermo).*

## COLLABORAZIONI E RINGRAZIAMENTI

Vorrei esprimere la mia profonda gratitudine e un sincero ringraziamento a tutti coloro che in questi tre anni hanno dato un supporto fondamentale alla ricerca:

Il Prof. Antonio De Vecchi che ha contribuito nel primo anno all'impostazione del progetto di ricerca, suggerendo importanti aspetti metodologici e operativi.

La Prof. Maria Clara Ruggieri per la fiducia e il supporto in tutte le fasi della ricerca e per i suggerimenti che hanno permesso una serie di riflessioni critiche.

Il Prof. Walter Emanuele Angelico e il Prof. Giuseppe De Giovanni per la disponibilità, la fiducia e i consigli nelle varie fasi di studio a partire dal secondo anno.

Il dott. Ing. Rolf Dieter Lieb, direttore dell'Istituto IFI, (Institut für Industrieaerodynamik), University of Applied Sciences, Aachen, Germania, che da anni si occupa di aerodinamica degli edifici e di simulazioni. Lo ringrazio per la disponibilità, la collaborazione, gli strumenti di ricerca suggeriti e i fondamentali contributi che hanno reso possibile questo lavoro. Ha contribuito verificando sia dal punto di vista metodologico che operativo i calcoli e le simulazioni da me effettuati e ha reso possibile la validazione dei risultati grazie al suo supporto per rilievi e sopralluoghi. Il mio ringraziamento va anche a tutti i membri dell'Istituto IFI per l'aiuto e la pazienza.

Il Prof. Dr. Ing. Harald Funke, Aachen University of Applied Sciences e la Prof. Dr.-Ing. Michaela Lambertz, Cologne University of Applied Sciences, che hanno valutato la ricerca.

Si ringraziano istituzioni, professionisti e aziende di varie città, italiane e straniere, che gentilmente hanno fornito articoli e informazioni riguardanti i siti archeologici e le coperture. In particolare: Denis Maljean del Museo Archéolab e J. C. Marquet conservatore del sito di Abilly (Francia); lo studio di progettazione Schlaich Bergermann und Partner, Stuttgart (Germania); la ditta Regine Lacker (Germania); l'ing. Jürgen Graf; lo studio dell'arch. Mario Botta; l'arch. Paul Arnold; l'arch. Stefania Guiducci; l'arch. Marcello Guido; l'arch. Luigi Ferrario; l'arch. Elena Fraschina; l'arch. Giancarlo Casetta; l'arch. Gianni Cimini; la dott. Luisella Pejrani, funzionario archeologo della Soprintendenza del Piemonte; Tim Alex Savolainen, technical manager museo Domkirkeodden (Norvegia); l'arch. Brian Paul; Angeles Sevillano Fuertes del Museo Romano di Astorga (Spagna); l'arch. Juan Múgica Aguinaga; l'arch. Horacio Fernandez del Castillo Sainz; Jose Luis Hernandez dell'impresa Ajingenieria (Spagna); Albert Ribera, direttore Centro archeologico de l'Almoína (Spagna); l'arch. Jose Miguel Rueda Muñoz de San Pedro; l'arch. Bálint Bachmann e l'arch. Molnár Tamás (University of Pécs, Ungheria).

Infine ringrazio i miei colleghi di dottorato che hanno condiviso e sostenuto il mio percorso di ricerca.

## CAPITOLO 1

### La copertura dei siti archeologici: storia ed evoluzione

#### 1.0. Abstract

##### Protective structures on archaeological sites: history and development

*Quite often archaeological sites consist of artifacts of considerable historical and artistic value, built with easily perishable materials; the fragility of mortar, plaster, floors, etc., is well known. The decision to preserve these artifacts in their original context has favoured the spread of on-site archaeological museums, with interventions aimed at the preservation of the archaeological remains. Because ancient artifacts almost always lack covering structures these represent an essential element. The choice of protective covering structure must be carefully considered; it entails deliberation regarding its objective need and determination of the costs of its construction and maintenance. It represents a considerable change that should not in any way clash with the conservation of archaeological finds, considering them as a part of an authentic historical document. Several aspects are involved: protection, preservation, enhancement of ruins and public use. The lay-out and the public opening of archaeological sites in recent years have been the object of discussion, debate and interdisciplinary collaboration. This chapter provides a historical framework, from the origins of the problem in archaeological site protection to the current international debate, which has also led to the development of typological classifications and distinctions between covering structures.*



Fig. 1 - Villa del Casale di Piazza Armerina (1957), Sicilia (foto Associazione Monumento-Documento Onlus).

### 1.1. Le origini

Il problema di coprire i resti del passato per conservarli, proteggendoli dall'aggressione dell'ambiente, non si è affermato con la moderna archeologia. Già nell'antichità si costruirono apposite strutture per preservare luoghi dei quali si voleva conservare la memoria, permettendone talora anche la frequentazione (Laurenti, 2006). Nel periodo romano, ad esempio, a protezione di quello che si riteneva fosse il luogo della nascita di Romolo, furono utilizzate delle coperture temporanee in legno e vimini periodicamente sottoposte a manutenzione, quasi come fosse un luogo di culto (Ruggieri & Sposito, 2004).

Quando nel Settecento iniziarono i primi scavi sistematici non si pose subito il problema della protezione dei reperti archeologici che venivano in luce, perché la prassi consueta era quella di distaccare i partiti decorativi considerati di maggior pregio al fine di arricchire le collezioni dei nobili. A Pompei ed Ercolano, in particolare, dove per l'eccezionale situazione che aveva portato al seppellimento delle antiche città si erano conservati grandi complessi di dipinti murali e rivestimenti pavimentali, la pratica era quella di asportare i quadri figurati e le decorazioni ritenute di più alto valore, abbandonando sul posto le rimanenti parti. Il problema che si sentiva con più urgenza era quindi quello di trovare rimedi appropriati per la conservazione delle parti distaccate. Al contrario, per far fronte ai problemi conservativi delle pitture murali rimaste *in situ* e sottoposte alle intemperie, si ricorreva a rimedi temporanei da cantiere, quali tavole, fascine o tele incerate appese dall'alto.

Qualsiasi intervento era caratterizzato da forme che si limitavano alla sola protezione del sito, non tentando di emulare in nessun modo, nell'aspetto e nei materiali, le forme originarie. Un disegno di Desprez del 1777 (Fig. 2) che documenta lo stato dei lavori al *Tempio di Iside a Pompei*, ci offre una rara immagine delle coperture sorrette da pali di legno che ven-

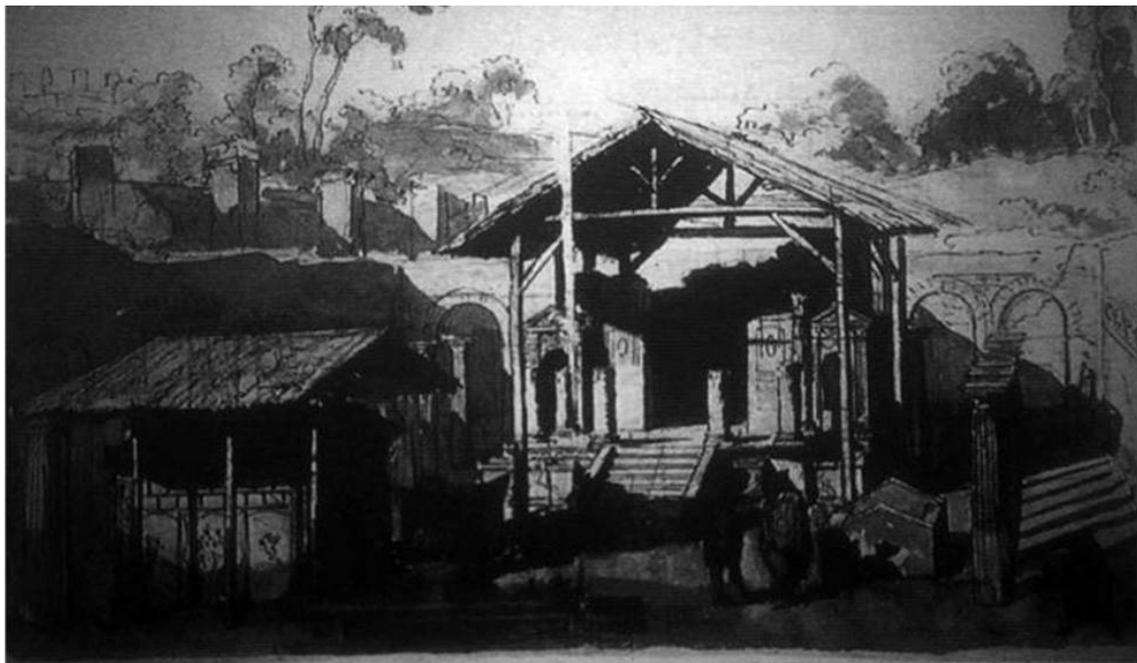


Fig. 2 - Sistema di protezione provvisorio con pali di legno del tempio di Iside, Disegno di L. J. Deprez, 1777.

nero apprestate per coprire gli stucchi che decoravano le pareti del tempio e il cosiddetto *purgatorium*; tali stucchi, considerati “di maniera cattiva”, erano stati lasciati sul posto, mentre le pitture del portico erano state staccate e portate a Napoli. Gli apprestamenti posti in situ a proteggere gli stucchi, comunque, vennero presto smontati perché fatiscenti e non se ne realizzarono più altri. A Pompei, con la direzione dell’architetto La Vega si cominciò a far strada l’esigenza nuova di presentare al pubblico le aree di scavo nel miglior modo; per tale ragione, pur continuando a distaccare i partiti decorativi, si dedicò maggiore cura alle strutture antiche *in situ* e la pratica della manutenzione cominciò ad acquistare un aspetto preminente. Ancora per un secolo si perpetuò quella gerarchia di valori che faceva passare in secondo piano la conservazione e la salvaguardia degli apparati di minor pregio e delle strutture; si continuarono così a distaccare i migliori partiti decorativi, perdendo in tal modo il senso originale di dipinti e mosaici.

Fu solo alla fine dell’Ottocento che, grazie a una ormai matura sensibilità verso la storia, la conservazione *in situ* diventò il problema centrale dell’archeologia pompeiana, con la generazione successiva a Fiorelli. Questi, infatti, pur attento agli aspetti filologici, non avrebbe potuto ammettere la sovrapposizione di strutture estranee a quelle antiche, sia pure con fini protettivi. Dopo la sua direzione, quindi, alla fine del secolo, si decise per la prima volta di lasciare integri i maggiori complessi monumentali, ricostruendone le coperture e ripristinando in situ peristili, giardini e fontane. Non tutte le costruzioni, comunque, furono sottoposte a tali operazioni di musealizzazione *in situ*: gli episodi di edilizia minore furono lasciati senza alcuna protezione. Questa scelta così selettiva è quella che ha determinato nel tempo una disparità nello stato di conservazione. I modesti ripari apprestati sulla sommità dei dipinti murali, infatti, quali le impermeabilizzazioni dei colmi, realizzate talora con tegole e le cornici sporgenti, non si sono rivelati protezioni sufficienti e specialmente le pitture mancanti di figurazioni, allora considerate poco importanti, sono quasi del tutto scomparse nelle città vesuviane (Laurenti, 2006).

Fuori dall’Italia nell’Ottocento abbiamo i primi esempi di coperture realizzate su monumenti o complessi archeologici. Nel centro e nord Europa l’esigenza di coprire i resti antichi nacque non soltanto per la presenza di complessi decorativi di pregio, quanto più in generale per le rigide condizioni climatiche dei luoghi che imponevano misure conservative più radicali. In particolare, gli elementi cui maggiormente si è rivolta l’attenzione sono stati sostanzialmente i mosaici, le pitture e gli ipocausti. La rinuncia ad asportare mosaici importanti, in un’epoca nella quale il saccheggio costituisce la pratica ricorrente dei musei archeologici, costituisce un primato del quale va reso grande merito alla museografia inglese. Nei primi anni dell’Ottocento viene aperta al pubblico la *Villa romana di Bignor* (Fig. 3 a), scoperta dall’archeologo Samuel Lysons (1793-1819). Si tratta del primo sito che, pur avendo restituito mosaici pregevolissimi, li abbia mantenuti *in situ*, con un tipo di esposizione consistente nella realizzazione di piccoli *cottages* coperti da tetti di paglia, concepiti sia per coprire i mosaici principali, sia per organizzare un piccolo museo (Ruggieri 2007). La Villa va citata come intervento di architettura contemporanea sulle rovine, in quanto esso venne affrontato

senza cedere a quelle inclinazioni ricostruttive che hanno caratterizzato la tutela archeologica più tipica del nord Europa. Il linguaggio è quello dell'architettura del tempo: la pubblicità dei site museum parla appunto di *barrel - vaulted roofs* (tetti a barilotto), rivisitazione del linguaggio popolare. Nel 1864 viene scoperta la *Villa di Chedworth* e nel 1870 le parti più interessanti della Villa vengono coperte con quattro grandi strutture con tetto a falde, nello stile tipico della regione (Fig. 3 b).

In Germania nel 1821 il principe Karl Egon II di Fürstenberg si occupava della protezione dell'*impianto termale romano di Hüfingen*, facendo costruire sopra le rovine un edificio nello stile dell'epoca (Fig. 3 c). Il riferimento alla tradizione edilizia della prima romanizzazione degli *Agri Decumantes* e della *Raetia* è abbastanza evidente: la struttura possente delle capriate, in legno appena sbizzato, domina il cuore di un antico *aisled building*, dove però le pareti, non più in legno, paglia e fango, sono in muratura, esprimendo così l'influenza romana. Dopo questo primo intervento, frutto di una passione privata, all'impulso locale si accompagnò l'interesse pubblico. Nel 1838 viene inaugurato il primo intervento statale tedesco di conservazione in situ finalizzato ad una presentazione pubblica: gli scavi e la protezione delle rovine di una fattoria romana, la *Römische Villa Otrang* (Fig. 3 d). Quattro piccoli edifici in muratura, realizzati nello stile *Biedermeier*, con tetto ligneo ricoperto di tegole d'ardesia, furono costruiti sopra i mosaici venuti alla luce a partire dal 1825. Si era deciso di proteggere le testimonianze più preziose del grande complesso residenziale, lasciando all'aperto le restanti aree della Villa. Un decennio più tardi viene scoperto il sito di *Nenning*, coperto nel 1874 da un edificio museale che alludeva alla tipologia edilizia romana (Ruggieri, 2007).

Nel Novecento la novità che si registra è nelle tecniche e nei materiali impiegati negli



Fig. 3 - Villa romana di Bignor (1814), Inghilterra (a); Villa di Chedworth (1870), Inghilterra (b) (foto Ruggieri, M.C.); Impianto termale romano di Hüfingen (1821), Germania (c); Römische Villa Otrang (1838), Germania (d).

interventi di ricostruzione delle coperture. Specialmente a partire dal dopoguerra si introdussero sulle aree archeologiche i materiali tipici dell'edilizia moderna, come il legno lamellare, le strutture metalliche e il cemento armato. Fino agli anni '50 non troviamo casi di vere e proprie coperture architettoniche di protezione al di là delle ricostruzioni di alcune pensiline e di rare strutture più complesse, come la tettoia trasparente a falda sulla *Casa di Nettuno e Anfritrite a Ercolano* (Fig. 4 a), riportata da Schimdt (Schimdt, 1988). Egli inoltre illustra i vantaggi e gli svantaggi che l'utilizzo di una copertura in vetro poteva comportare a quei tempi. Il vetro è da Schmidt apprezzato per la sua trasparenza e leggerezza ed è invece sconsigliato per la sensibilità agli urti, la scarsa protezione dai raggi UV, l'effetto serra. Si tratta di problematiche oggi in gran parte superate grazie alla continua innovazione nel settore.

Le soluzioni adottate per proteggere e musealizzare le aree archeologiche in Sicilia nel corso del decennio fra gli anni '50-60, frutto dell'elaborazione teorica di Franco Minissi, traducono in una dimensione spaziale allargata al sito la concezione della vetrina per l'esposizione museale dei reperti, introdotta per la prima volta in un sito archeologico. Le *Mura greche di Capo Soprano* presso Gela, i mosaici della *Villa romana di Piazza Armerina* e il *Teatro di Eraclea Minoa* furono racchiusi entro teche trasparenti (Laurenti, 2006). Cesare Brandi, direttore dell'*Istituto Centrale di Restauro*, nel 1952 affidò a Minissi l'incarico del restauro e della protezione delle *Mura greche di Capo Soprano* (Fig. 5). Il progetto di Minissi aveva introdotto lastre di vetro temprato con la funzione di proteggere i mattoni di argilla cruda posti nella parte superiore, particolarmente vulnerabili all'azione degli agenti atmosferici. Un'altra funzione demandata alle lastre di vetro, collegate alle mura con elementi in acciaio inossi-

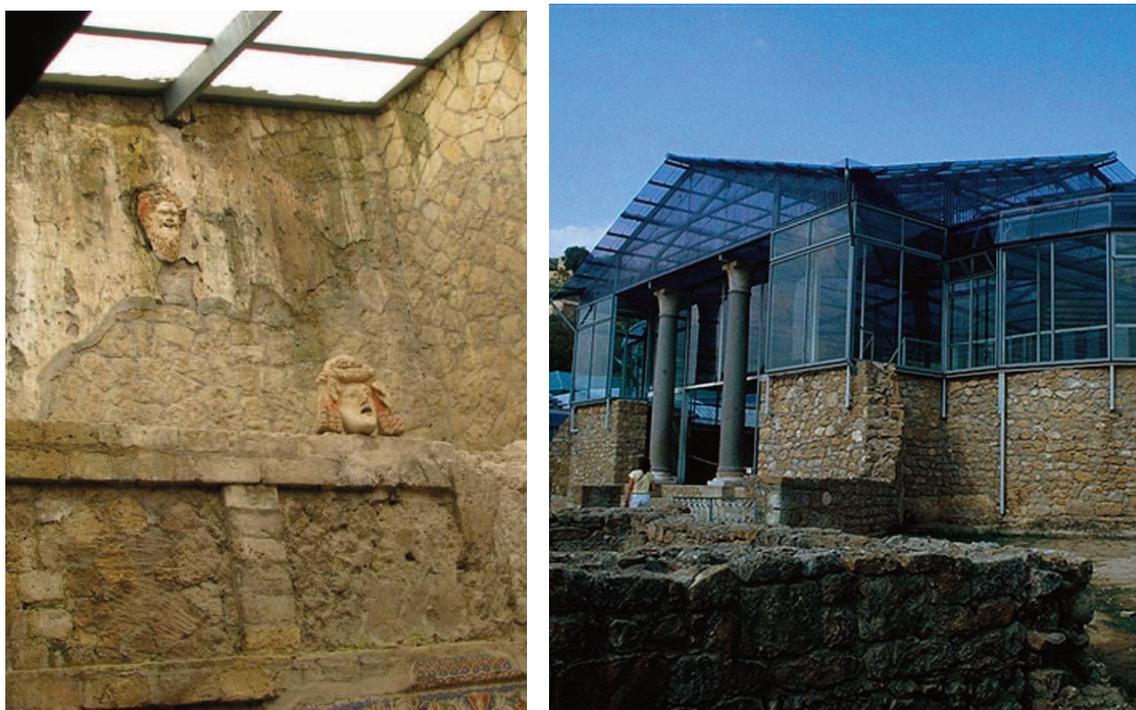


Fig. 4 - Casa di Nettuno e Anfritrite a Ercolano, Italia (a); Villa del Casale di Piazza Armerina (1957-63), Italia (b).

dabile, era quella di esercitare una pressione sui mattoni per il loro contenimento, permettendone allo stesso tempo una perfetta lettura storico-critica da parte della collettività. La copertura, che doveva impedire ogni possibile infiltrazione di acqua, fu dismessa dalla Sovrintendenza di Caltanissetta, perché ritenuta troppo “moderna”. La mancata protezione dalla pioggia ha innescato il processo di disgregamento dell’argilla.

Il progetto per la copertura della *Villa del Casale di Piazza Armerina* (Fig. 4 b) fu posto all’epoca sotto la supervisione di una commissione ministeriale di esperti presieduta da Cesare Brandi, il quale diede mandato a Minissi di studiare alcune soluzioni per la conservazione in situ i mosaici e i dipinti. L’interdisciplinarietà del progetto non prevede allora il contributo fondamentale degli esperti di microclima e, per mancanza di conoscenze specifiche, non venne considerata l’interazione fra l’ambiente e i manufatti (Laurenti, 2006).

Anche il *Teatro di Eraclea Minoa* è stato oggetto di un intervento di protezione (Fig. 6) da parte dell’architetto Franco Minissi. Nel 1960 egli venne chiamato dal Soprintendente Pietro Griffo per il restauro e la musealizzazione del teatro greco, la cui cavea era costituita da un calcare marnoso estremamente friabile, considerando che l’alternativa sarebbe stata quella di reinterrare il monumento al fine di garantirne la conservazione. Minissi aveva realizzato una ideale ricostruzione della cavea utilizzando un materiale plastico trasparente, il *perspex*, modellato sul calcare marnoso di cui sono costituite le antiche forme architettoniche, che avrebbe dovuto proteggere i resti del teatro dagli agenti atmosferici, impedendone la progressiva erosione per l’azione eolica e assicurando la visione al pubblico. Tale intervento, oltre a non garantire nel tempo la visione dei reperti a causa dell’ingiallimento del materiale, si è anche rivelato fortemente lesivo della sussistenza dei resti del teatro. Le gradinate di protezione in *perspex*, in mancanza di uno studio preliminare delle condizioni ambientali di progetto, hanno determinato l’incremento incontrollato della temperatura e del grado igrometrico del microambiente racchiuso, accelerando i fenomeni di degrado sulle superfici, a causa della formazione di un microclima che favoriva la crescita di vegetazione e di altri agenti patogeni (Palmerio & Di Muzio, 2007).

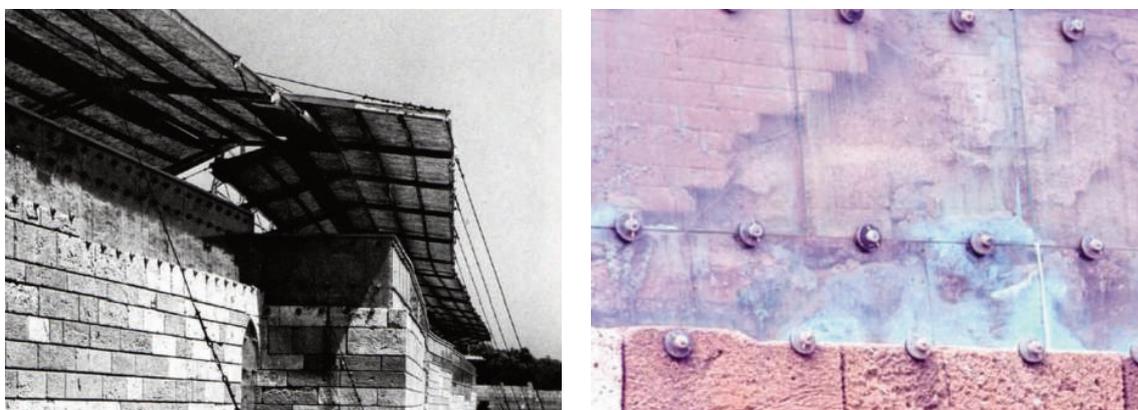


Fig. 5 - Mura di Capo Soprano, Gela, Sicilia. Foto del 1952 dopo la realizzazione delle opere di protezione (a). Vista del 1983, quando era già stata rimossa la copertura e per effetto delle infiltrazioni dell’acqua si era perso, quasi totalmente, l’effetto di trasparenza delle lastre di vetro (b) (foto Associazione Monumento-Documento Onlus).

## 1.2. Il dibattito internazionale

L'interesse per le problematiche connesse alle coperture nelle aree di scavo riprende e si intensifica, anche in ambito internazionale, a partire dai primi anni '80 del secolo scorso, in concomitanza con il rinnovamento delle tecniche di scavo stratigrafico e con la nascita dell'interesse per alcune testimonianze della cultura materiale fino ad allora trascurate. L'affinamento delle tecniche di indagine archeologica, fondate su una maggiore attenzione per il reperto, ebbe come conseguenza quella di porre il problema della conservazione dei resti archeologici sin dal momento della loro messa in luce, riaprendo così il dibattito della loro conservazione *in situ* (Laurenti, 2006).

Il *Convegno di Cipro* e quello di *Ghent*, organizzati nel 1983 e nel 1985 dall'*ICCROM*, (*International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property*), un'organizzazione intergovernativa dedicata alla conservazione del patrimonio culturale in tutto il mondo attraverso la formazione, informazione, ricerca e cooperazione, furono dedicati entrambi alla conservazione sullo scavo archeologico. Nel corso dei due incontri studiosi ed esperti discussero anche delle coperture protettive, sentite quali strumenti necessari, insieme ad altre misure conservative, per la preservazione dei resti, soffermandosi sulla pianificazione degli interventi prima, durante e dopo lo scavo e facendo riferimento alla conservazione dei reperti ma anche dei siti, analizzando, quindi, il ruolo del conservatore. Vennero illustrati principi, metodi e tecniche di conservazione che riguardano sia i reperti mobili, sia i siti di scavo con tutte quelle superfici che fanno parte dell'insieme architettonico. Gli atti del convegno organizzato dall'*ICCROM* a Cipro nel 1983 furono pubblicati nel 1984 nel testo *Conservation on archaeological excavations* (Stanley Price, 1986), tradotto in italiano (*La conservazione sullo scavo archeologico*, a cura di Luciano Nardi, 1986). Si tratta di un volume, elaborato grazie al contributo di grandi personalità nel campo dell'archeologia, importante per il periodo nel quale è stato pubblicato perché il primo a raccogliere in modo chiaro problematiche riguardanti la conservazione sullo scavo archeologico. Ancora oggi, con la sua suddivisione in argomenti corrispondenti ai singoli capitoli, si indirizza a varie figure, dall'archeologo al restauratore, aprendo la strada ad un dibattito approfondito



Fig. 6 - Teatro greco di Eraclea Minoa (1960-63), Italia. Si può osservare un generale ingiallimento della plastica degli elementi di protezione di perspex che in origine era completamente trasparente. L'involucro ha causato la disgregazione degli elementi lapidei per effetto dell'eccessivo calore e dell'umidità.

sul tema della tutela dei beni archeologici alle varie scale.

John Stubbs, in particolar modo, nel suo articolo tratta della protezione e presentazione *in situ* di reperti archeologici. Egli sottolinea che occorre imparare dai lavori già sperimentati, individuando in essi alcuni criteri di base. Per quanto riguarda la fase della progettazione, egli afferma l'importanza di una valutazione oggettiva e globale del sito, delle difficoltà tecniche e dei costi. Per quanto riguarda la metodologia, sottolinea la necessità di far comprendere le caratteristiche chiave del sito. Parlando della conservazione dei materiali indica come soluzione efficace di protezione la realizzazione di coperture che possano convogliare la pioggia lontano dalle strutture e che "non stonino con le caratteristiche del sito e con le costruzioni residue". Procede quindi all'illustrazione di esempi di protezione di siti, tra i quali anche quello di Piazza Armerina, specificando i pregi e i difetti di ognuno. Conclude affermando che il degrado è un processo continuo: per i siti esposti occorre mitigare gli effetti del tempo accettando il fatto che la manutenzione è una parte essenziale della conservazione.

Sulla protezione e conservazione di strutture di scavo in mattone crudo, Balderrano e Chiari, dopo aver elencato l'analisi delle cause di deterioramento dei reperti in mattone crudo, elencano anche i possibili interventi di conservazione. Tra questi l'uso di tettoie per la protezione temporanea e permanente: "Tali opere d'arte dovrebbero essere isolate completamente dall'ambiente esterno per evitare l'azione della pioggia, della condensazione e dei vapori del mare e per minimizzare le escursioni termiche sulle superfici".

Negli anni '80 in Italia, il dibattito si incentra nuovamente sulle città vesuviane quando lo stanziamento di fondi speciali, a seguito del terremoto del 1980, creò nuove opportunità di intervento a Pompei e nelle altre città dell'area vesuviana rendendo possibili nuovi progetti di sistemazione e valorizzazione dei monumenti archeologici. È in questo contesto che si apre la discussione sulle tipologie di copertura più adatte a proteggere l'architettura antica.

Il tema delle protezioni architettoniche fu dibattuto sia durante il *Convegno Internazionale COPAM* (1-4 Luglio 1986, Napoli), che nell'ambito della presentazione dei progetti realizzati. In tali occasioni fu evidenziato come, in modo particolare nel caso delle due città vesuviane, i problemi dell'indagine archeologica, del restauro e della presentazione dei monumenti fossero fra loro strettamente connessi e come non si potesse prescindere, nella fase della progettazione delle coperture, dall'integrità dei contesti urbanistici, nonché dalle pregresse vicende conservative dei singoli episodi edilizi.

Su queste premesse si basarono i primi tentativi di elaborazione di una classificazione e distinzione tipologica delle coperture. A questo proposito è importante il contributo di Minissi il quale, nello stesso Convegno Internazionale di Napoli, espose la sua teoria sulla musealizzazione delle aree archeologiche quale condizione prioritaria per un progetto di protezione. Nella relazione al Convegno egli afferma alcuni principi di seguito elencati (Minissi, 1987):

- Le preesistenze archeologiche inamovibili devono conservarsi *in loco*, vanno considerate sullo stesso piano scientifico e culturale di quelle mobili e va quindi predisposta per esse una serie di operazioni e di interventi atti a soddisfare tutte le esigenze di una conser-

vazione attiva, esattamente come il museo le soddisfa per le opere che in esso vengono trasferite; si tratta in sostanza di sostituire al museo come luogo il museo come concetto: se il reperto non può andare al museo, il museo dovrà andare al reperto.

- I restauri dei reperti archeologici inamovibili, in tutti i casi in cui ciò risulti scientificamente corretto ed ammissibile, dovranno tendere a suggerire, se non addirittura in qualche caso reintegrarla, l'immagine originaria delle preesistenze.

- La scelta delle soluzioni da adottare, nei vari casi possibili dovrà dipendere innanzitutto dalla individuazione e analisi delle possibili cause di offesa e danneggiamento del complesso in relazione alla sua consistenza strutturale, alla sua collocazione sul territorio e alla sua maggiore o minore frequentazione.

- Occorre affermare il principio che la progettazione degli interventi protettivi dei complessi archeologici va assimilata alla progettazione degli interventi di restauro in quanto il restauro costituisce la prima indispensabile fase della protezione delle preesistenze.

- Data la stretta correlazione tra restauro e protezione dei siti archeologici va di conseguenza affermato che i relativi interventi investono massimamente il campo di attività dell'architetto, un architetto che sia capace di conservare ed esaltare, con il suo intervento, l'assoluto protagonismo della preesistenza.

Riguardo il tema delle coperture su siti archeologici si riportano alcune parti dell'articolo di Minissi: *Ipotesi di impiego di coperture metalliche a protezione di zone archeologiche* (Minissi, 1985):

*«L'esigenza di proteggere perché si conservi più a lungo possibile tutto ciò che fa parte del patrimonio dei beni culturali rientra indiscutibilmente nel campo del restauro. Si può anzi affermare che la protezione del bene culturale costituisce la fase conclusiva irrinunciabile di ogni intervento di restauro. Mentre infatti l'intervento di restauro è operazione sostanzialmente finalizzata a individuare, restituire ed evidenziare il valore e il significato culturale dell'oggetto, la protezione di questo è operazione finalizzata a garantire sia la sopravvivenza fisica sia il permanere dell'efficienza delle operazioni di tecnica conservativa del restauro stesso. Nel vasto campo dei beni culturali storico – artistici il problema della loro protezione spazia in un immenso arco di soluzioni di cui la tecnica e le tecnologie moderne in continuo divenire fanno sperare un sempre maggior ampliamento. Nel campo tuttavia di quelle preesistenze di valore culturale, caratterizzate da una fruizione soprattutto visiva non soltanto della loro immagine ma anche del rapporto che esse stabiliscono sempre con il loro contesto ambientale originario o acquisito, il problema impone la ricerca di soluzioni protettive capaci di ridurre al minimo il processo di totale decontestualizzazione e nello stesso tempo essere altresì utilizzate come ausili alla loro corretta rilettura. Il settore dell'archeologia è senza dubbio quello che presenta in questo campo i maggiori e più complessi problemi sia sul piano concettuale sia su quello operativo [...]».*

Riguardo i reperti archeologici egli afferma: *«È chiaro ed evidente che l'approdo al museo di reperti archeologici per natura mobili e la loro protezione in vetrina sia un'operazione senza dubbio snaturante anche se opportune soluzioni museografiche possono ridurre l'effetto*

*negativo ma è altresì chiaro ed evidente che l'effetto snaturante provocato dalla stessa operazione di trasferimento in museo a quei reperti per natura non mobili, quali elementi architettonici o strettamente collegati alle strutture architettoniche come gli affreschi parietali, i mosaici pavimentali e gli elementi decorativi, risulta estremamente più grave e certamente non riscattabile [...].*

*Scaturisce l'esigenza che il problema della conservazione dei siti archeologici venga orientato verso soluzioni che postulino il più esteso possibile processo di musealizzazione in loco evitando al massimo asportazioni e trasferimenti di parti e conservando presso lo stesso sito archeologico, in eventuale apposito museo, i reperti mobili per i quali risulta impossibile mantenerli nella condizione e localizzazione del rinvenimento. È sulla base di tale esigenza pertanto che si pone il problema della protezione dei complessi archeologici le cui maggiori o minori mutilazioni li rendono comunque sempre privi della protezione originaria propria di ogni manufatto architettonico e cioè la copertura. Questa prima e fondamentale constatazione non deve condurre però automaticamente all'ipotesi generalizzata di dotare comunque di coperture ogni sito archeologico; la motivazione infatti dell'esigenza di tale intervento protettivo e le soluzioni da adottare per la sua realizzazione dipendono dalle numerose e differenziate qualità e condizioni dei singoli siti archeologici nonché, e forse soprattutto, dai loro contenuti.*

*Appare infatti evidente la giustificazione di proteggere mediante opportuna copertura quei complessi architettonici ricchi di contenuti artistici, decorativi o di arredo allo scopo di mantenerli nel loro contesto ambientale e nel loro reciproco rapporto; mentre potrebbe apparire ingiustificato proteggere con coperture delle strutture murarie per se stesse solide e proteg-gibili con metodi che non ne alterino l'immagine. Torna invece giustificata ancora la copertura protettiva di complessi archeologici di sole strutture murarie qualora queste fossero di materiali fragili e facilmente deteriorabili. Ai vari possibili "perché" che possono giustificare o meno l'opportunità dell'adozione di coperture protettive dei siti archeologici seguono i vari possibili "come" di tali coperture [...].».*

Minissi propose quindi una classificazione delle coperture basata sia sulla funzionalità, che sulla loro conformazione, distinguendo quattro tipologie possibili:

- coperture provvisorie;
- coperture unitarie di interi complessi archeologici che fungano da contenitori museali, autonome rispetto ai resti antichi;
- coperture che ricompongono arbitrariamente spazi e volumi di pura invenzione, ma in contraddizione con l'originaria planimetria del complesso;
- coperture che ripropongono su basi filologiche le forme e i volumi originali, resi con materiali moderni, distinguibili rispetto agli antichi e integralmente reversibili.

L'archeologo Giorgio Gullini, invece, distingue le coperture in tre tipologie:

- coperture filologiche sia nella forma che nei materiali;
- coperture che imitano la forma e i volumi delle coperture originarie ma impiegano materiali differenti;

- coperture del tutto indipendenti dal contesto di riferimento.

Nel 1988, fuori dall'Italia dobbiamo ad Hartwig Schimdt la pubblicazione del trattato *Schutzbauten* (Schimdt, 1986) che illustra un campione significativo di coperture architettoniche esistenti su scavi archeologici sia in Occidente che nel Vicino Oriente. Schimdt suddivide le strutture di protezione in quattro classi tipologiche principali, alle quali fanno riferimento numerosi casi studio:

- coperture provvisorie;
- tettoie, che possono a loro volta suddividersi in tre sottocategorie, basate sull'oggetto da salvaguardare: possono confrontarsi con un singolo oggetto, con un intero complesso di ritrovamenti oppure con un'intera area di scavo.
- chiusure, che vengono invece distinte in strutture di protezione su murature preesistenti, strutture a capannone che racchiudono completamente la rovina all'interno di un unico grande spazio, strutture di protezione chiuse su scavi sotterranei;
- cripte, ambienti sotterranei, ricavati al di sotto dello spazio pubblico o nei piani interrati di edifici di nuova costruzione (Tricoli, 2011).

La Demas e altri studiosi intervenuti al Convegno in Arizona del 2001, organizzato dal *US/ICOMOS* in cooperazione con *US National Park Service* e il *The Getty Conservation Institute*, intitolato "Protective shelters for archaeological sites in the southwest Usa", mettono in evidenza la mancanza di note critiche sulla funzionalità delle coperture a distanza di tempo ed anche l'assenza di pubblicazioni specifiche riguardanti la definizione di linee guida alla progettazione di *shelters* in rapporto alla conservazione dei resti archeologici protetti (Laurenti, 2006).

In questi ultimi anni si è assistito all'affermarsi di una nuova sensibilità verso il problema. Gli studiosi Gasparri e Santopuoli elaborano una catalogazione di esempi, basata su una ricerca bibliografica e su sopralluoghi in vari siti, con immagini fotografiche e schede tecniche contenenti i dati principali delle strutture analizzate: aspetti archeologici, architettonici e ambientali; tecnologie costruttive; materiali costituenti la struttura; tipologia di fruizione; montaggio; tipologia di fondazione; impatto ambientale. In tal modo gli autori intendono offrire agli operatori del settore una guida operativa che illustri le principali categorie e tipologie di copertura.

Pur nella difficoltà di progettazione su canoni prestabiliti e pur nella necessità di ricercare una soluzione puntuale ai problemi specifici di ogni sito, gli studiosi Guidobaldi e Scoppola indicano alcuni criteri essenziali per distinguere le diverse tipologie di ripari, classificati in base:

- al posizionamento degli appoggi, interni o esterni all'area di scavo, al manufatto antico o ai resti delle murature e direttamente poggianti sulle pavimentazioni;
- alla forma del riparo visto dall'esterno, che può suggerire o meno la volumetria del monumento, o quantomeno la sua distribuzione planimetrica;
- alla forma del riparo vista dall'interno, che può o meno suggerire spazi, dimensioni e fonti luminose dell'ambiente antico nella sua interezza;
- al genere di riparo: a semplice tettoia, con ripari verticali (conservazione in spazio semiconfinato),

con chiusure su ogni lato (conservazione in spazio confinato);

- all'aspetto delle nuove opere e delle tecnologie costruttive adottate, che possono essere realizzate con tecniche tradizionali o locali o con tecniche innovative e diverse da quelle delle costruzioni antiche e dell'ambiente circostante;

- alla natura delle superfici con le quali la struttura protettiva è costituita, che possono essere trasparenti o opache;

- al peso e alla facilità di montaggio e smontaggio;

- alle alterazioni delle strutture antiche richieste per l'installazione;

- ai sistemi di raccolta, canalizzazione e irraggimentazione delle acque meteoriche;

- ai sistemi costruttivi impiegati, se modulari prefabbricati o formati espressamente in loco;

- al ritmo delle nuove strutture che può prescindere o meno da quello del manufatto da proteggere.

Guidobaldi e Scoppola concludono auspicando che la committenza e le autorità di vigilanza esprimano voti o diano prescrizioni a proposito di tali tipologie in ogni caso concreto (Ruggieri & Sposito).

Nel 2004, Alberto Sposito, nel volume *Coprire l'Antico*, propone alcune buone pratiche per le chiusure di protezione, tra le quali: il legame con il contesto, il minimo impatto ambientale ed archeologico, la massima debolezza semantica rispetto alle preesistenze, la reversibilità e la facilità di manutenzione (Sposito, 2004). In una recente serie di studi, Cesare Sposito riepiloga le caratteristiche tecnologiche generali delle coperture stabilite dalle norme *UNI* e individua alcune tipologie per l'intervento di protezione dei siti archeologici, chiarendone anche i requisiti. Egli individua due livelli di classificazione. Il primo distingue le tipologie primarie in strutture di protezione provvisoria e definitiva. Il secondo livello, sulla base della natura formale e architettonica, distingue i sistemi di protezione in:

- indifferenti alla preesistenza;

- con riconfigurazione parziale altimetrica;

- con riconfigurazione parziale planimetrica;

- con riconfigurazione totale;

- con riconfigurazione e ricostruzione parziale;

- con riconfigurazione e ricostruzione totale (Tricoli, 2011).

L'*Istituto Centrale per il Restauro (ISCR)*<sup>1</sup> ha avviato, già da alcuni anni, diversi studi nel campo della conservazione delle aree archeologiche, sia sperimentando metodi e materiali per il consolidamento *in situ* e la conservazione dei manufatti e delle strutture, sia avviando uno studio sistematico per la realizzazione di strutture di protezione di aree archeologiche. La ricerca ha riguardato la caratterizzazione dei materiali protettivi, in relazione anche alle condizioni climatico-ambientali da predisporre a contatto con le strutture antiche per la loro protezione temporanea e la progettazione di coperture architettoniche. La ricerca dell'*ISCR*, iniziata sul sito della *Domus dei Coiedii*, presso Castelleone di Suasa, dove è stata installata una copertura ed è stato impostato uno studio metodologico relativo alle condizioni climatico-ambientali e ai materiali, ha trovato occasione di sviluppo in un contesto di ricerca più ampio, reso possibile da una *partnership* con l'*ENEA*.

Si tratta in questo caso di un progetto molto articolato avente come tema lo sviluppo di una metodologia finalizzata alla progettazione di coperture di protezione in ambito archeologico; l'obiettivo è quello di fornire un supporto metodologico di guida alla progettazione delle coperture. Il titolo del progetto è "tecniche di progettazione di materiali/componenti e sistemi per la conservazione e la fruizione di siti archeologici - museo aperto. Dal rilevamento schedografico su monumenti con coperture architettoniche di protezione sono stati ottenuti dati statistici utilizzabili per ottenere, ad esempio, la distribuzione dei monumenti con coperture sul territorio nazionale, la percentuale di strutture temporanee e la diffusione di alcuni materiali.

I dati, relativi a 381 monumenti archeologici, 120 dei quali caratterizzati dalla presenza di tettoie protettive, sono stati immessi in un *Sistema Informativo Territoriale (SIT)*, *Carta del Rischio del patrimonio culturale*, progettata e portata avanti dagli inizi degli anni '90 dall'ICR. Le *Carte del Rischio* prevedono, secondo parametri tecnici, tecnologici, materici e volumetrici, una classificazione attraverso la realizzazione di una banca dati informatica. Attraverso tale metodologia è possibile attribuire a un certo monumento o area archeologica una sua specifica vulnerabilità collegabile alla pericolosità del territorio in cui il bene è situato; si ottiene così un quadro complessivo della condizione di rischio a cui il monumento è esposto. In tal modo il sistema, implementabile ed aggiornabile, contribuisce al "monitoraggio conservativo" del patrimonio e facilita la programmazione degli interventi sulla base delle priorità individuate.

La selezione dei monumenti, avvenuta sulla base delle indicazioni fornite dalle Soprintendenze archeologiche, ha tenuto conto delle differenti caratteristiche delle tettoie e delle specificità dei siti: localizzazione geografica, tipologia delle tettoie provvisorie/definitive, materiali utilizzati, morfologia dell'area archeologica. In relazione alle attività di schedatura, è stata messa a punto e verificata una nuova sezione all'interno della scheda *Monumento e Complesso Archeologico (MA)*, dedicata al rilevamento dei dati delle coperture attraverso l'analisi degli elementi costruttivi al fine di ottenere una casistica più ampia possibile sulla tipologia delle coperture archeologiche presenti in Italia. L'analisi ha consentito di valutare l'efficienza e l'adeguatezza della copertura: l'efficienza è correlata alle caratteristiche costruttive, l'adeguatezza è correlata allo stato di conservazione dei resti archeologici protetti (Laurenti, 2006).

Una griglia tipologica sugli interventi per la valorizzazione e la protezione dei siti archeologici messa a punto in Italia è quella di Maria Clara Ruggieri Tricoli e Rosa Maria Zito, che prendono le mosse dagli studi di Schimdt e Stubbs. Le studiose presentano una casistica delle possibilità che possono presentarsi nel campo del processo di conoscenza, conservazione e valorizzazione dei siti archeologici e identificano trentaquattro tipologie (Tricoli, 2011) che, specie in presenza di siti o parchi archeologici di una certa complessità, possono essere utilizzate contemporaneamente. Tra le tipologie analizzate vi sono: rovine coperte con "tettoie", provvisorie o meno; rovine coperte con edifici di chiusura parziale, pressochè totale, o totale, non riconfigurativa, allusiva o evocativa, più o meno riconfigurativa; rovine

chiuse in edifici museali; rovine incorporate in altre strutture, storiche o moderne, ecc. Per ognuna di tali tipologie vengono illustrate le caratteristiche e citati i casi emblematici. Le studiose concludono evidenziando come la maggior parte delle tipologie di intervento individuate costituiscano un' interessante occasione progettuale, sia per interventi propriamente architettonici, sia per interventi di recupero, sia per interventi di musealizzazione di vario genere e sottolineano l'importanza della formazione di una specifica competenza in questo vasto e difficile campo di ricerca (Ruggieri & Zito, 2007).

### Note

1) L'ISCR è un organo tecnico, dotato di autonomia speciale, del *Ministero per i Beni e le Attività Culturali*, specializzato nel campo del restauro e della conservazione del patrimonio culturale, fondato nel 1939, su progetto di Giulio Carlo Argan e Cesare Brandi per rispondere all'esigenza di impostare l'attività di restauro su basi scientifiche e di unificare le metodologie di intervento sulle opere d'arte e i reperti archeologici.

### Riferimenti bibliografici

- Laurenti, M. C. 2006. *Le coperture delle aree archeologiche. Museo aperto*, Roma, Gangemi, pp. 78-91.
- Minissi, F. 1987. *Perché e come proteggere i siti archeologici*, in "Restauro", n.90, pp. 78-85.
- Minissi, F. 1985. *Ipotesi di impiego di coperture metalliche a protezione di zone archeologiche*, Restauro, 81, 27-31.
- Palmerio, G., Di Muzio, A. 2007. *Strutture protettive in archeologia*, "Restauro architettonico e impianti" (Carbonara, G., a cura di) IX, Torino, Utet, pp. 402-487.
- Ruggieri Tricoli, M. C., Sposito, C. 2004. *I siti archeologici. Dalla definizione del valore alla protezione della materia*, Palermo, Flaccovio, p. 90.
- Ruggieri Tricoli, M. C. 2007. *Musei sulle rovine. Architetture nel contesto archeologico*, Milano, Lybra Immagine, pp. 51-53, 63, 69-70, 218-220, 248.
- Ruggieri Tricoli, M. C., Zito, R. M. 2007. *Conservare e valorizzare i siti archeologici: una griglia tipologica* in "Agathón 2006", Palermo, Offset Studio, pp. 17-22.
- Schmidt, H. 1988. *Schutzbauten*, Stuttgart, Theiss, pp. 48-51.
- Sposito, A. 2004. *Coprire l'Antico*, Palermo, Flaccovio.
- Stanley Price, N. (a cura di), traduzione di Nardi, L. 1986. *La conservazione sullo scavo archeologico. Con particolare riferimento all'area Mediterranea*, Roma, ICCROM.
- Tricoli, A. 2011. *La città nascosta*, Monografie di Agathón, 2, Palermo, Offset Studio, pp. 119-127.

## CAPITOLO 2

### Requisiti delle coperture su aree archeologiche

#### 2.0. Abstract

##### Requirements for covering structures on archaeological sites

*The main purpose of covering structures on archaeological sites is as protection from degradation resulting mainly from the action of various environmental factors. Covering structures ought to be able to reduce this action and to prevent and limit harmful effects, without necessarily eliminating the root causes of the degradation process. Effective protective/preventive action and control of the degradation process will be obtained if, and only if, the covering structure is properly designed, built, maintained and used. If even one of the four components is lacking, the benefits from the action may be reduced. When this happens, the protective action can turn into its contrary and the covering structure may cause accelerated damage. The construction of covering structures in archaeological areas has to consider multiple factors; it must meet needs related to the protection of the finds as well as their proper use, and it must ensure a high level of quality and an adequate system of requirements. The user's needs and those of the finds, and the consequent development of specific requirements for the covering structures, may provide guidance for the actual design. This chapter focuses on the needs of the archaeological items and the requirements of the covering structures, whilst referring specifically to the use of glass. Users' needs and the consequent additional requirements for the covering structures are also analyzed.*

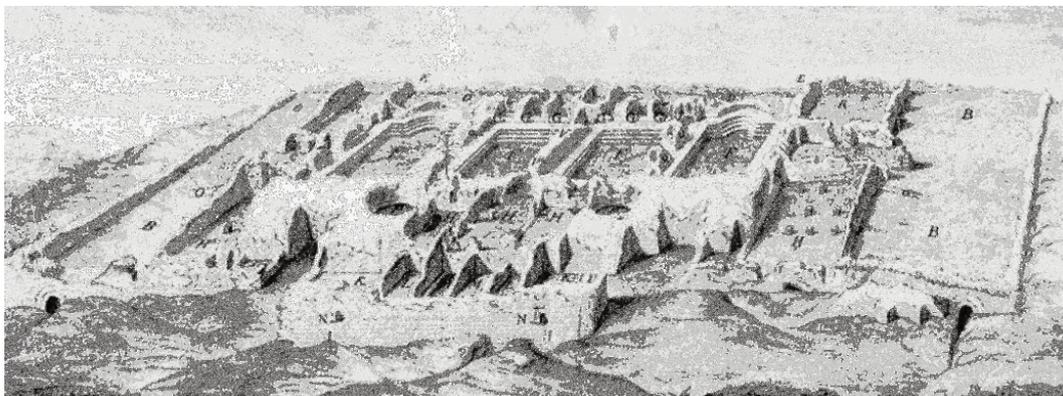


Fig. 1 - Allianz Nepomuk Amann, J. 1788. *Rudera Thermarum Romanorum Badenvilae*, "Historia Nigrae Silvae", 2.

## 2.1. Esigenze, qualità e requisiti

I manufatti archeologici si presentano come un insieme di parti ed elementi significativamente diversi rispetto alla loro originaria configurazione, a cui viene riconosciuto il valore di documento storico, da conservare nella sua costituzione e consistenza materica (Bellomo, 1999). La conservazione *in situ* del patrimonio archeologico implica una serie di opere concepite in modo da considerare contemporaneamente più fattori, quali l'esigenza di conservare il manufatto e la fruibilità dello stesso. Un nodo centrale della questione è costituito dalle coperture, di cui i vecchi manufatti sono quasi sempre privi. La copertura di uno scavo archeologico ha l'intento principale di proteggere un determinato sito e i reperti in esso contenuti dall'azione di degrado esercitata prevalentemente dai fattori ambientali. Essa, anche senza eliminare alla radice le cause del processo di degrado, deve essere in grado di attenuarne l'azione e di esplicitare un'accettabile funzione di prevenzione e di limitazione degli effetti dannosi. Un'azione protettiva/preventiva efficace e il controllo del processo di degrado si ottengono se, e soltanto se, la copertura è correttamente progettata, realizzata, mantenuta ed utilizzata. Se anche uno solo dei quattro punti indicati è carente, il beneficio dell'azione può venire a mancare. Quando questo accade, l'azione protettiva si può trasformare nell'azione contraria e la copertura può diventare un sistema di invecchiamento accelerato (Laurenti, 2006). Le protezioni possono essere distinte tra temporanee e permanenti, anche se ogni intervento richiede manutenzioni e rifacimenti periodici e ogni soluzione provvisoria viene utilizzata per un periodo spesso superiore al previsto (Sposito, 2004). La realizzazione di una copertura in area archeologica deve soddisfare delle esigenze che riguardano sia la protezione dei reperti che la loro adeguata fruizione e deve garantire un elevato grado di qualità correlabile ad un sistema di requisiti da soddisfare, adeguatamente e specificamente definito. Interventi inadeguati o inaffidabili, per la scelta di materiali e di tecniche, finiscono con il compromettere nel tempo i manufatti (Sposito, 2004).

### 2.1.1. Esigenze per i reperti e requisiti delle coperture

Hartwig Schimdt nel suo trattato *Schutzbauten* (Schimdt, 1988) elenca i tre aspetti di una chiusura protettiva per siti archeologici che unitamente concorrono al risultato finale. Essi sono:

- *funzionalità*: protezione dagli agenti atmosferici, corretta climatizzazione, stabilità, sicurezza, ecc.
- *forma architettonica* adatta alla particolare conformazione delle rovine e che costituisca un oggetto chiaramente distinto dalle preesistenze;
- *legame con il contesto* che prevede il rispetto della situazione topografica e delle qualità storiche ed ambientali del sito di intervento (Tricoli, 2011).

La conservazione ha come obiettivo principale quello di proteggere dall'azione di degrado, soddisfacendo le seguenti *esigenze primarie*:

- *durata dei materiali e del sistema costruttivo*;
- *protezione dagli agenti atmosferici*;

- *resistenza e protezione dagli sbalzi termici;*
- *controllo e stabilizzazione del microclima interno* (temperatura, ventilazione) per il benessere della materia;
- *protezione dalle attività antropiche.*

I *requisiti* fondamentali per le coperture definitive, relativi alla conservazione dei reperti sono:

1. *leggerezza e trasportabilità* per il montaggio anche in zone difficilmente raggiungibili;
2. *semplicità e rapidità di montaggio e smontaggio* per lo spostamento della struttura;
3. *non invasività* nei confronti del sito e assoluta *reversibilità* delle azioni compiute per il montaggio;
4. *riduzione dell'impatto archeologico*: il collegamento a terra non deve interferire con le preesistenze o danneggiare saggi di terreno e strutture non ancora indagate; i sistemi di appoggio devono essere non invasivi e il più possibile limitati; il sistema di protezione facilmente riconoscibile;
5. *manutenibilità*: il sistema di protezione deve essere facilmente sottoposto a manutenzione programmata;
6. *flessibilità e adattabilità*, che permettono di integrare, modificare, rinnovare, spostare, a seconda delle necessità poste dal procedere dei lavori di scavo, dei quali spesso non è possibile preventivare a priori lo sviluppo definitivo;
7. *adeguata illuminazione naturale*, da valutare caso per caso;
8. *protezione dai fattori atmosferici e ambientali* e condizioni microclimatiche adeguate;
9. *protezione dall'intrusione* (Ruggieri & Sposito, 2004).

Riprendendo i punti precedentemente elencati e riferendoli all'utilizzo del vetro per le coperture di siti archeologici, possiamo affermare che:

1. il vetro è un materiale non suscettibile al deterioramento e relativamente leggero (peso specifico di circa 2500 Kg/m<sup>3</sup> che corrisponde, nel caso dei vetri piani, a una massa di 2,5 kg per ogni m<sup>2</sup> e per ogni mm di spessore), considerando la sua notevole resistenza a compressione (circa 10000 Kg/cm<sup>2</sup>) notevolmente superiore a quella del calcestruzzo (200 - 500 kg/cm<sup>2</sup>), che permette di utilizzarlo in lastre sottili. Inoltre, per possibilità di fabbricazione, le lastre di vetro float hanno dimensioni massime eseguibili di m 6 x 3,21, con conseguente trasportabilità. Per la posa in opera di grandi lastre sono necessarie cinghie, pinze e ventose conformi e adatte al tipo di prodotto, alla sua forma e al suo peso;
2. i vetri possono essere assemblati con semplicità e rapidità di montaggio e smontaggio grazie all'utilizzo di sistemi di ancoraggio a secco con elementi prefabbricati;
3. si tratta di un materiale trasparente e non invasivo che permette la reversibilità dell'intervento. Da verificare l'invasività del supporto;
4. riguardo la riduzione dell'impatto archeologico, i progressi tecnologici permettono oggi di realizzare strutture con grandi luci caratterizzate da sistemi di appoggio non invasivi e il più possibile limitati come numero; si tratta inoltre di un materiale che permette di rispettare le esigenze di riconoscibilità dell'intervento;
5. il vetro è un materiale inerte, che non produce reazioni chimiche con altri elementi con cui viene a contatto. Un sistema di protezione in vetro può essere facilmente sottoposto a manu-

tenzione programmata (pulizia periodica delle lastre, controllo dei sistemi di ancoraggio, ecc.);

6. in genere l'utilizzo di elementi in vetro replicabili permette di avere la massima flessibilità e adattabilità; le tecniche di produzione sono state molto affinate nel tempo e ogni nuova tecnologia che viene applicata si innesta su uno scheletro tecnico già molto solido ma altrettanto flessibile, in grado di adattarsi e modificarsi per accoglierla;

7. per quanto riguarda l'illuminazione naturale, il passaggio di luce è di difficile controllo, in quanto strettamente dipendente dalle condizioni esterne. In questi ultimi anni la ricerca di prodotti che possono deviare la luce solare all'interno degli spazi ha portato alla nascita di numerose soluzioni, tra le quali: vetri con elementi ottici riflettenti e rifrangenti; vetrocamera che incorporano lamelle riflettenti, prismi regolabili, ecc.; vetri con pellicole selettive secondo l'angolo di incidenza; pellicole dicroiche, ecc. (Sinopoli & Tatano, 2002). Altri tipi di vetro che permettono di variare la trasmissione luminosa, al momento allo stato di prototipo sono i vetri fotocromici, termocromici ed elettrocromici. Un'opportunità di regolazione della luce può essere costituita dall'utilizzo di sistemi di oscuramento, quali tende regolate automaticamente, griglie oscuranti, ecc;

8. per quanto riguarda i fattori atmosferici e ambientali, il vetro offre una discreta protezione: un buon sistema di smaltimento delle acque protegge dall'azione diretta delle acque meteoriche; occorre però salvaguardare il bene dalla formazione di condensa e dall'effetto serra e dare la possibilità di regolare il passaggio dell'aria; il controllo microclimatico necessita di un attento studio poiché una progettazione non adeguata potrebbe provocare danni ai reperti;

9. grazie all'uso del vetro, i manufatti possono essere visibili dall'esterno senza pericolo di intrusioni e vandalismi (vetro stratificato, vetro antisfondamento, ecc.), anche nelle ore notturne.



Fig. 2 - Copertura in vetro dei Resti delle Terme romane di Badenweiler, Germania. Progetto di Schlaich Bergemann und Partner, Stuttgart, 2001 (foto Lanza Volpe, A.).

### 2.1.2. Esigenze per i fruitori e requisiti delle coperture

La fruizione di un bene culturale è momento indispensabile per la sua valorizzazione. Le *esigenze per i fruitori* sono: *sicurezza*, ovvero l'insieme delle condizioni relative all'incolumità pubblica degli utenti, con particolare riferimento alle utenze deboli, quali i disabili, i bambini e gli anziani; *benessere*; *riduzione dell'impatto ambientale e archeologico*, in modo che la struttura non sia vissuta come un corpo estraneo deturpante e fastidioso alla fruizione e nella percezione; *cultura*: la struttura deve coinvolgere i visitatori, permettendo la visibilità delle opere di scavo, per diventare evento culturale. Maria Clara Ruggieri distingue quattro gradi crescenti d'integrazione del sito archeologico nella progressione della sua comprensibilità e fruibilità, ottenibili attraverso precise operazioni e appositi dispositivi tecnici:

1. la *conservazione*, conseguibile attraverso interventi di restauro, manutenzione, protezione temporanea e recinzione, ma anche attraverso il rinterro;
2. l'*accessibilità*, che rispetto al livello precedente prevede la messa in sicurezza, la realizzazione di accessi e percorsi interni, la programmazione di attività di visita, l'illuminazione artificiale del sito;
3. la *presentazione* che prevede anche servizi aggiuntivi, pannelli esplicativi, illuminazione artistica, ecc.
4. la *musealizzazione* che prevede l'istituzione di un vero e proprio museo, con attività didattiche, strutture di ricerca, eventuali rievocazioni storiche, un *visitor center*, una gestione finanziaria e promozionale, mezzi complessi di comunicazione museale, ecc.

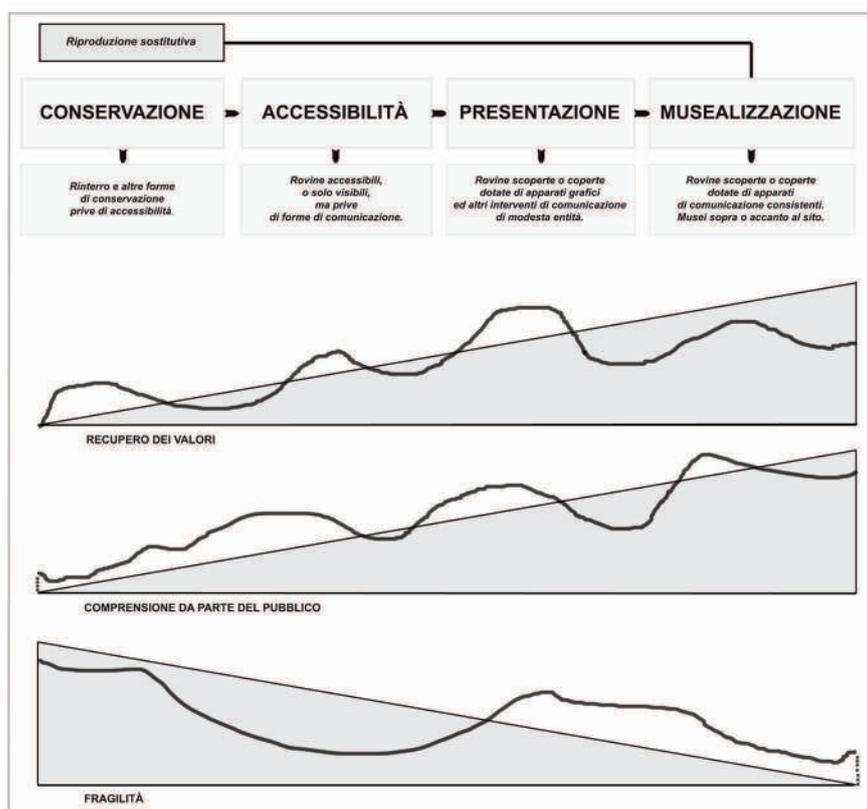


Fig. 3 - Schematizzazione dei gradi d'integrazione del sito archeologico (Ruggieri, M. C.).

Ogni grado della scala comprende e integra quelli precedenti: in generale un sito musealizzato è anche conservato, accessibile e presentato. Bisognerebbe anche essere consapevoli in partenza a quale livello di fruizione si voglia arrivare attraverso il processo di valorizzazione, valutando la possibilità di presentare i ritrovamenti meno importanti o per i quali si vuole prevedere un'integrazione più leggera e spontanea col tessuto urbano e invece musealizzare solo i siti archeologici di alto valore storico, documentario e monumentale. Nella pubblicazione di Alberto Sposito, *Coprire l'Antico*, Giuseppe De Giovanni espone requisiti, parametri e indicatori per una fruizione di qualità (Ruggieri & Sposito, 2004). Il progetto di fruizione deve essere specifico, ossia diretto ad ogni singolo sito, ripetibile nel metodo, ma diverso nella struttura a seconda del sito. Possiamo suddividere i *requisiti dovuti a esigenze di fruizione* in classi:

1. accessibilità
2. visitabilità
3. adattabilità
4. comunicabilità
5. usabilità
6. temporaneità
7. controllabilità

1. L'*accessibilità* è il punto di partenza di ogni progetto di fruizione; essa può essere:

1.1 *materiale o fisica*: grazie a strutture adeguatamente progettate. Parametri qualitativi essenziali sono:

- *raggiungibilità*: concerne la possibilità fisica di arrivare e di spostarsi autonomamente nell'area del sito;

- *mobilità*: si riferisce al fruire liberamente dei percorsi culturali, dei servizi annessi e degli spazi espositivi del sito;

- *pedonabilità/carrabilità*: esamina la possibilità di fruire il sito con percorsi pedonabili relativi agli itinerari culturali, museali, archeologici e con percorsi carrabili relativi alle strade di accesso al sito e a quelle di servizio utilizzate temporaneamente dai mezzi delle imprese di restauro o manutenzione.

- *sicurezza*: ovvero l'insieme delle condizioni relative all'incolumità pubblica degli utenti, con particolare riferimento alle utenze deboli, quali i disabili, i bambini e gli anziani;

- *comfort ambientale*: in modo da soddisfare i requisiti di benessere (termo - igrometrico, visivo, acustico, ecc.) del fruitore;

- *arredi e servizi*: la loro presenza è indispensabile sia per l'espletamento delle normali attività gestionali del sito sia per rendere accogliente, completa e confortevole la visita;

1.2 *immateriale o culturale*: di tipo didattico – informativo, vale a dire la possibilità che ha un fruitore di intendere bene la storia, il senso e il valore del sito nel suo insieme e nelle sue parti. Essa è connotata da quattro parametri:

- *leggibilità*: percepita come la facilità di comprensione del valore materiale, storico e

culturale di un sito archeologico e come facilità di lettura della morfologia, della tipologia e delle sue stratificazioni storiche;

- *panoramicità*;
- *presenza di itinerari predefiniti*;
- *presenza di musei*.

1.3 *economica*: possibilità di poter pagare un biglietto d'ingresso al bene che rispecchi i servizi offerti e risponda alle aspettative attese;

1.4 *non assoluta o totale*: alcune parti del bene possono non essere fruibili quando le caratteristiche morfologiche non lo consentono;

1.5 *sostenibile*: quando il rischio antropico, dato dai flussi turistici, diviene minimo e non si verificano furti e vandalismi.

2. la *visitabilità* è un più ridotto grado di fruibilità dello spazio che limita l'accessibilità ad alcune parti del sito dove si può garantire un buon grado di mobilità. Più genericamente si intende l'apertura al pubblico di un'area di interesse culturale per i fruitori.

3. l'*adattabilità* può essere definita come un'accessibilità potenziale. Riguarda la possibilità di garantire in futuro la completa accessibilità attraverso modifiche non sostanziali.

4. la *comunicabilità* indica il superamento delle barriere culturali e delle differenze linguistiche che potrebbero creare difficoltà per alcuni fruitori.

5. l'*usabilità* esprime l'efficacia di uno strumento ad assolvere il compito per cui è stato progettato. Riferita a un sito archeologico, essa riguarda tutto ciò di cui esso è composto: i contenuti storico – culturali e la loro organizzazione, la forma, le tecnologie impiegate, la facilità di reperimento di ciò che è necessario, il tipo di fruitore considerato, la forma di comunicazione utilizzata. Per usabilità si intende, quindi, la possibilità che hanno tutti i beni culturali di essere fruiti in modo diverso e alla loro facilità di essere coinvolti in attività per la didattica, per il turismo e per la ricerca.

6. la *temporaneità* esprime il carattere di provvisorietà che devono possedere determinate strutture inserite nell'area archeologica per migliorarne nel tempo i requisiti prestazionali. Le strutture aggiunte devono anche adeguarsi ai cambiamenti funzionali (versatilità), alle reinstallazioni ed alle modifiche materiali (flessibilità).

7. la *controllabilità* risiede nella capacità di poter sempre monitorare e controllare l'affidabilità di un progetto di fruizione, affinché non perda mai la sua caratteristica di coerenza, in quanto esso dovrà essere sottoposto a continui processi di *feedback*, vista la presenza degli altri requisiti precedentemente individuati.

Riguardo le esigenze legate alla fruizione, l'uso del vetro può permettere di conser-

vare i reperti garantendo l'accessibilità materiale in condizioni di sicurezza (vetro stratificato, vetro antinfortunistico, ecc.) e in condizioni di benessere, adottando opportuni sistemi di schermatura, ventilazione o climatizzazione. Il vetro può inoltre consentire al visitatore di comprendere il significato dell'intervento (accessibilità immateriale) che potrà costituire anche un'operazione di musealizzazione. Un'attenta progettazione può inoltre garantire i caratteri sopra elencati di visitabilità, adattabilità, comunicabilità, usabilità, temporaneità e controllabilità.

Quanto analizzato evidenzia come l'individuazione dei requisiti per la qualità e la loro relativa descrizione costituisca supporto indispensabile nella pianificazione del progetto di fruizione per un sito archeologico. Il progetto di fruizione di un bene fa parte della gestione del patrimonio culturale e può essere considerato un sistema composto da livelli collegati e finalizzati al soddisfacimento di bisogni, secondo un approccio che va dall'individuazione alla valutazione, dalla flessibilità di risposta all'efficacia dell'azione, dall'esame della situazione alla misurazione dell'effetto, con azioni di retroazione che tendono al confronto, all'eventuale modifica e al miglioramento dei bisogni espressi. I livelli progettuali si caratterizzano in cinque momenti principali:

- individuazione;
- descrizione;
- verifica dello stato attuale;
- fase di avvio;
- trattamento dell'informazione.

L'*individuazione* è la fase preliminare del progetto in cui l'area archeologica viene studiata accertandone la collocazione storica, la tipologia insediativa e la morfologia del luogo. Si tratta di una prassi importante per il successivo studio dei percorsi di visita, degli accessi, delle protezioni e di quanto altro occorre alla fruizione.

La *descrizione* è il livello in cui si evidenziano i problemi che impedirebbero la libera fruizione del sito. Tale analisi fornisce tutte le informazioni che serviranno per la stesura dei requisiti qualitativi appropriati all'area oggetto di indagine.

La *verifica dello stato attuale* è una registrazione accurata delle condizioni del sito. Tale verifica va eseguita sia durante la fase iniziale sia in fase di esercizio.

Dai dati raccolti è possibile appurare l'efficacia degli interventi per la fruizione (fase iniziale) e prevedere l'*iter* di quelli indirizzati al miglioramento (fase di esercizio). Questo livello costituisce la base per tutte le operazioni di controllo e di retroazione necessarie. La *fase di avvio* è il livello in cui si mettono in relazione tutte le informazioni raccolte attraverso un opportuno sistema di archiviazione. Tale sistema individuerà per ogni requisito mancante il tipo di intervento, specificandone tempi, costi, materiali e tutte le altre voci utili a descriverlo. Tali informazioni si ottengono con un accurato monitoraggio della soddisfazione del fruitore e delle condizioni conservative del sito. La registrazione delle soluzioni attuate può costituire un *database* di modelli, cui fare riferimento in siti con problemi analoghi e per successivi interventi sullo stesso (De Giovanni, 2004).

In conclusione, l'individuazione delle esigenze dei reperti e di fruizione e l'elaborazione di un sistema di requisiti specifico per le coperture possono costituire una guida per la progettazione degli interventi di protezione su siti archeologici (Bellomo, 1999). In tali interventi di protezione devono essere riconoscibili i seguenti *tipi qualitativi*:

- la *qualità ambientale*, che va perseguita in termini di adeguato inserimento del prodotto conservativo all'interno del contesto ambientale, naturale o urbano caratterizzato da specificità storiche, culturali, formali, sociali, ecc;

- la *qualità compositiva*, che assegna valori estetico – formali agli spazi e ai volumi tali da elevare la copertura ad architettura;

- la *qualità fruitiva*, che riguarda la funzionalità e la fruizione degli spazi a tutte le utenze, con particolare riferimento alle utenze deboli (disabili, bambini e anziani), assicurando percorsi preferenziali e distribuzione di spazi relazionati alle esigenze delle utenze;

- la *qualità costruttiva, tecnica e tecnologica*, da intendersi in termini di scelta coordinata di materiali, di componenti e di sistemi costruttivi in relazione a parametri di affidabilità, di durata e di costi di manutenzione;

- la *qualità ecosistemica*, nel senso di ottimizzazione delle condizioni di benessere per le utenze, dentro e fuori gli interventi di protezione;

- la *qualità energetica*, relativa ad una corretta scelta e a un oculato utilizzo delle fonti energetiche utilizzabili, dando preferenza alle fonti rinnovabili o a quelle che comunque non abbiano effetti negativi nei confronti dell'ambiente, ed infine a quelle che, a parità di prestazioni, consentono un minor consumo energetico; la qualità impiantistica, in tal senso, può essere inglobata all'interno di quella energetica;

- la *qualità socio – economico – gestionale*, a vantaggio di una realtà sociale che richiede interventi che rispondano sempre e comunque alle sue esigenze, in rapporto alle risorse economiche disponibili.

Le qualità richieste devono essere presenti in ogni parte dell'intervento: ad esempio, il vetro è dotato di forma, svolge delle funzioni, ha una determinata composizione, ha un ruolo ecosistemico, così come possiede delle proprietà energetiche e può avere usi a scopo sociale (Alagna, 2000).

### Riferimenti bibliografici

Alagna, A. 2000. *La riqualificazione tecnologica per la qualità ambientale: l'involucro edilizio*, D.P.C.E. Università degli Studi di Palermo, pp. 25 e 43.

Bellomo, M. 1999. *Materiali e tecnologie per le coperture in aree archeologiche: una riflessione sull'argomento*, in "Tecniche edili Tradizionali", Firenze, Alinea, pp. 63-64.

De Giovanni, G. 2004. *Per una fruizione di qualità: requisiti, parametri, indicatori*, in Sposito, A. (cur.), "Coprire l'Antico", Palermo, Flaccovio, pp. 99-113.

Laurenti, M. C. 2006. *Le coperture delle aree archeologiche. Museo aperto*, Roma, Gangemi.

Ruggieri Tricoli, M. C., Sposito, C. 2004. *I siti archeologici. Dalla definizione del valore alla protezione della materia*,

Palermo, Flaccovio, pp. 10-66, 100-101, 106-107.

Schmidt, H. 1988. *Schutzbauten*, Stuttgart, Theiss.

Sinopoli, N., Tatano, V. (a cura di) 2002. *Sulle tracce dell'innovazione. Tra tecniche e architettura*, Roma, Franco-Angeli, p.180.

Sposito, A. 2004. *Coprire l'Antico*, Palermo, Flaccovio, p.131.

Sposito, A. (a cura di), 2004. *La conservazione affidabile per il patrimonio architettonico/Reliable Conservation of Architectural Heritage*, Tavola rotonda internazionale, Atti a cura di M. L. Germanà, Palermo (27-28 settembre 2002), Palermo, Flaccovio.

Tricoli, A. 2011. *La città nascosta*, Monografie di Agathón, 2, Palermo, Offset Studio.

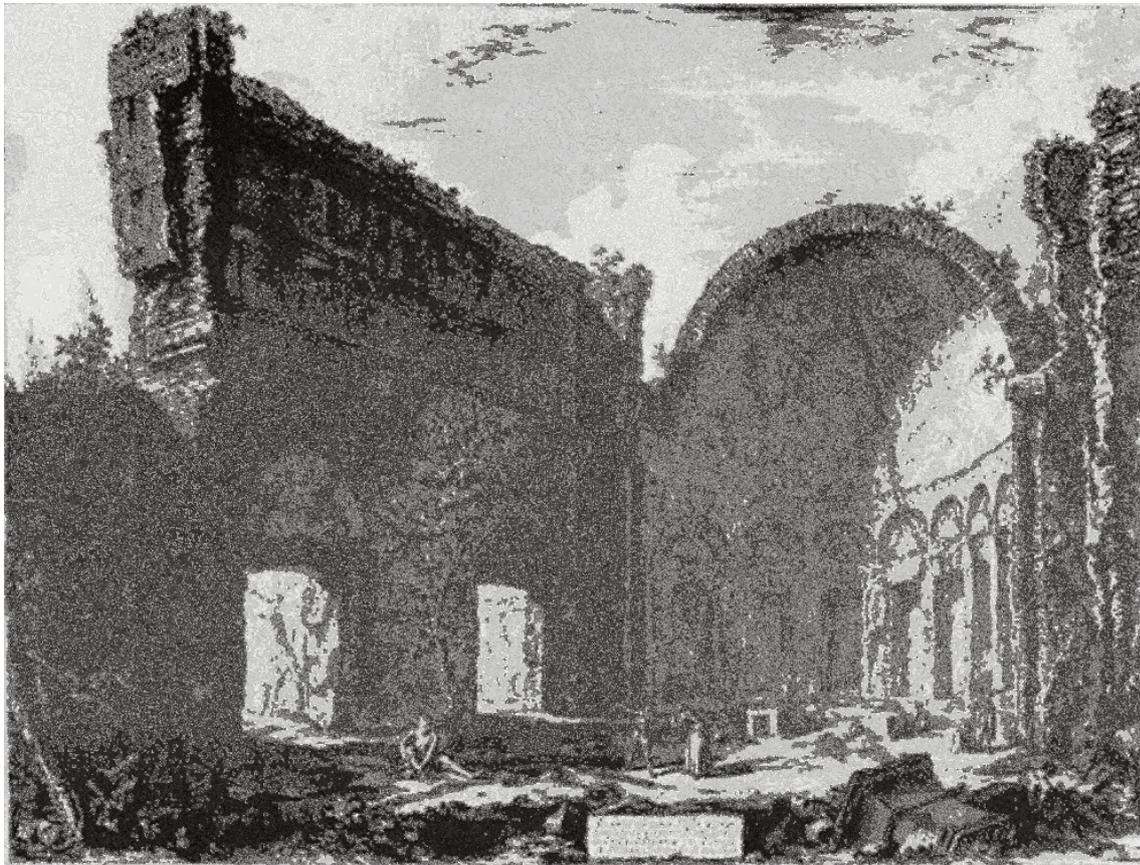


Fig. 4 - Piranesi, G. B. 1774. *Avanzi di una sala appartenente al Castro Pretorio nella Villa Adriana di Tivoli, "Vedute di Roma"*.

## CAPITOLO 3

### Analisi di coperture trasparenti realizzate su aree archeologiche

#### 3.0. Abstract

##### Analysis of transparent covering structures on archaeological sites

*In recent decades, various European archaeological sites have been employing solutions using glass, which is now widely established as a highly-esteemed, characterizing feature to be used in prestigious buildings and structures. Research was focused on analysis of these transparent covering structures. Twenty archaeological sites in Europe with covering structures built with transparent materials, comprise an index of the various covering structures constructed over the years. We proceeded to catalogue the above-mentioned covering structures, the main purpose being to increase knowledge regarding the functionality of the different types of covering structures identified by analyzing the features and checking the efficiency and adequacy on each site. Apart from exploiting bibliographical research, in order to obtain all the necessary data, contact was established with all the parties involved (designers, manufacturers of glass components and systems, enterprises, museums, superintendence, etc.) in the work on the European sites analyzed. The datasheet employed has common and specific characteristics in relation to the covering structure, with a macro division into four sections: location, history, general data and technical details, with relative descriptive information, photographs and graphic representations.*



Fig. 1 - Limestone, Dalkingen, Germania (foto Lanza Volpe, A.).

### 3.1. Schedatura delle coperture

Sono stati individuati venti siti archeologici in Europa che presentano coperture in materiali trasparenti su siti archeologici che costituiscono un repertorio esemplificativo di casi realizzati. La schedatura di tali strutture costituisce uno strumento di analisi e confronto che permetterà di pervenire a una classificazione. Gli obiettivi della schedatura proposta sono:

- costituire un quadro esaustivo delle coperture in vetro o materiali trasparenti realizzate, raccogliendo informazioni descrittive, fotografiche e di rappresentazione grafica;
- individuare parametri che riguardano le condizioni microclimatiche dei luoghi in cui le coperture sono realizzate in relazione ai materiali da proteggere;
- individuare parametri che riguardano le componenti formali e costruttive in relazione ai reperti da proteggere.

L'individuazione di parametri diversi, quali le aree geografiche, i materiali dei reperti oggetto di intervento, la tipologia di copertura realizzata e le molteplici variabili che connotano ciascun intervento, permetterà di ottenere delle classificazioni, utili a valutare l'efficacia dei materiali trasparenti impiegati per la copertura ai fini della conservazione. La scheda tipo presenta caratteristiche comuni e caratteri specifici (Danzi, 2010) a seconda del sito considerato, con una macro suddivisione in quattro paragrafi: luogo, storia, dati generali e caratteristiche tecniche. Nel paragrafo "luogo" si individuano gli interventi in relazione a: localizzazione (città, nazione), coordinate geografiche (da *Google Earth*), quota media s.l.m. (da *Google Earth*), condizioni climatiche del sito, precipitazioni annue. Nel paragrafo "storia" si descrivono gli interventi in relazione a periodo di edificazione e storia del sito, con disegni e foto storiche dei luoghi prima dell'intervento. Nel paragrafo "dati generali" si individuano progettisti, anno dell'intervento, estensione del sito archeologico, materiali sottoposti a copertura, estensione e tipo di copertura, motivazioni della realizzazione della copertura trasparente, bibliografia, climatizzazione. Nel paragrafo "caratteristiche tecniche" si individuano gli interventi in relazione a struttura portante della copertura e materiali impiegati. La descrizione delle strutture è effettuata a partire dal sistema di attacco al suolo o alle strutture esistenti fino ai materiali di copertura, con disegni di progetto, dettagli costruttivi, sezioni tipo, immagini fotografiche degli elementi e della realizzazione complessiva, ecc. Al fine di reperire tutti i dati necessari, oltre ad effettuare ricerche su web, testi, riviste specializzate, atti di convegni, ecc., sono stati contattati progettisti, ditte produttrici di componenti e sistemi vetrati, imprese, amministrazioni dei musei, sovrintendenze, ecc. dei siti analizzati. Articoli e testi relativi ai singoli casi sono riportati nella bibliografia all'interno delle schede. I testi di interesse generale sono riportati nella bibliografia generale.

#### Riferimenti bibliografici

Danzi, E. 2010. *Coperture. Metodologie di indagine. La schedatura delle coperture archeologiche: alcune riflessioni sull'impostazione metodologica del progetto*, "Archeologia e contemporaneo" (a cura di Indrigo, A., Pedersoli, A.), IUAV Giornale dell'Università, 81, Venezia, Grafiche veneziane, p. 8.

Francia

1. ABILLY (Indre-et-Loire) – *Sito neolitico Petit – Paulmy* (1992)

Germania

2. BADENWEILER (Baden-Württemberg) – *Antiche terme romane di Badenweiler* (2001)
3. DALKINGEN (Baden-Württemberg) – *Ruderi della porta romana Limestor a Dalkingen* (2010)

Grecia

4. ATENE (Attica) – *Resti archeologici presso la banca nazionale di Grecia* (2001)

Irlanda

5. KILFENORA (County Clare) – *Cappella della cattedrale di St Fachnan* (2005)

Italia

6. CIVIDATE CAMUNO (BS, Lombardia) – *Anfiteatro romano di Cividate Camuno* (2002)
7. COSENZA (Calabria) – *Resti archeologici a piazza Toscano* (2001)
8. LEGNANO (MI, Lombardia) – *Castello di Legnano* (2008)
9. NATURNO (BZ, Trentino Alto Adige) – *Castello di Juval* (1997)
10. ODERZO (TV, Veneto) – *Municipium romano di Opitergium* (1990)
11. RIMINI (Emilia Romagna) – *Domus del chirurgo a Rimini* (2007)
12. TERAMO (Abruzzo) – *Sito archeologico di piazza Sant'Anna a Teramo* (1991)
13. TORINO (Piemonte) – *Rovine della cattedrale paleocristiana di Torino* (2000)

Norvegia

14. HAMAR (Hedmark) – *Rovine della cattedrale medievale di Hamar* (1998)

Regno Unito

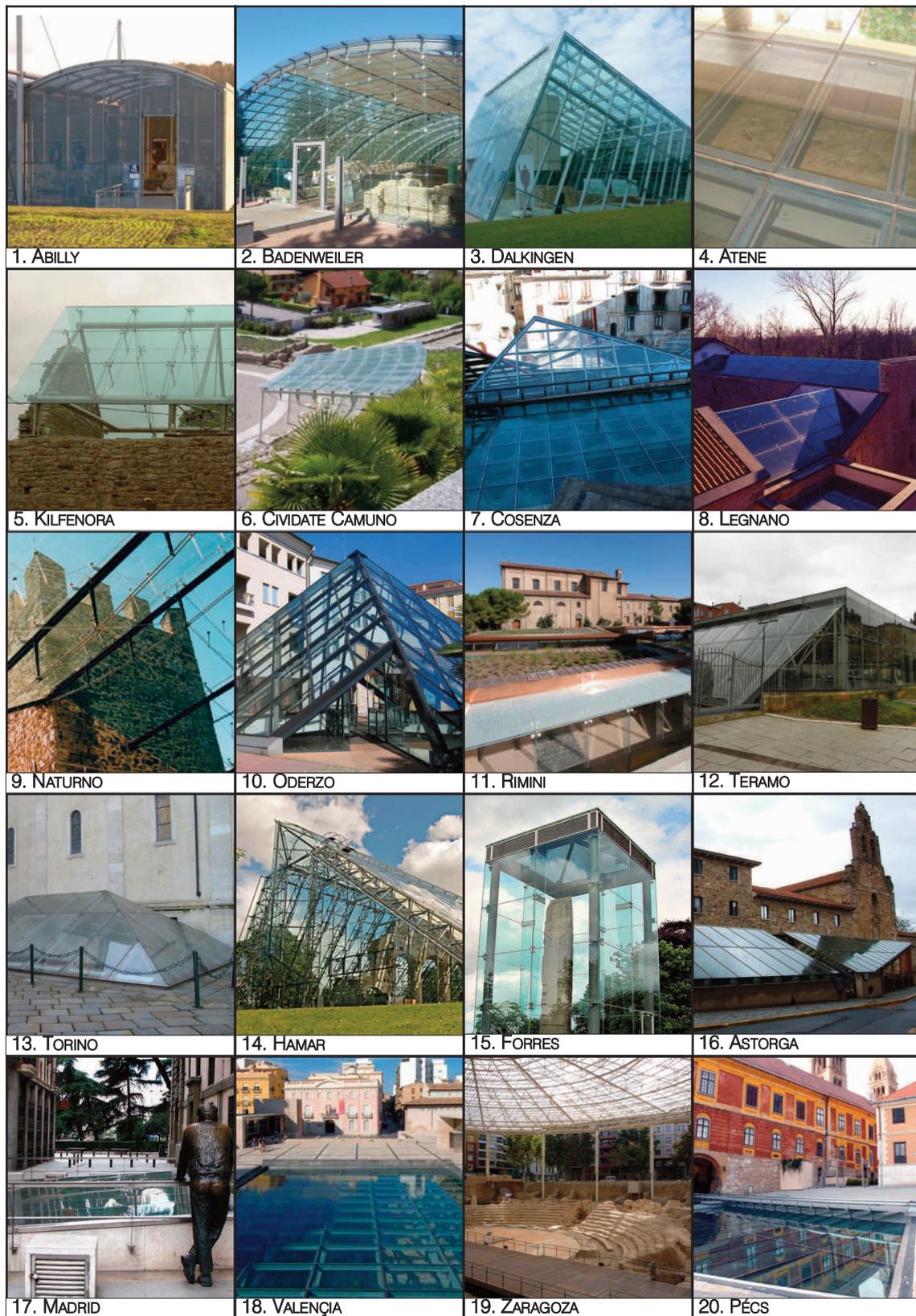
15. FORRES (Scotland, Moray) – *Sueno's Stone* (1990)

Spagna

16. ASTORGA (León) – *Domus dei mosaici dell'antica Asturica Augusta* (1990)
17. MADRID – *Resti della chiesa di Santa Maria la Real de Almudena* (2002)
18. VALENCIA (Comunidad Valenciana) – *Sito archeologico de la Almoina* (2006)
19. ZARAGOZA (Aragona) – *Rovine del teatro di Caesaraugusta* (2003)

Ungheria

20. PÉCS (Transdanubio Meridion.) – *Cella Septichora del cimitero paleocristiano di Pécs* (2006)



# 1. SITO NEOLITICO PETIT-PAULMY

## 1.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

### *Localizzazione:*

ABILLY SUR CLAISE (Indre-et-Loire), FRANCIA.

*Coordinate geografiche:* 46°56'15"N 0°44'21"E

*Quota media:* m 55 s.l.m.

### *Condizioni climatiche del sito:*

INVERNO min. 1° C max. 10° C

ESTATE min. 11° C max. 27° C

*Precipitazioni annue:* da 39 a 73 mm/mese.

## 1.2 STORIA

*Periodo di edificazione:* Età della pietra, 2800-2400 a.C.

### *Storia del sito*

Il sito archeologico Petit-Paulmy è stato scoperto alla fine del sec. XIX.

Nel 1980 una serie di sondaggi ha rivelato uno strato archeologico molto ricco. Le campagne di scavi si sono succedute dal 1981 al 1991 senza interruzioni.

Nel 1992 è stato costruito sul sito il museo *Archéolab* (Fig.3). Esso presenta i risultati degli scavi e le tecniche utilizzate dagli archeologi per ricostruire periodi storici (Figg. 2, 4), permettendo ai visitatori di comprendere come la scoperta di un sito preistorico possa arrivare a ricostruire fasi della vita dell'uomo.



Fig.1 Vista aerea dell'area con l'intervento di copertura.



Fig.2 Vista interna dell'Archeolab.



Fig.3 Vista esterna.



Fig.4 Vista interna.

# 1. SITO NEOLITICO PETIT-PAULMY

## 1.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Arch. Jean-Yves Barrier (Tours, Centre, France).

**Anno dell'intervento:** 1992.

**Estensione sito archeologico:** diverse centinaia di mq.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** pietra (resti del neolitico).

**Estensione copertura:** base m<sup>2</sup> 625.

Lunghezza m 25, larghezza m 25, altezza max circa m 5.

**Tipo di copertura:** la copertura, costituita da tre volte a botte, copre uno spazio a pianta quadrata circondato da pareti in rete metallica stirata.

**Motivazioni:** conservare i resti scoperti non interrompendo il legame tra i resti archeologici e il paesaggio circostante.

### **Bibliografia**

DOMINIQUE, M., *Le site du Petit-Paulmy à Abilly (Indre-et-Loire)*, «Un habitat du Néolithique final de la région pressignienne», Supplément à la R.A.C., FERACF, Tours.

MARQUET, J. C., *Abilly, Indre-et-Loire: le Petit Paulmy*, Persée, revue archéologique du Centre de France, vol. 26, n. 1 (1987).

**Climatizzazione:** non vi è un sistema di condizionamento poiché l'aria può circolare liberamente attraverso le pareti in rete metallica stirata. La rete metallica permette di schermare dai raggi diretti del sole pur garantendo la trasparenza (Fig.4).

## 1.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura:** struttura in acciaio con pilastri perimetrali al sito, travi e tiranti di controventatura (Figg.1, 2, 3).

**Materiali impiegati per la copertura:** acciaio, policarbonato e rete metallica.



Fig.1 Vista esterna.



Fig.2 Vista interna.



Fig.3 Vista interna.



Fig.4 Dettaglio del prospetto con la rete metallica.

## 2. ANTICHE TERME ROMANE DI BADENWEILER

### 2.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

#### **Localizzazione:**

BADENWEILER (Baden-Württemberg), GERMANIA.

**Coordinate geografiche:** 47°48'09"N 7°40'18"E

**Quota media:** m 410 s.l.m.

#### **Condizioni climatiche del sito:**

INVERNO min. -2° C max. 6° C

ESTATE min. 12° C max. 25° C

**Precipitazioni annue:** da 33 a 71 mm/mese.

### 2.2 STORIA

**Periodo di edificazione:** 75 d. C.

#### **Storia del sito**

I Romani conquistarono la zona del Reno e costruirono una città con il nome romano di *Aqua Villae* in posizione strategica sollevata sulla valle del Reno, caratterizzata da condizioni climatiche favorevoli. Attorno alle sorgenti termali di *Cassiopeia* essi costruirono, nel 75 d.C., un ampio complesso termale (Fig. 1). Le Terme erano dedicate alla dea Diana Abnoba, come suggerito dalla pietra votiva portata alla luce dagli scavi archeologici. A quel tempo il culto della dea della caccia Diana è stato unito al culto di Abnoba, la dea celtica della Foresta Nera. Il complesso termale, convertito e ampliato diverse volte nel corso della sua storia, formava il cuore della colonia romana.

Nel 1784 nel parco termale sono stati rinvenuti i resti della struttura termale, la più antica rinvenuta in Germania e la più estesa a nord delle Alpi. L'attuale edificio presenta una simmetria esatta (Fig. 3) ed è orientato su di un asse est-ovest. Costruito intorno a quattro bacini rettangolari, riceveva acqua termale direttamente dalla fonte. A est e a ovest i bacini erano preceduti da due sale utilizzate come spogliatoi, precedute da una corte coperta. Il primo bacino era circondato da quattro cabine doccia o singole vasche a incasso nelle pareti. A nord del secondo bacino si trovano gli ambienti della camera di sudorazione un tempo riscaldata da un sistema di *hypocausto* e un bacino circolare che veniva riempito con acqua fredda. Sembra che un lato dell'edificio fosse riservato agli uomini e un lato alle donne. Sul lato nord è stato trovato un tubo di drenaggio a 3,70 m di profondità che serviva per lo smaltimento dell'acqua dei bacini e delle acque piovane. Nel 260 d.C., le truppe romane lasciarono le rive del Reno e le popolazioni germaniche continuarono a usare le terme romane. Lo stabilimento termale fu abbandonato definitivamente tra l'XI e il XII secolo. Successivamente l'edificio venne utilizzato come cava per la costruzione di un castello nelle vicinanze. Dopo la scoperta nel 1784 (Fig. 2), le rovine furono danneggiate durante le guerre napoleoniche del XIX secolo a causa della trasformazione in stalle e furono ripristinate alla fine del XIX secolo. Nel 2001 è stata costruita una copertura di vetro trasparente (Fig. 4) e una mostra permanente offre un quadro della cultura balneare romana.



Fig.2 Vista dall'alto delle rovine.

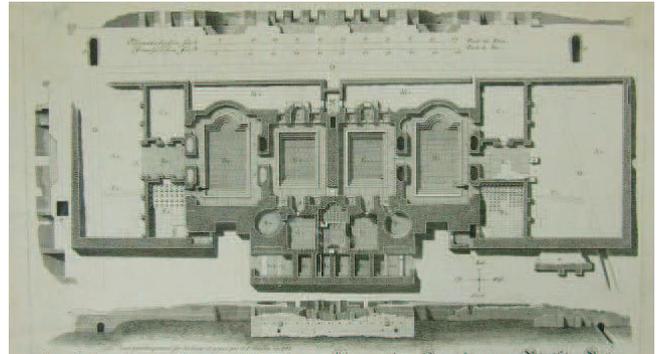


Fig.3 Pianta dei resti delle antiche terme scoperte nel 1784.

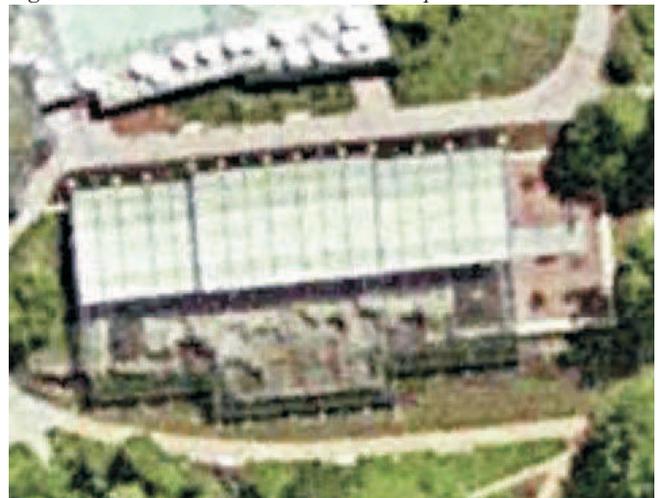


Fig.4 Vista dall'alto con l'intervento di copertura delle rovine.



Fig.1 Plastico di riconfigurazione delle antiche terme romane.

## 2. ANTICHE TERME ROMANE DI BADENWEILER

### 2.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Schlaich Bergermann und Partner, Stuttgart.

**Anno dell'intervento:** 2001.

**Estensione sito archeologico:** m<sup>2</sup> 2.760 (m 92x30).

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** resti in pietra delle antiche terme romane, rivestimenti di vasche e serbatoi composti da lastre di pietra calcarea lucida. Oggetti vari come le spazzole, i sandali di legno con spessa suola che permettevano di camminare sul terreno reso caldo dai condotti dell'aria, un rubinetto monumentale di miscelazione acqua calda e fredda in bronzo, ecc. sono racchiusi all'interno di vetrine.

**Estensione copertura:** base m<sup>2</sup> 2.500.  
Lunghezza m 67, larghezza m 40, altezza max m 9.  
Superficie vetrata m<sup>2</sup> 3.150.

**Tipo di copertura:** volta a botte in vetro e acciaio, longitudinalmente divisa in tre parti con la parte centrale più alta di quelle laterali.

**Motivazioni:** l'obiettivo è stato quello di ottenere una struttura leggera e trasparente per proteggere le rovine dagli agenti atmosferici.

#### Bibliografia

SCHLAICH, J., SCHOBER, H., *Design principles of glass roofs*, «Lightweight structures in civil engineering», proceedings of the international symposium, Warsaw, Poland, 24-28 June 2002.

SCHOBER, H., GERBER, H., SCHNEIDER, J., *Ein Glashaus für die Therme in Badenweiler*, «Stahlbau», v. 73, n. 11 (November 2004), pp. 886-892.

SCHOBER, H., GUGELER, J., *Glasdach über der römischen Badruine in Badenweiler*, «Glas», 1/2002, pp. 29-35.



Fig.1 L'ingresso e la copertura delle rovine.



Fig.2 Vista dall'alto dell'intervento.

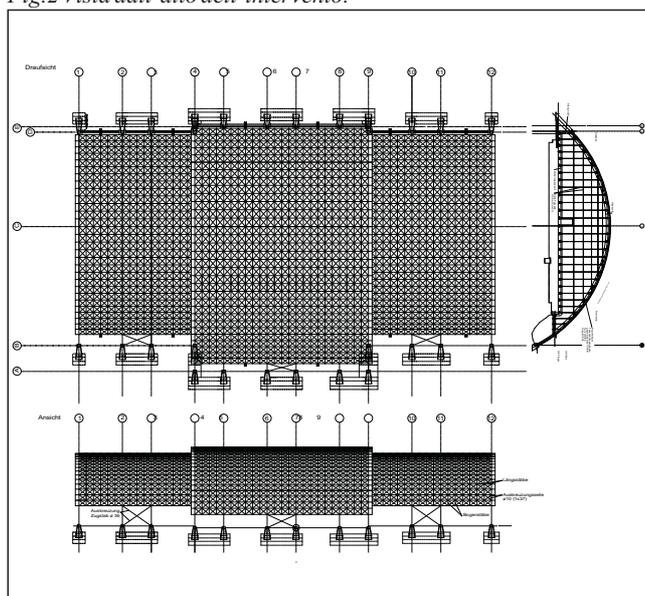


Fig.3 Pianta e prospetti della copertura.



Fig.4 Vista interna delle rovine protette.

## 2. ANTICHE TERME ROMANE DI BADENWEILER

**Climatizzazione:** la presenza di aperture garantisce, insieme ai giunti aperti delle lastre di vetro in facciata, la ventilazione naturale. Il guscio di vetro curvo si distacca da terra (Figg. 1, 2) e tra la parte di vetro verticale e la copertura curva vi è un'apertura di circa 50 cm, al fine di garantire un'aerazione sufficiente (Fig.3).

Un sistema di ombreggiatura lungo le travi ad arco costituito da teli in tessuto controllati automaticamente evita la radiazione diretta nei giorni caldi (Figg.4, 5).



Fig.1 Vista interna dell'apertura in basso per la ventilazione.



Fig.3 Vista esterna dell'apertura in alto per la ventilazione.



Fig.4 Teli per l'ombreggiamento.



Fig.2 Vista esterna dell'apertura in basso per la ventilazione.



Fig.5 Vista interna.

## 2. ANTICHE TERME ROMANE DI BADENWEILER

### 2.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura:** i 12 archi principali (Fig.2) sono ancorati mediante piastre e barre filettate a 24 plinti di fondazione in calcestruzzo inclinati secondo la direzione dell'asse degli archi in modo da trasmettere meglio la spinta nel terreno (Fig.1). Come in una membrana, gli sforzi sono trasmessi all'interno del piano, senza pertanto creare sforzi di flessione negli elementi. Sono state realizzate maglie di vetro rettangolari ad alta resistenza con cavi precompressi diagonali ( $\varnothing$  10 mm) creando un guscio irrigidito, con un ingombro di 68 x 40 m, con profili in acciaio di soli 60 x 40 mm che si estendono a 60 x 60 mm per le campate. Per irrigidire la copertura trasversalmente sono stati necessari 10 fasci di cavi pretesi costituiti da un cordone di compressione con sezione a T e cavi quasi invisibili longitudinali e diagonali ( $\varnothing$  22 e 10 rispettivamente) (Figg.5, 6).

In corrispondenza degli angoli, i pannelli di vetro sono ancorati ai profili metallici mediante piastre in acciaio inox. Le fughe dei vetri della copertura sono state chiuse a filo con la superficie mediante silicone.

I due fronti della volta a botte sono anch'essi chiusi con pannelli in vetro (Fig.3), con una struttura assolutamente minima. I cavi d'acciaio teso orizzontali e verticali ad alta resistenza ( $\varnothing$  16 mm) formano una griglia alla quale sono ancorati i pannelli di vetro mediante connessioni in acciaio inox. Su tali fronti i giunti tra i vetri non sono sigillati con silicone, ma sono aperti.

#### **Materiali impiegati per la copertura:**

Archi in acciaio;

Cavi elicoidali galvanizzati  $\varnothing$ 10/16/22 mm;

Piastre in acciaio inox;

1725 pannelli di vetro rettangolari (circa m 1,20x1,20)

Copertura: vetro stratificato di sicurezza 2 lastre da 5 mm di vetro indurito termicamente.

Facciate: vetro stratificato di sicurezza 2 lastre da 8 mm di vetro indurito termicamente (max 1,20 x 1,80 m).

17 teli (MHZ) per l'ombreggiamento, montati su binari, con azionamento elettrico, di tessuto acrilico pesante, dimensioni m 3,6 x 18,8.



Fig.1 Vista dei plinti inclinati.



Fig.2 Vista esterna degli archi in acciaio.

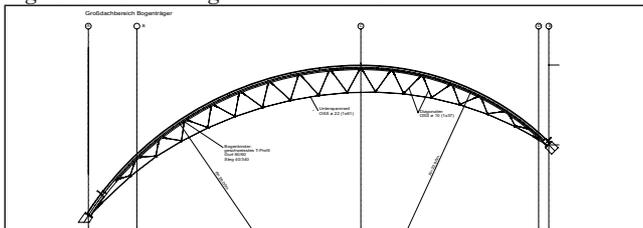


Fig.5 Arco di irrigidimento trasversale.

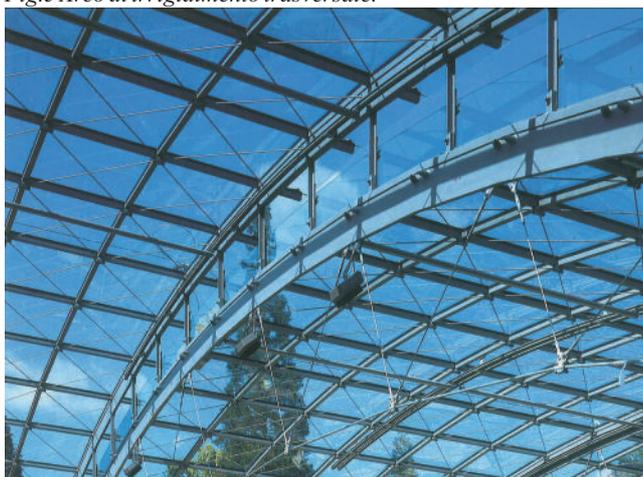


Fig.6 Vista dei cavi per irrigidire trasversalmente la struttura.



Fig.3 Pannelli in vetro di facciata



Fig.4 Ancoraggio dei vetri di facciata



Fig.7 Cavi di rinforzo della struttura del tetto con serracavo.



Fig.8 Ancoraggio dei cavi di facciata all'arco in acciaio.

## 3. RUDERI DELLA PORTA ROMANA LIMESTOR A DALKINGEN

### 3.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

**Localizzazione:**

DALKINGEN (Baden-Württemberg), GERMANIA.

**Coordinate geografiche:** 48°55'36"N 10°09'20"E

**Quota media:** m 465 s.l.m.

**Condizioni climatiche del sito:**

INVERNO min. -1,2°C max. 0,1° C

ESTATE min. 15,6° C max. 17,2° C

**Precipitazioni annue:** da 52 a 127 mm/mese.



### 3.2 STORIA

**Periodo di edificazione:** 213 a.C.

**Storia del sito**

Con una lunghezza di 550 km, il Limes Romano, tra il Danubio e il Reno, è uno dei monumenti del mondo più estesi in lunghezza, secondo solo alla Grande Muraglia Cinese. Nei pressi di Dalkingen, vicino Aalen, nel 1974/75 sono stati scoperti i muri di fondazione di un arco trionfale, originariamente alto 12 m, unico lungo tutto il Limes, che fu fatto costruire, come simbolo del potere romano, dall'imperatore romano Caracalla nell'anno 213 d.C. dopo il successo di una campagna contro le tribù germaniche. Venti anni dopo, gli alemanni tornarono e la porta fu distrutta. Le mura, così come tutta la parte superiore del Limes Tedesco Retico, nel 2005 sono state designate Patrimonio dell'Umanità.

I resti scoperti, esposti al vento e ai fattori meteorologici per 35 anni, mostravano chiari segni di alterazione. Per proteggere il complesso della Porta del Limes contro un ulteriore decadimento, l'autorità appaltante *Recreation Area Rainau-Buch Association* e l'Ufficio Distrettuale delle *Ostalbkreis* hanno deciso di dare un riparo ai resti con una copertura. Il compito principale è stato quello di garantire la tutela del complesso della porta e della zona residenziale situata dietro di essa.

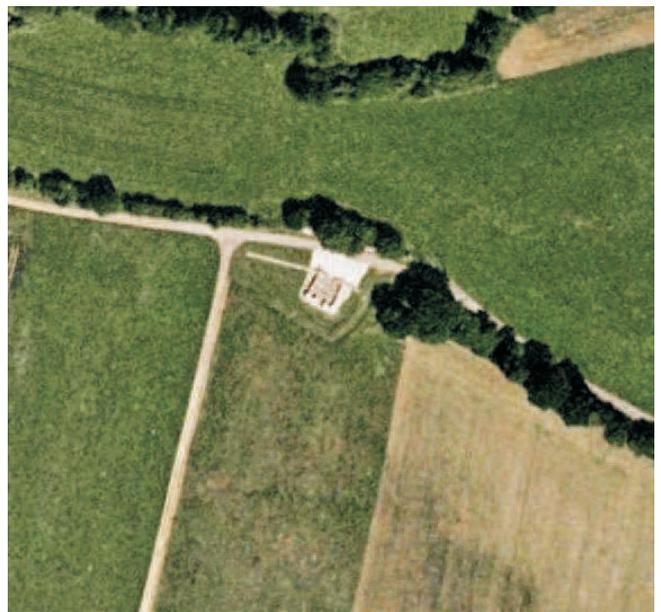


Fig.1 Foto aerea delle rovine.



Fig.2 Vista dall'alto delle rovine.



Fig.4 Prospetto dell'antica Porta.



Fig.3 Resti della Porta.

### 3. RUDERI DELLA PORTA ROMANA LIMESTOR A DALKINGEN

#### 3.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Cemal Isin Architekten.

**Anno dell'intervento:** 2010.

**Estensione sito archeologico:** circa 400 mq.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** struttura della porta con le basi ancora visibili dei pilastri, decorazione fra colonne con *opus reticulatum* di pietre rettangolari di tufo.

**Estensione copertura:** base mq 527 (m 23,10 x 22,85).

Altezza da 8 a 15 m.

**Tipo di copertura:** l'edificio moderno ha dovuto soddisfare i seguenti requisiti: consentire una vista completa sulla struttura storica, coprire le rovine in modo armonioso e sottolineare l'importanza storica della Porta del Limes come edificio a sé stante. Gli architetti Isin (Aalen) hanno progettato una costruzione cubica di vetro inclinata a sud di 23° rispetto all'orizzontale che ha permesso di montare all'interno dell'edificio una replica dell'arco di 12 m di altezza. Una struttura in acciaio è coperta da una membrana che raffigura la Porta nel suo aspetto originale (Fig. 7).

Il progetto nasce dall'idea di base che il complesso, con i 12 m di altezza dell'arco trionfale originario e i 5,5 m di altezza degli alloggiamenti, possa determinare le dimensioni e la gradualità in altezza della copertura. Si tratta di un edificio in vetro quasi cubico con una lunghezza dello spigolo di circa 20 m che sale obliquamente verso sud da un'altezza di 8 m fino a 15 m con un angolo di 23° rispetto all'orizzontale (Figg. 2-4).

**Motivazioni:** nel corso degli anni di esposizione alle intemperie si erano verificati notevoli danni che hanno richiesto un restauro dei reperti. La costruzione di una copertura di protezione, oltre a evitare ulteriori danni, permette allo stesso tempo di offrire ai visitatori, attraverso pannelli informativi, una panoramica completa sulla storia dei ruderi. L'uso del vetro permette di dare l'impressione che la rovina sia ancora all'aperto, immersa nella natura circostante (Figg. 2-4).



Fig.1 Vista esterna prima dell'intervento di copertura.



Fig.2 Vista esterna dopo l'intervento di copertura.



Fig.3 Vista esterna della copertura.

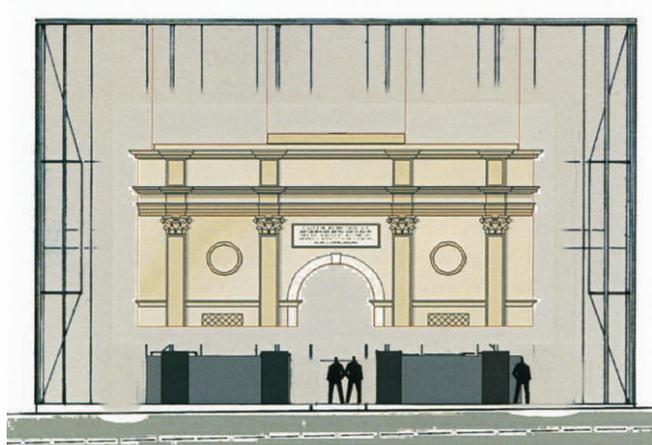
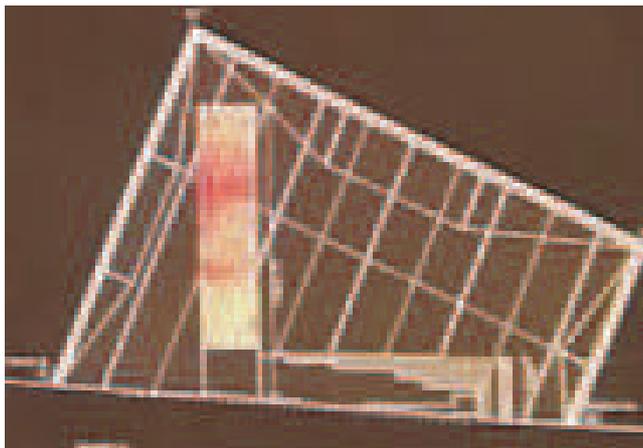


Fig.6 Sezioni.



### 3. RUDERI DELLA PORTA ROMANA LIMESTOR A DALKINGEN

#### **Bibliografia**

GRAF, J., *A glass palace for the Limes Gate at Dalkingen*, «Engineered transparency. International Conference at glasstec, Düsseldorf, Germany 29 and 30 September 2010».

**Climatizzazione:** un edificio in vetro chiuso si scalda intensamente al sole. Calcoli hanno dimostrato la necessità di garantire una ventilazione trasversale permanente all'interno dell'edificio. Questo risultato è stato ottenuto attraverso prese d'aria in basso e attraverso lamelle in vetro aperte lungo il bordo superiore della facciata sud (Figg.4, 5). L'inclinazione dell'edificio amplifica l'effetto camino risultante così l'aria calda viene dissipata nel punto più alto e quindi nessun accumulo di calore può svilupparsi sotto la copertura. La temperatura interna a 2 m di altezza non è mai superiore al valore della temperatura esterna più 3 gradi Celsius.



Fig.1 Vista esterna.



Fig.2 Vista esterna.



Fig.5 Vista delle aperture con lamelle in vetro.



Fig.7 Vista interna.

### 3. RUDERI DELLA PORTA ROMANA LIMESTOR A DALKINGEN

#### 3.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura:** si tratta di una struttura in acciaio i cui telai, alti quanto l'edificio, sono disposti a un intervallo di 2,18 m in direzione nord-sud ed est-ovest. La costruzione in acciaio è supportata da travi di fondazione in calcestruzzo. A causa della costruzione inclinata, vengono generate azioni di sollevamento dei sostegni a cui reagiscono barre filettate in acciaio inox ad alta resistenza.

Ai bordi del cubo, i telai si connettono mediante profili rigidi angolari con un angolo di 45°. Le sezioni scatolari dei profili del telaio hanno b/h 80/320 mm e b/h 80/450 mm. I profili del telaio dell'involucro perimetrale si connettono con i profili del tetto a campi quadrati aventi lunghezza dello spigolo di 2,18 m. Le strutture portanti delle facciate sono divise in triangoli per mezzo di diagonali in acciaio con diametro fino a 52 mm che irrigidiscono l'intera struttura. Anche la copertura è dotata di cavi per garantire la stabilità globale. Il vetro è una chiusura e non è strutturale. L'edificio è omogeneamente rivestito con vetro singolo, b/h 2.18m/4.36m. Tali pannelli in vetro sono sostenuti con attacchi puntuali in acciaio inox (Fig.2).

**Materiali impiegati per la copertura:** acciaio S 355, lastre di vetro (dimensioni in facciata mm 2160 x 4360). È stato impiegato vetro stratificato (2 lastre da 10 mm di vetro indurito con uno strato di PVB da 1,52 mm). Per i giunti (20-25 mm) è stato utilizzato silicone strutturale.

Le aperture di ventilazione sulla facciata sud possono essere chiuse mediante otto lamelle in vetro isolante Lacker bigAir® 350D, azionate grazie a sensori.



Fig.1 Vista esterna della copertura.

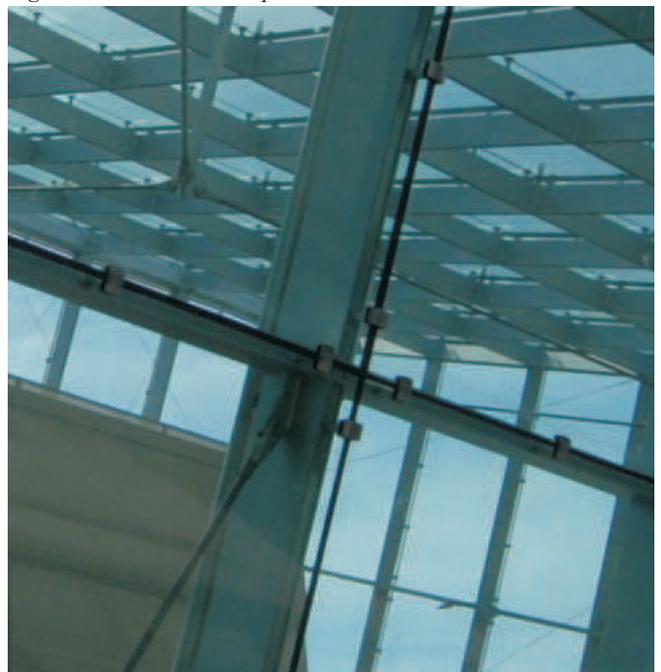


Fig.2 Attacchi puntuali dei vetri alla struttura in acciaio.



Fig.3 Cavi di irrigidimento in acciaio.

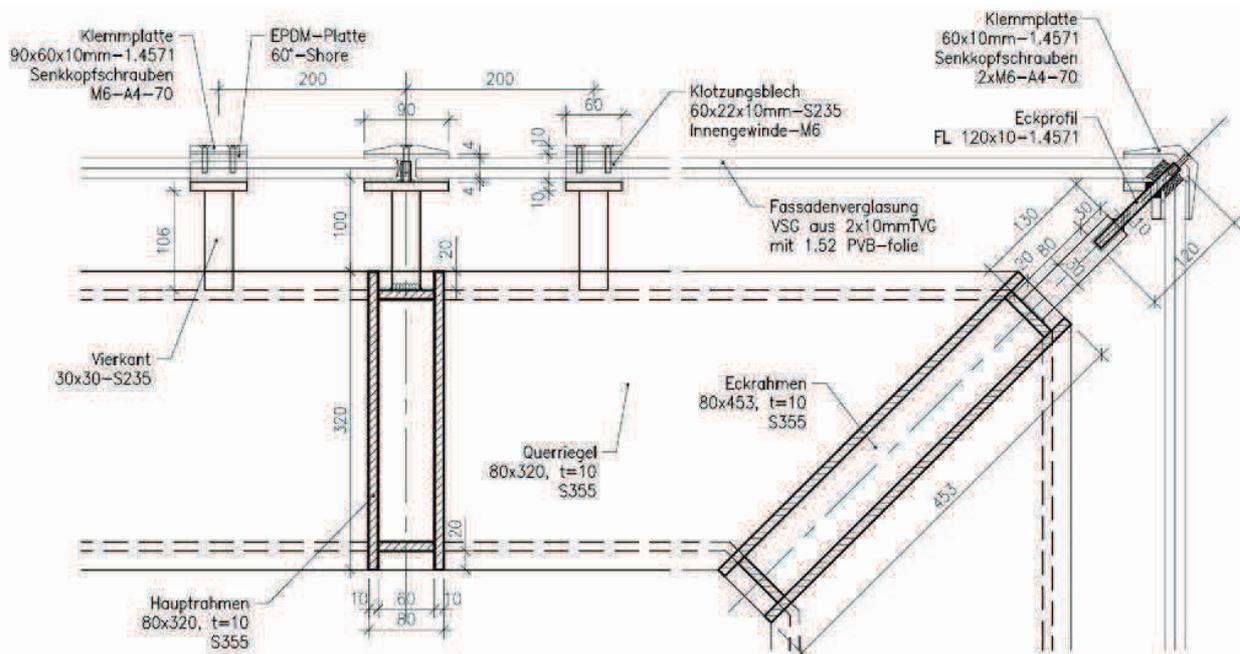


Fig.4 Dettaglio costruttivo della connessione tra vetro e struttura in acciaio.

## 4. RESTI ARCHEOLOGICI PRESSO LA BANCA NAZIONALE DI GRECIA

### 4.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

#### *Localizzazione:*

ATENE (Attica), GRECIA.

*Coordinate geografiche:* 37°58'50" N 23°43'42" E

*Quota media:* m 74 s.l.m.

#### *Condizioni climatiche del sito:*

INVERNO min. 6° C max. 14° C

ESTATE min. 19° C max. 32° C

*Precipitazioni annue:* da 5 a 66 mm/mese.

### 4.2 STORIA

*Periodo di edificazione:* V sec. a.C.

#### *Storia del sito*

In occasione del centesimo anniversario della sede principale della Banca Nazionale ad Atene è stato indetto nel 1998 un concorso d'architettura per la realizzazione di un nuovo edificio adiacente alla sede principale. Il lotto, nel centro storico di Atene (angolo tra Aiolou & Sofokleous Street), contiene dei reperti archeologici giudicati di grande importanza. Il progetto vincitore ha proposto la creazione di un vuoto al pianterreno della nuova sede in modo da valorizzare i reperti ed esaltare il carattere pubblico della nuova costruzione.

Nel 1999 nuovi scavi archeologici liberano il tracciato dell'antica Strada Acharniki e costringono a fare delle modifiche al progetto per permettere trasparenze e viste ancora più aperte sull'asse antico verso piazza Kotzia. L'edificio completa l'angolo di un importante isolato nel centro storico d'Atene con vista sull'acropoli, all'estremità sud della strada Aiolou (Fig.2). Il volume si presenta con una forma primaria molto rigorosa nonostante il vuoto al piano terra (Fig.3). La gerarchia delle facciate, l'organizzazione simmetrica dei piani, la semplicità delle forme, il rapporto con gli scavi archeologici e la luce naturale sono i temi fondatori del progetto. Un vuoto all'interno dell'edificio lascia penetrare la luce naturale attraverso una serie di lucernari e anima gli spazi di circolazione dall'ultimo piano fino agli scavi. Il tracciato archeologico è visibile attraverso passerelle in metallo e vetro.

Le nuove fondazioni dell'edificio conservano indisturbata l'antica stratificazione della strada *Acharniki*. La nuova sede comprende, oltre il piano terra, cinque livelli fuori terra e quattro livelli interrati. Una pietra naturale di colore sabbia - travertino di Cipro - riveste le facciate esterne e gli spazi pubblici interni dell'edificio.



Fig.1 Vista aerea del sito.



Fig.2 Vista del nuovo edificio.



Fig.3 Vista dei resti archeologici.

## 4. RESTI ARCHEOLOGICI PRESSO LA BANCA NAZIONALE DI GRECIA

### 4.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Mario Botta con gli architetti greci Irena Sakellaridou, Morpho Papanikolaou, Maria Pollani.

**Anno dell'intervento:** 2001.

**Estensione sito archeologico:** m<sup>2</sup> 600.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** resti in pietra dell'antica Porta *Acharniki* delle Mura *Themistokleio* e resti dell'antica via Acharniki.

**Estensione copertura:** m<sup>2</sup> 942.

Altezza max m 9 dal fossato delle antiche mura.

Superficie vetrata circa m<sup>2</sup> 200.

**Tipo di copertura:** la copertura vetrata è costituita da lucernari e passerelle in metallo e vetro.

**Motivazioni:** rendere visibili i resti mentre si attraversa l'asse verso piazza Kotzia, conferendo al piano terra dell'edificio le caratteristiche di un museo all'aperto.

#### Bibliografia

Mario Botta, *National Bank of Greece*, teNeues, 2003, pp. 60-66.

Mario Botta-New Headquarters of the National Bank of Greece, Athens (1999-2001), Plus - Korean Architecture + Interior design, v. 2002.6, pp. 66-69.

CAPELLATO, G., *Mario Botta. Luce e gravita architecture 1993-2003*, Editrice Compositori, Bologna 2003, pp. 132-139.

JODIDIO, P., *Mario Botta. Headquarters of National Bank of Greece*, Taschen, 2003, pp. 172-175, 192.

**Climatizzazione:** il sito risulta ventilato grazie alla presenza di una vasta area scoperta sul fronte dell'edificio.

### 4.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura vetrata:** telai in acciaio ancorati su strutture portanti in cemento armato.

**Materiali impiegati per la copertura:** acciaio, vetro stratificato temprato.



Fig.4 Dettaglio della copertura vetrata.



Fig.1 Vista interna.

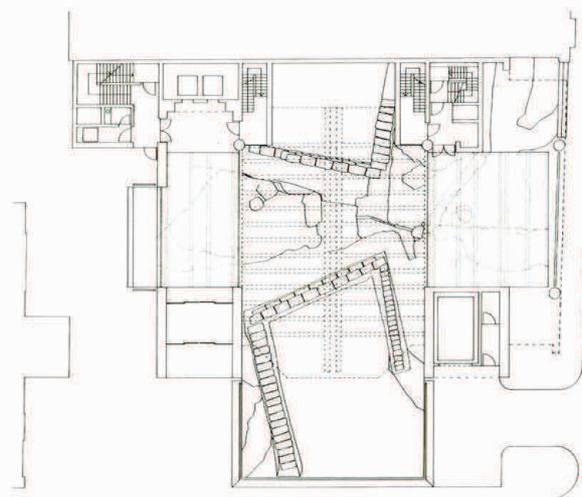


Fig.2 Piano terra dell'edificio.

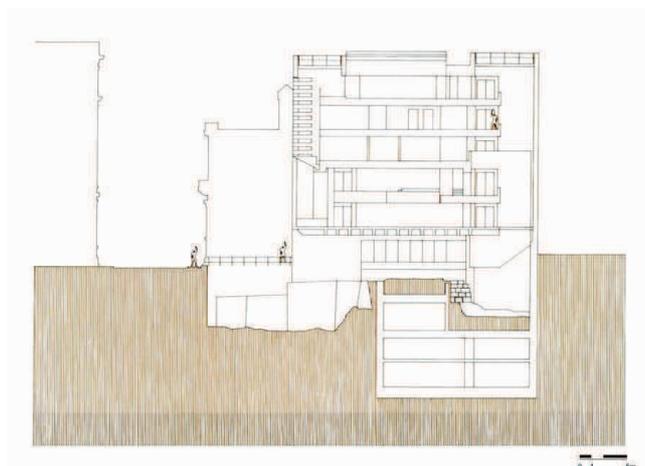


Fig.3 Sezione.

## 5. CAPPELLA DELLA CATTEDRALE DI ST FACHNAN

### 5.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

**Localizzazione:**

KILFENORA (County Clare), IRLANDA.

**Coordinate geografiche:** 52°59'26"N 9°13'00"O

**Quota media:** m 62 s.l.m.

**Condizioni climatiche del sito:**

INVERNO min. 2° C max. 8° C

ESTATE min. 10° C max. 18° C

**Precipitazioni annue:** da 47 a 79 mm/mese.

### 5.2 STORIA

**Periodo di edificazione:** XIV sec.

**Storia del sito**

Kilfenora è un paese famoso per le *High Crosses* (croci alte). Secondo la tradizione nel paese vi erano sette croci, non tutte ritrovate. La Cattedrale è dedicata a St. Fachnan che fondò il suo monastero nel VI secolo. La Chiesa originale era probabilmente in legno e fu in seguito sostituita da un edificio in pietra. La Chiesa abbaziale fu incendiata nel 1055. Tra il 1056 e il 1058 furono effettuate ricostruzioni, ma l'edificio fu saccheggiato nel 1079 e accidentalmente incendiato nel 1100. La struttura attuale risale al periodo compreso tra il 1189 e il 1200. Fu ricostruita con una sola navata e coro. Samuel Lewis la descrisse nel 1837 come «[...] una struttura molto antica e vulnerabile con una massiccia torre quadrata, al comando di una visione molto ampia e interessante, il corridoio è attualmente in fase di ricostruzione [...]». Nel corso di tali lavori di ristrutturazione la navata e il coro furono separati. Due anni dopo, nel 1839, Eugene O'Curry scrive: «[...] il lato est di 36 metri è ora senza tetto e abbandonato al vento e alle intemperie» (Fig.3).

La *Lady Chapel*, sacrestia o sala capitolare, è un'ala rettangolare a nord del presbiterio, probabilmente dello stesso periodo dell'edificio principale. Nella parete orientale presenta due finestre ogivali. Oggi è coperta con un tetto in vetro e acciaio e viene utilizzata come luogo espositivo delle antiche croci in pietra (Fig.1).



Fig.1 Croce Doorty.



Fig.2 Vista aerea del sito con l'intervento di copertura.



Fig.3 Cattedrale prima dell'intervento di copertura.



Fig.4 Cattedrale dopo l'intervento di copertura.

## 5. CAPPELLA DELLA CATTEDRALE DI ST FACHNAN

### 5.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Paul Arnold Architects.

**Anno dell'intervento:** 2005.

**Estensione sito archeologico:** circa m<sup>2</sup> 200.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** strutture in pietra, croci in pietra scolpita.

**Estensione copertura:** circa m<sup>2</sup> 96.  
Lunghezza circa m 12,00, larghezza circa m 8,00.

**Tipo di copertura:** la copertura a due falde riprende la forma dell'antica copertura.

**Motivazioni:** protezione della *Croce Doorty*, di altre croci medievali in pietra e di pietre scolpite. La filosofia di intervento è stata quella di lasciare la muratura in rovina senza ripristinare (Fig.3).



Fig.1 Vista esterna della Cattedrale e della cappella coperta.



Fig.2 Vista del timpano della copertura vetrata.

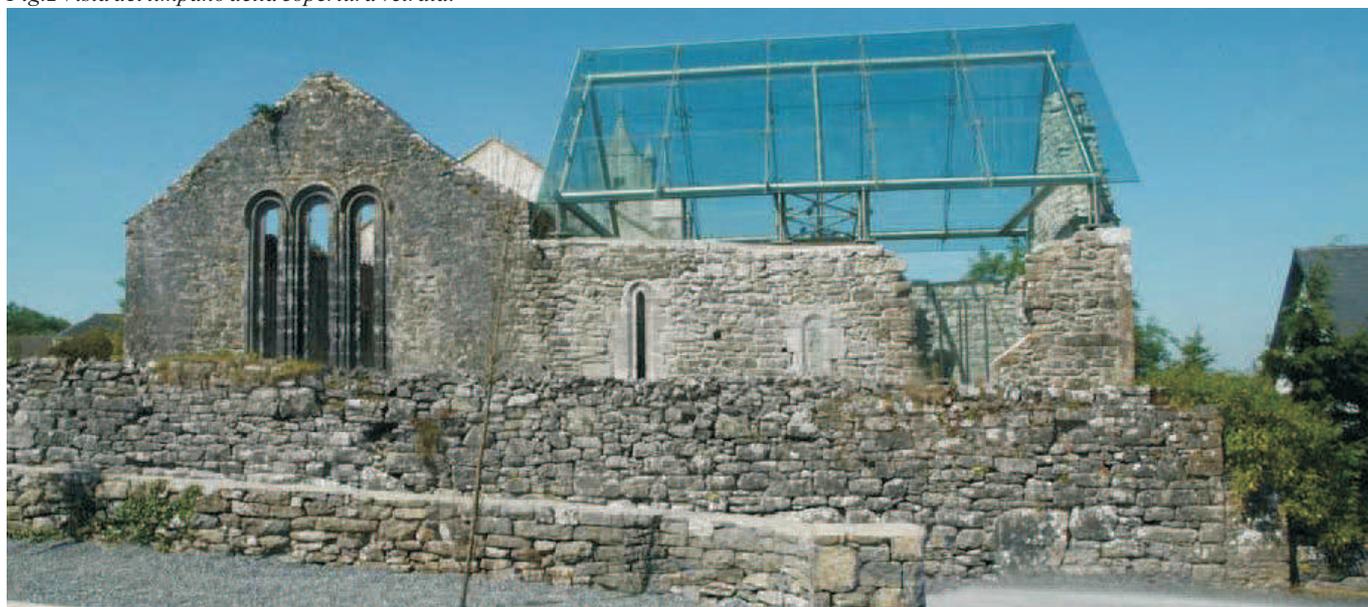


Fig.3 Vista esterna della copertura vetrata.

## 5. CAPPELLA DELLA CATTEDRALE DI ST FACHNAN

### 5.3 DATI GENERALI

#### **Bibliografia**

DI MUZIO, A., *Rovine protette. Conservazione e presentazione delle testimonianze archeologiche*, L'Erma di Bretschneider, Roma 2010.

**Climatizzazione:** la copertura vetrata si appoggia alla struttura esistente solo su pochi punti lasciando numerose aperture che permettono la ventilazione naturale (Fig.1-4). Poiché la zona è caratterizzata da un clima temperato, con poco gelo e relativamente poco sole, ed è fortemente ventilata in modo naturale e costante, la temperatura dell'aria nella zona espositiva è solo leggermente maggiore rispetto alla temperatura ambientale esterna.



Fig.1 Vista della copertura vetrata.



Fig.2 Vista della copertura vetrata.



Fig.3 Vista di alcuni appoggi della copertura vetrata.



Fig.4 Vista esterna della copertura vetrata.

## 5. CAPPELLA DELLA CATTEDRALE DI ST FACHNAN

### 5.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura:** un telaio di travi tubolari in acciaio è sospeso sulla struttura esistente tramite elementi verticali in acciaio. Otto tralicci in acciaio inox (quattro per lato) sostengono le lastre di vetro con connessioni puntuali (Fig.1). Nella parte centrale della copertura sono presenti elementi di irrigidimento trasversali (Fig.2).

**Materiali impiegati per la copertura:** acciaio inox316, lastre di vetro stratificato temprato (spessore complessivo 22 mm).



Fig.1 Vista degli elementi puntuali di ancoraggio dei vetri.



Fig.2 Irrigidimenti trasversali.



Fig.3 Vista degli ancoraggi alla struttura esistente.

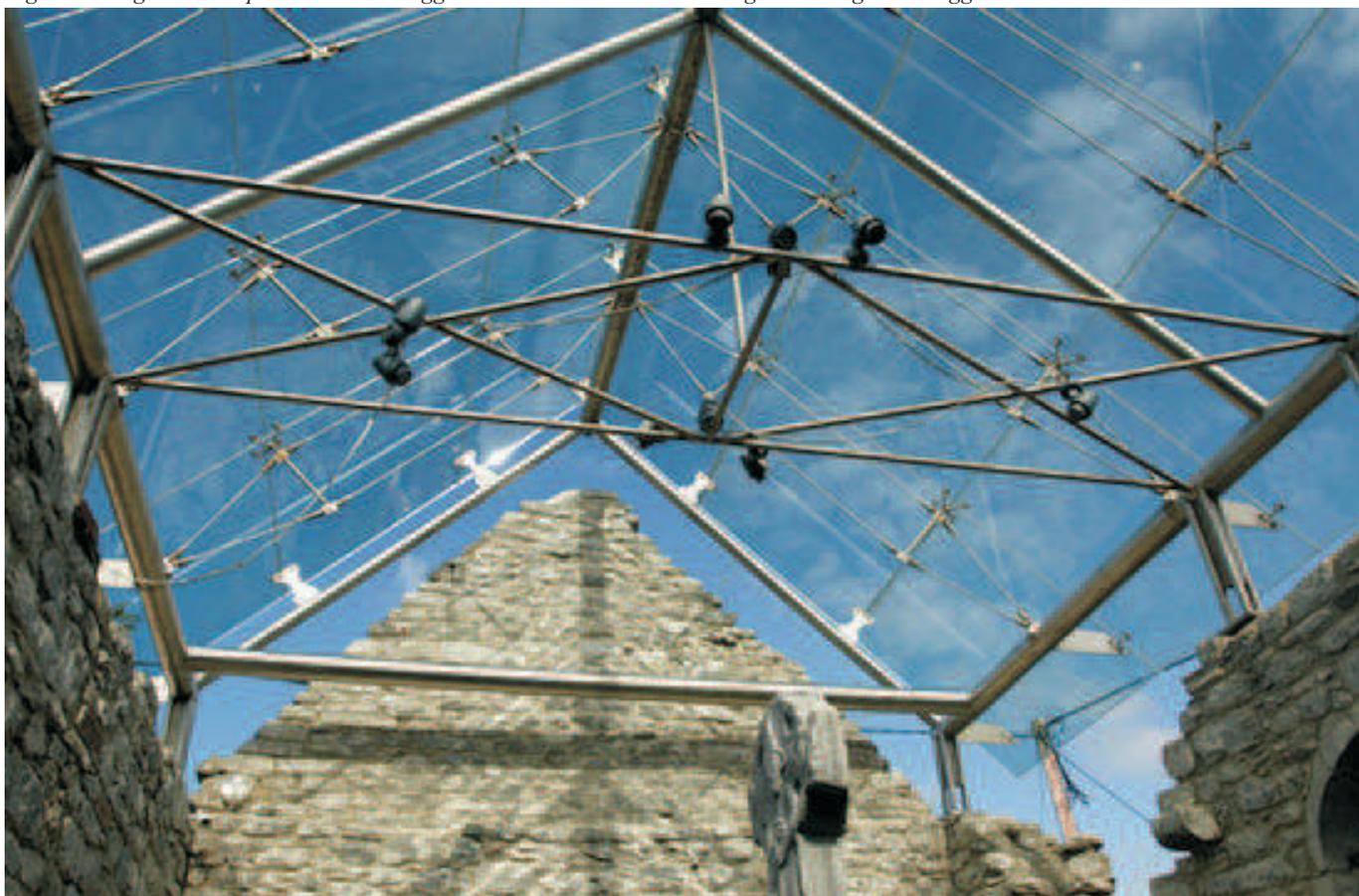


Fig.4 Vista interna della copertura.

## 6. ANFITEATRO ROMANO DI CIVIDATE CAMUNO

### 6.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

#### *Localizzazione:*

CIVIDATE CAMUNO (BS, Lombardia), ITALIA.

*Coordinate geografiche:* 45°56'37"N 10°16'52"E

*Quota media:* m 290 s.l.m.

#### *Condizioni climatiche del sito:*

INVERNO min. -5,8° C max. 7,1° C

ESTATE min. 12,1° C max. 26,4° C

*Precipitazioni annue* da 43 a 127 mm/mese.



### 6.2 STORIA

*Periodo di edificazione:* I-II sec. d. C.

#### *Storia del sito*

Cividate Camuno fu nominata capitale della Valle Camonica dopo la conquista romana (16 a.C.). Come in ogni antica città romana, in essa si trovavano gli edifici dedicati allo spettacolo: il teatro e l'anfiteatro.

Collocato ai piedi della rupe di S. Stefano, l'anfiteatro di Cividate Camuno è del tipo a struttura piena su terrapieno, meno dispendioso rispetto a quello su arcate e utilizzato in zone che potevano sfruttare la pendenza del terreno. Fu costruito nell'arco del I secolo d.C., durante la dinastia dei Flavi, o all'inizio del II, durante il regno di Traiano. L'edificio sfruttava la naturale pendenza del terreno a nord, mentre a sud si appoggiava ad un terrapieno artificiale. L'anfiteatro conserva parte delle gradinate e dispone di più ingressi. La parte a monte è realizzata sfruttando il pendio della collina sulla quale poggiano le gradinate, mentre quella in corrispondenza dell'asse maggiore è costruita in muratura. L'arena è scavata e la sua terra di risulta è stata utilizzata per il terrapieno della parte a valle che, contenuto dal muro perimetrale e dal podio, sosteneva le gradinate. L'area è interessata da altri edifici di servizio funzionali agli spettacoli e da una lunga canaletta che attraversa tutta la parte alta del complesso. L'anfiteatro cadde in disuso a partire dal IV sec. d.C., in concomitanza con la crisi che ovunque preannunciava il crollo dell'Impero romano.

Nel gennaio 1995 sono iniziati i lavori per il restauro e la salvaguardia del teatro e dell'anfiteatro e per l'apertura di un Parco Archeologico e nel 2002 sono state progettate alcune strutture di copertura in acciaio e vetro.



Fig.1 Vista dall'alto.

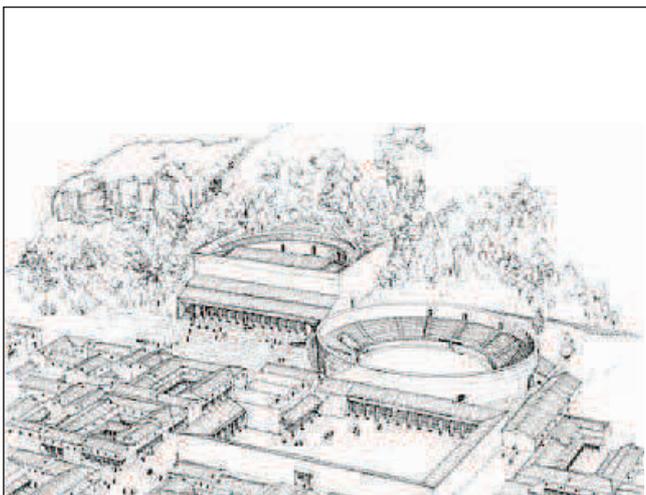


Fig.2 Ricostruzione di una parte di città in epoca romana.



Fig.3 Vista generale dei reperti.

## 6. ANFITEATRO ROMANO DI CIVIDATE CAMUNO

### 6.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Stefania Guiducci, Marzio Mercandelli.

**Anno dell'intervento:** 2002.

**Estensione sito archeologico:** m<sup>2</sup> 14000.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** gradinate rivestite in pietra calcarea di Buhenstein.

**Estensione copertura:** (tettoia grande) base m<sup>2</sup> 320.  
Lunghezza circa 16 m , larghezza circa m 20, altezza max circa m 4.

**Tipo di copertura:** tettoia in acciaio e vetro.

**Motivazioni:** la parte coperta (gradinate e sacello) è un corollario al progetto complessivo, restituisce l'impianto originario riattivando percorsi che evidenziano i reperti e, attraverso le ricostruzioni in pietra, garantisce la continuità percettiva. Le coperture coadiuvano il progetto, proteggendo solo le parti maggiormente delicate.

#### **Bibliografia**

MARIOTTI, V. (a cura di), *Il teatro e l'anfiteatro di Cividate Camuno. Scavo, restauro e allestimento di un parco archeologico*, All'Insegna del Giglio, Firenze 2004.

### 6.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura:** per la tettoia più grande che copre le gradinate, sei pilastri tubolari in acciaio, travi reticolari in acciaio di collegamento dei pilastri sui due lati lunghi a cui si ancorano le travi secondarie in acciaio che sorreggono i vetri.

**Materiali impiegati per la copertura:** acciaio, vetro stratificato temprato.



Fig.7 Vista delle due tettoie in acciaio e vetro.



Fig.4 Vista dell'area dell'anfiteatro scavata nella collina.

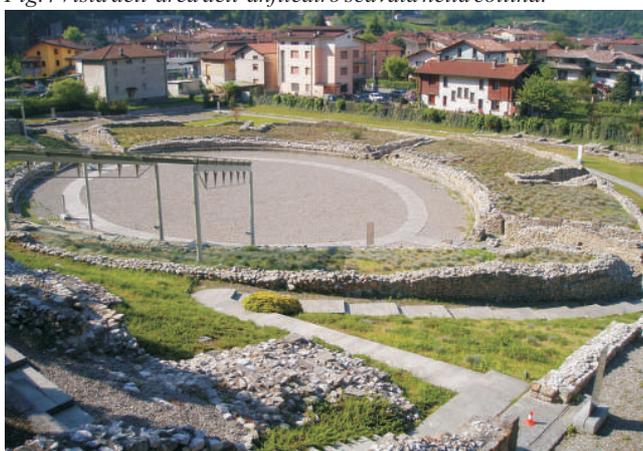


Fig.5 Vista dall'area del teatro.



Fig.6 Vista della copertura dal basso.



Fig.8 Vista della tettoia che copre le gradinate in parte ricostruite.

## 7. RESTI ARCHEOLOGICI A PIAZZA TOSCANO

### 7.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

#### **Localizzazione:**

COSENZA (Calabria), ITALIA.

**Coordinate geografiche:** 39°17'19"N 16°15'39"E

**Quota media:** m 256 s.l.m.

#### **Condizioni climatiche del sito:**

INVERNO min. 3,2° C max. 12,9° C

ESTATE min. 15,3° C max. 33,1° C

**Precipitazioni annue:** da 13,3 a 131,5 mm/mese.

### 7.2 STORIA

#### **Periodo di edificazione**

#### **Storia del sito**

Piazzetta Toscano a Cosenza non è mai stata una piazza vera e propria, ma soltanto un vuoto urbano originato dai bombardamenti della seconda guerra mondiale. Per questo motivo, pur situato nel centro storico, il luogo era rimasto uno slargo mai sistemato: su una complessa orografia, caratterizzata da notevoli dislivelli, si affacciavano edifici mutili e cadenti.

L'occasione dell'intervento nasce dalla campagna di scavi che ha portato in luce un giacimento archeologico di notevole valore storico.

Dopo le prime indagini, l'elemento di maggior interesse archeologico è identificato in un frammento di muro in *opus reticulatum*, appartenente ad un piccolo rudere collocato lungo la storica via Martirano. Una campagna di scavi condotta alla fine degli anni Novanta porta successivamente alla luce un ben più vasto giacimento archeologico, caratterizzato da testimonianze e stratificazioni di epoca bruzia, romana e medievale.

Il fine dell'intervento non era solo quello di tutelare, ma soprattutto di valorizzare un'area fortemente degradata della città, creando quindi strutture protettive per i ruderi e spazi di aggregazione organizzati a piazza, al fine di rendere fruibile il contesto archeologico.



Fig.1 Vista aerea del sito con l'intervento di copertura.



Fig.2 Vista dall'alto della piazza con l'intervento di copertura.

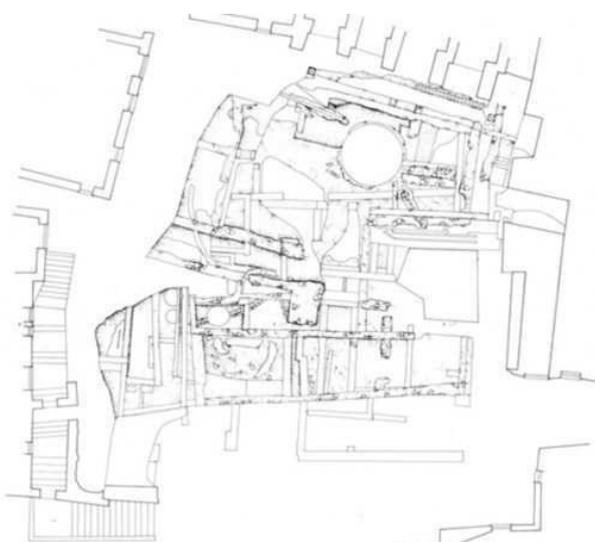


Fig.4 Disegno della piazza con i resti archeologici.

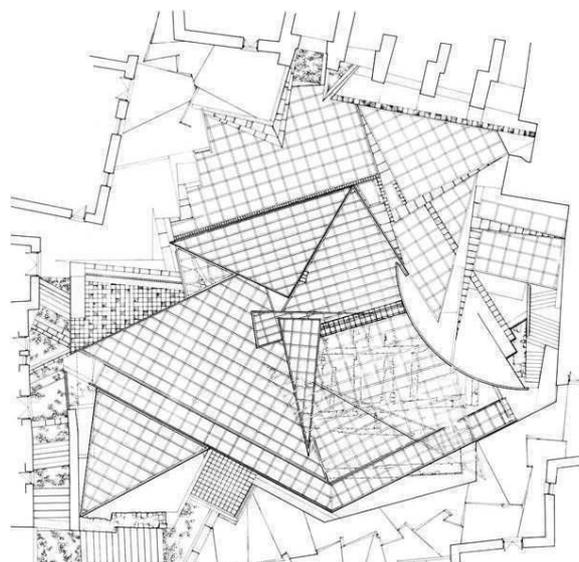


Fig.3 Pianta della piazza con l'intervento di copertura.

## 7. RESTI ARCHEOLOGICI A PIAZZA TOSCANO

### 7.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Arch. Marcello Guido.

**Anno dell'intervento:** 2001.

**Estensione sito archeologico:** m<sup>2</sup> 2400.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** pietra (resti di epoca bruzia, romana e medievale).

**Estensione copertura:** altezza max m 6,00 dal piano di calpestio. Superficie vetrata m<sup>2</sup> 2400.

**Tipo di copertura:** la copertura è costituita da una sovrapposizione di falde vetrate su setti in calcestruzzo, travi e pilastri in acciaio colorato (Fig.2).

**Motivazioni:** proteggere e mantenere visibili gli strati archeologici riportati in luce, senza escludere l'area dai percorsi urbani, cercando di reintegrarla nella città, attraverso nuovi tracciati e un'estesa pavimentazione in vetro che consente la percezione dall'alto dei reperti.



Fig.2 Vista esterna delle pavimentazione in vetro.

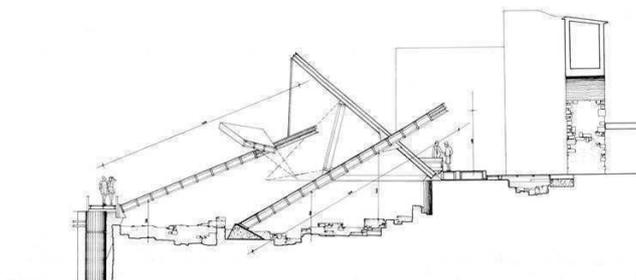
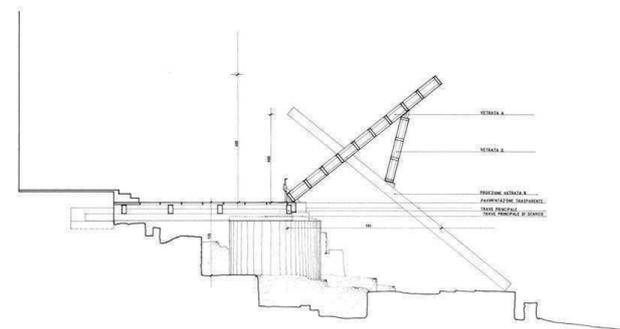
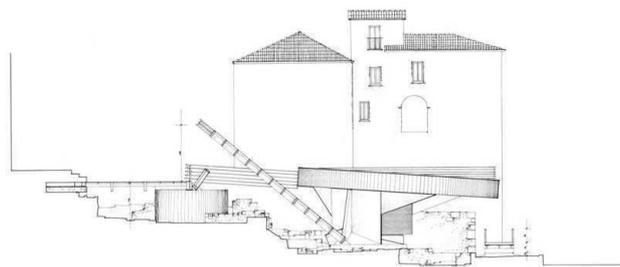


Fig.1 Sezioni.



Fig.3 Vista esterna della copertura vetrata.

## 7. RESTI ARCHEOLOGICI A PIAZZA TOSCANO

### **Bibliografia**

GABBIANI, B., *Creatività e polemiche; Piazzetta Toscano a Cosenza, sistemazione degli scavi archeologici. Il progetto di Marcello Guido*, «Recupero e Conservazione», 50.

DE SESSA, C., *Marcello Guido: l'impegno della trasgressione*, Clean, Napoli 1999.

MULTARI, A., *Piazza Toscano*, «Edilizia Popolare», 259 (1998)

RUGGIERI TRICOLI M. C., SPOSITO, C., *I siti archeologici – Dalla definizione del valore alla protezione della materia*, Flaccovio, Palermo 2004.

VOGLIAZZO, M., *Esplosione generatrice in Cosenza*, «L'Arca», 174 (2002).

ZEVİ, B. (cur.), *Paesaggistica e linguaggio: grado zero dell'architettura*, atti del Convegno (Modena 1997), Canal & Stamperia, Venezia 1999.

**Climatizzazione:** non sono stati previsti impianti, se non quello di illuminazione. La piazza, a causa della sua collocazione e dell'altezza dei fabbricati circostanti, è quasi sempre in ombra. La circolazione dell'aria è garantita grazie alla particolare conformazione geometrica delle superfici vetrate.



Fig.1 Vista esterna delle falde vetrate.



Fig.2 Vista esterna delle falde vetrate.

## 7. RESTI ARCHEOLOGICI A PIAZZA TOSCANO

### 7.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura vetrata:** lo scavo archeologico è protetto da un articolato insieme di vetrate sorrette da travi in acciaio di lunghezza variabile (la più grande arriva a circa m 18), sostenute da pilastri in acciaio e da setti in cemento armato.

**Materiali impiegati per la copertura:** acciaio, vetro stratificato temprato (spessore di 3 cm per le superfici calpestabili, inferiore per i piani inclinati).



Fig.1 Vista esterna.



Fig.3 Vista interna.

## 8. CASTELLO DI LEGNANO

### 8.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

**Localizzazione:**

LEGNANO (MI, Lombardia), ITALIA.

**Coordinate geografiche:** 45°35'09"N 8°55'29"E

**Quota media :** m 195 s.l.m.

**Condizioni climatiche del sito:**

INVERNO min. -4,4° C max. 8,6° C

ESTATE min. 12,6° C max. 28,6° C

**Precipitazioni annue:** da 54,6 a 132 mm/mese.



### 8.2 STORIA

**Periodo di edificazione:** 1231d. C.

**Storia del sito**

Il Castello di Legnano sorge a sud della città su un'isola del fiume Olona. È conosciuto come *Castrum Sancti Georgi* (Castello di San Giorgio).

La fortificazione è sorta su un convento di Regolari Agostiniani, con annessa una piccola Chiesa dedicata a San Giorgio. Il monastero possedeva molte terre coltivabili. I monaci, a seguito delle prepotenze subite dai potenti del luogo, abbandonarono il monastero firmando un atto di cessione. L'edificio ha subito nel corso dei secoli (dal duecento ad oggi) diversi passaggi di proprietà e diversi lavori di sovrapposizione ed integrazione.

Nel 1973 è stato acquistato dal comune di Legnano. Dopo decenni di degrado ed incuria è stato ristrutturato e riaperto al pubblico nel 2005. Dal 2007 fa parte del progetto *SALe* Legnano ed è sede della "Pinacoteca del Castello".

L'edificio storico si sviluppa in due ali che sono state restaurate con differenti tipologie di intervento. L'ala sud-est, residenza nobiliare di campagna, in migliori condizioni, è stata restaurata con un intervento di semplice conservazione. Per l'ala nord-ovest, ridotta ad un "rudere", con sole murature perimetrali, senza solai e coperture, si è resa invece necessaria la copertura. È stata realizzata una copertura in vetro sorretta da strutture in acciaio (Fig.2, 3).



Fig.1 Vista aerea del sito con gli interventi di copertura.



Fig.4 Vista d'insieme dalla strada.



Fig.2 Vista prima dell'intervento di restauro.



Fig.3 Vista dopo l'intervento di restauro.



Fig.5 Vista dal lato della corte interna.

## 8. CASTELLO DI LEGNANO

### 8.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** arch. Luigi Ferrario, arch. Elena Frascina.

**Anno dell'intervento:** 2008.

**Estensione sito:** m<sup>2</sup> 3000.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** muratura, intonaci, tele della pinacoteca.

**Tipo di copertura:** copertura in acciaio e vetro (Fig. 1, 2). I muri perimetrali rappresentano i confini entro i quali è stato realizzato un nuovo organismo architettonico che, sulla base di un modulo geometrico, ha inglobato il torrione, la chiesa e tre nuovi padiglioni: reception con scala, ballatoi e ascensore in acciaio e vetro, uffici ed aula per l'esposizione di tele (Fig.3).

**Motivazioni:** tutela e conservazione del castello. I nuovi elementi architettonici e strutturali introdotti sono ispirati ai criteri di compatibilità, leggibilità e reversibilità.

#### **Bibliografia**

AA.VV., *Il Castello di Legnano. Fascino e suggestione di una testimonianza storica*, Ed. Museo civico Sutermeister, 1991.  
CASCIANI, S., *Luigi Ferrario - Mies and Me*, Skira, Milano 1999.

LEYLA CIAGÀ, G., FERABOLI, M. T., *Luigi Ferrario. Paesaggi costruiti / Land-Shapes*, Silvana Editoriale, Milano 2010.



Fig.1 Vista dal lato della corte



Fig.2 Vista della copertura.

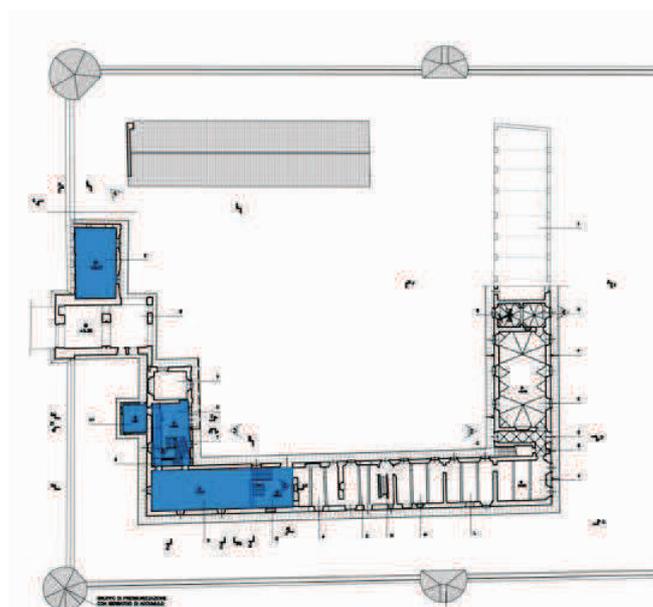


Fig.3 Planimetria con individuazione delle zone coperte in vetro.



Fig.4-5 Sezioni .

## 8. CASTELLO DI LEGNANO

**Climatizzazione:** al fine di minimizzare il passaggio dei raggi solari il progettista stesso aveva previsto la serigrafia sulle lastre, considerata sufficiente per una generica destinazione d'uso.

Nel momento in cui, però, è stato deciso di convertire l'ambiente con copertura vetrata in museo contenente tele, tale accorgimento non è stato valutato sufficiente. Pertanto, sulla parte esterna della copertura vetrata è stata applicata una pellicola per il controllo delle radiazioni ultravioletta. Tale pellicola è di tipo selettivo, riesce a bloccare quasi completamente l'ultravioletto che danneggerebbe le tele, lasciando passare la luce visibile e l'infrarosso. Il calore determinato dall'infrarosso viene mitigato con l'applicazione di tende bianche microforate poste all'interno della copertura vetrata e soprattutto con un sistema di regolazione climatica che avviene attraverso l'impianto di climatizzazione e controllo dell'umidità. L'obiettivo è quello di mantenere per tutta la stagione invernale una temperatura costante di 20° C e per tutta la stagione estiva una temperatura di 26° C.



Fig.1 Vista d'insieme.



Fig.2 Vista dall'alto delle coperture.



Fig.3 Dettaglio della vetrata di copertura.

## 8. CASTELLO DI LEGNANO

### 8.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura:** pilastri costituiti da due angolari in acciaio sono collegati alle murature storiche e sorreggono le travi in acciaio (Fig.1, 2). Strutture di controventatura composte da cavi di acciaio lungo la pendenza delle coperture permettono l'aggancio dei vetri mediante attacchi puntuali per i quali è stato utilizzato il sistema *SGG SPIDER GLASS* composto da elementi metallici: *ragni* in acciaio inox e *rotules* tipo *Faraone* in acciaio inox (Fig.3).

**Materiali impiegati per la copertura:** struttura in acciaio.

Il vetro è del tipo *SGG SECUR STADIP*, composto da 2 lastre con spessore totale 22 mm, ottenuto mediante stratificazione di:

- lastra esterna tipo *SGG PLANILUX TEMPERED* mm 12;
- film di polivinilbutirrale (PVB spessore 1,52 mm);
- lastra interna tipo *SGG PLANILUX PLANIDUR* mm 8, sottoposta a indurimento.

Inoltre, tale vetro presenta una serigrafia sulla seconda faccia della lastra esterna. La serigrafia è costituita da un disegno puntinato. I puntini hanno diametro coprente di 3 mm e spaziatura trasparente di 9x9 mm. Sulla parte esterna della copertura vetrata è stata in un secondo momento applicata una pellicola per il controllo delle radiazioni ultravioletta. La pellicola anti UV installata esternamente è la *ULV 70 EXT* distribuita dalla *Foster*, serie *Selective-* per esterni.

Di seguito le caratteristiche della pellicola: neutra, con trattamento antigraffio sulla superficie.

Luce visibile trasmessa: 67%

Luce visibile riflessa: 9%

G value (Solar Heat Gain Coefficient): 0,60

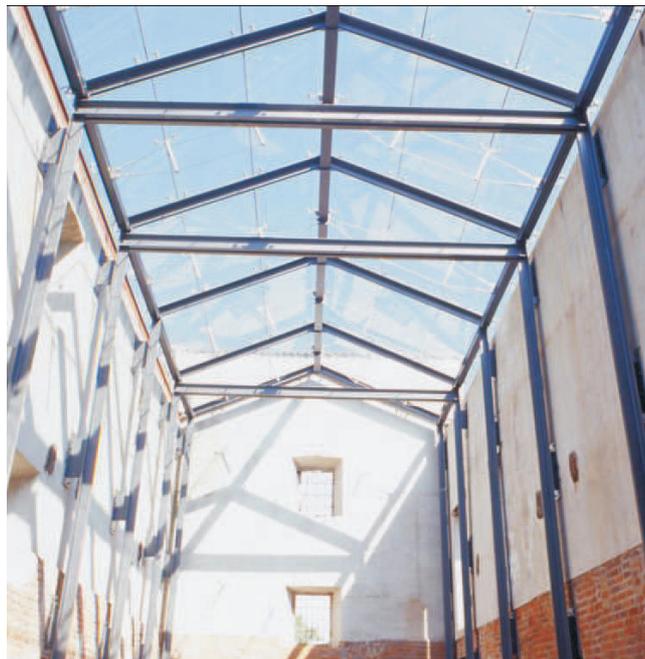


Fig.1 Vista interna.

U factor : 1,06

Energia solare totale respinta: 40%

Riduzione dell'abbaglio: 24%

Riduzione dell'Ultravioletto: ≥99%

Infrarosso (980 nm) respinto: 70%

All'interno dell'ambiente vi è una tenda bianca microforata.



Fig.2 Vista interna.

## 9. CASTELLO DI JUVAL

### 9.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

**Localizzazione:**

NATURNO (BZ, Trentino Alto Adige), ITALIA.

**Coordinate geografiche:** 46°39'00"N 10°58'30"E

**Quota media:** 680 m s.l.m.

**Condizioni climatiche del sito:**

INVERNO min. -5° C max. 9° C

ESTATE min. 13° C max. 29° C

**Precipitazioni annue:** da 13 a 83 mm/mese.

### 9.2 STORIA

**Periodo di edificazione:** I sec. d.C.

**Storia del sito**

Nel Medioevo il castello di Juval controllava, dalla rocca su cui si erge, l'accesso alla valle di Senales nella val Venosta. La più antica testimonianza in fonti scritte risale al 1278, quando il castello era di proprietà di Hugo von Montalban. Nel XIV secolo il maniero appartenne invece ai Signori di Starkenberg. Dopo vari cambi di proprietà nei secoli seguenti, Castel Juval stava per cadere in rovina. Ma nel 1913, l'olandese William Rowland acquistò la rovina e la fece accuratamente restaurare. Nel 1983 Castel Juval passò nelle mani dell'alpinista Reinhold Messner.

La conclusione dei lavori di ristrutturazione è rappresentata dalla copertura dello spazio accanto alla torre della rocca (Fig.3, 4). Questo spazio, prima del risanamento, era un ammasso di ruderi e di rovine, poiché i contadini della zona lo avevano trasformato in una cava di pietre per costruire le loro abitazioni; tuttavia l'alpinista se ne era innamorato anche per la presenza di due cedri himalayani che stavano nel cortile inferiore e l'aveva acquistato per utilizzarlo come abitazione. Successivamente, però, Messner in parte lo ha trasformato anche in un museo di rari oggetti d'arte e di culto asiatici provenienti dal Tibet e oggi fa parte del grande progetto museale "Messner Mountain Museum".

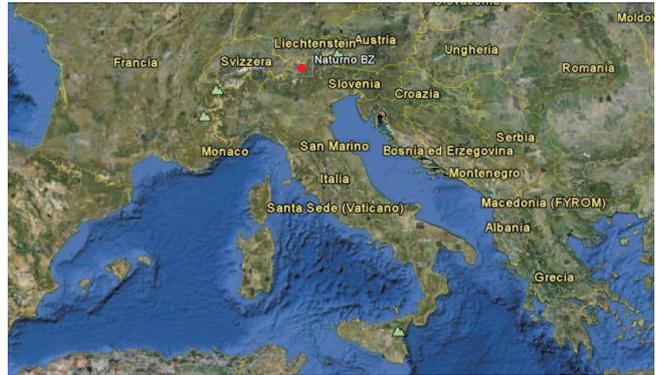


Fig.1 Vista aerea del sito.

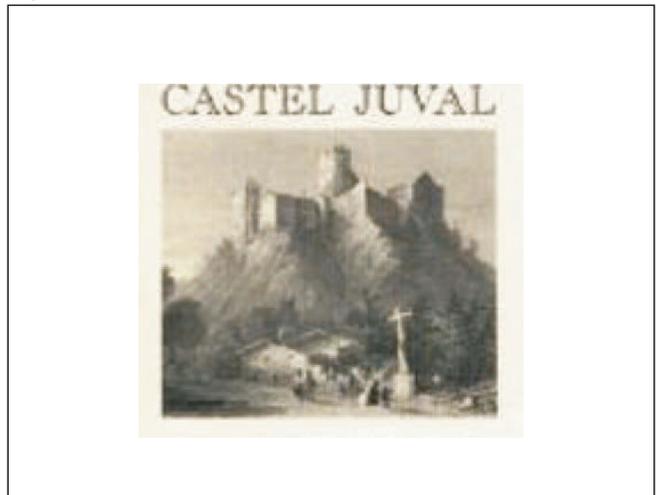


Fig.2 Immagine storica del Castello.



Fig.4 Vista del Castello prima dell'intervento di copertura.



Fig.3 Vista del Castello dopo l'intervento di copertura.

## 9. CASTELLO DI JUVAL

### 9.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Karl Spitaler, Robert Danz.

**Anno dell'intervento:** 1997.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** muratura in pietra.

**Estensione copertura:** base m<sup>2</sup> 200 circa.  
Lunghezza max m 17,00 larghezza m 15,00.

**Tipo di copertura:** la copertura riprende formalmente i tratti della vecchia struttura del tetto.

**Motivazioni:** proteggere le vecchie mura da ulteriori crolli e rendere utilizzabile lo spazio per l'esposizione di sculture. Per motivi di tutela è stata scelta una copertura in vetro con un numero limitato di punti d'imposta. La scelta di una copertura in vetro permette di assicurare una illuminazione dall'alto ai pezzi esposti nel museo.



Fig.1 Vista esterna del castello con la copertura in vetro.



Fig.2 Vista del Castello dopo l'intervento di copertura.

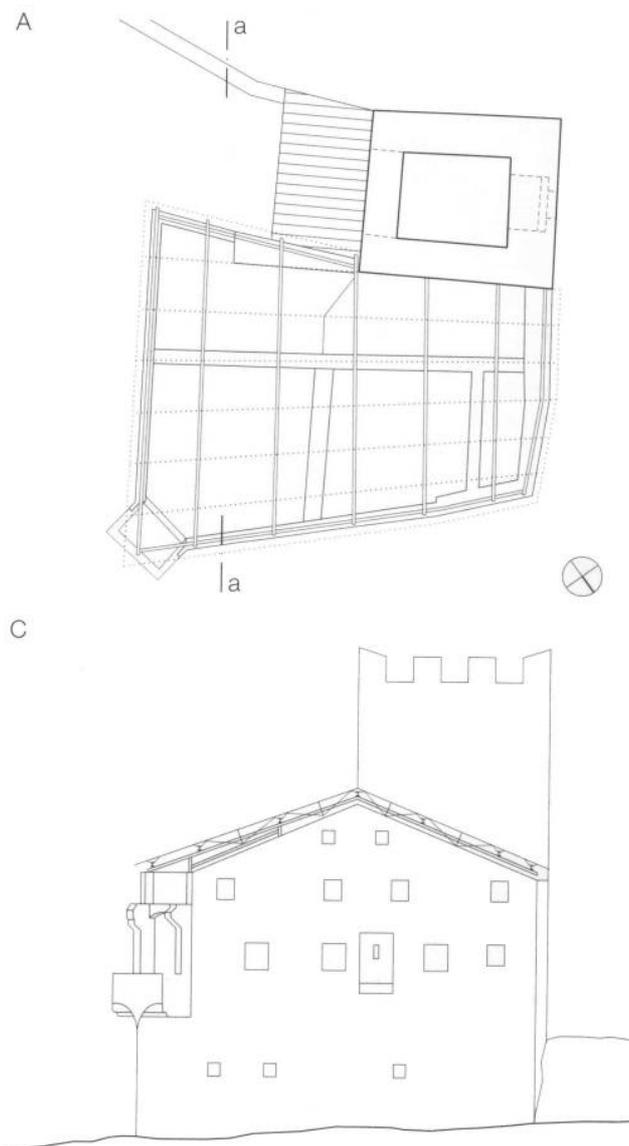


Fig.3 A: pianta, B: sezione a-a, C: prospetto nord-est.

## 9. CASTELLO DI JUVAL

### **Bibliografia**

BEHLING, Stefan, BEHLING Sophia, *Glass: structure and technology in architecture*, Prestel, Monaco 2000.

*Glass roof to Juval Castle*, «A+U Architecture and Urbanisme», 02 (2000).

SCHITTICH, C., STAIB, G., *Copertura di vetro sopra le rovine di un castello in Alto Adige, Italia*, Atlante del vetro, Utet, Torino 1999.

*Toiture de verre sur des ruines, château de Schloss Juval, Haut-Adige, Italie*, «L'architecture d'aujourd'hui», 342 (Settembre-Ottobre 2002).

WURM, J., *Glass structures: design and construction of self-supporting skins*, Birkhäuser, Berlino 2007.

**Climatizzazione:** la copertura in vetro non chiude in maniera completa i ruderi, lasciando sopralzi e aperture laterali che assicurano la ventilazione naturale (Fig.1-3).

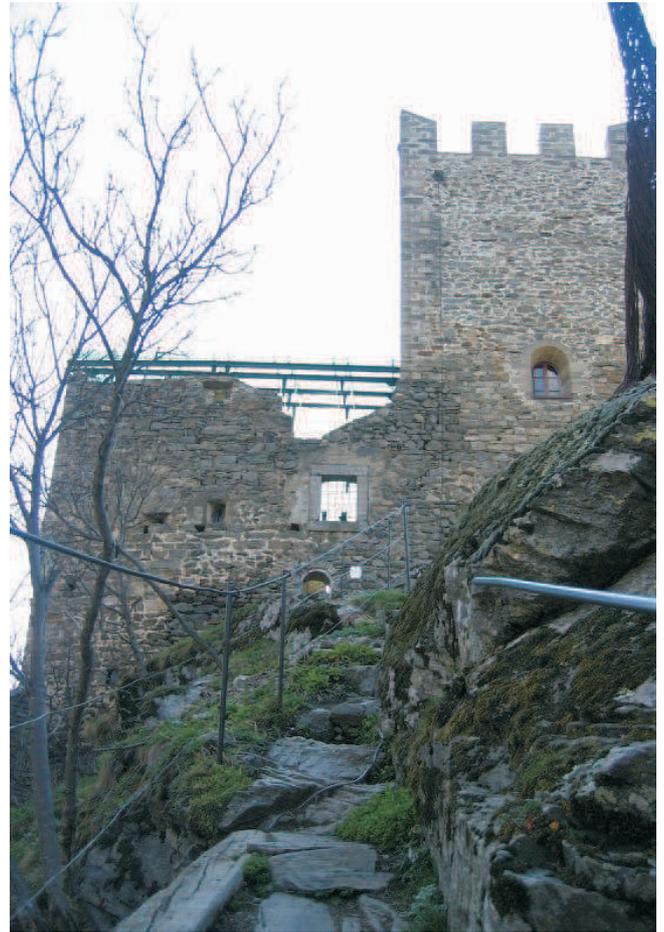


Fig.1 Vista esterna.



Fig.2 Vista esterna.

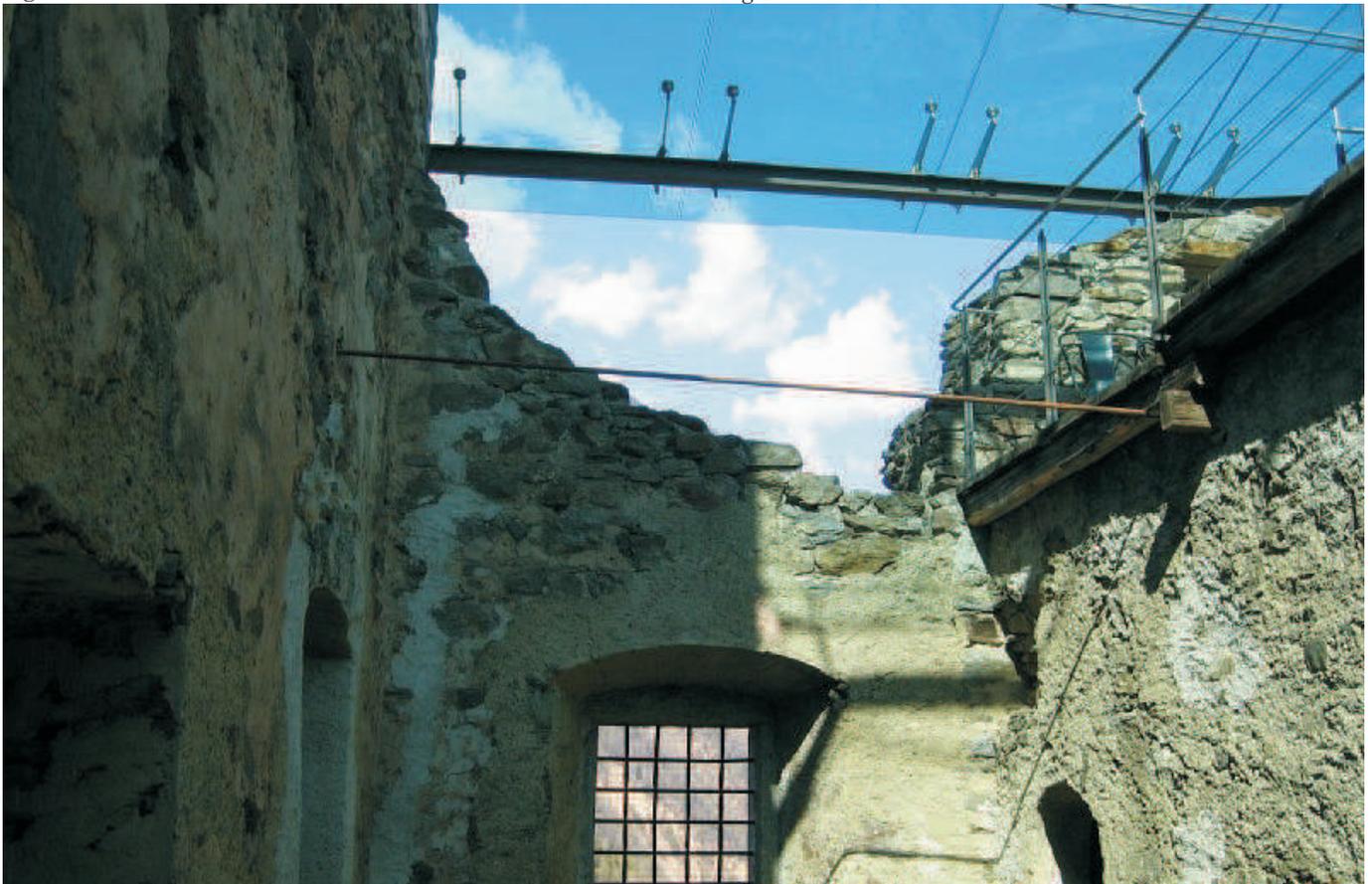


Fig.3 Vista interna.

## 9. CASTELLO DI JUVAL

### 9.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura:** la copertura presenta solo alcuni punti di appoggio e uno sbalzo dai 25 ai 40 cm oltre i ruderi. La struttura è costituita da profili in acciaio galvanizzato (*HEB 120*), connessi puntualmente alle pareti all'interno di apposite cavità. Le travi reticolari "a lisce di pesce", che coprono la luce dell'intero spazio, sono appoggiate a delle traversine di bordo. Il dimensionamento dei pannelli di vetro e delle travi d'acciaio si basa su un carico di progetto di  $185 \text{ kg/m}^2$ , considerando il carico neve più il peso proprio. Ciascun elemento è vincolato puntualmente ai quattro vertici con attacchi a "borchia" in acciaio inox ed è rinforzato all'intradosso con due cavi longitudinali pretesi allo scopo di limitare la freccia massima e di conferire alla struttura un ulteriore appoggio intermedio elasticamente cedevole (Fig.2). Allo scopo di valutare preventivamente la capacità portante limite ultima dell'elemento tipo, alcuni moduli sono stati sottoposti a prove di carico uniforme presso l'Università di Innsbruck mediante l'applicazione diretta di sacchi riempiti di sabbia su pannelli posti in posizione orizzontale e con vincoli identici a quelli previsti in opera. I supporti a borchia hanno consentito di regolare la tolleranza, durante l'installazione, nelle direzioni x, y, z. Il foro nel pannello di vetro è stato sigillato dopo l'installazione con un bicomponente in resina epossidica.

**Materiali impiegati per la copertura:** poiché il piano della superficie del tetto è di forma trapezoidale, la suddivisione delle lastre è radiale. Ciò significa che non ci sono pannelli di vetro uguali tra loro. I moduli di vetro sono costituiti da pannelli rettangolari stratificati aventi dimensioni variabili (3400x2000 mm circa) realizzati con due lastre di 8 mm di spessore, entrambe temperate termicamente, con uno strato intermedio di *PVB* di 1,56 millimetri. La lastra inferiore è di colore verde *Parsol*.



Fig.1 Vista dei cavi di tensione del tetto in vetro.

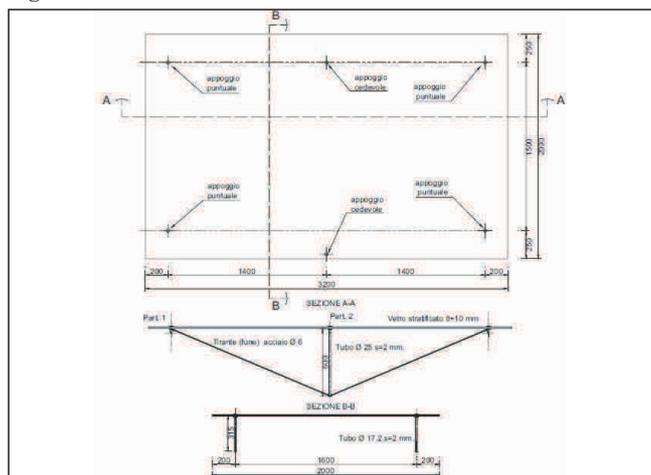


Fig.2 Schema e dimensioni di una lastra in vetro.



Fig.3 Vista esterna.



Fig.4 Vista interna.



Fig.5 Vista dei cavi di tensione del tetto in vetro.

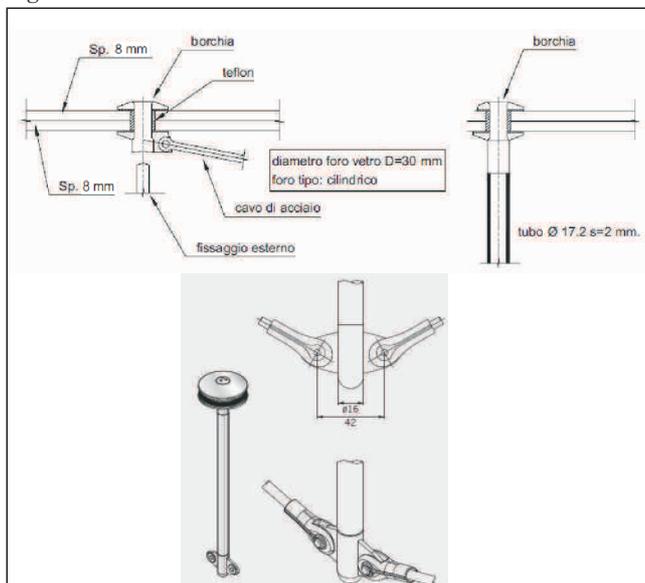


Fig.6 Dettaglio del braccio e della borchia per il supporto delle lastre.

## 10. MUNICIPIUM ROMANO DI OPITERGIUM

### 10.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

#### Localizzazione:

ODERZO (TV, Veneto), ITALIA.

**Coordinate geografiche:** 45°46'59"N 12°29'32"E

**Quota media:** m 15 s.l.m.

#### Condizioni climatiche del sito:

INVERNO min. 1° C max. 8° C

ESTATE min. 17° C max. 27° C

**Precipitazioni annue:** da 50 a 99 mm/mese.

### 10.2 STORIA

**Periodo di edificazione:** fine I sec. a.C. – prima metà del I sec. d.C.

#### Storia del sito

Oderzo, anticamente *Opitergium*, è un Comune della Sinistra Piave inserito nel cuore della pianura veneta le cui origini risalgono alla prima età del ferro (fine del X secolo a.C.).

In seguito alla costruzione della strada consolare Postumia (148 a.C.), che collegava Aquileia alla Liguria, la cittadina finì sotto l'influenza politico-militare romana, sino ad essere dichiarata *municipium* da Cesare nel 48 a.C., vivendo poi il suo momento di massimo splendore economico e culturale nel I secolo d.C., durante il regno di Augusto.

Gli scavi furono condotti dalla Soprintendenza per i Beni Archeologici del Veneto tra il 1983 e il 1985, nel 1989 e ancora tra il 1992 e il 1995, in occasione dei lavori per la costruzione dei complessi tra Via Roma e Via Mazzini.

Integrata nel complesso edilizio di piazza del Foro romano, al di sotto del piano pavimentale, l'area archeologica conserva i resti di una parte del complesso forense, di un tracciato stradale e di una abitazione con ricche decorazioni pavimentali, tutti riferibili ad età augustea. Il foro (in pianta: A), costruito sopra a quello di età tardo-repubblicana, era lastricato in trachite euganea e presentava sui lati lunghi un portico, al quale si accedeva da una scala posta sul lato breve sud-occidentale. Si conservano oggi a vista una buona porzione di lastricato e il limite della piazza su cui poggiavano i tre gradini (ricostruiti) che davano accesso al portico sopraelevato. Sul lato occidentale sorgeva una doppia fila di botteghe, successivamente trasformate in edifici variamente utilizzati come sedi di corporazioni, sale riunioni dei magistrati, curia o sacelli per il culto imperiale. Sul lato settentrionale del complesso sorgeva la basilica (in pianta: B). Di questa sono visibili le tracce del colonnato interno con le quindici basi in ciottoli e mattoni.

Sul lato occidentale il foro era delimitato da una strada, oggi ricostruibile unicamente grazie alla presenza del condotto fognario (in pianta: D) di cui sono visibili due consistenti segmenti. Il collettore era in mattoni sesquipedali e presentava copertura a volta. Posizione, orientamento e dimensioni (larghezza 6 m) hanno indotto a identificare nel soprastante asse viario il *cardo maximus*, nel suo punto di incrocio con il decumano.

Separata dal cardine massimo urbano e visibile dalla galleria che collega la piazza a Via Mazzini è una *domus* di

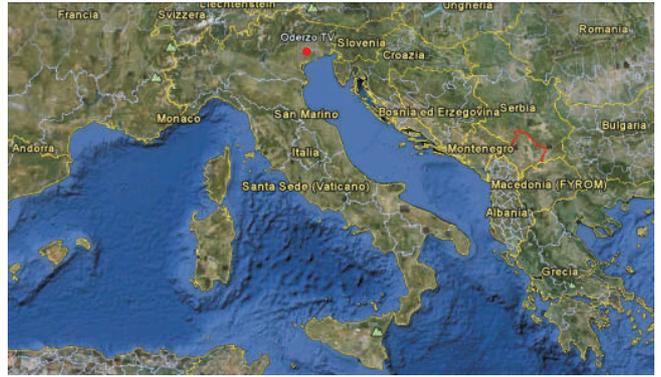


Fig.1 Vista aerea del sito con l'intervento di copertura.

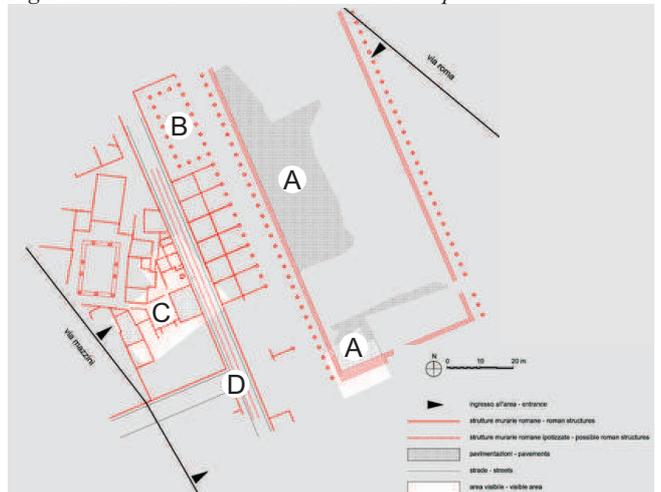


Fig.2 Planimetria dell'area archeologica.

notevole complessità planimetrica, caratterizzata da due nuclei distinti a diverso orientamento riuniti e ristrutturati in età augustea (in pianta: C). Del maggiore nucleo della casa, con orientamento nord-sud e organizzato attorno ad un peristilio a giardino, si notano un ambiente a L in tessellato bianco ornato da motivo a tralcio d'edera e piccole porzioni di altri ambienti ad esso contigui con pavimenti in tessellato bianco a fasce nere. Del nucleo minore della casa, organizzato attorno ad un cavedio, sono visibili tre triclini pavimentati con battuto in fondo bianco e inserzioni di tessere e di frammenti di marmi policromi circondati da fasce in tessellato.

## 10. MUNICIPIUM ROMANO DI OPITERGIUM

### 10.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Ing. Giancarlo Casetta.

**Anno dell'intervento:** 1990.

**Estensione sito archeologico:** circa 10000 m<sup>2</sup>.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** resti delle strutture murarie e delle pavimentazioni in pietra del foro romano, della basilica e di una casa privata.

**Estensione copertura:** base m<sup>2</sup> 225.

Lunghezza m 15, larghezza m 15, altezza max circa m 9,00.

**Tipo di copertura:** struttura piramidale in acciaio e vetro (Fig. 1-2, 5).

**Motivazioni:** proteggere il sito archeologico e assicurare una continuità di fruizione rendendo l'area pedonale e realizzando un percorso sospeso sui resti (Fig.3).

#### **Bibliografia**

TIRELLI, M., *Itinerari archeologici di Oderzo*, Treviso 2003.

*I luoghi della cultura*, Roma 2006, pp. 382-383.

BONETTO, J., *Veneto (Archeologia delle Regioni d'Italia)*, Roma 2009.

**Climatizzazione:** la copertura vetrata è ventilata grazie alle aperture laterali realizzate per consentire il passaggio pedonale (Fig.3). Alla sommità della piramide, per sfruttare l'effetto camino, la lattoneria è sagomata in modo da consentire la fuoriuscita dell'aria calda. Le aperture al piano terra funzionano da ripresa dei moti convettivi verso l'alto. Le temperature interne estive non superano i 30° C; i reperti sottostanti, in estate, non arrivano oltre i 25° C.

### 10.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura:** fondazione in c.a., struttura di profili tubolari in acciaio su cui si agganciano i telai in alluminio dei vetri (Fig.4).

**Materiali impiegati per la copertura:** base in c.a., acciaio, telai in alluminio a profilo freddo e vetro stratificato temprato 5+5.



Fig.1 Vista dall'alto della copertura vetrata.



Fig.2 Vista esterna della copertura vetrata.

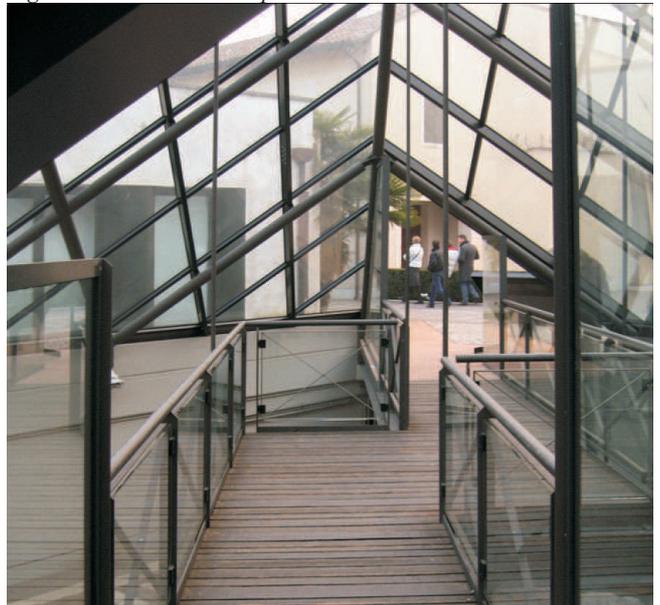


Fig.3 Vista interna del passaggio pedonale.



Fig.4 Dettaglio di aggancio della struttura tubolare.



Fig.5 Vista esterna.

## 11. DOMUS DEL CHIRURGO A RIMINI

### 11.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

**Localizzazione:**

RIMINI (Emilia Romagna), ITALIA.

**Coordinate geografiche:** 44°03'44" N 12°34'03" E

**Quota media:** m 6,00 s.l.m.

**Condizioni climatiche del sito:**

INVERNO min. 1,4° C max. 8,7° C

ESTATE min. 17,0° C max. 27,7° C

**Precipitazioni annue:** da 39 a 86 mm/mese.



### 11.2 STORIA

**Periodo di edificazione:** II - VI sec. d.C.

**Storia del sito**

Il sito archeologico della domus del chirurgo è situato nel centro storico di Rimini e i suoi primi ritrovamenti risalgono al 1989, in occasione dei lavori di riqualificazione di Piazza Ferrari, quando furono scoperti antichi mosaici e affreschi appartenuti a una residenza romana di un chirurgo del II secolo d.C., insieme a oltre 150 strumenti di lavoro perfettamente conservati.

Si tratta di un patrimonio storico e archeologico unico, tra i più importanti dell'epoca romana. In seguito a scavi avvenuti tra il 1989 e il 1997, sono emersi numerosi altri reperti. I resti più significativi corrispondono a parte di un isolato residenziale situato al margine settentrionale dell'antica *Ariminum*. Ai lati correvano due strade disposte ad angolo retto - un cardo e un decumano - all'interno delle quali si erano succedute una casa di età imperiale, che comprendeva anche il settore oggi noto come domus del Chirurgo, e un'altra domus di epoca tardo-imperiale (V-VI secolo d. C.) con mosaici policromi. La casa del II secolo d. C. era costruita su due piani, ma fu distrutta durante un incendio nella seconda metà del III secolo, durante le incursioni



Fig.1 Vista aerea del sito con l'intervento di copertura.

barbariche che si abatterono nella regione. Proprio il crollo del tetto ha consentito la perfetta conservazione dei mosaici, degli arredi e degli utensili.

L'insieme dei resti offre l'immagine della stratificazione storica ed urbanistica che testimonia duemila anni di vita della città.



Fig.3 Vista di piazza Ferrari prima dell'intervento.



Fig.4 Vista di piazza Ferrari dopo l'intervento.

# 11. DOMUS DEL CHIRURGO A RIMINI

## 11.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Studio Cerri Associati Engineering di Milano.

**Anno dell'intervento:** 2007.

**Estensione sito archeologico:** oltre 700 m<sup>2</sup>.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** mosaici policromi e affreschi, tracce di pavimenti in cocciopesto.

**Estensione copertura:** base m<sup>2</sup> 1.189.

Lunghezza m 41, larghezza m 29, altezza dei fronti circa m 2,00.

Superficie vetrata circa mq 300.

**Tipo di copertura:** la copertura ha una struttura in acciaio, nella parte perimetrale è in vetro (Fig.1); nella parte centrale è coperta da un giardino pensile e presenta lucernari a nastro apribili (Fig.2). Le pareti perimetrali sono costituite da vetri che permettono la visione dello scavo anche dall'esterno (Fig.5).

**Motivazioni:** proteggere lo scavo archeologico dagli agenti atmosferici per permettere la conservazione e la visita al pubblico come estensione del vicino museo, riqualificando l'assetto architettonico ed ambientale di piazza Ferrari.



Fig.1 Vista esterna.



Fig.2 Vista esterna della copertura vetrata, del tetto giardino e del lucernario.



Fig.4 Vista esterna notturna.

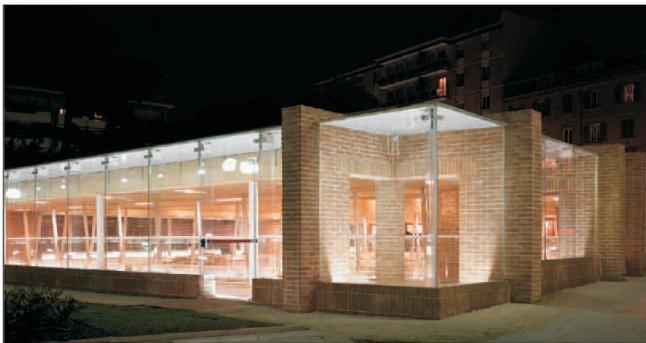


Fig.5 Vista esterna notturna.

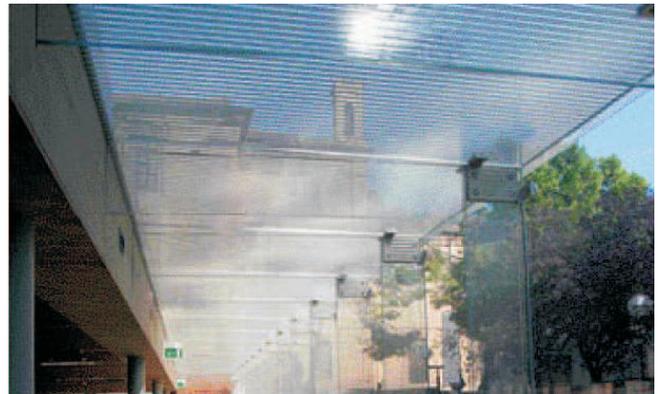


Fig.3 Vista interna.

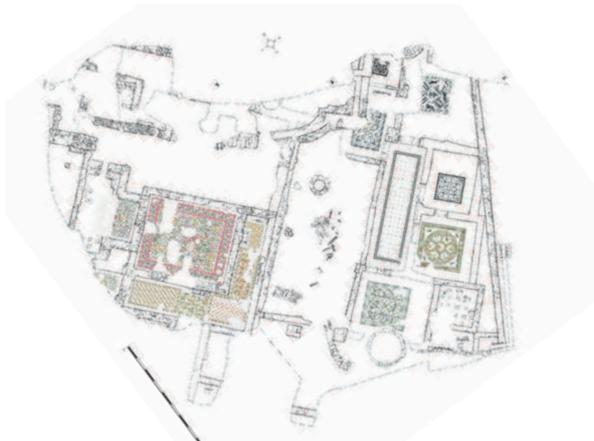


Fig.6 Planimetria complessiva dell'area archeologica di piazza Ferrari.

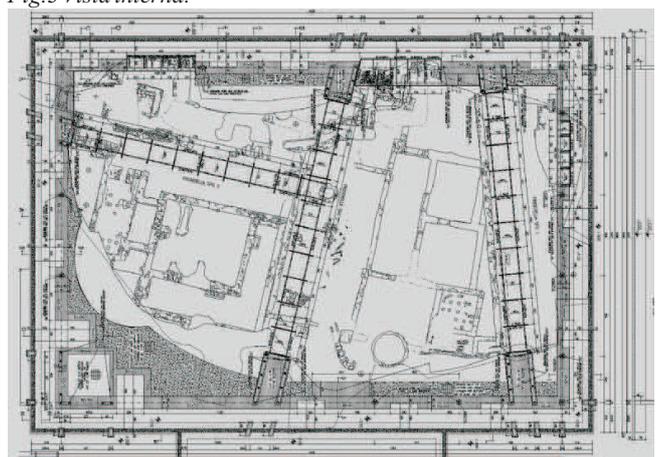


Fig.7 Planimetria di progetto per la Domus.

## 11. DOMUS DEL CHIRURGO A RIMINI

### **Bibliografia**

MAGAROTTO, E., Dip. Best, Politecnico do Milano, *La Domus del chirurgo a Rimini*, «Archeologia sottovetro», NF 338.

TRICOLI, A., *Nell'altra Rimini: la Domus del Chirurgo*, Agathòn, Offset Studio, Palermo 2008/2.

*Il chirurgo torna a casa*, «L'Arengo», periodico del Comune di Rimini, novembre 2007.

**Climatizzazione:** è stato scelto vetro serigrafato al 60% con righe orizzontali, in grado di schermare una buona parte di raggi solari incidenti (Fig.2).

Nella parte centrale della copertura vi sono lucernari a nastro apribili per il ricircolo dell'aria (Fig.1).



Fig.1 Vista esterna dei lucernari a nastro.

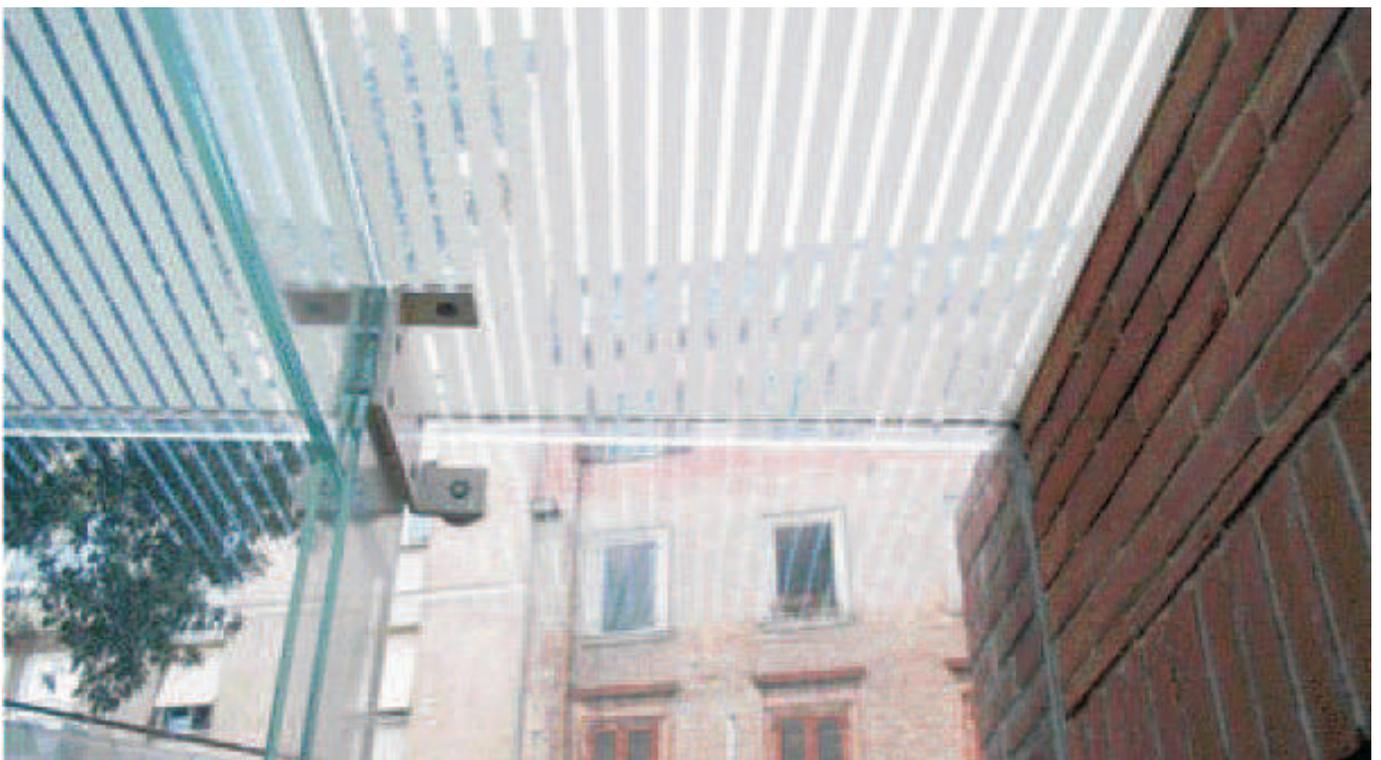


Fig.2 Vista esterna.

# 11. DOMUS DEL CHIRURGO A RIMINI

## 11.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura vetrata:** setti in muratura, struttura in acciaio. La copertura è sostenuta, sui bordi, da una serie di travi in vetro che si congiungono con montanti, anch'essi in vetro (Fig.3).

**Materiali impiegati per la copertura:** le lastre di copertura serigrafate al 60% con righe orizzontali sono costituite da due vetri extrachiaro di 12 mm ciascuno accoppiati e stratificati, il più esterno dei quali temperato e quello interno indurito, tra cui è interposto uno strato di Pvb da 1,52 mm. La scelta di questa soluzione, rispetto all'impiego di vetri di spessore inferiore (10+10), è stata dettata dal fatto che la freccia dovuta al peso della vetragezione sarebbe risultata circa 11 mm e, dunque, antiestetica. Le travi in vetro della copertura sono anch'esse stratificate con due lastre di vetro extrachiaro dello spessore di 12 mm ciascuna e uno strato di Pvb (1,52), una delle quali indurita e l'altra temperata (Fig.4). L'intera area è, inoltre, perimetrata da un'ampia vetrata, caratterizzata da estrema trasparenza e da strutture portanti anch'esse trasparenti: essa è costituita da un doppio vetro extrachiaro 10+10 (di cui quello esterno temperato e quello interno indurito), collegato da uno strato di 1,52 mm di Pvb. I montanti che sostengono tale facciata sono stati invece realizzati mediante due vetri monolitici da 12 mm ciascuno, separati in modo da aumentare i livelli di sicurezza della struttura: se uno dei due si rompesse, l'altro avrebbe modo di sorreggere il peso della struttura senza farla collassare in tempi brevi (Fig.2).

La parte centrale della struttura è caratterizzata dalla presenza di un giardino pensile piante arbustive mediterranee e con lucernari a nastro.

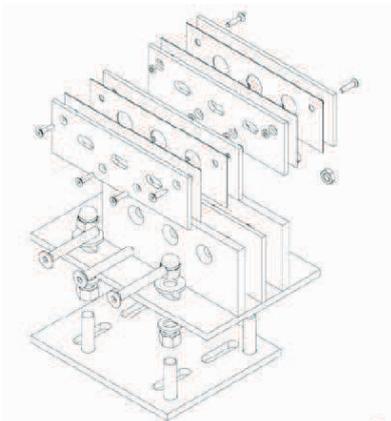


Fig.1 Esploso assometrico della struttura che sostiene il montante vetrato della parete trasparente, con la sequenza di montaggio.



Fig.2 Piede del montante in vetro incastrato tra piastre in acciaio.



Fig.3 Vista interna della struttura vetrata.

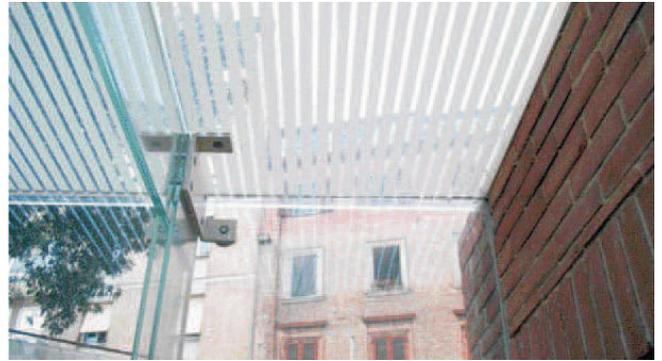


Fig.4 Connessione tra montante, trave e lastre serigrafate.

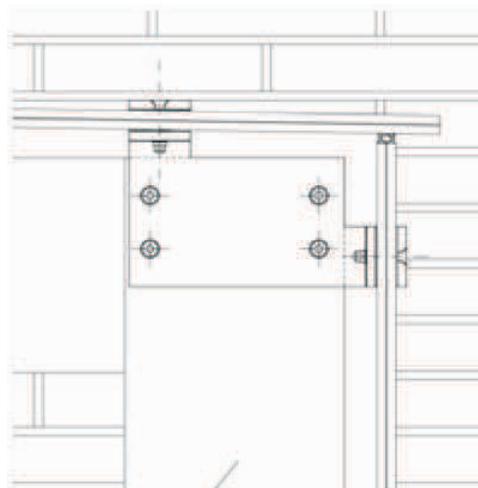


Fig.5 Connessione tra montante, parete vetrata e copertura vetrata.

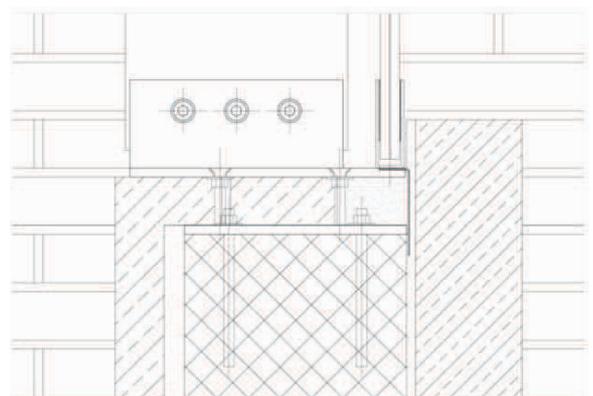


Fig.6 Piede del montante in vetro incastrato tra piastre in acciaio.

## 12. SITO ARCHEOLOGICO DI PIAZZA SANT'ANNA A TERAMO

### 12.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

**Localizzazione:** TERAMO, ITALIA.

**Coordinate geografiche:** 42°39'30"N 13°42'16"E

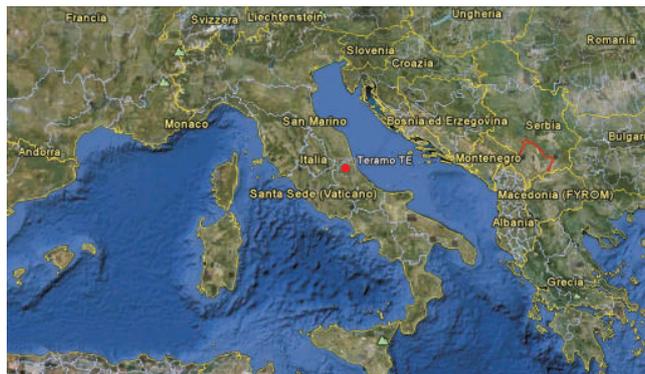
**Quota media:** m 271 s.l.m.

**Condizioni climatiche del sito:**

INVERNO min. 2,9° C max. 9,3° C

ESTATE min. 15,7° C max. 26,9° C

**Precipitazioni annue:** da 51 a 86 mm/mese.



### 12.2 STORIA

**Periodo di edificazione:** fine I - VI sec. a.C.

**Storia del sito**

In Piazza Sant'Anna, al fianco della Chiesa omonima, si trovano i resti dell'antica cattedrale di Santa Maria Aprutiensis, l'antica cattedrale di Teramo eretta nel periodo bizantino, intorno al VI secolo, sui resti di una domus romana.

La chiesa medievale venne ricostruita nella prima metà del XII secolo e subito distrutta, insieme alla città, a causa di un incendio, nel 1155. Le porzioni dell'antico edificio scampate alla rovina del fuoco dovevano essere ancora visibili nel 1590, anno in cui il vescovo dispose che nell'area vi si stabilisse il collegio dei Padri della Dottrina Cristiana.

Il perimetro del fabbricato della chiesa aveva dimensioni sicuramente maggiori del solo spazio occupato dall'area dell'attuale chiesa di Sant'Anna. Con i lavori di restauro (1982-1986) della chiesa attuale, la Sovrintendenza, nella persona di Glauco Angeletti, si preoccupò di eseguire degli scavi, sia sull'ala destra che sull'ala sinistra della Chiesa, allo scopo di meglio conoscere la conformazione dell'antica cattedrale.

Gli scavi, iniziati nel 1981 - 1983, ma intensificati nel 1990 -1991, dimostrano la vera estensione dell'antica cattedrale, suggerendo di mantenere scoperti i ritrovamenti sull'ala destra, i più cospicui, coperti successivamente con una struttura in acciaio e vetro che occupa tutto il fianco della piazza Sant'Anna (Fig.3). Sul lato sinistro, invece, alcuni vetri sul piano stradale permettono di vedere i resti sottostanti coperti dalla strada (Fig.2).



Fig.1 Vista aerea del sito prima dell'intervento di copertura.



Fig.2 Via dell'antica cattedrale a sinistra della Chiesa.



Fig.3 Visione d'insieme dei ruderi a destra della Chiesa.

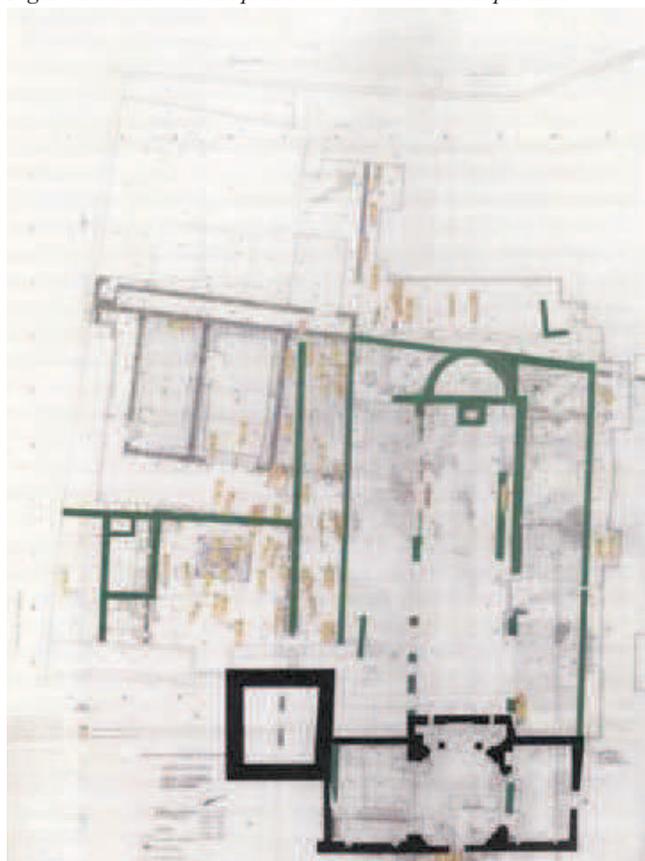


Fig.4 Planimetria dell'antica chiesa di Santa Maria Aprutiensis.

## 12. SITO ARCHEOLOGICO DI PIAZZA SANT'ANNA A TERAMO

### 12.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Ufficio tecnico del comune di Teramo: Arch. Cimini, Ing. Rastelli, Ing. Figliola.

**Anno dell'intervento:** 1991.

**Estensione sito archeologico:** -

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** mattoni posti in opera in strutture romane della seconda metà del I secolo, pavimentazioni in coccio pesto.

**Tipo di copertura:** copertura opaca con chiusura verticale vetrata che racchiude i reperti (Fig. 1).

**Motivazioni:** permettere la visibilità dei resti dalla piazza.

#### **Bibliografia**

ANGELETTI, G., *S. Maria Aprutensis*, Teramo 2000.

TRICOLI, A., *La città nascosta*, monografie di Agathon, 2, Palermo 2011.

**Climatizzazione:** non vi è schermatura né impianto di climatizzazione perché in fase di progettazione uno studio apposito ha dimostrato che non era necessario, lasciando però delle aperture per la ventilazione naturale.

### 12.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura:** struttura reticolare spaziale in acciaio, con nodi sferici *Mero* e attacchi puntuali per i vetri (Fig.4).

**Materiali impiegati per la copertura:** struttura in acciaio inox; pannelli sandwich e sovrastante guaina impermeabile per la copertura; vetro stratificato temprato per la parte inclinata della copertura e per le pareti.



Fig.3 Vista frontale della copertura



Fig.4 Vista interna della struttura reticolare spaziale in acciaio.



Fig.1 Vista esterna della copertura.



Fig.2 Vista esterna della copertura.

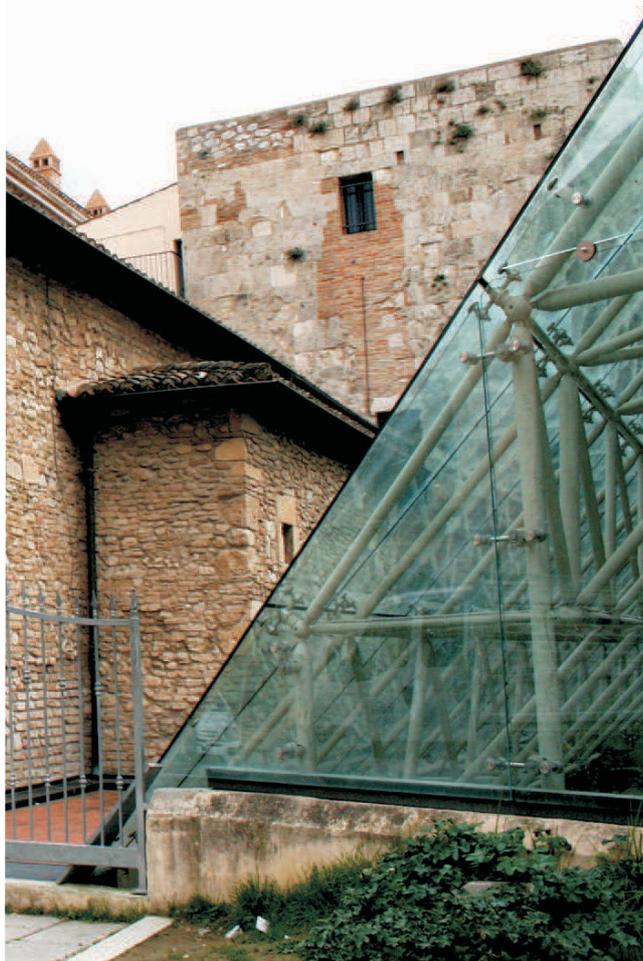


Fig.5 Dettaglio della vetrata di copertura.

# 13. ROVINE DELLA CATTEDRALE PALEOCRISTIANA DI TORINO

## 13.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

**Localizzazione:** TORINO (Piemonte), ITALIA.

**Coordinate geografiche:** 45°04'24"N 7°41'07"E

**Quota media:** m 233 s.l.m.

**Condizioni climatiche del sito:**

INVERNO min. -3° C max. 7° C

ESTATE min. 14° C max. 28° C

**Precipitazioni annue:** da 41 a 120 mm/mese.

## 13.2 STORIA

**Periodo di edificazione:** fine IV sec. d.C.

**Storia del sito**

Nel Medioevo la cattedrale di Torino era composta da tre chiese affiancate dedicate a Cristo Salvatore, a San Giovanni Battista e a Maria. La prima a essere costruita fu la basilica del Salvatore, a tre navate, in origine separate da colonnati, di cui restano i soli basamenti in pietra. Le tre chiese principali della città vennero abbattute tra il 1490 e il 1492 per costruire il duomo rinascimentale attuale.

Scavi archeologici hanno riportato alla luce vestigia di edifici d'epoca romana, ai quali si sovrapposero le basiliche cristiane. Gli scavi condotti dalla Soprintendenza per i Beni Archeologici in piazza S. Giovanni tra il Duomo e il teatro romano, iniziati nel 1996 e proseguiti per oltre dieci anni, hanno permesso di riaprire e ampliare le indagini nell'area esplorata nel 1909 da Cesare Bertea (Torino, 23 giugno 1866 – 18 gennaio 1941, ingegnere presso l'Ufficio Regionale per la Conservazione dei Monumenti del Piemonte e della Liguria) e Alfredo d'Andrade (Alfredo Cesare Reis Freira de Andrade, Lisbona, 26 agosto 1839 – Genova, 30 novembre 1915, architetto e direttore dell'Ufficio Regionale per la Conservazione dei Monumenti del Piemonte e della Liguria). Già allora si erano individuati i resti dell'antica basilica paleocristiana del Salvatore, ma si decise di rinterrarli dopo aver prelevato il mosaico romano del presbiterio, risistemato successivamente in prossimità del Duomo, dietro la torre campanaria.

Con i nuovi interventi finanziati dal Comune è stato completato lo scavo di tutto il settore a nord del Duomo per creare un'area archeologica sotterranea.



Fig.3 L'area archeologica al termine degli scavi nel marzo 2000.



Fig.1 Vista aerea del sito.

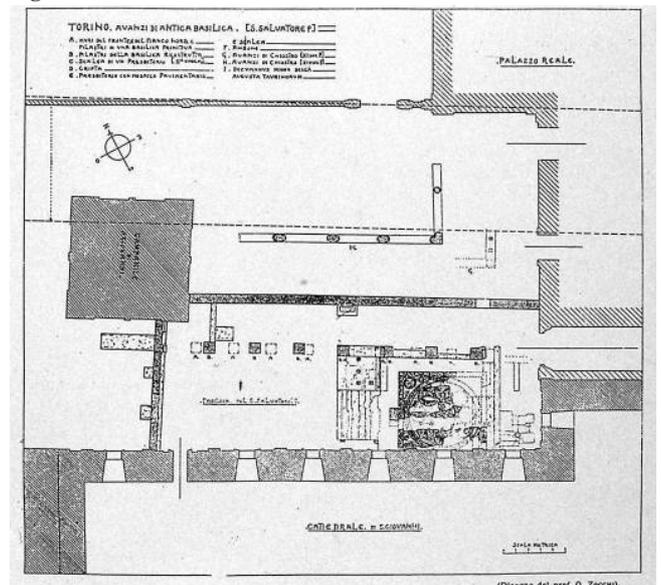


Fig.2 Planimetria della chiesa del Salvatore scoperta nel 1909, P. Toesca 1910.

## 13. ROVINE DELLA CATTEDRALE PALEOCRISTIANA DI TORINO

### 13.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Studio Gabetti e Isola.

**Anno dell'intervento:** 2000.

**Estensione sito archeologico:** circa m<sup>2</sup> 300.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** basamenti in pietra, mosaico dell'antico pavimento della chiesa.

**Estensione copertura:** base circa m<sup>2</sup> 40.

Lunghezza circa m 8,00, larghezza circa m 5,00, altezza max m 2,50.

**Tipo di copertura:** copertura piramidale in acciaio e vetro (Fig. 1, 2).

**Motivazioni:** permettere la visibilità del mosaico dalla piazza.

#### **Bibliografia**

CASARTELLI NOVELLI, S., *Le fabbriche della cattedrale di Torino dall'età paleocristiana all'alto Medioevo*, in «Studi Medievali», XI, 1970.

PEJRANI BARICCO, L., *La basilica del Salvatore e la cattedrale di Torino: considerazioni su uno scavo in corso*, in Liliana Mercado, Egle Micheletto (a cura di), «Archeologia in Piemonte. L'età romana», vol. III. Il Medioevo, Allemandi, Torino 1998.

AIMONE, M., *Le antiche cattedrali di Torino: gli edifici e i loro committenti*, in Enrico Castelnuovo (a cura di), Torino, I luoghi dell'arte, Istituto della Enciclopedia Italiana Treccani, Roma c.d.s.

**Climatizzazione:** la progettazione non ha tenuto sufficientemente in conto il problema della condensa affidando soltanto a fessure lasciate alla base della piramide vetrata la funzione di ricircolo dell'aria. Immediatamente si è verificato un consistente gocciolamento a causa della condensa sui vetri. Dalla posa del lucernario nel 2000 si è giunti al 2006, nell'imminenza delle Olimpiadi, per la predisposizione provvisoria, ma tuttora esistente, di un impianto di ventilazione forzata che ha permesso di rimontare in sicurezza i pannelli del mosaico romano al di sotto della piramide, previa compartimentazione di questo settore dell'area archeologica mediante tende di plastica trasparente. Il progetto di musealizzazione dell'area del San Salvatore non è mai stato completato e manca del necessario impianto di climatizzazione.



Fig.1 Vista esterna della copertura.



Fig.2 Vista esterna della copertura.



Fig.3 Vista interna della copertura.

### 13.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura:** profili tubolari in acciaio, attacchi puntuali per l'ancoraggio dei vetri (Fig.3-4).

**Materiali impiegati per la copertura:** struttura in acciaio inox, vetro stratificato temprato.



Fig.4 Dettaglio della vetrata di copertura.

# 14. ROVINE DELLA CATTEDRALE MEDIEVALE DI HAMAR

## 14.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

### Localizzazione:

HAMAR (Hedmark), NORVEGIA.

**Coordinate geografiche:** 60°47'31" N 11°02'18" E

**Quota media:** m 122 s.l.m.

### Condizioni climatiche del sito:

INVERNO min. -30° C max. 3° C

ESTATE min. 5° C max. 26° C

**Precipitazioni annue:** da 3 a 24 mm/mese.

## 14.2 STORIA

**Periodo di edificazione:** 1152-1200 d.C.

### Storia del sito

Accanto ai resti dell'antica sede vescovile, ora museo archeologico, si trovano i resti della Cattedrale, in un punto dominante, una leggera altura poco distante dalla riva di un lago (Fig.2).

L'inizio dell'edificazione della Cattedrale risale al 1152, la conclusione è databile intorno al 1200. In questo arco di tempo, lo stile romanico adottato all'inizio andrà trasformandosi via via in gotico. La Cattedrale è stata costruita come basilica romanica a una navata e corridoi a volta. Il fronte occidentale aveva due torri, tra la navata e il coro vi era il transetto, una grande torre centrale sovrastava l'incrocio della navata e del transetto. Ad est vi era l'abside (Fig.1). A seguito dell'avvento della Riforma del XVI secolo la Chiesa rimarrà per lungo tempo in stato d'abbandono e nel corso di una guerra settennale contro gli svedesi, verrà data alle fiamme e in tale stato rimarrà per lungo tempo. Nel 1600 la Cattedrale fu trasformata in una cava per ottenere materiale per altre costruzioni nella zona. È stato anche costruito un forno da calce per recuperare le pietre che non potevano essere utilizzate come materiale da costruzione. Nel 1844 è stata fondata l'Associazione per la conservazione degli antichi monumenti norvegesi. Una delle priorità dell'associazione fu la protezione e il restauro delle rovine della Cattedrale. Dal 1880 le rovine sono state più o meno soggette regolarmente a manutenzione non sufficiente però a impedire il continuo degrado. Il pessimo stato di conservazione della struttura muraria ha portato il *Ministry of Church and Cultural Affairs*, verso la fine dello scorso secolo, ad indire un concorso (1987) per individuare la proposta più idonea per la loro conservazione (Fig.3).



Fig.2 Planimetria del sito con l'antica cattedrale.



Fig.3 Vista dall'alto con l'intervento di copertura delle rovine.



Fig.1 Raffigurazione dell'antica Cattedrale.



Fig.4 Ruderi della cattedrale prima dell'intervento di copertura.

# 14. ROVINE DELLA CATTEDRALE MEDIEVALE DI HAMAR

## 14.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Kjell Lund dello studio Lund & Slatto.

**Anno dell'intervento:** 1998.

**Estensione sito archeologico:** mq 1300 circa.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** resti dell'antica cattedrale in pietra calcarea. Le murature presentano un nucleo intermedio di piccole pietre e malta di calce.

**Estensione copertura:** base m<sup>2</sup> 2.724.  
Lunghezza max m 68, larghezza m 40, altezza max m 20.  
Superficie vetrata m<sup>2</sup> 4.708.

**Tipo di copertura:** copertura in acciaio e vetro. Il colmo del tetto è posto in corrispondenza dell'asse centrale della navata della Chiesa. In corrispondenza di tale asse si sviluppa una copertura in vetro in una posizione simile alle volte originarie delle Cattedrale. Nel complesso, la pianta si sviluppa asimmetricamente a formare un parallelogramma con i lati inclinati di 11° che avvolge le rovine sottostanti (Fig.4). In proiezione, per un tratto corrispondente alla posizione del transetto, le superfici laterali riprendono l'allineamento originario. Le superfici laterali hanno una pendenza variabile tra 35,81° e 58,44° e costituiscono un paraboloide iperbolico. In questo modo, la diversa pendenza divide le superfici di protezione dell'edificio in quattro grandi quadranti, che reinterpretano l'originaria chiesa cruciforme. Alle estremità, le due fronti della nuova costruzione richiamano lo schema ecclesiale del frontone d'ingresso e dell'abside (Fig.3).

**Motivazioni:** tramite manutenzione convenzionale non è stato possibile impedire i processi di degrado generati dagli agenti atmosferici: la pietra, specialmente quella delle colonne, era fortemente alterata e c'erano grandi crepe nella muratura, a causa del gelo. Nel 1980 è apparso chiaro che la parte più caratteristica delle rovine, la fila di alte colonne, avesse scarsa stabilità laterale. L'esigenza di sviluppare campagne di scavo in condizioni climatiche accettabili e di proteggere i conci in calcare dall'azione del gelo ha convinto la Direzione del Patrimonio culturale norvegese della necessità della copertura del sito.

### Bibliografia

Sverre Fehn. *Il museo di Hamar. Lund & Slatto. La Christal Cathedral*, «Hortus», rivista on-line del Dipartimento Architettura e Progetto - "Sapienza" Università di Roma.

*Tecnologia e sacro*, «Glass in building, the international magazine for glass and design», Philippe Grell Editor, n.1 (September 2000).

NORBERG-SCHULZ, C., *La cupola sulle rovine*, Spazio e Società, v. 21, n. 87 (1999).

*The protective structure for Hamar Cathedral Ruins*, «Living Architecture», n.19 (2004).

*Dreams in ruins*, «Building Design», November 1999.

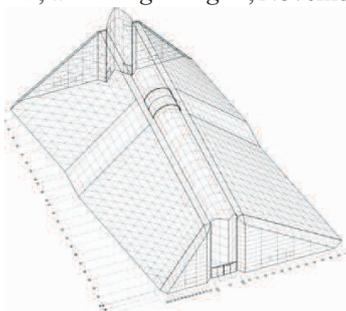


Fig.3 Vista assonometrica della copertura.



Fig.1 Vista esterna con l'intervento.



Fig.2 Vista interna con l'intervento.

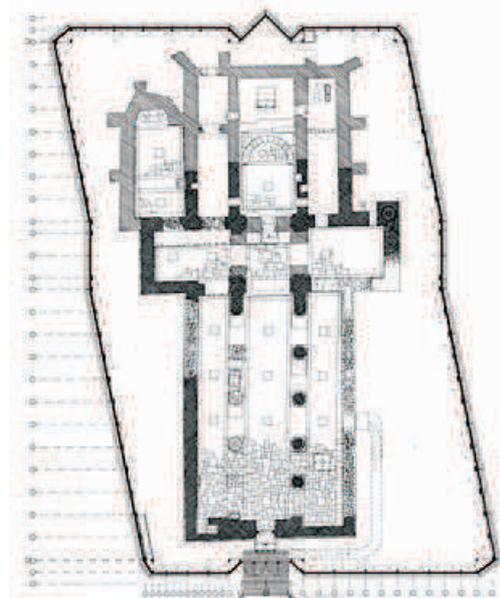


Fig.4 Pianta e prospetto.

## 14. ROVINE DELLA CATTEDRALE MEDIEVALE DI HAMAR

**Climatizzazione:** all'interno della nuova copertura è stato messo in atto un sistema di ventilazione e di riscaldamento per combattere la condensa e difendere le pietre dall'azione di sfaldamento determinata dal gelo.

La preoccupazione principale dei progettisti è stata quella di non raggiungere temperature inferiori a 0°C e di evitare formazioni saline superficiali. Il sistema di climatizzazione, di tipo misto, prevede l'introduzione di aria calda dal basso, in corrispondenza delle vetrate e un certo numero di radiatori integrati all'interno della struttura in acciaio. I radiatori consentono un riscaldamento diretto delle rovine, (mentre la temperatura dell'aria nel resto dell'ambiente può scendere sotto lo zero termico) e, tramite una corrente calda lungo il vetro, riducono il rischio di condensa. La temperatura delle rovine viene misurata con sensori montati direttamente sulle pietre. La funzione principale del sistema di ventilazione è



Fig.1 Teli per l'ombreggiamento.

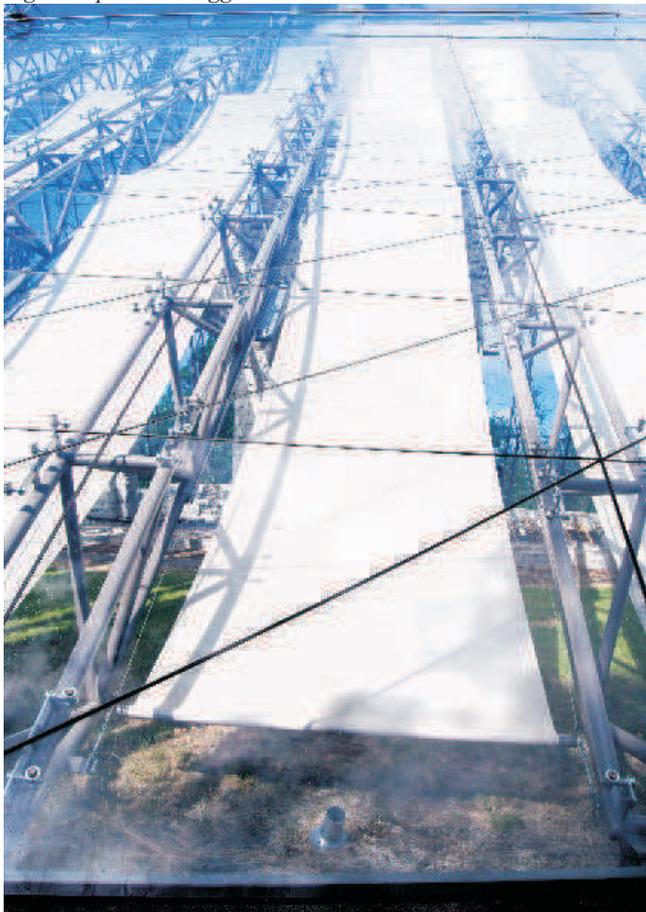


Fig.2 Teli per l'ombreggiamento.

quella di deumidificare l'aria, riducendo il rischio di condensa sul vetro e contribuendo a scaldare l'aria. L'aria di alimentazione viene fornita costantemente a livello del terreno, lungo la fondamenta (Fig.3).

Nella stagione estiva è necessario rimuovere il calore all'interno dell'ambiente protettivo costruito evitando anche la luce solare diretta ai visitatori. Ciò è in parte risolto dalla ventilazione naturale e in parte tramite tende interne (probabilmente montate solo sul lato sud). Le tende (Fig.1) riflettono indietro una parte significativa del calore. Il sistema è controllato automaticamente grazie a sensori di luce e di calore. La ventilazione naturale avviene grazie all'ingresso di aria dalle aperture poste in basso su ciascuna estremità dei lati corti (Fig.4) e alla fuoriuscita di aria in corrispondenza della parte centrale della copertura. L'area totale delle aperture è di circa 100 m<sup>2</sup>. L'impianto ha una centralina che controlla radiatori, ventilazione, tende avvolgibili e aperture in modo che sia raggiunto il clima ideale. Possono essere adottate differenti strategie. Si può scegliere come priorità una strategia giornaliera che evita il gelo delle rovine, senza formazione di condensa e con basso consumo energetico, oppure una strategia che garantisce il comfort termico anche ai visitatori.

In condizioni normali, la strategia adottata è la seguente:

- La temperatura delle rovine è mantenuta a un minimo di 1 °C.
- La temperatura all'interno del vetro è superiore alla temperatura del punto di rugiada dell'aria.
- La temperatura ambientale è bassa (0° C), per ragioni di consumo di energia. In generale il riscaldamento per motivi di comfort è applicato quando la temperatura esterna è inferiore ai -25 °C. L'unità di trattamento dell'aria e la centrale degli impianti elettrici sono state collocate, in prossimità del sito, in un locale interrato integrato nel contesto ambientale del bosco circostante.



Fig.3 Griglie per l'ingresso dell'aria.

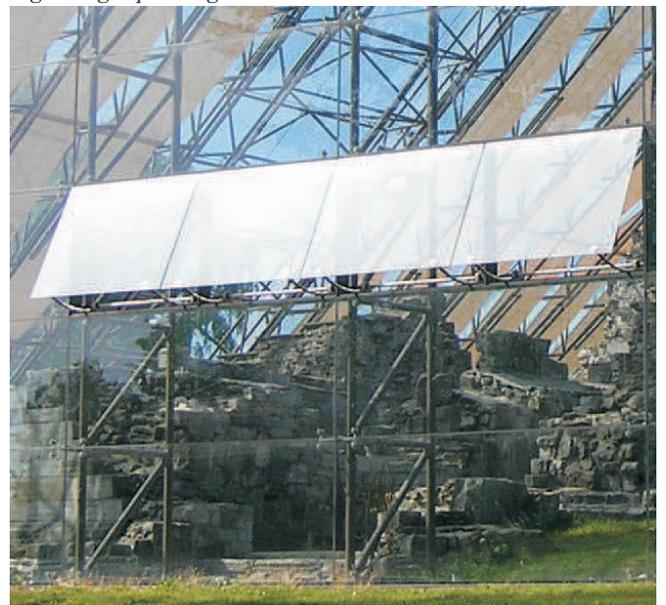


Fig.4 Vetri apribili per la ventilazione.

## 14. ROVINE DELLA CATTEDRALE MEDIEVALE DI HAMAR

### 14.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura vetrata:** base in calcestruzzo, tralicci in acciaio.

**Materiali impiegati per la copertura:**

4600 tubi di acciaio verniciato (142 tonnellate);

Sistema di connessione: *VEA (Vitrage Extérieur Agraffé)* Le lastre di vetro sono fissate alla struttura in acciaio attraverso due staffe in acciaio inox. I bulloni che fissano il vetro si avvitano alle piastre saldate direttamente ai tubi in acciaio (Fig.3-4-5).

1675 pannelli di vetro di cui 690 con forme speciali (Fig.1) (triangoli, trapezi, vetro curvato per la volta centrale, ecc.) (144 tonnellate), giunti in silicone;

Tipo di vetro: doppio strato di vetro indurito (con trattamento *Heat Soak*, per ridurre al minimo il rischio di rotture) da 10 mm e da 15 mm, con una intercapedine di aria di 16 mm (sistema *Pilkington Planar™*); teli per l'ombreggiamento.



Fig.1 Pannelli di vetro.



Fig.2 Vista d'angolo.

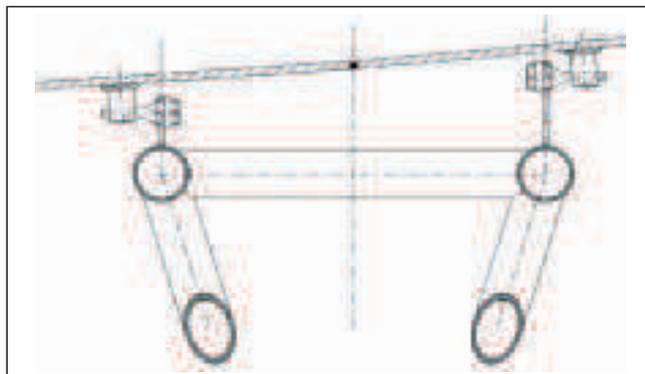


Fig.3 Dettaglio di aggancio degli elementi di vetro sulla struttura in acciaio.



Fig.4-5 Aggancio degli elementi in vetro sulla struttura in acciaio.

## 15. SUENO'S STONE

### 15.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

**Localizzazione:**

FORRES (Scotland, Moray), REGNO UNITO.

**Coordinate geografiche:** 57°36'56"N 3°35'52"O

**Quota media:** m 20 s.l.m.

**Condizioni climatiche del sito:**

INVERNO min. 0° C max. 6° C

ESTATE min. 8° C max. 18° C

**Precipitazioni annue:** da 50 a 73 mm/mese.

### 15.2 STORIA

**Periodo di edificazione:** IX - X sec. d.C.

**Storia del sito**

Sueno's Stone è una lastra verticale con pannelli scolpiti. Il nome Sueno è stato dato nel 1800, quando la pietra è stata scoperta. Vi sono raffigurati i Pitti sconfitti sui loro cavalli in fuga, dominati da scozzesi vittoriosi. La faccia occidentale ha una grande croce celtica con decorazioni intagliate riccamente intrecciate. La faccia est raffigura una grande scena di battaglia. Gli storici hanno fornito varie possibili interpretazioni del messaggio della pietra, che coinvolgono tre importanti eventi, noti per avere avuto luogo nella zona tra il 923 e il 966. La pietra forse raffigura il trionfo finale dei Gaeli di Dal Riada sui loro nemici Pitti. Potrebbe anche raffigurare il confronto tra la forza dei Pitti e i Norsemeni. Un'altra teoria è che la pietra commemori la sconfitta, morte e sepoltura del re scozzese Dubh durante una battaglia nel 966 o 967 a Forres.

Lady Ann Campbell, la contessa di Moray, nel XVIII secolo si impegnò per fare eseguire la manutenzione sulla pietra, nel tentativo di stabilizzarla. Ciò è stato ottenuto con la realizzazione di un plinto alla base. Nell'ottobre 1992 lo

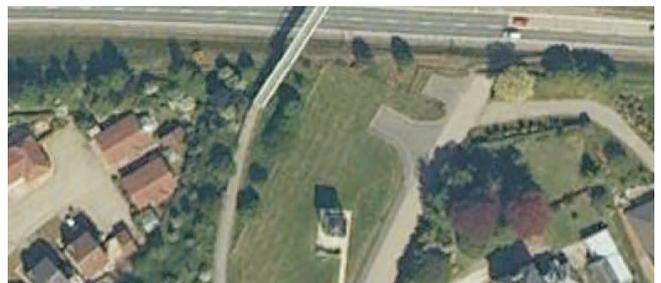


Fig.2 Vista aerea del sito con l'intervento di copertura.

Scottish Office (ora Dipartimento di Stato del Parlamento di Scozia) ha scelto di racchiudere la lastra Sueno's Stone in una costruzione in vetro e acciaio, secondo il progetto di mantenere le pietre simbolo significative *in situ*, invece di rimuoverle e sostituirle con repliche.



Fig.1 La Sueno's stone prima dell'intervento di copertura.



Fig.3 La Sueno's stone dopo l'intervento di copertura.

## 15. SUENO'S STONE

### 15.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Brian Paul per la Hurd Rolland Architects.

**Anno dell'intervento:** 1990.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** lastra in pietra di arenaria rossa scolpita alta 6,5 m.

**Estensione copertura:** base m<sup>2</sup> 4,00.  
Lunghezza m 2,00, larghezza m 2,00, altezza m 8,00 circa.

**Tipo di copertura:** involucro chiuso in acciaio e vetro.

**Motivazioni:** evitare i danni da gelo in inverno quando la pietra è bagnata dalla pioggia, evitare l'erosione dovuta alle intemperie e alle piogge acide e proteggere dall'azione umana (scarichi delle auto della vicina autostrada e graffiti).

#### **Bibliografia**

ASHURST, J., DIMES, F., *Conservation of building and decorative stone*, Elsevier, Oxford 1990.

SUTHERLAND, E., *In search of the Picts. A celtic Dark Age Nation*, Constable, Londra 1994.

**Climatizzazione:** l'intera chiusura è stata modellata con la collaborazione dell'*University of Strathclyde* allo scopo di prevedere riscaldamento, raffreddamento e soprattutto la condensa sulle fredde facce di pietra. Sono stati realizzati modelli di simulazione all'alba del 21 dicembre, con sole caldo, vetro freddo, ecc. La pietra ha iniziato a delaminarsi a causa di bagnatura, essiccazione e cicli di gelo, quindi occorreva proteggerla dal bagnato/umido. Le lamelle in alto e in basso sono state dimensionate per consentire un flusso d'aria, al fine di evitare temperature estreme e umidità. Vi è molto caldo a volte all'interno in piena estate, ma mantenere la pietra a secco è stata la preoccupazione dei progettisti.

### 15.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura:** quattro pilastri tubolari in acciaio, posti sui quattro angoli dell'involucro vetrato, collegati tra loro in sommità mediante travi in acciaio. Su ogni lato vi sono otto lastre di vetro, ciascuna ancorata tramite elementi puntuali in acciaio inox ai pilastri e a una pinna in vetro intermedia.

**Materiali impiegati per la copertura:** acciaio, lastre di vetro blindato di 12 mm per le pareti, vetro a controllo solare colorato per la copertura.



Fig.1 Vista della Sueno's stone dopo l'intervento di copertura.



Fig.2 Vista delle lamelle di aerazione superiore.



Fig.3 Vista interna dell'involucro vetrato.

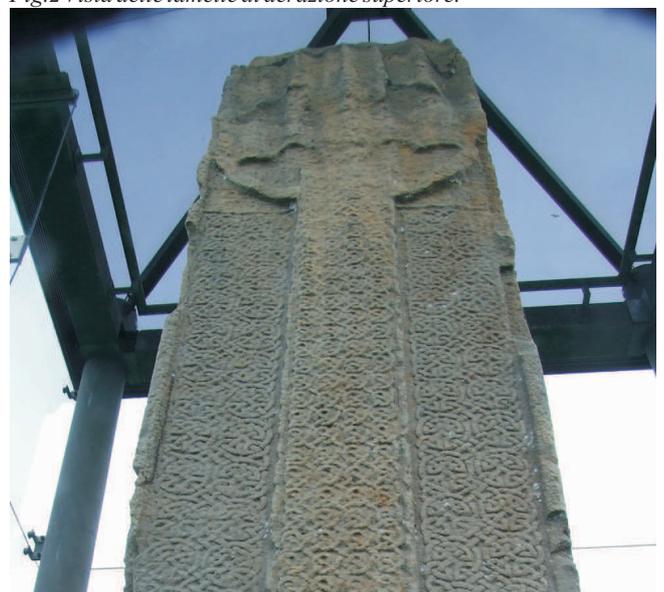


Fig.3 Vista interna della copertura vetrata.

## 16. DOMUS DEI MOSAICI DELL'ANTICA ASTURICA AUGUSTA

### 16.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

**Localizzazione:**

ASTORGA (León), SPAGNA.

**Coordinate geografiche:** 42°27'12"N 6°03'05"O

**Quota media:** m 865 s.l.m.

**Condizioni climatiche del sito:**

INVERNO min. 0 °C max. 13 °C

ESTATE min. 11°C max. 29 °C

**Precipitazioni annue:** da 4 a 114 mm/mese.



### 16.2 STORIA

**Periodo di edificazione:** I - II sec. d.C.

**Storia del sito**

Si tratta della casa romana che prende il nome dalle raffigurazioni dei suoi mosaici, «del osso e dos pejares». La Domus del mosaico si trova accanto al Convento dei Padri Redentoristi. Aveva delle terme proprie, caratteristica che mostra la ricchezza del suo proprietario. Si articolava su un piano intorno a diversi cortili. Lo scavo rappresenta un terzo del corpo che si estendeva attraverso lo spazio oggi occupato dal convento.



Fig.2 Vista del mosaico dos pejares.



Fig.1 Vista aerea del sito con l'intervento di copertura.

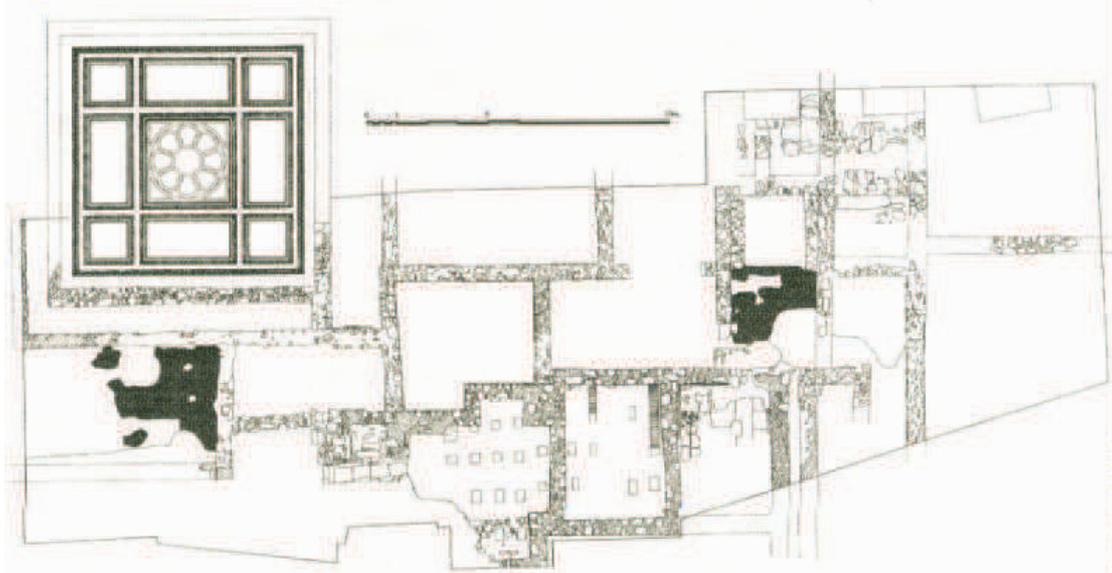


Fig.3 Planimetria del sito archeologico.

## 16. DOMUS DEI MOSAICI DELL'ANTICA ASTURICA AUGUSTA

### 16.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Arch. Juan Múgica Aguinaga.

**Anno dell'intervento:** 1990.

**Estensione sito archeologico:** mq 500.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** resti dell'antica domus in pietra, pavimenti in *opus signinum*, marmo e *opus spicatum*, pitture e mosaici.

**Estensione copertura:** base mq 500.  
Altezza max m 3,00 dal piano stradale.

**Tipo di copertura:** copertura a due falde. L'intenzione del progetto è stata quella di creare l'immagine della struttura di un edificio a due falde semidistrutta, in cui manca la strato di finitura (legno, argilla, tegole, ecc.), sostituendo le travi in legno con correnti in metallo rettangolari appoggiate alle estremità come se ci fosse un dormiente (come nelle classiche costruzioni in legno) e incastrate in sommità.

**Motivazioni:** proteggere e musealizzare l'area. La realizzazione della copertura per la protezione dei mosaici consente la creazione di un passaggio pedonale a collegamento di due diversi livelli stradali (Fig.5). L'intento è stato quello di evocare la struttura originaria della casa romana con la minore influenza sui resti (Fig.1).

#### **Bibliografia**

TRICOLI, A., *La città nascosta*, Monografie di Agathon, 2, Palermo 2011.

**Climatizzazione:** le aperture laterali consentono la ventilazione naturale (Fig.4).

### 16.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura:** base in c.a., pilastri tubolari in acciaio e travi IPE alleggerite su cui sono ancorati gli infissi in acciaio dei vetri (Fig.5).

**Materiali impiegati per la copertura:** acciaio, neoprene per evitare il contatto tra vetri e tra acciaio e vetri, vetro stratificato temprato composto da due lastre di 8 mm unite da Pvb.



Fig.1 Vista d'insieme della copertura vetrata.



Fig.3 Vista esterna.



Fig.2 Vista esterna.



Fig.4 Vista esterna.



Fig.6 Vista esterna di dettaglio.



Fig.5 Vista interna della copertura con la passerella di collegamento.

# 17. RESTI DELLA CHIESA MEDIEVALE DI SANTA MARIA REAL DE ALMUDENA

## 17.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

**Localizzazione:**

MADRID, SPAGNA.

**Coordinate geografiche:** 40°24'55"N 3°42'45"O

**Quota media:** m 640 s.l.m.

**Condizioni climatiche del sito:**

INVERNO min. 0° C max. 13° C

ESTATE min. 13° C max. 33° C

**Precipitazioni annue:** da 11 a 48 mm/mese.



## 17.2 STORIA

**Periodo di edificazione:** sec. XII d. C.

**Storia del sito**

La storia della Chiesa di Santa Maria real de Almudena è caratterizzata da un continuum di lavori e ampliamenti, dalla sua fondazione fin quasi alla data della sua demolizione. Dopo la conquista della città da parte dei cristiani intorno al 1085, la vecchia moschea fu trasformata in chiesa cristiana e consacrata da Alfonso VI con il nome di Santa Maria real de la Almudena, patrona di Madrid. Nel 1868 poiché la Chiesa si interponeva al nuovo taglio di calle Bailen, è stata approvata la sua demolizione.

Nel 2002 con le opere di urbanizzazione di Calle de la Almudena è stata realizzata una vetrata che consente la vista dei resti dall'alto, evidenziata dalla presenza di una statua in bronzo di un uomo appoggiato a una ringhiera che sembra osservare i resti.



Fig.1 Vista aerea del sito.



Fig.3 Chiesa di Santa Maria (lettera A nel Plano de Teixeira, 1656).



Fig.4 Vista attuale di calle de la Almudena.

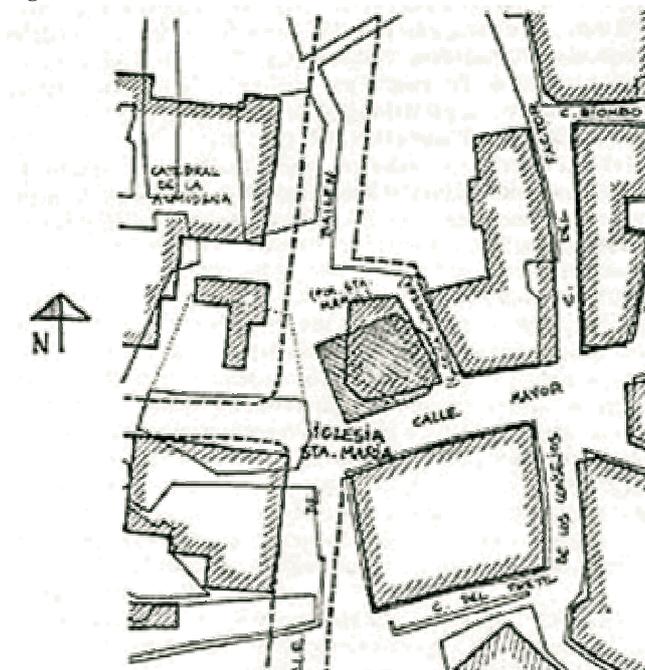


Fig.2 Localizzazione dell'antica Chiesa.

# 17. RESTI DELLA CHIESA MEDIEVALE DI SANTA MARIA REAL DE ALMUDENA

## 17.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Juan Armino Hernandez Montero (urbanista) e Horacio Fernandez del Castillo Sainz (architetto).

**Anno dell'intervento:** 2002.

**Estensione sito archeologico:** mq 50.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** resti in pietra e ceramica dell'antica chiesa.

**Estensione copertura:** base circa mq 50.  
Lunghezza circa 10 m, larghezza circa 5 m, altezza max dal livello stradale m 0,56.

**Tipo di copertura:** copertura in acciaio e vetro (Fig. 2-3).

**Motivazioni:** permettere la visibilità delle rovine, costituendo un nuovo elemento turistico culturale.

### Bibliografia

Publ. online *Obras de urbanizacion e Infraestructuras de la Calle Major, Madrid*, «Oficios», 2003, pp. 166-169.

**Climatizzazione:** ventilazione naturale attraverso alcune panchine in marmo bianco dotate di griglie situate su entrambi i lati corti della protezione (Fig.1). Esiste anche una ventilazione forzata anche se funziona abbastanza bene quella naturale.



Fig.1 Vista della copertura con i cubi per la ventilazione.



Fig.2 Vista della copertura.



Fig.3 Vista delle lastre in vetro con giunti in silicone.

## 17.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura:** profili in acciaio inox ancorati al cemento armato.

**Materiali impiegati per la copertura:** struttura in acciaio inox, vetro stratificato 6+6+6 mm, giunti in silicone strutturale, ringhiera in acciaio inox.

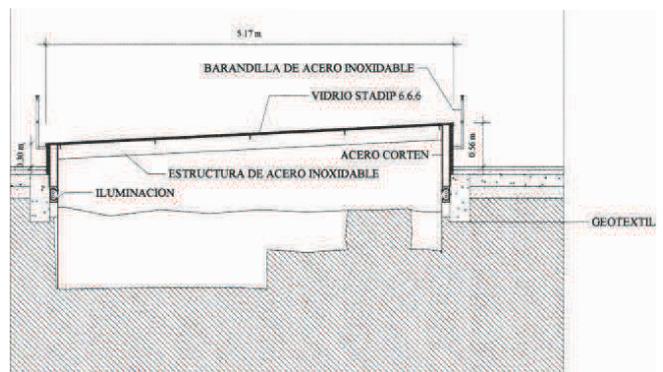


Fig.4 Sezione trasversale.

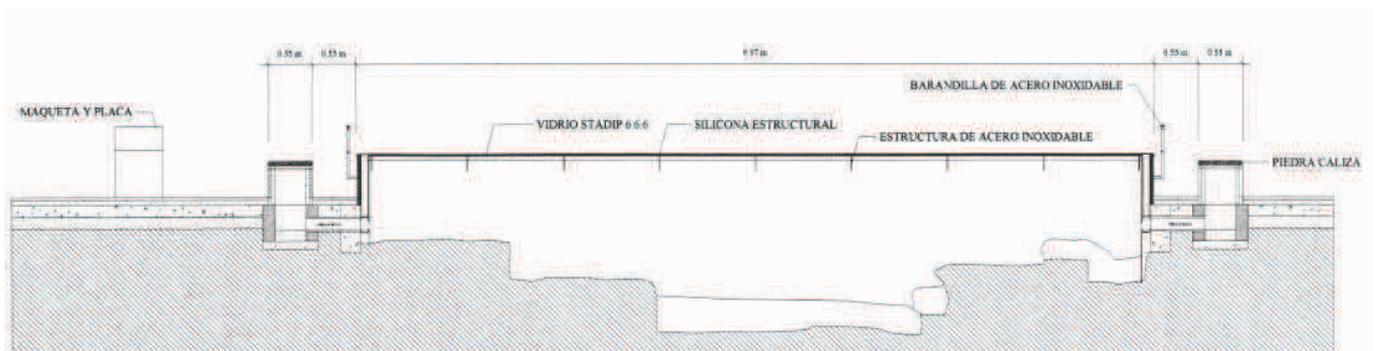


Fig.5 Sezione longitudinale.

## 18. SITO ARCHEOLOGICO DE LA ALMOINA

### 18.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

#### **Localizzazione:**

VALENÇIA (Comunidad Valençiana), Plaça de la Almoina, SPAGNA.

**Coordinate geografiche:** 39°28'34" N 0°22'27" O

**Quota media:** m 22 s.l.m.

#### **Condizioni climatiche del sito:**

INVERNO min. 7° C max. 17° C  
ESTATE min. 18° C max. 30° C

**Precipitazioni annue:** da 9 a 74 mm/mese.

### 18.2 STORIA DEL SITO

**Periodo di edificazione:** dal II sec. a.C. al XIV sec.

#### **Storia del sito**

La piazza de la Almoina, situata nel centro storico di Valençia (Fig.2), è una delle più antiche della città. Il suo nome ha origine da un antico palazzo sede di un'istituzione medievale dedicata alla beneficenza. La demolizione degli edifici che occupavano questo spazio ha permesso l'apertura di una grande piazza. Sotto tale piazza sono stati trovati resti che vanno dal II secolo a.C. (periodo romano) fino al XIV secolo (medioevo) (Fig.1).

I resti del periodo romano romano ritrovati con gli scavi sono:

- Terme (fine del secondo secolo d.C.), di forma rettangolare, costituite da una camera calda (*caldarium*), una stanza riscaldata (*tepidarium*) e una sala d'acqua fredda. In un'altra stanza vi era il forno alimentato a legna per riscaldare l'acqua. Varie erano le stanze accessorie: il vestibolo, lo spogliatoio, le latrine, i depositi, ecc;
- Tempio di Esculapio, situato accanto al muro, era un tempio circondato da un recinto o muro;
- Horreum, composto da quattro navate, al suo interno si immagazzinava il grano e i prodotti necessari per nutrire la città;
- Foro, di epoca imperiale. Costruito tra il 70 e il 100 d.C., aveva una pianta rettangolare e nel suo centro sorgeva il tempio principale della città;
- Curia, sede del governo della città (I secolo d.C.);
- Basilica, rettangolare a tre navate, era il luogo dove si



Fig.1 Vista dall'alto delle rovine.



effettuavano gli scambi commerciali e in cui si esercitava la giustizia.

I resti del periodo visigoto sono in quantità minore di quelli dell'epoca romana. Grazie agli scavi sono stati rinvenuti l'abside della Cattedrale visigota e alcune tombe associate ad essa.

La città fu conquistata dai musulmani nel VIII secolo. I resti di epoca romana e visigota sono stati dimenticati e sepolti sotto edifici musulmani. Su questo stesso spazio furono costruiti i locali del castello, sede del governo. Si possono oggi vedere i resti di una vasca e un cortile di uno dei palazzi monumentali. Nel 1238 Giacomo I conquistò la città. In questo spazio, nei primi anni del XIV secolo, fu costruito l'edificio dell'Almoina per iniziativa del vescovo Despont, in seguito alla cui demolizione sono stati scoperti i resti archeologici.

Alla fine del 2007, dopo 20 anni di scavi, consolidamenti e studi, è stato aperto al pubblico il centro archeologico de l'Almoina, un museo realizzato nel luogo in cui sono state ritrovate le rovine. Sono stati realizzati un edificio per l'ingresso all'area archeologica interrata sotto la piazza e un edificio per il museo, oltre a un piccolo edificio vicino al giardino della Basilica.



Fig.2 Foto aerea del sito archeologico.



Fig.3 Foto aerea con l'intervento di copertura.

## 18. SITO ARCHEOLOGICO DE LA ALMOINA

### 18.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Arch. Jose Miguel Rueda, José María Herrera.

**Anno dell'intervento:** 2006.

**Estensione sito archeologico:** m<sup>2</sup> 2500.

**Estensione copertura:** m<sup>2</sup> 2255.

**Estensione della parte vetrata:** m<sup>2</sup> 302,76 (m 17,40x17,40).

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** resti di edifici in pietra, iscrizioni, elementi architettonici, più di 1000 monete e 500 ceramiche.

**Tipo di copertura:** volume interrato a una profondità di circa 5 m, in parte coperto da una piazza rivestita in pietra calcarea e alabastro. La zona delle terme romane è coperta da elementi in vetro su cui scorre una lamina d'acqua. La nuova piazza si adatta alle direzioni delle principali vie antiche: il cardo e il decumano (Fig.3). La pavimentazione e la griglia strutturale della copertura vetrata sono suddivise secondo un modulo che riprende la distanza fra le colonne del portico dell'antico Foro.

**Motivazioni:** la decisione di conservare e presentare al pubblico i reperti archeologici de l'Almoina ha dovuto trovare una soluzione che permettesse la conservazione dei resti e lo sviluppo urbano. È nato così il progetto di creare una cripta archeologica sotto una piazza di nuova costruzione, con annesso un museo (Fig.4). La struttura vetrata sulle antiche terme romane permette un contatto visivo con i ruderi che, grazie alla piazza, risultano integrati nella vita urbana (Fig.2). Il vetro permette l'illuminazione e la vista dell'esterno anche da alcuni punti all'interno del sito archeologico instaurando una connessione tra passato e presente.

L'idea iniziale di realizzare una piazza completamente vetrata è stata esclusa a causa delle difficoltà di manutenzione e di fruizione del pubblico, per il possibile scivolamento su un tale tipo di pavimentazione.

#### **Bibliografia**

HERRERA, J.M., RUEDA, J. M., *Plaza de l'Almoina*, «Paisea», revista de paisajismo, 007.



Fig.3 Pianta dei resti archeologici.

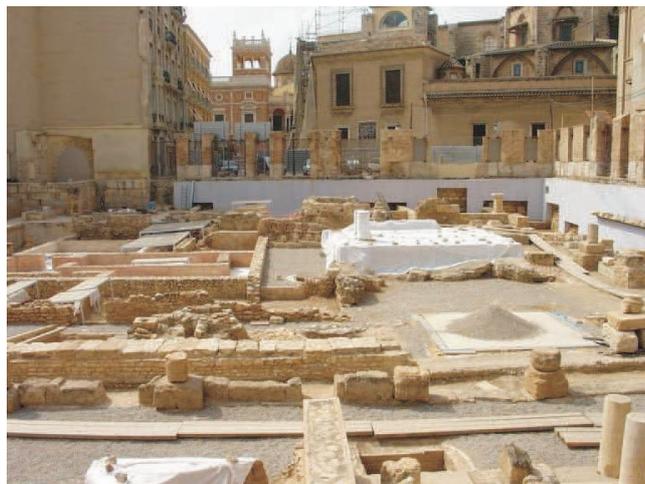


Fig.1 Vista della piazza prima dell'intervento di copertura.



Fig.2 Vista della piazza dopo l'intervento di copertura.

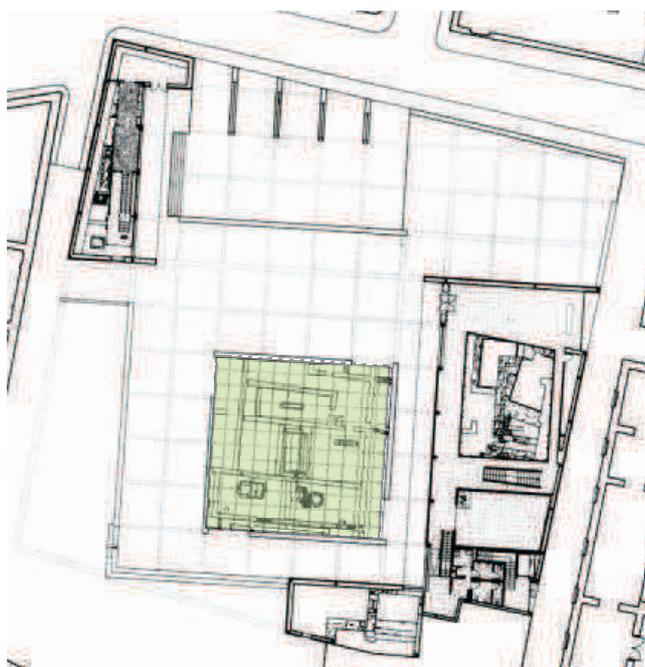


Fig.4 Pianta della piazza e del museo.

## 18. SITO ARCHEOLOGICO DE LA ALMOINA

**Climatizzazione:** in un museo di tal genere è particolarmente importante mantenere condizioni di temperatura e umidità costanti tutto l'anno. Il sistema di aria condizionata sta normalmente attivo durante il giorno e la notte, poiché le condizioni interne di temperatura e soprattutto di umidità relativa devono mantenersi costanti per la buona conservazione dei resti archeologici.

Le condizioni interne sono:

- in estate 25° C e 65% di umidità relativa;
- in inverno 16° C e 65% di umidità relativa.

Tali dati di temperatura e umidità relativa interna sono stati forniti ai progettisti degli impianti (*Ajingenieria*) dagli archeologi responsabili della manutenzione del museo. Questi dati di temperatura e soprattutto di umidità hanno limitato fortemente la scelta del sistema HVAC. Per mantenere costanti le condizioni interne il museo è stato climatizzato con alcuni condizionatori (unità di trattamento aria) composti da batteria di raffreddamento, batteria di riscaldamento, refrigeratore, recuperatore di calore entalpico e umidificatori, al fine di mantenere le condizioni interne del 65% di umidità relativa in inverno. Il controllo del climatizzatore avviene per l'umidità e per la temperatura, dando sempre priorità all'umidità relativa, in quanto si tratta di un parametro critico per la buona conservazione dei resti archeologici.

La soluzione proposta si basa su un sistema di produzione di acqua calda e fredda a 4 tubi, mediante refrigeratori ad acqua con recupero totale d'aria. Il sistema è collocato all'ultimo piano dei locali tecnici adiacenti, in un ambiente acusticamente isolato. I terminali sono unità di climatizzazione a 4 tubi dotate di recuperatori entalpici rotanti, sezione *free-cooling*, e umidificatori adiabatici. La distribuzione delle risorse idriche è realizzata con tubi in acciaio nero e isolamento esterno. La distribuzione dell'aria avviene attraverso tubi zincati con isolamento esterno. La superficie vetrata è ricoperta da una lamina d'acqua di circa 3-4 cm per evitare che la gente vi passi sopra (Fig.2-3). Il fatto

che sopra il vetro vi sia dell'acqua ha forti implicazioni per il sistema di aria condizionata progettato: poiché non vi è una camera d'aria interna al vetro (si tratta di vetro stratificato) occorre evitare la condensazione sul lato interno. Questo problema è stato risolto con adeguati sistemi di distribuzione dell'aria (ugelli a lungo raggio) che mandano aria sotto il vetro per sfruttare l'«effetto coanda», riducendo così la probabilità di condensa sul vetro. L'intero sistema è controllato da un *software* appositamente realizzato.



Fig.1 Vista esterna della copertura vetrata ricoperta d'acqua.



Fig.2 Vista interna in corrispondenza delle antiche terme.



Fig.3 Vista della copertura vetrata ricoperta d'acqua.

## 18. SITO ARCHEOLOGICO DE LA ALMOINA

### 18.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura vetrata:** micropali di fondazione, muro perimetrale, pilastri in acciaio, sei travi reticolari in acciaio che coprono una luce di m 17,40 (Fig.4). Orditura secondaria in acciaio.

**Materiali impiegati per la copertura:** acciaio, vetro stratificato di sicurezza (m 1,45x1,45), lamina d'acqua di 3-4 cm.

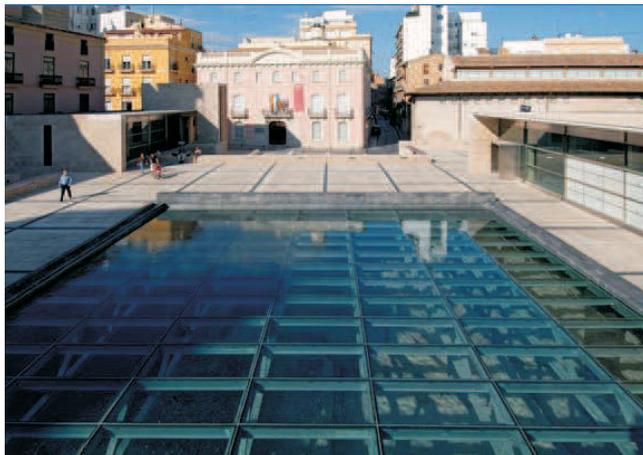


Fig.1 Vista della copertura vetrata.



Fig.3 Vista della copertura vetrata.



Fig.2 Vista della copertura vetrata.



Fig.4 Vista della copertura vetrata dall'interno.

## 19. ROVINE DEL TEATRO DI CAESARAUGUSTA

### 19.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

**Localizzazione:**

SARAGOZZA, SPAGNA.

**Coordinate geografiche:** 41°39'08"N 0°52'40"O

**Quota media:** m 214 s.l.m.

**Condizioni climatiche del sito:**

INVERNO min. 2° C max. 12° C

ESTATE min. 15° C max. 31° C

**Precipitazioni annue:** da 16 a 44 mm/mese.

### 19.2 STORIA

**Periodo di edificazione:** I sec. d.C.

**Storia del sito**

*Caesaraugusta* fu l'unica città romana che ebbe il privilegio di detenere il nome completo dell'imperatore Cesare Augusto.

Il complesso archeologico (Fig.2) fu rinvenuto occasionalmente nel 1972, durante i lavori di costruzione di un edificio. Il teatro, iniziato nel I secolo, al tempo di Tiberio, fu completato durante il regno dell'imperatore Claudio, divenendo uno dei più grandiosi teatri romani in Spagna, con una capacità di 6.000 spettatori (Fig.1). L'edificio cadde in disuso nel III sec. d.C. fino ad essere lentamente saccheggiato dei suoi materiali, utilizzati per altre costruzioni.

Sotto la dominazione araba fu inglobato dall'estendersi della Medina che comportò una sistematica occupazione del sito con un labirinto di stradine che collegava le abitazioni arabe, come era frequente in questo tipo di insediamenti. Nel XIII secolo, in epoca cristiana, lo spazio fu organizzato per ospitare il ghetto ebraico fino alla cacciata degli ebrei nel 1492. Da allora l'area fu oggetto del graduale ampliamento della città di Saragozza. Il Rinascimento fu uno dei periodi di massimo splendore della città aragonese e presso l'area furono costruiti molti edifici religiosi e diverse case nobiliari. Fu poi coperto da altri edifici fino a quando gli scavi riportarono alla luce i resti. Dopo il ritrovamento, i resti sono stati coperti (Fig.3) e integrati con un museo che illustra la storia dei reperti rinvenuti.

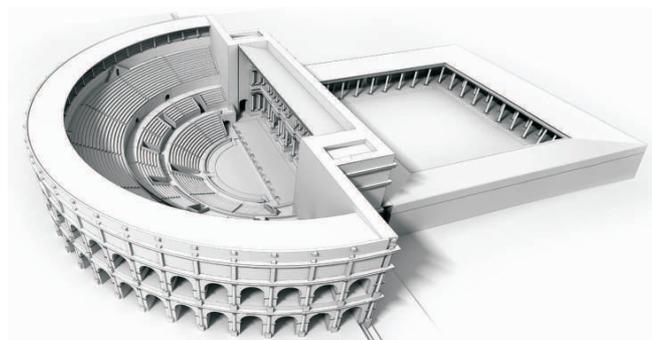


Fig.1 Riconfigurazione tridimensionale dell'antico teatro.

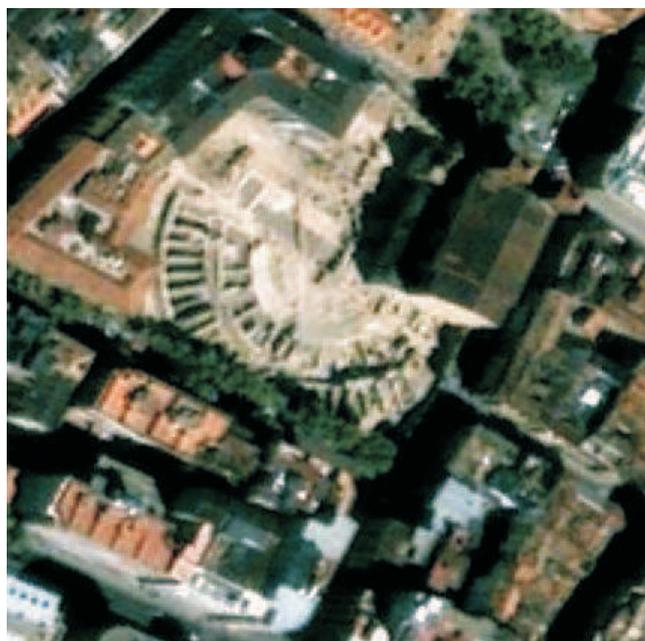
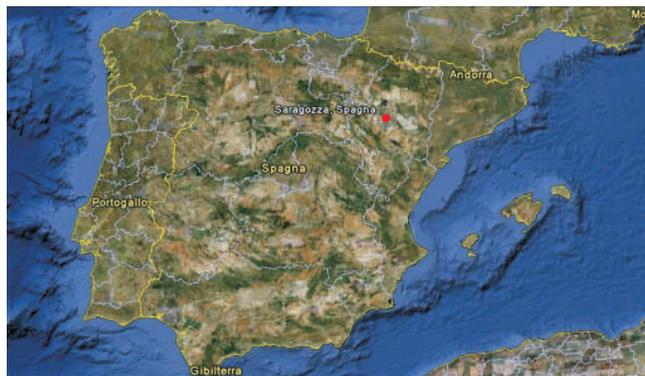


Fig.2 Ruederi del teatro prima dell'intervento di copertura.



Fig.3 Intervento di copertura dei ruderi.

## 19. ROVINE DEL TEATRO DI CAESARAUGUSTA

### 19.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Ursula Heredia Lagunas, Ramon Velasco. Camina, Ufficio per la tutela delle Belle Arti.

**Anno dell'intervento:** 2003.

**Estensione sito archeologico:** mq 5000 circa.

**Materiali sottoposti a copertura:** pavimenti decorati, resti del teatro in *opus caementicium*, resti scultorei che testimoniano la grandezza e la sontuosità dell'antico teatro romano.

**Estensione copertura:** base m<sup>2</sup> 5000 circa.  
Diametro m 106,60 , altezza max m 25.



Fig.2 Vista della copertura.



Fig.1 Vista della copertura.



Fig.3 Vista della cavea coperta.

## 19. ROVINE DEL TEATRO DI CAESARAUGUSTA

### 19.3 DATI GENERALI

**Tipo di copertura:** copertura semicircolare trasparente in policarbonato su una struttura portante a traliccio in acciaio. La forma si adegua alla geometria originaria del teatro.

**Motivazioni:** la copertura protegge il sito dagli agenti atmosferici e segna l'altezza originaria del *velarium* mobile in lino situato a circa 25 m di altezza che veniva usato durante gli spettacoli per proteggere dal sole (Fig.2).

**Climatizzazione:** il policarbonato permette il passaggio della luce solare e ostacola il passaggio dei raggi ultravioletti.

#### Bibliografia

*Cubiertas en yacimientos arqueológicos*, «Detail», n.4 (2004).



Fig.1 Vista della copertura.

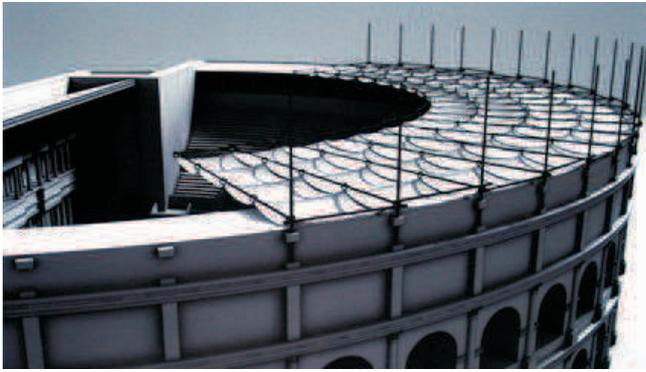


Fig.2 Riconfigurazione dell'antico velarium del teatro.



Fig.3 Vista della cavea coperta.

# 19. ROVINE DEL TEATRO DI CAESARAUGUSTA

## 19.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura:** la struttura reticolare spaziale ad aste e nodi sferici in acciaio (*Lanik*) è sostenuta dall'edificio del museo e da 15 montanti in acciaio ancorati nel terreno.

**Materiali impiegati per la copertura:** acciaio, policarbonato multicellulare.



Fig.1 Vista della copertura.



Fig.2 Vista della copertura.

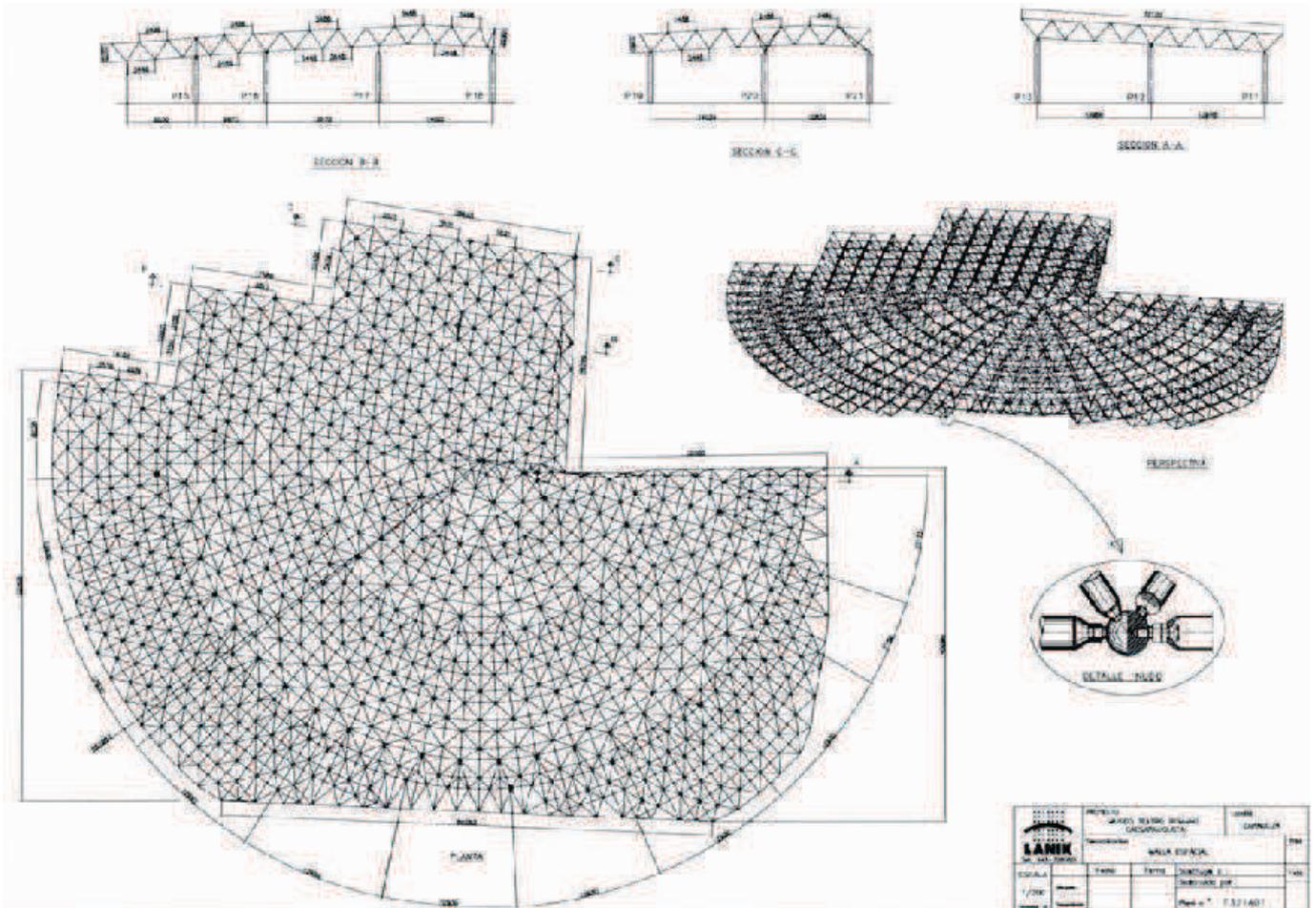


Fig.3 Dettagli della struttura reticolare spaziale della copertura.

## 20. CELLA SEPTICHORA DEL CIMITERO PALEOCRISTIANO DI PÉCS

### 20.1 CARATTERISTICHE GEOGRAFICHE

#### **Localizzazione:**

PÉCS (Transdanubio Meridionale), UNGHERIA.

**Coordinate geografiche:** 46° 04' 41"N 18°13'31"E

**Quota media:** m 164 s.l.m.

#### **Condizioni climatiche del sito:**

INVERNO min. -4° C max. 5° C

ESTATE min. 13° C max. 26° C

**Precipitazioni annue:** da 32 a 84 mm/mese.

### 20.2 STORIA

**Periodo di edificazione:** IV sec. d.C.

#### **Storia del sito**

Il Cimitero Paleocristiano di Pécs è un sito archeologico nel centro della città ungherese di Pécs (Fig.3), l'antica *Sopianae* romana, contenente i resti di una chiesa paleocristiana e diverse cappelle funerarie costruite come camere funerarie sotterranee con cappelle memoriali in superficie.

Il sito si estende sotto tutta l'area della piazza antistante la Cattedrale di Santo Stefano (Fig.4). Le rovine del cimitero, inizialmente a livello del terreno in epoca tardo-romana, ora si trovano nel sottosuolo del centro storico, vicino alla Cattedrale. Sotto la superficie sono state trovate diverse centinaia di tombe.

Gli scavi, iniziati nel 1870, hanno portato alla scoperta di 16 cappelle funerarie. Fra queste, sul lato destro della piazza, la *Cella Septichora*, con sette absidi come indica il suo nome (Fig.1, 2), a una profondità di 4-6 m dal livello del suolo, scoperta nel 1913. È stato scoperto un modo completamente nuovo di costruire le sepolture che ha confermato il motivo per cui l'area doveva diventare parte del patrimonio mondiale, dal momento che si tratta del primo cimitero cristiano in Europa al di sopra del livello del terreno.

Nel 2000 il Cimitero Paleocristiano di Pécs è diventato Patrimonio dell'umanità dell'*UNESCO*.



Fig.3 Foto aerea con l'intervento di copertura



Fig.1 Modello dell'antica Cella Septichora

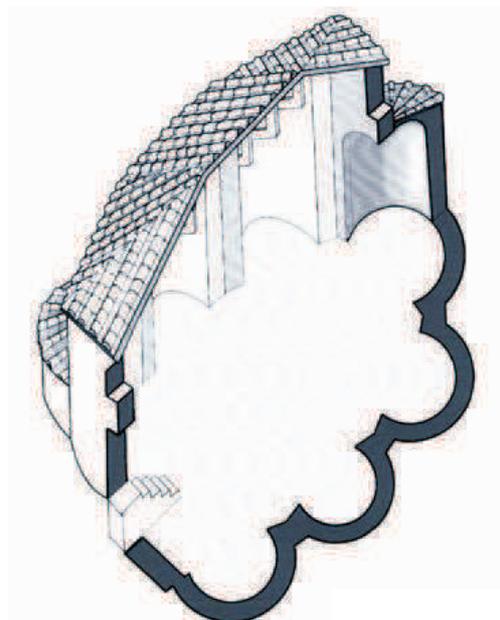


Fig.2 Schizzo assometrico dell'antica Cella Septichora

## 20. CELLA SEPTICHORA DEL CIMITERO PALEOCRISTIANO DI PÉCS

### 20.3 DATI GENERALI

**Progettisti:** Bachman & Bachmann Office Architects - DLA Master-school of the University of Pécs Pollack Mihály Faculty of Engineering.

**Anno dell'intervento:** 2006.

**Estensione sito archeologico:** m<sup>2</sup> 2000.

**Materiali e reperti sottoposti a copertura:** pareti in pietra delle cappelle affrescate con motivi ornamentali e figurativi che riproducono scene della Bibbia e simboli cristiani simili a quelli ritrovati nelle catacombe romane.

**Estensione copertura:** superficie m<sup>2</sup> 618.

Luce max m 16,80, altezza m 6.

Superficie vetrata m<sup>2</sup> 300.

**Tipo di copertura:** copertura vetrata calpestabile allo stesso livello della piazza. Un percorso divide la copertura vetrata in quattro settori permettendo l'accesso carrabile alla sede vescovile e al Museo del Duomo.

**Motivazioni:** per scopi didattico-culturali, il cimitero sotterraneo è reso visibile in modo che il visitatore possa avere l'idea del cimitero quando stava sotto il sole. La copertura in vetro sopra la camera sepolcrale permette anche di vedere la *Cella Septichora* dal livello della strada. Le lastre in vetro al livello superficiale odierno permettono di avere, dove possibile, la luce naturale per far capire che non si sta camminando dentro catacombe ma tra cappelle che una volta si trovavano sopra terra (Fig.4). Un ponte a forma di croce funge da tappeto rappresentativo per l'ingresso alla Curia. Di notte, quando è evidenziata dalla luce, la croce giace sulla superficie del vetro, evocando il simbolo della fede cristiana (Fig.5).



Fig.4 Vista interna



Fig.5 Vista notturna della copertura vetrata



Fig.1 Vista esterna della copertura vetrata

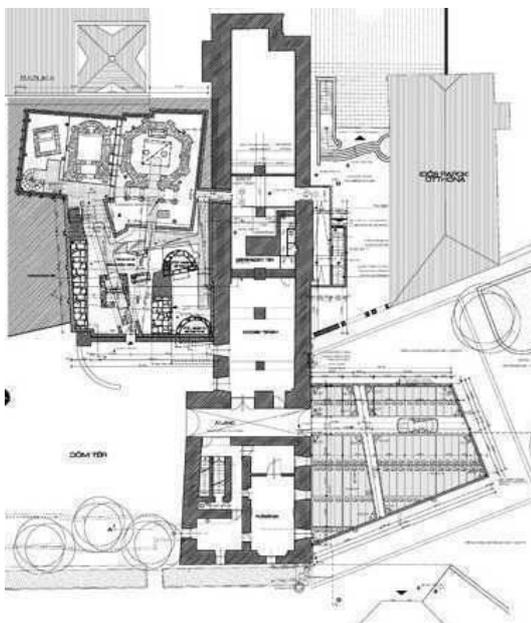


Fig.2 Pianta al livello della piazza

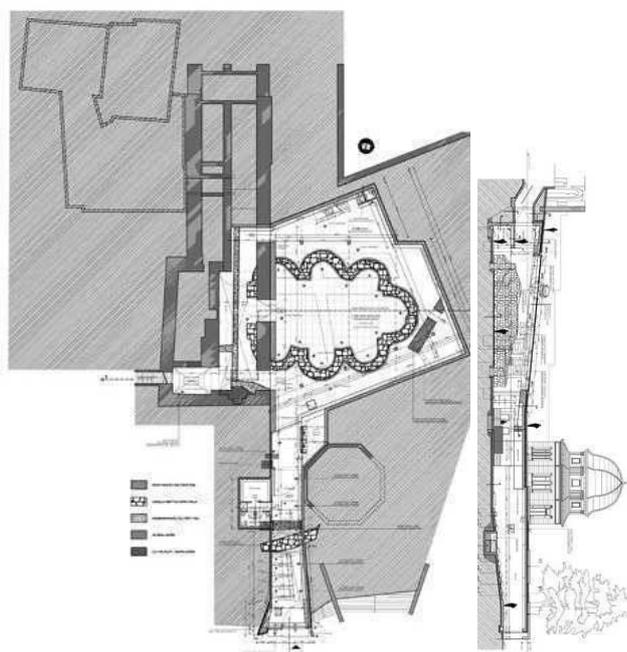


Fig.3 Pianta al livello della mura della cella septichora

## 20. CELLA SEPTICHORA DEL CIMITERO PALEOCRISTIANO DI PÉCS

### **Bibliografia:**

Bachman, Z., *Architectural conservation Hungary's Roman underworld extensive architectural conservation of the Roman Mausoleum in Pécs including details of new public rooms for above group and underground viewing*, «The Journal of CIB Batiment International Building Research and Practice», v. 22, n. 1, 1989, pp. 41-51.

BACHMANN, B., *Die Architektur zum Schutze des Weltkulturerbes in Pécs*, Schild von Steier, Kleine Schriften, v. 19, Landesmuseum Joanneum, Graz 2002, pp. 11-29.

BACHMAN, Z., *Pécs/Sopianae Early Christian Cemetery Complex Cella Septichora Visitors' Centre*, «Magyar Építőipar», vol. LIX, n.5., Budapest 2009, pp. 162-170.

BALIGA, K., *Daylight*, «Pécs, Cella Septichora Visitors' Centre», Régi Új Magyar Építőművészet Hungarian Architecture, n. 4. Magyar Építőművészek Szövetsége, Budapest 2007, pp. 4-9.

MOLNÁR, T., BACHMANN, B., *Early christian cemetery complex Sopianae/Pécs*, in Paulo J. S. Cruz, «Structures and Architecture» - Icsa 2010 - 1st International Conference On Structures And Architecture, 21-23 July 2010 in Guimaraes, Portugal, Taylor & Francis Group, Londra 2010.

**Climatizzazione:** i problemi di conservazione sono stati risolti isolando la Cella dal terreno circostante e creando un ambiente con aria condizionata costante. La temperatura media mantenuta è di 20-25° C.



Fig.1 Vista esterna della copertura vetrata



Fig.4 Vista esterna della copertura vetrata



Fig.4 Vista interna della copertura vetrata

## 20. CELLA SEPTICHORA DEL CIMITERO PALEOCRISTIANO DI PÉCS

### 20.4 CARATTERISTICHE TECNICHE

**Struttura portante della copertura vetrata:** muri in c.a. con isolamento termico che circondano l'antico monumento, ponte in c.a. a croce che sostiene travi *IPE* in acciaio ancorate alla struttura in c.a. (Fig.1).

Travi in vetro (Fig.2-4) sono ancorate alla struttura in acciaio mediante scarpe, anch'esse in acciaio (Fig.3).

**Materiali impiegati per la copertura:**

Travi in acciaio

Tipo di vetro delle lastre di copertura calpestabili (*Hoszig Ltd*):

All'esterno *AGC vetro, Stratobel 12 12 12,44* (3 lastre) vetro incollato - *Linea Azura* temprato;

16 millimetri di camera d'aria;

All'interno *AGC vetro Stratobel TOPN 44,2* incollato.

Tipo di vetro delle travi in vetro:

*AGC vetro, Stratobel 15 15 15 15,444* (4 lastre) vetro incollato temprato (Fig.3).



Fig.1 Vista interna



Fig.2 Vista interna



Fig.3 Vista interna delle travi della copertura vetrata



Fig.4 Vista interna dei resti della Cella Septichora con la copertura in acciaio e vetro

## CAPITOLO 4

### Coperture e involucri trasparenti

#### 4.0. Abstract

##### Covering structures and transparent enclosures

*The search for greater transparency and dematerialization in building cladding characterizes the present architectural scenario, inducing designers to investigate innovative technology and more efficient products. In particular, the topic of glass shelters denotes a field of experimentation that, from a technological point of view, is very complex and involves structural and microclimatic issues. Today, in the glass sector, there is a wide-ranging set of products that can be used to cover and to protect ruins. Recent technological developments have enabled glass to maintain its characteristic transparency and, at the same time, improve its mechanical properties, workability and solar protection, which also represent its greatest limits, owing to problems related to environmental climatic conditions. Nowadays glass is a material used in architecture for structural purposes (in the Countries where it is allowed) and also because of its innovative optical and mechanical properties; it guarantees transparency and light transmission and represents a supporting element. The ability to mold and shape it, also in accordance with three-dimensional geometry (it is possible to bend even toughened glass but blown glass has no certified strength and is therefore only of artistic value), and the great technological advances in recent years have generated several applications that increase prospects for protection, preservation and use in ancient contexts. On-site covering structure materials should never compromise the conservation of ancient materials; it is important to know the limitations in the use of glazed systems in archaeological sites, since a lack of evaluation can damage the finds, as has occasionally happened in the past. Glass, with its transparency, consents the passage of solar radiation, which may have dangerous effects on the remains. In order to carry out analysis of damage caused by solar radiation passing through glass (and materially affecting the finds), we carried out analysis on solar radiation and energy flows, and the optical and thermal performance of different types of glass on the market today.*

*The chapter focuses on the characteristics of glass, starting from properties and production techniques, processing and finishing. Glass can be subjected to transformations that achieve the desired performance, including: modification of the composition for production of coloured glass, special glass, etc.; association with other materials, which enables one to*

*create composite products such as glass and polyvinyl butyral, PVB layers (e.g. for safety), glazing with air, argon, etc. (thermal and acoustic insulation) and surface deposits of thin layers (coatings) for the production of low - emissivity glass, reflective glass, etc; transformation of the surface through various treatment techniques, such as screen printing or sand blasting; mechanical strengthening through heat treatments such as tempering or heat-strengthening. More specifically, analysis of characteristics, uses, durability, maintenance and technical data and the elaboration of comparison charts concerned the types of glass that may have importance in energy terms: insulating glass, laminated glass, tinted glass, screen printed glass and a variety of coated glass. In the last part of the chapter the connection systems of glass panels, which are important for aesthetic and technological impact, but also in energy terms, were investigated.*



Fig. 1 - Limestor, Dalkingen, Germania (foto Lanza Volpe, A.).

#### 4.1. Il vetro

Plinio il Vecchio così narra della scoperta del vetro, materiale dalle antiche origini, oggi uno dei più utilizzati in architettura: «una nave di mercanti di nitro (carbonato di sodio) approdò su d'una spiaggia in Fenicia, vicino al fiume Belo. Per la preparazione della cena furono utilizzati, in mancanza di pietre per sostenere le pentole, alcuni blocchi di nitro dal carico della nave. La mescolanza del nitro con la sabbia (silicea) della spiaggia diede origine, per effetto del calore del fuoco, a rigagnoli di liquido che solidificato appariva lucente e trasparente: si trattava di vetro»<sup>1</sup>. È così che la storia di questo materiale in edilizia coincide con la ricerca della trasparenza: grazie al vetro la luce può entrare negli ambienti che, al tempo stesso, sono protetti dagli agenti atmosferici.

Il vetro non è un solido, ma un liquido sottoraffreddato. Le sue molecole sono mescolate in modo casuale, come in un liquido, al punto che esse si muovono molto lentamente. Il

1) Plinio il Vecchio, *Naturalis Historia*, XXXVI, p. 191. Questa opera è un trattato naturalistico in forma enciclopedica scritto da Plinio il Vecchio tra il 23 e il 79 d. C. Nella forma giunta sino a noi, è costituito da 37 libri, che sono stati il riferimento in materia di conoscenze scientifiche e tecniche per tutto il Rinascimento e oltre. Plinio vi ha infatti registrato tutto il sapere della sua epoca su argomenti molto diversi, quali le scienze naturali, l'astronomia, l'antropologia, la psicologia o la metallurgia. Il XXXVI libro tratta di mineralogia, scultura, architettura, obelischi, piramidi, labirinti, creta, argilla, sabbia, pietra, vetro, uso del fuoco.



Fig. 2 - Prime produzioni vetrarie: VII - I millennio a.C.

vetro comune è costituito da biossido di silicio ( $\text{SiO}_2$ ), chiamato anche silice. In forma pura, la silice ha un punto di fusione di circa  $2000^\circ\text{C}$  ma spesso, durante la produzione del vetro, vengono aggiunte altre sostanze per abbassare tale temperatura. Alcune di queste sono la soda (carbonato di sodio  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) oppure la potassa (carbonato di potassio) che abbassano il punto di fusione a circa  $1000^\circ\text{C}$ . La presenza di soda rende il vetro solubile in acqua, per cui viene aggiunta anche calce (ossido di calcio,  $\text{CaO}$ ) per ripristinare l'insolubilità. La silice ( $\text{SiO}_2$ , biossido di silicio) è il più comune formatore del reticolo vetroso ed è quindi la più importante materia prima per la produzione del vetro. Circa metà della crosta terrestre è formata da minerali di silice (silicati e quarzo), il maggior costituente di rocce e sabbie. Tuttavia la silice naturale non ha, in generale le caratteristiche necessarie per la produzione del vetro, sia perché forma dei minerali complessi con altri ossidi, sia perché contiene degli elementi come il ferro che, anche in piccola quantità, danno al vetro una leggera colorazione. Solo la silice che contiene meno dello 0,1% di ossido di ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) può essere usata per la produzione di lastre. Per il vetro usato nell'ottica la quantità accettabile è ancora più bassa, meno dello 0,001%. Ancora minore deve essere il contenuto di altri minerali, come gli ossidi di cromo, cobalto, rame, ecc. che hanno un potere colorante maggiore di quello del ferro. Nessuna sabbia naturale è in grado di rispondere ai requisiti del vetro per l'ottica; per tale motivo, anche le sabbie dei migliori giacimenti devono essere ulteriormente purificate con speciali trattamenti.

La miscela vetrificabile è un fluido viscoso nel quale si trovano disperse numerose bolle gassose formatesi per decomposizione dei carbonati o per altra origine. Per eliminarle, vengono aggiunti dei composti detti affinanti. Nei moderni forni continui gli affinanti principali sono solfati associati a piccole quantità di composti riducenti (carbone, loppa d'altoforno, ecc.). Questi composti si decompongono ad alta temperatura (oltre  $1200^\circ\text{C}$ ) liberando bolle di ossigeno che, risalendo nel fuso, assorbono le bolle che incontrano fino a raggiungere la superficie. Attraversando le stratificazioni di vetro a diversa densità, le bolle svolgono anche una azione di omogeneizzazione del fuso.

Il vetro così ottenuto non è ancora puro, trasparente ed incolore. Alcuni elementi, come il ferro e il cromo, sono sempre presenti anche se in piccolissima quantità, comunque sufficiente a colorare leggermente e occorre aggiungere un decolorante alla miscela. Si tratta di alcuni elementi che in piccola quantità correggono la tonalità di colore secondo un principio fisico (sovrapposizione di un colore complementare che annulla un altro colore) o chimico (ossidazione o riduzione dell'elemento colorante). Il decolorante più noto, che agisce in entrambi i modi, è il biossido di manganese che, per questa sua proprietà, era chiamato "il sapone dei vetrai". Tuttavia il manganese, fissato nel vetro, ha la capacità di catturare l'energia della luce solare e quindi di ossidarsi, conferendo al vetro una colorazione giallo-viola (Moretti, 2004).

#### 4.1.1. Proprietà

Il vetro è un materiale fragile: la sua rottura avviene improvvisamente, senza deformazione plastica, con un comportamento lineare prima della rottura. I materiali fragili come il vetro vengono generalmente provati a compressione in quanto il loro impiego pratico avviene di solito in queste condizioni. In tale prova si sottopone il provino a compressione crescente e si valuta la sua deformazione fino a rottura. Nella prova di trazione il campione viene invece allungato sotto tensione, mentre vengono registrati con continuità il carico e l'allungamento. L'innescarsi di una microfrattura non viene contrastato da una plasticizzazione locale, per cui la presenza di inevitabili imperfezioni determina un comportamento poco favorevole. Le caratteristiche meccaniche del vetro float sono di seguito riportate:

Proprietà	
Densità	2.500 kg/m <sup>3</sup>
Durezza	6,5 Scala Mohs
Modulo elastico	750.000 kg/cm <sup>2</sup>
Coefficiente di Poisson	0,23
Carico di rottura a compressione	10.000 kg/cm <sup>2</sup>
Carico di rottura a trazione	400 kg/cm <sup>2</sup>
Carico di rottura a flessione	400 kg/cm <sup>2</sup>
Coefficiente di dilatazione termica	9x10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>
Conducibilità termica	1,163 W/m K

Tali dati mostrano un' altissima resistenza a compressione del vetro; paragonato ad un acciaio Fe360 o a un calcestruzzo Rck 300 (materiali da costruzione ordinariamente usati) risulta evidente la superiorità di tale materiale sottoposto a compressione. Il modulo elastico è di un ordine inferiore a quello dell'acciaio e quasi uguale a quello dell'alluminio:

Materiali	Carico di rottura a compressione [kg/cm <sup>2</sup> ]	Materiali	Modulo di Young [kg/cm <sup>2</sup> ]
Acciaio Fe360	3.600	Acciaio	2.100.000
Calcestruzzo Rck 300	3.000	Alluminio	700.000
Vetro	10.000	Vetro	750.000

Vi è quindi un'affinità tra la rigidità dell'alluminio e quella del vetro: un accoppiamento di questi materiali sarà più idoneo che non con l'acciaio. È fondamentale infatti evitare concentrazioni di sforzi e rendere il più uniforme possibile la distribuzione delle forze attraverso elementi di contatto. È da notare anche il basso valore del coefficiente di dilatazione termica; ciò determina un ottimo comportamento agli sbalzi termici (Lani, 2003). Il riscaldamento o il raffreddamento parziale di una vetrata determina delle sollecitazioni che possono provocare rotture cosiddette termiche. L'esempio più comune di rottura termica è quello rappresentato dai bordi coperti di un vetro ad elevato assorbimento energetico, che in presenza di forte irraggiamento solare si riscalderanno più lentamente rispetto alla superficie esposta. Nei casi in cui le condizioni di utilizzo o di posa in opera rischiano di determinare considerevoli differenze di temperatura in una lastra di vetro, sarà necessario adottare delle precauzioni in fase di posa o di lavorazione. Con un trattamento termico complementare, come la tempra, si consente alla lastra di meglio sop-

portare tali differenze di temperatura (AA. VV., 2007).

È fondamentale ribadire come soltanto oggi, grazie allo sviluppo di una tecnologia adeguata, si inizi a sfruttare le potenzialità di questo materiale che, per la sua fragilità e per la sua bassa lavorabilità, in passato è stato usato come materiale secondario. Un uso consapevole permette di ovviare le inadempienze del materiale e di sfruttare al meglio i suoi pregi (Lani, 2003).

#### 4.1.2. Classi composizionali

Il vetro esiste anche allo stato naturale. Il più abbondante è l'ossidiana, un materiale lucido scuro, molto duro, formatosi nelle rocce vulcaniche e che l'uomo imparò a lavorare per preparare manufatti (lame, punte di freccia, ecc.) oltre un milione di anni fa. Tra i materiali artificiali, il vetro è uno dei più utilizzati e certamente il più versatile, con tante proprietà uniche (facile da modellare, trasparente, durevole, poco costoso), e difficilmente potrà essere sostituito, in molte applicazioni, da altri materiali. Esistono numerosi tipi di vetro che possono essere classificati in base: alla tecnica di lavorazione (soffiato, pressato, stampato, ecc.); all'impiego (per uso farmaceutico, alimentare, per l'edilizia, per ottica, ecc.); all'aspetto (colorato, incolore, trasparente, opaco, ecc.); alle proprietà (neutro, biocompatibile, atermico, ecc.); alla resistenza chimica (inerte, durevole, poco durevole, solubile, ecc.); alla composizione chimica (quarzo, silico-sodico-calcico, borosilicato, al piombo, ecc.). Di seguito si riporta una descrizione delle principali classi composizionali (Schittich et al., 1999).

- *Quarzo fuso (vetro di silice)*. È una sostanza vitrea ideale per caratteristiche chimiche e fisiche, ma di produzione costosa per le difficoltà della sua fusione ad altissima temperatura (oltre 1700°C).

- *Silicato sodico (vetro solubile)*. È un prodotto trasparente, facilmente solubile nell'acqua, che trova larga applicazione in molte industrie.

- *Silico-sodico-calcico*. A tale gruppo del vetro silico-sodico-calcico (vetro comune), appartiene la più vasta produzione vetraria come le lastre per edilizia, arredamento e auto, le bottiglie, ecc. Commercialmente viene distinto in bianco (decolorato), mezzo bianco, colorato (verde, ambra, ecc.). L'ossido di calcio, che nella miscela vetrificabile non supera, in peso il 12-13%, viene, in parte, sostituito da altri ossidi bivalenti quando si vuole ottenere vetro con particolari proprietà chimico-fisiche. L'ossido di magnesio (MgO), oltre a migliorare la fusibilità e la lavorabilità del vetro, riduce la tendenza alla denitrificazione. L'ossido di bario (BaO) migliora la lavorabilità, impartisce brillantezza e influisce sulle caratteristiche dielettriche e di resistenza elettrica. L'ossido di zinco (ZnO) riduce il coefficiente di dilatazione e migliora la resistenza chimica. Infine l'allumina ( $Al_2O_3$ ), introdotta nel vetro al posto della silice, agisce sulla viscosità, sul coefficiente di dilatazione, sulla resistenza meccanica e chimica del vetro.

- *Borosilicati*. Sono vetri di elevata resistenza chimica (per questo detti neutri) e di composizione molto varia: contengono, in genere quantità relativamente elevate di allumina

( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e anidride borica ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ). Questi tipi di vetro vengono usati per la fabbricazione di flaconi e fiale, per apparecchiature da laboratorio chimico, ecc. Per le loro proprietà (modesta dilatazione termica) sono resistenti al calore e trovano numerosi impieghi per manufatti da forno (vetro *Pyrex*) o per particolari applicazioni.

- *Vetri al piombo*. Con questo termine si indicano i vetri trasparenti che per la loro elevata qualità imitano il cristallo di rocca naturale. A questo gruppo appartengono vetri particolarmente puri con quantità di ossido di piombo superiori al 24%. Esigono materie prime di grande purezza e sono caratterizzati da una grande lucentezza (elevato indice di rifrazione). Sono usati nel settore artistico e nella realizzazione di schermature per proteggere da radiazioni ionizzanti. La necessità di sostituire l'ossido di piombo per motivi ecologici, ha portato allo sviluppo negli ultimi anni di vetri con proprietà ottiche analoghe, contenenti potassio, bario, zinco e zirconio. Il termine cristallo è riferito anche a vetri silico-sodico-calcici (cristallo veneziano) e potassico-calcici (cristallo di Boemia).

- *Vetri per ottica*. Fra tutti i vetri è il più pregiato; la sua composizione è molto varia per conseguire i molteplici rapporti tra rifrazione e dispersione necessarie. Alcuni tipi di vetro per ottica sono: il *flint* (vetro piombico con anidride borica e ossido di bario), il *crown* (vetro calcico con anidride borica, ossido di bario, di zinco e fosfati) ed i borosilicati con elevato tenore di boro.

- *Vetri speciali*. Vi sono un'infinità di vetri con composizioni diverse, usati per applicazioni particolari come i vetri allumino-silicatici (vetro per fibre, manufatti da sottoporre a tempra chimica), vetri fosfatici (vetri privi di silice dove il vetrificante è l'anidride fosforica, usati per i biovetri ed i vetri fertilizzanti), vetri privi di ossigeno come i calcogenuri (arseniuri, solfuri) che trovano impiego in optoelettronica e i vetri alogenuri (fluoruri, ecc.) utilizzati per speciali fibre ottiche che trasmettono nell'infrarosso, ecc.

- *Invetriature o smalti*. Vetri di diversa composizione sono infine utilizzati in strato sottile applicati per cottura come rivestimento di altri materiali come i metalli (smalti) o corpi ceramici (invetriature o smalti). Si tratta in genere di vetri al piombo o borici, con dilatazione termica compatibile con il supporto, relativamente basso fondenti (Newman, 1993).

### 4.1.3. Produzione, lavorazioni e finiture del vetro piano

La tecnica di produzione, attualmente utilizzata per la fabbricazione di vetro piano, messa a punto negli anni sessanta, consiste nel far galleggiare il vetro fuso di provenienza dal forno fusorio su di un bagno di stagno liquido. Così realizzato, il vetro non ha più bisogno di levigatura superficiale e di ulteriore ricottura. L'intero processo di produzione consta delle seguenti fasi:

- *fusione delle materie prime*. Le materie prime, contenute in *silos*, vengono elettronicamente pesate con una precisione pari ad 1/1000 ed opportunamente miscelate ed umidificate. Si ottiene così la miscela vetrificabile che viene convogliata, mediante nastri trasportatori, nel forno fusorio, all'interno del quale la temperatura raggiunge i 1550° C.

- *float*. A 1100° C il vetro fuso cola dal forno su di un bagno di stagno fuso. Il vetro gal-

leggia sulla superficie liquida e piana e viene tirato sino a divenire un nastro a facce parallele. Sui bordi del nastro le ruote dentate (*toprolls*) distendono o retraggono il vetro lateralmente, per ottenere lo spessore desiderato. Gli spessori ottenuti sono compresi tra 1,1 e 19 mm.

- *ricottura*. Deposito a 600°C sui rulli di un tunnel di raffreddamento, lungo 100 metri, il nastro di vetro si raffredda sotto controllo fino alla temperatura ambiente. Il nastro di vetro acquista intorno ai 500°C le proprietà di un solido perfettamente elastico.

- *squadratura*. Raffreddato all'aria libera, il nastro di vetro è controllato e, successivamente, tagliato in lastre dalla dimensione massima di 6 x 3,21 m, con taglio dei bordi longitudinali. Gli elementi sono successivamente posizionati verticalmente su dei cavalletti per mezzo di elevatori a ventosa.

- *laminazione*. All'uscita dal forno, il vetro passa tra due rulli metallici che gli conferiscono lo spessore e il disegno desiderati.

Il vetro piano viene consegnato ai trasformatori sotto forma di lastre in "grandi dimensioni", pronte per essere tagliate nelle misure di impiego. Il taglio avviene manualmente o automaticamente mediante impianti a programmazione computerizzata. I principali tipi di molatura consistono nella:

- *sfilettatura*: eliminazione meccanica o manuale del filo o degli spigoli taglienti al bordo delle lastre;

- *molatura a filo greggio*: abrasione dei bordi di una lastra ottenuta con nastri o mole di pietra, di *carborundum* o diamantate, di grana piuttosto grossolana per eliminare le irregolarità del taglio;

- *molatura a filo lucido*: fase successiva alla precedente consistente nell'eliminazione di ogni minuta asperità dei bordi e una lucidatura degli stessi con mole diamantata e grana finissima o polveri di pomice o di ossido di cerio.

- *molatura a filo lucido industriale*: ottenuto dalla molatura del bordo delle lastre con mole di adeguata finezza, senza successive lavorazioni. L'aspetto è semiopaco, ma il bordo ha una buona finitura.

- *molatura a smussi e a bisello*: lavorazione dei bordi di una lastra che, essendo eseguita con un angolo qualunque inferiore ai 90° rispetto alla superficie della lastra, interessa, oltre che il bordo, la stessa superficie. Lavorazione molto delicata e appariscente, viene ancora oggi usata per prodotti di pregio nell'arredamento di interni.

Il vetro può subire delle trasformazioni che gli conferiscono le prestazioni volute. Tra queste:

- la modifica della composizione, per la produzione di vetri colorati, vetri speciali, vetroceramici;

- l'associazione con altri materiali, che permette la realizzazione di prodotti compositi quali: vetro e polivinilbutirrale, *PVB* (sicurezza), vetrocamera con aria, argon, ecc. (isolamento termico e acustico), o il deposito superficiale di strati sottili (*coating*) per la fabbricazione di vetri basso – emissivi, riflettenti, ecc.;

- la trasformazione della superficie, attraverso diverse tecniche di trattamento superficiali, quali la serigrafia o la sabbiatura.

- il miglioramento delle caratteristiche meccaniche, attraverso trattamenti termici come la tempra o l'indurimento.

La tempra del vetro viene effettuata al termine di tutte le lavorazioni richieste (messa in misura, molatura, foratura, serigrafia, ecc.) e consiste in un processo termico mediante il quale si inducono particolari tensioni in una lastra di vetro, allo scopo di conferire migliori caratteristiche di resistenza, in particolare alla flessione. Frutto di una intensa ricerca di laboratorio, la tecnica della tempra risale al 1959 quale adeguata risposta alla domanda dell'industria automobilistica. Questo procedimento consiste in un raffreddamento assai rapido del vetro mediante un soffio d'aria (in pochi secondi il vetro passa da 600° a 300°) che aumenta la resistenza. Al raggiungimento della temperatura prossima al rammollimento, la lastra viene estratta dal forno e bruscamente raffreddata. Le tensioni indotte in questa azione risultano di trazione all'interno e di compressione allo stato superficiale esterno, conferendo quindi una più elevata resistenza meccanica. La lastra temprata ha la caratteristica di ridursi in minuti frammenti non taglienti quando si rompe, per tale motivo è considerata di sicurezza. Il vetro temprato è utilizzato per le automobili, per l'edilizia e per quelle applicazioni speciali in cui è richiesto un particolare grado di sicurezza. La resistenza alla trazione è pari a 4-7 kg/mm<sup>2</sup> in un vetro comune, mentre il temprato arriva fino a 12-20 kg/mm<sup>2</sup>. Per ambedue i tipi la resistenza alla compressione raggiunge i 100 Kg/mm<sup>2</sup>.

Per ottenere il vetro indurito si procede come per la tempra, con la differenza che il raffreddamento viene eseguito più lentamente rispetto a un pari spessore di vetro temprato. Il vetro indurito ha il vantaggio di non avere problemi di rottura spontanea, di mantenere una resistenza meccanica maggiore del vetro ricotto e di avere una minore deformazione dell'immagine riflessa. A differenza del temprato la rottura avviene in pezzi grossolani e, per tale motivo, non è classificato come vetro di sicurezza<sup>2</sup>.

---

2) Per maggiori informazioni consultare: *Vetro piano*, sul sito [www.assovetro.it](http://www.assovetro.it)

## 4.2. Caratteristiche energetiche

Per comprendere i flussi di energia che interagiscono con il vetro occorre prima comprendere la natura dello spettro elettromagnetico e dello spettro solare e il percorso della radiazione solare verso gli ambienti vetrati. Tale percorso determina la quantità di energia solare che colpisce il vetro.

### 4.2.1. Lo spettro elettromagnetico e lo spettro solare

Ogni corpo che si trova ad una certa temperatura emette energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche e di particelle elementari. I parametri che caratterizzano le radiazioni elettromagnetiche sono:

- *Lunghezza d'onda* ( $\lambda$ ), ovvero lo spazio percorso da un'onda per compiere un'oscillazione completa. Essa viene definita anche come distanza tra due creste vicine.

- *Velocità di propagazione nel vuoto* ( $c$ ), ovvero la distanza percorsa da un'oscillazione nell'unità di tempo e che, nel caso delle radiazioni elettromagnetiche, è la velocità della luce che nel vuoto raggiunge il suo valore massimo e viene indicata con  $c_0 = 3 \times 10^8$  m/s; negli altri mezzi invece tale velocità è pari a  $c_0/n$ , dove  $n$  è una costante tipica del mezzo nel quale si propaga l'onda ed è detta indice di rifrazione assoluto del mezzo. Non esistono mezzi nei quali  $n$  sia minore di uno, cioè la luce nel vuoto si propaga con la massima velocità possibile.

- *Frequenza* ( $\nu$ ), ovvero il numero di oscillazioni nell'unità di tempo. Essa è espressa in Hertz (Hz, dove  $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ );

- *Periodo* ( $T$ ), ovvero l'intervallo di tempo che intercorre tra due passaggi consecutivi della cresta in uno stesso punto.

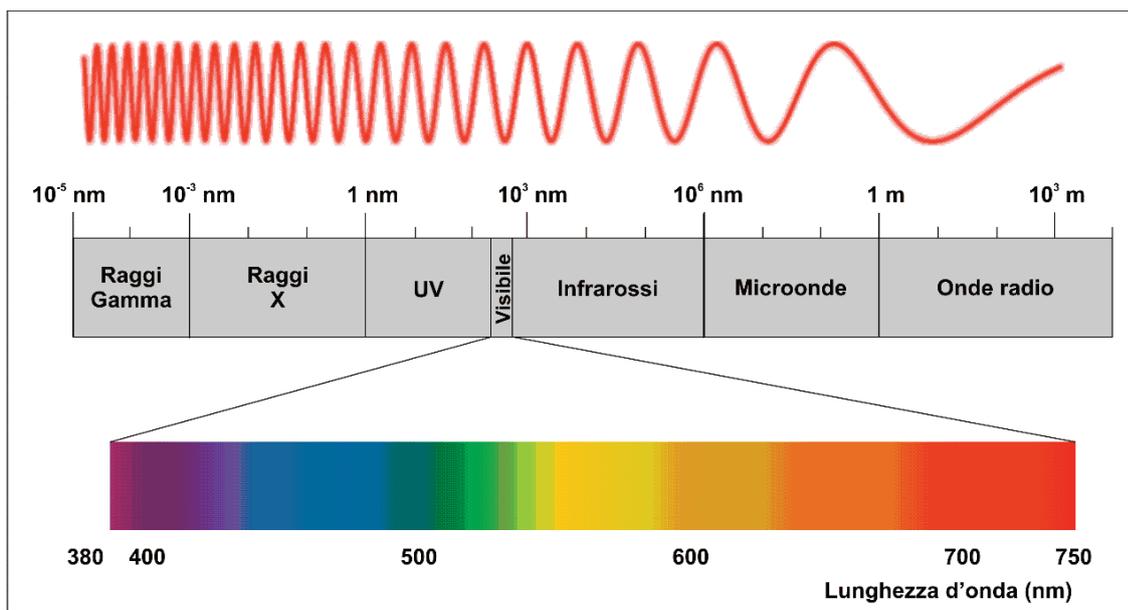


Fig. 3 - Spettro elettromagnetico.

Lo spettro elettromagnetico (*EM*), è l'insieme di tutte le possibili frequenze delle radiazioni elettromagnetiche. Poiché la lunghezza d'onda e la frequenza sono inversamente proporzionali, la lunghezza d'onda sarà tanto minore quanto maggiore sarà la frequenza e quindi l'energia dell'onda a parità di ampiezza. L'energia radiante  $E = hv$ , dove:

$$h = \text{costante universale di Planck} = 6,625 \times 10^{-27} \text{ erg/sec.}$$

$$v = c/\lambda \text{ è la frequenza con } c = \text{velocità della luce}$$

A lunghezze d'onda minori (e quindi a frequenze più alte) corrispondono energie maggiori. Tale spettro è di tipo continuo; tuttavia è possibile una suddivisione puramente convenzionale e indicativa in vari intervalli o bande di frequenza: raggi gamma, raggi X, raggi ultravioletti, radiazione visibile, radiazione infrarossa, microonde, radioonde. A seconda della loro frequenza, le onde elettromagnetiche sono prodotte da tipi di sorgenti diverse, hanno proprietà diverse e in particolare hanno diverse modalità di interazione con la materia. Le varie lunghezze d'onda che compongono lo spettro di emissione di un corpo dipendono dalla natura del corpo stesso, mentre l'intensità dell'energia alle varie lunghezze d'onda è relazionata al modo in cui le molecole vengono eccitate (Mencuccini & Silvestrini, 1999).

Esiste un valore limite per l'emissione di radiazioni, emesso da quello che viene chiamato corpo nero. Esso, più che corrispondere ad un corpo effettivo, costituisce un'astrazione. La sua caratteristica è quella di assorbire tutta l'energia incidente indipendentemente dalla lunghezza d'onda. Lo spettro di assorbimento del corpo nero si ottiene dall'involuppo di infiniti spettri di corpi diversi poiché nessun corpo, a una qualsiasi lunghezza d'onda, può emettere più energia di esso. Il corpo nero assorbe tanto calore quanto ne riceve a tutte le frequenze.

Lo spettro solare costituisce solo una piccola parte dello spettro elettromagnetico. Il sole irradia energia elettromagnetica a lunghezze d'onda di circa 0.2 micron e oltre 20.0 mm. Il profilo di questa radiazione solare raggiunge l'atmosfera terrestre con un picco massimo di intensità di circa 0.5 mm. In realtà solo una parte della radiazione solare attraversa l'atmosfera, poiché essa è opaca in certe aree dello spettro elettromagnetico assorbendo

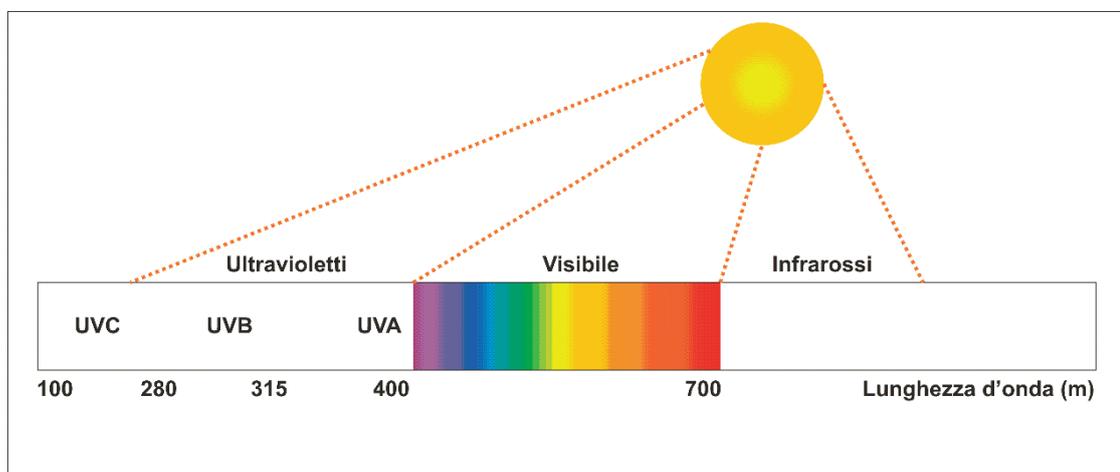


Fig. 4 - Spettro della radiazione solare.

quindi le radiazioni solari. Gli intervalli delle radiazioni che arrivano sulla superficie perché non assorbite dall'atmosfera sono tre: ultravioletta, visibile o luce e radiazione a onde corte o nel vicino infrarosso. Un quarto intervallo, onde lunghe o lontano infrarosso, rappresenta l'energia radiante dei materiali sulla terra che sono stati scaldati dal sole e reirradiano il calore a un livello energetico ridotto. Questa larghezza di banda, denominata 'radiazione terrestre' va da 3 a 50 mm.

Le diverse onde elettromagnetiche della radiazione solare che arriva sul nostro pianeta sono quindi classificate in base alla loro lunghezza d'onda:

- ultravioletti (10 ÷ 400 nm)
- luce visibile (400 ÷ 700 nm)
- infrarossi (700 ÷ 106 nm)

La radiazione ultravioletta costituisce una parte molto piccola del contenuto totale di energia della radiazione solare, circa l'8 - 9%. La gamma visibile rappresenta invece il 46 - 47% dell'energia totale ricevuta. Ciò significa che quando si sente il calore del sole sul viso, meno della metà di quella sensazione è dovuta alla radiazione visibile. All'interno di questo segmento dello spettro, naturalmente, vi sono tutte le lunghezze d'onda che costituiscono i colori dell'arcobaleno, dalle piccole lunghezze d'onda del blu alle lunghezze d'onda del rosso. Il restante 45% dell'energia totale è nel vicino infrarosso. Tale radiazione solare è energia che viene generalmente assorbita dalla gran parte dei materiali con cui viene in contatto, per poi essere riemessa sotto forma di calore (lontano infrarosso). Oltre allo spettro della radiazione solare vi è quindi uno spettro di radiazione terrestre nel *range* del lontano infrarosso che va da 3 a 75 mm. Queste lunghezze d'onda lunghe, a bassa energia, sono le lunghezze d'onda del calore irradiato dai materiali che sono stati riscaldati dal sole.

La radiazione ultravioletta, di lunghezza d'onda compresa tra i 10 e i 380-400 nm, è situata nella regione dello spettro che si estende dalla banda del violetto a quella dei raggi X. Il Sole emette radiazioni ultraviolette con lunghezze d'onda comprese tra 0,25 e 0,36 m; la banda compresa tra 0,25 e 0,31 m comprende le radiazioni più energetiche. Gran parte di queste radiazioni provenienti dal Sole viene però assorbita dallo strato di ozono

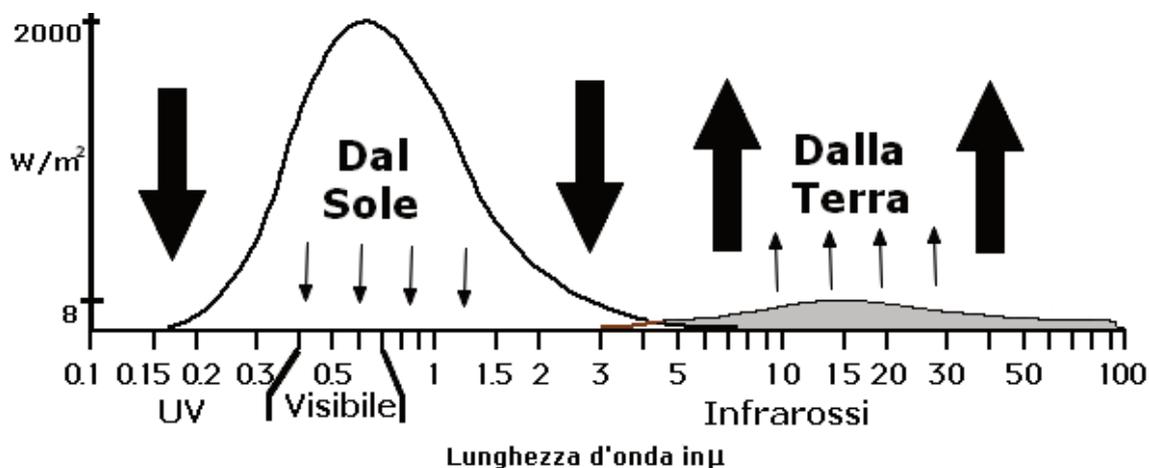


Fig. 5 - Lunghezze d'onda emesse dal sole e dai materiali riscaldati dal sole.

presente nella nostra atmosfera a una quota compresa tra 25 e 40 km circa. Gli UV-C (100-280 nm) sono completamente assorbiti dallo strato di ozono nell'atmosfera. Gli UV-B (280-315 nm) sono parzialmente assorbiti dall'atmosfera. Gli UV-A (315-380 nm) generalmente passano attraverso l'atmosfera e attraverso il vetro. La radiazione UV ha energia sufficiente a spezzare legami molecolari e a ionizzare parzialmente gli atomi, favorendo numerose reazioni fotochimiche. Il coefficiente di assorbimento degli UV è molto grande per quasi tutti i materiali.

La porzione della radiazione solare tra 380 e 780 nm è chiamata luce visibile proprio perché risulta visibile ai nostri occhi. A radiazioni visibili di diversa lunghezza d'onda corrispondono i diversi colori dell'arcobaleno. La luce, come tutte le onde elettromagnetiche, interagisce con la materia. Quando un fascio di luce colpisce un oggetto possono avvenire quattro fenomeni principali: riflessione speculare, riflessione diffusa o "scattering", rifrazione, assorbimento selettivo. Tali fenomeni possono verificarsi contemporaneamente. Il manifestarsi di un fenomeno piuttosto che un altro dipende dalla natura del materiale. Quando un raggio di luce colpisce un materiale trasparente, una parte della luce viene riflessa e una parte attraversa il materiale, subendo una deviazione nella direzione. La deviazione del raggio rifratto dalla direzione originale dipende dagli indici di rifrazione dei materiali (ad es. aria, vetro) e dalla lunghezza d'onda  $\lambda$  della luce incidente. La luce visibile è inoltre in grado di eccitare gli stati energetici elettronici. Se un oggetto è colorato ciò è dovuto essenzialmente al fatto che gli atomi o le molecole della superficie dell'oggetto possono assorbire certe lunghezze d'onda della luce che li investe portando gli elettroni a livelli energetici più alti. Solo le radiazioni con  $\lambda = 400-750$  nm sono visibili all'occhio umano. La luce percepita come bianca è in realtà la risultante di una miscela di lunghezze d'onda a cui corrispondono i differenti colori.

Gli infrarossi costituiscono la radiazione elettromagnetica di lunghezza d'onda compresa tra 700 e 2500 nm nella regione dello spettro che si estende dalla banda del visibile a quella delle onde radio e si manifestano sotto forma di calore. Il termine infrarosso deriva dal fatto che esso è formato dalle frequenze di valore minore a quelle del rosso, ma superiori alle microonde. In realtà l'intervallo comprende radiazioni che hanno un comportamento molto differente. La radiazione infrarossa si divide in tre gruppi: vicino, medio e lontano infrarosso. La parte vicina allo spettro visibile detta *NIR* (*Near Infrared*, 780 – 1400 nm) ha un comportamento simile alla luce, mentre la parte lontana *FIR* (*Far Infrared*, 1400 – 2500 nm) ha un comportamento simile alle microonde. L'energia trasportata dalle radiazioni infrarosse è in grado di eccitare gli stati vibrazionali della materia. Poiché questi sono particolarmente rilevanti nella materia allo stato solido, la maggior parte della radiazione infrarossa passa quasi inalterata attraverso l'atmosfera e soltanto una piccola parte di essa è assorbita. Le radiazioni *IR* emesse dal Sole scaldano la Terra e costituiscono la principale fonte di energia dei processi biologici, vengono inoltre emesse da qualunque corpo con temperatura superiore allo zero assoluto e la loro emissione aumenta all'aumentare della temperatura (Cutnell & Johnson, 2010).

#### 4.2.2. Il percorso della radiazione solare verso gli ambienti vetrati

La radiazione solare è l'energia radiante emessa dal Sole a partire dalle reazioni termoneucleari di fusione che avvengono nel nucleo solare e producono radiazioni elettromagnetiche che si propagano nello spazio interplanetario. Essa ha un'influenza diretta sulla temperatura dell'aria e del terreno e sul processo di evapotraspirazione<sup>3</sup> e indiretta sul valore dell'umidità atmosferica, sul movimento delle masse d'aria e sulle precipitazioni. La quantità totale di radiazione emessa dal sole nell'unità di tempo, nell'unità di superficie e misurata alle soglie esterne dell'atmosfera, valore pressoché costante nel tempo, è detta costante solare, pari a circa 1366 W/m<sup>2</sup>. Tale costante solare prima di raggiungere la finestratura viene modificata da una serie di sovrapposizioni o filtri, dalla scala del sistema solare alla scala dell'edificio, che descrivono le tappe del percorso della radiazione solare verso gli ambienti vetrati. Tali filtri sono: geometria della posizione del sole rispetto alla terra, atmosfera, sito, dispositivi di controllo solare e vetri (Wasley & Utzinger, 2000).

La prima serie di effetti riguarda la geometria della posizione del sole rispetto alla terra: l'orbita ellittica della Terra; la sua forma approssimativamente sferica; la rotazione giornaliera intorno al proprio asse; il fatto che l'asse terrestre non è perpendicolare al piano individuato dalla sua orbita ma inclinato di 23.5° e il fatto che questa inclinazione assiale rimane costante mentre la Terra orbita attorno al sole. Così abbiamo poli ed equatori, giorni e notti, stagioni con l'aumentare delle ore di luce, stagioni con il diminuire delle ore di luce, solstizi ed equinozi. Per modellare la relazione tra sole e sito abbiamo quindi bisogno di specificare tre variabili: la latitudine, l'ora del giorno e il giorno dell'anno. La latitudine influenza la relativa altezza del sole sopra l'orizzonte, l'ora del giorno individua il sole nel cielo rispetto al sud e il periodo dell'anno individua il sole in relazione ai suoi mutevoli percorsi attraverso il cielo, con poche ore di luce e un percorso basso in inverno o molte ore di luce e un percorso alto in estate.

La seconda serie di effetti riguarda l'atmosfera. L'atmosfera attenua l'intensità della radiazione che giunge al suolo provocando: riflessione dei raggi dovuta all'albedo; rifrazione; assorbimento che ne provoca un aumento di temperatura, a seguito del quale riemette radiazioni; diffusione ad opera dei vari gas atmosferici in misura variabile in funzione della frequenza. Di conseguenza, la radiazione solare al suolo risulta irregolare rispetto a quella rilevata alle soglie esterne dell'atmosfera con presenza di tipiche bande di assorbimento o riflessione. La radiazione elettromagnetica proveniente dal sole può essere suddivisa in diverse componenti: globale, diffusa, diretta, riflessa, netta. La radiazione globale viene definita come la somma della radiazione misurata a terra su un piano orizzontale proveniente direttamente dal sole e quella diffusa dal cielo (atmosfera). I rapporti tra le due componenti sono in relazione alle condizioni atmosferiche. Lo spettro di lunghezze d'onda interessato è compreso tra 0.3 e 3 mm. La radiazione globale deve essere sempre inferiore a quella massima teorica calcolata al di fuori dell'atmosfera ma può essere, al limite, uguale ai valori

---

3) L'evapotraspirazione è la quantità d'acqua che dal terreno passa nell'aria allo stato di vapore per effetto congiunto della traspirazione, attraverso le piante, e dell'evaporazione, direttamente dal terreno.

massimi teorici calcolati tenendo conto dell'atmosfera. La radiazione diffusa è la componente, misurata su un piano orizzontale, della radiazione solare che arriva a terra non direttamente dal sole ma per effetto dell'atmosfera (gas, nubi, ecc.); lo spettro di lunghezze d'onda interessato è compreso tra 0.3 e 3 mm. Nel centro Europa la radiazione diretta è equiparabile mediamente alla radiazione diffusa a causa della frequenza di nebbia e nuvole, ma a sud è la componente preponderante. La radiazione diretta è la radiazione proveniente direttamente dal Sole tra 0.3 e 3 mm. La radiazione riflessa è la radiazione solare riflessa da una superficie entro la banda 0.3 - 3 mm. Il rapporto tra la radiazione riflessa e la radiazione globale dà l'albedo. La radiazione netta è la differenza tra la radiazione proveniente dal cielo e quella riflessa ed emessa dal suolo.

Un terzo gruppo di effetti è la posizione specifica del sito con le significative influenze delle differenze regionali di altitudine, umidità relativa e modelli meteorologici stagionali. Specifici modelli climatici regionali e locali, per esempio, possono creare modelli stagionali di cielo relativamente nuvoloso che diminuisce la radiazione solare disponibile al suolo. L'orientamento della vetratura (azimuth e tilt) influenzerà la quantità di radiazione riflessa dal vetro. Questo terzo gruppo di effetti potrebbe includere anche le ostruzioni del sito e la riflettanza a terra.

Un quarto gruppo di effetti è costituito dai dispositivi di controllo solare esterni: aggetti, gronde e rientranze, dispositivi di ombreggiatura, ecc., tutti elementi architettonici con cui il progettista può modificare la quantità di radiazione solare incidente.

Le suddette categorie di 'sovrapposizioni', dalla scala del sistema solare alla scala dei dispositivi di ombreggiamento, determinano la quantità e le proprietà spettrali della radiazione solare che colpisce la superficie della vetratura prima che arrivi e si disperda nello spazio da essa racchiuso (Wasley & Utzinger, 2000).

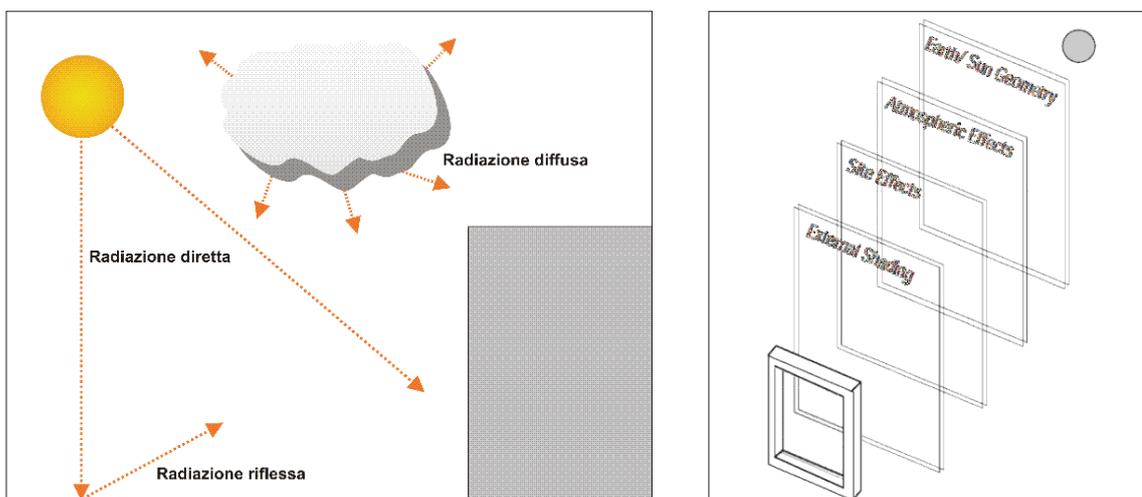


Fig. 6 - Radiazione solare globale (a); sovrapposizioni dalla scala del sistema solare al vetro (b) (Wasley & Utzinger, 2000).

### 4.2.3. I flussi energetici attraverso il vetro

Attraverso le superfici vetrate avvengono, in ogni momento del giorno, interscambi energetici che possono essere:

- *dispersioni energetici*, ovvero flussi di calore che, attraversando il vetro, si disperdono dall'ambiente interno quando si trova a una temperatura più elevata rispetto a quello esterno.
- *apporti energetici* che, al contrario, rappresentano il flusso di calore esterno portato all'interno degli ambienti, dopo aver attraversato il vetro. Tale calore entrante nell'ambiente è dovuto sia all'irraggiamento solare, sia alla differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno.

La radiazione solare incidente su una superficie vetrata in un certo giorno e a una determinata data e ora può essere descritta dalla curva di distribuzione spettrale, con riduzione della potenza di determinate lunghezze d'onda o anche con l'aumento di potenza di altre lunghezze d'onda (ad esempio, un paesaggio altamente riflettente aumenta l'intensità della radiazione solare riflessa sul vetro).

La propagazione del calore avviene per conduzione nei corpi solidi in base al proprio coefficiente di *conducibilità termica*, che per il vetro è  $\lambda = 1 \text{ W/m K}$ ; per convezione nei fluidi (aria, gas, liquidi) che a contatto con un corpo solido prende il nome di adduzione  $h$ ; per irraggiamento nello spazio, per mezzo di onde elettromagnetiche. L'irraggiamento a temperatura ambiente è situato nell'infrarosso a lunghezze d'onda superiori a  $5 \mu\text{m}$ . Esso risulta proporzionale all'*emissività*, una caratteristica superficiale dei corpi. Ad una scarsa emissività corrisponde uno scarso scambio termico per irraggiamento. Per il vetro l'emissività normale è di circa 0,89. L'insieme degli scambi termici è definito convenzionalmente per velocità del vento, emissività e temperature normalmente riscontrate nell'ambito dell'edificio. Essi sono caratterizzati da coefficienti di scambio superficiale,  $h_e$  per gli scambi esterni e  $h_i$  per gli scambi interni che presentano i seguenti valori normalizzati:  $h_e = 23 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ ;  $h_i = 8 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$ .

Il bilancio energetico delle superfici vetrate rappresenta la somma algebrica tra i disperdimenti e gli apporti energetici. Questi flussi vengono determinati, oltre che dal salto termico esistente fra i due ambienti, dalla trasmittanza termica e dalle caratteristiche spettrofotometriche del vetro.

La *trasmittanza termica* della superficie vetrata o coefficiente globale di trasmissione termica rappresenta il trasferimento del calore attraverso conduzione, convezione e irraggia-

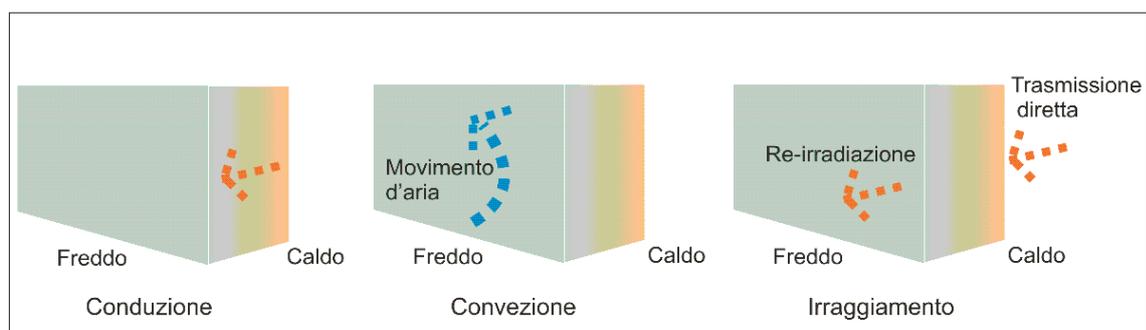


Fig. 7 - Le tre modalità di trasferimento del calore.

mento fra i due ambienti separati. È definita come la quantità di energia che nell'unità di tempo, di superficie e per la differenza di 1 °C, passa da una parte all'altra di una vetrata.

$U = \lambda S \Delta T$  [W/m<sup>2</sup> K], dove  $\lambda$  è la conducibilità termica,  $S$  la superficie e  $\Delta T$  il salto di temperatura fra i due ambienti. Il valore convenzionale è stabilito per i coefficienti di scambio superficiale  $h_e$  e  $h_i$  definiti in precedenza. Per migliorare il valore  $U$ , è necessario ridurre gli scambi termici per conduzione, convezione ed irraggiamento.

Le *caratteristiche spettrofotometriche* o caratteristiche energetiche e luminose del vetro sono rappresentate dai valori di trasmissione, di riflessione e di assorbimento dell'irraggiamento solare da parte delle pareti vetrate. L'irraggiamento che colpisce un vetro viene in parte trasmesso (trasmissione), in parte respinto (riflessione) e in parte assorbito nel vetro, trasformato in calore (assorbimento) e ri-emesso a seconda dell'emissività delle superfici. I rapporti di ciascuna di queste componenti sul flusso incidente definiscono rispettivamente il fattore di riflessione, il fattore di assorbimento e il fattore di trasmissione del vetro stesso (AA. VV., 2007).

La parte della radiazione incidente che viene assorbita verrà dissipata all'interno del vetro e avrà come effetto un aumento della temperatura del vetro stesso. A differenza della parete opaca, dove l'assorbimento si verifica sui primissimi strati della superficie esterna (tanto da dipendere dal colore della superficie), nel caso di un materiale trasparente l'assorbimento avviene, sempre in modo continuo, ma su tutto lo spessore della lastra. In definitiva, quindi, considerando che gli spessori delle superfici vetrate sono modesti, si può ragionevolmente supporre che tutta la parete vetrata si porti alla stessa temperatura. Il vetro riscaldato restituisce poi per adduzione l'energia all'ambiente.

Il fattore di riflessione "r" è dato dal rapporto tra il flusso di energia riflesso "G<sub>rifl</sub>" e il flusso incidente "G<sub>inc</sub>":  $r = G_{rifl} / G_{inc}$  (1)

Il fattore di trasmissione "t" è dato dal rapporto tra il flusso di energia trasmesso "G<sub>trasm</sub>" e il flusso incidente "G<sub>inc</sub>":  $t = G_{trasm} / G_{inc}$  (2)

Il fattore di assorbimento "a" è dato dal rapporto tra il flusso di energia assorbito "G<sub>ass</sub>" e il flusso incidente "G<sub>inc</sub>":  $a = G_{ass} / G_{inc}$  (3)

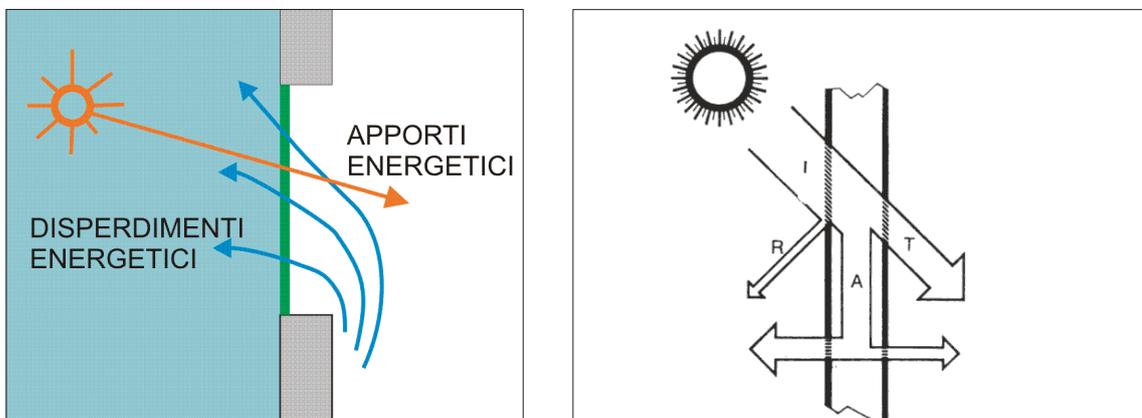


Fig. 8 - Bilancio energetico per una lastra di vetro (a); Irraggiamento che colpisce un vetro: I, radiazione solare complessiva; R, radiazione riflessa; A, radiazione assorbita; T, radiazione trasmessa (b).

Tali fattori di riflessione, di trasmissione e di assorbimento sono funzione della lunghezza d'onda e dell'angolo di incidenza della radiazione solare incidente. Per il principio di conservazione dell'energia vale:

$$G_{\text{trasm}} + G_{\text{ass}} + G_{\text{rifi}} = G_{\text{inc}} \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (4)$$

$$t G_{\text{inc}} + a G_{\text{inc}} + r G_{\text{inc}} = G_{\text{inc}} \text{ da cui segue che:} \quad (5)$$

$$t + a + r = 1 \quad (6)$$

Si ipotizza, con una semplificazione, che la distribuzione spettrale della radiazione sia indipendente dalla posizione del sole e dalle condizioni atmosferiche e che la radiazione incontri il vetro direttamente e con una direzione perpendicolare. In corrispondenza di una data incidenza, tali rapporti dipendono dall'eventuale colore del vetro, dal suo spessore e, nel caso di un vetro con deposito, dalla natura del deposito applicato.

Consideriamo una parete vetrata che divide l'ambiente esterno a temperatura  $T_1$  da un ambiente interno a temperatura  $T_2 < T_1$ . La parete sia sottoposta ad irraggiamento solare diretto. Sia  $G_{\text{inc}}$  la potenza solare incidente per unità di superficie. Per valutare la potenza entrante nell'ambiente interno, dovuta sia all'irraggiamento solare che alla differenza di temperatura  $T_1 - T_2$ , può essere applicata la relazione:

$$q = U(T_1 + \frac{G_{\text{ass}}}{k_1} - T_2) + G_{\text{trasm}} \quad (7)$$

con  $U$  trasmittanza e  $1/k_1$  resistenza liminare, da cui:

$$q = G_{\text{inc}} \cdot a \frac{U}{k_1} + U(T_1 - T_2) + G_{\text{inc}} \cdot t \quad (8)$$

Si definisce fattore solare di una parete vetrata:

$$F_s = t + \frac{U \cdot a}{k_1} \quad (9)$$

Esso rappresenta la percentuale di energia introdotta nel locale in rapporto all'energia solare incidente. Esso è pari al flusso trasmesso più il flusso riemesso verso l'interno del locale. Quanto più basso è il fattore solare, tanto meno importanti sono gli apporti solari. Per cui:

$$q = G_{\text{inc}}(F_s) + U(T_1 - T_2) \quad (10)$$

Facendo riferimento a tale equazione, nella prospettiva di dover limitare la potenza entrante  $q$ , si può agire o sul primo termine o sul secondo termine. Relativamente al primo termine, a parte la possibilità di usare sistemi di ombreggiamento che schermino la radiazione solare  $G_{\text{inc}}$ , si può agire sul fattore solare  $F_s$ . In definitiva, quindi, si tratta di ridurre i contributi dovuti ai termini  $t$ ,  $a$ ,  $U/k_1$ . Inoltre si può notare che il termine  $U/k_1$  è minore di 1 e, in base ai valori tipici di  $k_1$ , può essere assunto pari a circa 0,3. In tali condizioni è evidente che, della potenza assorbita solo una quota pari circa al 30% penetra di fatto all'interno. Per diminuire il secondo contributo occorre diminuire la trasmittanza  $U$  (AA. VV., 2007). Con-

cludendo, la diminuzione della potenza entrante nell'ambiente attraverso il vetro può essere conseguita:

- diminuendo la potenza incidente tramite l'ombreggiamento;
- impiegando vetri caratterizzati da bassa trasmittanza termica;
- agendo sulle caratteristiche spettrofotometriche del vetro.

#### 4.2.4. Le prestazioni energetiche del vetro

Le prestazioni energetiche del vetro riguardano il flusso di energia solare (calore e luce) e il flusso di energia terrestre (calore) attraverso di esso. Un vetro tradizionale assorbe le lunghezze d'onda al di fuori delle bande del visibile e del vicino infrarosso, quindi blocca una buona percentuale di radiazione UV e di radiazione infrarossa a onda lunga. I profili di radiazioni assorbite da diversi tipi di vetro sono diversi, però, a causa delle impurità inevitabili nel mix soda-calce-silice che assorbono alcune radiazioni che invece potrebbero passare attraverso. Il grado in cui la radiazione di una data lunghezza d'onda è trasmessa, assorbita o riflessa dipende da composizione, spessore e superficie del vetro. I dati principali da analizzare per determinare l'incidenza delle radiazioni solari su vari tipi di vetro sono:

- *Trasmittanza termica* (U): trasferimento del calore per conduzione, convezione e irraggiamento fra interno ed esterno a causa della differenza di temperatura. Per definizione, è la quantità di calore in watt trasmesso per ora attraverso 1 m<sup>2</sup> di vetro con una differenza di 1 K tra l'interno e l'esterno (espresso in W/m<sup>2</sup>K). Il valore di trasmittanza è calcolato per un coefficiente di scambio di calore superficiale verso l'interno pari a 8 W/m<sup>2</sup>K e verso l'esterno pari a 23 W/m<sup>2</sup>K. Più bassa è la trasmittanza più basso è il trasferimento di calore, migliore è l'isolamento;

- *Trasmissione energetica diretta* (TED): percentuale di radiazione solare diretta trasmessa attraverso il vetro;

- *Fattore solare* (g): percentuale di energia introdotta nel locale in rapporto all'energia solare incidente, comprendente la radiazione diretta e la radiazione assorbita e riemessa dal vetro verso l'interno. Minore è tale fattore maggiormente il vetro limita la trasmissione di radiazione solare. Il coefficiente è calcolato considerando il sole a 30° sopra l'orizzonte e ad angolo retto rispetto alla facciata; temperatura interna pari alla temperatura esterna; coefficienti di scambio di calore superficiale del vetro pari a 8 W/m<sup>2</sup>K verso l'interno e 23 W/m<sup>2</sup>K verso l'esterno;

- *Trasmissione luminosa* (TL): percentuale di radiazione visibile che viene trasmessa attraverso il vetro. È misurata tra le lunghezze d'onda di 380-780 nm, perpendicolarmente alla superficie. Maggiore è la percentuale, maggiore è la luce trasmessa all'interno dell'ambiente attraverso il vetro.

- *Trasmissione dei raggi ultravioletti* (UV): percentuale di radiazione ultravioletta trasmessa dal vetro, misurata nel range di lunghezze d'onda 290-380 nm. Maggiore è la percentuale minori radiazioni UV vengono trasmesse.

- *Emissività* ( $\epsilon$ ) è la frazione di energia rispetto all'energia irraggiata da un corpo nero alla

stessa temperatura. È una misura della capacità del materiale di irraggiare energia. Un vero corpo nero avrebbe una emissività pari a uno, mentre qualunque oggetto reale ha emissività compresa tra zero e uno (corpo grigio). L'emissività dipende da fattori quali la temperatura, l'angolo di emissione, la lunghezza d'onda e la finitura superficiale del materiale.

Poiché il vetro è un materiale sempre più sofisticato, oltre a tali parametri di base vi sono altri parametri che tentano di caratterizzare meglio le sue proprietà per scopi architettonici: fattore di ombreggiamento (*Shading Coefficient, SC*), efficienza luminosa (*Coolness Factor, CF*), guadagno di calore relativo (*Relative Heat Gain, RHG*), indice di resa cromatica (*Colour Rendering Index, Ra*), indice di condensazione (*Condensation Index, CI*), coefficiente di riduzione dello scolorimento (*Fading Reduction Coefficient, FRC*).

Il *fattore di ombreggiamento (Shading Coefficient, SC)* è dato dal rapporto del fattore solare attraverso il vetro in questione rispetto al fattore solare attraverso un vetro di riferimento. Dal 1994 il riferimento, costituito in origine dal vetro semplice di 3 mm con fattore solare dell'87%, è stato sostituito con un vetrocamera ordinario a due lastre, con fattore solare dell'80%. Il coefficiente di tale vetro è per definizione pari a 1,0 e rappresenta una prestazione di base. Minore è il fattore di ombreggiamento minore è il guadagno di calore e quindi più ombreggiatura è fornita dal vetro. Esso è calcolato come  $SC = g/0,80$ , con 0,80 fattore solare del vetrocamera chiaro di riferimento. È un rapporto adimensionale definito sostanzialmente come il guadagno solare attraverso un vetro determinato rispetto a ciò che sarebbe stato il guadagno solare attraverso un vetrocamera standard chiaro non ombreggiato con stessa dimensione e stesso orientamento. È stato sviluppato per fornire un semplice

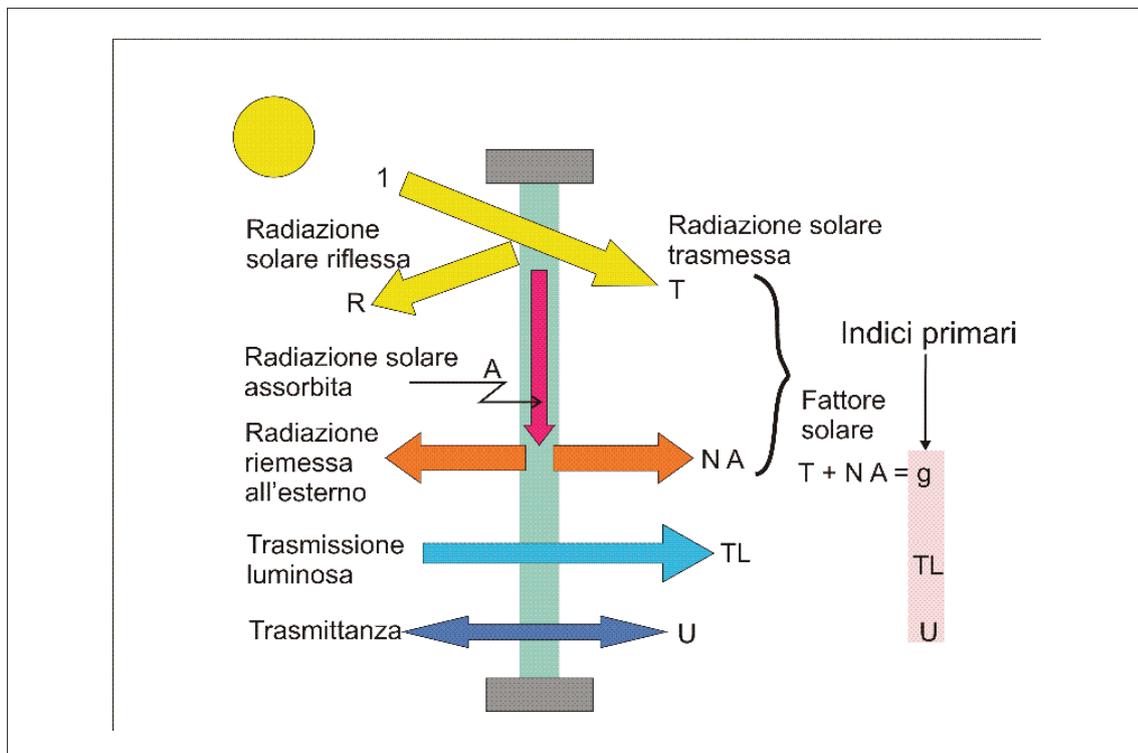


Fig. 9 - Prestazioni energetiche del vetro.

riferimento a un prodotto noto. È utilizzato per caratterizzare la riduzione della radiazione solare determinata da frangisole esterni di diverso tipo, da vari tipi di materiali e rivestimenti, da dispositivi di ombreggiatura interni come tende, veneziane e così via. È anche usato dai fabbricanti di prodotti in vetro per caratterizzare la riduzione dell'apporto solare attraverso i loro prodotti, tenendosi fuori da un contesto specifico. Tale fattore fornisce un modo per quantificare rapidamente la riduzione di guadagno solare atteso da una strategia di ombreggiatura per il calcolo del carico solare in un edificio. Esso si riferisce alla radiazione dello spettro solare, comprendente luce visibile, ultravioletto e vicino infrarosso. Basandosi soltanto su tale coefficiente si rischia di perdere di vista tutte le caratteristiche innovative delle nuove tipologie di vetro, così come non è considerata la relazione tra l'ombreggiatura, l'illuminazione naturale e il riscaldamento. In alcuni paesi tale fattore di ombreggiamento viene separato in componenti ad onde lunghe e ad onde corte.

Il *coefficiente di ombreggiamento per onde corte* (*swSC*, *short wave Shading Coefficient*) è dato dalla trasmissione energetica diretta diviso 0,80 ( $swSC = TED/80$ ). Il *coefficiente di ombreggiamento per onde lunghe* (*lwSC*, *long wave Shading Coefficient*) rappresenta il trasferimento di calore all'interno diviso 0.80, ottenuto come  $lwSC = SC - swSC$ .

L'*efficienza luminosa* (*Coolness Factor*, *CF*) è data dal rapporto tra la trasmissione della luce visibile diviso il coefficiente di ombreggiatura ( $CF = TL/SC$ ). Si tratta di uno strumento utile nella selezione del vetro, permettendo di confrontare diverse tipologie in termini di equilibrio tra la trasmissione di luce e di calore. Il parametro intende descrivere la capacità di un dato vetro di ammettere la luce escludendo il guadagno di calore solare. Tipi di vetro con un'efficienza luminosa pari a 1 trasmettono tanta luce quanto calore, quelli con un fattore inferiore a 1 trasmettono più calore che luce e quelli con un fattore maggiore trasmettono più luce che calore. Il valore più basso dell'indice è 0,36, che riflette la quantità di energia termica contenuta nella porzione visibile dello spettro solare. Il concetto che i vetri con un basso indice possano ammettere luce in uno spazio con una quantità di calore inferiore a quella dovuta all'illuminazione artificiale è fondamentale per il futuro del risparmio energetico.

Il *guadagno di calore relativo* (*Relative Heat Gain*, *RHG*) è la combinazione del guadagno di calore solare (l'energia trasmessa più la quantità di energia assorbita che viene irradiata verso l'interno) e del trasferimento di calore a causa della differenza di temperatura tra interno ed esterno, calcolato in condizioni estive e ottenuto come  $RHG = 630(W/m^2) \times SC + 7.8 (^\circ C) \times U$  (estate). Minore è tale valore più il vetro limita il guadagno di calore.

L'*indice di resa cromatica* (*Colour Rendering Index*, *Ra*) è una misura di quanto naturali appaiano i colori degli oggetti da essa illuminati. In un ambiente interno è auspicabile una corretta resa dei colori. I colori di un oggetto sono considerati come "corretti" se visti sotto una fonte di luce naturale come la luce del giorno. L'indice di resa del colore definisce la qualità trasmissiva spettrale dei vetri. L'indice valuta la somiglianza tra il colore dell'oggetto esposto alla luce diurna (rappresentata dalla luce *D65*) e il colore di tale oggetto esposto a luce che attraversa il vetro. Il valore massimo che può essere assunto è 100. Valori di 95 o superiori sono considerati accettabili. Il valore massimo raggiungibile con un vetro è 99.

L'*indice di condensa* (*Condensation Index, CI*) è un indicatore della capacità di un determinato prodotto di resistere alla formazione di condensa in uno specifico insieme di condizioni ambientali. Maggiore è il valore maggiore è la resistenza alla formazione di condensa. Tale fattore, introdotto a partire dal 2003, è stato sviluppato dal *National Fenestration Rating Council (NFRC)* e permette di valutare la probabilità di condensa, consentendo un confronto tra prodotti.

Il *coefficiente di riduzione dello scolorimento* (*Fading Reduction Coefficient, FRC*) è il rapporto tra la riduzione dello scolorimento determinato su opere d'arte attraverso un vetro rispetto alla riduzione dello scolorimento attraverso un vetro chiaro di 3 mm. Il *FRC* di 3 mm float chiaro è per definizione 1.0 e rappresenta la protezione minima da scolorimento offerta dal vetro standard. Minore è il coefficiente di riduzione dello scolorimento, migliore è la protezione offerta. Esso deriva dalla trasmissione di danno ponderata che è una misura della riduzione dello scolorimento su tutto lo spettro solare. È ponderata per includere il fatto che il danno si verifica in una larga fascia di energia solare (raggi infrarossi, luce visibile e ultravioletti). Normalmente un'elevata trasmissione luminosa significa alta trasmissione di radiazione e quindi un'alta riduzione dello scolorimento non è sempre realizzabile. Tuttavia tipi speciali di vetro e rivestimenti possono aiutare ad affrontare questo problema (Wasley & Utzinger, 2000).

#### 4.2.4.1. Controllo solare, selettività spettrale e selettività angolare

Concetti fondamentali per la definizione delle caratteristiche energetiche delle superfici vetrate sono il controllo solare, la selettività spettrale e la selettività direzionale o angolare. Il *controllo solare* è la riduzione della radiazione solare diretta che attraversa il vetro ed entra nell'edificio. In climi caldi o negli edifici con elevati carichi termici entranti, il vetro a controllo solare minimizza il guadagno solare e contribuisce a eliminare l'abbagliamento. Le caratteristiche di controllo solare, espresse tramite il fattore solare, dipendono dalla quantità di radiazione assorbita dal vetro e dalla quantità di radiazione riflessa. Tradizionalmente esiste un compromesso tra controllo solare e trasmissione della luce poiché più un vetro controlla

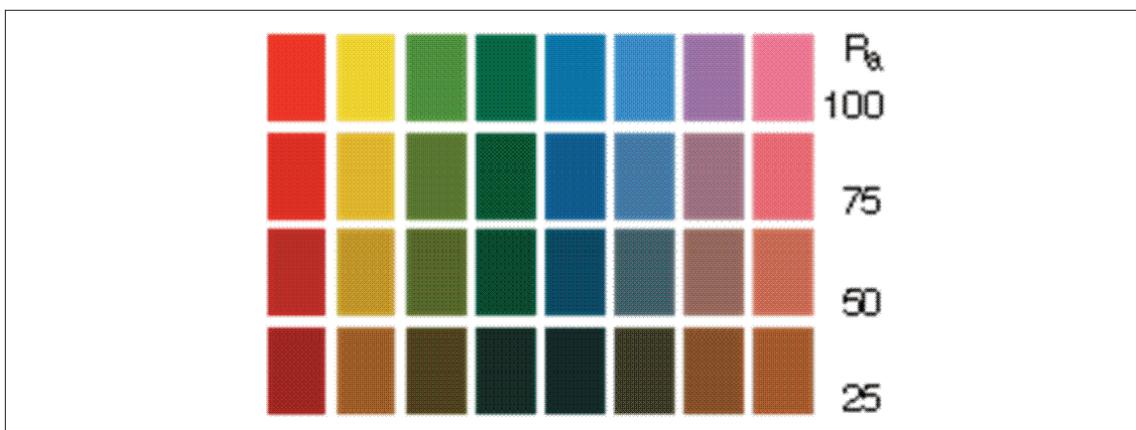


Fig. 10 - Leggendo le colonne di colori nella direzione verticale si può vedere che  $R_a$  ha un impatto significativo sulla resa cromatica.

il calore entrante più si riduce la quantità di luce che entra nell'edificio. Tuttavia, la riduzione di luce contribuisce a ridurre l'abbagliamento all'interno dell'edificio, che può essere un problema nel caso di grandi superfici vetrate. L'efficienza luminosa permette di controllare il rapporto tra la trasmissione di luce visibile e il coefficiente di ombreggiamento. I moderni vetri a controllo solare riescono a risolvere questo equilibrio con una maggiore trasmissione della luce visibile e un più basso coefficiente di ombreggiamento, riducendo la riflessione. Il controllo solare può essere raggiunto in diversi modi, ad esempio tramite il vetro colorato, il vetro riflettente o tramite vetro isolante che incorpora lamelle frangisole.

Poiché la radiazione solare e la radiazione terrestre si sviluppano su un ampio spettro di lunghezze d'onda, uno dei fattori più significativi in merito ai vetri è che essi possono influire su diverse lunghezze d'onda in modo diverso. Il progresso più importante per il vetro negli ultimi venti anni è stato proprio lo sviluppo di superfici selettive che possono bloccare alcune porzioni dello spettro. Variabili quali il tipo di vetro, il suo spessore e l'angolo di incidenza della radiazione entrante determinano se l'energia di una data lunghezza d'onda verrà trasmessa, assorbita o riflessa.

La selettività spettrale indica la capacità del vetro (o del suo *coating*) di trasmettere la radiazione in alcune parti dello spettro, bloccandone altre. Si può ottenere per assorbimento o per riflessione. Il cosiddetto "effetto serra" è il primo esempio di selettività spettrale del vetro. Il vetro ammette radiazioni nel visibile e nel vicino infrarosso, ma è opaco e assorbe di conseguenza le radiazioni nel lontano infrarosso, determinando l'effetto serra. La potenzialità di un materiale trasparente di essere selettivamente trasparente a diverse lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico è estremamente importante in quanto permette che diverse parti dello spettro solare e terrestre siano filtrate, a seconda delle esigenze applicative. In una costruzione in cui il riscaldamento è la necessità primaria, come in un clima freddo, l'ideale sarebbe un vetro spettralmente selettivo che ammetta tutta la radiazione visibile e nel vicino infrarosso dello spettro solare, e rifletta verso l'interno la radiazione terrestre del lontano infrarosso. In un edificio in cui invece il raffreddamento è la preoccupazione principale, il vetro ideale sarebbe quello che ammette solo la luce visibile, mentre respinge tutto il vicino infrarosso e il calore che lo caratterizza (Wasley & Utzinger, 2000).

Mantenendo una trasmissione luminosa alta attraverso il vetro e un fattore solare basso, sarà ammessa una luce adeguata pur bloccando quantità significative di radiazione solare. Il rapporto fra trasmissione luminosa e fattore solare è definito *indice di selettività (light-to-solar gain ratio, LSG)*. Se tale rapporto è maggiore di uno, il vetro trasmette più luce che calore. Più alto è tale rapporto, maggiore è la selettività spettrale. Un componente trasparente può essere considerato selettivo se il rapporto risulta maggiore di 1,25. Le principali applicazioni della selettività spettrale sono:

- trasmissione elevata nello spettro solare, ma bassa al di fuori di esso (lontano infrarosso);
- trasmissione alta poco al di sopra dello spettro visibile (vicino infrarosso) e bassa nel resto dello spettro;
- trasmissione bassa nel *range* di radiazioni ultraviolette e alta nel resto dello spettro.

L'importanza del concetto di selettività è chiara se si considera che la parte visibile dello spettro rappresenta circa il 50% della radiazione solare totale e si può fare in modo che un filtro selettivo ammetta tutta la 'luce', ma solo metà del calore. Un ulteriore passo in avanti viene effettuato teorizzando un filtro di 'luce fredda', un filtro ideale che restringe la larghezza di banda della luce visibile ammessa dalla gamma di 370-770 nm alla gamma dei 430-690 nm. Ciò elimina solo le lunghezze d'onda ai limiti della visione umana in cui la risposta dell'occhio è inferiore all'1% della sua sensibilità di picco. Questa banda di luce fredda rappresenta il 99,4% della radiazione visibile all'occhio umano e il 34% della radiazione solare totale. Tali limiti teorici di selettività spettrale sono stati raggiunti grazie agli attuali sviluppi della tecnologia del vetro (Carmody et al., 2007).

Una caratteristica innovativa ancora in fase di ricerca e sviluppo è la *selettività angolare* che permette di ottenere vetri direzionalmente selettivi o a selettività angolare. I vetri direzionalmente selettivi respingono o riorientano la radiazione solare incidente sulla base di una relazione geometrica tra le radiazioni e il materiale. Tali vetri possono reindirizzare la luce in una determinata direzione. Essi includono vetro serigrafato, dispositivi prismatici, pellicole olografiche, vetromattoni, lamelle e particolari strutture integrate nel vetro che filtrano o bloccano la luce. Si tratta di vetri la cui trasmissione solare è variabile in base all'angolo di incidenza della radiazione. Ad esempio, si ha un'alta trasmissione per incidenza quasi normale (che permette di mantenere la visione attraverso) e una bassa trasmissione per un elevato angolo di incidenza (componente di radiazione solare vicino allo zenit). Il principale obiettivo tecnico è quello di bloccare o riflettere la luce diretta e i

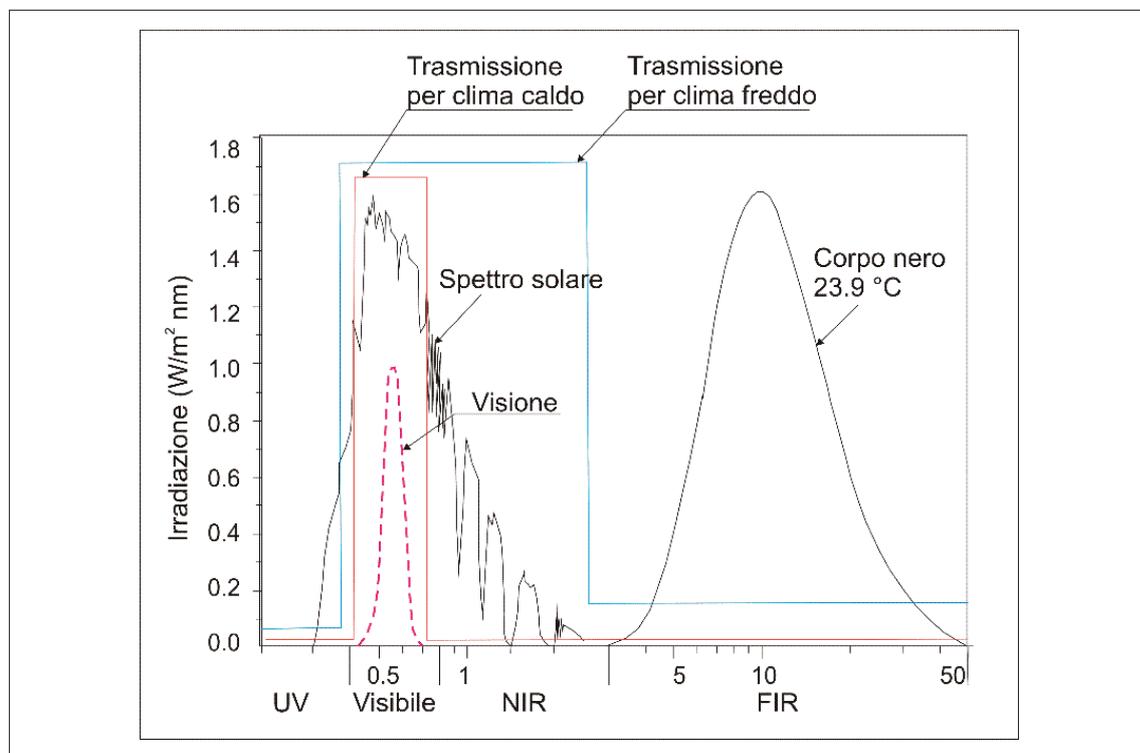


Fig. 11 - Principali applicazioni della selettività spettrale.

guadagni termici solari durante l'estate.

La fritta è il rivestimento angolare selettivo più comune. Consiste in uno strato ceramico, traslucido o opaco, che è serigrafato con piccoli motivi su una superficie di vetro. Il motivo utilizzato sul vetro controlla la luce in base all'angolo di incidenza. Il colore della fritta controlla la riflessione, l'assorbimento e il livello di *privacy*. La trasparenza visiva può anche essere controllata applicando fritte su entrambi i lati del vetro in modo che esso possa apparire trasparente secondo alcune angolazioni e opaco secondo altre. Sistemi prismatici reindirizzano la luce per rifrazione, cioè tramite passaggio o riflessione di luce che produce fasci paralleli. Le lenti di Fresnel, realizzate in materiali microscopici prismatici incorporati all'interno del vetro, sono un tipo di dispositivo prismatico. Un altro tipo di vetro direzionalmente selettivo in fase di ricerca e sviluppo è rappresentato dai vetri rivestiti con film olografici. Questi film comprendono foto-polimeri con strutture a diffrazione o pellicole goffrate che dirigono la luce in profondità in uno spazio nella direzione voluta o in funzione dell'angolo di incidenza e della lunghezza d'onda. Il vetro appare più scuro nelle aree in cui è applicato il film ma la visione avviene senza distorsioni. Dispositivi olografici funzionano in modo simile alle tradizionali mensole che redirezionano la luce e possono essere redirezionati. Offrono una ridotta manutenzione rispetto alle mensole ma non ombreggiano la parte inferiore del vetro. La ricerca per lo sviluppo di *coating* a selettività angolare su vetro è complessa e non si è ancora tradotta in un prodotto commerciale. Tecniche di rivestimento a film sottile possono creare microstrutture che, in linea di principio, riflettono selettivamente la radiazione visibile o solare in base ad angoli di incidenza (Schuman et al., 1992).

I progettisti per potere valutare le prestazioni dei vetri devono quindi considerare una molteplice serie di aspetti. Un sistema di valutazione a livello nazionale per il rendimento energetico del vetro non solo fornirebbe ai progettisti informazioni sulle caratteristiche energetiche, ma consentirebbe anche la comparazione diretta tra prodotti. Etichette energetiche potrebbero mostrare una serie di caratteristiche prestazionali, consentendo di confrontare e selezionare i prodotti sulla base delle esigenze di ciascun progetto. In alcuni Paesi esistono già sistemi di classificazione, simili a quelli oggi utilizzati per classificare gli elettrodomestici, che permettono di confrontare dal punto di vista energetico diversi tipi di vetro costituendo un supporto per la scelta.

Per valutare l'introduzione di nuove tecnologie, standard e programmi in tutto il settore, in Australia e in Nuova Zelanda è stato costituito l'*Australian Window Council (AWC)*. Oggi esistono numerose etichette che sono destinate a promuovere l'uso di prodotti ad alta efficienza energetica. Le etichette possono essere classificate in tre categorie di marchi: di qualità, comparative e informative. La classificazione è fatta con una scala di stelle, con lettere da A a G o con numeri da 0 a 10. In Australia, Nuova Zelanda e nel Regno Unito vi sono etichette comparative per finestre e in Danimarca esiste un'etichetta comparativa per vetrate isolanti. Si tratta degli unici Paesi con etichette comparative per finestre o vetrate. In Australia il *Window Energy Rating Scheme, WERS*, consente che le finestre per usi residenziali siano classificate ed etichettate in base al loro impatto energetico annuale sull'intera

abitazione, in un qualsiasi clima del continente. Il sistema di classificazione riguarda sia il riscaldamento che il raffreddamento. La variante del sistema WERS in Nuova Zelanda è il *Window Efficiency Rating Scheme*. I sistemi utilizzati nel Regno Unito e in Danimarca sono basati solo sulla minimizzazione del riscaldamento (Carmody et al., 2007).

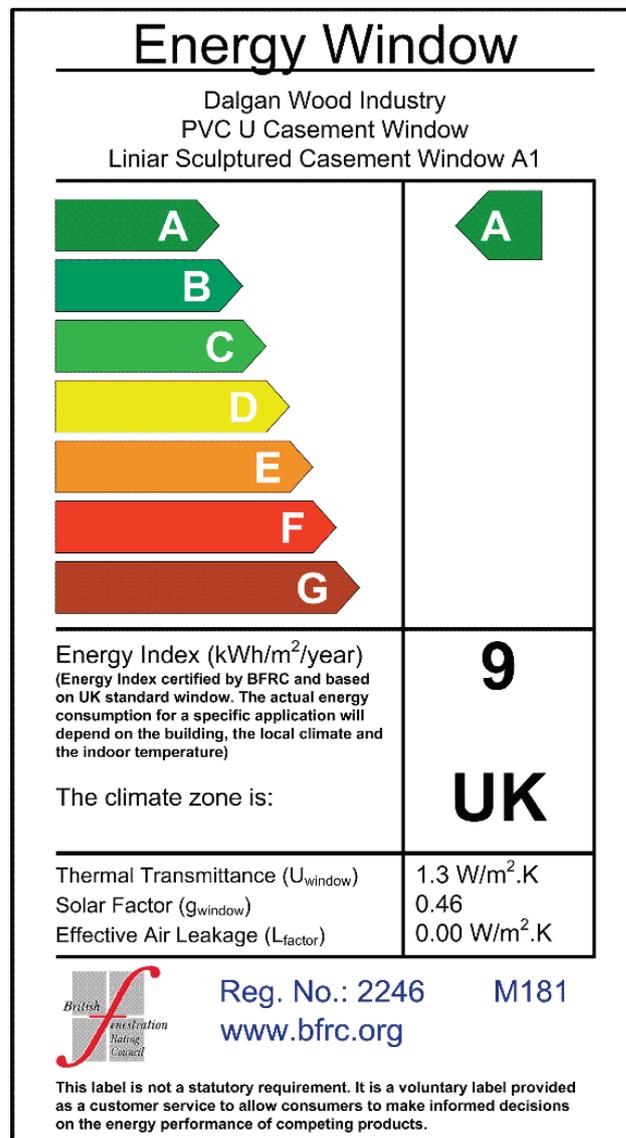


Fig. 12 - Etichetta comparativa per finestre nel Regno Unito.

### 4.3. Lavorazioni per il miglioramento delle caratteristiche del vetro

Oggi i prodotti vetrari offrono soluzioni efficaci al problema della trasmissione delle radiazioni poiché l'industria ha sviluppato tecnologie per affrontare la maggior parte delle carenze di prestazione dei sistemi tradizionali. I risultati negli ultimi dieci anni sono stati a dir poco rivoluzionari e vengono prodotti vetri ad alte prestazioni, notevolmente superiori rispetto a quelle di solo pochi anni fa. Per migliorare le prestazioni del vetro si può agire componendo la lastra con altre lastre, intervenire sugli elementi che costituiscono la sua composizione materiale, ad esempio aggiungendo coloranti o sovrapponendo *coating* di materiali diversi sulla sua superficie, oppure attraverso la trasformazione della superficie attraverso diverse tecniche di trattamento, quali la serigrafia o la sabbiatura.

#### 4.3.1. L'associazione del vetro con altri materiali

Coerentemente con la sua radice etimologica, "comporre"<sup>4</sup> il vetro significa associarlo con altri materiali in modo da ottenere nuove soluzioni, al fine di creare un unico prodotto declinabile a sua volta secondo innumerevoli programmi formali e/o funzionali. L'evoluzione del procedimento di composizione del vetro ha origine dalle tecnologie produttive standard dei prodotti vetrari, quali la laminazione e l'assemblaggio in vetrocamera, alle quali vengono aggiunti successivamente elementi complementari e alternativi ai tradizionali (Tatano, 2008). Le tipologie di composizione standard del vetro sono due:

- vetro stratificato o laminato, utilizzato essenzialmente per conferire caratteristiche di sicurezza;
- vetro isolante o vetrocamera, utilizzato per migliorare le prestazioni di isolamento termico.

La superficie dei vetri può inoltre essere rivestita con depositi (*coating*) di metalli, metalli nobili o ossidi. A seconda del tipo di deposito il materiale assumerà proprietà differenti. Il coating è il frutto della costante ricerca scientifica sviluppata dalle aziende produttrici del vetro piano, al fine di poter garantire prestazioni migliori, più durature e affidabili. Il vetro associato ad altri materiali può:

4) dal latino *compònere*, contrazione di *cum pònere*, porre insieme.

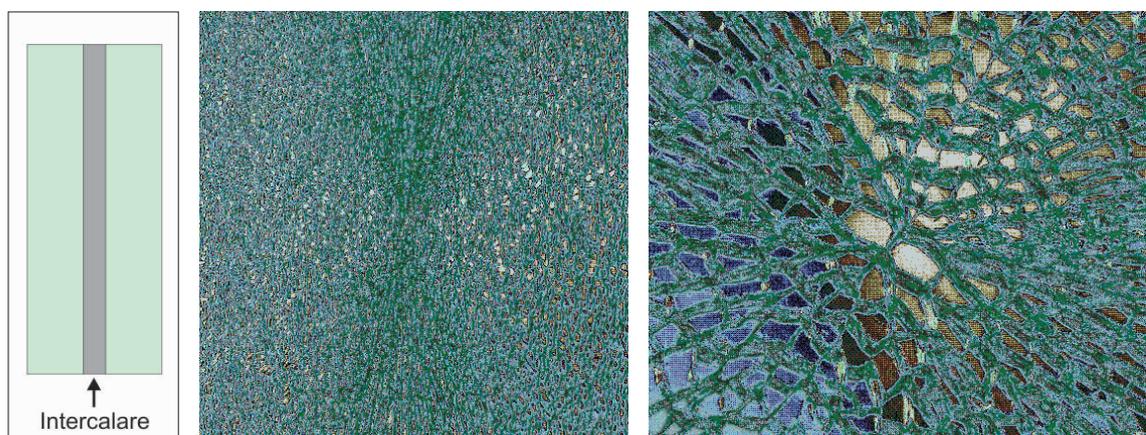


Fig. 13 - Schema di composizione del vetro stratificato (a); Adesione dei frammenti all'intercalare in caso di rottura di vetro temprato, LVR-Landes Museum Bonn, Germania (b, c) (foto Lieb, R. F.).

- incrementare le proprie caratteristiche tecniche, in particolare la resistenza meccanica, la trasmissione energetica e luminosa, l'isolamento acustico;
- modulare la propria trasparenza;
- proteggere l'interstrato di altro materiale costituendo un pannello composito di spessore ridotto;
- costituire un elemento mediatico (Tatano, 2008).

#### 4.3.1.1 Vetro stratificato o laminato

*Caratteristiche.* Il vetro stratificato o laminato è composto da due o più lastre di vetro tra loro unite su tutta la superficie mediante uno o più intercalari di materiale plastico. "In caso di rottura l'intercalare serve a trattenere i frammenti di vetro, limita la dimensione dell'apertura, offre resistenza residua e riduce il rischio di ferite da taglio o penetrazione"<sup>1</sup>. Più strati e maggiore spessore del vetro aumentano la resistenza. Quando si parla di vetro stratificato, si intende sempre vetro stratificato di sicurezza poiché, in caso di rottura, non vengono rilasciati frammenti pericolosi.

È stato inventato nel 1909 dal chimico francese Edouard Benedictus, ispirato da un incidente in laboratorio. Un flacone di vetro rivestito con il nitrato di cellulosa caduto per caso si era ridotto in frantumi, ma non a pezzi. Benedictus fabbricò un vetro plastico composito in grado di ridurre il pericolo di lesioni in caso di incidenti automobilistici. L'invenzione non fu immediatamente adottata nel settore automobilistico, ma il primo impiego fu per i vetri delle maschere antigas usate durante la prima guerra mondiale. Nel 1939, circa 56.000 m<sup>2</sup> di vetro di sicurezza *Indestructo* furono utilizzati in veicoli prodotti presso lo stabilimento

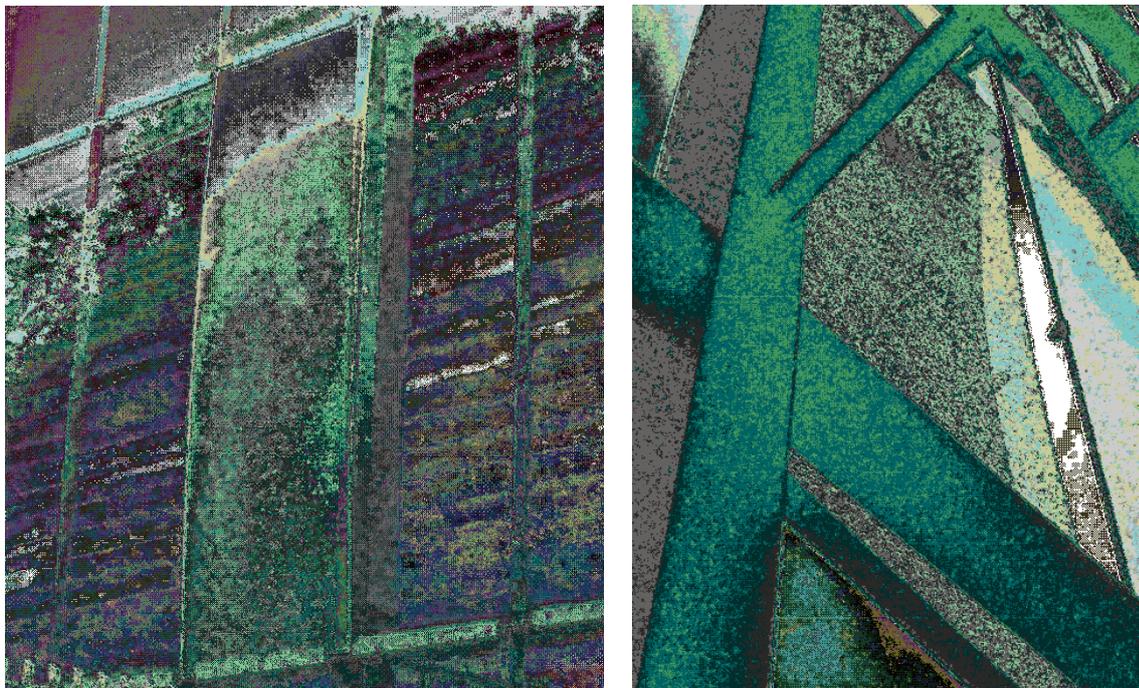


Fig. 14 - Adesione dei frammenti all'intercalare in caso di rottura del vetro, LVR-Landes Museum Bonn, Germania (foto Lanza Volpe, A.).

*Ford Motor Company* a Dagenham in Inghilterra. Il vetro veniva prodotto dalla *British Indestructo Glass Ltd* di Londra. La *Ford* lo scelse nel 1939 in quanto “dà la miglior protezione possibile. Oltre ad essere a prova di rottura, è cristallino e permanentemente trasparente”. Questa citazione accenna ad alcune delle questioni tecniche che hanno permesso al vetro stratificato di essere ampiamente utilizzato nel settore automobilistico. Il vetro stratificato può essere prodotto assemblando vetri, fogli di polycarbonato o materiale acrilico mediante intercalari, in molteplici combinazioni e spessori.

Gli intercalari possono differire per composizione e tipo di materiale, caratteristiche meccaniche, caratteristiche ottiche. In genere come intercalare viene utilizzato il *Polivinilbutirrale (PVB)*, film plastico, preparato con alcol polivinilico per reazione con aldeide butirrica, particolarmente adatto per applicazioni che richiedono forte legame, chiarezza ottica, adesione, tenacità e flessibilità. È prodotto da circa 80 anni ed è l'intercalare maggiormente utilizzato dal 1930. Oggi è prodotto e commercializzato da una serie di aziende in tutto il mondo; marchi registrati di film in *PVB* sono *GlasNovations*, *Butacite*, *Saflex*, *S-Lec*, e *Trosifol*. Ha uno spessore nominale di 0,38 millimetri o multipli e ha caratteristiche di trasparenza, tenacità, elasticità ed adesione alle lastre di cristallo particolarmente efficaci. Aumentando lo spessore del *PVB* e/o lo spessore dei vetri che compongono lo stratificato, possono essere migliorate le prestazioni di sicurezza del vetro a seconda delle esigenze (caduta nel vuoto, effrazione, proiettili, ecc.). Esistono diverse tipologie di *PVB*: trasparenti, colorati, traslucidi. Esso fornisce al vetro un più alto grado di isolamento acustico, per effetto dello smorzamento, e può bloccare la radiazione UV entrante. Un tipico vetro stratificato può essere costituito ad esempio da: 3 mm di vetro / 0,38 mm di polivinilbutirrale / 3 mm di vetro. Il prodotto in questo caso è definito vetro stratificato (laminato) da 6,38 mm o anche “33.1”, indicando in tal modo lo spessore delle due lastre (mm 3 ciascuna) e il numero di strati di *PVB* presente (uno strato da mm 0,38).

Durante la fase di assemblaggio degli stratificati le lastre vengono lavate e asciugate con l'ausilio di un'apposita macchina. Successivamente, all'interno di un ambiente climatizzato, avviene la stesura dei fogli di *PVB* tra le lastre di vetro, in funzione della tipologia di prodotto desiderata, per mezzo di un ponte automatico. Le eccedenze di *PVB* rispetto alla dimensione finale della lastra vengono poi asportate con macchinari di taglio automatici. Il procedimento successivo di pressaggio avviene in due fasi. La lastra multistrato assemblata

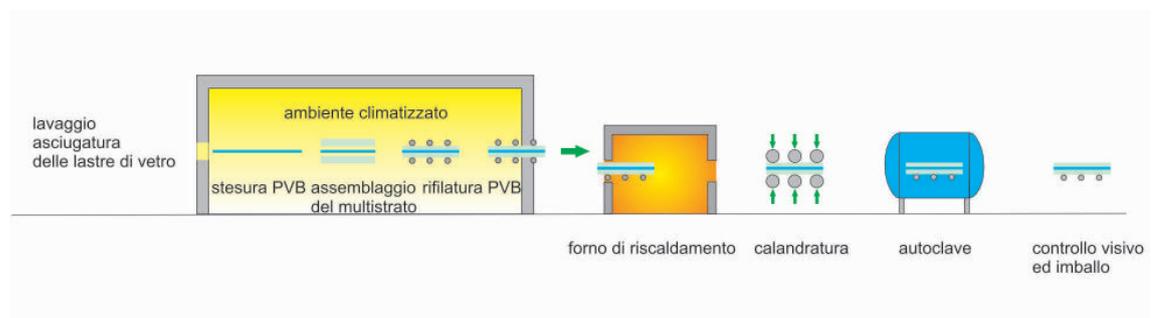


Fig. 15 - Schema della procedura di laminazione del vetro.

passa all'interno di un primo forno di riscaldamento, dove viene preriscaldata a 30°C e calandrata per favorire il processo di deaerazione, eliminando quasi tutta l'aria presente tra il PVB e le lastre di vetro. In un secondo forno di riscaldamento la temperatura sale a 60°C, per completare il processo di deaerazione ed attivare le proprietà adesive del PVB. Sempre durante questa fase, la lastra multistrato passa sotto altre calandre, che completano la sigillatura ai bordi e impediscono l'entrata di aria prima dell'autoclavatura (si effettua un esame visivo per valutare la riuscita del processo). Dopo il secondo pressaggio, poiché la lastra di vetro stratificato presenta una trasparenza ancora disomogenea, viene inserita in autoclave ad una temperatura di 140°C e ad una pressione di 9 atmosfere, per uscire completamente trasparente. Laminato in queste condizioni, l'interstrato in PVB diventa otticamente trasparente e lega le due lastre di vetro che si comportano come una singola unità.

Recenti sviluppi hanno incrementato le tipologie di materiali termoplastici per la laminazione di vetro. Accanto al PVB, importanti materiali termoplastici di laminazione del vetro oggi sono EVA (etilvinilacetato) e TPU (poliuretano termoplastico). Dal 2004 intercalari metallizzati ed elettroconduttivi in poliestere (PET) vengono utilizzati come substrato per diodi emettitori di luce (LED) e stratificati tra i vetri.

L'Etilene Vinil Acetato (EVA) è una plastica copolimerica (etilene più acetato di vinile). È utilizzato per realizzare prodotti particolarmente flessibili ed elastici. Offre tre proprietà al vetro stratificato: aumenta la resistenza all'impatto del vetro, assolve alla funzione di trattenere i frammenti in caso di rottura e assorbe energia, riducendo l'attraversamento all'impatto dell'oggetto e l'energia ad esso trasmessa poiché subisce una deformazione plastica durante e dopo l'urto. Il film EVA permette radiazioni in entrata ottime e in uscita minime (trattiene FIR per un maggior effetto serra), offre un'elevata riduzione dell'inversione termica accumulando calore durante il giorno e impedendone la fuoriuscita durante le ore notturne, ha ottima resistenza agli UV. È possibile, inoltre, aggiungere il film EVA con un additivo "antigoccia" che favorendo lo scorrimento dello strato di condensa, ostacola la formazione di gocce salvaguardando la trasparenza del film. È sempre più utilizzato nella laminazione del vetro per la produzione di pannelli fotovoltaici, per la realizzazione di serre e recentemente

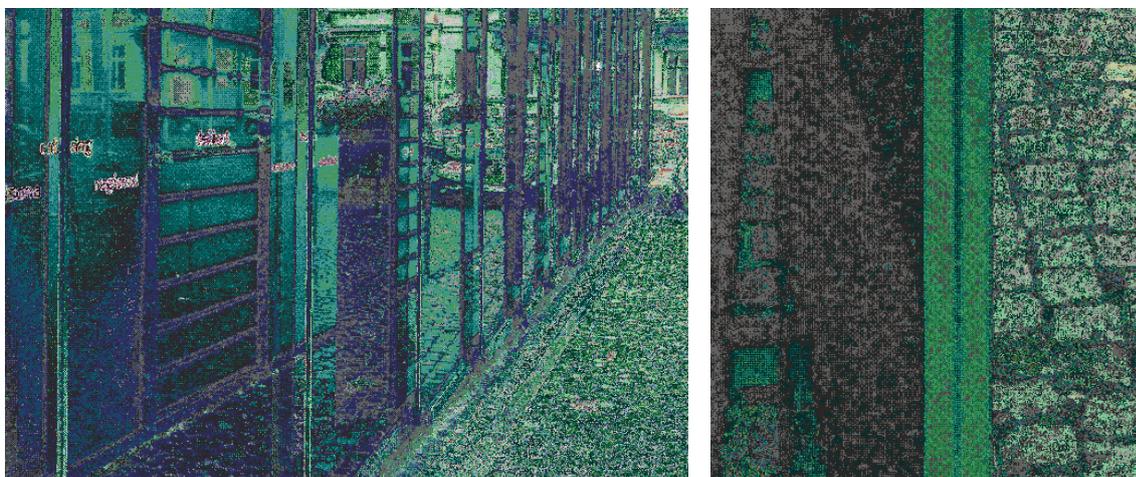


Fig. 16 - Vetro stratificato, LVR-Landes Museum Bonn, Germania (foto Lanza Volpe, A.).

anche per il vetro decorato. È consigliato per la copertura di serre e tunnel per le coltivazioni invernali in zone a bassa luminosità. Tali pellicole sono traslucide prima di essere riscaldate e diventano completamente trasparenti dopo il trattamento termico. I risultati sono stabili nel tempo anche in condizioni particolari; il costo è elevato rispetto ad altri film plastici.

Il *Poliuretano Termoplastico (TPU)*, a base estere o etere, è un materiale versatile che combina proprietà di elasticità e resistenza meccanica in un ampio intervallo di temperature di impiego. Ha ottima resistenza all'abrasione, all'impatto, ritorno elastico, resistenza alla lacerazione, resistenza chimica, caratteristiche di trasparenza, buona stabilità in condizioni umide e a temperature estreme, grazie alla sua capacità di compensare espansione e contrazione termica. Inoltre, sono a disposizione concentrati per aumentare la resistenza agli UV. Viene applicato principalmente nei vetri per finestre e coperture in edifici in zone soggette a situazioni meteorologiche estreme come gli uragani, in edifici con particolari esigenze di sicurezza quali banche ed edifici governativi, carceri, ospedali, centri di ricerca o per mezzi di trasporto quali treni, aerei, automobili blindate e veicoli militari.

*Impieghi.* Il vetro stratificato è distribuito comunemente in casse contenenti lastre di 3210×2400 mm e/o in grandi lastre 3210×6000 mm, dimensioni non standard fino a 7000 mm e con accoppiamenti 3/3, 4/4, o 5/5. Altri accoppiamenti vengono eseguiti appositamente su richiesta. È normalmente impiegato dove vi può essere il rischio di impatti con il corpo umano, oppure dove il pericolo possa derivare dalla caduta della lastra se frantumata (settore automobilistico, luoghi pubblici, coperture, ecc.). Le vetrine dei negozi, i parabrezza-lunotti delle automobili sono tipicamente realizzati in vetro stratificato come pure le zone parapetto delle vetrine interne ed esterne. I vetri stratificati possono soddisfare molteplici esigenze di sicurezza e si classificano in:

- *vetri antiferita*; è la funzione per la quale è nato il vetro stratificato. Il vetro stratificato antiferita deve essere utilizzato ogni volta sussiste un rischio per l'incolumità delle persone (ma non si presenta il pericolo di caduta nel vuoto). In caso di rottura, i frammenti rimangono tenacemente aderenti al plastico e, pertanto, dalla lastra non possono staccarsi pezzi di vetro di dimensioni pericolose per l'incolumità delle persone. In genere si usano lastre di vetro di modesto spessore e fogli di PVB di spessore relativamente elevato.

- *vetri anticaduta*; hanno caratteristiche di resistenza superiori ai vetri antiferita e devono essere in grado, in caso di urto accidentale, di trattenere una persona, evitandone la caduta nel vuoto.

- *vetri antivandalismo - anticrimine*; in opportune composizioni il vetro stratificato è in grado di resistere a violenti e ripetuti colpi di mattoni, pietre, spranghe di ferro, martelli e simili. Pur rompendosi, lo stratificato rimane in opera e continua a proteggere persone e beni in occasione di atti vandalici occasionali. La scelta del numero, dello spessore e della sequenza di montaggio delle lastre di vetro e dei fogli di leganti in PVB punta ad ottimizzare le caratteristiche di resistenza allo sfondamento.

- *vetri antiproiettile*; la scelta del numero, dello spessore, della sequenza di montaggio

delle lastre di vetro e dei fogli di leganti in PVB ottimizza le caratteristiche di resistenza ai proiettili.

- *vetri antiesplorazione*; la scelta del numero, dello spessore, della sequenza di montaggio delle lastre di vetro e dei fogli di leganti in PVB è fatta in modo da ottimizzare le caratteristiche di resistenza alla pressione causata da esplosione di ordigni.

- *vetri antiuragano*; vetro resistente a cicloni, accompagnati da venti costanti con velocità superiore a 120 Km/h che possono arrivare a 350 km/h.

I vetri stratificati sono in grado di assolvere, oltre a quelle di sicurezza, anche le seguenti funzioni con i dovuti abbinamenti:

- controllo della visione e della luce;
- isolamento termico;
- protezione solare;
- protezione dai raggi ultravioletti;
- isolamento acustico;
- decorazione.

*Durabilità e manutenzione.* Il procedimento tecnologico per il trattamento delle lastre in autoclave permette di ottenere prodotti stratificati di alta qualità indegradabili nel tempo. La produzione di vetro stratificato con interposto PVB vanta una tecnologia di consolidata efficacia da oltre 50 anni. Eventuali danni possono riguardare la penetrazione dell'umidità sul bordo dello stratificato, la delaminazione dovuta ad eccessivo calore e la compatibilità con i vari sigillanti.

Gli effetti dell'umidità sono riscontrabili in una opacizzazione caratterizzata da un alone biancastro che si sviluppa sui bordi tra le due lastre, dovuta ad una lunga ed eccessiva esposizione all'acqua. Il fenomeno di opacizzazione dei bordi è reversibile con la perdita di umidità; in condizioni ambientali di clima secco l'area opaca tenderà a scomparire, per riformarsi in periodi di maggiore umidità. L'effetto di opacizzazione dei bordi dovuta all'umidità normalmente si manifesta se il vetro stratificato non è stato immagazzinato adeguatamente prima dell'installazione o se l'umidità riesce a penetrare nell'alloggiamento del vetro nel telaio e in tale telaio non ci sono gli adeguati accorgimenti per evitare la condensa.

Le delaminazioni da eccessivo calore si possono verificare su vetri stratificati in opera con bordi a vista. Questo inconveniente è dovuto alla scarsa qualità dei processi di produzione non controllati e che possono generare delle sollecitazioni in alcuni punti del bordo del vetro stratificato, soprattutto in presenza di lastre temperate. Altri effetti negativi sui bordi del vetro stratificato sono dovuti al contatto dei sigillanti con il PVB. Ciò si manifesta con irregolari bollicine lungo il bordo ove il materiale sigillante incompatibile è a stretto contatto col bordo dello stratificato. Questo fenomeno si verifica più comunemente in vetrature prive di telai e con i bordi sigillati. Tutto ciò è evitabile in modo semplice avendo precauzione di usare sigillanti compatibili. In genere sono raccomandati sigillanti resilienti non indurenti e nastri o guarnizioni elastometriche.

Lo standard europeo previsto nella norma *UNI EN ISO 12543 - Vetro stratificato e vetro stratificato di sicurezza*, suddivisa in sei sezioni, di cui la quarta specifica sulla durabilità del vetro laminato, descrive metodi e requisiti dei test per poter avere un prodotto resistente a temperatura elevata, umidità elevata ed esposizione a radiazioni per un periodo di tempo equivalente a 25 anni di vita senza che le proprietà del vetro stratificato vengano alterate in modo significativo dalla comparsa di delaminazione, bolle e opacità.

*Caratteristiche energetiche.* Di seguito i grafici di confronto delle principali caratteristiche energetiche del vetro stratificato al variare dello spessore. Tali grafici sono stati ricavati a partire dai dati tecnici forniti da alcune ditte vetrarie.

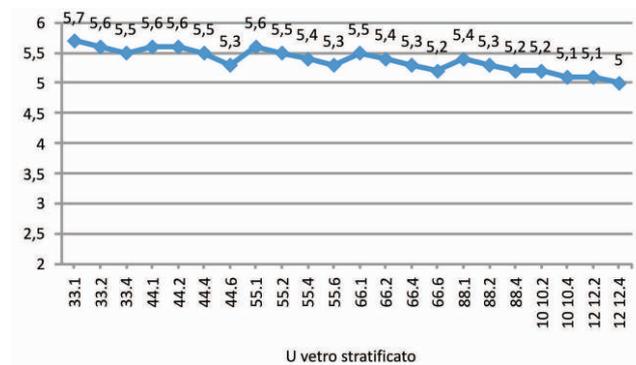


Fig. 17 - Trasmittanza ( $W/m^2 K$ ) del vetro stratificato al variare dello spessore (mm).

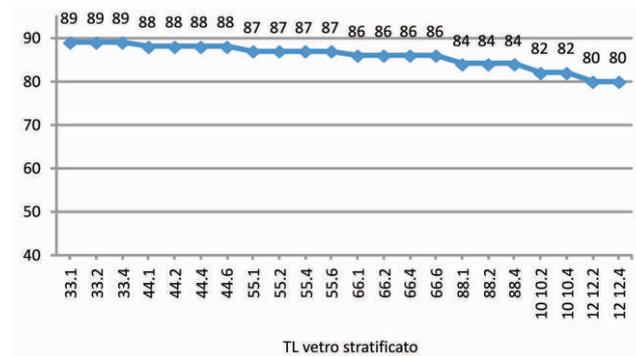


Fig. 18 - Trasmissione Luminosa TL (%) del vetro stratificato al variare dello spessore (mm).

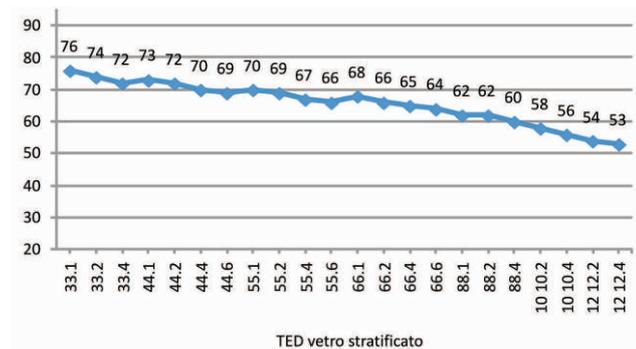


Fig. 19 - Trasmissione Energetica Diretta TED (%) del vetro stratificato al variare dello spessore (mm).

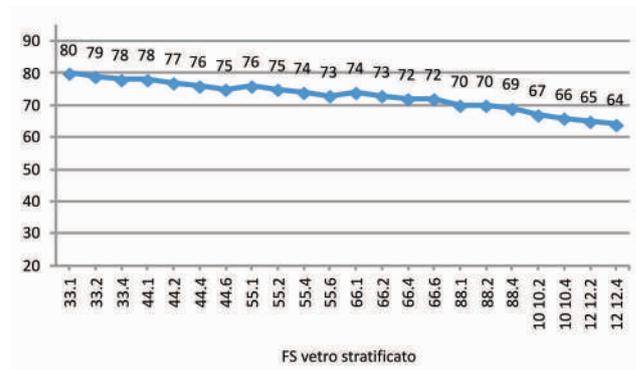


Fig. 20 - Fattore Solare FS (%) del vetro stratificato al variare dello spessore (mm).

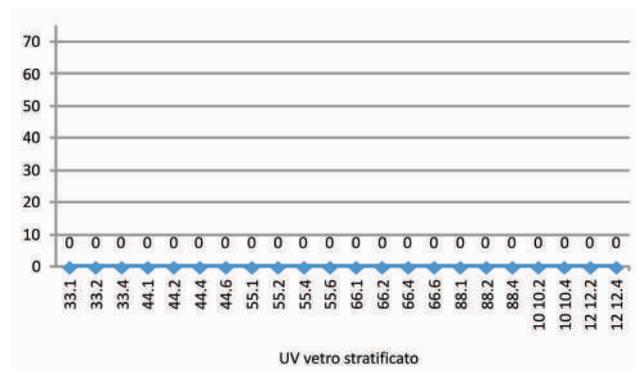


Fig. 21 - Trasmissione UV (%) del vetro stratificato. Grazie alla presenza del PVB la trasmissione delle radiazioni ultraviolette è pressochè pari a zero.

#### 4.3.1.2. Vetrocamera o vetro isolante

*Caratteristiche.* Il vetrocamera o vetro isolante (IGU, *Insulating Glass Unit*, elemento vetrato isolante) è un tipo di vetro costituito da due o più lastre unite tra loro lungo il perimetro da un distanziatore in materiale metallico (alluminio, acciaio) o polimerico e separate da uno strato d'aria o di gas con una bassa conducibilità termica (argon, krypton, xenon), con lo scopo di aumentare l'isolamento termico.

La "finestra a doppio vetro" è stata inventata negli Stati Uniti nel 1930 ed era comunemente disponibile nel 1950 in America con il marchio *Thermopane*<sup>TM</sup>, registrato nel 1941 dalla *Libbey-Owens-Ford Glass Company*. Il processo di produzione è oggi ben definito e il marchio *Thermopane* è entrato nel vocabolario del settore del vetro indicando il vetrocamera. Le parti di cui si compone una vetrata isolante sono:

- A: vetro
- B: distanziatore
- C: setaccio molecolare
- D: butile
- E: sigillante
- F: intercapedine con aria disidratata o gas

A) Il *vetro*, sia interno che esterno, può essere di qualsiasi tipo, con spessori da mm 3 a mm 10 o spessori maggiori per applicazioni speciali. Possono anche essere utilizzati vetri stratificati. La maggior parte delle unità sono costituite da vetri interni ed esterni aventi medesimo spessore. Applicazioni speciali, per l'isolamento acustico o la sicurezza, possono richiedere l'uso di spessori diversi nella stessa unità. Per comodità di descrizione, le superfici di una unità con doppia lastra sono denominate in base alla seguente convenzione: superficie # 1 (faccia all'esterno), superficie # 2 (faccia interna della lastra esterna), superficie # 3 (al di fuori della lastra interna) e superficie # 4 (faccia interna della lastra interna). Applicando la nomenclatura corrispondente, per le unità triple risultano superfici da # 1 a # 6.

B) Il *distanziatore*, di materiale non permeabile al vapore acqueo, metallico o polimerico, separa i vetri e sigilla lo spazio tra essi. È conformato in modo che all'interno di esso possa trovare alloggio il setaccio molecolare costituito dai sali necessari per mantenere disidratata

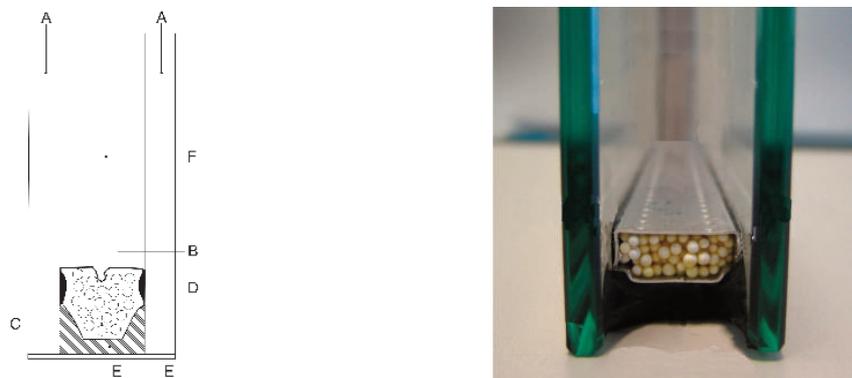


Fig. 22 - Sezione di un vetrocamera con indicazione delle parti componenti A: vetro, B: distanziatore, C: setaccio molecolare, D: butile, E: sigillante, F: intercapedine con aria disidratata o gas; immagine della sezione.

l'intercapedine risultante, evitando in tal modo la comparsa di condensa sulla superficie # 2, quando la temperatura esterna del vetro diminuisce.

C) D) E) Un *sigillante adesivo primario* (cordone di *butile* o a base di polisobutilene - *PIB*) garantisce la tenuta meccanica tra le facce del distanziatore e le lastre, pressate contro esso. Le lastre sono poi sigillate sul bordo utilizzando come *sigillante secondario* polisolfuro o sigillante siliconico o materiale simile, che assicura la tenuta all'aria umida esterna.

F) L'*intercapedine* è lo spazio tra i due vetri, normalmente riempito con aria secca. Sfruttando la resistenza termica fornita dall'intercapedine di aria disidratata, le vetrate isolanti permettono di raggiungere livelli di isolamento termico decisamente migliori rispetto al vetro singolo. Gli spessori della camera usualmente utilizzati sono di mm 6, 9, 12, 15, 16, 18. Tale spessore in genere non supera i 18 mm, poiché per valori superiori si innescano moti convettivi e la resistenza termica dell'intercapedine tende a diminuire.

Isolare significa contrastare conduzione, convezione, irraggiamento. L'isolamento termico rinforzato viene conseguito con l'impiego di vetrate isolanti evolute i cui componenti sono in grado di interferire favorevolmente sulla frazione conduttiva, convettiva e radiativa del flusso termico. Il punto di maggiore resistenza e di più facile intercettazione del flusso risulta essere l'intercapedine tra le lastre. Il primo passo è stato fatto sostituendo l'aria disidratata delle vetrate comuni con gas dalle caratteristiche di conducibilità termica molto ridotte: l'*Argon* (conducibilità termica pari al 67% di quella dell'aria), il *Krypton* (circa la metà della conducibilità dell'Argon), lo *Xenon* (circa 1/3 della conducibilità dell'Argon) usati perché non tossici, trasparenti, inodore, chimicamente inerti e commercialmente disponibili a causa della loro diffusa applicazione nell'industria. In generale, per ogni gas di riempimento vi è uno "spessore limite" definito dalle equazioni riportate nella norma *UNI-EN 673: 2005* come spessore di gas oltre il quale, in funzione della temperatura e delle caratteristiche di densità e viscosità dinamica, si favorisce l'insorgere di convezione<sup>5</sup>. Questo fenomeno non influisce in alcun modo sulla componente radiativa della trasmissione del calore che resta perciò invariata al variare del gas di riempimento o dello spessore dell'intercapedine. Lo spessore ottimale per il Krypton è inferiore di quello per l'Argon e per l'Argon inferiore che per l'aria. In sintesi, mediante l'uso di gas diversi dall'aria si possono mantenere spessori dell'inter-

---

5) Fissate le condizioni al contorno e un parametro geometrico caratteristico  $d$ , (per una vetrata isolante, temperature delle superfici, temperatura media del gas e spessore della cavità), il coefficiente di convezione si può esprimere in funzione della conducibilità termica del gas alla temperatura riferimento e del rapporto fra la dimensione caratteristica  $d$  e lo spessore dello strato limite ipotetico  $\delta^*$ ; il rapporto  $d/\delta^*$  corrisponde al gruppo adimensionale detto numero di Nusselt,  $Nu$ . Attraverso sperimentazioni estese e l'analisi teorica del processo convettivo naturale sono state individuate alcune relazioni che permettono di esprimere il numero di Nusselt in funzione delle grandezze che determinano il coefficiente di convezione. Fissate la temperatura di riferimento  $T_\infty = 283 \text{ K}$  e la differenza di temperatura fra le facce  $T = 15 \text{ K}$ , per ciascun gas vi è uno spessore dell'intercapedine  $d^*$  in corrispondenza del quale  $Nu = 1$ ; minore è la viscosità cinematica del gas, minore sarà il valore di tale spessore limite  $d^*$ . Con spessori dell'intercapedine  $d$  superiori a  $d^*$  la trasmittanza termica aumenta per effetto dell'insorgere di moti convettivi.

capedine elevati senza innescare moti convettivi e si ottengono maggiori valori di resistenza termica con spessori più ridotti. Tali gas hanno una densità maggiore rispetto all'aria, ma costi più elevati. Krypton e Xenon sono molto costosi. Il Krypton, che è notevolmente più costoso rispetto all'Argon, non è generalmente utilizzato se non per produrre vetrate doppie sottili o unità a triplo vetro a elevate prestazioni. Lo Xenon ha trovato impiego in pochissime applicazioni proprio a causa dei costi elevati. Nel caso di vetrocamera a più intercapedini, la minore differenza di temperatura tra le facce adiacenti una singola intercapedine ostacola l'insorgere dei moti convettivi all'interno dei gas e quindi si avranno "spessori limite" maggiori di quelli ottenibili per il vetrocamera singolo. Tuttavia, aumentando il numero di intercapedini, aumenta anche il numero delle lastre di vetro impiegate (con due intercapedini si hanno già quattro lastre di vetro) e ciò porta ad un peso complessivo maggiore, con telai di spessore maggiore e con l'esigenza di connessioni in grado di reggere tale peso.

In passato, alcuni produttori hanno utilizzato anche esafluoruro di zolfo, in particolare per l'isolamento acustico. Esso ha solo i 2/3 della conducibilità dell'Argon ma è stabile, poco costoso e denso. Il regolamento (CE) n. 842/2006 del 17 maggio 2006 vieta oggi l'immissione in commercio di vetrate riempite con gas ad effetto serra come l'esafluoruro di zolfo ( $SF_6$ ).

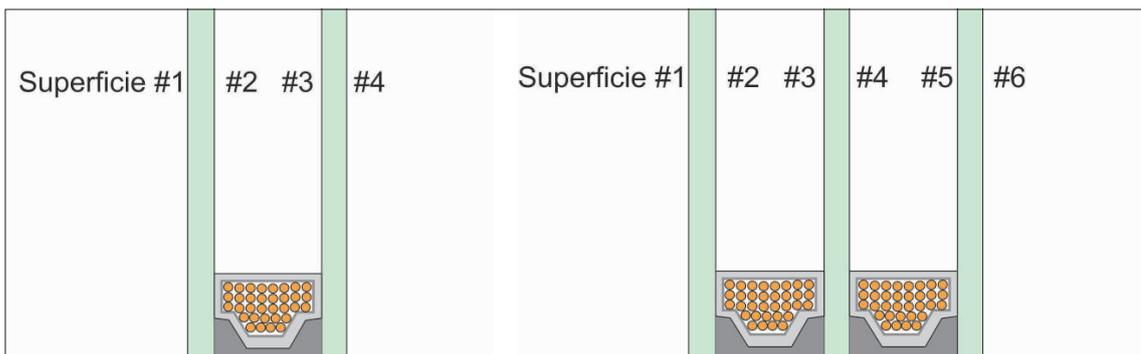


Fig. 23 - Indicazione della numerazione delle facce di un vetrocamera con camera singola e con doppia camera.

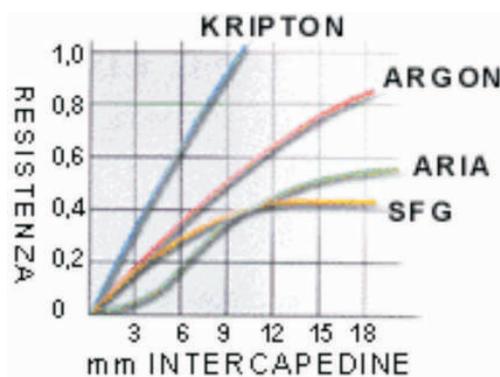


Fig. 24 - Andamento della resistenza termica in funzione dello spessore dell'intercapedine. Aumentando lo spessore di gas a bassa conducibilità termica la resistenza aumenta. Superato un certo spessore l'isolamento termico non migliora ulteriormente e tende leggermente a peggiorare. In corrispondenza di questo spessore, variabile in funzione della differenza di temperatura fra le facce delle lastre che racchiudono l'intercapedine e delle proprietà del gas di riempimento, hanno inizio i moti convettivi il cui effetto negativo è superiore a quello positivo dell'aumento di spessore di gas isolante. Dal punto di vista dell'isolamento termico, è quindi inutile costruire vetrate isolanti con spessore dell'intercapedine superiore allo "spessore limite".

Per ridurre drasticamente la perdita di calore per convezione e conduzione può anche essere utilizzato un prodotto noto come vetro isolante sotto vuoto (*VIG*, *Vacuum Insulated Glass*). In tali unità *VIG* viene rimossa dallo spazio tra le lastre la maggior parte dell'aria, lasciando quasi completamente il vuoto. Unità *VIG* attualmente sul mercato sono ermeticamente sigillate lungo il loro perimetro con una saldatura in vetro rigida, cioè una fritta di vetro avente un punto di fusione ridotto. Tali vetri a tenuta rigida sono generalmente limitati alle applicazioni per le quali la differenza di temperatura attraverso i vetri non supera i 35°C.

Per ottenere un isolamento rinforzato, si può agire, sempre a carico della componente radiativa, sulle caratteristiche spettrofotometriche delle lastre utilizzate, attraverso l'uso di vetri con trattamenti superficiali in grado di assorbire o riflettere la radiazione termica.

Unendo tutte le opportunità oggi offerte dalle vetrate isolanti è possibile disporre di un'ampia scelta di soluzioni con trasmittanza compresa tra  $U = 2,9 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  delle vetrate isolanti comuni e  $U = 1,5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  delle vetrate isolanti rinforzate, e tra esse scegliere, con l'integrazione dei parametri spettrofotometrici, la tipologia più idonea (Daneo & D'Este, 2009).

*Impieghi.* Edilizia, in particolare serramenti esterni (finestre e porte) e facciate continue, al fine di ridurre le perdite termiche dell'edificio o per l'isolamento acustico.

*Durabilità e manutenzione.* Le vetrate isolanti se di dimensioni ridotte, possono anche essere realizzate con lastre di vetro di 3 mm benchè questo spessore sia sconsigliabile per la sua fragilità. Misure standard massime fornite sono di mm 6000 x 3210. La norma *UNI 10593* è divisa in quattro sezioni; la quarta sezione definisce in modo specifico le prove di invecchiamento e i requisiti delle vetrate isolanti, al fine di determinare la penetrazione del vapore acqueo all'interno dell'intercapedine della vetrata isolante stessa per verificarne la durabilità. Le vetrate isolanti prodotte ormai da vari decenni offrono le migliori risposte nelle realizzazioni architettoniche trasparenti per isolamento termico, isolamento acustico e per il controllo degli apporti solari e luminosi.

Il maggiore rischio di instabilità nel tempo è la formazione di condensa all'interno dell'intercapedine. Essa si presenta inizialmente con tracce di umidità nella camera d'aria della vetrata isolante (normalmente di forma circolare al centro della lastra); con il tempo tali tracce diventano sempre più evidenti fino ad interessare tutta la superficie del vetro; ciò comporta oltre alla mancanza di trasparenza anche l'assenza della funzione di isolamento termico.

Le cause più diffuse sono dovute ad un difetto iniziale di produzione: sali disidratanti saturi o inopportuni, sigillature eseguite non idoneamente. Per queste cause l'effetto condensa interno alla camera d'aria può apparire molto rapidamente. Altri motivi possono derivare dai telai sui quali è montata la vetrata isolante, ad esempio l'uso di infissi sui quali non vi sono gli adeguati accorgimenti di drenaggio e di ventilazione per evitare la condensa. Altra motivazione frequente è dovuta all'incuria nella movimentazione delle vetrate isolanti, che possono riportare delle piccole lesioni sugli spigoli che permettono un contatto tra l'aria

interna disidratata e l'aria dell'ambiente.

La protezione del giunto perimetrale è condizione necessaria per il mantenimento della sua funzione, per cui ogni influenza lesiva va evitata. Ciò vale per deposito, trasporto, montaggio ed utilizzo. Influenze dannose possono essere: formazione costante di umidità sul giunto, irradiazione UV, temperature estreme. Grandi differenze di temperatura tra i vetri interni ed esterni danneggiano i sigillanti dei distanziatori. Le unità con un piccolo spazio tra le lastre sono più inclini al danneggiamento a causa dell'aumento della pressione. La vita di un vetro isolante varia a seconda della qualità dei materiali utilizzati, delle lavorazioni, della dimensione dell'intercapedine tra vetri, delle differenze di temperatura e della posizione di installazione sia in termini di direzione che di posizione geografica. In genere durano da 10 a 25 anni. Se si affacciano a sud nell'Emisfero Nord, o a nord nell'emisfero Sud, la durata è spesso inferiore ai 12 anni.

In Canada, a partire dagli inizi degli anni '90, nel Regno Unito dal 2004 e in Irlanda dal 2010 vi sono alcune aziende che offrono il restauro di vetrate isolanti. Esse permettono la ventilazione con una foratura nel vetro o nel distanziale. Questa soluzione elimina spesso la condensa visibile, ma non può pulire la superficie interna del vetro e la colorazione che può essere avvenuta dopo l'esposizione a lungo termine all'umidità; può offrire una garanzia da 5 a 20 anni e può essere una soluzione "verde" quando la finestra è ancora in buone condizioni. Se l'unità isolante aveva un riempimento di gas (ad esempio Argon o Krypton), il gas naturale viene dissipato.

*Caratteristiche energetiche.* Di seguito i grafici di confronto delle principali caratteristiche energetiche del vetrocamera singolo e a doppia camera al variare dello spessore. Tali grafici sono stati ricavati a partire dai dati tecnici forniti da alcune ditte vetrarie.

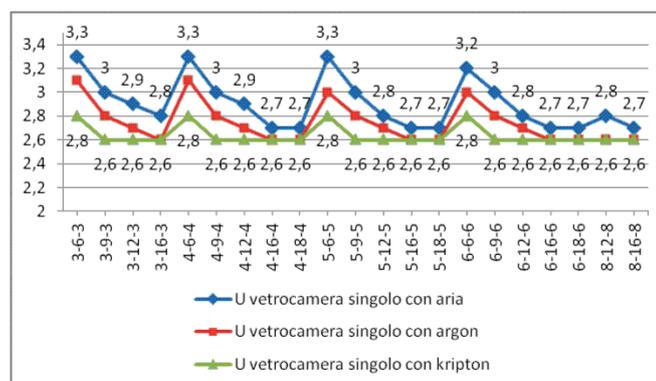


Fig. 25 - Trasmittanza ( $W/m^2 K$ ) del vetrocamera con diversi gas di riempimento.

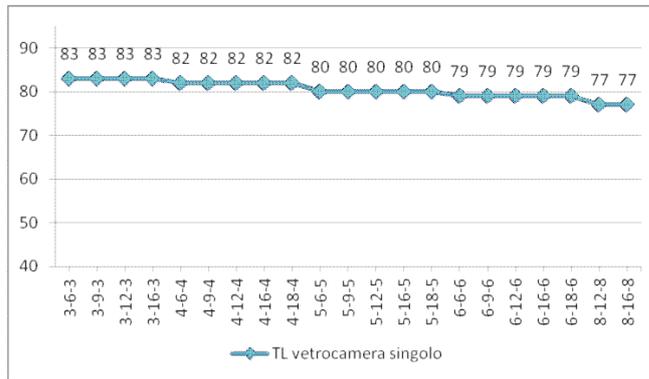


Fig. 26 - Trasmissione Luminosa TL (%) del vetrocamera al variare dello spessore (mm).

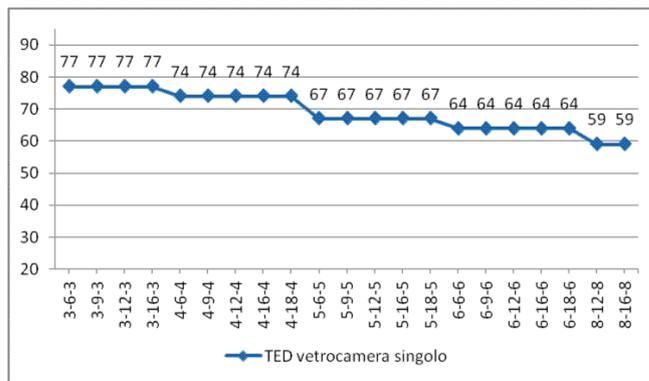


Fig. 27 - Trasmissione Energetica Diretta (%) del vetrocamera al variare dello spessore (mm).

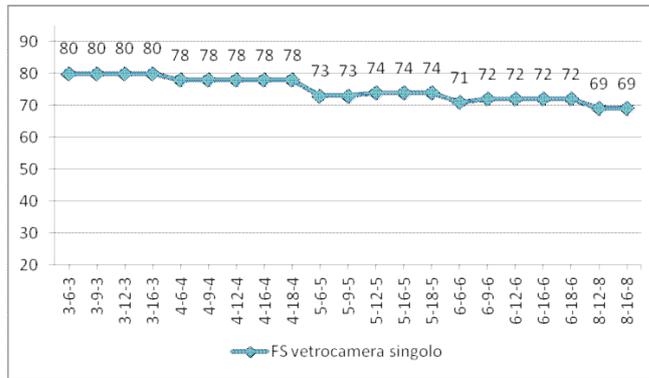


Fig. 28 - Fattore Solare (%) del vetrocamera al variare dello spessore (mm).

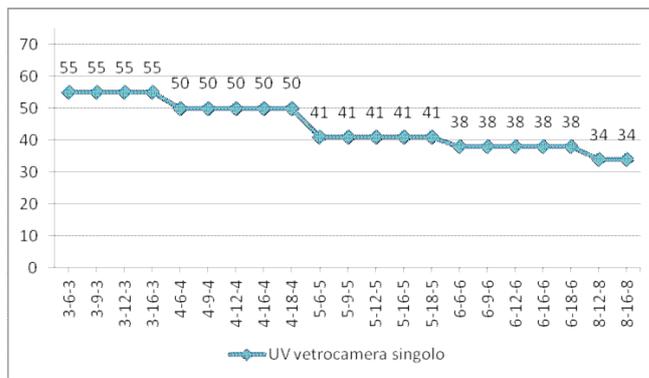


Fig. 29 - Trasmissione UV (%) del vetrocamera al variare dello spessore (mm).

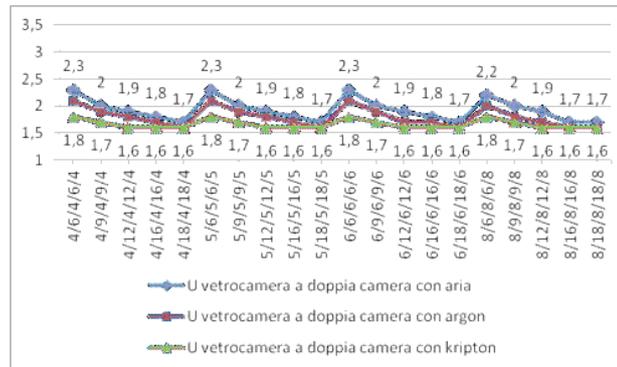


Fig. 30 - Trasmittanza U (W/m²K) del vetrocamera a doppia camera con diversi gas di riempimento.

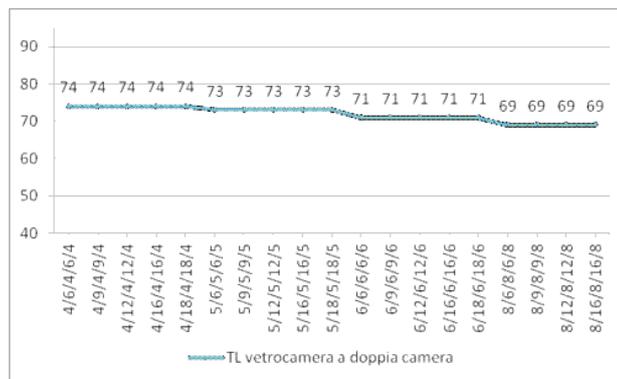


Fig. 31 - Trasmissione Luminosa TL (%) del vetrocamera a doppia camera al variare dello spessore (mm).

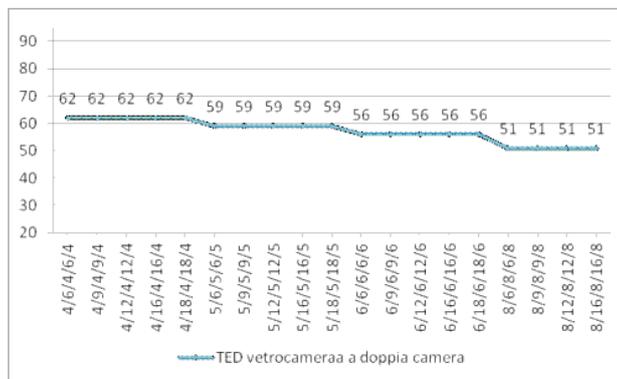


Fig. 32 - Trasmissione Energetica Diretta (%) del vetrocamera a doppia camera al variare dello spessore (mm).

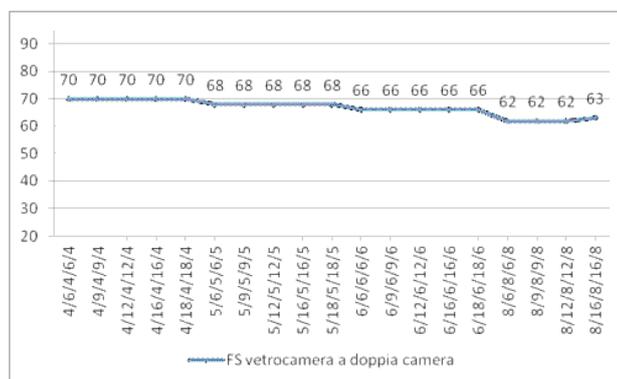


Fig. 33 - Fattore Solare (%) del vetrocamera a doppia camera al variare dello spessore (mm).

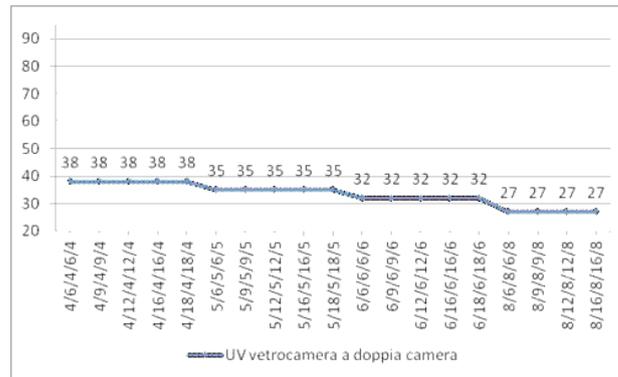


Fig. 34 - Trasmissione UV (%) del vetrocamera a doppia camera al variare dello spessore (mm).

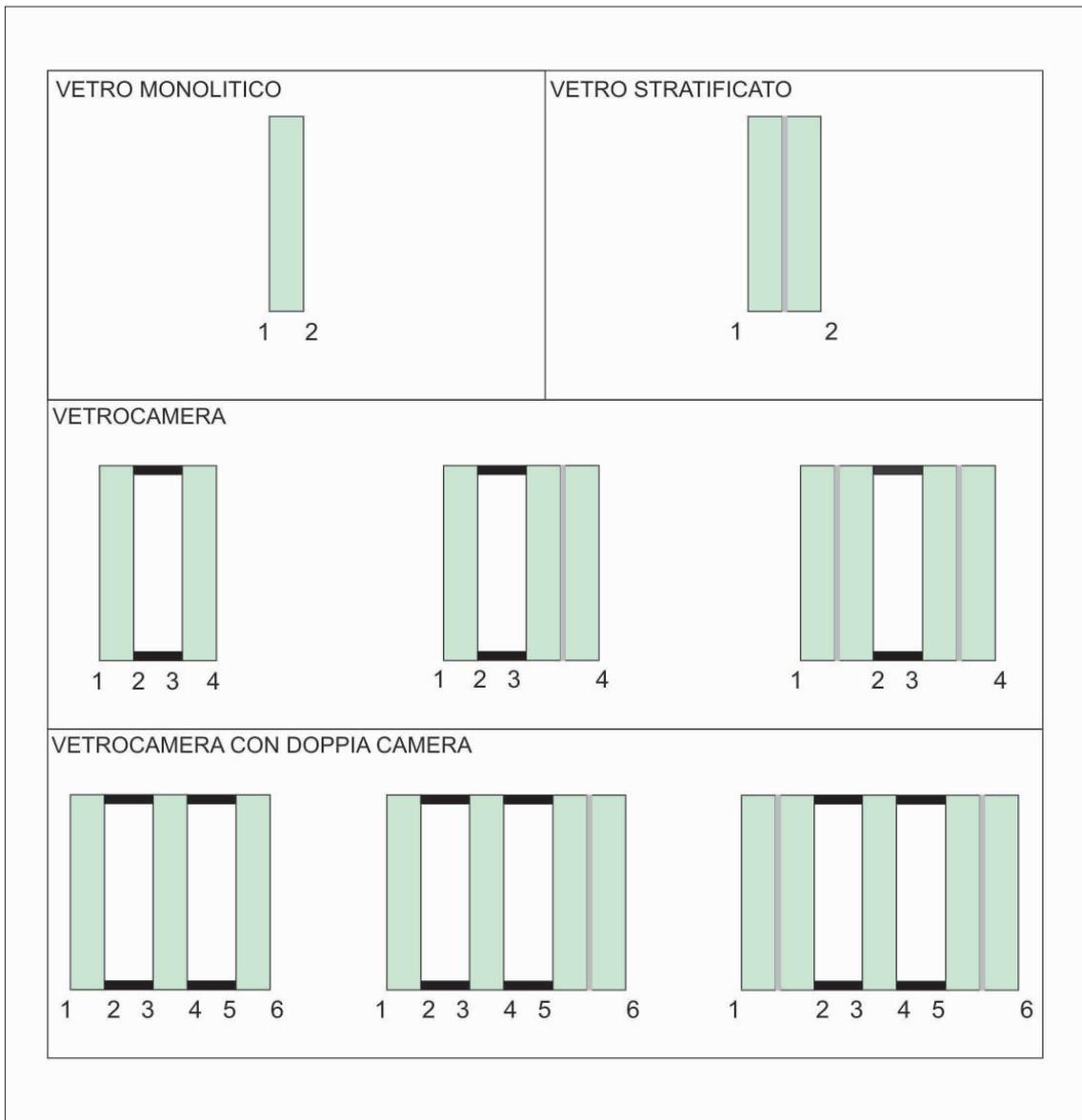


Fig. 35 - Possibili composizioni.

### 4.3.1.3. Vetro con coating

La superficie dei vetri può essere rivestita con film o strati sottili nanometrici, detti coating, di metalli, metalli nobili o ossidi. A seconda del tipo di deposito, il materiale assumerà proprietà differenti. Tali strati "funzionalizzanti" possono essere usati per raggiungere specifiche prestazioni in termini di benessere, gestione, manutenibilità, aspetto, sicurezza. Un vetro coatizzato o rivestito è quindi un vetro che presenta una faccia opportunamente trattata per ottenere da essa una proprietà specifica. I materiali utilizzati per la produzione di film sottili su vetro devono rispondere a una serie di requisiti: essere non tossici; essere facilmente reperibili; formare strati sottili con opportune resistenze meccaniche e chimiche; garantire le proprietà desiderate con il minor numero di strati possibili. Le tecniche di deposizione dei film sottili sul vetro consentono di utilizzare gran parte degli elementi metallici, dei loro ossidi e nitruri e di numerose leghe. I *coating* possono essere applicati con procedimenti differenti, di tipo chimico e di tipo fisico (Daneo et al., 2011). I più diffusi sono il procedimento pirolitico, "*Chemical Vapor Deposition*" (CVD) e quello magnetronico, "*Magnetron Sputtering Vacuum Deposition*" (MSVD), sviluppati già dagli anni Ottanta.

Il procedimento pirolitico è un processo di deposizione a caldo che avviene in linea durante la produzione del vetro piano. Metalli nobili e ossidi metallici vengono depositati durante la fabbricazione a temperature elevate che ne provocano la fusione e l'inglobamento nella superficie delle lastre, permettendo di introdurre legami forti tra *coating* e vetro. La resistenza superficiale del rivestimento è quindi molto elevata (stabilità, durezza e resistenza agli agenti atmosferici), pari a quella del vetro. Questa caratteristica consente l'applicazione del rivestimento su qualsiasi faccia della lastra, sia interna che esterna. Si tratta di un processo semplice, efficiente e poco costoso. Il risultato è un prodotto facilmente temprabile e trasformabile, di grande durata, bassa manutenzione e pochi problemi di stoccaggio, chiamato per tali motivi vetro "*hard coating*". Data l'impossibilità di ottenere depositi multi-

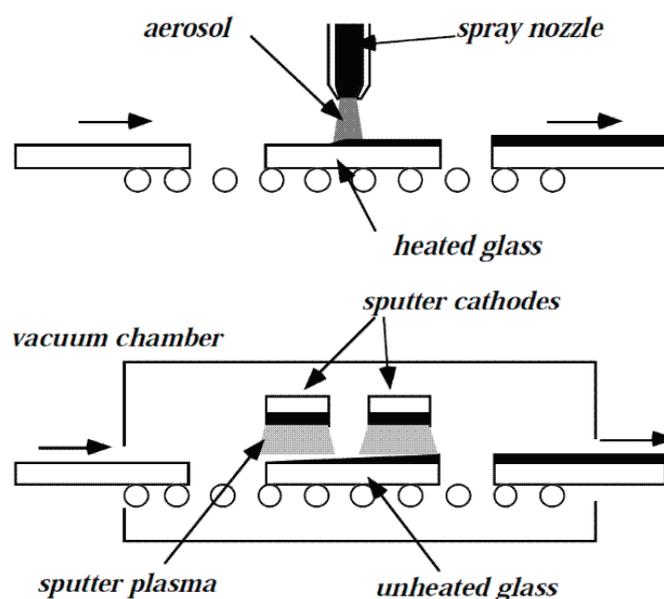


Fig. 49 - Processi di deposizione di coating per vetri float: pirolitico (a); magnetronico (b).

strato e di regolare lo spessore del film, le prestazioni sono limitate.

Il procedimento magnetronico è un processo di deposizione superficiale a freddo effettuato fuori linea, in camere sotto vuoto, che possono essere continue o separate secondo il numero e i tipi di gas di processo (argon, ossigeno, azoto). Il materiale metallico di rivestimento viene asportato da un elettrodo (catodo) per mezzo di un bombardamento da parte degli ioni del gas di processo, la cui concentrazione attorno al catodo viene aumentata per mezzo di magneti. Uno dei procedimenti più avanzati tecnologicamente è quello denominato “*magnetron sputtering*”. In esso il materiale di supporto è introdotto nella camera in cui sono contenuti il metallo da depositare (catodo) e un gas di processo a bassa pressione. In seguito all’applicazione di un voltaggio negativo al catodo, avviene la ionizzazione del gas. Gli atomi del gas così formati sono attratti dal catodo con una forza tale che atomi del catodo stesso, espulsi, si depositano sulla superficie della lastra sottostante. Il campo magnetico creato attorno al catodo aumenta la velocità di deposizione. Il vetro ottenuto può essere laminato e temprato sia prima che dopo il trattamento. Il processo garantisce un’eccellente uniformità del coating. Grazie ai vari tipi di gas reagenti con diversi materiali si possono produrre una molteplicità di sottilissimi strati metallici e dielettrici in sequenze diverse: da ciò deriva una grande varietà di caratteristiche e prestazioni, dipendenti dal tipo di rivestimento e dal suo spessore (Zacchei, 2005-2007). A differenza del procedimento pirolitico, la deposizione dello strato metallico risulta sottile e uniforme perché il processo viene pilotato magneticamente permettendo una deposizione con densità estremamente omogenea (Schittish, 2007). La produzione è discontinua e richiede un impianto sicuramente più complesso e costoso rispetto a quello del sistema pirolitico, ma fornisce prestazioni migliori e

	CVD	MSVD
Coating	Multi-Layer Non regolarità	Multi-Layer Uniformità
Produzione	In linea È integrata nel processo di produzione del vetro float	Fuori linea Richiede processi e tempi addizionali
Pressione di produzione	Atmosferica	Sotto vuoto
Utilizzo di energia di produzione	Bassa Utilizza il calore dal processo float	Alta 3-9 volte maggiore rispetto al CVD
Si può usare come vetro monolitico	Si	No
Caratteristiche energetiche	Limitate	Molteplici Migliori prestazioni, maggiore isolamento
Messa in opera e manutenzione	Durabilità	Si può graffiare facilmente
Tempra e curvatura	Si	Con procedimenti particolari
Durabilità	Si conserva come il vetro float Il coating non si degrada	Conservabilità in deposito limitata Il coating si degrada in 3-4 settimane se esposto a umidità

Fig. 50 - Caratteristiche di procedimenti di deposizione CVD e MSVD.

riproducibili, sebbene presenti una stabilità inferiore rispetto alla precedente tecnologia, perché gli ossidi non vengono inglobati nella lastra di vetro. I vetri ottenuti sono più delicati e facilmente graffiabili, per questo detti anche “*soft coating*”. Poiché la superficie trattata è meno resistente agli agenti atmosferici, deve essere posta verso l'interno dell'intercapedine del vetrocamera o verso l'interno dello stratificato, sulla faccia 2 o 3, per garantire e mantenere elevata la sua prestazione. In particolare, i *coating* a base di argento sono soggetti a deteriorabilità, si possono ossidare se esposti all'aria e devono essere racchiusi in un vetro isolante o stratificato per mantenere le loro proprietà nel tempo. Gas Argon all'interno del vetrocamera è talvolta usato per prevenire l'ossidazione. Ai fini del comportamento termico, dunque, i film pirolitici, hanno prestazioni leggermente peggiori di quelli magnetronici, ma hanno il vantaggio di poter essere impiegati in vetri singoli. Di seguito vengono illustrate le caratteristiche di vetri con *coating* che ne migliorano le caratteristiche energetiche: vetro riflettente e vetro basso - emissivo.

### Vetro riflettente

*Caratteristiche.* Il vetro riflettente è così chiamato perché presenta un elevato coefficiente di riflessione solare. Esso rappresenta una delle prime tecnologie la cui evoluzione oggi ha portato alla produzione dei più sofisticati vetri a bassa emissività. In commercio esistono molti tipi di vetri riflettenti tra loro diversificati sia per il processo tecnologico di produzione, sia per le caratteristiche fisico-tecniche ed energetiche, disponibili in una varietà di colori. I vetri riflettenti vengono ottenuti tramite il deposito di ossidi metallici sulla lastra vetrata per pirolisi tramite deposito di ossidi metallici effettuato direttamente in continuo sulla linea di produzione delle lastre di vetro chiaro o colorato in pasta o per polverizzazione catodica in campo elettromagnetico e sotto vuoto spinto di metalli e ossidi metallici su lastre di cristallo chiaro o colorato in pasta.

Sono utilizzati per il controllo solare perché riflettono la luce e il calore all'esterno del-



Fig. 51 - Schema del comportamento energetico di un vetro riflettente (a); lastre di vetro riflettente di un edificio commerciale, Düsseldorf, Germania (foto Lanza Volpe, A.).

l'edificio. Uno strato di un metallo altamente conduttivo a bassa emittanza applicato al vetro respinge la radiazione dalla superficie rivestita. *Coating* riflettenti di metalli come l'oro e l'argento sono abbastanza sottili da essere trasparenti, ma abbastanza spessi da riflettere le lunghezze d'onda in tutto lo spettro solare più o meno allo stesso modo e sono quindi poco selettivi. Grazie all'elevata riflessione, riducono la trasmissione della radiazione solare e quindi la trasmissione luminosa, l'abbagliamento e il fattore solare. Essi non contribuiscono alla diminuzione delle dispersioni termiche; per tale scopo devono essere montati come vetro esterno di una vetrata isolante, in modo da portare la trasmittanza a valori più bassi.

Un noto fenomeno legato alla riflessione sulla lastra dei raggi luminosi è quello della "visione a senso unico" che si verifica in determinate condizioni di luce. La visione attraverso le lastre riflettenti è pertanto possibile dall'ambiente meno illuminato verso quello più illuminato, ossia durante il giorno dall'interno dei locali verso lo spazio esterno, mentre nelle stesse condizioni non è possibile la visione dall'esterno verso l'interno per l'effetto specchio. Di notte, con il cambiamento delle condizioni di luce, anche il fenomeno cambierà di senso, invertendosi così il lato della lastra su cui si verifica l'effetto specchio.

I vetri riflettenti possono essere installati con il *coating* sulla superficie #1 o #2. Le applicazioni con il rivestimento riflettente sulla prima superficie hanno massima riflettività e la massima esclusione di radiazione solare. Tuttavia, il rivestimento su superficie #1 si trova ad affrontare l'esterno ed è più suscettibile a graffi e macchie. Inoltre, il colore del vetro è nascosto dal colore del rivestimento superficiale. I prodotti con la seconda superficie riflettente hanno bassi coefficienti di ombreggiatura; inoltre hanno riflettività inferiore e permettono di visualizzare dall'esterno il vero colore del substrato di vetro. Poiché il rivestimento non è esposto, è protetto da graffi o macchie.

*Impieghi.* I vetri riflettenti vengono impiegati per il controllo dell'irraggiamento solare (luce e calore).

*Durabilità e manutenzione.* Con la tecnologia di pirolisi si provoca la fusione degli ossidi metallici ad alta temperatura e il loro inglobamento nella superficie delle lastre, conferendo al deposito la massima stabilità, durezza e resistenza agli agenti atmosferici. La superficie trattata può essere posta sia verso l'esterno che verso l'interno. Con la tecnologia di polverizzazione catodica in campo elettromagnetico e sotto vuoto spinto a temperatura ambiente si ha una buona adesione del deposito alla superficie delle lastre. La superficie trattata però deve essere posizionata verso l'interno, a protezione degli effetti ossidanti e dilavanti degli agenti atmosferici. I vetri riflettenti si riscaldano in misura minore rispetto ai vetri colorati e il rischio di rotture è basso.

### Vetro basso-emissivo (low-E)

*Caratteristiche.* Tutti i materiali, tra cui i vetri, emettono (o irradiano) calore sotto forma di onde lunghe, energia nel lontano infrarosso, in misura variabile a seconda della temperatura. Questa emissione di calore radiante è una delle componenti importanti del trasferimento di calore attraverso un vetro. La capacità di una superficie di riemettere energia si chiama emissività. L'emissività è la proprietà di una superficie che indica lo scambio di calore per irraggiamento. Riducendo l'emissività del vetro si possono notevolmente migliorare le sue proprietà isolanti poiché minore è l'emissività, minore è il calore irradiato che passa attraverso. Il valore di emissività di un materiale dipende dal rapporto di calore emesso rispetto ad un corpo nero, su una scala da 0 a 1. Un corpo nero è un emettitore perfetto con emissività pari a 1, mentre un riflettore perfetto avrebbe un valore di emissività pari a zero. La bassa emissività termica è dunque la qualità di una superficie che assorbe ed emette bassi livelli di energia termica radiante.

L'emissività dipende da fattori quali la temperatura, l'angolo di emissione, la lunghezza d'onda e la finitura superficiale del corpo osservato. Ad esempio, le foglie sono verdi perché hanno emissività elevata a lunghezze d'onda rosse e bassa emissività a lunghezze d'onda verde. Un normale vetro assorbe radiazione ad onda lunga, si scalda, e re-irradia in tutte le direzioni, un rivestimento a bassa emissività impedisce al vetro di re-irradiare l'energia termica attraverso la superficie rivestita. Il calore piuttosto che venire assorbito ed essere nuovamente irradiato sia verso l'interno che verso l'esterno, viene riflesso nella direzione da cui proviene. In tal modo, il vetro *low-e* trattiene più calore rispetto a un vetro convenzionale e in inverno non fa altro che aumentare l'effetto serra che si viene a creare a causa del trattenimento del calore interno riflesso. L'emissività termica di un comune vetro chiaro usato in edilizia è pari a 0,84; ciò significa che emette l'84% dell'energia possibile per un oggetto alla sua temperatura. Si tratta quindi di un materiale altamente emissivo. Il vetro può essere prodotto con una più bassa emissività termica, controllando, ad esempio, il contenuto di ferro.

Un metodo oggi molto diffuso per abbassare l'emissività è quello di applicare sul vetro *coating* basso emissivi, sottili rivestimenti ossido – metallici, riflettenti il calore ma non la luce. Si ottengono in tal modo i vetri detti *basso-emissivi (low-E)*. I rivestimenti basso emissivi influenzano direttamente solo la componente irradiata del trasferimento di calore e funzionano riflettendo la radiazione infrarossa. L'emissività delle vetrate a “deposito basso emissivo” può raggiungere un valore pari a 0,01. Tali vetri emettono solo l'1% dell'energia disponibile e pertanto riflettono il 99% della radiazione infrarossa incidente. Essi tendono a mantenere il calore sullo stesso lato da cui ha origine, mentre lasciano passare la luce visibile. Abbassando il flusso di calore radiativo, la trasmittanza del vetro e il fattore solare si riducono.

Il rivestimento può essere applicato con i due procedimenti, pirolitico, rivestimenti multistrato tipicamente costituiti da metalli, ossidi metallici e nitruri metallici depositati tramite pirolisi all'uscita del forno ad alte temperature, e magnetronico, metalli depositati sotto vuoto

mediante processo elettromagnetico. Con il procedimento pirolitico si possono creare superfici con emissività fino al 13%. Gli ossidi impiegati maggiormente sono a base di semiconduttori drogati (soprattutto a base di ossido di indio drogato con stagno, ITO, Indium-tin-oxide, perché più economici). Questi film hanno una maggiore resistenza all'abrasione rispetto ai metalli. Possono essere depositati come strati singoli, ma con spessori più elevati dell'ordine di alcune centinaia di nanometri per evitare la comparsa di colori interferenziali (Daneo et al., 2011).

Con il procedimento magnetronico si creano superfici che riflettono e trasmettono la radiazione solare su specifiche lunghezze d'onda, con un'emissività estremamente ridotta, fino all'1%. I metalli utilizzati per la produzione sono caratterizzati da una elevata riflettanza nell'infrarosso quali catodi di metalli nobili come argento e più raramente anche oro, oppure cromo, titanio, leghe nichel-cromo, alluminio, zinco, stagno, rame, ecc. Si utilizza spesso l'argento perché l'oro, oltre ad essere troppo costoso, presenta una soglia di assorbimento a 600 nm, in pieno intervallo visibile e il rame ha invece una bassa resistenza all'abrasione. Poiché per propria natura i metalli nobili non sono trasparenti, devono essere depositati in spessori molto ridotti dell'ordine di pochi nanometri. Inoltre, poiché formano legami deboli con la superficie del vetro e sono facilmente deteriorabili, vengono normalmente depositati tra due strati di ossidi o nitruri che hanno il compito di migliorare l'adesione con la superficie del vetro (strato inferiore) e di proteggere lo strato metallico dall'ambiente esterno (strato superiore). Il deposito risulta quindi in genere costituito da 3 o 4 strati, dei quali il primo assicura l'adesione al vetro e l'ultimo la protezione dagli agenti esterni, entrambi a base di ossido di piombo, di zinco o di alluminio: lo strato realmente basso-emissivo è costituito dal metallo puro o da ossidi, ossinitruri o nitruri che si formano per reazione chimica del metallo con i gas di processo.

La trasmissione luminosa di questi film può essere aumentata senza modificare sostanzialmente l'emissività depositando il film di metallo nobile tra due strati dielettrici antiriflettenti di materiale ad elevato indice di rifrazione (ad es. ossido di titanio). In questo modo il metallo nobile può anche essere sostituito con "metalli grigi" (ad es. cromo e nichel), nitruri e carburi metallici (Daneo et al., 2011). Storicamente, questi rivestimenti prodotti con *sputtering* sono stati denominati soft perché offrono una minore resistenza agli attacchi chimici o meccanici rispetto a quelli ottenuti per pirolisi, anche se i progressi nella scienza dei materiali hanno notevolmente migliorato la durabilità chimica e meccanica di tali rivestimenti. Il vetro *low-E* è stato progettato principalmente per l'uso all'interno di vetrocamera. Tuttavia, nel caso di vetro monolitico o stratificato possono essere utilizzate le soluzioni con *hard coating* e per migliorare la funzione termica e di controllo solare nel caso di esposizione diretta al sole possono essere anche colorati o riflettenti (Carmody, 2007).

A seconda del clima e dell'orientamento occorre scegliere vetri basso emissivi con caratteristiche differenti. In un clima freddo occorre un fattore solare più elevato, in un clima caldo un basso fattore solare, con una conseguente riduzione del guadagno di calore diretto. La riflettanza solare di rivestimenti *low-E* può essere manipolata per includere parti

specifiche dello spettro visibile e infrarosso. Questa è l'origine dei rivestimenti spettralmente selettivi, che selezionano porzioni specifiche dello spettro di energia, in modo che alcune lunghezze d'onda sono trasmesse mentre altre riflesse. Un vetro può quindi essere progettato per ottimizzare i flussi di energia per il riscaldamento, l'illuminazione naturale e il raffreddamento.

I primi vetri *low-E* progettati, quelli *hard*, sono caratterizzati da un elevato fattore solare e da una elevata trasmissione della radiazione visibile per consentire la massima quantità di luce verso l'interno, riducendo la trasmittanza. La seconda generazione di rivestimenti *low-E*, di tipo *soft*, mantiene una bassa trasmittanza, ma è stata progettata per riflettere l'energia nel vicino infrarosso, riducendo così il fattore solare e fornendo livelli elevati di trasmissione della luce (*Lawrence Berkeley National Laboratory*). La trasmittanza spettrale è la frazione di luce trasmessa ad una data lunghezza d'onda). Oggi si hanno coating riflettenti nel lontano, nel medio e nel vicino infrarosso. Rivestimenti *low-E* possono quindi essere formulati per avere una vasta gamma di caratteristiche di controllo solare, pur mantenendo una bassa trasmittanza. Nel caso di vetrocamera, il diverso fattore solare, alto, moderato o basso, dipende, oltre che dal tipo di *coating*, anche dalla posizione del rivestimento che determina diverse modalità di funzionamento degli scambi termici. Vi è una sostanziale differenza nel comportamento dei due tipi di vetro, dovuta principalmente al lato in cui viene posizionato il rivestimento.

In generale, in climi freddi, dove il mantenimento di calore all'interno è una priorità, occorre favorire il guadagno di calore solare a onda lunga e non lasciare nuovamente irradiare verso l'esterno l'aria calda dello spazio interno. Per questo motivo sarebbe ottimale un rivestimento pirolitico. Rispetto a rivestimenti *soft*, un rivestimento pirolitico permette una trasmissione luminosa del 20-30% in più, ciò riduce il livello di isolamento, poiché la trasmittanza è maggiore, ma favorisce il guadagno di calore solare passivo. Un tale rivestimento, basso emissivo nel lontano infrarosso, può essere posto sulla superficie # 2 o sulla superficie # 3 di un'unità di vetro isolante o sulla superficie # 2 di un vetro monolitico.

L'energia termica infrarossa a onda corta (parte di energia infrarossa dello spettro che viene normalmente avvertita come calore) attraversa il vetro, viene assorbita all'interno dell'edificio da pareti, pavimenti, tendaggi, mobili, ecc. e viene da questi riemessa come energia infrarossa a onda lunga (a bassa energia). In tal modo il guadagno di calore solare riscalda naturalmente l'interno dell'edificio mentre il rivestimento basso emissivo riflette il calore re-irradiato all'interno della stanza, contribuendo a ridurre la perdita di energia. I raggi infrarossi a onda lunga provenienti dall'esterno vengono anch'essi respinti, ma ciò è compensato dai benefici della quantità di calore trattenuta all'interno. Il posizionamento sulla superficie # 2 o # 3 permette di riflettere, trattenendole all'interno, le radiazioni infrarosse a onda lunga che invece verrebbero assorbite e poi trasmesse per l'84% all'esterno da un normale vetro. Con un rivestimento sulla superficie # 2 il fattore solare sarà inferiore rispetto a un rivestimento su superficie # 3. Quest'ultima configurazione accumula nell'intercapedine del vetro il calore e lo porta verso l'interno, con un conseguente alto valore di fattore solare.

Ciò può comportare un rischio di rottura da stress termico sul lato interno del vetro.

In climi caldi la priorità è quella di abbassare i guadagni solari. Un vetro progettato per minimizzare i guadagni termici estivi dovrebbe consentire una certa illuminazione diurna, ma bloccare tutte le altre porzioni dello spettro solare, le radiazioni ultraviolette e nel vicino infrarosso, nonché il calore a onda lunga irradiato da oggetti esterni, come le pavimentazioni e gli edifici adiacenti. Se un rivestimento basso emissivo riflettente nel lontano infrarosso viene applicato sulla superficie # 2, l'energia infrarossa a onda lunga proveniente da davanzali, marciapiedi, ecc è riflessa mentre l'energia infrarossa a onda corta è assorbita dal vetro stesso ed è da questo riemessa come energia infrarossa a onda lunga che viene respinta all'esterno, riducendo il passaggio di calore attraverso il vetro che funziona da convertitore di onde corte in onde lunghe. Questa energia assorbita dal vetro e riemessa viene limitatamente trasmessa all'interno grazie alla proprietà basso emissiva del rivestimento che può irradiare anche solo l'1% di onde infrarosse, rispetto a lastre di vetro semplice che invece irradiano l'84% di energia.

In un clima caldo un rivestimento soft basso emissivo nel vicino infrarosso riduce la perdita di calore in inverno, ma riduce anche il guadagno di calore in estate. Esso offre una minore trasmissione luminosa, riflettendo così più energia radiante responsabile dell'aumento indesiderato di calore. Per ottenere risultati ottimali questo strato dovrebbe essere applicato sulla superficie più esterna della finestra, ma a causa della natura delicata dei rivestimenti *soft*, può essere posto sia sulla superficie # 2 che sulla superficie # 3 e, riflettendo in entrambi i casi la radiazione nel vicino infrarosso verso l'esterno, rallenta la velocità di riscaldamento dell'intercapedine d'aria e riduce la radiazione solare entrante.

Per climi miti, con costi di riscaldamento e raffrescamento più o meno uguali è importante considerare ogni superficie vetrata e il relativo orientamento. Nell'emisfero settentrionale, per le aperture a nord che non sono esposte alla luce diretta del sole non sarà necessario disporre di un rivestimento *soft* con basso fattore solare, ma basterà un vetrocamera con un rivestimento *hard* posto sulla superficie # 2 che permette di riflettere le radiazioni a onda lunga, che contribuirebbero a mantenere il clima interno costante oppure un rivestimento *soft* con moderato fattore solare, bilanciando moderati guadagni solari in inverno e moderati guadagni solari in estate. Al contrario, per le aperture esposte a sud si potrebbe favorire il guadagno di calore solare nei mesi invernali e inibire il guadagno di calore nei mesi più caldi. In questo caso, per il controllo delle temperature interne è più efficace un buon isolamento ma le differenze tra *coating soft* o *hard* e il diverso posizionamento del rivestimento saranno minimali se valutate nel corso di un intero anno (McCluney & Jindra, 2000).

In generale, il posizionamento del rivestimento sulla superficie # 1 dovrebbe essere evitato in quanto gli agenti atmosferici e inquinanti potrebbero causare difficoltà nella pulizia del vetro; per cui il rivestimento nel caso di vetro semplice o stratificato viene sempre posto sulla faccia rivolta verso l'interno.

Per quanto riguarda la trasmittanza, possono essere raggiunti miglioramenti fino al 35% con rivestimento a bassa emissività sulla superficie # 2 per vetro singolo monolitico e fino

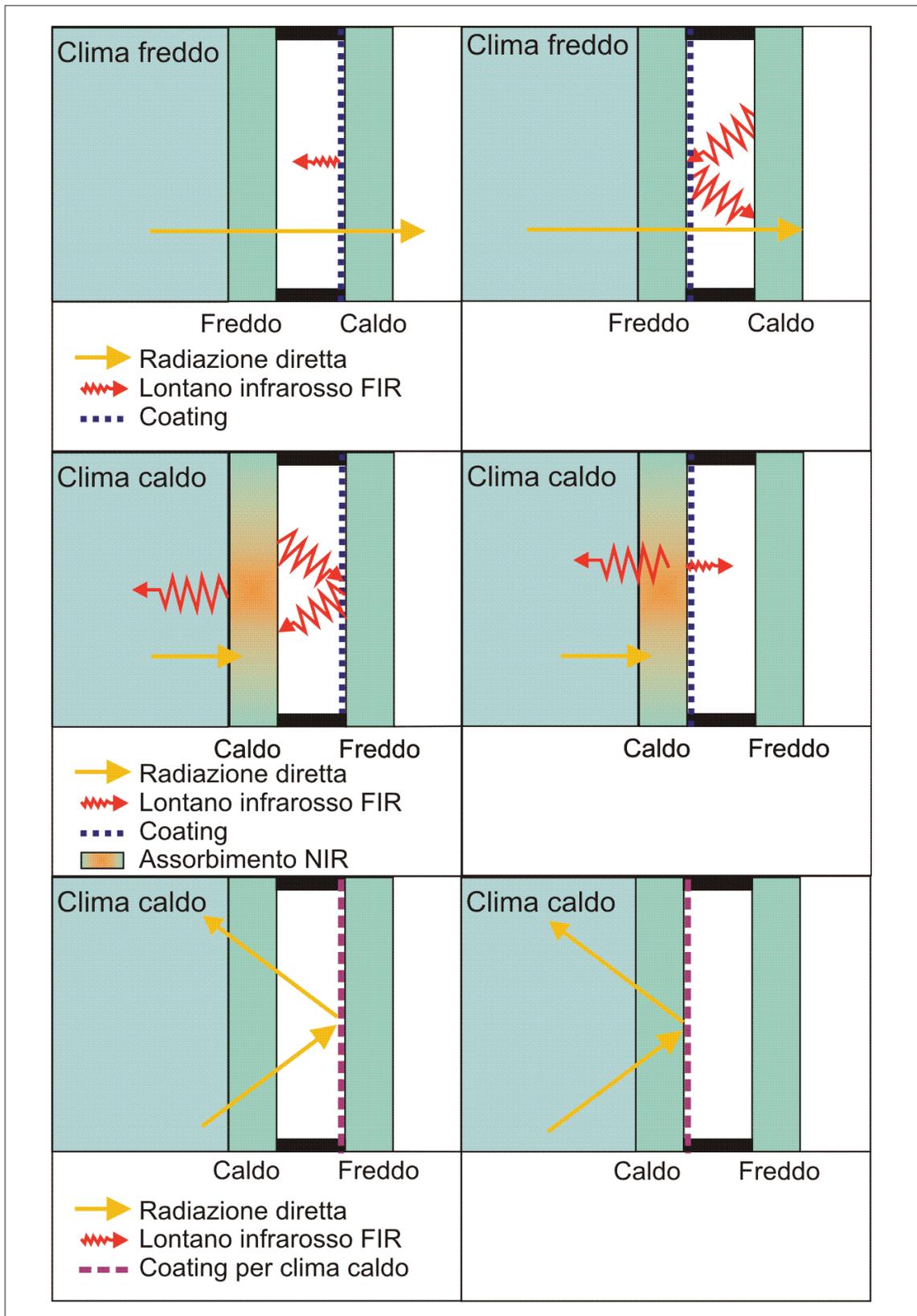


Fig. 52 - Schema del comportamento energetico di un vetrocamera con coating basso - emissivo, in differenti condizioni climatiche e con differenti configurazioni.

al 30% con rivestimento sulla superficie # 4 per vetro stratificato. Il *coating* dovrebbe essere in tali casi di tipo *hard* per problemi di durabilità. All'interno di un vetrocamera, il posizionamento su superficie # 2 o # 3 abbassa in ugual modo la trasmittanza, mentre il fattore solare è inferiore quando il rivestimento è sulla superficie # 2.

I film *low-e* possono bloccare il 99,5 percento della luce UV. Inoltre, poiché in inverno la temperatura della superficie interna del vetro è più calda, si ha un miglioramento del comfort e si riduce la formazione di condensa sulla superficie interna del vetro (Carmody, 2004).

*Impieghi.* Il vetro basso emissivo è utilizzato per pareti e infissi vetrati. L'aspetto neutro del vetro, molto vicino a quello del vetro chiaro, lo rende idoneo ad ogni genere di applicazione, sia nelle costruzioni nuove che nelle ristrutturazioni.

*Durabilità e manutenzione.* La produzione del vetro *low-E* attraverso il processo pirolitico di *Chemical Vapor Deposition* permette di ottenere un rivestimento rigido estremamente resistente, poiché legato covalentemente al vetro. Nella produzione del vetro a bassa emissività con *Magnetron Vacuum Deposition Sputtering*, il prodotto risultante è meno durevole rispetto al rivestimento rigido e richiede particolare conservazione e manipolazione per evitare che si graffi. Sulle facce esposte dovrebbe essere usato un rivestimento pirolitico poiché l'attuale tecnologia limita l'utilizzo di un prodotto *soft* come il rivestimento magnetronico a causa di problemi di durabilità quando esposto all'aria esterna e di problemi di compatibilità se stratificato. Poiché il rivestimento magnetronico deve essere sigillato all'interno di un'unità di vetro isolante, non richiede manutenzione. Nel caso di rivestimento pirolitico utilizzato in un vetro semplice è raccomandata una normale pulizia con una miscela di acqua e di alcool isopropilico.

*Caratteristiche energetiche.* Di seguito i grafici di confronto delle principali caratteristiche energetiche di vetri con diversi tipi di *coating* basso - emissivi (pirolitici e magnetronici) e con diverse configurazioni. Tali grafici sono stati ricavati a partire dai dati tecnici forniti da alcune ditte vetrarie.

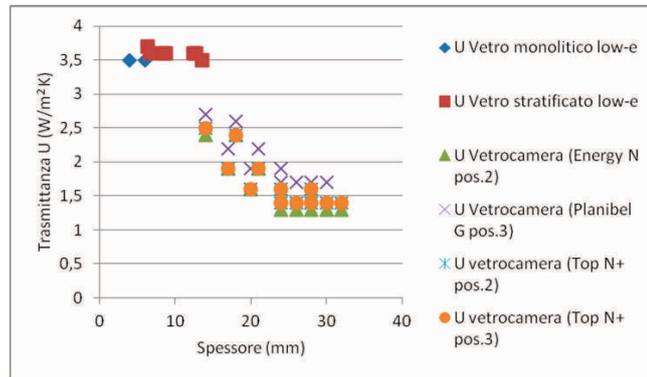


Fig. 53 - Trasmittanza U (W/m²K) di vetro basso - emissivo con diverse configurazioni.

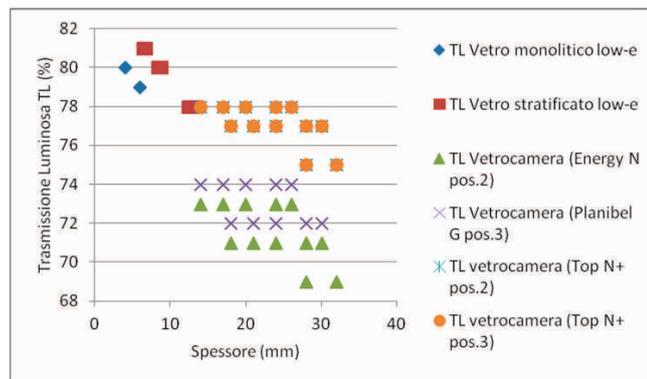


Fig. 54 - Trasmissione Luminosa TL (%) di vetro basso - emissivo con diverse configurazioni.

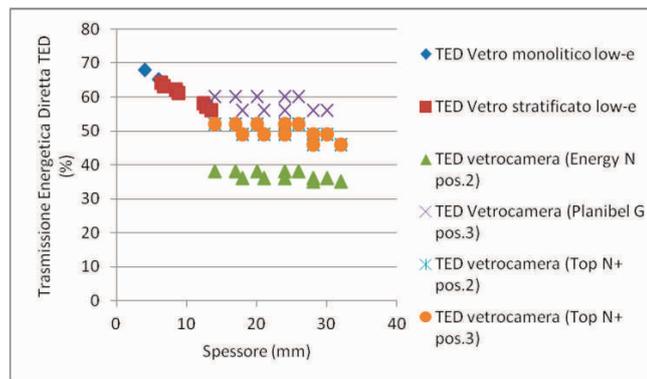


Fig. 55 - Trasmissione Energetica Diretta (%) di vetro basso - emissivo con diverse configurazioni.

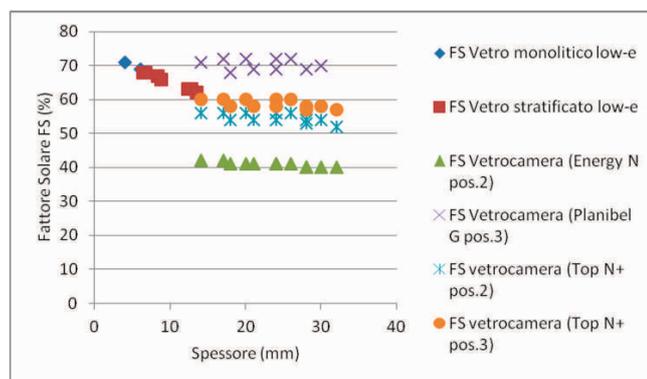


Fig. 56 - Fattore Solare (%) di vetro basso - emissivo con diverse configurazioni.

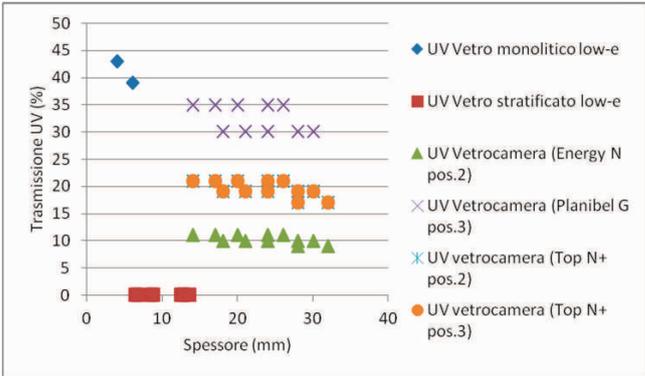


Fig. 57 - Trasmissione energetica Diretta TED (%) di vetro basso - emissivo con diverse configurazioni.

### 4.3.2. La modifica della composizione dei vetri

La modifica della composizione standard del vetro avviene aggiungendo materiali o composti che permettono di conferire peculiarità diverse (fisico-meccaniche, estetiche, ottiche, ecc.) a seconda dei settori d'uso, quali quello edile, degli strumenti ottici o degli oggetti d'uso comune. Ad esempio i vetri colorati si ottengono con aggiunte di sostanze coloranti al vetro fuso; il vetro opalino è un vetro traslucido a causa della dispersione di fluoruri, fosfati, ossidi che determinano la formazione di bollicine gassose; i vetri speciali sono destinati ad usi particolari come i vetri al piombo utilizzati a protezione dei raggi X o i vetri per lampade al sodio. La presenza dell'ossido di piombo determina una diminuzione di viscosità senza modificare i valori di resistività elettrica e comporta buoni valori di densità e rifrazione; il vetro cristallo, o semplicemente cristallo, si ottiene con l'aggiunta fino al 35% di piombo o con aggiunta di potassio e cristallo di Boemia per oggetti artistici.

#### 4.3.2.1. Vetro colorato

*Caratteristiche.* Il vetro colorato contiene elementi o composti che cambiano la sua colorazione. In tal modo la superficie trasparente lascia passare tutti i colori tranne quello che assorbe e tutto ciò che si trova al di là di esso appare con una colorazione differente da quella che si avrebbe se non ci fosse il vetro. Storicamente il vetro colorato precede quello trasparente poiché la trasparenza dei primi oggetti realizzati con tale materiale non era totale. Nel VI millennio a.C. l'uomo utilizzava un materiale vetroso naturale, l'ossidiana, una

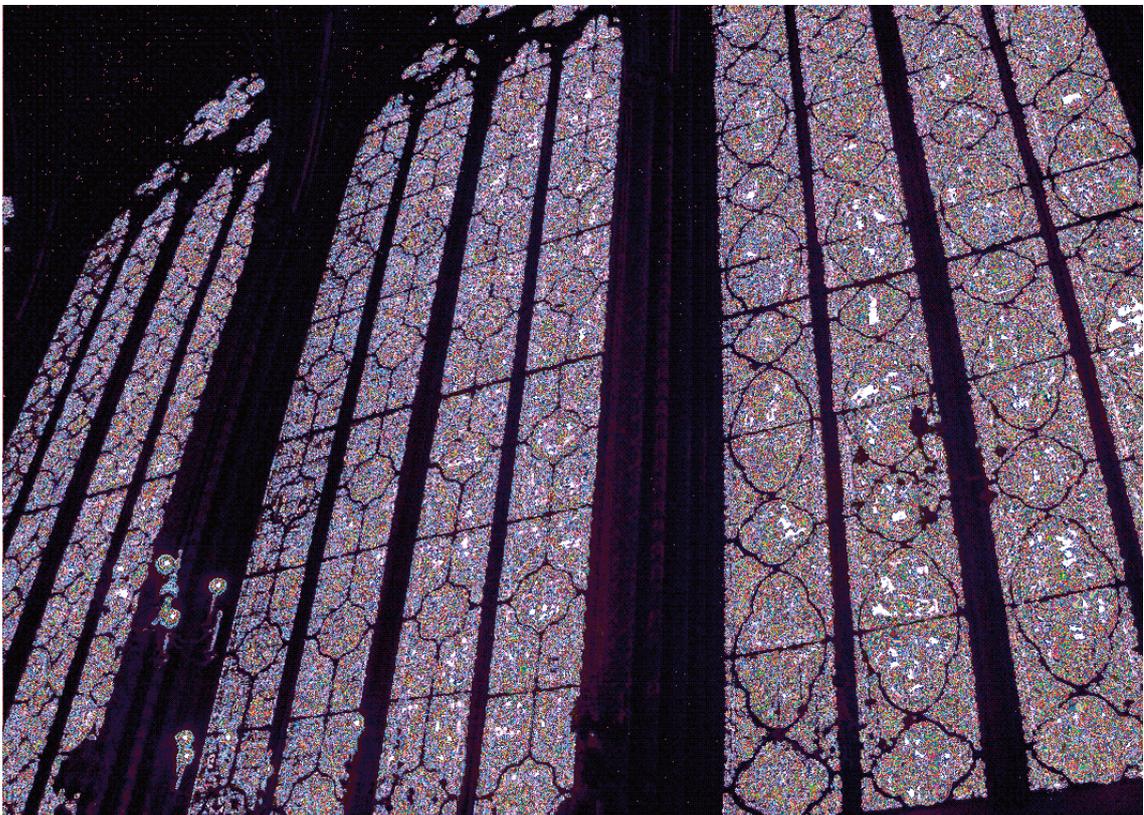


Fig. 36 - SainteChapelle, Parigi, Francia (foto Lanza Volpe, A.).

roccia silicea di origine vulcanica, con un aspetto traslucido di color nero o verde scuro e anche la prima pasta vitrea, che si fa risalire alla metà del III millennio a.C., conteneva una serie di impurità che non le consentivano quella reale trasparenza cui si arriverà nel corso del I secolo d.C., quando cominciano a diffondersi vetri piani trasparenti per finestre resi possibili dalla scoperta della soffiatura. Alcuni elementi presenti nella massa vetrosa come il ferro e il cromo erano sufficienti a conferire leggere colorazioni a cui era necessario aggiungere decoloranti per correggere la tonalità di colore. I colori venivano invece ottenuti aggiungendo metalli e ossidi metallici durante le fasi della produzione, secondo procedimenti ancora oggi impiegati. Le vetrate policrome hanno una grande diffusione in Europa a partire dal secolo XI, con la realizzazione delle grandi aperture vetrate delle cattedrali gotiche (Fig. 36). La tecnica delle vetrate colorate consisteva in un collage di innumerevoli pezzi, di colori differenti, montati su telaio metallico e giuntati con strisce di piombo, mentre il colore era ottenuto addizionando al bagno i consueti composti a base metallica o riscaldando le sostanze coloranti sulla superficie del vetro. Oggi, l'architettura ha recuperato e reintegra nel progetto l'impiego del colore utilizzando grandi lastre come vere e proprie campiture cromatiche o come protezione dalla radiazione solare. Le tecnologie disponibili per colorare il vetro sono molteplici sul piano tecnico, anche se il risultato visivo può apparire simile. (Tatano, 2008). È possibile: intervenire sulla massa vetrosa, ottenendo un vetro colorato in pasta; lavorare sulla superficie della lastra smaltando un lato; inserire nel vetro stratificato intercalari colorati; operare con tecniche di coating sulla superficie.

La tecnologia più antica consiste nella colorazione in pasta della massa vetrosa in cui vengono incorporati gli ossidi di metallo. Per realizzare un tale tipo di vetro colorato è necessario aggiungere alla normale composizione del vetro dei costituenti secondari, quali gli ossidi metallici e gli ossidi di metalli di transizione in quantità molto ridotta (in concentrazione anche minore del 5% della massa totale). Si tratta quindi di un normale vetro float nella cui fusione vengono aggiunti coloranti. Le colorazioni disponibili si attestano sul verde,

Elemento/composto	Colorazione prodotta	
Coloranti ionici	Condizioni ossidanti	Condizioni riducenti
Cobalto ossido	Blu	Blu
Rame ossido	Acquamarina	Verde
Manganese	Viola	-
Cobalto-Manganese	Ametista, nero	Ametista, nero
Ferro	Giallo	Verde-blu
Zolfo-Ferro	-	Giallo-Ambra
Coloranti colloidali	Condizioni ossidanti	Condizioni riducenti
Zolfo-Cadmio	-	Giallo
Zolfo-Cadmio-Selenio	-	Rosso
Rame	-	Rosso rubino
Oro	-	Rosso rubino
Argento	-	Giallo

Fig. 37 - In tabella vengono elencati alcuni dei principali elementi e composti coloranti con i relativi effetti distinti a seconda delle condizioni operative ossidanti o riducenti.

bronzo, grigio e azzurro. L'intensità della colorazione dipende dalla quantità di colorante introdotto nella composizione del vetro, dalla presenza o meno di sostanze ossidanti o riducenti nell'atmosfera del forno, dalla conduzione termica della fusione e dal tipo di colorazione (ionica o colloidale).

Un'altra tecnologia consiste nella smaltatura del vetro. Essa avviene attraverso la deposizione di un composto ceramico polverizzato che vetrifica in seguito alla permanenza della lastra in forno nel quale si raggiungono temperature superiori a 600 °C. Questo procedimento è pertanto associato a quello di tempra. In funzione della forma del manufatto e del disegno da riprodurre, si distinguono quattro sistemi applicativi: serigrafia, applicazione a spruzzo, applicazione a velatrice, applicazione in tampografia. La serigrafia si usa per riprodurre disegni. Una frittta ceramica viene riportata sul manufatto attraverso le maglie aperte di una matrice a tessuto tesa su telaio. La stampa dei colori avviene tramite una macchina che consente una dimensione massima delle lastre legata alla dimensione dei forni. La migliore qualità cromatica si ottiene con il vetro bianco o povero di ossidi di ferro. È possibile serigrafare tutte le tonalità *Ral*<sup>6</sup> con diversi gradi di saturazione. Con l'applicazione a spruzzo, lo smalto, in sospensione in un veicolo normalmente idro-compatibile, viene spruzzato sul manufatto mediante un aerografo. Questo sistema è usato per il rivestimento completo di superfici. Con l'applicazione a velatrice, lo smalto, sotto forma di sospensione in un veicolo normalmente idro-compatibile, cade "a cascata" da un'apertura lamellare, posta alla base di un serbatoio, sul manufatto che scorre su un trasportatore a

6) RAL in origine acronimo di *Reichsausschuss für Lieferbedingungen*, Comitato del Reich Tedesco per termini e condizioni di vendita, istituito nel 1925 dalla Repubblica di Weimar, è un termine oggi usato per definire una scala di colori normalizzata. La codifica RAL è uno standard internazionale tra i più importanti per l'industria, il commercio e il design. L'unificazione dei colori RAL è nata nel 1927 con una tavola a colori di 40 tonalità. La classificazione è costituita da 4 cifre che classificano i colori in ordine di rilevanza. La tavola dei colori *RAL CLASSIC* dispone di 213 tonalità.



Fig. 38 - Vetri color bronzo in un teatro, Krefeld, Germania (foto Lanza Volpe, A.)

rulli. Anche questo metodo permette il rivestimento completo di superfici piane. Con l'applicazione in tampografia, lo smalto viene riportato sul manufatto con un sistema simile alla timbratura, mediante un tampone di gomma silconica, sagomato per formare il disegno richiesto (tale sistema è usato per riprodurre scritte e disegni).

Una nuova generazione di vetri colorati sfrutta l'effetto di pellicole colorate poste tra due lastre di vetro applicate come i tradizionali PVB. È possibile combinare sino a quattro pellicole tra due lastre. In situazioni di *retrofit*, quando le finestre non vengono sostituite, un film plastico colorato può essere applicato alla superficie interna del vetro. Tali pellicole colorate applicate non sono però durevoli. Un'altra tecnologia impiega *coating* di sottili strati di ossidi metallici che permettono di ottenere un effetto cromatico a seconda dell'incidenza della luce (Paoletti & Magarotto, 2008).

Il vetro colorato svolge una funzione di controllo solare, limitando la trasmissione energetica diretta, di luce visibile e di radiazioni UV. Le diverse tinte disponibili assorbono una parte di radiazione solare e riducono la radiazione luminosa. In generale, nel vetro colorato sono maggiori i livelli di alcuni ossidi che assorbono principalmente nelle lunghezze d'onda del vicino infrarosso, riducendo in tal modo la quantità di calore trasmessa. Le proprietà di controllo solare conferite sono il risultato delle leggi della fisica. In primo luogo, i colori più scuri assorbono più calore rispetto ai colori più chiari. Pertanto, un vetro oscurato assorbe



Fig. 39 - Vetrata verde, vista dall'esterno e dall'interno, Aachen, Germania (foto Lanza Volpe, A.).

più calore di un vetro chiaro e quindi re-irradia più calore. In secondo luogo, per la legge di equilibrio energetico, tutta l'energia, compreso il calore, cerca costantemente di raggiungere uno stato di equilibrio, con un movimento dalle zone più calde alle zone più fredde. Poiché il vetro colorato assorbe calore, la sua temperatura aumenta e di conseguenza supera la temperatura dell'ambiente, sia quello esterno che quello interno. Il calore generato cerca di trovare l'equilibrio mediante trasferimento convettivo con la massa di aria fredda che si trova normalmente sulla parte esterna del vetro. Così, il calore assorbito viene maggiormente irradiato verso l'esterno dell'edificio, mentre una quantità ridotta di calore viene irradiata all'interno. Il vetro colorato assorbe quindi più calore di un vetro trasparente e irradia la maggior parte di tale calore assorbito all'esterno mediante convezione naturale. La quantità di energia emessa verso l'esterno e verso l'interno dipende dalla velocità del vento e dalle rispettive temperature interna ed esterna. In sostanza, tale vetro fornisce un intervallo di tempo maggiore degli effetti dell'energia diretta del sole attraverso vetro trasparente. A seconda del colore e dello spessore, il fattore solare varia tra il 40 e l'80%. Con lo sviluppo di *coating* e dei sistemi vetri multistrato, una lastra esterna di vetro colorato può essere efficacemente isolata dallo spazio interno e la sua energia termica nuovamente irradiata più efficacemente verso l'esterno (Pfrommer et al. 1995).

Il vetro colorato riflette solo una piccola percentuale di luce, per cui non ha l'aspetto specchiato del vetro riflettente. Di giorno riduce la visibilità dall'esterno e mantiene la sua trasparenza dall'interno, anche se la luminosità è ridotta e la percezione del colore modificata. I colori più comuni sono il grigio neutro, il bronzo e il blu-verde, che non alterano molto il colore percepito e tendono a fondersi bene con i colori dell'architettura. Tuttavia, di notte l'effetto è invertito e diventa quindi più difficoltoso vedere dall'interno verso l'esterno.

Grazie all'elevato coefficiente di assorbimento solare, i vetri colorati sono anche detti vetri assorbenti. Il valore di tale coefficiente di assorbimento varia in funzione dello spessore della lastra (un vetro più spesso fornisce maggiore assorbimento e meno trasmissione) e della colorazione. Ogni cambiamento di colore o combinazione di tipi di vetro ha effetto in



Fig. 40 - Schema del comportamento energetico di un vetro colorato (a); vetri verdi in un edificio commerciale, Eindhoven, Olanda (b) (Lanza Volpe, A.).

particolare sulla trasmissione della radiazione visibile, sul fattore solare e sulla riflettività. I produttori di vetro elencano queste proprietà per ogni colore, spessore e assemblaggio.

Oggi i vetri colorati sono appositamente formulati per massimizzare l'assorbimento di alcune radiazioni dello spettro solare. I progressi nella colorazione prodotta dagli additivi hanno portato a vetri assorbenti spettralmente selettivi che ammettono più luce che calore e sembrano quindi più chiari. Parte del calore, tuttavia, continua a passare attraverso il vetro per conduzione e re-irradiazioni, per cui la tinta non ha alcun effetto sulla trasmittanza del vetro, ma riduce il guadagno solare; ciò può essere un vantaggio in estate e uno svantaggio in inverno a seconda delle condizioni climatiche locali. Il colore grigio è stato progettato per ridurre l'abbagliamento e l'ingresso di calore. Per l'elevato assorbimento di calore il vetro deve essere temperato o indurito. Tinte bronzo hanno maggiori caratteristiche di trasmissione della luce visibile rispetto al grigio. Un vetro colorato bronzo o grigio spesso però costringe a un compromesso tra la luce visibile e il guadagno solare, vi è infatti una maggiore riduzione di trasmissione visibile piuttosto che di guadagno solare. Ciò contribuisce a diminuire l'abbagliamento, ma la quantità di luce che entra nella stanza diminuisce. I colori verde e azzurro assorbono selettivamente la radiazione infrarossa più che quella visibile. Tali vetri spettralmente selettivi hanno un più alto valore di trasmissione visibile rispetto ai vetri di colore bronzo o grigio. Le tinte verdi forniscono controllo solare paragonabile a quelle grigie senza rinunciare alla trasmissione di luce visibile, ciò le rende una scelta diffusa per ottenere un'alta efficienza energetica. Le tinte azzurre offrono un'alternativa, con un piccolo compromesso sul controllo solare.

*Impieghi.* Il vetro colorato viene utilizzato primariamente per la riduzione dell'abbagliamento e dell'energia solare trasmessa. È molto impiegato nel settore automobilistico per evitare il surriscaldamento dell'abitacolo dei veicoli allo scopo di migliorare il comfort dei passeggeri, proteggere interni e tappezzeria dalle radiazioni solari, ridurre i consumi dell'impianto di condizionamento. L'uso in edilizia è più diffuso per edifici commerciali e per uffici. Il vetro colorato è anche diffuso negli interni per scopi decorativi (porte, pareti divisorie, pannelli, ecc.). Può essere impiegato come vetro monolitico, assemblato in vetrocamera o stratificato.

*Durabilità e manutenzione.* Il vetro colorato è caratterizzato da alta resistenza, pari a quella di un normale vetro. Il colore è durevole e non cambia nel tempo anche se esposto agli agenti atmosferici. Poiché è assorbente, si riscalda più velocemente e intensamente rispetto ai vetri tradizionali e, in alcuni casi, vi potrebbe essere il rischio di rottura indotta da sollecitazioni termiche. A causa di ciò, alcune tinte, in determinate situazioni, possono richiedere la tempratura o l'indurimento per far fronte allo stress termico.

*Caratteristiche energetiche.* Di seguito i grafici di confronto delle principali caratteristiche energetiche di vari tipi di vetro colorato. Tali grafici sono stati ricavati a partire dai dati tecnici forniti da alcune ditte vetrarie.

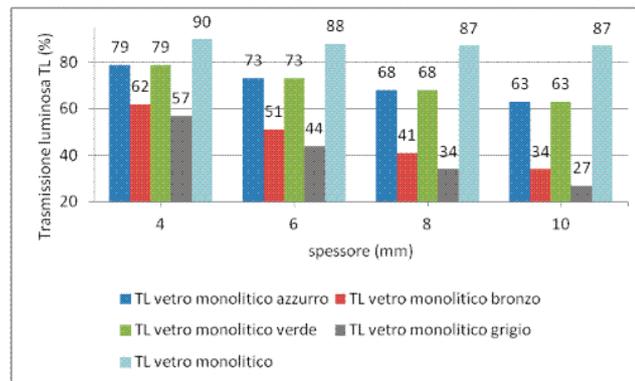


Fig. 41 - Trasmissione luminosa (%) di vari tipi di vetro monolitico colorato al variare dello spessore (mm).

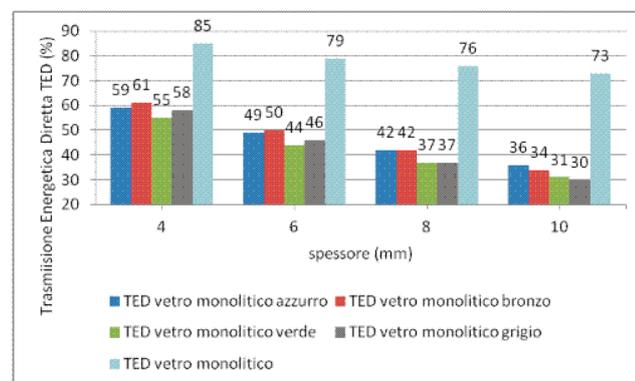


Fig. 42 - Trasmissione Energetica Diretta (%) di vari tipi di vetro monolitico colorato al variare dello spessore (mm).

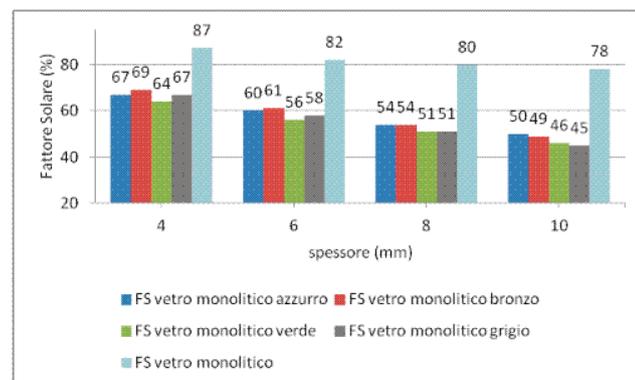


Fig. 43 - Fattore Solare (%) di vari tipi di vetro monolitico colorato al variare dello spessore (mm).

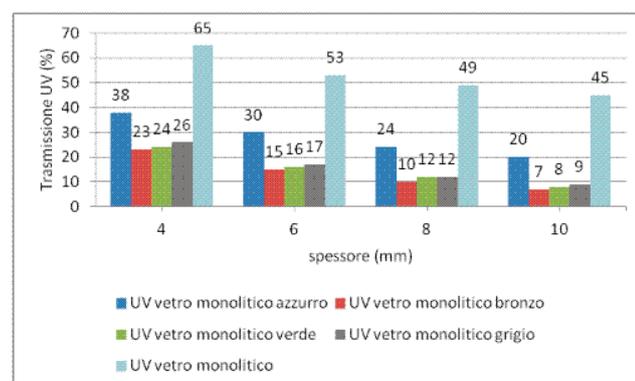


Fig. 44 - Trasmissione UV (%) di vari tipi di vetro monolitico colorato al variare dello spessore (mm).

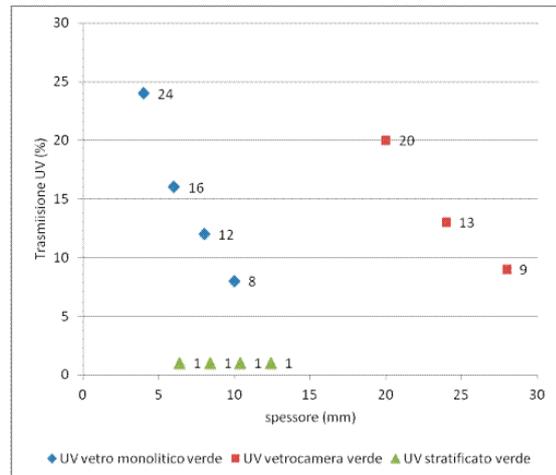
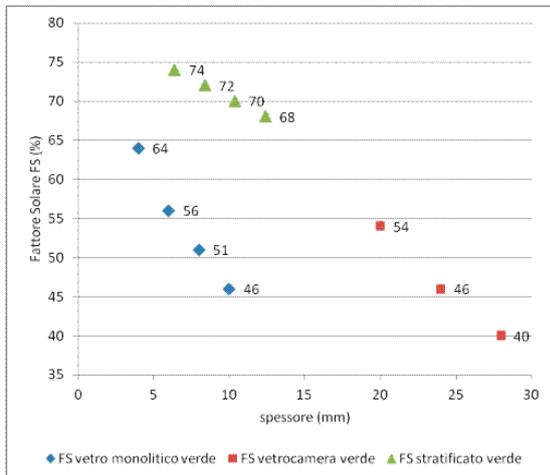
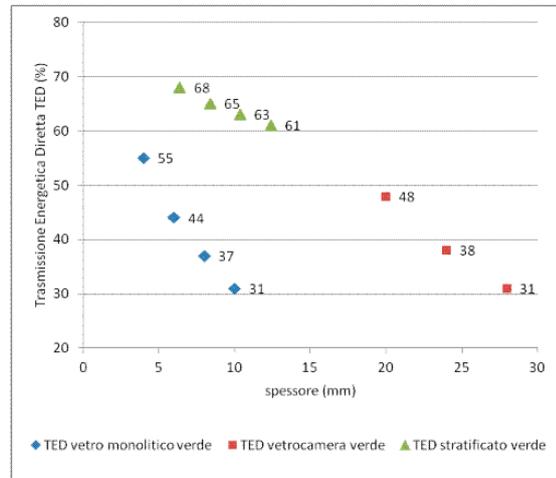
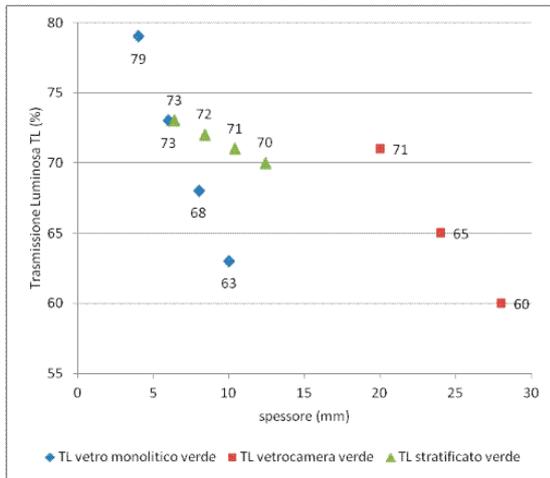


Fig. 47 - Confronto Fattore Solare di vetro monolitico, vetrocamera e stratificato verde.

Fig. 48 - Confronto Trasmissione UV di vetro monolitico, vetrocamera e stratificato verde.

### 4.3.3. La trasformazione della superficie del vetro

La trasformazione della superficie del vetro può avvenire attraverso diverse tecniche di trattamento:

- *sabbiatura*: getto di sabbia abrasiva con aria compressa. I granelli di sabbia incidono ad ogni urto la superficie del vetro asportandone minutissimi frammenti. In questo modo si rende la superficie satinata;

- *satinatura*: utilizza acido fluoridrico in soluzione diluita oppure applicata come gelatina sulla superficie del vetro. La zona esposta viene corrosa e disciolta dall'acido fluoridrico che a seconda della concentrazione (1% - 2%) e del tempo di contatto può produrre effetti più o meno marcati;

- *verniciatura* o *laccatura*: le lastre di vetro possono essere verniciate con prodotti ad essiccazione naturale o accelerata mediante lampade a raggi IR;

- *smaltatura*: processo mediante il quale si colora completamente la faccia di un vetro per effetto dell'applicazione a rullo o a spruzzo. Può essere stabilizzata con ulteriore trattamento termico;

- *serigrafia*: usata per la riproduzione su lastre piane o curvate di disegni, scritte, decorazioni a scopo artistico o funzionale, con l'uso di fritte ceramiche, tramite telai. Può essere stabilizzata con ulteriore trattamento termico;

- *opacizzazione*: procedimento che assicura l'inalterabilità del deposito opacizzante anche se esposto agli agenti atmosferici. Si ottiene attraverso l'applicazione di film plastici, incollando sulla lastra delle sottilissime pellicole in poliestere o in polietilene;

- *siliconatura*: spruzzando sulla lastra, con impianti specifici a pressione, dei granuli di silicone diluiti al fine di ottenere, dopo adeguata polimerizzazione, una pellicola gommosa perfettamente aderente;

- *laccatura*: a freddo o a caldo, ottenuta depositando sulla lastra speciali lacche poliuretiche (Lazzerini, 2007).

Di particolare importanza in termini energetici è il vetro serigrafato.

#### 4.3.3.1. Vetro serigrafato

*Caratteristiche.* Il vetro serigrafato viene stampato tramite serigrafia. Un composto ceramico polverizzato (fritta) viene applicato su un lato con un telaio serigrafico con seta sintetica che riproduce il motivo da stampare. La fritta è composta da minuscole particelle di vetro, pigmenti e prodotti chimici (anidride borica, ossidi alcalini, di piombo, di stagno, ecc.). La cottura in forno, in genere associata alla tempra o all'indurimento termico del vetro, facendo vetrificare il composto, determina un rivestimento permanente (smalto).

La superficie del vetro può essere stampata secondo diversi modelli: punti, linee, reticoli, ecc. Le dimensioni e la densità di punti, linee e reticoli determinano la schermatura del vetro. Lo smalto assorbe e riflette l'energia solare. In termini di controllo delle radiazioni solari, il vetro serigrafato è efficace in due modi. In primo luogo, la fritta ceramica aumenta la percentuale di riflessione solare e blocca una parte di raggi ultravioletti e infrarossi e, con una

quantità di radiazione solare ridotta, all'interno dell'edificio verrà intrappolato meno calore. In secondo luogo, tale vetro riduce la quantità di luce in eccesso nello spettro visibile e contemporaneamente l'abbagliamento all'interno degli spazi. L'utilizzo di vetro serigrafato permette quindi di realizzare grandi vetrate offrendo un compromesso tra luce visibile eccessiva e opacità. «Con il cambiamento delle condizioni meteorologiche e con vari angoli di visione, la vetrata serigrafata può sembrare cristallina, opaca o quasi bianca, con un effetto molto elegante» (Arch. William Stein, Dattner Architects, New York).

Il grado di miglioramento delle prestazioni acquisite dal vetro con l'aggiunta della serigrafia dipende da una serie di variabili. In generale, l'efficacia del controllo solare è proporzionale alla percentuale di copertura della fritta e varia con spessore, opacità, riflessione/assorbimento del materiale, posizione. La percentuale di copertura è la variabile più facilmente riconoscibile: più copertura equivale a rendimento solare migliore. Gli elementi serigrafati possono inoltre avere un gradiente di variazione a seconda dell'angolo di incidenza della radiazione solare. In tal modo un materiale come il vetro, apparentemente inadatto per fungere da riparo e modulazione della luce diurna, permette di assicurare un ampio ventaglio di regolazioni possibili, grazie anche al ricorso a sistemi di calcolo per un corretto posizionamento delle lastre. Diverse percentuali di copertura nella parte superiore e inferiore di pareti vetrate possono essere usate in modo da mantenere completamente trasparente la visione. Il colore della fritta ceramica influisce sulle prestazioni solari. I colori scuri sono assorbenti e tendono a ridurre la luminosità. Un fritta grigio medio assorbe più calore rispetto al tradizionale bianco che invece è maggiormente riflettente.

Il vetro serigrafato può essere impiegato in versione monolitica, inserito in unità di vetro isolante oppure può essere sottoposto a stratificazione. La fritta può essere applicata su qualsiasi superficie, ad esclusione della superficie esterna del vetro (# 1). Per ottenere un ottimo

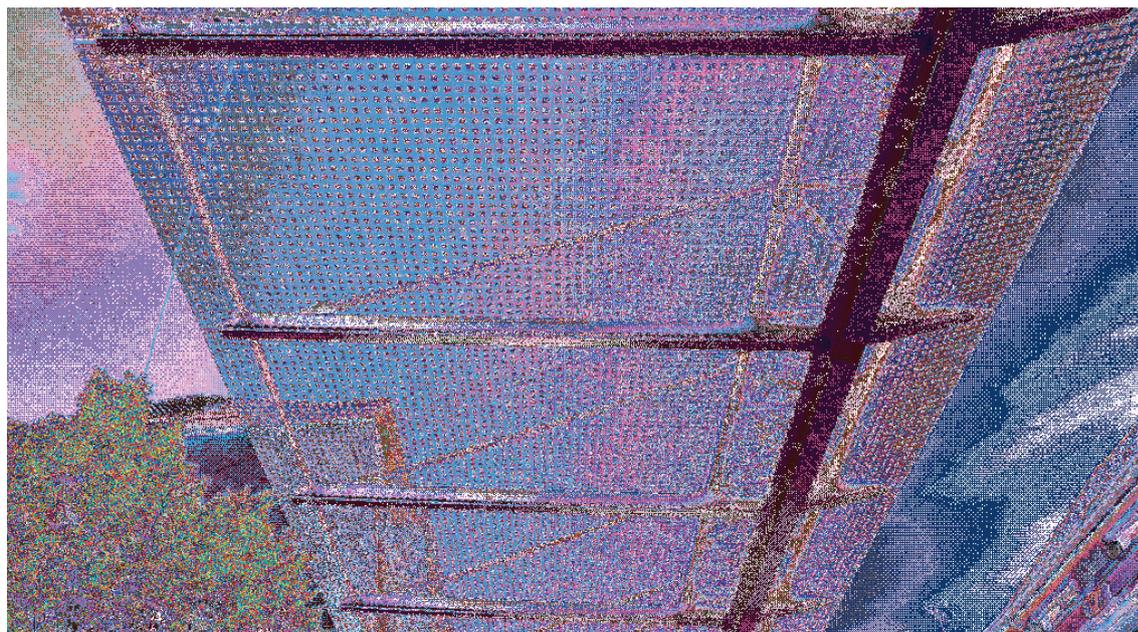


Fig. 58 - Pensilina con vetro serigrafato, Krefeld, Germania (foto Lanza Volpe, A.).

controllo solare in un vetrocamera occorre applicare la frittata su superficie # 2, poiché su superficie # 3 o # 4 blocca meno calore con l'incremento dell'assorbimento solare all'interno del vetro e un più alto coefficiente di ombreggiamento. La serigrafia su queste due facce diventa inoltre più visibile dall'interno durante le condizioni notturne. Rivestimenti *Low-E* possono essere applicati sulla frittata se la percentuale di copertura del vetro non supera l'80%.

Da lontano, la differenza tra vetro serigrafato e vetro normale non è rilevabile. Si potrebbe infatti pensare che con l'uso di una tale tipologia di vetro, come quello serigrafato per punti, si vedrebbero i punti, ostacolando la visione. Ciò non avviene poiché l'occhio umano tende a mettere a fuoco ciò che si trova al di là del vetro. In particolare, nell'ambito della ricerca, sono stati effettuati degli studi su lastre di vetro serigrafato. Grazie ai campioni di vetro monolitico serigrafato per punti, con varie percentuali di copertura, acquistati nell'ambito del *PRIN* coordinato dalla Prof. Maria Clara Ruggieri sono stati effettuati degli studi, in collaborazione con il Prof. Antonio De Vecchi e la Prof. Simona Colajanni, che hanno dimostrato che è possibile un utilizzo di tali vetri senza compromettere, a una certa distanza di osservazione, la percezione attraverso essi.

Sono stati utilizzati campioni con il 40, 50, 60 e 70% di copertura, serigrafati con punti di diverso diametro (3,6 e 10 mm). Le prove sono state effettuate scattando fotografie dall'interno verso l'esterno dell'ambiente, a una distanza di circa 5 m e con un angolo di visione pari a  $90^\circ$  (Fig. 59 a). L'occhio umano, semplificando al massimo, può per certi versi essere paragonato ad una macchina fotografica, se non altro perché dispone di un obiettivo (il cristallino), con regolazione dell'apertura (iride e pupilla) e di una superficie sensibile alla luce su cui viene messa a fuoco l'immagine (la retina) (Fig. 59 b). Sono state scattate due tipologie di foto: mettendo a fuoco il vetro con la sua serigrafatura; mettendo a fuoco ciò che si trova al di là del vetro stesso. Si osserva che con un diametro di 3 mm i punti diventano

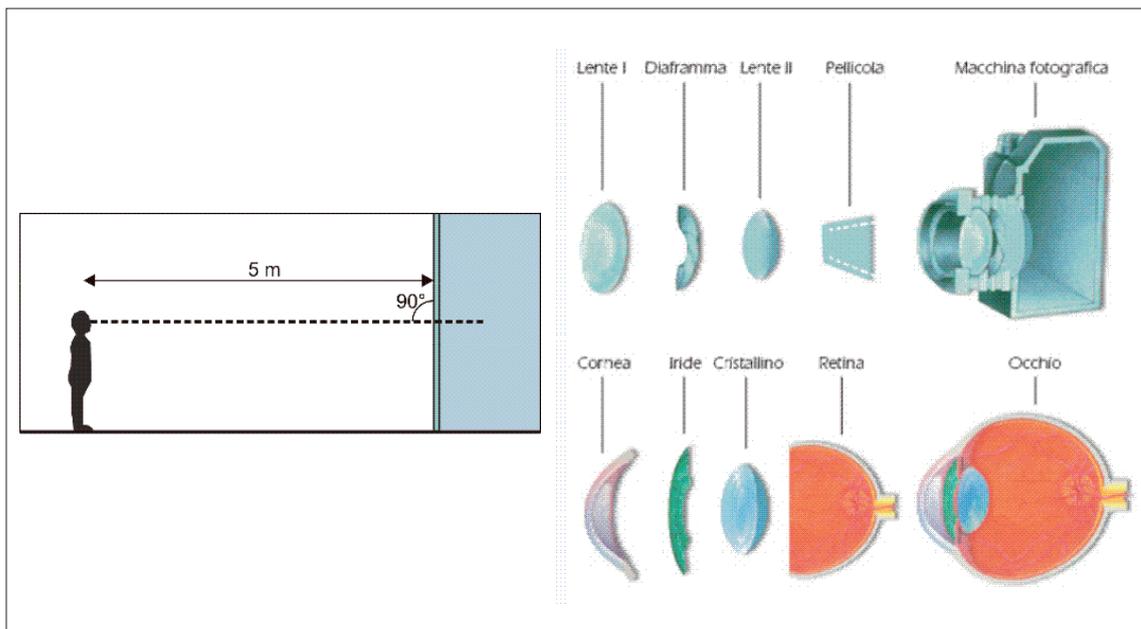


Fig. 59 - Schema delle condizioni di prova (a); parallelismo tra occhio umano e apparecchio fotografico (b).

invisibili anche con un'elevata copertura, pari al 70%, provocando solo una lieve alterazione di colore rispetto all'immagine fotografata senza l'interposizione del vetro. Anche con gli altri diametri e con diverse percentuali di copertura i risultati sono soddisfacenti, i punti sembrano scomparire alla vista. La serigrafia diventa più evidente dall'interno in condizioni notturne. Al fine di un buon risultato è raccomandata la valutazione *in loco* di un campione in

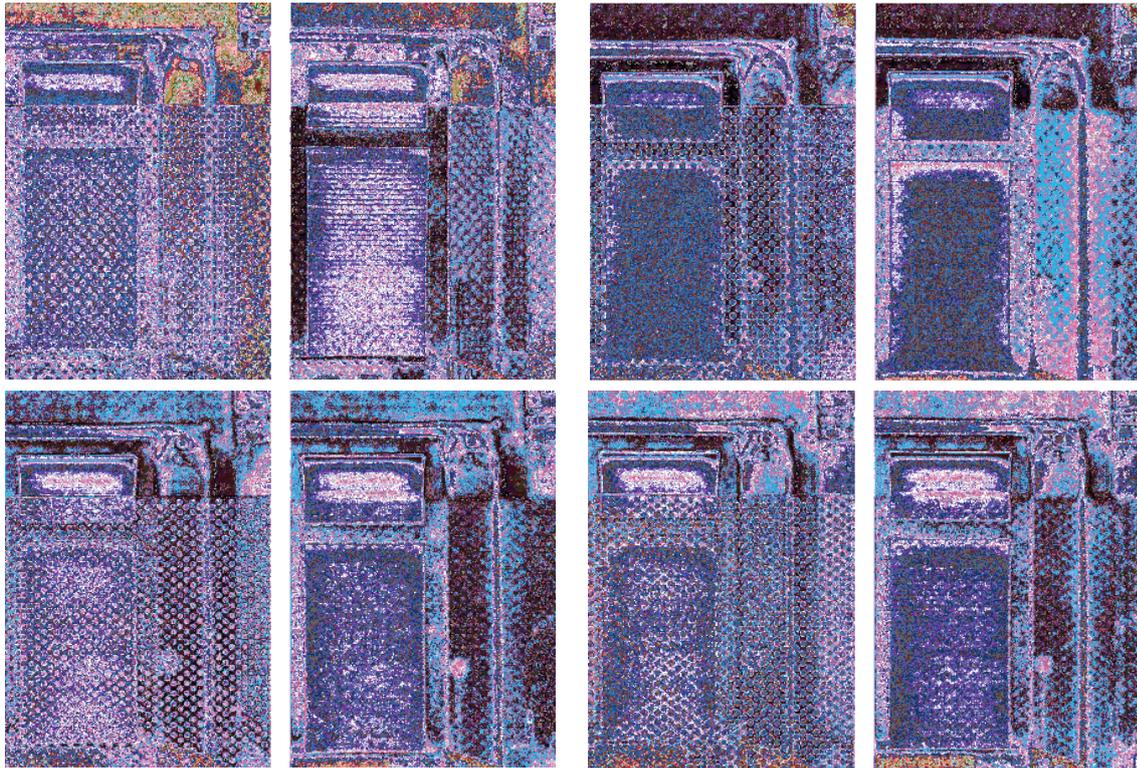


Fig. 60 - Da sinistra e dall'alto, lastre serigrafate con punti di diametro pari a 10 mm con 40, 50, 60 e 70% di copertura. Prove presso il laboratorio del Dipartimento di Architettura dell'Università di Palermo (De Vecchi, A., Colajanni, S., Lanza Volpe, A.).

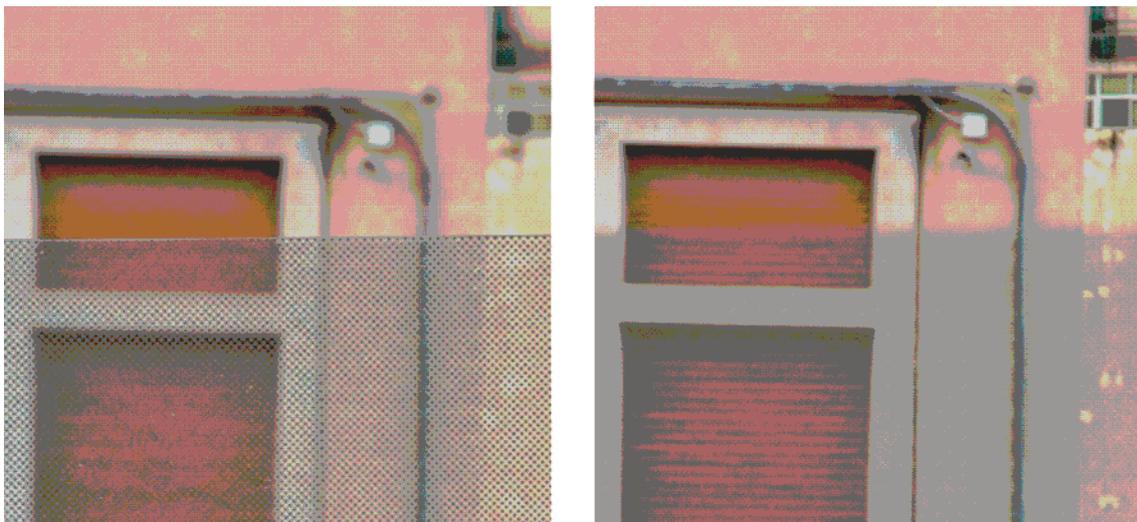


Fig. 61 - Lastre serigrafate con punti di diametro pari a 3 mm e 70% di copertura. Prove presso il laboratorio del Dipartimento di Architettura dell'Università di Palermo (De Vecchi, A., Colajanni, S., Lanza Volpe, A.).

varie condizioni di illuminazione.

*Impieghi.* Una varietà di colori e texture permette di creare un effetto visivo distintivo dell'edificio. Il vetro serigrafato viene usato per ridurre la trasmissione di calore anche in climi molto caldi e per attenuare la luminosità. Nel settore automobilistico il vetro con bande serigrafate viene integrato ai bordi al fine di oscurare l'incollaggio del vetro alle carrozzerie e anche di proteggere i collanti da una esposizione diretta ai raggi UV.

*Durabilità e manutenzione.* Poiché durante la produzione il vetro raggiunge temperature elevate, lo strato ceramico si fonde alla superficie del vetro. Si ottiene in tal modo resistenza chimica e ai graffi, opacità e difficile dissolvenza. Il vetro serigrafato si pulisce facilmente e mantiene il suo aspetto per tutta la durata del vetro.

*Caratteristiche energetiche.* Di seguito i grafici di confronto delle principali caratteristiche energetiche di vetri con diverse percentuali di copertura. Tali grafici sono stati ricavati a partire dai dati tecnici forniti da alcune ditte vetrarie.

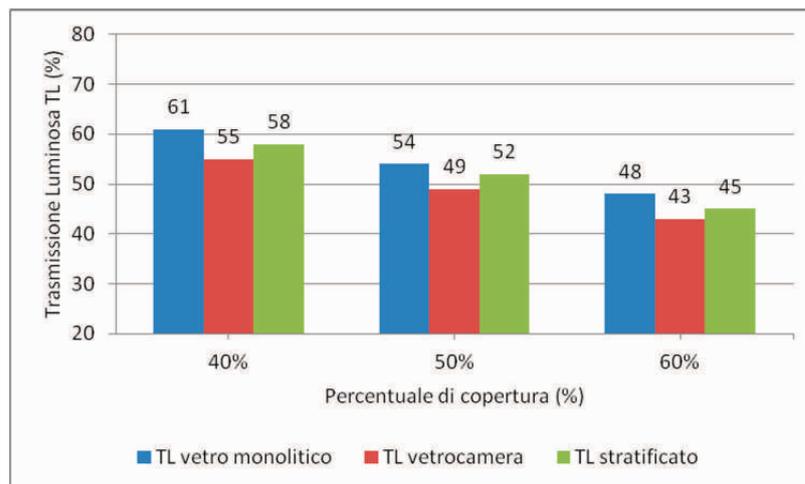


Fig. 62 - Trasmissione Luminosa TL (%) del vetro serigrafato per diverse percentuali di copertura.

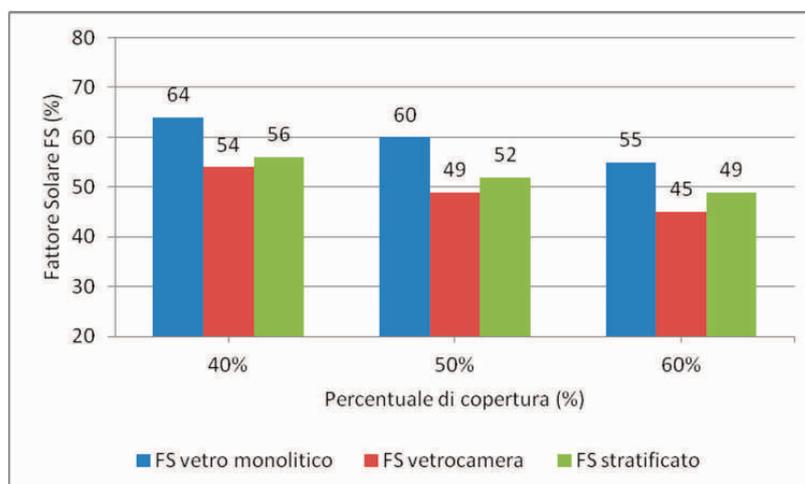


Fig. 63 - Fattore Solare FS (%) del vetro serigrafato per diverse percentuali di copertura.

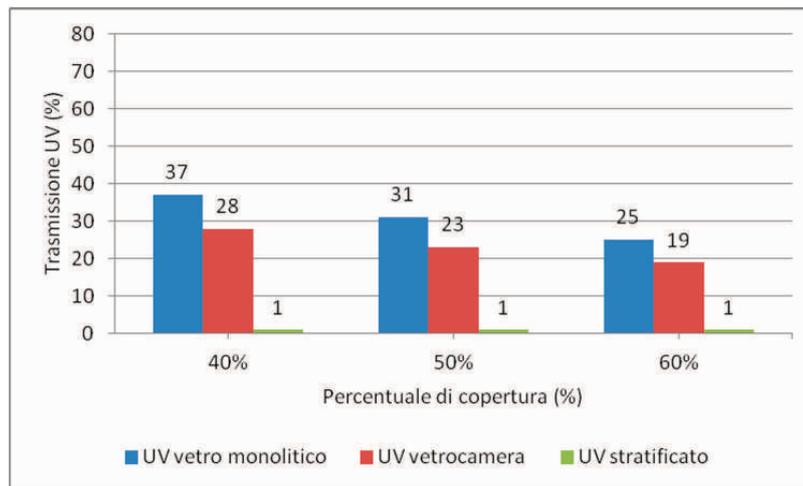


Fig. 64 - Trasmissione UV (%) del vetro serigrafato per diverse percentuali di copertura.

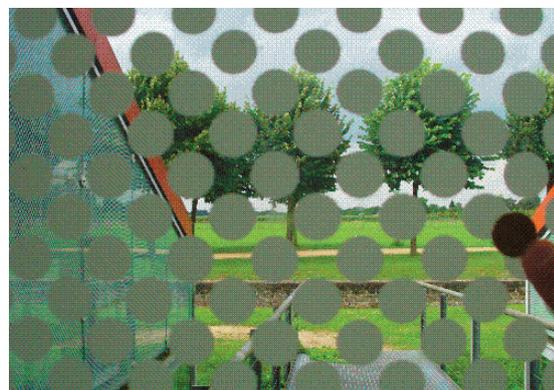
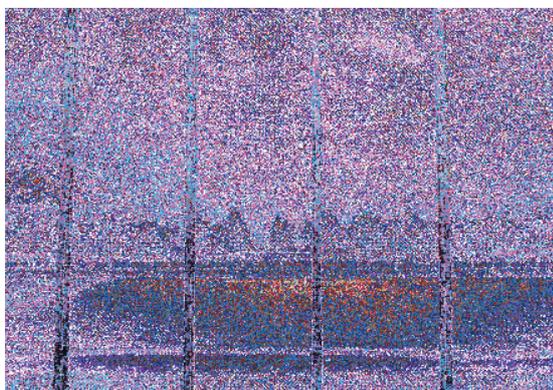


Fig. 65 - Involucro in vetro serigrafato per punti a protezione delle antiche terme romane, Xanten, Germania (foto Lanza Volpe, A.).

#### 4.4. Strutture di supporto dei vetri

La diffusione registrata negli ultimi decenni di coperture innovative in vetro su siti archeologici dipende da molti fattori, fra i quali i mezzi finanziari disponibili, che consentono di effettuare sperimentazioni (spesso si tratta di siti Patrimonio dell'Unesco), il progresso tecnologico e, soprattutto, la presenza di materiali e sistemi sempre più performanti che ha permesso la concezione di coperture e/o di chiusure sempre più grandi e soddisfacenti. La tecnologia moderna è in continua evoluzione e l'industria del vetro oggi fa molti investimenti nella ricerca scientifica. Attualmente, sul mercato sono disponibili vetri in grado di rispondere ai requisiti di sicurezza, meccanica, antinfortuno, antivandalismo, antincendio, ecc. Le proprietà di tali lastre sono determinate dal diverso processo produttivo (vetro ricotto, temprato o indurito) e dalla possibilità di combinare più lastre (vetro stratificato) (Lanza Volpe, 2013).

Tale evoluzione tecnologica delle procedure di lavorazione del materiale ha dato la possibilità di realizzare coperture in vetro secondo schemi statici rigidi a flessione o a compressione (Paoletti & Romano, 2010). Le coperture rigide a flessione, a travi o a piastra, realizzate tramite travi reticolari o tralici spaziali ad aste e nodi, costituiscono la tipologia più diffusa. Nel caso della copertura orizzontale di Pécs (Fig. 66) le lastre sono calpestabili e il vetro assume funzione portante grazie ad alcune travi di sostegno costituite da quattro lastre di vetro temprato stratificato con *PVB*, ancorate alla struttura in acciaio. Le strutture rigide a compressione sono gli archi, le cupole, le volte, come quella in vetro e acciaio di Badenweiler (Fig. 67) progettata dagli ingegneri di Stoccarda Schlaich, Bergermann und Partner. Qui, come in una membrana, gli sforzi sono trasmessi all'interno del piano, senza pertanto creare sforzi di flessione negli elementi. Sono state create maglie di vetro rettangolari ad alta resistenza con cavi precompressi diagonali di soli mm 10 e ciò crea un guscio irrigidito



Fig. 66 - Copertura con travi portanti in vetro stratificato dell'antico cimitero paleocristiano di Pécs, Ungheria.

dalla struttura triangolare, con un ingombro di 68 x 40 m e profili in acciaio di soli mm 60 x 40 che si estendono a mm 60 x 60 per le campate. Tuttavia, per irrigidire la copertura trasversalmente sono stati necessari 10 fasci di cavi pretesi costituiti da un cordone di compressione con sezione a T e cavi longitudinali e diagonali ( $\varnothing$  22 e 10 rispettivamente), quasi invisibili a distanza (Schober & Gugeler, 2002).

Oltre all'innovazione nella lavorazione del materiale, ciò che ha permesso un sempre maggior uso del vetro è stato lo sviluppo dei sistemi di connessione delle lastre, problema di grande importanza sia in termini di progettazione sia dal punto di vista economico. Le tecnologie per le coperture vetrate ricalcano in parte quelle impiegate per le facciate verticali, adattate per la copertura. Per assicurare il massimo grado di esilità nell'aspetto complessivo della costruzione, la larghezza delle sezioni metalliche a vista è spesso ridotta al minimo. La riduzione delle parti metalliche è importante anche dal punto di vista termico, poiché la presenza di tali strutture caratterizzate da elevata conducibilità porta in estate a un aumento della temperatura delle superfici con la conseguente trasmissione del calore negli ambienti interni. In base al tipo di connessione degli elementi in vetro possiamo distinguere:

- *sistemi a montanti e traversi*: elementi verticali e orizzontali che formano un reticolo strutturale al quale vengono applicati gli elementi trasparenti;

- *sistemi strutturali (structural glazing o VEC, Vitrage Exterieur Collé)*. L'espressione "vetro strutturale" è usata per descrivere strutture in vetro senza telaio nella loro forma più pura: non vi sono fermavetro o fissaggi puntuali esternamente e le lastre di vetro sono fissate alla

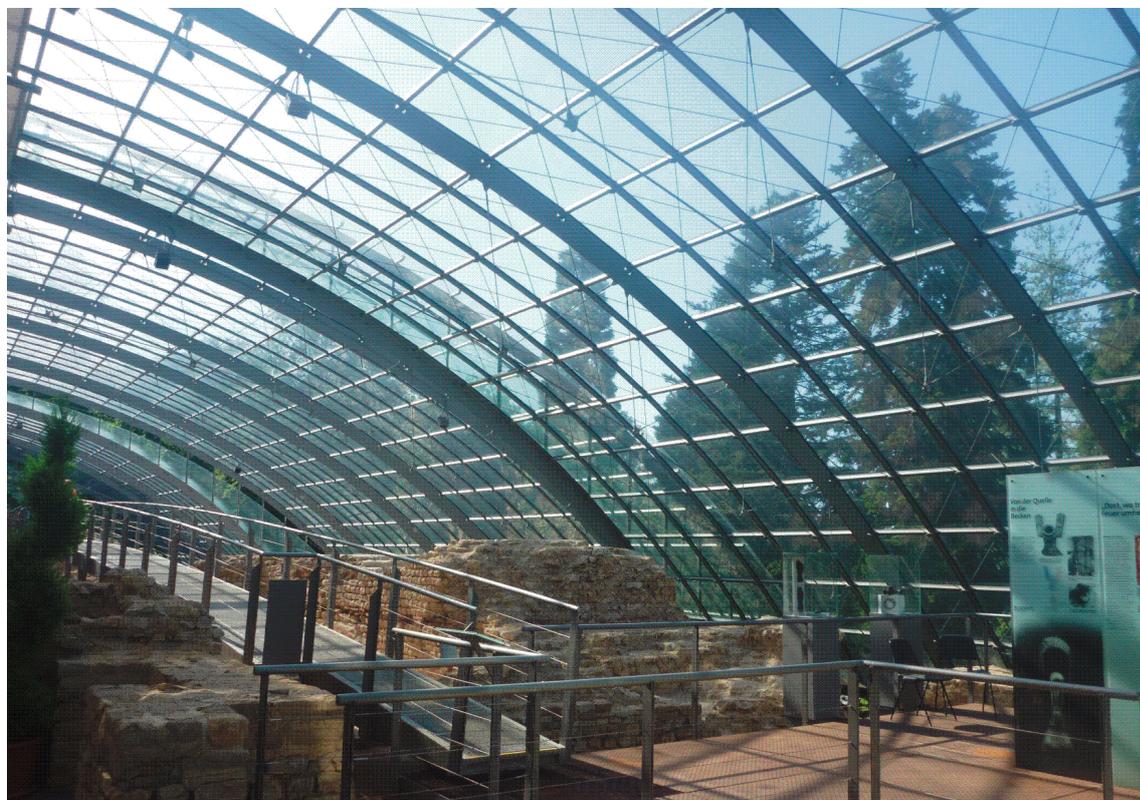


Fig. 67 - Copertura delle antiche terme romane di Badenweiler, Germania (foto Lanza Volpe, A.).

struttura di sostegno esclusivamente mediante adesivi. Tutti i quattro lati del pannello possono essere incollati a un telaio con sigillanti/adesivi siliconici. I giunti tra le cellule vengono tamponati con sigillanti compatibili e resistenti alle intemperie, oppure con guarnizioni preformate. In un sistema di incollaggio strutturale su due lati, solo due lati (sempre i lati opposti) del vetro vengono incollati (orizzontalmente o verticalmente) a un telaio con l'adesivo siliconico. Gli altri due lati opposti vengono fissati meccanicamente come le facciate strutturali con copertina. I carichi dinamici (e nei sistemi non supportati meccanicamente anche i carichi statici) sono trasferiti tramite gli adesivi siliconici.

- *sistemi a fissaggio puntuale (point fixings o VEA, Vitrage Exterieur Aggraffé)*: sono spesso usati nel tentativo di aumentare la trasparenza dell'involucro e di dematerializzare i fissaggi del vetro. In questo modo, minimizzando la superficie degli elementi di fissaggio, viene ovviamente raggiunto un maggior grado di trasparenza. Per confronto, l'area di sistemi intelaiati è pari a 8 - 10% della superficie vetrata totale; l'area coperta da sistemi di fissaggio puntuali può essere invece inferiore allo 0,5 %. Per quanto riguarda le strutture di supporto, i sistemi di vetratura a fissaggio puntuale richiedono piccole tolleranze. La trasmissione dei carichi per punti richiede calcoli più elaborati e l'utilizzo del "metodo degli elementi finiti" (Oesterle et al., 2001). Componenti principali di un sistema a fissaggio puntuale sono:

- le lastre in vetro;
- la struttura metallica;
- il sistema di aggancio delle lastre alla struttura metallica;
- la sigillatura tra le lastre di vetro.

Le *lastre di vetro* impiegate devono essere di sicurezza temperate o indurite, preferibilmente sottoposte a controlli *HST (Heat Soak Test)*, processo utilizzato per minimizzare il rischio di rottura spontanea del vetro dovuta all'espansione del solfuro di nickel in seguito a sbalzi di temperatura). Il dimensionamento delle lastre dipende da vari fattori: dal numero di agganci a vetro (è possibile realizzare lastre con quattro o più punti di aggancio, l'aggiunta di ulteriori attacchi permette di diminuire la freccia di flessione della lastra di vetro e quindi di aumentarne la resistenza); dalla posizione dei punti di fissaggio (che influisce, come per il numero degli attacchi, sulla freccia di flessione della lastra e quindi sulla sua resistenza); dalla resistenza ai carichi richiesta.

La *struttura metallica* può essere composta da: carpenteria con piloni o travi in ferro o acciaio; tensostrutture, tramite le quali è possibile ottenere involucri con un aspetto visivo particolarmente leggero in quanto l'ingombro della struttura è ridotto alle dimensioni del cavo e dalle bielle (distanziale tra cavo e supporto); strutture miste, dove sono presenti entrambe le tipologie precedentemente descritte.

Il *sistema di aggancio delle lastre alla struttura* è costituito da supporti metallici denominati ragni che hanno il compito di trasferire i carichi alla struttura e da vincoli strutturali che fissano i vetri ai suddetti supporti. In commercio vi sono diverse versioni di supporti con differente interasse e con diverso numero di bracci. Sono realizzati in fusione di acciaio inox e possono ad esempio garantire portate per carichi combinati di circa 200 Kg per braccio

(800 Kg per il supporto a 4 bracci). I valori di resistenza a carico sono calcolati in fase di progettazione con sistema di calcolo *FEM* e successivamente garantiti dai test effettuati da istituti riconosciuti a livello internazionale. Gli accessori utilizzati per la realizzazione di facciate strutturali a sospensione puntuale sono sottoposti a combinazioni di carico differenti: carichi che possano risultare dalla spinta del vento o dal carico della neve che generano uno sforzo perpendicolare al piano del vetro; carichi dati dal peso proprio del vetro che genera una forza di taglio sulle viti articolate e quindi una forza parallela al piano del vetro sui supporti; tensioni aggiuntive date dalle dilatazioni termiche nel caso in cui il sistema di fissaggio sia eccessivamente vincolato. Per questo motivo i supporti presentano forature differenziate. Lo scopo di forature differenziate sui bracci è appunto quello di sopperire alle variazioni e sollecitazioni subite dal vetro oltre a permettere una maggiore possibilità di regolazione in fase di posa. Utilizzando questo sistema si stabilisce la direzione della dilatazione e dello scorrimento del vetro in modo da evitare punti critici di pressione tra le lastre rischiosi per la resistenza dei vetri.

Per quanto riguarda i vincoli di connessione del vetro al supporto vi sono: viti articolate o *rotules*, viti fisse e morsetti fermavetro o *clamps fixings*. Le *viti articolate* presentano uno snodo sferico che trasforma il punto di connessione tra vetro ed elemento metallico in una vera e propria cerniera, evitando una connessione di tipo rigido. Questo sistema a fissaggio puntuale, che deriva da quello ideato da Rice, Francis e Ritchie per la Villette a Parigi, è quello più utilizzato in quanto adattabile a varie soluzioni. Sono completamente realizzate da tornitura di acciaio inox che garantisce un'elevata robustezza e sono dotate delle apposite guarnizioni e di eventuali accessori. Possono essere a plafone, non a filo con la superficie del vetro, o ad incasso, a filo con la superficie del vetro. Ogni vite può avere una portata di oltre 300 Kg. La scelta della vite articolata da utilizzare avviene considerando, oltre al tipo di vetro, la lavorazione da effettuare sulla lastra. È possibile realizzare forature diritte o sva-

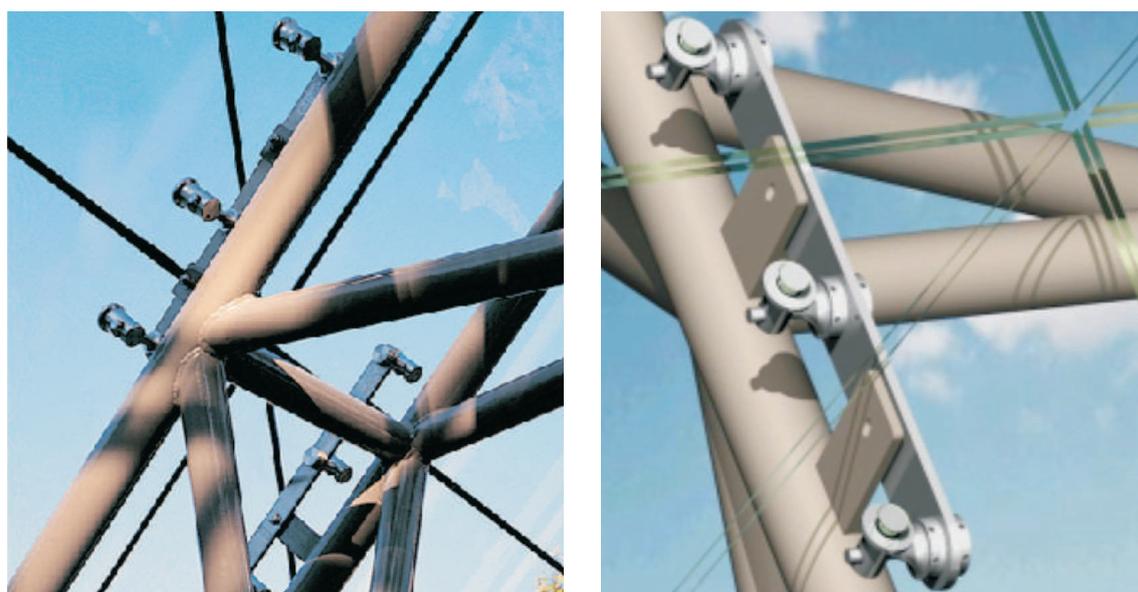


Fig. 68 - Fissaggio puntuale della copertura in acciaio e vetro dei resti della Cattedrale di Hamar, Norvegia.

sate; la differenza sostanziale tra le due è il tipo di vincolo che si crea sulla lastra. L'andamento delle tensioni intorno al foro svasato e al foro cilindrico sono simili. La differenza risiede nel fatto che se la lastra di vetro ha una foratura svasata si ha un fenomeno di sovratensione all'interno dello svaso con possibile rottura della lastra, mentre nel caso di foro cilindrico, è possibile un ulteriore movimento di scorrimento del vetro all'interno del foro, aumentando però la possibilità di creare tensioni tra lastra e lastra e quindi il rischio di rottura multipla; per questo motivo si ritiene corretto l'uso di rotule con foro cilindrico solo nelle realizzazioni di coperture o con vetri installati orizzontalmente. In questo caso, infatti, in seguito a carichi perpendicolari al vetro la lastra si dilaterà solo verso il suo stesso centro senza creare sovratensioni alla struttura o alle lastre vicine. Lo spessore minimo di vetro utilizzabile con foro svasato è 8 mm in quanto l'utilizzo di un vetro di spessore inferiore crea punti spigolosi che rendono la lastra soggetta a facili rotture. Con il foro cilindrico è possibile utilizzare vetri a partire da 6 mm di spessore. Ad Hamar (Fig. 68) sono state sviluppate diverse varianti di fissaggio puntuale per affrontare le condizioni geometriche variabili dell'edificio che hanno reso necessario l'utilizzo di 1675 pannelli di vetro di cui 690 con forme speciali (triangoli, trapezi, vetro curvato per la volta centrale). Le lastre in doppio strato di vetro indurito (con trattamento *Heat Soak*, per ridurre al minimo il rischio di rotture) da mm 10 e da 15 mm (*Pilkington Planar™*), sono fissate alla struttura in acciaio attraverso due staffe in acciaio inox. I bulloni che fissano il vetro si avvitano alle piastre, saldate direttamente ai tubolari in acciaio.

Le *viti fisse*, dotate delle apposite guarnizioni, sono utilizzate per la realizzazione di parapetti o strutture fisse interne. Tali sistemi rigidi, non sono infatti consigliati per grandi strutture, in quanto limitano ulteriormente le tolleranze ammesse, aumentando il problema di assicurare un montaggio senza sovratensioni e di consentire l'espansione e la contrazione.

I *morsetti fermavetro* consentono la connessione di vetri adiacenti senza foratura. Sono realizzati in acciaio o alluminio e permettono l'utilizzo di lastre di medie dimensioni. Il corpo del morsetto sostiene il peso della lastra superiore e fissa, tramite il coperchio, la lastra inferiore. Un esempio di tale sistema è quello utilizzato a Dalkingen (Fig. 69) dove i pannelli sono sostenuti con morsetti in acciaio inox, senza foratura delle lastre.

La *sigillatura tra le lastre di vetro* può anche non essere presente nel caso di pareti verticali in cui si voglia garantire ventilazione tra i giunti delle lastre (Fig. 70). Al fine di garantire impermeabilizzazione come riempimento per la sigillatura tra lastra e lastra possono essere utilizzati diversi tipi di guarnizioni: secche (neoprene, *EPDM*, profili siliconici, *PVC*, ecc.), a nastro o in pasta (silicone, poliuretano, polisolfuro, ecc.).

In generale, il tema delle coperture in vetro rappresenta un ambito di sperimentazione complesso dal punto di vista tecnologico e spesso devono essere effettuate prove sperimentali. A Juval lo studio di ingegneria Bergmeister ha fornito servizi di progettazione strutturale, prove sperimentali sulle lastre in vetro, progettazione di dettaglio, oltre che la direzione dei lavori strutturali. La copertura presenta solo alcuni punti di appoggio sui ruderi. Ciascun elemento in vetro è vincolato puntualmente ai quattro vertici con attacchi a "bor-

chia" in acciaio inox ed è rinforzato all'intradosso con due cavi longitudinali pre-tesi allo scopo di limitare la freccia massima e conferire alla struttura un ulteriore appoggio intermedio elasticamente cedevole. Allo scopo di valutare preventivamente la capacità portante limite ultima dell'elemento tipo, alcuni moduli sono stati sottoposti a prove di carico uniforme presso l'Università di Innsbruck, mediante l'applicazione diretta di sacchi riempiti di sabbia su pannelli posti in posizione orizzontale e con vincoli identici a quelli previsti in opera. I supporti a borchia hanno consentito di regolare la tolleranza in tre direzioni durante l'installazione (Froli & Lani, 2007).

Anche a Dalkingen la costruzione in acciaio è racchiusa da grandi vetri supportati per punti. Per i formati in vetro e i supporti non specificati nelle norme i regolamenti richiedono una valutazione caso per caso: prove sperimentali di rottura dei vetri devono essere condotte in condizioni realistiche per dimostrare che la caduta di vetri o schegge è impossibile per un periodo di tempo predefinito. È stata richiesta una prova di resistenza residua strutturale a causa delle dimensioni non regolari dei pannelli e dei supporti dei vetri inclinati della facciata ed è stato realizzato un modello in scala 1:1 dei punti di supporto dei vetri stratificati di sicurezza nello stabilimento della *Brendle Metallbau* ad Aalen. Sono state valutate le deformazioni e le conseguenti rotture. Successivamente, sono stati gettati sui vetri sacchi di sabbia equivalenti ai carichi di vento previsti e sono state determinate le deformazioni e le conseguenti resistenze residue di progetto. A dispetto delle loro dimensioni, i vetri hanno avuto un grande resistenza e hanno soddisfatto i requisiti senza restrizioni (Graf, 2010).

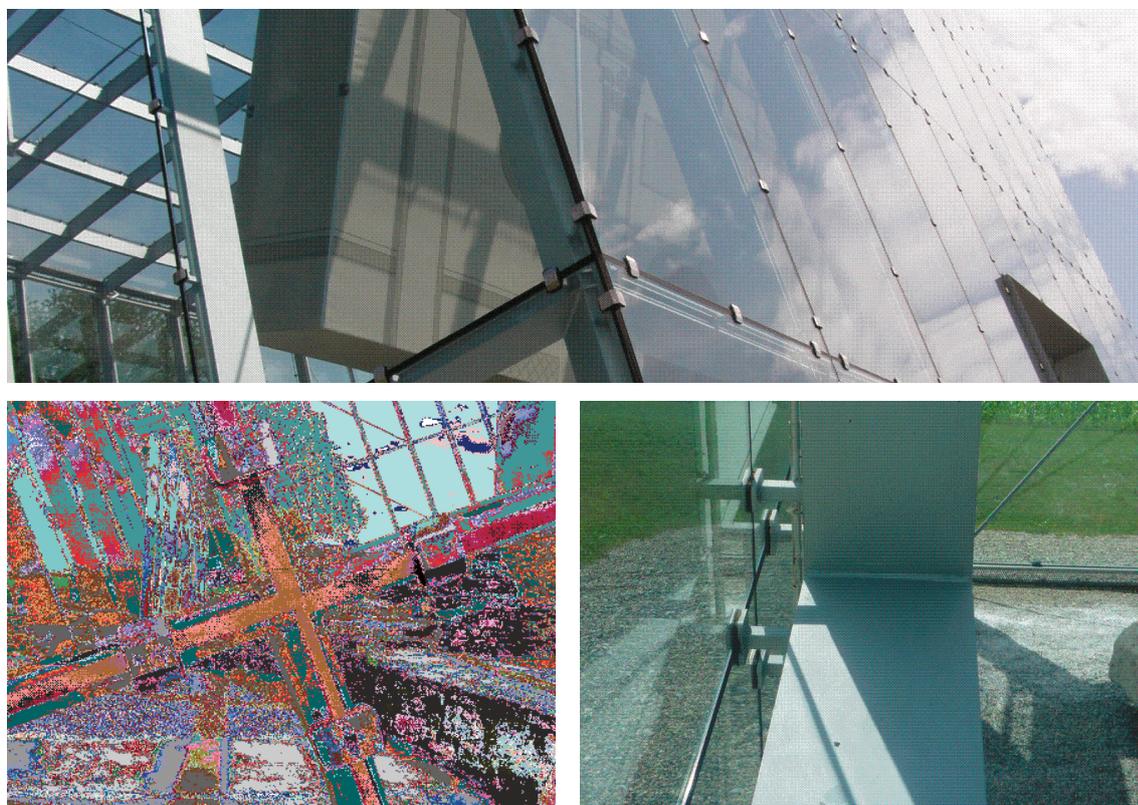


Fig. 69- Copertura dei resti della porta Limestor, Dalkingen, Germania (foto Lanza Volpe, A.).

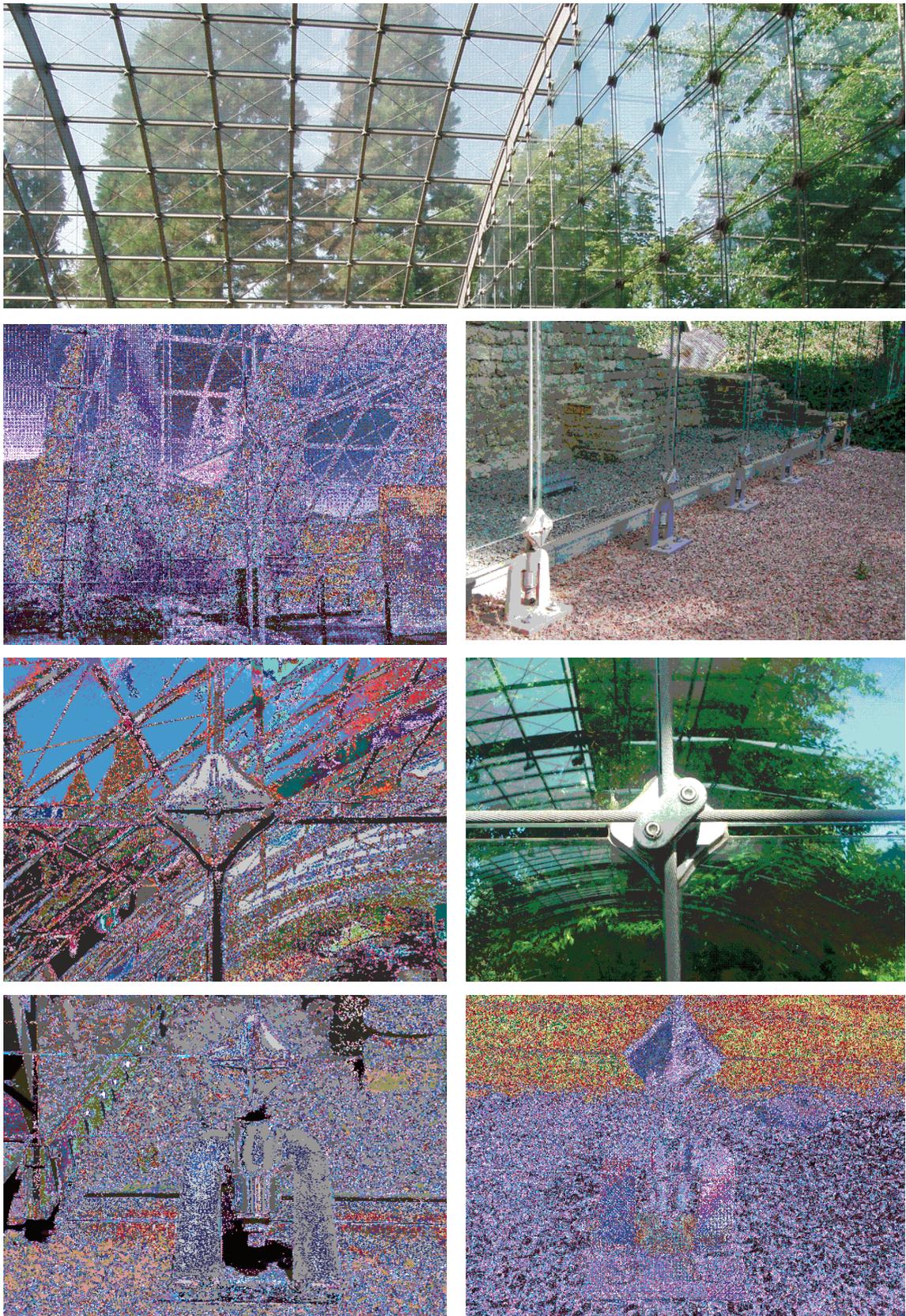


Fig. 70 - Copertura delle antiche terme romane di Badenweiler, Germania (foto Lanza Volpe, A.).

### Riferimenti bibliografici

- A. A. V. V., 2007. *Il vetro, Manuale tecnico*, Saint Gobain, edito a cura della Direzione Commerciale SGS.
- Daneo, A., Falcone, R., Sommariva, G., Vallotto, M. 2001. *I film sottili (coating) su vetro: caratteristiche, materiali e metodologie di analisi*, "Rivista della Stazione sperimentale del vetro", 1, p. 6.
- Carmody, J., Selkowitz, S., Lee, E., Arasteh, D. & Willmert, T. 2004. *Window Systems for High Performance Buildings*, New York, Norton & Company.
- Carmody, J., Selkowitz, S., Arasteh, D., & Heschong, L. 2007. *Residential Windows: A Guide to New Technology and Energy Performance*, New York, Norton & Company.
- Cutnell, J. D., Johnson, K. W. 2010. *Elementi di fisica*, Bologna, Zanichelli.
- Daneo, A., D'Este, A. 2009. *Considerazioni controintuitive sull'isolamento termico dei vetrocamera con gas*, Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro, 39 (1): 13-17.
- Froli, M, Lani, L. 2007. *Analisi strutturale di grandi lastre in vetro stratificato rinforzate con cavi in acciaio*, "Costruzioni metalliche", 2, pp.29-43.
- Graf, J. 2010. *A glass palace for the Limes Gate at Dalkingen*, engineered transparency, International Conference at Glasstec (Düsseldorf, 29 and 30 September 2010).
- Lani, L. 2003. *Il vetro come materiale costruttivo*, consultabile sul sito web [www.ingegneri.info](http://www.ingegneri.info) (28/11/13).
- Lanza Volpe, A. 2013. *Il vetro nelle coperture archeologiche*, Ruggieri Tricoli, M. C., Germanà, M. L., (a cura di), "Urban archaeology enhancement - Valorizzare l'archeologia urbana", Pisa, ETS.
- Lazzerini G, Lazzerini, S. 2007. *Vernici all'acqua per vetro piano*, - Vitrover, 5.
- McCluney, R., Jindra, P. 2000. *Industry Guide to Selecting the Best Residential Window Options for the Florida Climate*. Cocoa, Florida Solar Energy Center - University of Central Florida.
- Mencuccini, C., Silvestrini, V. 1999. *Fisica II. Elettromagnetismo – ottica*, Napoli, Liguori.
- Moretti, M. 2004. *Materie prime del vetro*, consultabile sul sito web: [www.glassway.org/vetro/](http://www.glassway.org/vetro/) (28/11/13).
- Newman, H. 1993. *Dizionario del vetro*, Milano, Garzanti.
- Oesterle, E., Lieb, R. D., Lutz, M., Heusler, W. 2001. *Double-Skin Facades*, Munich, Prestel Verlag.
- Paoletti, I., Magarotto, E. 2008. *Trasparenze colorate*, "NF Involucri innovativi", 01, pp.136-141.
- Paoletti, I, Romano, M. G. 2010. *Coperture trasparenti. Storia e tecnologie*, "Frames", 146, pp.108-113.
- Pfrommer, P., Lomas, K. J., Seale, C., & Kupke, C. 1995. *The radiation transfer through coated and tinted glazing*, *Solar Energy*, 54(5), 287-299.
- Schittich, C., Staib, G., Balkow, D., Schuler, M., Sobek, W. 1999. *Atlante del vetro*, Torino, Utet.
- Schober, H., Gugeler, J. 2002. *Glasdach über der römischen Badruine in Badenweiler*, "Glas" 1, pp. 29-35.
- Schuman J, Rubinstein F., Papamichael K., Beltrán L, Lee E. S. Selkowitz S., 1992. *Technology review: glazing systems*, Windows and Daylighting Group - Energy and Environment Division - Lawrence Berkeley Laboratory - University of California, Berkeley.
- Tatano, V. 2008. *Oltre la trasparenza. Riflessioni sull'impiego del vetro in architettura*, Roma, Officina.
- Wasley, J. H., Utzinger, M. 2000. *Vital Signs: Glazing Performance*, Johnson Controls Institute for Environmental Quality in Architecture, School of Architecture and Urban Planning, University of Wisconsin-Milwaukee.
- Zacchei, V. 2005-2007. *Film d'Architettura: uso di strati con funzione di coating attivi per il sistema involucro. Un modello di simulazione a supporto della scelta progettuale*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura, XX Ciclo, Università degli Studi di Ferrara, Università IUAV di Venezia, Università degli Studi di Bologna.

## CAPITOLO 5

### Qualità comunicativa e museografica

#### 5.0. Abstract

##### Communication and museological quality

*The main purpose of the museological discipline as applied to archaeological contexts is to “communicate” to the general public their history and their meanings, rendering the value of the archaeological heritage comprehensible, both in its material and immaterial aspects. The forms of communication in the archaeological context consider indoor and outdoor exhibit display techniques, with reference to the typical aspects of architecture (space, form, light, colors, materials, etc.) and to the tools of museology (media, graphics, models, templates, virtual systems, etc.).*

*For several decades now, in the conservation and presentation of archaeological ruins, glass has been important in both architecture and museology, subjected to every form of experimentation: from the partial or total covering of large or small sites to a precise and rational use in accordance with the demands of the materials employed. The communicative and museological abilities of glass covering-structures concern in particular the issues of transparency, transmission of natural light and aesthetics (appropriately examined in this chapter). But why do we need transparency in archaeological sites? The communicative reasons for the exploitation of transparency are different and primarily symbolic – evocative value, relationship needs, aesthetic - emotional needs and recognition of the intervention (as illustrated via various examples throughout Europe).*



Fig. 1 - Xanten archaeological park, Germany (foto Lanza Volpe, A.).

## 5.1. La capacità comunicativa e museografica del vetro

L'obiettivo fondamentale della disciplina museografica applicata ai contesti archeologici è quello di "comunicare" al pubblico la loro storia e il loro significato, suscitando maggiore consapevolezza del valore del patrimonio archeologico, della sua materialità e dei suoi aspetti immateriali. Le forme di comunicazione nei contesti archeologici tengono conto di tecniche di musealizzazione indoor e outdoor, attraverso gli strumenti tipici dell'architettura (spazio, forme, luci, colori, materiali, ecc.) e attraverso gli strumenti propri della museografia (supporti, grafica, modelli, sagome, sistemi virtuali, ecc.) (Ruggieri, 2007). Da qualche decennio nella conservazione e nella presentazione museale delle rovine archeologiche, il vetro è oggetto di ogni forma di sperimentazione: dalla copertura parziale o globale di siti più o meno vasti al ricorso puntuale e ragionato, in funzione delle esigenze legate alla natura del materiale esposto. Non a caso, proprio là dove la collezione rivela la sua stretta appartenenza al sito, come nei musei archeologici sulle rovine, la necessità di porre in relazione i reperti al luogo d'origine determina un uso ricorrente delle pareti vetrate (Zito, 2009). Un involucro vetrato caratterizza gli spazi per la trasparenza, la trasmissione di luce naturale e la resa estetica.

### 5.1.1. La trasparenza

Nell'analisi della capacità comunicativa del vetro, occorre innanzitutto fare riferimento alla sua proprietà caratteristica: la trasparenza. Cosa si intende per trasparenza? Bisogna distinguere fra trasparenza fisica e trasparenza percettiva. Nel campo fisico dell'ottica, tale caratteristica è riferita a quei corpi che si lasciano attraversare dalla luce e permettono così di individuare con chiarezza gli oggetti retrostanti. Un corpo solido perfettamente trasparente è impercettibile allo sguardo, si lascia attraversare dalla luce, ma non lascia passare la materia. Tale definizione chiarisce l'esistenza di una relazione tra la trasparenza e la luce, fenomeno fisico senza cui non si potrebbe avere la vista. Inoltre, attribuisce tale caratteristica a corpi che si interpongono tra l'occhio e gli oggetti, ovvero a filtri. Il materiale trasparente altera i contorni, la luminosità, i colori più o meno impercettibilmente, come farebbe un filtro. Ciò che tale definizione non contempla è che la trasparenza è anche una caratteristica percettiva della vista stessa, una sua modalità di essere (Bano, 2008).

Se ci riferiamo al fatto che la luce può passare attraverso un oggetto o un mezzo, il significato di "trasparente" è fisico, se invece ci riferiamo all'impressione del "vedere attraverso" il significato che attribuiamo alla stessa espressione è percettivo (Garau, 1999). Tale affermazione sembra avvalorata dall'analisi etimologica: il termine trasparente deriva dal latino medioevale *transparens*, composto da *trans* – attraverso - e *pareo*, verbo che può essere transitivo con il significato di vedere, ma anche intransitivo, ovvero con il significato di apparire, mostrarsi. La trasparenza dunque è una caratteristica di ciò che si vede, di come si vede o ancora di come si mostra attraverso un filtro. Il latino classico traduce l'aggettivo trasparente con *translucidus*, *perlucidus*, *perlucens*, *liquidus*, *splendidus*, aggettivi che sono spesso riferiti all'acqua e all'aria e significano limpido, nitido. La traduzione greca

dell'aggettivo trasparente nel suo significato attivo significa mostrare nel duplice senso di far vedere e rendere noto, e nella sua forma passiva significa apparire, venire alla luce, essere visibile, manifesto. Tale verbo ha un valore espressamente sensoriale, tanto che l'aggettivo che da esso deriva significa visibile ai sensi. Da tali considerazioni è interessante notare come il significato etimologico non fa riferimento al passaggio del raggio luminoso attraverso un corpo, ma esplicita la visibilità di un corpo o, più spesso, la presenza di un filtro per vedere un oggetto retrostante. La fisica tecnica, dovendo fornire un metodo di quantificazione, cerca nella definizione di trasparenza un parametro, il passaggio del raggio luminoso, controllabile scientificamente. Il risultato è sicuramente corretto da un punto di vista metodologico, ma appare carente rispetto a molti altri fattori che compongono il concetto di trasparenza. Vedere mediante un filtro, ovvero osservare attraverso un oggetto trasparente, permette di vedere gli oggetti retrostanti, i quali possono apparire più o meno nitidi, con colorazioni leggermente diverse, con maggiore o minore definizione dei dettagli.

La trasparenza fisica non è sempre accompagnata dalla trasparenza percettiva. Quando un corpo è "troppo" trasparente non è percepibile dall'occhio umano. Esistono pertanto situazioni in cui sembra che i nostri sensi si confondano, poiché non siamo in grado di percepire la presenza di un oggetto trasparente. Non mancano i casi in cui è assente la trasparenza fisica ed è invece presente la trasparenza percettiva. I nostri sensi possono anche percepire come trasparente un oggetto che in realtà non lo è; se, ad esempio, sovrapponiamo una serie di carte opache con gradi diversi di saturazione del colore, il nostro occhio percepisce una sensazione di trasparenza. Ci troviamo di fronte a quelle chiamate illusioni, le quali vengono spiegate come eccezioni alla corrispondenza tra mondo fisico – il



Fig. 2 - Botticelli, S. 1482. *Primavera*, Galleria degli Uffizi, Firenze.

mondo reale in cui viviamo – e mondo fenomenico – il mondo che percepiamo. Gli studi scientifici della psicologia percettiva trattano il tema della trasparenza come un fenomeno percettivo, affrontando la questione della impressione di trasparenza. Affinché tali impressioni si sviluppino non è sufficiente, né necessario, che un oggetto sia trasparente.

Fin dall'Ottocento i ricercatori di psicologia percettiva hanno tentato di individuare le condizioni che provocano l'impressione di trasparenza, con la consapevolezza che non sia sufficiente conoscere le caratteristiche fisiche dei corpi trasparenti per comprendere l'esito del processo percettivo. Analizzando alcune tele di pittori, soprattutto rinascimentali, è individuabile una prima risposta al quesito; essi impiegano figure, superfici e oggetti opachi per ottenere effetti di trasparenza: il velo delle *Grazie* nella *Primavera* del Botticelli (Fig. 2) viene percepito dal nostro occhio come trasparente, poiché le parti dei corpi retrostanti sono disegnate con colorazioni diverse rispetto alle parti non velate. È quindi possibile ridefinire la trasparenza come un concetto ampio, di natura non meramente fisica, ma legato a un forte valore psicologico, tanto che appare necessario spostare la questione al campo percettivo. La trasparenza è un concetto di natura psico - percettiva, un'impressione che il nostro cervello elabora in base agli stimoli che gli vengono forniti e alle condizioni psico - fisiche dell'osservatore. I fattori che la determinano sono molteplici e i risultati spesso inaspettati (Bano, 2008).

Il vetro, come filtro, influisce sulla radiazione entrante attraverso la rifrazione, un effetto che avviene tra materiali trasparenti di diversa densità, quali l'aria e vetro. La curvatura evidente con la rifrazione è una rappresentazione fisica del tempo più lungo che impiega la luce per passare attraverso il più denso dei due materiali ed è dipendente dall'angolo con cui la luce colpisce la lastra. Dove le due superfici del vetro sono parallele, la divergenza causata dall'iniziale rifrazione al primo confine tra aria e vetro è contrastata da una rifrazione uguale e contraria al confine opposto. Lievi variazioni possono essere rilevate in lastre di vetro molto vecchie o su vetri con coating in determinate condizioni di luce.

Altre caratteristiche fondamentali delle superfici trasparenti sono la lucidità e la riflessione. I materiali sono tanto più trasparenti quanto più la loro superficie è lucida. Quanto più una superficie è lucida, tanto più è riflettente. Quando l'osservatore e la sorgente luminosa si trovano in certe posizioni, la trasparenza diventa riflessione. Se una superficie è riflettente, non lascia passare lo sguardo, quindi diventa opaca. Dunque una superficie trasparente può, in certe condizioni, diventare opaca. Ciò è funzione sia dello spessore del vetro che dell'angolo di incidenza della radiazione luminosa. Quando la radiazione è perpendicolare a un vetro non rivestito esso riflette molto poco. Questa riflessione cresce man mano che l'angolo di incidenza aumenta, dapprima lentamente e poi notevolmente, fino ad un angolo di incidenza di circa  $87^\circ$  in cui tutta la luce incidente viene riflessa. Questo angolo è identificato come l'angolo di *cut off*. Anche con un angolo di incidenza di  $0^\circ$  vi è una certa percentuale di radiazione riflessa su ogni superficie. Per il vetro normale questa riflessione è pari a circa il 4% per ciascuna faccia. Dal momento che ogni lastra di vetro ha due superfici riflettenti, una anteriore e una posteriore, verrà riflesso un minimo dell'8% della luce. La trasparenza del vetro può essere aumentata mediante la raffinazione relativamente costosa

delle materie prime per eliminare le impurità o più recentemente con la stratificazione di coating selettivi anti-riflesso. Il vetro extra – chiaro è un esempio di un vetro altamente raffinato antiriflesso che trasmette il 99% della luce. A causa del suo costo è utilizzato in situazioni in cui è essenziale una trasparenza quasi perfetta, come nel caso della costruzione di collettori solari (Wasley & Utzinger, 2000).

Poiché trasparente è ciò che determina un tipo di visione che appare modificata dalla presenza di un filtro, è opportuno parlare di visione trasparente in vari gradi, ovvero secondo diverse modalità di disturbo. La trasparenza del vetro può avere variazioni quantitative, qualitative o discrete. Si può parlare di variazioni quantitative perché il vetro può variare nella sua capacità di lasciar passare la luce, dalla trasparenza, alla semitrasparenza, all'opacità. Una particolare trasparenza è la proprietà dei corpi traslucidi: lasciano passare le forme e i colori ma sfumano i contorni, come il vetro smerigliato. Le variazioni qualitative riguardano la colorazione: i vetri possono essere colorati e in questo caso lasciano passare tutti i colori tranne quello che assorbono. In tal modo tutto ciò che si trova al di là di essi appare colorato del colore della superficie trasparente. Riguardo alle variazioni discrete, se la trasparenza è separazione spaziale e unione visiva di osservatore e osservato, vi sono vari modi di ottenerla, anche senza dover usare una superficie uniforme, come nel caso delle reti di punti o linee serigrafate sul vetro. A Xanten, in Germania, nella struttura che copre i resti delle antiche terme romane il vetro serigrafato è usato per proteggere dalla radiazione solare diretta e allo stesso tempo permette l'unione visiva tra interno ed esterno. Il museo che affianca tale struttura protettiva ripropone anch'esso la serigrafia, ma con l'intento di giocare consapevolmente con il confine della percezione e dare ai vetri un aspetto meno imponente (Fig. 3).

Un altro tema legato alla trasparenza è quello dell'illustrazione, ove l'elemento filtro può diventare mezzo di rappresentazione e di informazione. Tale tipo di trasparenza, modulata



Fig. 3 - Xanten archaeological park, Germany (foto Lanza Volpe, A.).



Fig. 4 - Parc Archéologique de Gisacum, Francia (a); Archäologischer Park Carnuntum, Germania (b) (foto Ruggieri, M. C.).

dalla rappresentazione sulla superficie dell'elemento di separazione, può essere ottenuta in vario modo: serigrafia, pellicole applicate, sovrapposizione di strati con disegni o colori. In tal modo, evocare antiche connessioni o immagini del passato, affidandosi alle opportunità di una superficie trasparente, può rivelarsi uno strumento museografico e comunicativo efficace. Anche in un ambiente quasi del tutto chiuso verso l'esterno, una parete vetrata può tornare utile al progetto comunicativo, magari rappresentando il paesaggio attorno al sito archeologico così com'era nel passato. Il pannello di vetro può permettere di sovrapporre alla rovine le loro ricostruzioni e il paesaggio antico può riaffiorare nel ridisegno degli antichi manufatti. Imprimere un'immagine sulla superficie vetrata, creando la sovrapposizione visiva alla reale prospettiva del sito, diventa in tal modo un'opportunità per la ricostruzione virtuale degli antichi manufatti (Fig. 4, a-b). La serigrafia può anche essere usata come strumento per indicare date e informazioni inerenti il sito, sostituendosi ai classici pannelli. Ad Aachen, in Germania, presso lo scavo archeologico di *Elisengarten*, i resti risalenti a varie epoche sono stati protetti con una vetrina archeologica che, grazie a una sequenza di lastre di vetro serigrafato, permette di illustrare la successione di varie fasi (Fig. 5).

Occorre considerare l'impressione di trasparenza sia dall'interno del manufatto che dall'esterno. Il rapporto tra trasparenza e architettura nasce in origine come rapporto di antitesi,



Fig. 5 - Vetrina archeologica Elisengarten, 2013, Aachen, Germania (foto Lanza Volpe, A.).

fortemente congiunto al concetto di soglia. L'apertura di finestre e porte nell'involucro, necessarie al passaggio di aria e luce all'interno di un luogo circoscritto, determina una prima mediazione: tali elementi consentono di vedere dall'esterno ciò che sta all'interno, pertanto permettono a un oggetto di essere conosciuto, sottolineando il fatto che qualcosa si può guardare ma non avvicinare senza varcare una soglia, un limite. «La porta è il segno della trasparenza possibile, subito negata dalla sua chiusura»: così Paolo Portoghesi introduce il tema della trasparenza in architettura. La trasparenza, con la sua leggerezza quasi immateriale, definisce una soglia, separa un luogo da un altro. Un pannello o una semplice transenna definiscono la diversità di un luogo rispetto ad un altro, spesso delimitano campi d'azione con funzioni diverse: i luoghi sacri e riservati sono spesso visibili ma non accessibili, come l'iconostasi delle chiese bizantine e il coro in quelle conventuali, ove tra il fedele e colui che celebra l'atto sacrale si pone un filtro, in primo luogo scenografico (Bano, 2008).

Tali considerazioni portano a definire il concetto di trasparenza come un fenomeno legato alla visione in un contesto ampio, considerato come modalità di graduato disturbo della visione, pertanto legata al mondo apparente. L'elemento trasparente è un filtro che determina gradi diversi di disturbo della visione apparente di un oggetto: in taluni casi la visione con il filtro appare come se esso non fosse presente, in altri la visione è parziale o modificata, per colorazione, geometria, definizione dei contorni. Esso appare in primo luogo come l'elemento che separa l'ambiente esterno da quello interno, ma può essere adottato anche in ambienti esterni, per separare un luogo da un altro, per definire una funzione rispetto a un'altra, per mascherare qualcosa che si vuole solo intuire ma non vedere in maniera nitida. In tali termini la trasparenza appare effettivamente legata al concetto più largo di soglia, ovvero di un elemento che separa, che definisce un qualcosa rispetto a un altro e conferisce identità diverse. La soglia definisce il luogo ove si svolge l'evento artistico, creando un distacco fisico e psicologico dell'osservatore, il quale viene portato a un inconscio senso di rispetto e deferenza. L'apertura, ovvero la trasparenza, può ampliarsi, assottigliarsi, può diventare una sequenza di strati, così come può modellarsi in forme sinuose o illusionistiche grazie alle tecniche scenografiche della prospettiva. La trasparenza nel costruito è pertanto fortemente legata al concetto di *frons scenae*, ovvero della rappresentazione di ciò che sta oltre lo schermo. Da un valore di semplice natura funzionale, essa passa a un valore più alto, simbolico, di esaltazione di ciò che sta oltre, come una cornice definisce e porta l'attenzione su ciò che racchiude. Così, il contenuto di un involucro viene mostrato ed esaltato per divenire parte dell'ambiente urbano. La smaterializzazione permette di mostrare la vita all'interno, sia a livello di funzioni spaziali, ma anche di struttura portante, impiantistica e soluzioni tecnologiche (Bano, 2008).

La trasparenza totale, letta come valore da perseguire in quanto permette la visione dello spazio interno e la vita che vi si svolge, diventa un fattore condizionante per le soluzioni tecnologiche. Da qui la ricerca di soluzioni con struttura arretrata per far scomparire alla vista il sistema di supporto dei vetri e all'impiego di lastre in doppio e triplo strato, con camere d'aria, con doppia pelle e/o ventilate, al fine di salvaguardare il risparmio energetico

garantendo un livello di comfort accettabile, in termini di isolamento termico, luminoso e acustico (Bano, 2008).

In altri casi, la trasparenza assume significati che non sono quelli di rendere semplicemente visibile ciò che sta oltre lo schermo, ma cambia la percezione dell'oggetto in secondo piano enfatizzando il filtro. Il rischio di tali involucri trasparenti è però quello di diventare essi stessi l'oggetto esaltato, come la scatola giapponese ricordata da Roland Barthes. Da, "L'impero dei segni", 1984: «[...] Così, la scatola tiene il ruolo di segno: come involucro, schermo, maschera, essa vale per ciò che nasconde, protegge e pertanto designa, essa dà il cambio, se si vuol intendere quest'espressione nel suo doppio senso, monetario e psicologico: ma ciò che essa racchiude e significa è lungamente rimandato a dopo, quasi la funzione del pacchetto non fosse tanto quella di proteggere nello spazio quanto rimandare nel tempo. È infatti nell'involucro che sembra concentrarsi il lavoro della confezione (del fare), ma attraverso tutto questo processo l'oggetto stesso perde la propria esistenza, diventa miraggio [...]» (Bano, 2008).

Ciò può accadere in particolar modo nel caso delle rovine archeologiche da proteggere *in situ* dove l'involucro di vetro, come afferma lo studioso Accardi, gioca un ruolo determinante nella definizione dell'atmosfera delle rovine (Accardi, 2008). Accade, tuttavia, che la costruzione di contenitori puri porti a una negazione dello spazio interno, ridotto a una semplice scatola trasparente. Ad Hamar (Fig. 6), in Norvegia, per coprire le rovine dell'antica Cattedrale è stata realizzata una copertura in acciaio e vetro il cui disegno è assimilabile a un tetto a due falde. Si tratta di una struttura che non cerca di porsi in relazione con la volumetria dell'antica chiesa, ma piuttosto dichiara la sua estraneità accentuando, con la marcata presenza della trama strutturale che sorregge i pannelli di vetro, la sua intrusione di tipo storico/estetico rispetto al contesto, rivendicando, come unica ragione della sua presenza, la funzione di protezione che gli è stata assegnata. Il risultato è una volumetria

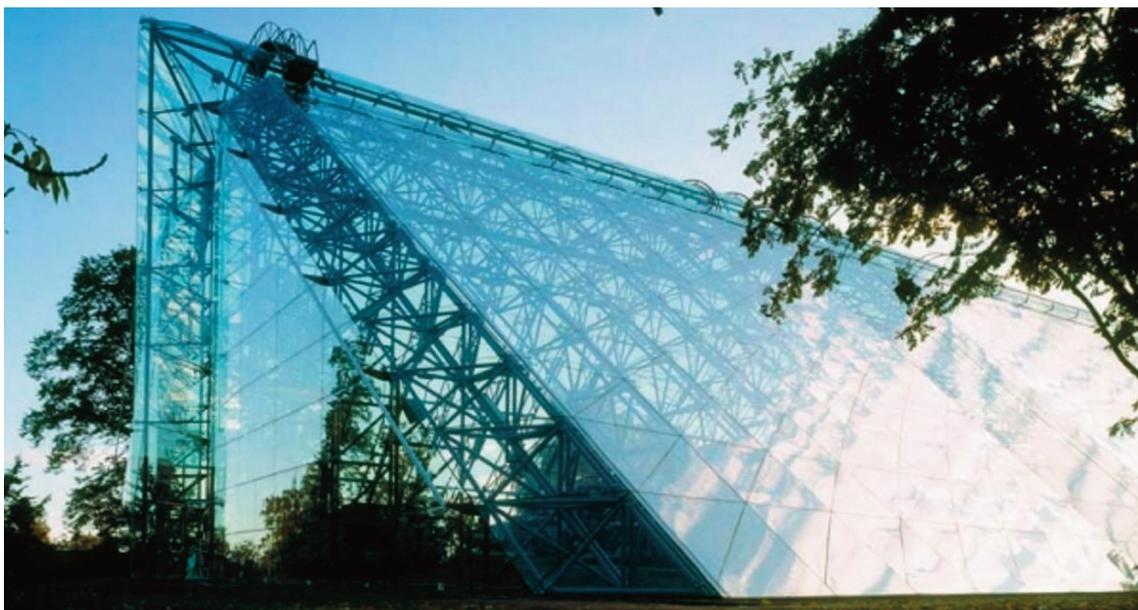


Fig. 6 - Copertura in vetro dei resti dell'antica Cattedrale di Hamar, Norvegia.

di una certa imponenza, una pelle di vetro e acciaio che non sempre consente di percepire la sagoma delle rovine e che diventa protagonista (Costanzo, 2008). «Un oggetto trasparente esiste senza esistere per la luce: deve contenere, separare, proteggere, isolare, sorreggere senza imporre visivamente la sua materialità oppure proponendola in modo delicato con opalescenze, riflessi, luminosità colorate. Tradizionalmente “fare trasparente” ha significato soprattutto portare la luce diurna negli interni (così com’è o modificandola nel colore), produrre contenitori che lascino vedere il contenuto (bottiglie, attrezzature da laboratorio), creare valenze estetiche intorno a questa particolare materialità lucente e invisibile» (Bano, 2008).

In taluni casi la trasparenza si esplicita in maniera *soft* e il passaggio della luce può essere diverso, non diretto, ma diffuso o filtrato, solo in parte permesso o addirittura modificato. La trasparenza può essere anche densa e la profondità, la geometria e il colore permettono in tal modo di leggere la materia del filtro e di concentrare l’attenzione dell’osservatore non più su ciò che sta oltre ma sull’elemento separatore (Bano, 2008). A Valencia a Plaça de la Almoina (Fig. 7) la zona delle antiche terme romane è coperta da elementi in vetro su cui scorre una lamina d’acqua. In tal modo, la trasparenza cambia densità in rapporto al punto di osservazione e all’angolo di incidenza della luce sull’acqua che si sovrappone alla superficie in vetro, ora trasparente, ora opaca, ora mutevole nel colore. La traslucenza del filtro può modificare fortemente la percezione dell’oggetto che sta oltre: la visione non è nitida, il raggio luminoso deviato e permette, più che una visione, una immaginazione dell’oggetto in secondo piano. Si tratta di una “trasparenza opaca”, distante da quella che vuole stabilire una continuità tra interno ed esterno, piuttosto desiderosa di stabilire una consapevolezza di distinzione spaziale.

A Saragozza (Fig. 8), per coprire i resti dell’antico teatro è stato utilizzato il policarbonato, materiale dalla natura traslucida. La copertura semicircolare protegge il sito dagli agenti at-



Fig. 7 - Lamina d’acqua sulla copertura in vetro a plaça de la Almoina, Spagna (foto Tricoli A.).

mosferici e segna l'altezza originaria del *velarium* mobile in lino situato a circa 25 m di altezza che veniva usato durante gli spettacoli per proteggere dal sole. L'effetto finale è quello di una luce che, diffusa, si fa morbida, lontana da quel concetto di trasparenza interpretata in termini assoluti, priva di materia e idealizzata.

La trasparenza si può quindi esplicitare a livello sensibile attraverso densità materiche diverse. Questo modo di concepire la trasparenza, ovvero per profondità, è caratteristico della tradizione culturale orientale più che di quella occidentale. Se infatti per l'Occidente la trasparenza è un passaggio di luce e implica esclusivamente un unico senso, ovvero quello della vista, per il mondo orientale essa è un modo di coniugare la luce e le ombre che cadono su un oggetto, determinandone la profondità, la matericità, coinvolgendo in tal modo tutti i sensi. Nel testo "Oltre la trasparenza" (Tatano, 2008), Valeria Tatano fa cenno al confronto fra la cultura orientale "dell'ombra" e quella occidentale "della luce" con una citazione del giapponese Tanizaki, tratta dal "Libro d'ombra" (Tanizaki, 2002) pubblicato nel 1933. Tanizaki si sofferma sul fascino dell'ombra, esaltato dalla cultura tradizionale del Sol Levante e messo in pericolo dal diffondersi dei modi della civiltà occidentale tendente alla luminosità. Oggi anche in Occidente, oltre la trasparenza, si ricercano nuove prestazioni nel vetro, nel tentativo di lavorare con la modulazione della luce e di ottenere gradi di luminosità differenti: colorare, comporre, disegnare, dividere, plasmare, sono "parole chiave" che permettono di descrivere caratteristiche che il vetro può avere e variazioni che può determinare (Lanza Volpe, 2012).

Ma cosa succede di notte? La dissoluzione della fisicità di alcuni involucri determina la trasformazione degli stessi in elementi luminosi che appaiono di notte come lanterne. Se di giorno il filtro trasparente fa entrare la luce naturale, di notte permette a quella artificiale di



Fig. 8 - Copertura in policarbonato del teatro romano di Zaragoza, Spagna.

portarsi all'esterno: un luogo chiuso illumina uno spazio aperto. È il caso della copertura dei resti dell'antica Domus del Chirurgo a Rimini (Fig. 9) visibili di notte attraverso le superfici vetrate grazie all'illuminazione degli interni; anche in altri siti protetti da coperture trasparenti come Hamar, Dalkingen e Badenweiler, di notte le luci illuminano il gioco tra architettura antica e moderna. La pelle esterna, trasparente o semitrasparente nelle ore diurne, diventa totalmente trasparente durante quelle notturne e permette di portare luce all'esterno, oltre che di rendere visibile ciò che racchiude.

### 5.1.2. La trasmissione di luce naturale

Il vetro, poiché trasparente, permette il passaggio della luce, strumento tipico dell'architettura. La luce serve innanzitutto per mostrare, ma anche per svelare significati nascosti, per comunicare funzioni o datazioni, per drammatizzare strutture e perfino per riconfigurarle in modo non invasivo. In un museo, la luce può essere cromaticamente uniforme o di vario colore, concentrata o diffusa, fissa o mobile, continua o discontinua, diretta o indiretta. Le scelte al riguardo fanno parte di un progetto volto non soltanto alla valorizzazione estetica ma, come avviene per qualsiasi altra scelta museografica, di un progetto volto a reintegrare, per quanto possibile, i significati, in tutto o in parte perduti, delle tracce che il passato consegna alla nostra attenzione e alla nostra cura. Non si tratta soltanto di illuminare, in modo più o meno artistico, ma anche di comunicare: è necessaria anche una particolare sensibilità museografica, che agisca di concerto con tutte le valutazioni di opportunità e di logistica cui si è fatto cenno, e che non prescinda mai dalla collaborazione con gli archeologi esperti del sito (Ruggieri, 2012). Nel caso del vetro, il sito risulterà esposto a un'illuminazione naturale e proprio per tale motivo, variabile. L'illuminazione naturale ha sempre svolto un'azione fon-



Fig. 9 - Domus del Chirurgo a Rimini, Italia.

damentale in architettura fin dall'antichità, poiché definisce le strutture, stabilisce il gioco fra i volumi, fa percepire la profondità degli spazi e modifica, nel suo ciclo diurno, la percezione dei luoghi. La direzione e la distribuzione della luce naturale subiscono variazioni in maniera continua e istantanea, con il trascorrere del tempo e con il mutare delle condizioni climatiche. La luce naturale, in quanto materiale - immateriale, è cangiante, impalpabile, in perenne metamorfosi, emblema per eccellenza del "fugace", non controllabile o riconoscibile se non attraverso il gioco dei volumi o l'alternanza dei vuoti e dei pieni. L'influenza reciproca di luce e architettura si può leggere anche dal punto di vista emotivo, come appropriazione della natura, come manifestazione del cielo e così via (Di Salvo, 2012).

Un'illuminazione naturale porta con sé vantaggi ma anche connesse problematiche. I vantaggi sono i benefici psicologici ed emotivi e il cambiamento della luce nelle ore della giornata. Le problematiche che costituiscono alcune delle principali difficoltà di un museo eccessivamente trasparente sono legate sia ai conflitti con le esigenze di un allestimento interno che alla fruizione visiva. I conflitti con le esigenze dell'allestimento interno sono dovuti all'eccessiva illuminazione che rischia di appiattare i reperti e di creare un eccessivo contrasto. Si tratta di effetti che si producono sia con la componente diretta del sole che con quella diffusa, nel caso di un cielo particolarmente chiaro. Una copertura completamente trasparente non permette di avere un supporto fisico alle necessarie funzioni museali e non riesce inoltre ad evocare spazi interni coerentemente con le rovine esposte. Riguardo la fruizione visiva, le problematiche principali sono gli effetti di abbagliamento, le ombre portate dalle ostruzioni e dalle strutture portanti della copertura e il controllo solare. La radiazione solare può produrre una temperatura dell'aria interna inaccettabile per i reperti e per i visitatori; abbagliamento e discomfort visivo o livello di illuminazione non desiderato.



Fig. 10 - Controsoffitto semitrasparente LVR-LandesMuseum Bonn, Germania (foto Lanza Volpe, A.)

Sono oggi presenti sul mercato molte varietà di prodotti trasparenti e semitrasparenti, finalizzati a una riduzione della trasmissione termica e/o luminosa; la tendenza va verso componenti in grado di selezionare il *range* di lunghezza d'onda della radiazione di cui si vuole impedire l'ingresso, in modo sia fisso che variabile, in funzione delle condizioni microclimatiche. La scelta del tipo di prodotto dipende dalle esigenze, nonché dalle condizioni microclimatiche del sito. L'impiego di trattamenti o di *coating* sulle superfici vetrate avviene principalmente per il controllo del comfort termico ma coinvolge direttamente anche l'aspetto del comfort luminoso.

Un aspetto estremamente importante nella scelta di soluzioni per l'involucro vetrato deve quindi tener conto della distribuzione della luce negli spazi. Per controllo del flusso luminoso si intende l'esclusione temporanea o permanente, parziale o completa, della radiazione solare dalle superfici e dagli spazi interni all'edificio. In generale, esistono due tipologie di controllo luminoso: il controllo passivo, cioè la riduzione del livello di illuminamento e il mantenimento di uniformità di luminanza attraverso l'intervento sull'involucro edilizio, e il controllo attivo, cioè l'impiego di corpi illuminanti artificiali che utilizzano energia elettrica. Obiettivi del controllo del flusso luminoso sono: ammettere l'illuminazione naturale diffusa escludendo la radiazione solare diretta; escludere interamente la radiazione solare quando non sia necessaria l'illuminazione. Il controllo può agire secondo diverse strategie. I principali sistemi di controllo passivo del *daylight* possono essere distinti in riflessione semplice, riflessione complessa, diffusione, diffrazione, rifrazione e conduzione (Zacchei, 2005-2007).

- Riflessione semplice: si tratta di dispositivi che riflettono la radiazione solare diretta. Tali sistemi sono pensati per la protezione termica, ma controllano anche i fenomeni di abbagliamento. Sono un esempio i vetri con *coating* riflettenti le lunghezze d'onda in tutto lo spettro solare che riducono pertanto notevolmente la trasmissione luminosa e l'abbagliamento. Tali tipi di vetri determinano una riduzione della radiazione luminosa, ma all'esterno presentano l'effetto specchio. I vetri serigrafati invece riproducono motivi tramite serigrafia. Un composto ceramico polverizzato, "fritta", viene applicato su un lato del vetro riproducendo il motivo da stampare. La cottura in forno, in genere associata alla tempra o all'indurimento termico del vetro, facendo vetrificare il composto, determina un rivestimento permanente, uno "smalto" che assorbe e riflette l'energia solare. In genere i motivi riprodotti sono costituiti da intervalli regolari di linee o punti non percepiti nella visione a distanza, disponibili con diverse percentuali di copertura. Tale tipo di vetro può essere utilizzato sia per coperture sia per pareti, con percentuali di serigrafia variabili a seconda dell'altezza alla quale è posta la lastra, nella parte alta o bassa della vetrata, in modo da mantenere completamente nitida la visione. I film fotovoltaici, non trasparenti, agiscono invece come serigrafie parzialmente schermanti.

- Riflessione complessa: dispositivi in grado di schermare selettivamente la radiazione luminosa. Appartengono a questa categoria i vetri colorati che mantengono la loro trasparenza dall'interno, anche se la luminosità della vista esterna è ridotta e la percezione del

colore modificata. I colori più comuni sono il grigio neutro, il bronzo e il blu - verde, che non alterano molto il colore percepito e tendono a fondersi bene con gli altri colori ambientali. Una grande evoluzione è rappresentata dall'applicazione di *coating* basso - emissivi. Essi tendono a mantenere il calore sullo stesso lato da cui ha origine, al contempo però garantiscono un'ottima trasmissione di luce visibile. Esistono inoltre sistemi autoregolanti a controllo dinamico dell'energia solare che modificano le proprietà ottiche e cromatiche in relazione all'intensità della radiazione solare: materiali autoregolanti (fotocromici, termocromici) e attivati elettricamente (elettrocromici, a cristalli liquidi, *Transparent Insulating Materials*, ecc.) e i rivestimenti a comportamento angolare selettivo che hanno la proprietà di modificare il valore di trasmissione a seconda dell'angolo di incidenza della radiazione diretta.

- Diffusione: sistemi che filtrano e diffondono nell'ambiente interno la radiazione incidente diretta, come le pellicole opacizzanti. Tali sistemi, essendo opachi, trasmettono la luce ma non permettono la visione dell'esterno.

- Diffrazione: dispositivi che filtrano lo spettro di immissione solare. Le tipologie principali sono costituite dai film antiriflesso che hanno la proprietà di ridurre fortemente la riflessione della luce sulla superficie del vetro e dai film olografici. I sistemi olografici si inseriscono tra quelle soluzioni che sfruttano meglio la luce diurna sia nelle condizioni di cielo coperto, sia durante i periodi di illuminazione solare diretta, consentendo di ottenere un miglioramento della distribuzione dell'illuminazione diurna mediante la deviazione controllata della radiazione solare. Si tratta di pellicole trasparenti sulle quali sono stati stampati sottili disegni geometrici che diffrangono la luce e la indirizzano in una direzione precisa e quindi non trasmettono la luce diretta. Un'unica pellicola può contenere "istruzioni" per quattro angoli d'incidenza diversi e deve essere protetta tra due lastre di vetro.

- Rifrazione: dispositivi che permettono la rifrazione delle radiazioni modificando la distribuzione della luce; trasformano la luce diretta del sole in luminosità diffusa. Sono un esempio le pellicole prismatiche che deviano i raggi solari a seconda dell'angolo di incidenza con cui vengono colpite e consentono quindi, attraverso questo espediente, di dirigere la luce dove serve. La tecnica di incisione consente la produzione di pellicole con minuscoli prismi distanziati di un solo millimetro. Tali pellicole sono molto sottili e leggere e, per protezione dai graffi o dalla polvere, devono essere racchiuse tra due lastre di un normale vetrocamera.

- Conduzione: la radiazione solare viene deflessa negli elementi prismatici mediante riflessione interna totale e rifrazione. Il pannello controlla i fenomeni di abbagliamento, elimina le differenze di luminanza e produce limitata distorsione visiva (Zacchei, 2005-2007). Un esempio è costituito dai *laser-cut panel* che contengono specchi molti piccoli utilizzati per reindirizzare la luce verso il soffitto piuttosto che verso il pavimento: una luce indirizzata verso il pavimento è infatti sprecata sotto forma di calore e dà poca illuminazione e luce riflessa; una luce indirizzata verso il soffitto viene invece riflessa verso il basso fornendo un'illuminazione diffusa utile.

### 5.1.3. La resa estetica

Legate alle classi esigenziali di cui alla norma *UNI 8289:1981* troviamo le prestazioni di "aspetto", "Insieme delle condizioni relative alla fruizione percettiva del sistema". È inoltre possibile individuare alcune prestazioni che a prima vista non sembrano valutabili secondo l'approccio esigenziale - prestazionale di tipo tradizionale, in particolare le caratteristiche dinamiche e adattive conferite da alcuni *coating*. L'adattività, ovvero la capacità di adattarsi autonomamente alle mutate condizioni ambientali, cambiando il proprio stato da trasparente a opaco, oppure cambiando colore o coefficiente di riflessione della luce, è infatti un aspetto non considerato dalla normativa vigente, così come non lo è la capacità di veicolare informazioni: sono, queste, prestazioni che non rientrano nella prassi e nella tradizione costruttiva ma che, di fatto, possono essere impiegate, fino a diventarne uno degli aspetti più importanti e caratterizzanti l'aspetto (Zacchei, 2005-2007).

La normativa affronta i requisiti d'aspetto soprattutto per quanto riguarda la regolarità delle finiture o il controllo della regolarità geometrica, lasciando necessariamente fuori le valenze estetiche, poiché non è possibile descriverle o tantomeno suggerirle per via normativa, ma non per questo esse sono meno importanti nella scelta dell'involucro. Tali scelte sono strettamente correlate al materiale, ai formati utilizzati, ai metodi di fissaggio, alla continuità della superficie. Inoltre l'involucro vetrato, tramite la forma e l'immagine che il materiale utilizzato contribuisce a creare, si distingue dall'intorno e si relaziona con esso. I materiali scelti per l'involucro presentano quindi una notevole importanza, oltre che in ambito funzionale, anche e soprattutto in ambito estetico.

L'immagine e la rappresentatività si pongono, insieme ai requisiti di natura funzionale come primo criterio di scelta in sede progettuale, determinano il tipo, la forma degli elementi e il materiale, con le relative proprietà di trattamento estetico superficiale. La scelta del materiale e del tipo di posa in opera più adatto è in ogni caso legato anche a bisogni di natura funzionale ed è quindi soggetto a cambiamenti secondo i casi. Ogni scelta è motivata da parametri che non sono slegati tra loro ma si intrecciano, risolvendo ognuno problemi differenti. Esistono delle priorità, dipendenti dalle destinazioni d'uso, dalle caratteristiche dell'edificio e del sito, che si possono sintetizzare in prestazioni funzionali, che dipendono dalle caratteristiche funzionali del rivestimento, come la protezione da agenti esterni di natura atmosferica, chimica o meccanica e prestazioni di natura estetica, che dipendono dal materiale e dai relativi trattamenti di rifinitura superficiale aventi un carattere non solo estetico, ponendosi anche come strato protettivo per il materiale stesso (Zacchei, 2005-2007).

Secondo la sua composizione e la sua storia termica, il vetro può essere trasparente, traslucido o opaco, incolore o colorato. La serigrafia, i *coating*, la sabbiatura, ecc. possono conferire differenti proprietà; così, un vetro riflettente appare, visto dall'esterno, come una superficie specchiante, il cui impatto ambientale su superfici grandi può apparire non idoneo; il vetro colorato modifica la percezione dei colori; i film anti-riflesso permettono di ottenere una maggiore trasparenza; i film dicroici, a selettività angolare, cangianti, luminescenti, ecc. permettono di avere differenti effetti visivi. La resa estetica riguarda non

solo il materiale vetro, ma anche la struttura che lo sostiene. Essa in genere deve essere poco invasiva, evitando il più possibile le ombre portate.

## 5.2. Le motivazioni comunicative della trasparenza

Perché impiegare la trasparenza nei siti archeologici? Le motivazioni comunicative che portano all'impiego della trasparenza sui siti archeologici sono diverse e vanno ricondotte essenzialmente ad esigenze simboliche ed evocative, di relazione, estetico - emozionali e di riconoscibilità dell'intervento (Lanza Volpe, 2013).

### 5.2.1. Esigenze simboliche ed evocative

In alcuni interventi il vetro viene usato al fine di integrare i resti nella vita urbana, con valori simbolici ed evocativi. Due sono gli esempi emblematici in tal senso: la copertura dei resti di piazza de la Almoina a Valençia (Spagna) e la copertura della Cella Septichora a Pécs (Ungheria).

Piazza de la Almoina (Fig. 11), situata nel centro storico di Valençia, è una delle più antiche della città. La demolizione degli edifici che occupavano questo spazio ha permesso l'apertura di una grande piazza al di sotto della quale sono stati trovati resti che vanno dal II secolo a.C. (periodo romano) fino al XIV secolo (medioevo). I resti del periodo romano ritrovati con gli scavi sono parecchi, tra essi anche le terme (fine del II secolo d.C.), di forma rettangolare, costituite da una camera calda (caldarium), una stanza riscaldata (tepidarium) e una sala d'acqua fredda (frigidarium). I resti del periodo visigoto sono in quantità minore di quelli dell'epoca romana: l'abside della Cattedrale e alcune tombe associate ad essa. La città fu conquistata dai musulmani nel secolo VIII. I resti di epoca romana e visigota fu-



Fig. 11 - Plaça de la Almoina, Valençia, Spagna.

rono quindi dimenticati e sepolti sotto edifici musulmani. Su questo stesso spazio furono costruiti i locali del castello, sede del governo. Nei primi anni del secolo XIV fu costruito l'edificio dell'Almoina, in seguito alla cui demolizione sono stati scoperti i resti archeologici (Herrera & Rueda, 2007-2008). Alla fine del 2007, dopo 20 anni di scavi, consolidamenti e studi, è stato aperto al pubblico il centro archeologico de l'Almoina, un museo archeologico realizzato nel luogo in cui sono state ritrovate le rovine.

La decisione di conservare e presentare al pubblico i reperti archeologici de l'Almoina ha determinato una soluzione che ha permesso sia la conservazione dei resti che lo sviluppo urbano. È nato così il progetto di creare una cripta archeologica sotto una piazza di nuova costruzione, con annesso un museo. La realizzazione di una struttura vetrata sulle antiche terme romane permette un contatto visivo con i ruderi che, per mezzo della grande piazza, risultano integrati nella vita urbana. Il vetro permette l'illuminazione e la vista dell'esterno anche da alcuni punti all'interno del sito archeologico, instaurando una connessione tra passato e presente. La superficie vetrata è inoltre ricoperta da una sottile lamina di acqua di circa 3-4 cm per evitare che la gente vi cammini (Tricoli, 2011). La presenza dell'acqua richiama l'idea delle terme romane sottostanti, assumendo anche un valore simbolico ed evocativo.

Un altro sito in cui è leggibile l'intento simbolico del progetto di copertura in vetro è quello del Cimitero Paleocristiano di Pécs (Fig. 12), situato nel centro della città ungherese, l'antica Sopianae romana, contenente i resti di una chiesa paleocristiana e diverse cappelle costruite come camere funerarie sotterranee con cappelle memoriali in superficie. Si tratta del primo cimitero cristiano risalente al IV secolo d.C. Il sito si estende sotto tutta l'area della piazza antistante la Cattedrale di Santo Stefano. Le rovine, inizialmente a livello del suolo in



Fig. 12 - Copertura in vetro del cimitero paleocristiano di Pécs, Ungheria (Molnár & Bachman, 2010).

epoca tardo romana, si trovano oggi nel sottosuolo del centro storico. Gli scavi, iniziati nel 1870, hanno portato alla scoperta di 16 cappelle funerarie. Tra queste, sul lato destro della piazza, la Cella Septichora, una tomba a sette absidi, come indica il suo nome, a una profondità di circa 4-6 m dal livello del suolo, scoperta nel 1913. Il problema della conservazione è stato risolto isolando le tombe dal terreno circostante e creando un ambiente con aria condizionata costante. Così è nato il “*Visitor Centre Cella Septichora*” il cui ingresso si apre dalla passeggiata di fronte alla Cattedrale.

Gli architetti hanno cercato di mantenere l’esperienza visiva che hanno avuto i primi archeologi che ritrovarono il vecchio cimitero cristiano nel 1600. Dove è stato possibile, i progettisti hanno lasciato che la luce entri nella necropoli sotterranea attraverso una superficie di vetro, realizzata al livello di calpestio odierno per far capire al visitatore che non sta camminando all’interno di catacombe, ma tra cappelle che un tempo si trovavano sopra terra. In questo caso, l’uso del vetro è stato dettato da motivi didattici: far comprendere ai visitatori che non si tratta di catacombe sotterranee, ma del primo cimitero paleocristiano all’aperto. La costruzione di 300 m<sup>2</sup> di copertura calpestabile in vetro sulla camera sepolcrale permette alla *Cella Septichora* di essere vista anche dal livello della strada. La copertura è realizzata con lastre in vetro sostenute da travi, anch’esse in vetro, con un ponte a forma di croce che funge da tappeto rappresentativo per l’ingresso alla Curia. Di notte, quando è evidenziata dalla luce, la croce giace sulla superficie del vetro evocando il simbolo della fede cristiana. Gli architetti, dopo la realizzazione dell’intervento, hanno studiato le reazioni della gente e hanno osservato che non soltanto i bambini che camminano e giocano sul soffitto in vetro risultano interessati, ma che anche gli altri passanti apprezzano questo intervento: una simbiosi tra la cultura antica e quella moderna (Molnár & Bachman, 2010).



Fig. 13 - Vista interna delle antiche terme romane di Badenweiler, Germania (foto Lanza Volpe, A.).

### 5.2.2. Esigenze di relazione

La trasparenza del vetro permette di instaurare un legame tra le architettura antiche e il paesaggio circostante. L'impressione di trasparenza è leggibile sia dall'interno che dall'esterno. L'involucro, diventando una grande vetrina, trasmette all'esterno informazioni inerenti le attività che vengono svolte nell'edificio, ma allo stesso tempo consente lo scambio di informazioni su ciò che succede fuori, mettendo in questo modo in relazione gli spazi interni con l'esterno. Una copertura trasparente può creare una continuità percettiva tra l'interno e l'esterno. All'interno, pur essendoci un limite fisico, lo sguardo può spaziare al di fuori, filtrato dall'involucro. All'esterno, a seconda dell'inclinazione dei raggi solari, si possono vedere o anche solo intravedere le rovine. Con un rinnovato apporto tecnologico, non solo il vetro dà la possibilità di trasmettere all'esterno il contenuto, ma offre anche consistenze materiche diverse: riflettente o trasparente, l'involucro muta aspetto secondo le condizioni di luce, conferendo leggerezza all'intervento e dinamicità dovuta alla diversa capacità nel percepire l'interno. È stato questo il fine delle coperture sulle terme romane di Badenweiler (Germania) e sui resti della porta romana Limestor a Dalkingen (Germania).

Le rovine delle terme romane a Badenweiler si trovano a nord delle Alpi e sono una testimonianza unica della cultura romana. Il complesso termale, convertito e ampliato diverse volte nel corso della sua storia, ha formato il cuore della colonia romana. I Romani conquistarono la zona del Reno e costruirono una città con il nome di Aqua Villae in una posizione strategica, sollevata sulla valle del Reno, caratterizzata da condizioni climatiche favorevoli. Nel 75 d.C., attorno alle sorgenti termali di Cassiopeia, costruirono l'ampio complesso termale. Nel 260 d.C. le truppe romane lasciarono le rive del Reno e le popolazioni germaniche continuarono a usare le terme. Lo stabilimento termale fu abbandonato definitivamente tra



Fig. 14 - Copertura in vetro delle antiche terme romane di Badenweiler, Germania (foto Lanza Volpe, A.).

l'XI e il XII secolo. È in questo periodo che l'edificio venne utilizzato come cava per la costruzione di un castello nelle vicinanze. Nel 1784 sono stati rinvenuti i resti di tale struttura termale, la più antica rinvenuta in Germania e la più estesa a nord delle Alpi. L'attuale edificio presenta una simmetria esatta. È orientato su un asse est-ovest, costruito intorno a quattro bacini rettangolari disposti fianco a fianco e riceve acqua termale direttamente dalla fonte. A est e a ovest i bacini erano preceduti da due sale utilizzate per spogliatoi e da una corte coperta. Dopo la scoperta, le rovine furono danneggiate durante le guerre napoleoniche del XIX secolo a causa della loro trasformazione in stalle e ripristinate alla fine del secolo. Nel 2001 è stata costruita una copertura di vetro (Fig. 13, 14) e una mostra permanente offre un quadro della cultura balneare romana.

A Badenweiler uno degli obiettivi principali è stato quello di conferire leggerezza e trasparenza all'intervento di copertura, data la grande estensione dell'area da proteggere. Di conseguenza, nella progettazione è stato impegnativo fare in modo che la copertura si inserisse nel parco, sul monumento e accanto agli edifici circostanti delle terme. In contrasto con i materiali delle antiche rovine, si è lavorato con materiali moderni come l'acciaio e il vetro, creando una struttura con elevata trasparenza, come un guscio d'uovo che, con una quantità minima di materiale, ha una capacità massima di carico. Con strutture a guscio in vetro si può ottenere un limitato uso di elementi opachi e quindi una trasparenza ottimale ripartendo i carichi come in una membrana. Grazie alle moderne tecnologie è stata creata una costruzione estremamente delicata e trasparente: 1725 grandi lastre di vetro, circa 1,20 x 1,20 m e 10 mm di spessore, che si tengono agli angoli con piastre in acciaio. Dall'esterno, a seconda delle condizioni di luce, i vetri riflettono la vegetazione, la luce e il cielo con un effetto specchiante, oppure offrono un livello ottimale di trasparenza (Schober & Gugeler, 2002).

Anche nel recente intervento a Dalkingen (2008) trasparenza e leggerezza sono gli obiettivi principali dei progettisti. Nei pressi di Dalkingen vicino Aalen, negli anni 1974 e 1975 sono state ritrovate le fondamenta di una Porta, un arco trionfale unico lungo tutto il Limes che fu fatto costruire dall'imperatore romano Caracalla nell'anno 213 d.C., dopo una campagna vittoriosa contro i popoli germanici, come simbolo del suo potere. Con una lunghezza di 550 km, il Limes Romano, tra il Danubio e il Reno, è uno dei più lunghi monumenti del mondo, secondo solo alla Grande Muraglia Cinese.

Le mura ritrovate, così come tutta la parte superiore del Limes Tedesco Retico, sono state designate Patrimonio dell'Umanità nel 2005. I resti originali, dopo la scoperta, sono rimasti esposti al vento e ai fattori meteorologici per 35 anni e, dopo tale periodo di tempo, già mostravano chiari segni di alterazione. Per proteggere il complesso della Porta contro un ulteriore decadimento, l'autorità appaltante *Recreation Area Rainau-Buch Association* e l'Ufficio Distrettuale delle *Ostalbkreis* hanno deciso di dare riparo alle rovine con una copertura. Gli architetti Isin (Aalen) hanno progettato una costruzione cubica in vetro. L'edificio moderno ha dovuto soddisfare i seguenti requisiti: consentire una vista completa sulla struttura storica, coprire le rovine in modo armonioso e sottolineare l'importanza storica della Porta del Limes come edificio a sé stante. Il progetto di *Isin Architekten* nasce dall'idea di base che il com-

plesso, con i suoi 12 m di altezza dell'arco trionfale e i 5,5 m di altezza degli alloggiamenti situati direttamente dietro la porta, dovrebbe determinare le dimensioni e la gradualità in altezza della copertura. Gli architetti hanno risolto questo compito impegnativo progettando un edificio in vetro quasi cubico con una lunghezza dello spigolo di circa 20 m. Il cubo sale obliquamente verso sud da un'altezza di 8 m fino a 15 m con un angolo di 23° rispetto all'orizzontale (Fig. 15). Questa inclinazione tiene conto delle differenze di altezza tra gli alloggi e la Porta. Essa permette di poter visualizzare la ricostruzione della Porta offrendo così al visitatore la possibilità di sperimentare le dimensioni del monumento Romano. Una moderna riproduzione dell'arco trionfale è sospesa grazie a una costruzione in acciaio di 1,50 m di larghezza, 14 m di lunghezza e 7 m di altezza, ricoperta da una membrana dipinta, progettata dalla società *Agentur für Kommunikation Schober + Reinhardt e Wahl + Wollmann* (Stoccarda), che mostra la Porta nel suo aspetto presumibilmente originale.

In questo caso, la copertura doveva permettere una visione libera da tutti i lati, sui resti storici così come sulla riproduzione della Porta del Limes, e doveva avere una struttura opaca minima. Per tale motivo è stata progettata una costruzione in acciaio discreta racchiusa da grandi vetri supportati per punti. La costruzione leggera è stata principalmente resa possibile dalla scelta di materiali ad alta resistenza e di strutture soggette a sforzi assiali. Una grande quantità di cavi e barre avrebbe distolto l'attenzione dei visitatori dall'importante complesso storico. Per evitare ciò, la struttura doveva essere poco appariscente,



Fig. 15 - Limestor di Dalkingen, Germania (foto Lanza Volpe, A.).

non doveva suscitare particolare interesse e doveva apparire del tutto naturale al suo posto. Ciò è stato ottenuto utilizzando stilemi architettonici quali la simmetria, l'impiego di lastre di vetro con armoniose proporzioni (un rapporto larghezza/altezza di 1:2) portate da profili con un rapporto di 1:4 e la ripetizione degli elementi. Questa riduzione all'essenziale rende la struttura portante chiara e il flusso di forze leggibile (Graf, 2010).

### 5.2.3. Esigenze estetico - emozionali

Le superfici vetrate si possono presentare in modi differenti e, conseguentemente, la trasparenza può assumere connotati diversi, tramutandosi in opalescenza o traslucenza. Di giorno l'uso del vetro permette riflessi, trasparenze, variabilità luminosa, tutti elementi che possono far parte del progetto estetico - emozionale. Di notte, è possibile creare giochi di luce variabili e proiettare la luce all'esterno per evocare particolari suggestioni e rendere visibile ciò che di notte sarebbe invisibile. Il costruire trasparente diventa possibilità di convogliare all'interno la luce e di trasportarla all'esterno, calibrata e dosata opportunamente, per tramutarla in elemento architettonico e museografico.

### 5.2.4. Riconoscibilità dell'intervento

Alcuni interventi si caratterizzano per il fatto che riprendono la conformazione originaria della copertura, ma si distaccano da essa grazie all'uso del vetro, massimizzando in tal modo la loro riconoscibilità e permettendo al tempo stesso di non alterare la visione dei



Fig. 16 - Castello di Juval, Italia.

resti grazie all'uso di un materiale neutro. È questo il caso delle coperture in vetro nel Castello di Juval (Italia) e nella Cappella della Cattedrale di St. Fachnan a Kilfenora (Contea di Clare, Irlanda), interventi concepiti col fine di coprire le rovine in modo discreto, rendendole utilizzabili come spazi espositivi. La prima copertura (Fig. 16), sull'ala settentrionale del complesso di Juval in Val Venosta, è stata commissionata da Reinhold Messner, mentre l'intero castello veniva restaurato dall'architetto Karl Spitaler per ospitare, fra l'altro, il cosiddetto MMM (*Museo della Montagna Messner*) ed è stata progettata (1997-1998) dall'architetto Robert Danz (*Schönaich*) e dall'ingegnere Josef Taferner dello studio *Bergmeister (Neustift-Vahrn/Novacella-Varna)*<sup>2</sup>; la copertura della *Lady Chapel* della Cattedrale di Kilfenora (Fig. 17), è stata realizzata nel 2004 su progetto dell'architetto di Dublino Paul Arnold<sup>3</sup>. La somiglianza evidente fra questi interventi suggerisce senza dubbio che l'uso di un materiale trasparente sia sembrato il più naturale e il più atto a garantire la leggibilità del nuovo rispetto all'antico, conservando ai muri perimetrali la loro atmosfera originaria di rovine *en plein air*.

Alcuni casi di coperture vetrate raccolgono più di una motivazione comunicativa dell'uso del vetro: esigenze simboliche evocative, esigenze di relazione, esigenze estetico – emozionali, riconoscibilità dell'intervento. Ad Hamar, accanto ai resti dell'antica sede vescovile, ora museo archeologico, si trovano i resti dell'antica cattedrale, in un punto dominante, una leggera altura poco distante dalla riva di un lago. L'inizio dell'edificazione della Cattedrale risale al 1152, la conclusione è databile intorno al 1200. A seguito dell'avvento della Riforma

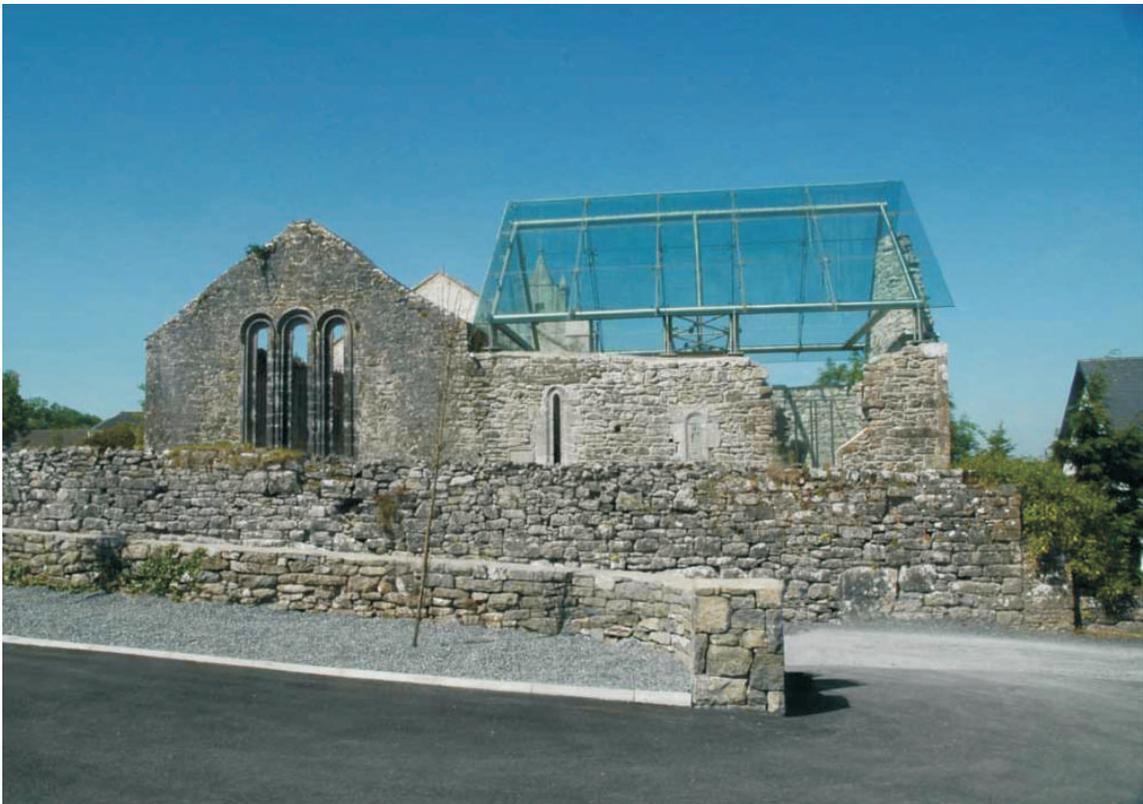


Fig. 17 - Lady Chapel della Cattedrale di Kilfenora, Irlanda.

del XVI secolo la Chiesa rimarrà per lungo tempo in stato d'abbandono e, nel corso di una guerra settennale contro gli svedesi, verrà data alle fiamme e rimarrà abbandonata per lungo tempo. Nel 1600 la Cattedrale fu trasformata in una cava in modo da ottenere materiale per altre costruzioni nella zona. Fu anche costruito un forno da calce per recuperare le pietre che non potevano essere utilizzate per la costruzione. Nel 1844 è stata fondata l'Associazione per la conservazione degli antichi monumenti norvegesi. Una delle priorità dell'associazione fu la protezione e il restauro delle rovine della cattedrale. Dal 1880 le rovine sono state più o meno soggette regolarmente a manutenzione. Questa operazione di manutenzione non era però sufficiente a impedire il continuo degrado generato dagli agenti atmosferici: la pietra, specialmente delle colonne, era fortemente alterata e c'erano grandi crepe nella muratura a causa del gelo. Nel 1980 è apparso chiaro che la parte di rovine più caratteristica, la fila di alte colonne, aveva scarsa stabilità laterale. Il pessimo stato di conservazione della struttura muraria, l'esigenza di sviluppare campagne di scavo in condizioni climatiche accettabili e di proteggere i conci in calcare dall'azione del gelo ha portato il *Ministry of Church and Cultural Affairs* ad indire un concorso (1987) per individuare la proposta più idonea per la loro conservazione (Costanzo, 2008).

Il motto per il progetto di concorso è stato "La poesia della ragione". Il progetto realizzato presuppone che le rovine di pietra debbano resistere alle forze naturali distruttive grazie a materiali durevoli quali il vetro e l'acciaio. Preservare i resti delle mura della basilica, di circa 850 anni fa, sotto un sottile strato di vetro sostenuto da esili strutture in acciaio, ha comportato l'impiego di avanzate tecnologie costruttive, instaurando un rapporto di convivenza tra

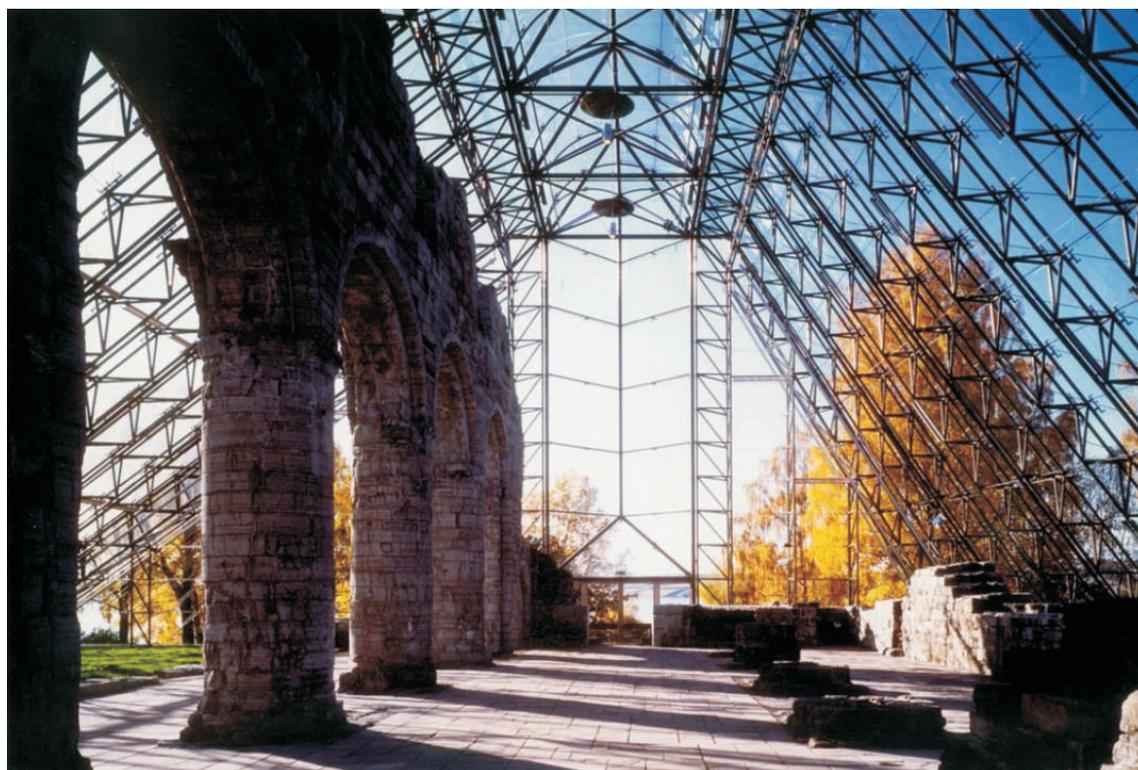


Fig. 18 - Copertura in vetro sui resti della Cattedrale di Hamar, Norvegia.

passato e presente. La costruzione in vetro è servita principalmente per la protezione dalle intemperie e per garantire condizioni climatiche ideali per futuri studi archeologici, ma al tempo stesso ha creato un nuovo spazio sacro in relazione alla sua funzione storica di Chiesa. Nella storia dell'architettura la Chiesa migliaia di volte ha presentato allegorie del concetto di cielo. Oggi, la protezione in vetro permette che il cielo sia visibile dalle rovine della basilica in tutte le ore e le stagioni (Lund & Slaatto, 2004) (Fig. 18). Nella Cattedrale di Hamar il messaggio di religiosità e mistero medievale è stato legato con la ricerca e le conoscenze scientifiche del nostro tempo. Il complesso formato dalle rovine con la loro protezione in vetro realizza oggi il concetto di "cattedrale". L'attività di conservazione ha prodotto un nuovo concetto di ciò che l'edificio in senso letterale e figurato rappresentava (Cloonan, 2007). La copertura lascia inoltre intravedere le rovine dall'esterno e consente che visivamente dall'interno possa essere parte del paesaggio che le circonda in modo continuo. La funzione del vetro è stata principalmente quella di creare il clima necessario per preservare le rovine, ma contemporaneamente sono stati perseguiti gli altri temi comunicativi (Lanza Volpe, 2013).

### Note

- 1) Si vedano le note al progetto nel sito online dell'architetto stesso.
- 2) Ingenieurteam/Studio di Ingegneria Bergmeister, Tetto in vetro del Castello Juval, note tecniche alla progettazione, leggibili online al sito dello studio Bergmeister.
- 3) Note tecniche al sito dell'architetto.

### Riferimenti bibliografici

- Accardi, A. R. D. 2008. *Architectures "on ruins" and ambiguous transparency: The glass in preservation and communication of archaeology*, Journal of Cultural Heritage, 9.
- Bano, V. 2008. *Trasparenze di sintesi. Applicazioni e linee di sviluppo dei materiali polimerici nel progetto di architettura*, Tesi di dottorato Ciclo XXI, Università degli Studi di Ferrara.
- Cloonan, M. V. 2007. *The Paradox of Preservation*, Library Trends, v. 56, n. 1, Johns Hopkins University Press, Summer 2007, pp. 133-147.
- Costanzo, M. 2008. *Sverre Fehn. Il museo di Hamar. Lund & Slaatto. La Christal Cathedral*, «Hortus», rivista on-line del Dipartimento Architettura e Progetto - "Sapienza" Università di Roma, 13.
- Di Salvo, S. 2012. *Luce e colori sulle rovine. Strategie museografiche per la comunicazione dell'archeologia*, Roma, Aracne.
- Garau, A. 1999. *Le armonie del colore: analisi strutturale dei colori, la teoria delle mescolanze, la trasparenza percettiva*, Torino, Hoepli.
- Graf, J. 2010. *A glass palace for the Limes Gate at Dalkingen, engineered transparency*, International Conference at Glasstec (Düsseldorf, 29 e 30 Sett. 2010), leggibile *online*.
- Herrera, J. M. Rueda, J. M. 2007-2008. *Plaza de l'Almoína*, "Paisea", 007.
- Lanza Volpe, A. 2011. *Valeria Tatano e A.A. V.V. Oltre la Trasparenza*, "Agathón", 2, Palermo, Offset.

- Lanza Volpe, A. 2013. *Il vetro nelle coperture archeologiche*, in Ruggieri Tricoli, M. C., Germanà, M. L., (a cura di), *Urban archaeology enhancement - Valorizzare l'archeologia urbana*, Pisa, ETS.
- Lund & Slaatto, 2004. *The protective structure for Hamar Cathedral Ruins*, "Living Architecture", 19, pp.116-125.
- Molnár T., Bachman, T. 2010. *Early christian cemetery complex Sopiana/Pécs*, in Cruz, P. J. S. 2010. *Structures and Architecture*, ICSA 2010 - 1st International Conference on Structures and Architecture (Guimaraes 21-23 July 2010), Londra, Taylor & Francis.
- Ruggieri Tricoli, M. C. 2007. *Musei sulle rovine. Architetture nel contesto archeologico*, Milano, Lybra.
- Ruggieri Tricoli, M. C. 2012. *Presentazione di Maria Clara Ruggieri Tricoli*, in Di Salvo, S., *Luce e colori sulle rovine. Strategie museografiche per la comunicazione dell'archeologia*, Roma, Aracne, pp. 5-6.
- Schober H. Gugeler, J. 2002. *Glasdach über der römischen Badruine in Badenweiler*, "Glas" 1, pp. 29-35.
- Tanizaki, J. 2002. *Libro d'ombra*, "Opere", Milano, Bompiani.
- Tatano, V. (a cura di) 2008. *Oltre la trasparenza. Riflessioni sull'impiego del vetro in architettura*, Roma, Officina.
- Tricoli, A. 2011. *La città nascosta. Esperienze e metodi per la valorizzazione del patrimonio archeologico urbano*, Palermo, Offset.
- Wasley, J. H. & Utzinger, M. 2000. *Vital Signs: Glazing Performance*, Johnson Controls Institute for Environmental Quality in Architecture, School of Architecture and Urban Planning, University of Wisconsin-Milwaukee.
- Zacchei, V. 2005-2007. *Film d'Architettura: uso di strati con funzione di coating attivi per il sistema involucro. Un modello di simulazione a supporto della scelta progettuale*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura, XX Ciclo, Università degli Studi di Ferrara, Università IUAV di Venezia, Università degli Studi di Bologna.
- Zito, R. M. 2009. *Architetture trasparenti: il vetro nella comunicazione museale*, "Trasparenza e leggerezza" (a cura di Corrao R., De Giovanni G.), edA esempi di Architettura, anno III, n. 6, Padova, Il Prato.

## CAPITOLO 6

### Rapporto fra condizioni climatiche, materiale impiegato per la copertura e natura dei reperti

#### 6.0. Abstract

#### Relationship between climatic conditions, material for covering structures and archaeological finds

The preservation of archaeological finds is affected by the climate and environment in which they are located; microclimatic characteristics can encourage certain mechanisms in the processes of deterioration. The climatic classification gives an idea of the environmental parameters of extensive geographical areas, but the specific location of the finds determines the microclimatic conditions caused by the meteorological factors that characterize a localized area. Climatic elements are added to geographical elements (topography, presence of water, type of soil, covering structure, etc.); other relevant factors include architectural features and orientation, materials and construction techniques. Moreover, the microclimate is easily modified by a human presence (visitors, service staff, artificial lighting, etc.). Knowledge of the deterioration processes and of their causes is needed in order to choose the most appropriate types of protective structure. Consequently the issue of conservation was addressed by studying materials and the environment in which they are preserved.

For archaeological sites and museums in general, no protocol has been adopted at the international level indicating the precise range of the microclimatic parameters for correct preservation. In general, there are guidelines and recommendations establishing basic criteria and providing guidance on recommended levels for some of the main parameters (temperature, relative humidity, light, UV radiation). This chapter examines the issues related to microclimate and environmental comfort and describes the various international standards for conservation.

In particular, the construction of covering structures with large glass surfaces poses the problem of exposure to solar radiation, which can damage the actual finds. Therefore, a focus was placed on the issue of degradation of materials caused by solar radiation, with analysis of physical, chemical and biological parameters.

## 6.1. Analisi climatica - ambientale

### 6.1.1. Il clima

Lo stato di conservazione dei reperti è condizionato dal clima e dall'ambiente in cui essi si trovano. Una corretta conservazione dei beni di interesse storico ed artistico si può avere solo nel caso in cui essi siano collocati ove le condizioni ambientali (termiche, igrometriche e luminose) siano tali da limitare i processi di degrado. La conoscenza delle condizioni climatiche e ambientali permette, in un intervento conservativo, di apportare le appropriate correzioni al fine di rallentare il processo di invecchiamento naturale dell'opera.

Il clima è l'insieme delle condizioni medie atmosferiche che caratterizzano una regione, riferite a un arco di tempo relativamente lungo, relativo a decenni. La commissione di climatologia della *Organizzazione Meteorologica Mondiale* definisce il clima come l'insieme degli elementi fisici, chimici e biologici che caratterizzano le condizioni meteorologiche di una determinata regione della Terra e che influenzano nel contempo la vita degli esseri viventi che la popolano, siano essi animali che vegetali. La parola 'clima' deriva dal greco klima che vuol dire "inclinato": il clima infatti è in massima parte una funzione dell'inclinazione dei raggi solari sulla superficie della Terra al variare della latitudine. Esso determina molte caratteristiche ambientali, come flora e fauna, al punto che a ciascuna fascia climatica si associano spesso ambienti simili su tutto il globo. La caratteristica principale del clima rispetto al comune "tempo meteorologico", oltre all'intervallo temporale di osservazione, è l'aver un andamento che tende a mantenersi stabile nel corso degli anni pur con una variabilità climatica di medio - lungo periodo che vi si sovrappone. Le carte bioclimatiche considerano il clima come un insieme di condizioni uniformemente distribuite in una ampia zona: le unità tipologiche più grandi nella classificazione bioclimatica sono i macrobioclimi, rappresentativi per ampi territori. Si tratta di modelli sintetici biofisici, definiti da determinati valori di latitudine, clima e vegetazione. La metodologia di *Rivas-Martinez* permette di classificare il clima secondo i parametri generalmente più diffusi sul territorio (temperatura e precipitazioni) sulla base di indici bioclimatici. Secondo tale classificazione, sulla Terra si possono individuare cinque macrobioclimi: tropicale, mediterraneo, temperato, boreale e polare. All'interno di tali macrobioclimi sono distinte unità subordinate, denominate bioclimi, caratterizzati da peculiarità climatiche e di vegetazione, per un totale di 28 unità. I bioclimi, a loro volta, sono ulteriormente suddivisi sulla base delle variazioni nei ritmi stagionali della temperatura e delle precipitazioni.

L'Europa si trova tra il 36° e il 66° parallelo, ossia tra il polo nord e l'equatore. Tale posizione garantisce una distribuzione di calore e di luce bilanciata. I punti estremi del continente, escludendo le terre remote, sono: punto più a nord – Knivskjellodden, Norvegia (71° 11' 08" N); punto più a sud – Gavdos, Grecia (34° 48' 02" N); punto più a ovest – Bjargtangar, Islanda (24° 32' 03" W); punto più a est – in Russia, una cima di 535 metri senza nome (68° 18' 50" E), sul fronte nord degli Urali. L'Europa appartiene, dunque, secondo la suddetta classificazione, quasi interamente alla zona latitudinale temperata e si individuano quattro dei cinque macrobioclimi: mediterraneo, temperato, boreale e polare. Si va dalle zone tipi-

camente mediterranee del Sud fino a quelle polari della Scandinavia, passando per fasce climatiche temperate e boreali (Fulvi, 1996).

Zone latitudinali	Cinture latitudinali	Tropicale	Mediterraneo	Temperato	Boreale	Polare
1.Calda 0°-35° N e S	1a. Equatoriale	0°				
	1b. Eutropicale					
	1c. Subtropicale	35°	23°	23°		
2.Temperata 35°-66° N, 35°-60° S	2a. Eutemperata		52°		43°N 49°S	
	2b. 2c. Subtemperata			55°S 66°N	56°S 71°N	51°N 53°S
3.Fredda 66°-90° N, 60°-90° S	3a. Artica					
	3b. Antartica					90°

Fig. 1 - Limiti latitudinali dei macrobioclimi nelle zone e cinture latitudinali della Terra. Rivas-Martinez, S. & Rivas-Saenz, S. 1996-2009. *Worldwide Bioclimatic Classification System*, Phytosociological Research Center, Spain. <http://www.globalbioclimatics.org>

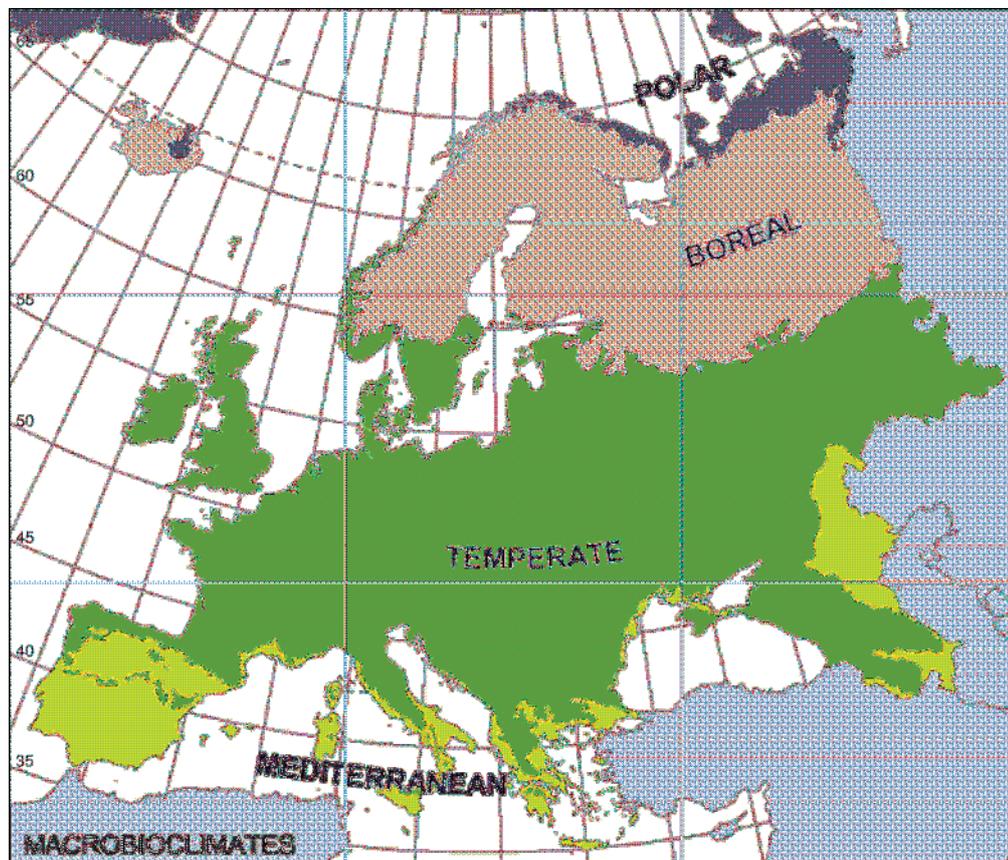


Fig. 2 - Latitudini europee.

### 6.1.2. Il microclima

Il problema della conservazione delle opere d'interesse storico artistico deve essere affrontato individuando i parametri fisici necessari per un'analisi microclimatica dell'ambiente contenente l'oggetto (aperto o confinato). Le classificazioni climatiche danno un'idea dei parametri ambientali di grandi aree geografiche, ma le condizioni specifiche dei reperti determinano il microclima che può subire variazioni in funzione del clima e di molti fattori che interagiscono con le coperture progettate. Occorre dunque studiare il microclima, inteso come l'effetto risultante dei vari fattori meteorologici che caratterizzano una piccola area. La radiazione solare e la ventilazione si combinano con gli elementi geografici (topografia, presenza di masse d'acqua, tipo di copertura del suolo, ecc.). Fattori determinanti sono le caratteristiche architettoniche e l'orientamento delle coperture, i materiali e le tecniche costruttive; inoltre il microclima viene facilmente modificato dalla presenza umana (visitatori, personale di servizio, illuminazione artificiale, ecc.). La conoscenza delle caratteristiche microclimatiche permetterà di individuare i meccanismi favorevoli all'insorgenza e allo sviluppo di processi di degrado dei materiali, attraverso la verifica dell'esistenza di determinate condizioni di radiazione solare, temperatura, umidità, ecc. (AA. VV. 2007).

#### 6.1.2.1 Temperatura

La temperatura è la proprietà fisica che indica lo stato termico di un sistema. La differenza di temperatura tra due sistemi in contatto termico determina un flusso di calore dal sistema più caldo a quello più freddo, per il raggiungimento dell'equilibrio termico. Il trasferimento di calore può avvenire:

- per conduzione, cioè il calore viene trasferito da una molecola all'altra;
- per convezione nei liquidi e nei gas: le variazioni di temperatura determinano differenze in densità che causano il muoversi delle molecole poiché le parti calde hanno una massa minore, mentre avviene il contrario per le parti fredde; questi movimenti bilanciano le differenze di temperatura;
- per irraggiamento: ogni corpo riscaldato emette energia sotto forma di radiazione elettromagnetica; quando le onde incontrano un ostacolo, rilasciano parte della loro energia verso l'ostacolo che a sua volta emette calore.

L'andamento giornaliero della temperatura dell'aria al suolo per un dato luogo e in con-

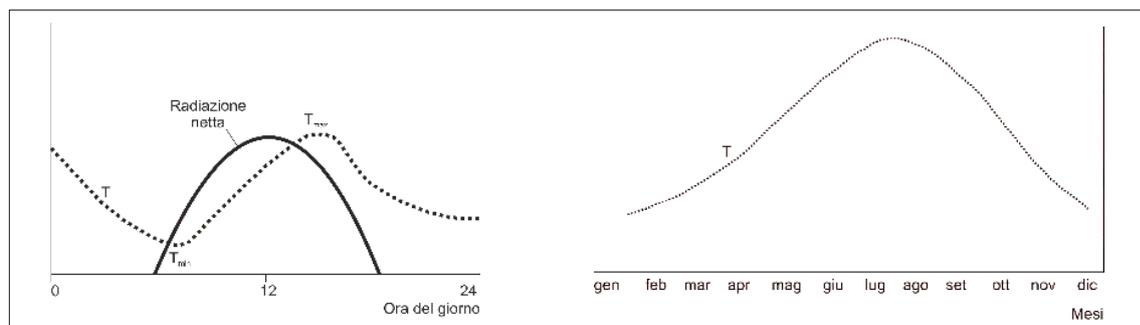


Fig. 3 - Andamento giornaliero delle temperature (a); andamento mensile delle temperature (b).

condizioni di cielo sereno presenta un rapido aumento subito dopo il sorgere del sole, un continuo crescere fino a quando la radiazione solare entrante supera quella riemessa dalla Terra, raggiungendo per questo l'apice non necessariamente nel periodo di massima insolazione, cioè intorno al mezzogiorno locale, bensì nelle prime ore pomeridiane; quindi subisce una tendenza alla diminuzione fino a quando la radiazione termica emessa dalla Terra supera quella solare entrante cioè fino al nuovo sorgere del sole, momento in cui si raggiunge la temperatura minima (Fig. 3, a). Per una data località si può dunque determinare la media giornaliera tra la temperatura massima e la temperatura minima, l'escursione termica giornaliera, cioè la differenza tra la temperatura massima e la minima registrata nell'arco delle 24 ore e l'escursione termica media annua, ossia la differenza fra la temperatura media del mese più caldo e quello più freddo legata per lo più alle stagioni, alla vicinanza al mare e all'altitudine con la quale diminuisce, anche se in misura minore. La temperatura influisce:

- sulla densità dell'aria. Masse d'aria a temperature diverse hanno anche densità e pressione atmosferica diversa perché l'aria più calda è meno densa dell'aria fredda più densa e quindi più compressa. Tale diversità delle due masse d'aria genera una differenza di pressione che rappresenta il 'motore' degli spostamenti di masse d'aria;

- sull'umidità relativa dell'aria: più l'aria è calda minore è l'umidità relativa se l'umidità assoluta rimane costante e viceversa; temperature più alte favoriscono però l'accumulo nell'aria di maggiori quantità di vapore acqueo cioè innalzano l'umidità assoluta per evaporazione ed evotraspirazione da suolo umido e vegetazione;

- sullo stato delle precipitazioni, cioè pioggia o neve, rugiada o brina.

La cosiddetta *temperatura percepita* è definita come la sensazione di "caldo" o di "freddo" che viene avvertita; essa è dovuta non solo alla temperatura dell'aria, ma all'effetto combinato della temperatura dell'aria, del vento, dell'umidità e dell'intensità della radiazione solare. Per esempio l'umidità dell'aria può aumentare la sensazione di caldo, mentre il vento può aumentare la sensazione di freddo. Per misurare il disagio legato a condizioni ambientali calde e umide, viene comunemente impiegato il cosiddetto *indice di calore*. Questo parametro indica lo stato di disagio provato dal fisico per le limitazioni alla sudorazione imposte dall'azione combinata del calore e della umidità. Per esempio, una temperatura dell'aria di 28° C con umidità del 30% genera un indice di calore di 29° C, ma con l'umidità al 75% l'indice sale a 40 °C. L'indice di calore si limita a prendere in considerazione il fattore correttivo esercitato dalla sola umidità relativa sulla temperatura dell'aria e non può quindi essere considerato un indicatore assoluto della temperatura percepita dall'organismo umano, essendo quest'ultima sensibile a ulteriori fattori, quali la massa corporea dell'individuo, il vestiario, l'attività fisica, l'esposizione a radiazioni solari, la velocità del vento, ecc. (vedi par. 6.2.5.). Altri indici utilizzati sono il *Wind Chill*, detto anche indice di raffreddamento, temperatura percepita per effetto combinato della temperatura e del vento e il *THSW Index* (acronimo per *Temperature/Humidity/Sun/Wind*), temperatura percepita per l'effetto combinato di temperatura, umidità, radiazione solare e vento. Si tratta di un calcolo simile a quello del-

l'indice di calore ma con l'aggiunta di due variabili: l'irraggiamento solare e l'effetto di raffreddamento del vento.

#### 6.1.2.2. Umidità

L'umidità è la misura della quantità di vapore acqueo presente in una massa d'aria. L'*umidità assoluta*, intesa come quantità d'acqua contenuta in un determinato volume d'aria, non è rappresentativa delle condizioni reali poiché non considera le condizioni di temperatura dell'aria: con la stessa quantità di vapore d'acqua infatti, l'aria calda può raggiungere valori di umidità molto bassi, mentre l'aria fredda può condurre alla saturazione di parte del vapore. Unitamente alla misura dell'umidità assoluta, è quindi necessario considerare la misura dell'*umidità relativa*, che rappresenta la massima quantità di acqua che un determinato volume d'aria può trattenere a quella temperatura. Per *umidità di saturazione* si intende il quantitativo massimo di vapore acqueo contenibile a una determinata temperatura (equilibrio tra molecole che evaporano e molecole che condensano). Un valore di umidità relativa pari al 100% implica che quella massa d'aria contiene la massima quantità di vapore contenibile in quelle condizioni senza che si abbia condensazione. Se la quantità di saturazione viene superata, la quantità eccedente condensa sotto forma di goccioline di acqua allo stato liquido che si depositano sulle pareti o sugli oggetti che si trovano nell'ambiente.

All'esterno degli edifici l'umidità relativa varia con il variare dalle condizioni meteorologiche; in genere, nei nostri climi si assumono, per l'esecuzione dei calcoli, valori medi valutabili tra il 50 % e il 90%. Negli ambienti interni l'umidità relativa è teoricamente uguale a quella esterna, ma nella realtà, la presenza di persone produce un aumento di umidità determinato dalle attività fisiologiche e funzionali. Per mantenere un livello di umidità relativa confortevole l'umidità relativa eccedente deve essere considerata come acqua da smaltire per equilibrare la produzione interna di vapore. Lo smaltimento dell'acqua eccedente può avvenire con adeguati ricambi d'aria e/o con sistemi di ventilazione, tenendo conto che, durante la stagione invernale, la temperatura dell'aria introdotta all'interno di locali riscaldati viene innalzata, con conseguente abbassamento dell'umidità relativa. Se invece di un aumento di temperatura si verificasse una diminuzione, il tasso di umidità relativa aumenterebbe di conseguenza. In quest'ultimo caso si potrebbe addirittura raggiungere la condizione di saturazione con conseguente condensa del vapore in eccesso. La temperatura a cui ciò si verifica è definita *temperatura di rugiada*.

I principali fenomeni che determinano problemi di umidità all'interno di edifici sono:

- infiltrazioni: dovute ad esempio alla non integrità della copertura;
- capillarità: l'acqua può risalire per capillarità all'interno dei muri, se non adeguatamente protetti, soprattutto nelle zone basamentali;
- condensazione: la condensa si localizza sulle superfici degli oggetti o sulle pareti dell'ambiente che hanno una temperatura inferiore alla temperatura di rugiada dell'aria interna;
- altra fonte di umidità nei locali è la presenza a cavallo della superficie dei muri, di cristalli di sali igroscopici (specialmente solfati e nitrati) portati da anni o secoli di infiltrazione ca-

pillare nei muri, da risalita verticale o orizzontalmente da terra addossata. A seconda delle variazioni di temperatura e di umidità relativa dell'aria, questi cristalli assorbono umidità o la emettono. Possono pertanto mantenere un locale umido anche 'in assenza' di infiltrazioni 'in atto' o di condensa.

L'azione di queste fonti è a sé stante, ma possono, ovviamente, agire in concomitanza l'una dell'altra. I metodi per prevedere e calcolare il possibile verificarsi della "condensazione" sono numerosi, fra questi il diagramma psicrometrico. Esso si avvale di parametri rappresentati dalla Temperatura aria bulbo secco ( $T_{bs}$  = temperatura misurata con un comune termometro a bulbo) e dall'Umidità Relativa (U.R.). Grazie a metodi di verifica possono essere individuati i possibili provvedimenti igrometrici in termini preventivi, ad esempio con l'adeguamento del sistema termoisolante, o di carattere funzionale, attraverso la predisposizione di corretti metodi di areazione e ventilazione (Manieri Elia, 2010).

### 6.1.2.3. Ventilazione

Le differenze di pressione costituiscono la forza motrice delle correnti d'aria: se due spazi sono collegati, l'aria fluisce da uno spazio con alta pressione a uno spazio con bassa pressione, al fine di raggiungere uno stato di equilibrio. Nel campo delle costruzioni, vi sono tre cause principali che determinano differenze di pressione:

- a) operazioni meccaniche;
- b) spinta termica;
- c) azione del vento.

In particolare, la ventilazione di un ambiente è di tipo forzato se prodotta artificialmente con dispositivi che introducono aria dall'esterno, provocando un contemporaneo allontanamento di quella interna; di tipo naturale, qualora il movimento dell'aria avvenga spontaneamente per effetto delle differenze di pressione.

a) *operazioni meccaniche*. La ventilazione meccanica o forzata è il processo orientato a spingere o aspirare aria da un certo ambiente. Un esempio è costituito dal ventilatore, il più comune mezzo di propulsione meccanica dell'aria; il suo effetto può essere descritto come esempio di un fenomeno generale. Il ventilatore è costituito essenzialmente da un'elica, utilizzata per determinare il movimento dell'aria. L'elica è formata da un certo numero di pale che, ruotando, spingono l'aria in una certa direzione. La parola "meccanica" in questo caso può essere presa letteralmente, perché le pale mobili comprimono costantemente l'aria sulla faccia anteriore creando in tal modo un eccesso di pressione. Viceversa sulla faccia posteriore si crea spazio e l'aria libera vi scorre. Un più piccolo volume di aria in un dato spazio significa pressione negativa: un flusso di aria arriva dallo spazio circostante fino al punto in cui viene stabilito un equilibrio di pressione (Oesterle et al., 2001).

b) *spinta termica*. La spinta termica è spesso causa di correnti d'aria. L'aria subisce una variazione di densità con le variazioni di temperatura: l'aria calda occupa un volume maggiore dell'aria fredda e ha un peso dell'unità di volume (peso specifico) minore dell'aria fredda. Un materiale che è più leggero dell'acqua, come il legno, galleggia in superficie e

un materiale pesante, come il ferro, si deposita sul fondo. Lo stesso avviene per l'aria calda e per l'aria fredda quando entrano in contatto con aria a una temperatura intermedia: l'aria calda sale e l'aria fresca scende. In questo caso, le differenze di pressione sono dovute alle differenti densità dell'aria, causate dalle diverse temperature dei fluidi, per cui l'aria calda meno densa tende a risalire generando una depressione a valle e richiamando aria fredda più densa (moti convettivi). Le spinte termiche possono verificarsi all'interno degli edifici (correnti d'aria in spazi verticali) e, ugualmente, fra ambiente esterno e spazi interni (ventilazione naturale attraverso le aperture). Quando la temperatura interna è maggiore di quella esterna, l'aria "fresca" esterna entra nell'edificio attraverso le aperture preferibilmente poste nella parte bassa di esso e l'aria calda esce dalle aperture poste nella parte alta. Il procedimento inverso avviene quando la temperatura dell'aria interna è più bassa di quella esterna.

c) *azione del vento*. I venti sono spostamenti orizzontali di masse d'aria causati da differenze di pressione per lo più dovute alla differenza di irraggiamento solare nelle varie regioni del globo. Il vento, generato dalla spinta termica tra aree di alta e bassa pressione, è quindi una corrente di equilibrio tra aree con pressione diversa. Esso può avere una grande influenza sulle correnti d'aria dentro e intorno agli edifici. Ciò si spiega con il fatto che l'edificio costituisce un ostacolo al flusso d'aria. Il vento viene deviato attorno ad esso, con conseguente sovrappressione sul lato esposto al vento e pressione negativa sul lato sottovento. Per gli edifici alti in particolare, la porzione del flusso d'aria che incontra l'edificio sarà arginata in fronte ad esso, creando così uno stato di pressione in eccesso. L'entità di questa pressione in eccesso, denominata "pressione di stagnazione", dipenderà dalla velocità del vento. Quando il vento è bloccato da un muro, il flusso di aria può soltanto deviare oltre la massa dell'edificio, scorre e aumenta la propria velocità lungo i bordi. Ciò è dovuto al fatto che vi è meno spazio disponibile per il volume di aria condotto dal vento fino all'edificio e l'unico modo di compensare questa mancanza di spazio è quello di passare a una velocità maggiore ai suoi lati. Allo stesso tempo, c'è una maggiore tendenza ad aspirare l'aria che porta a uno stato di pressione negativa. Sul retro dell'edificio teoricamente ci sarebbe lo spazio sufficiente affinché tutta l'aria possa fluire nuovamente indisturbata, ma l'inerzia si manifesta più intensamente e l'aria accelerata intorno ai lati dell'edificio prosegue diritto. In tal modo dietro l'edificio si verifica uno stato di pressione negativa. Ciò, a sua volta, provoca ai lati vortici del flusso d'aria accorrente che riempiono lo spazio sottovento. Per tale motivo, le zone sottovento sono spesso estremamente turbolente. Tali effetti del vento descritti sono di grande importanza per la progettazione di strutture alte (Oesterle et al., 2001).

## 6.2. Degrado dei materiali a causa delle radiazioni solari

La conoscenza dei processi responsabili del degrado dei beni archeologici è argomento di estremo interesse se si pensa che anche velocità molto basse di deterioramento possono condurre nel tempo a danni cumulativi irreparabili. I parametri che determinano le alterazioni dei materiali si possono classificare in:

- parametri fisici e chimici: luce; temperatura e sue variazioni; umidità e sue variazioni; idrometeore; aria; inquinanti.

- parametri biologici: organismi (insetti, uccelli, piante infestanti, ecc.) e microorganismi (batteri, lieviti, funghi microscopici, ecc.).

Tale classificazione è indicativa e non sempre univocamente determinata. Lo studio del processo di degrado è reso complesso per la difficoltà di separare gli effetti dalle varie cause. L'effetto di ognuno viene influenzato dalla presenza concomitante degli altri e l'esposizione a un fattore può rendere il materiale maggiormente suscettibile alla successiva azione degli altri. Uno stesso parametro può determinare conseguenze diverse così come un tipo di danno necessita della compresenza di più fattori per manifestarsi. Ad esempio, l'umidità dell'aria è responsabile di deformazioni strutturali se assorbita dalle fibre del materiale che possono degenerare a spaccature se sono accompagnate da brusche variazioni della stessa o di temperatura. L'alto tasso di umidità favorisce anche la proliferazione di colonie batteriche o fungine sulla superficie dei materiali (Laurenti, 2006). Il deterioramento può essere di tipo:

- chimico, se avviene a livello della struttura molecolare o atomica del materiale;
- fisico, quando interessa la forma e l'aspetto esteriore dell'oggetto;
- biologico, se è dovuto alla presenza di colonizzazioni biologiche di micro o macro organismi.

Non esiste una forma di danno tipica per categoria di materiali; ad esempio la formazione di depositi biologici può interessare tanto i monumenti in pietra quanto i reperti di materiali organici, diversificandosi per le tipologie di colonie di alghe o batteri. Il processo di degrado è suddivisibile in tre momenti:

1. l'innescò da parte di uno o più agenti;
2. l'evoluzione temporale, più o meno rapida a seconda delle condizioni in cui si trova l'oggetto;
3. la manifestazione visiva del danno.

Il degrado può avvenire a qualsiasi livello fisico della materia: può iniziare dagli strati più superficiali e dopo la sua formazione può espandersi in tutto l'oggetto, ovvero restare circoscritto e localizzato in una determinata zona. Il fenomeno è di natura cumulativa, pertanto, una volta innescato, si sviluppa in modo non-lineare, ma progressivo e irreversibile: i suoi effetti possono essere forse riparati, ma non potranno essere annullati. L'entità del danno dipende sia dalla quantità sia dall'intensità dei singoli fattori scatenanti che, generalmente, non agiscono da soli ma in concomitanza tra loro (Pedrotti, 2010).

In particolare, la realizzazione di una copertura con grandi superfici vetrate pone il problema dell'esposizione alla radiazione solare che può provocare danni ai reperti. È stato quindi trattato il tema del degrado dei materiali causato dalle radiazioni solari, con l'analisi

dei parametri fisici e chimici (luce, temperatura e umidità) e dei parametri biologici (organismi e microorganismi) ad esse connessi.

### 6.2.1. Parametri fisici e chimici

#### 6.2.1.1 Luce

La luce, sia naturale che artificiale, è una forma di energia che interagisce con l'ambiente e il materiale illuminato. Già gli antichi conoscevano gli effetti dannosi della luce sui manufatti policromatici: nei palazzi rinascimentali si usava ricoprire i quadri alle pareti con pesanti drappi quando la sala non era usata e, in vecchi manuali di pittura ad olio si suggerisce di sottoporre il dipinto alla luce solare durante l'asciugatura così che resista meglio alla luce stessa e di conservarlo comunque al riparo dagli "sprazzi di sole" che ne altererebbero i colori (Piva, 1985).

Il *foto-degrado* è l'insieme dei cambiamenti permanenti a livello atomico/molecolare che avvengono in un materiale a causa dell'assorbimento di energia radiante (fotoni) da parte dello stesso durante l'esposizione alle radiazioni luminose. Quando un fotone colpisce un atomo o una molecola è in grado di eccitare il suo sistema elettronico (attivazione) trasferendogli la propria energia, che viene poi rilasciata o innescando una reazione fotochimica o sotto forma di riscaldamento radiante (Feller, 1994). La luce interagisce quindi con il corpo illuminato in due modi, a seconda delle componenti spettrali contenute nella radiazione incidente l'oggetto e dell'energia radiante ad essa associata: in modo diretto con azione fotochimica o in modo indiretto con effetto di riscaldamento radiante.

L'azione fotochimica si manifesta come incremento dell'eccitazione elettronica per assorbimento della luce nella banda del visibile e ultravioletta che determina possibili alterazioni dei legami chimici. L'effetto di riscaldamento radiante si manifesta come eccitazione molecolare che invece causa un aumento della temperatura e il conseguente riscaldamento dell'oggetto illuminato. I due processi presentano effetti finali caratteristici, ma alcuni tipi di alterazioni sono comuni a entrambi e in questi casi risulta particolarmente difficile riuscire a distinguerne la causa originaria. In ogni caso, la radiazione assorbita dal materiale viene comunque successivamente trasformata in calore, qualsiasi sia la propria lunghezza d'onda.

Allo stesso tempo, l'energia immessa in modo indiretto dalla luce in un ambiente può alterare sia la quantità media di energia interna, variandola nel tempo, sia la sua distribuzione spaziale, provocando bruschi gradienti o forti escursioni tra giorno e notte o tra lo stato di impianto acceso e spento nel caso di un'illuminazione artificiale. Queste distribuzioni termiche discontinue sono spesso associate a spostamenti di masse d'aria o variazioni di umidità relativa all'interno dei volumi (Bernardi, 2004). Per questo motivo, le sorgenti luminose possono essere responsabili di fenomeni di degrado quali deformazioni e cedimenti, depositi di polveri oppure attacchi biologici sulle superfici (Pedrotti, 2010).

L'*azione fotochimica* avviene quando l'energia di attivazione fornita dal fotone e assorbita dall'atomo o dalla molecola del materiale coinvolto comporta il cambiamento della struttura

chimica della stessa, la rottura dei legami chimici oppure la collisione con un'altra particella. Secondo la legge di Stark – Einstein, nota anche come legge dell'equivalenza fotochimica, l'eccitazione di innesco avviene in modo univoco (una particella per ogni fotone assorbito) e per livelli discreti di energia, che equivalgono alla quantità massima trasportabile da un fotone definita dalla seguente espressione (Feller, 1994):

$E = h\nu = hc/\lambda$  nota come equazione di Planck, dove:

$E$  = quantità di energia [J]

$\nu$  = frequenza della radiazione elettromagnetica [Hz = 1/s]

$\lambda$  = lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica [nm]

$h$  = costante di Planck, pari a  $6,62559 \times 10^{-34}$  [Js]

$c$  = velocità della luce nel vuoto, pari a 299.792.458 m/s  $\sim$  3 105 km/s

L'energia del fotone è inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda della radiazione incidente (quindi è maggiore per quelle più corte a cui corrispondono le frequenze più alte); per tale motivo l'innesco dell'azione fotochimica è attribuita per lo più al campo dell'ultravioletto e alla parte più bassa della banda del visibile. L'assorbimento e il successivo smaltimento di energia da parte della particella costituiscono quello che è denominato processo primario dell'azione fotochimica, che dipende esclusivamente dalla radiazione luminosa. In seguito, l'attività della particella eccitata può scatenare una complessa serie di reazioni chimiche a catena che può arrivare fino alla trasformazione totale della sostanza. Questa fase è indicata come processo secondario, su cui influiscono in modo decisivo fattori come la temperatura e l'umidità dell'ambiente ovvero la presenza di sostanze inquinanti o di ossigeno le quali accelerano oppure intervengono all'interno dell'interazione tra le particelle coinvolte. Le modifiche atomiche o molecolari subite dal materiale gli conferiscono ovviamente caratteristiche fisico - chimiche diverse dalle condizioni originali. La conseguenza più evidente è la variazione del colore con cui appare l'oggetto e quindi il viraggio di croma o la perdita di chiarezza (incurimento) per ossidazione dei pigmenti: caso tipico è l'ingiallimento dei bordi esterni delle pagine di libri rimasti esposti alla luce, oppure l'alterazione, solitamente per perdita di trasparenza e incurimento, della vernice protettiva di dipinti a olio o tempera. Ma le variazioni dei legami possono anche indebolire la struttura molecolare della sostanza con effetti importanti, come il logoramento delle fibre o l'aumento della fragilità dei supporti. Questi ultimi danni sono molto simili ai danni provocati dal riscaldamento radiante per cui risulta particolarmente difficile risalire alle cause che portano a questo tipo di fenomeni (Pedrotti, 2010).

Oltre che in modo diretto mediante azione fotochimica, la luce può interagire in modo indiretto con l'effetto di riscaldamento radiante. Quando l'energia proveniente dal fotone non è in grado di intervenire sui legami chimici, come nel caso delle radiazioni a lunghezze d'onda superiori appartenenti alla banda dell'infrarosso, allora viene dispersa all'interno della struttura molecolare del materiale come calore. Ne risulta un incremento della mobilità delle particelle e un conseguente innalzamento della temperatura superficiale rispetto a quella ambientale fino ad una temperatura massima rag-

giungibile, calcolabile con la seguente relazione:

$T_{\max} = T_a + k A E_e / h_c$  dove appaiono i seguenti termini:

$T_a$  = temperatura dell'aria dell'ambiente [°C]

$k$  = costante di proporzionalità

$A$  = coefficiente di assorbimento globale dell'oggetto

$E_e$  = irradianza a cui è sottoposto l'oggetto [W/m<sup>2</sup>]

$h_c$  = coefficiente di perdita di calore per induzione

Dalla formula si evince che la quantità di energia radiante convertita interamente in calore è proporzionale all'intensità della radiazione e all'assorbimento globale del materiale, mentre non influiscono la sua capacità termica, la sua densità o il suo spessore (CIE, 2004). La maggiore mobilità delle molecole favorisce la loro possibilità di reazione, per cui l'effetto di riscaldamento radiante può accelerare il processo di azione fotochimica e intensificarlo, portando a compimento le trasformazioni chimiche in atto. L'aumento di temperatura del materiale, inoltre, favorisce la dilatazione delle fibre e la loro conseguente deformazione ovvero provoca la riduzione dell'umidità relativa interna con successiva essiccazione delle fibre. Il primo caso si dimostra particolarmente pericoloso negli oggetti policomposti, in quanto le diverse parti o strati possono presentare coefficienti di dilatazione differenti e potrebbero distaccarsi tra loro. La disidratazione, invece, comporta una desaturazione dei colori (scolorimento) e un indurimento degli elementi che diventano quindi più fragili e rischiano maggiormente di rompersi. Non solo l'aumento di temperatura, ma anche le sue continue variazioni nel tempo (per esempio una superficie sottoposta a irraggiamento intermittente) o nello spazio (quando la distribuzione della luce non è uniforme sulla superficie) sono dannose perché si creano gradienti termici e corrispondenti variazioni tensionali tra le varie aree, che con il tempo possono portare al degrado, con spaccature e fessurazioni (CIE, 2004).

In generale, l'entità delle conseguenze generate dalla luce dipende dai seguenti fattori:

- la distribuzione di potenza spettrale della radiazione incidente, cioè le lunghezze d'onda che contiene;
- l'irradianza di tale radiazione, che rappresenta la densità di energia ricevuta dalla superficie illuminata [W/m<sup>2</sup>];
- la durata dell'esposizione [h];
- il fattore di assorbimento spettrale della superficie illuminata;
- la fotosensibilità del materiale, cioè la sua attitudine a deteriorarsi. Essa dipende dal numero di molecole fotosensibili presenti nella composizione del materiale. Il fenomeno è dovuto esclusivamente all'interazione tra il materiale e la luce che lo colpisce, mentre gli altri parametri ambientali risultano completamente ininfluenti sulla sua attivazione e contribuiscono piuttosto ad accelerarne lo sviluppo (Pedrotti, 2010). Condizione fondamentale per innescare l'azione di fotodegrado è espressa dalla legge di Grotthus – Draper: la radiazione luminosa deve essere assorbita perché possa provocare una reazione chimica o fisica (Feller, 1994). Tale asserzione può sembrare banale, ma permette delle osservazioni che non sono così scontate. La prima è che il fenomeno ha inizio dal momento in cui si illumina

il materiale e pertanto non è possibile stabilire una soglia minima di intensità di luce che ne assicuri l'immunità perché abbassando il livello di illuminamento si riduce la densità di fotoni incidenti la superficie, ma non l'energia di ogni fotone che interagisce singolarmente con un elettrone. L'unica condizione per preservare dal fotodegrado un oggetto sarebbe quella di mantenerlo al buio completo, non rendendo possibile però la visione, mentre con illuminamenti minimi è possibile solo rallentare significativamente lo sviluppo. Infine, specie nel caso di pigmenti e tinte, non si può dire per scontato che le lunghezze d'onda innescanti il processo corrispondano necessariamente allo spettro di assorbimento della sostanza stessa, in quanto l'assimilazione della radiazione può avvenire da parte di impurità presenti che la trasmettono poi al colorante. A tal proposito si distinguono due tipi di innesco per il processo di fotodegrado: primario, quando la radiazione è direttamente assorbita dal materiale che poi reagisce e secondario, quando l'energia della radiazione è trasmessa per via indiretta da un altro elemento (Feller, 1994).

Lo studio del fotodegrado ha da sempre riguardato anche la formulazione di modelli matematici in grado di descrivere l'andamento del fenomeno e di esprimere il legame tra i fattori da cui dipende l'entità del danno provocato. La conoscenza di tali relazioni è utile a progettisti e curatori di esposizioni di beni culturali al fine di individuare strategie di prevenzione e limitazione degli effetti oppure per prevedere il comportamento di un oggetto sottoposto a un determinato irraggiamento. Nell'ambito illuminotecnico, in particolare nella fase di progettazione, tali azioni non sono rivolte tanto verso l'oggetto di intervento, quanto al contesto ambientale in cui esso si trova: si tratta quindi di identificare una sorgente luminosa tale da arrecare il minor danno possibile al soggetto illuminato, pur esaltandone al meglio le caratteristiche fisico-cromatiche.

Per quantificare l'energia che è scambiata tra la materia e la radiazione elettromagnetica incidente si introducono due grandezze di riferimento: l'esposizione radiante e l'esposizione radiante effettiva. Modelli matematici descrittivi del fenomeno di fotodegrado sono: il principio di reciprocità; le variazioni di colore e l'esposizione radiante; la curva di sensibilità al fotodegrado; la curva di danno e l'indice di danno (Pedrotti, 2010).

*Il principio di reciprocità.* La quantità di danno subito da un materiale dipende unicamente dalla dose complessiva di energia radiante di composizione spettrale nota che incide su di esso, mentre non è influenzato dalla modalità con cui tale energia è stata ricevuta, essendo il fotodegrado un fenomeno di tipo cumulativo (Saunders & Firby, 1996). Pertanto, a parità di spettro di potenza emessa, un'esposizione a un basso livello di irraggiamento protratta per un lungo periodo provocherà lo stesso effetto finale di un irraggiamento molto più intenso di breve durata. Questa affermazione è nota come principio di reciprocità o legge di Bunsen – Roscoe: l'effetto fotochimico in una sostanza è proporzionale al prodotto dell'intensità luminosa per l'esposizione, cioè per il tempo durante il quale la sostanza è stata illuminata. Di conseguenza, la prevenzione può essere fatta semplicemente controllando che la dose totale di esposizione ricevuta non superi la quantità massima di energia annuale fissata a priori sulla base del livello di deterioramento accettabile per ogni categoria di beni

culturali. Occorre comunque tener sempre presente che il principio non indica una relazione lineare tra l'esposizione e l'alterazione dell'oggetto, pertanto raddoppiare l'energia radiante incidente non implica necessariamente che si raddoppi il danno subito (Pedrotti, 2010).

*Le variazioni di colore e l'esposizione radiante.* Le variazioni di colore riportate da un oggetto sottoposto a radiazioni luminose sono il parametro più semplice e immediato da misurare per poter valutare il danno da fotodegrado che esso ha subito. La rappresentazione su grafico dei cambiamenti cromatici registrati su campioni di materiali museali sottoposti a invecchiamento forzato in funzione dell'esposizione radiante assorbita mostra un andamento di tipo esponenziale (Fig. 4), in cui il valore finale raggiunto a regime e la pendenza (tempo di salita) che rappresenta la velocità della perdita di colore sono caratteristici della sensibilità del materiale. Il processo evolve piuttosto rapidamente all'inizio e poi degrada lentamente fino a un valore massimo tendente all'infinito: il numero di molecole ancora inattive colpite dai fotoni, che rappresentano la possibilità di innesco di nuove reazioni, decresce al progredire dell'azione fotochimica senza però mai annullarsi. Ciò è facilmente intuibile nel caso di tinte e pigmenti per i quali si può assumere che la perdita di colore sia proporzionale alla concentrazione delle particelle coloranti (Pedrotti, 2010). L'andamento esponenziale sta a significare che un qualsiasi materiale è più reattivo e sensibile allo scolorimento per azione fotochimica durante i primi tempi della sua vita o dopo un prolungato periodo trascorso all'oscurità, mentre poi tende pressoché a stabilizzarsi. Si deve comunque ricordare che le variazioni chimico-fisiche, invece, possono proseguire o addirittura intensificarsi, visto che dipendono anche da fattori esterni, quali la temperatura o l'umidità relativa (Cuttle, 1988).

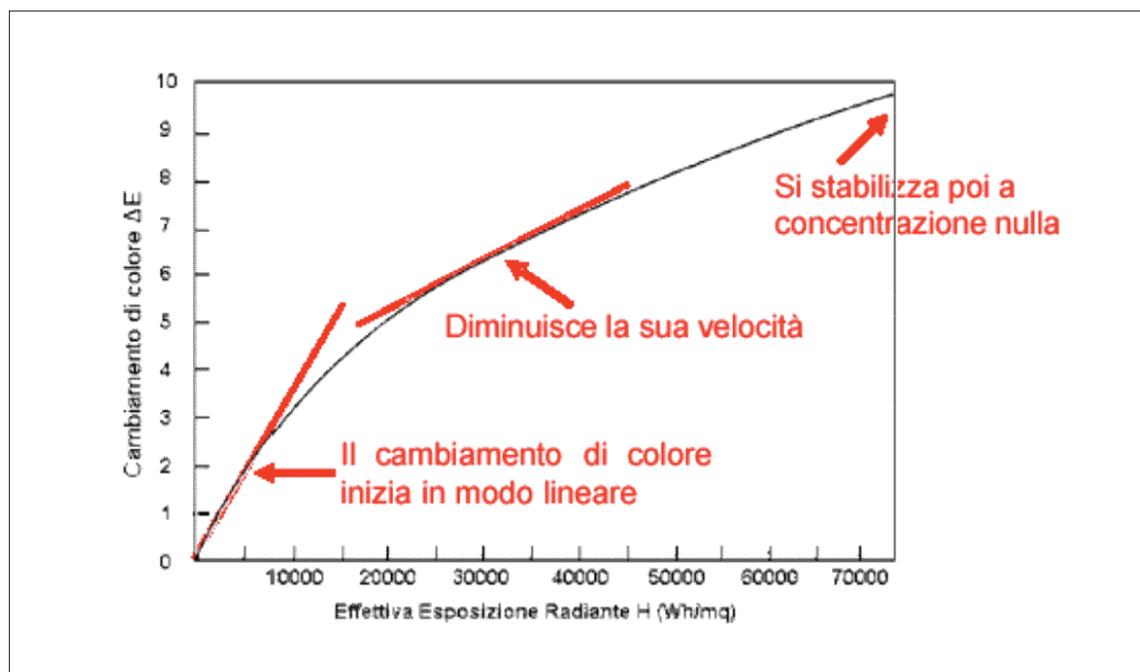


Fig. 4 - Andamento tipico della curva di invecchiamento: variazioni cromatiche rispetto all'esposizione radiante (Pedrotti, 2010).

*La curva di sensibilità al fotodegrado.* La capacità di un fotone di attivare o meno una reazione fotochimica dipende dall'energia che esso può scambiare con la particella con cui collide. Ogni radiazione luminosa trasporta un'energia specifica inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda (equazione di Planck) assorbita dal materiale. Successivamente le molecole attivate interagiscono tra loro secondo il loro grado di compatibilità dando l'avvio a possibili trasformazioni chimiche. Ad ogni sostanza viene quindi attribuito un parametro con cui è indicata la possibilità di innesco di una reazione fotochimica quando essa è colpita da una radiazione elettromagnetica di determinata lunghezza d'onda. Tale parametro è denominato curva di sensibilità, espresso generalmente con la seguente formula (CIE, 2004):

$$s(\lambda)_{dm,rel} = \alpha(\lambda) \frac{1}{\lambda} f(\lambda)$$

in cui i vari termini rappresentano rispettivamente:

$s(\lambda)_{dm,rel}$  = sensibilità spettrale relativa del materiale in oggetto

$\alpha(\lambda)$  = coefficiente spettrale di assorbimento dello stesso

$f(\lambda)$  = funzione caratteristica del materiale in oggetto

Una radiazione a una specifica lunghezza d'onda incidente sulla superficie di un qualsiasi materiale presenta, nei suoi confronti, un potenziale di danno determinabile dalla curva di sensibilità del materiale stesso. La curva di sensibilità spettrale relativa di un materiale rappresenta l'entità del danno subito dallo stesso quando assorbe una radiazione di lunghezza d'onda  $\lambda$ , espresso come variazione di colore, normalizzata al valore massimo registrato. Dall'andamento di tale curva, quindi, è possibile conoscere quali sono le componenti spettrali da evitare nella sollecitazione radiante che illumina l'oggetto ai fini della sua preservazione o quanto meno in che misura devono essere limitate. Diversi ricercatori hanno realizzato modelli con curve di sensibilità e coefficienti caratteristici delle categorie principali degli oggetti esposti all'interno dei musei, dedotti da prove di invecchiamento accelerato effettuate su un gran numero di campioni appartenenti a tali categorie. Nei test di esposizione forzata sono stati utilizzati filtri in modo da selezionare singole bande di radiazioni nel campo del visibile e poter considerare singolarmente l'incidenza di ciascuna sulla variazione di colore. Confrontando i risultati raggiunti, è stato ricavato che tutte le categorie hanno sensibilità notevolmente maggiore per le basse lunghezze d'onda, cioè le radiazioni prossime al blu e il violetto, rispetto a quelle più alte. Inoltre, i vari materiali mostrano comportamenti simili all'esposizione alle radiazioni luminose, con eccezione della carta da giornale che appare la più sensibile tra tutti (Pedrotti, 2010).

*Curva di danno e indice di danno.* Data una sorgente luminosa ovvero un sistema di illuminazione, inteso come l'insieme di sorgenti e relativi filtri correttivi, si vuole conoscere quanto le sue emissioni siano effettivamente utili per la visione degli oggetti che andrà ad illuminare e non dannose, considerata la fotosensibilità degli stessi. A questo scopo si introduce l'indice di danno di una data illuminazione o di un sistema composto di sorgenti e filtri correttivi, definito come il rapporto tra la quota di energia radiante della sorgente o del sistema illuminante che provoca fotodegrado, denominato flusso di danno

relativo, e il flusso luminoso complessivo. La conoscenza di tale parametro serve a titolo di confronto fra diversi sistemi di illuminazione adottati. È possibile confrontare più sorgenti o sistemi tra di loro, determinando quello con il minore impatto dannoso a parità di flusso luminoso emesso.

In alternativa, si possono utilizzare le curve di danno. Queste curve indicano la quantità di energia radiante massima che può essere assorbita dal bene per una specifica lunghezza d'onda durante il suo periodo di esposizione, prima di subire un cambiamento percepibile dall'occhio umano. Sapendo che l'energia radiante è pari al prodotto tra l'irraggiamento e il tempo di esposizione, se si fissa quest'ultimo sulla base dei dati del progetto, si ricava il massimo valore di irraggiamento possibile che può incidere sulla superficie in esame per ogni componente spettrale che soddisfi le condizioni di danno imposte. Partendo da questo dato e conoscendo le condizioni di riflessione del luogo dove è esposto il bene, le posizioni delle sorgenti e le loro interdistanze con gli oggetti da illuminare, è possibile ipotizzare l'andamento dello spettro che meglio accorda con le condizioni fissate (Pedrotti, 2010).

#### *6.2.1.2. Temperatura e umidità*

La temperatura di un oggetto esposto al sole dipende dall'energia solare e dalle condizioni di esposizione dell'oggetto quali la ventilazione e la temperatura dell'ambiente che lo circonda. Il rilevamento della temperatura dell'ambiente, dell'aria in prossimità dell'oggetto e di quest'ultimo permette di definire le sollecitazioni termiche cui l'oggetto è sottoposto. Al variare delle condizioni esterne, possiamo avere aumento o diminuzione di temperatura. Riguardo la prospettiva di deterioramento occorre parlare di temperature non corrette. Vi sono tre categorie di temperature non corrette: temperatura troppo alta; temperatura troppo bassa; rapide variazioni di temperatura. Gli effetti sui materiali dipenderanno da: velocità nel tempo del riscaldamento e del raffreddamento; intensità e quantità di calore trasferito; tipo di materiale e di superficie; per cui ogni oggetto e ogni materiale avranno differenti sensibilità a ciascuno di essi dovrà essere considerato in maniera specifica. L'aumento di temperatura negli ambienti interni può causare molteplici processi di degrado (AA. VV., 2007):

- accelerazione dei processi chimici: la velocità delle reazioni chimiche dipende dalla temperatura; le temperature più elevate riducono l'energia di attivazione e consentono di accelerare i processi di degradazione chimica;

- accelerazione dei processi fisici: il trasporto di acqua e di energia termica, le evaporazioni, le migrazioni di acqua e di Sali, il trasporto e il deposito di microinquinanti aerodispersi provocano dilatazioni e contrazioni che possono causare microfratture che modificano la resistenza del materiale all'ambiente;

- differenti espansioni nei materiali e sforzi di tensione tra le superfici e le strutture sottostanti (distacco di pellicole superficiali, formazione di fessurazioni, perdita di materiale, ecc.). I danni sono tanto maggiori quanto più rapidi sono i cicli di variazione. Quanto più brevi sono le fluttuazioni tanto più sottile è lo strato influenzato da esse: poiché le parti di maggior valore artistico dei monumenti si trovano sulla superficie, i cicli di temperatura giornalieri (o

più brevi) sono più determinanti di quelli stagionali;

- perdita delle caratteristiche meccaniche a causa della disidratazione parziale che aumenta il livello di fragilità del materiale se l'umidità non viene mantenuta stabile;
- accelerazione dei processi biologici (Camuffo, 1998).

Le basse temperature nel complesso sono vantaggiose, ma alcuni materiali, come le vernici, diventano più fragili. Basse temperature possono anche causare fenomeni di gelo e di cristallizzazione dei sali con effetti distruttivi determinati dal tensionamento meccanico provocato dalla formazione di cristalli di ghiaccio o di sale all'interno di un sistema di pori.

Le variazioni di temperatura sono correlate con le variazioni di umidità relativa e con i problemi da essa derivanti. L'umidità relativa, intesa come rapporto fra il contenuto d'acqua presente in un volume d'aria e quello di saturazione, è influenzata dalla temperatura, ma anche dalle caratteristiche di igroscopicità dei materiali. La buona conservazione dei beni culturali dipende in larga parte dall'umidità relativa dell'aria poiché l'acqua può contribuire a processi di degrado, sia allo stato di liquido che a quello di solido o di vapore. In realtà, molto spesso risulta difficile distinguere il degrado dovuto alla temperatura da quello dovuto all'umidità relativa, in quanto tra i due parametri esiste una stretta sinergia nella determinazione del danno; in ogni caso, è da sottolineare che l'entità dei danni indotti da ciascun parametro o dalla combinazione di essi dipende soprattutto dalla natura dei materiali, dalla geometria dell'oggetto, dal tempo di esposizione, dalla magnitudo del fattore di danno (concentrazione del contaminante o scostamento dai valori ottimali per umidità e temperatura) e dal tipo di meccanismi di deterioramento (D'Agostino, 2006). L'umidità ambientale può avere influenza:

- sulle reazioni chimiche: scolorimento dei colori, corrosione dei metalli, ossidazione, idratazione, cristallizzazione e dissoluzione di sali, idrolisi, ecc. Questi meccanismi generano danni in maniera cumulativa. In genere, la velocità del degrado cresce con l'attività dell'acqua adsorbita e quindi con l'umidità relativa dell'aria (sopra il 45-50%) ed è influenzata dalla natura e dalla quantità di sostanze inquinanti l'aria; ad esempio la presenza di cloruri accelera l'ossidazione di acciai e bronzi già al di sopra del 40-45% di umidità relativa e in ambiente urbano l'acqua è anche il veicolo per mezzo del quale gli inquinanti atmosferici possono interagire facilmente con le rocce carbonatiche interessate da processi di carbonatazione e solfatazione.

- sulle dimensioni e sulla forma degli oggetti, a causa delle variazioni di umidità relativa, con rotture e deformazioni per manufatti più sensibili come il legno;

- sulle sorgenti del deterioramento biologico, poiché la velocità del degrado aumenta con l'attività dell'acqua sul substrato e quindi con l'umidità relativa dell'aria a contatto. L'alta umidità dell'aria e/o la periodica disponibilità di acqua liquida, entro un certo intervallo di temperatura, rendono infatti possibile lo sviluppo di colonie di microrganismi capaci di produrre danni.

### 6.2.2. Parametri biologici

Le cause di degrado di tipo biologico sono dovute all'instaurazione e allo sviluppo di colonie di microrganismi (funghi, batteri), che con il proprio ciclo vitale possono interferire con i materiali costituenti i beni culturali. Sulle superfici dei manufatti sono presenti strutture biologiche, quali spore, conidi, cellule vegetative. Se queste strutture biologiche sono in via di sviluppo si può parlare di biodeterioramento. Nella categoria dei biodeteriogeni vanno compresi non solo i microrganismi, ma anche gli organismi come insetti, uccelli, roditori, ecc., nonché le piante infestanti. Un bene è soggetto all'attacco biologico tutte le volte che le condizioni fisico-chimiche del substrato e dell'ambiente circostante sono compatibili con le caratteristiche genetiche e biologiche di un organismo o microrganismo.

La temperatura è un fattore condizionante gli organismi viventi in quanto influenza la cinetica delle loro reazioni biochimiche. Gli organismi hanno condizioni ottimali di vita in un range di temperatura specifico per ogni specie. In relazione alle condizioni di temperatura possiamo classificare gli organismi in:

- Psicrofili: si sviluppano ad una temperatura tra 0°e 10°C
- Mesofili: si sviluppano ad una temperatura tra 25°e 35°C
- Termofili: si sviluppano ad una temperatura tra 30°e 50°C

Per la maggior parte delle specie, valori ottimali di umidità relativa sono quelli superiori al 65-70%. Quando si raggiungono contemporaneamente elevati valori di temperatura e umidità, l'attacco biologico sui materiali raggiunge il massimo sviluppo. La luce rappresenta un importantissimo fattore favorente la crescita degli organismi fotosintetici (alghe, licheni, briofite, piante superiori). In base alla quantità di luce abbiamo specie eliofile, caratteristiche di ambienti assolati e sciafile o ombrofile che vivono in ambienti scarsamente illuminati e hanno fotosintesi in regime di bassa irradiazione. Negli ambienti ipogei, in zone di maggiore illuminazione artificiale o naturale, si può avere un grande sviluppo di specie biologiche.

Il biodeterioramento dei materiali avviene con meccanismi diversi: i processi chimici (decomposizione) comprendono tutti quei meccanismi che portano ad una decomposizione o trasformazione del substrato dovuti all'attività chimica degli organismi (corrosione, dissolvimento, ecc.), ad esempio attraverso la produzione di acidi e pigmenti; i processi fisici (disgregazione) comprendono tutti quei meccanismi che portano al distacco di frammenti causati dalla pressione esercitata dalla crescita degli organismi o delle loro parti, in particolare le radici (Caneva et al., 2005).

### 6.2.3. Materiali dei reperti

I reperti presenti in un sito archeologico possono essere costituiti da materiali molto differenti fra loro e con risposte all'impatto delle condizioni ambientali molto diversificate e possono essere composti da più tipi di materiale. In termini generali, distinguiamo i materiali inorganici, costituiti da minerali, come i metalli, i materiali lapidei e le malte, e i materiali organici, provenienti dal mondo vegetale e animale, come il legno e i pigmenti organici. Tra gli elementi aggiunti per motivi di restauro possono essere presenti anche le materie pla-

stiche, come nel caso di materiali utilizzati per la protezione, il consolidamento o l'incollaggio. Non è raro che vengano utilizzati materiali a base di resine acriliche, viniliche o siliciche, come ad esempio molti pigmenti, elementi di supporto o di decorazione e supporti per il ricollocamento di strappi di affreschi. I materiali inorganici costituiscono una larga parte dei beni archeologici e sono in genere sottoposti a lento ma inesorabile invecchiamento. Si tratta di materiali teoricamente più tolleranti rispetto ai materiali organici che costituiscono beni più vulnerabili. Luce, temperatura e umidità sono tutti importanti fattori ambientali di rischio che devono essere monitorati (AA. VV., 2007).

L'irraggiamento sui materiali inorganici può essere causa diretta di danni (alterazioni cromatiche, scolorimento, ecc.), ma anche indiretta, in quanto può facilitare lo sviluppo di organismi foto autotrofi in presenza di elevati contenuti d'acqua dei materiali. Nel caso di materiali organici le radiazioni possono provocare trasformazioni chimiche importanti. Dato che l'energia trasportata aumenta con l'aumentare della frequenza, l'effetto dell'irraggiamento diventa più importante nella banda della radiazione ultravioletta. In sinergia con l'ossigeno dell'aria, queste radiazioni causano processi di ossidazione e/o polimerizzazione, accompagnati da ingiallimento o imbrunimento delle sostanze incolori e dalla perdita di colore di molti coloranti organici. Si verificano anche variazioni delle proprietà meccaniche (irrigidimento, infragilimento) e fisiche (perdita della solubilità e dell'idrorepellenza) (Marino, 2009).

Per quanto riguarda la temperatura e le oscillazioni termiche, materiali diversi reagiscono diversamente. Ad esempio, le ceramiche sono vulnerabili al calore a livello meccanico, ma molti materiali organici sono più a rischio di subire transizione di fase se la temperatura diventa troppo fredda (Erhardt et al., 2007). La dilatazione termica che tutti i materiali subiscono quando sono riscaldati dipende dalla variazione di temperatura, dalla lunghezza dell'oggetto e anche dalla natura del materiale. I materiali che si dilatano meno sono quelli che contengono i legami chimici più forti. Le variazioni di temperatura giornaliere e stagionali provocano quindi continui cambiamenti di dimensioni, specialmente per gli oggetti esposti all'esterno e soprattutto per quelli direttamente raggiunti dalle radiazioni solari. Se questi movimenti sono impediti da vincoli, si origina un tensionamento sia all'interno dell'oggetto vincolato che dei materiali che lo contrastano. Tensionamenti su scala microscopica si verificano in materiali composti da aggregati disordinati di cristalli minerali abbastanza grandi (ad esempio marmo e granito), che presentano una dilatazione termica variabile in funzione della direzione (anisotropia). A lungo andare, e in sinergia con la presenza di acqua e di acidi provenienti dall'aria, i contrasti tra i cristalli possono provocare una decoesione della struttura cristallina (Camuffo, 1998).

Per tutte le categorie di materiali l'acqua può contribuire a processi di degrado, sia allo stato di liquido che a quello di solido o di vapore. L'acqua allo stato liquido può entrare in contatto con le superfici dei materiali come velo liquido formato da fenomeni di condensazione di umidità, che trasportano sui materiali molte delle impurità solide (particelle) e gassose (gas inquinanti) presenti nell'atmosfera. I fenomeni di condensazione rendono quindi possibile l'azione fisica e chimica dell'acqua liquida anche su superfici protette dalla pioggia.

gia. L'acqua allo stato di vapore agisce sui materiali in tutte le condizioni di esposizione. I materiali igroscopici hanno la capacità di assorbire umidità dell'aria, i materiali idrofili hanno la capacità di assorbire acqua in forma liquida. Piante e animali contengono un'alta percentuale di acqua, pertanto i loro prodotti, i materiali organici, come il legno, conservano umidità. Tali materiali possono assorbire o emettere umidità fino a raggiungere uno stato di equilibrio con l'aria che li circonda. In genere, essi hanno una certa elasticità nella loro risposta alle oscillazioni di umidità relativa e possono dilatarsi o contrarsi, se necessario. Questo fenomeno è reversibile entro un intervallo del  $50 \% \pm 15 \%$  di umidità relativa. Quando l'aria circostante è molto umida (alta umidità relativa), possono subire deformazioni plastiche irreversibili e perdere resistenza. Quando l'aria circostante è molto secca (bassa umidità relativa), tali materiali rilasciano parte della loro umidità e possono diventare più rigidi e fragili, restringersi, deformarsi, spaccarsi o rompersi. Dato che l'assorbimento di acqua provoca un aumento delle dimensioni del materiale e il fenomeno opposto (desorbimento) una diminuzione, le oscillazioni dell'umidità atmosferica provocano continui movimenti, stress interno e tensionamenti meccanici se il materiale è vincolato ad altri che subiscono minori variazioni dimensionali. Inoltre, l'espansione di un materiale può forzare cambiamenti nelle dimensioni di un altro, provocando forti tensioni e danno; è il caso ad esempio dei dipinti su pannelli di legno: lo strato di pittura costituisce una barriera al vapore e quindi gli scambi evaporativi tra tavola e aria sono praticamente localizzati solo sulla superficie del lato "nudo" della tavola; ciò comporta che gli strati più esterni sono quelli soggetti a variazioni dimensionali più rilevanti, che inducono deformazioni plastiche irreversibili, causa della caratteristica forma convessa dell'intera tavola (Lorusso, 1995).

I materiali idrofili hanno una struttura polare e sono capaci di attirare l'acqua nel proprio interno per le particolari caratteristiche dell'acqua determinate dalla "polarità" delle sue molecole. Ciò avviene ad esempio nei materiali da costruzione porosi (pietre, mattoni, malte), che attraggono l'acqua nei pori più fini (capillari) dando luogo a processi di degrado, sia a bassa temperatura, con la formazione di cristalli di ghiaccio, che a temperature medio-alte, se l'acqua evapora lasciando nei pori cristalli formati dai sali solubili che essa conteneva. Il passaggio dallo stato liquido a quello solido può avere effetti distruttivi per il materiale poroso, legati alla formazione dei cristalli di ghiaccio all'interno dei pori. Il ripetersi dei cicli di gelo-disgelo e cristallizzazione - dissoluzione dei sali può portare alla rapida distruzione della struttura porosa originale, con l'apertura di micro e macrofratture, al conseguente aumento della porosità e alla crescente deperibilità del materiale (Torraca, 2005).

L'acqua contribuisce al degrado chimico di tutti i materiali dato che, a temperatura ambiente, la massima parte delle reazioni chimiche richiede la sua presenza. Essa può determinare degrado per fenomeni di reazione chimica (ossidazione, idratazione, dissoluzione, idrolisi, ecc.) fra il materiale in opera e composti reattivi originati dall'atmosfera naturale o inquinata che determinano la produzione di composti di reazione, con cambiamento della composizione chimica del materiale, conducente a perdite o alterazioni di materia. I materiali che hanno un tenore di sale naturale possono subire efflorescenze quando l'aria è secca:

i sali nei laterizi porosi sono ad esempio portati in superficie a causa dell'umidità entrata nei pori durante un periodo di maggiore umidità; una volta che l'acqua evapora, i sali che si concentrano sulla superficie si cristallizzano. I metalli, in particolare ferro e leghe di rame, si corrodono. Coloranti e pigmenti sbiadiscono più facilmente.

La presenza dell'acqua è la condizione necessaria anche per il degrado microbiologico: l'alta umidità dell'aria e/o la periodica disponibilità di acqua liquida, entro un certo intervallo di temperatura, rendono infatti possibile lo sviluppo di colonie di microrganismi (alghe, funghi, licheni, batteri) capaci di produrre danni sia su materiali organici che su quelli inorganici.

#### **6.2.4. Standard per la conservazione**

Nel campo dei beni culturali e in particolare per quanto riguarda l'ambiente di conservazione, il processo di standardizzazione dei parametri che direttamente o indirettamente possono nuocere alla conservazione non può limitarsi alla redazione di ferree regole universalmente valide, ma deve introdurre il concetto di standard come insieme di criteri, indicazioni e provvedimenti necessari per un idoneo programma conservativo. In ambito museale creare uno standard non ha lo stesso significato che siamo abituati a riscontrare in altri settori, ad esempio non è sempre possibile associare ad un antico manufatto dei validi e universali parametri ambientali di riferimento e un protocollo di misura, per il semplice fatto che ogni singolo bene è unico e particolare, possiede una propria storia ed è oggetto tutt'altro che "standard".

La complessità e varietà degli oggetti e dei materiali che costituiscono il patrimonio culturale, unitamente alla diversità geografica e climatica dei luoghi in cui essi si trovano, rendono difficoltosa l'unificazione degli standard e dei documenti pubblicati, nonostante l'intensa attività di organizzazioni internazionali quali ICCROM e ICOM. Per affrontare in maniera concreta i molti problemi della conservazione occorre selezionare e adattare in modo critico la notevole quantità di documenti che oggi sono disponibili presso diverse istituzioni. È possibile diversificare gli standard esistenti a livello internazionale in: legislativi, normativi, tecnici, etici o deontologici, procedurali e linee guida.

Nello specifico dei parametri ambientali, gli standard hanno lo scopo di: identificare i parametri di rischio; fornire metodi di valutazione; offrire criteri di scelta; suggerire valori ottimali per i diversi materiali; dare indicazioni sulle tipologie di danno che possono verificarsi; dare disposizioni sulle modalità di esposizione e sui materiali adatti agli allestimenti; regolamentare le procedure di monitoraggio ambientale; fornire indicazioni sulle soluzioni derivanti dal monitoraggio; creare archivi di dati per ottenere maggiori risultati rispetto al rischio di danno nel tempo (D'Agostino, 2006).

#### 6.2.4.1 Le leggi in Italia

L'introduzione del concetto di "standard" in ambito museale in Italia avviene grazie al D. Lgs. 112/98, che prevede che «con proprio decreto il *Ministero per i Beni Culturali e Ambientali* definisca i criteri tecnico - scientifici e gli standard minimi da osservare nell'esercizio delle attività trasferite, in modo da garantire un adeguato livello di fruizione collettiva dei beni, la sicurezza e la prevenzione dei rischi» (art. 150, comma 6).

Da qui segue l'elaborazione del *Decreto Ministeriale 10 Maggio 2001*, "Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei (Art. 150, comma 6, D.L. n. 112/1998)", redatto da un gruppo tecnico di lavoro composto da rappresentanti del *Ministero per i Beni e le Attività culturali*, delle *Regioni*, dell'*ANCI (Associazione Nazionale dei Comuni d'Italia)* e dell'*UPI (Unione delle Province d'Italia)*. Esso fornisce i criteri tecnico - scientifici e gli standard minimi da osservare, in modo da garantire la sicurezza e la prevenzione dei rischi negli ambienti museali. L'Atto di indirizzo identifica le otto attività, denominate ambiti, di ogni museo (status giuridico, assetto finanziario, struttura del museo, personale, sicurezza del museo, gestione e cura delle collezioni, rapporti del museo con il pubblico e relativi servizi, rapporti con il territorio), fornendo schede tecniche che evidenziano quali requisiti minimi rispettare per garantire un buon servizio. In particolare, nell'*Ambito VI – Gestione e cura delle collezioni*, si individuano come prioritarie la gestione e la cura delle collezioni in quanto rappresentano l'elemento costitutivo e la ragion d'essere di ogni museo; si raccomanda di osservare precisi criteri di conservazione preventiva, attraverso il monitoraggio delle condizioni ambientali, al fine di garantire la sicurezza delle opere; viene fornito un elenco dettagliato di parametri fisici, chimici e biologici da monitorare e si suggeriscono valori di riferimento per assicurare le condizioni ottimali di conservazione dei manufatti. Nel *Sottoambito 1* si trattano le norme per la conservazione e il restauro, comprendenti l'esposizione e la movimentazione. All'interno di tale sottoambito troviamo delle sezioni dedicate ai parametri ambientali e ai contenitori espositivi (vetrine, clima box e simili).

Un altro merito dell'atto di indirizzo è che, sulle base delle disposizioni contenute in esso, diverse Regioni, come Emilia-Romagna, Liguria, Lazio, Lombardia, Marche e Toscana, stanno lavorando per adeguarsi agli standard. Da questo progressivo adeguamento agli standard museali operato dalle Regioni è emerso in più casi (Lombardia e Marche) che nei musei vi è una effettiva carenza o mancanza di quelle azioni di conservazione preventiva che dovrebbero essere parte integrante della gestione e cura delle collezioni. Per quanto concerne il monitoraggio microclimatico, ad esempio, nelle Marche solo il 13% dei musei effettua un controllo igrometrico e il 20% un controllo termico, per altro con risultati non accettabili. In ogni caso, la recente attività delle Regioni appare rivolta all'elaborazione di una via italiana agli standard museali che tenga conto della realtà storica dei musei del nostro paese, del quadro istituzionale e delle significative differenze territoriali esistenti.

Con il *D.L. n. 42 del 22 Gennaio 2004*, il Governo ha varato il "Codice dei beni culturali e del paesaggio", ai sensi dell'*articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137*, così come modi-

ficato dal D. Lgs. 24 marzo 2006, n. 156 e D. Lgs. 24 marzo 2006, n. 157 nonché dal D. Lgs. 26 marzo 2008, n. 62 e D. Lgs. 26 marzo 2008, n. 63, che fornisce uno strumento per difendere e promuovere il patrimonio culturale, anche attraverso il coinvolgimento degli Enti Locali. Il *Codice dei beni culturali e del paesaggio* è un corpo organico di disposizioni in materia di beni culturali e beni paesaggistici; è il principale riferimento normativo italiano che attribuisce al *Ministero per i Beni e le Attività Culturali* il compito di tutelare, conservare e valorizzare il patrimonio culturale dell'Italia. Il Codice suddivide il "patrimonio culturale nazionale" in due tipologie di beni culturali: i beni culturali in senso stretto e i beni paesaggistici. In esso viene messa in evidenza la necessità del restauro preventivo, inteso come l'insieme di tutte le azioni mirate a garantire la conservazione del bene culturale, soprattutto in riferimento alla pericolosità del territorio sul quale il bene si trova. In particolare nella *Sezione II: Misure di conservazione, Articolo 29*, si legge: «La conservazione del patrimonio culturale è assicurata mediante una coerente, coordinata e programmata attività di studio, prevenzione, manutenzione e restauro. Per prevenzione si intende il complesso delle attività idonee a limitare le situazioni di rischio connesse al bene culturale nel suo contesto. Per manutenzione si intende il complesso delle attività e degli interventi destinati al controllo delle condizioni del bene culturale e del mantenimento dell'integrità, dell'efficienza funzionale e dell'identità del bene e delle sue parti» (AA. VV, 2007).

#### 6.2.4.2 Le norme tecniche nazionali e internazionali

Diversi organismi di unificazione, nazionali ed internazionali, emanano standard e norme tecniche su diversi settori. I principali enti normatori in Italia sono il *CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano)* per il settore della elettrotecnica e l'*UNI (Ente Nazionale Italiano di Unificazione)* per diversi settori industriali, commerciali e del terziario. In ambito europeo troviamo il *CEN (Comité Européen de Normalisation)* e in ambito internazionale l'*ISO (International Organization for Standardization)*. L'*UNI* ha come compiti principali quelli di elaborare norme che vengono sviluppate da organi tecnici ai cui lavori partecipano tutte le parti interessate in modo da: assicurare il carattere di trasparenza e condivisione; rappresentare l'Italia nelle attività di normazione a livello mondiale (*ISO*) ed europeo (*CEN*) per promuovere l'armonizzazione delle norme e agevolare gli scambi di prodotti e servizi; pubblicare e diffondere le norme tecniche. Nel panorama italiano la *UNI* ha cercato di rispondere all'esigenza di fornire indicazioni per la conservazione delle opere e nel settore dei beni culturali ha pubblicato diverse norme tecniche.

La *Commissione NorMaL (NORmalizzazione MAteriali Lapidei)*, nata nel 1977 su iniziativa di un gruppo di ricercatori del *CNR* e dell'*Istituto Centrale di Restauro*, ha definito metodologie unificate per lo studio dei materiali costituenti i manufatti; per lo studio delle alterazioni dei materiali (in principio solo lapidei ed in seguito anche dipinti murali, metalli, vetri e ceramiche) e per il controllo dell'efficacia dei trattamenti conservativi dei manufatti di interesse storico - artistico. Ha pubblicato 51 documenti, classificabili nelle categorie condizioni microclimatiche, malte, materiali lapidei, varie. In particolare, le *Normal 5* propongono metodi

di misura della concentrazione di alcuni inquinanti, dei parametri termoigrometrici indoor e outdoor e di alcuni parametri meteorologici.

Nel 1996 è stata stipulata una convenzione fra il *Ministero per i Beni Culturali e Ambientali* e l'*UNI*, "particolarmente sensibile ai problemi di normazione nel settore dei beni culturali". Scopo della convenzione, come cita l'art. 1, è quello di attivare una collaborazione finalizzata alla elaborazione comune di norme tecniche, valide a livello nazionale ed idonee ad essere proposte a livello europeo per la creazione di un corpo armonico nel campo del recupero e del restauro. In seguito a ciò, è stata attivata presso l'*UNI* (per il settore della conservazione del patrimonio storico-artistico nazionale) la attuale Commissione "Beni Culturali *UNI/Nor.Ma.L.*", diventata operativa nel 1997, il cui compito è quello di elaborare norme nazionali nel settore dei Beni Culturali, anche aggiornando i documenti *NorMaL*, con il trasferimento delle acquisizioni tecnologiche italiane in ambito europeo (*CEN*) ed internazionale (*ISO*) e la qualificazione delle "Raccomandazioni" sotto il profilo di vere e proprie norme tecniche. Quindi, a partire dalla fine degli anni '90, l'*Ente Nazionale Italiano di Unificazione*, unico tra gli enti normatori nazionali, ha emanato nel settore 29 norme classificabili nei seguenti argomenti: condizioni microclimatiche, ceramica, malte, manufatti lignei, materiali lapidei, strati pittorici (Complesso Museale Santa Maria della Scala, 2010).

Le principali norme che riguardano nello specifico i parametri per la conservazione e le condizioni microclimatiche sono:

*UNI 10829: 1999*. "Beni di Interesse storico e artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi". Il testo preparatorio alla stesura della norma deriva dal settore della termotecnica a cura del *Comitato Termotecnico Italiano* ("Climatizzazione dei musei: Analisi e valutazione delle condizioni ambientali, termiche, igrometriche e luminose per la conservazione di beni di interesse storico ed artistico", *La Termotecnica*, 4, 1994, pp. 43-50). La norma stabilisce le condizioni ambientali di conservazione dei beni di interesse storico e artistico e prevede il monitoraggio dei parametri microclimatici ai fini conservativi. Illustra la metodologia per la misurazione in campo di tali parametri termoigrometrici e di illuminazione e indica le modalità di elaborazione e sintesi dei dati rilevati allo scopo di contenere i processi di degrado. La norma parte dal presupposto che le grandezze fisiche ambientali da controllare, ai fini di evitare il degrado dei beni di interesse storico ed artistico in ambienti confinati, sono principalmente la temperatura e il grado igrometrico dell'aria, l'illuminamento e la quantità di radiazione ultravioletta, senza trascurare naturalmente la temperatura superficiale degli oggetti. Al fine di caratterizzare gli andamenti di queste grandezze, viene prescritta innanzitutto una metodologia per la loro misurazione in termini di rilievi spazio-temporali indicando anche le caratteristiche delle apparecchiature di misurazione; fornisce poi indicazioni relative alle modalità di elaborazione, sintesi e presentazione dei dati misurati. In essa sono, inoltre, riportati "a titolo indicativo", i valori di riferimento (in termini assoluti e di gradienti temporali) da considerarsi in mancanza di indicazioni specifiche diverse, per i parametri ambientali relativi alla conservazione di 33 categorie di materiali e oggetti e dei loro intervalli di variazione ritenuti accettabili. A tal riguardo la norma introduce

specifici indici per valutare la qualità microclimatica dell'ambiente interno: l'*Indice di Performance (IP)* oppure l'*Indice di Scostamento (IS)*. Il primo, riferito ad una specifica grandezza microclimatica, esprime "la percentuale di tempo in cui la grandezza in esame si mantiene all'interno del campo prescelto ritenuto accettabile". Il secondo invece, è relativo alle condizioni di conservazione ed è valutato come la percentuale di tempo, ovvero di punti misurati, per la quale i parametri ambientali rilevati cadono all'esterno della fascia di valori ritenuta accettabile. La norma riporta, infine, esempi di schede per la raccolta di informazioni sulla storia climatica cui il manufatto è stato sottoposto nel tempo al fine di evidenziare eventuali correlazioni con processi di degrado in atto nel manufatto stesso. Nella scheda sono previste informazioni sulla collocazione e sullo stato di conservazione dell'oggetto, sui valori massimi e minimi riscontrati delle grandezze ambientali significative nell'arco di un giorno tipo e sulle modalità e i dispositivi di controllo delle grandezze ambientali. Si tratta, in definitiva di una norma "di servizio", che dovrebbe costituire un ponte tra coloro che devono definire e imporre le condizioni per la conservazione, i conservatori, e coloro che devono realizzare tali condizioni, i progettisti, che devono progettare ambienti e impianti ad hoc.

*UNI 10969: 2002*. "Principi generali per la scelta e il controllo del microclima per la conservazione dei beni culturali in ambienti interni". La norma non fornisce alcuna informazione tecnica, ma costituisce una linea guida per la scelta e il controllo del microclima finalizzato alla conservazione dei beni culturali in ambienti interni, quali musei, gallerie, archivi, biblioteche, chiese e palazzi storici, ai fini della conservazione dei beni culturali. La norma si basa sull'assunto che il degrado dei materiali di cui sono costituiti manufatti e reperti naturali è un processo complesso, di natura cumulativa, dove intervengono sia il numero sia l'intensità dei singoli eventi forzanti, che ogni perturbazione ambientale contribuisce ad accelerare. La norma stabilisce principi generali cui possano attenersi i responsabili della conservazione. Secondo quanto essa prescrive, nella fase preliminare di indagine per la determinazione del microclima idoneo alla conservazione di un oggetto sono necessarie due tipi di azioni:

1. ricerca multidisciplinare integrata atta a individuare lo stato di conservazione dell'oggetto al presente e nel passato, la sua storia pregressa e i valori dei parametri microclimatici in cui è stato conservato;
2. analisi di laboratorio atte a rilevare i fenomeni di alterazione in relazione alla risposta dei materiali alle variazioni dei parametri ambientali.

Vengono poi date indicazioni, sempre a carattere generico, su come effettuare la scelta del microclima per la conservazione, in particolare tenendo conto sia dell'impatto diretto, in termini di valori assoluti e di gradienti spaziali e temporali, che questo ha sui materiali, sia di quello indiretto potendo favorire indesiderate reazioni chimiche, specie in presenza di inquinanti atmosferici, o realizzarsi un habitat favorevole a forme di degrado biologico. Seguono alcune linee guida che riguardano il rispetto per la storia microclimatica dell'oggetto, suggerimenti sulla scelta delle ubicazioni più adatte all'esposizione e sui rimedi per evitare indesiderate variazioni temporali o spaziali dei parametri ambientali.

Riguardo le norme *UNI* sul microclima, l'apporto della fisica applicata alle problematiche della conservazione affonda le sue radici nel tempo, in quanto da sempre negli ambienti conservativi è stata utilizzata l'impiantistica termotecnica; un contributo scientifico si è avuto però solo a partire dagli ultimi decenni del secolo scorso, quando in molti musei sono comparsi i primi impianti di climatizzazione per il controllo dei parametri termoigrometrici e della purezza dell'aria. Oggi, la ricerca effettuata a livello internazionale nell'ambito della fisica applicata e in Italia in quello della fisica tecnica ambientale, è giunta a risultati che vanno ben al di là della semplice progettazione dell'impianto; ne è un esempio chiaro il capitolo dell'*Handbook Fundamentals* dell'*ASHRAE* (*ASHRAE, 2003*) interamente dedicato alle problematiche dell'impiantistica museale.

Tra i documenti procedurali e linee guida italiani vi sono i documenti dell'*Istituto Centrale per il Restauro*. Nel 1997 l'*ICR* ha pubblicato "La carta del rischio del patrimonio culturale", che mette in evidenza la necessità del restauro preventivo, inteso come l'insieme di tutte le azioni mirate a garantire la conservazione del bene culturale, soprattutto in riferimento alla pericolosità del territorio sul quale i beni si trovano. In questo senso, il concetto di restauro preventivo è molto vicino a quello della manutenzione preventiva ed implica evidentemente interventi di tipo multidisciplinare, tesi a definire lo stato di conservazione di un bene e ad intervenire per evitare il degrado.

A ulteriore conferma dell'interesse di creare standard internazionali anche nel settore dei beni culturali, va registrata la costituzione del comitato tecnico europeo *CEN/TC 346 N.2: Conservation of Cultural Property*, che ha il compito di produrre norme tecniche, linee guida e norme sperimentali sulla terminologia e sui metodi di prova e di analisi impiegati per la caratterizzazione tecnico-scientifica dei materiali e dei diversi processi di deterioramento dei beni culturali. I cinque Gruppi di Lavoro in cui è suddiviso il *CEN/TC 346* sono i seguenti:

1. il *Gruppo di Lavoro WG1, Linee Guida e Terminologia*, che ha la responsabilità di produrre linee guida che definiscano la pianificazione degli interventi conservativi e di studiare norme sulla terminologia ed il lessico del degrado dei beni mobili ed immobili;

2. il *Gruppo di Lavoro WG2, Materiali costituenti i manufatti*, che si occupa della pubblicazione di norme tecniche sulla caratterizzazione dei materiali costituenti i beni culturali e sui relativi metodi di prova ed analisi, inclusa la valutazione dello stato di conservazione;

3. il *Gruppo di Lavoro WG3, Interventi conservativi*, che ha il compito di redigere documenti tecnici sulla valutazione delle prestazioni dei prodotti e dell'adeguatezza delle metodologie utilizzate nel restauro e nella manutenzione dei beni culturali;

4. il *Gruppo di Lavoro WG4, Ambiente*, che è incaricato di produrre linee guida e norme relative ai controlli delle variabili ambientali e alla misurazione delle condizioni ambientali, nonché alle interazioni ambiente/manufatto;

5. il *Gruppo di Lavoro WG5, Imballaggio e trasporto*, che si occupa di norme che stabiliscano i requisiti per i contenitori per l'esposizione, l'imballaggio ed il trasporto dei manufatti.

Di seguito si elencano le norme relative ai parametri microclimatici:

- EN 15251:2007, "Indoor environmental input parameters and assessment of energy performance of buildings, addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics", propone, in linea con la norma italiana precedentemente introdotta, un metodo di certificazione e classificazione della qualità dell'ambiente interno, indicando quali metodi di misurazione e monitoraggio seguire.

- EN 15757:2010, Conservation of Cultural Property - Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials.

- EN 15759-1:2011, Conservation of cultural property - Indoor climate - Part 1: Guidelines for heating churches, chapels and other places of worship.

Rispetto al problema della conservazione, nel catalogo dell'ISO (*International Standardization Organization*) non esistono norme per il settore della conservazione, se non standard

Numero	Anno	Titolo
<i>Condizioni microclimatiche</i>		
10586	1997	Condizioni climatiche per ambienti di conservazione di documenti grafici e caratteristiche degli alloggiamenti
10829	1999	Beni di interesse storico artistico - Condizioni ambientali di conservazione - Misurazione ed analisi
10969	2002	Beni culturali - Principi generali per la scelta e il controllo del microclima per la conservazione dei beni culturali in ambienti interni
11120	2004	Beni culturali - Misurazione in campo della temperatura dell'aria e della superficie dei manufatti
11131	2005	Beni culturali - Misurazione in campo dell'umidità dell'aria
<i>Ceramica</i>		
10379	1998	Beni culturali - Tecnologia ceramica - Termini e definizioni
11084	2003	Beni culturali - Materiali ceramici - Caratterizzazione
<i>Malte</i>		
10924	2001	Beni culturali - Malte per elementi costruttivi e decorativi - Classificazione e terminologia
11088	2003	Beni culturali - Malte storiche e da restauro - Caratterizzazione chimica di una malta - Determinazione del contenuto di aggregato siliceo e di alcune specie solubili
11089	2003	Beni culturali - Malte storiche e da restauro - Stima della composizione di alcune tipologie di malte
11139	2004	Beni culturali - Malte storiche - Determinazione del contenuto di calce libera e di magnesia libera
11140	2004	Beni culturali - Malte storiche - Determinazione del contenuto di anidride carbonica
<i>Manufatti lignei</i>		
11118	2004	Beni culturali - Manufatti lignei - Criteri per l'identificazione delle specie legnose
11119	2004	Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Ispezione in situ per la diagnosi degli elementi in opera
11130	2004	Beni culturali - Manufatti lignei - Terminologia del degradamento del legno
11138	2004	Beni culturali - Manufatti lignei - Strutture portanti degli edifici - Criteri per la valutazione preventiva, la progettazione e l'esecuzione di interventi
11141	2004	Beni culturali - Manufatti lignei - Linee guida per la datazione dendrocronologica del legno
<i>Materiali lapidei</i>		
10813	1999	Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Verifica della presenza di microrganismi fotosintetici su materiali lapidei mediante determinazione spettrofotometrica UV/Vis delle clorofille a, b e c
10859	2000	Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Determinazione dell'assorbimento d'acqua per capillarità.
10921	2001	Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Prodotti idrorepellenti - Applicazione su provini e determinazione in laboratorio delle loro caratteristiche.
10922	2001	Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Allestimento di sezioni sottili e sezioni lucide di materiali lapidei colonizzati da biodeteriogeni.
10923	2001	Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Allestimento di preparati biologici per l'osservazione al microscopio ottico
10925	2001	Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Metodologia per l'irraggiamento con luce solare artificiale
11060	2003	Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Determinazione della massa volumica e della percentuale di vuoti
11085	2003	Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Determinazione del contenuto d'acqua: metodo ponderale
11086	2003	Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Determinazione del contenuto d'acqua di equilibrio
11087	2003	Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Determinazione del contenuto di sali solubili
11121	2004	Beni culturali - Materiali lapidei naturali ed artificiali - Determinazione in campo del contenuto di acqua con il metodo al carburo di calcio
<i>Strati pittorici</i>		
10945	2001	Beni culturali - Caratterizzazione degli strati pittorici - Generalità sulle tecniche analitiche impiegate

Fig. 5 - Tabella Normativa UNI nel settore dei Beni Culturali.

specifici su materiali fotografici, ed una norma che indica i requisiti generali di un luogo adibito alla conservazione a lungo termine di materiali di archivio e di biblioteca.

Nel panorama internazionale non esistono vere e proprie leggi a cui riferirsi nella definizione di standard di qualità per i musei, ma diverse istituzioni ed enti pubblici o privati si sono organizzati attraverso il sistema dell' "accreditation", come quello promosso dall' *American Association of Museums (AAM)*. Si tratta di un programma di certificazione di qualità che attesta che "l'istituzione opera a tutti i livelli secondo i più elevati e attuali standard e pratiche professionali e adempie ai suoi doveri nei confronti del pubblico così come è previsto dalla sua missione". Dal 1971 ad oggi sono stati accreditati centinaia di musei americani di varie tipologie e dimensioni che attirano visitatori, prestiti, mostre temporanee, grazie anche alla accresciuta credibilità data dall'accreditation. L' *accreditation* consiste in un'autovalutazione della durata di un anno, seguita da un esame da parte di una apposita commissione. Per partecipare ed ottenere l'accreditamento, il museo deve possedere alcuni requisiti. L'AAM è uno dei 116 Comitati Nazionali che costituiscono le unità fondamentali dell' *ICOM (International Council of Museums)* e i principali strumenti di comunicazione fra i suoi soci in tutto il mondo. Il compito del Comitato Nazionale è quello di curare gli interessi dell' *ICOM*, rappresentare i suoi soci e contribuire alla realizzazione dei programmi dell' *ICOM*. Nel codice deontologico dell' *ICOM*, adottato nel 1986, compare il concetto di "standard minimi per i musei" e in particolare si legge che "in alcuni paesi, gli standard minimi relativi alle finanze del museo, ai locali, al personale e ai servizi sono definiti per legge o con altro atto governativo. In altri paesi, i criteri di indirizzo e la valutazione degli standard minimi sono dati sotto forma di "accreditamento", "registrazione" o di analogo schema valutativo. Qualora non esistano definizioni di tali standard a livello locale, si possono ottenere direttive dal Comitato nazionale, dal Comitato internazionale competente in materia o dalla Segreteria dell' *ICOM*. Per quanto concerne in dettaglio la gestione e cura delle collezioni, si stabilisce che "Tutti i professionisti museali cui sono affidati oggetti ed esemplari devono fare in modo di creare e mantenere un ambiente atto a proteggere le collezioni, siano esse in deposito, in esposizione o in corso di trasporto. Tale conservazione preventiva costituisce un fattore importante nella gestione dei rischi di un museo".

Anche in Gran Bretagna, *The Museums, Libraries and Archives Council (MLA)* ha promosso il "Museum Registration Scheme", adottato dalla *Museums & Galleries Commission* nel 1988 e rinominato nel 2004 in "Accreditation". All'interno degli "Accreditation Standards" vengono fissate le azioni per ridurre il rischio di danno sulle opere. Per quanto concerne il controllo del microclima, si afferma la necessità di attuare un monitoraggio ambientale per avvertire lo staff su condizioni ambientali potenzialmente pericolose, attraverso la misura di umidità relativa, temperatura e livelli di illuminamento, utilizzando strumentazione semplice o sofisticata. *The Museums & Galleries Commission* ha inoltre pubblicato diversi rapporti contenenti standard destinati alle diverse tipologie di collezioni: archeologiche (*Museums & Galleries Commission, Standards in the Museum Care of Archaeological Collections*, London 1992), biologiche, tessili, geologiche, strumenti musicali, fotografie, ecc.

In Francia, la *Direction de Musées de France*, con sede a Parigi, ha pubblicato “Museo-fiches” (1993-1999), dove vengono date indicazioni su tutte le misure da valutare per ottenere un microclima adatto alla conservazione: umidità relativa e temperatura, attrezzature museografiche, sicurezza (Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, *Vademecum de la conservation preventive*, Paris 2006).

Generalmente all'estero si assiste al nascere di linee guida, studi e pubblicazioni sul tema della conservazione da parte di diverse istituzioni, pubbliche e private. È questo il caso del *Northeast Document Conservation Center (NEDCC)*, un centro di conservazione no profit negli Stati Uniti che si occupa di migliorare i programmi di prevenzione di biblioteche, archivi e musei e incrementare la qualità dei servizi in queste istituzioni. I “pieghevoli” messi a disposizione sul sito web, danno indicazioni su strategie di conservazione preventiva, sui parametri microclimatici e di illuminamento, sulle procedure in caso di emergenza fino alla manipolazione e imballaggio degli oggetti.

Anche il *Getty Conservation Institute (GCI)* del *Paul Getty Museum* è impegnato a livello internazionale nel campo della conservazione attraverso ricerche scientifiche, progetti in campo, formazione e diffusione delle informazioni.

Di notevole interesse inoltre sono i manuali chiamati “re-Collections: Caring for Collections Across Australia” elaborati dall'*Heritage Collections Council* ad uso principalmente dei non-conservatori che lavorano nei beni culturali australiani. Nei documenti si fa riferimento all'*Australian Institute for the Conservation of Cultural Material (AICCM)*, una organizzazione nazionale per conservatori e persone interessate alle conservazione dei beni culturali nata nel 1973. In questi manuali vengono affrontati temi quali il controllo della luce, della temperatura, della umidità relativa, dell'attacco biologico, dell'inquinamento, come pratiche fondamentali per prevenire il danno ed il degrado dei materiali.

Il *National Preservation Office (NPO)*, sostenuto dalla *British Library*, ha pubblicato nel 2003 “Basic Preservation Guidelines for Library and Archive Collections”, linee guida sulla conservazione preventiva delle opere conservate in biblioteche, archivi e musei nel Regno Unito e in Irlanda. Un altro importante organismo inglese preposto alla conservazione è lo *United Kingdom Institute for Conservation (U.K.I.C.)*, che ha pubblicato nel 1984 “Environmental Standards for the Permanent Storage of Excavated Material from Archaeological Sites, Conservation Guidelines No. 3”.

Il *Canadian Conservation Institute (CCI)*, nato nel 1972 per sostenere la conservazione del patrimonio culturale canadese e per promuovere la scienza e la tecnologia applicate alla conservazione, ha pubblicato importanti “bollettini tecnici”, con la finalità di informare curatori e conservatori museali sulle tecniche e principi di conservazione più moderni. Tra questi quello dedicato alle Linee guida per l'umidità e la temperatura negli archivi canadesi.

I documenti tecnici chiamati “Conserve O Grams”, pubblicati dal *National Park Service — Museum Management Program di Washington*, si occupano di gestione e cura delle opere d'arte nei musei: forniscono procedure, tecniche e materiali per preservare gli oggetti d'arte, una nutrita bibliografia ed elenchi di fornitori, ad uso del personale museale esperto

e non, come anche dei collezionisti privati.

A differenza degli standards italiani, gli studi americani di *ASHRAE* (*American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers*) concentrano la loro attenzione sulla valutazione del benessere delle intere collezioni e non più del singolo oggetto. L'*ASHRAE* nel 2003 ha pubblicato un manuale "Applications 2003 - Museums, Libraries, and Archives" che contiene numerose informazioni circa le fonti di inquinamento, la qualità dell'aria indoor e le minacce per le opere d'arte. Inoltre il manuale sottolinea che devono essere garantite condizioni diverse a seconda del tipo di collezione, rimarcando l'importanza della definizione dei campi di variabilità richiesti per i singoli parametri; evidenzia la necessità di utilizzare microambienti, come le vetrine, per collezioni che richiedono condizioni ambientali particolari o comunque ogni volta si intraveda un risparmio in termini energetici ed economici; divide gli ambienti in cinque categorie, a seconda della classe di controllo definita in funzione della fluttuazione massima ammissibile per temperatura e umidità, e utilizza tali categorie nella classificazione degli edifici in cui le collezioni sono esposte, partendo dal presupposto che non sempre gli ambienti espositivi sono stati progettati e realizzati con questo scopo.

L'*Handbook* "HVAC Applications" 2007 dell'*ASHRAE* definisce invece le classi di controllo termoigrometrico degli ambienti in cui le opere sono conservate, fornendo indicazioni sulle fluttuazioni permesse sul breve e sul lungo periodo. Tali classi vengono successivamente relazionate con le potenzialità di controllo termoigrometrico dei possibili sistemi edificio - impianti, consentendo di ottenere un'ulteriore classificazione degli edifici dal punto di vista del loro "potenziale controllo microclimatico" (Complesso Museale Santa Maria della Scala, 2010).

### 6.2.5. Comfort ambientale e conservazione

In luoghi preposti alla conservazione come i musei o i siti archeologici è necessario garantire, oltre alla conservazione dei reperti, anche una corretta fruizione da parte dei visitatori. I reperti presentano diversi materiali costitutivi, per cui occorre prendere in considerazione i fenomeni fisici, chimici e biologici che si possono verificare in specifiche condizioni microclimatiche. Al pubblico fruitore vanno garantite adeguate condizioni di accessibilità e fruibilità. La conservazione va sempre confrontata con la necessità di offrire una corretta fruizione da parte del pubblico e questo aspetto non è privo di inconvenienti: i visitatori alterano il microclima degli ambienti espositivi (Mazzei et al., 2005), trascinando polveri ed inquinanti dall'esterno e apportando energia termica e vapore acqueo (si pensi quando un gruppo cospicuo di turisti si avvicina ad un'opera d'arte). Vanno dunque assicurate condizioni di comfort ambientale che permettano la fruizione, pur tenendo conto prioritariamente delle esigenze degli oggetti conservati. Così come si fa per le persone, occorre definire anche per i materiali e/o i manufatti di interesse storico-artistico le condizioni di benessere, ovvero intervalli di valori di temperatura e umidità relativa all'interno dei quali si può ritenere di garantire loro una corretta conservazione. Il raggiungimento e la persistenza di valori di temperatura e umidità relativa diversi da quelli che rientrano nell'intervallo di benessere per il particolare materiale o per il singolo oggetto producono danni sul lungo periodo, ma non va dimenticato che brusche variazioni o fluttuazioni di breve periodo, dell'ordine dei giorni se non delle ore, possono indurre alterazioni spesso irreversibili e che il rischio maggiore per la conservazione deriva proprio dai gradienti spaziali e temporali di tali parametri. Infatti, tenendo presente che qualsiasi oggetto si adatta nel tempo all'ambiente circostante entrando con esso in equilibrio, è soprattutto l'entità e la velocità dello spostamento da tale equilibrio ad accentuare processi di deterioramento in atto (UNI 10829: 1999).

La normativa oggi disponibile offre criteri e riferimenti generali, che vanno verificati prima dell'applicazione al caso specifico. È da sottolineare che l'entità dei danni indotti da ciascun parametro o dalla combinazione di essi dipende soprattutto dalla natura dei materiali, dalla geometria dell'oggetto, dal tempo di esposizione, dalla magnitudo del fattore di danno e dal tipo di meccanismi di deterioramento. Nella norma UNI 10969 del 2002 "Linee guida per la scelta e il controllo del microclima" si definisce che "I parametri ambientali devono essere scelti tenendo conto prioritariamente delle esigenze degli oggetti conservati, non solo del benessere umano. Qualora si rilevassero condizioni di incompatibilità, occorre provvedere adeguatamente, tenendo presente che per i beni culturali il processo di degrado è cumulativo, progressivo e irreversibile".

Per quanto riguarda l'argomento delle condizioni climatiche più confortevoli per l'organismo umano, esso è stato trattato da molti studiosi. Il comfort è definibile come la sensazione di benessere fisico e mentale (*European Passive Solar Handbook*) o come la condizione in cui un individuo esprime soddisfazione nei confronti dell'ambiente che lo circonda (*Norma ASHRAE, American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers*). In generale una persona si trova in stato di benessere quando non percepisce

nessun tipo di sensazione fastidiosa ed è quindi in una condizione di neutralità assoluta rispetto all'ambiente circostante. Già dalla definizione è chiaro che il benessere è una quantità non misurabile analiticamente ma solo statisticamente perché dipende da troppe variabili di cui alcune strettamente soggettive e di natura psicologica. Le variabili sono:

- il benessere termico e igrometrico;
- il benessere olfattivo (legato alla qualità dell'aria);
- il benessere visivo (relativo all'illuminazione);
- il benessere psicologico.

Il comfort termico dipende da parametri fisici e da parametri esterni:

*Parametri fisici:*

- temperatura dell'aria e temperatura media radiante (quella che si percepisce per irraggiamento da corpo caldo o freddo), che determinano la quantità di calore scambiato fra l'individuo e l'ambiente nelle tre forme principali di scambio termico, ovvero l'irraggiamento, la conduzione e la convezione; inoltre la presenza di eventuali stratificazioni termiche può indurre fastidi legati al problema di avere parti del corpo a differenti temperature;

- umidità relativa (a basse temperature l'aria molto secca accresce la sensazione di freddo; ad alte temperature l'aria umida accentua la sensazione di caldo);

- velocità dell'aria (produce effetti termici, aumentando la dissipazione del calore corporeo e può produrre spiacevoli situazioni qualora sia troppo alta); le reazioni medie soggettive alle varie velocità sono le seguenti: fino a 0,25 m/s: impercettibile; 0,25-0,50 m/s: piacevole; 0,50-1,00 m/s: sensazione di aria in movimento; 1,00-1,50 m/s: corrente d'aria da lieve a fastidiosa; oltre 1,50 m/s: fastidiosa. Tutti gli ambienti sono soggetti a movimenti anche impercettibili dell'aria. La velocità minima è di 0,075 m/s ma si inizia a percepire il movimento dell'aria a 0,3 m/s. Non esiste per la velocità dell'aria un limite inferiore necessario per il benessere, esiste invece un limite massimo. Alle temperature più alte anche 1 m/s è considerato piacevole, e una velocità sino a 1,5 m/s è tollerabile. Nella stagione fredda, all'interno di un locale riscaldato, la velocità dell'aria non dovrebbe superare i 0,25 m/s. La ventilazione influisce anche sulla qualità dell'aria interna e quindi sulla salute degli occupanti.

- pressione atmosferica.

*Parametri esterni:*

- attività svolta, che influenza il metabolismo e quindi la produzione di calore da parte del corpo;

- abbigliamento che influisce sulle perdite di calore per evaporazione e sugli scambi di calore per conduzione e irraggiamento;

- fattori organici: età, sesso, caratteristiche fisiche individuali;

- fattori psicologici e culturali.

L'organismo ha un sistema di controllo termico che permette un adattamento a condizioni ambientali molto variabili. Esso è in grado di misurare il flusso termico in ingresso e quello in uscita e di attivare delle regolazioni affinché la temperatura corporea rimanga sem-

pre mediamente attorno ai 37° C. La temperatura cutanea può invece variare molto di più al mutare delle condizioni ambientali. La pelle funziona infatti come scambiatore di calore con l'esterno. Si hanno quindi differenze fra la temperatura corporea interna (praticamente costante) e quella cutanea variabile in funzione della temperatura ambientale e della posizione corporea. In ambienti caldi o per attività intense il meccanismo di regolazione adottato è in primo luogo la dilatazione dei vasi sanguigni dell'epidermide con conseguente aumento del flusso di calore verso la pelle e aumento del calore superficiale. Quando la vasodilatazione è insufficiente si attiva la produzione di sudore che, evaporando, causa una ulteriore dissipazione di calore. In ambienti freddi inversamente l'organismo economizza il calore riducendo l'afflusso di sangue verso la cute attraverso la vasocostrizione e quindi riducendo il calore disperso per convezione e irraggiamento. Quando la vasocostrizione risulta insufficiente sopraggiungono i brividi che incrementano il metabolismo muscolare e quindi la produzione di calore. Inoltre è bene definire che il benessere è individuale e non collettivo: corrisponde per definizione al soddisfacimento psicofisico di un singolo individuo; il benessere è globale e non singolare: nella realtà i vari fattori interferiscono fra loro e le percezioni sensoriali si sovrappongono (Grosso, 1997).

Tutti i fattori elencati interagiscono fra loro per determinare le sensazioni di benessere o malessere. È impossibile giudicare il comfort ambientale sulla base di uno solo di questi parametri. Il nomogramma, e cioè la funzione di due variabili rappresentata sotto forma di grafico, più utilizzato per determinare le condizioni di comfort corporeo è quello chiamato *indice di Thom* (Thom, 1959) che viene presentato soprattutto durante i mesi caldi per avvertire la popolazione di possibili disagi o pericolo di condizioni termoigrometriche avverse (alta temperatura e alta umidità). L'indice di disagio proposto da Thom, "Discomfort Index" (*DI*), è considerato uno dei migliori indici di stima della temperatura effettiva. Quest'ultima è definita come "un indice arbitrario" che combina, in un singolo valore, l'effetto di temperatura, umidità e movimento dell'aria sulla sensazione di caldo o freddo percepito dal corpo umano. La temperatura effettiva tiene conto della temperatura di bulbo umido e della temperatura di bulbo asciutto di posti ombreggiati e protetti dal vento. Questo indice è adatto per descrivere le condizioni di disagio fisiologico dovute al caldo-umido ed è sensibile in un intervallo termico compreso tra 21° C e 47° C. Al di fuori di tale intervallo, anche al variare dell'umidità relativa, l'indice attribuisce sempre la condizione fisiologica alle classi estreme, cioè "benessere" per temperature inferiori a 21° C e "stato di emergenza medica" per temperature superiori a 47° C (AA. VV., 2007).

Una seconda rappresentazione è quella di Scharlau (Scharlau, 1950). Questo autore ha definito sperimentalmente, in assenza di vento, le temperature limite dell'aria, in relazione all'umidità atmosferica, oltre le quali l'organismo di un uomo medio e sano accusa disagio. Tali valori, tracciati su un diagramma cartesiano, definiscono una curva, detta di Scharlau. I parametri meteorologici presi in considerazione sono l'umidità relativa e la temperatura dell'aria. Attraverso la combinazione dei due parametri meteorologici considerati, l'indice consente di determinare l'esistenza o meno di un disagio fisiologico. In

tale rappresentazione, meno utilizzata ma più efficace per i nostri scopi, il campo più esteso di temperature ci permette di dimostrare che le condizioni termoigrometriche raccomandate per la corretta conservazione della maggior parte dei materiali e degli oggetti presenti nelle collezioni museali rientrano con facilità nell'area verde di benessere termoigrometrico dell'individuo più prossima all'intervallo 15 – 25 °C di temperatura e 45 – 65 % di umidità relativa (Fig. 6) (AA. VV., 2007).

Per la valutazione delle condizioni ambientali a cui corrispondono sensazioni di benessere termico all'interno degli ambienti si ricorre a sperimentazioni di tipo statistico valutando il grado di soddisfazione di gruppi di persone all'interno di ambienti variamente climatizzati, con una certa attività e con un determinato abbigliamento. I metodi di analisi bioclimatica definiscono il perimetro della zona di benessere termico, inteso come il luogo dei fattori climatici ambientali, entro il quale la sensazione termica è giudicata confortevole da oltre l'80 % delle persone<sup>1</sup>. I diagrammi bioclimatici correlano i valori minimi e massimi medi mensili di temperatura e umidità dell'aria al campo di comfort interno di progetto. Sono utili per evidenziare quali siano le criticità climatiche di un determinato sito in relazione al comfort da realizzare all'interno degli ambienti.

Il diagramma bioclimatico sviluppato nel 1969 da Baruch Givoni (*building bio-climatic chart*) (Givoni, 1969) e continuamente aggiornato fino ai giorni nostri, basato sul diagramma psicrometrico, rappresenta la zona di comfort standard all'interno degli ambienti e le sue

1) Gli indici di comfort termico e i metodi per calcolarli sono raggruppati nella norma tecnica EN 15251:2007 (Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics).

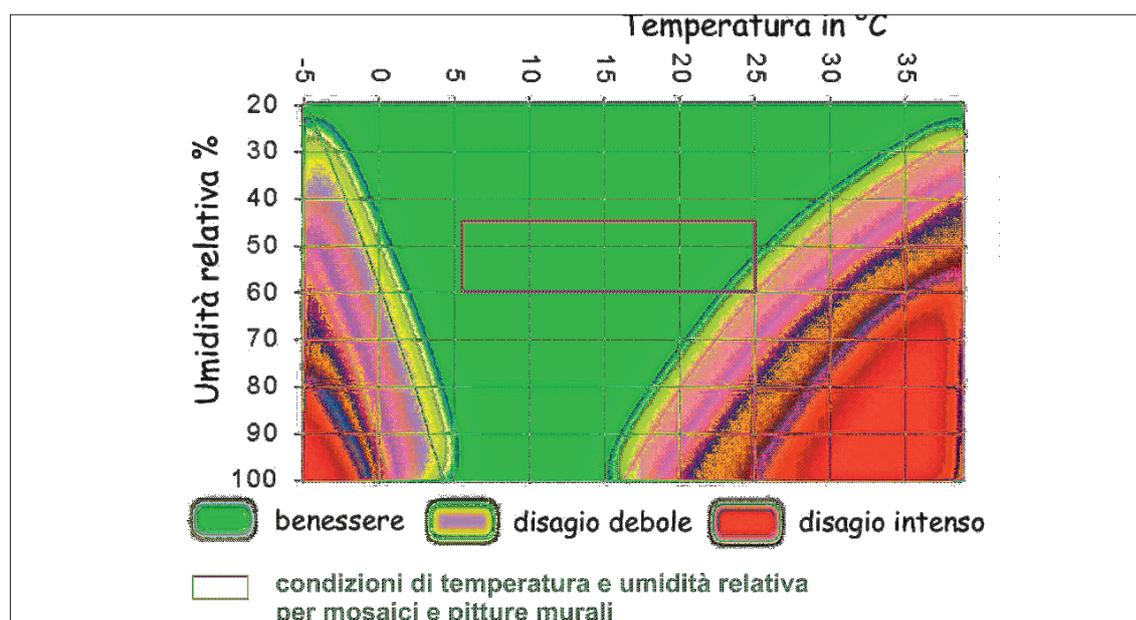


Fig. 6 -Indice di Scharlau che rappresenta l'indice di benessere corporeo estivo e invernale; il rettangolo rappresenta le condizioni di temperatura e umidità relativa valide per mosaici e pitture murali.

estensioni, in funzione di specifiche strategie di climatizzazione passiva. I confini delle diverse zone di comfort e le differenti strategie per assicurare le condizioni di comfort interno si basano sulle temperature interne previste nell'edificio privo di sistema di climatizzazione e correttamente progettato per il contesto climatico in cui è costruito. Su tale diagramma psicrometrico (Fig. 7) sono riportate le aree di accettabilità delle condizioni climatiche interne in relazione alle seguenti strategie di attenuazione delle azioni termiche esterne:

- ventilazione diurna: basata sull'incremento dei limiti di accettabilità della temperatura dell'aria all'aumentare della sua velocità;
- inerzia termica, con o senza ventilazione notturna: basata sulla capacità da parte dell'involucro di ritardare e smorzare l'effetto delle sollecitazioni termiche esterne;
- raffrescamento evaporativo diretto: basato sull'assorbimento del calore sensibile dell'aria da parte dell'acqua in evaporazione, con conseguente incremento dell'umidità dell'aria nell'ambiente trattato;
- raffrescamento evaporativo indiretto: ottenibile quando il processo evaporativo viene effettuato al di fuori dell'ambiente, a contatto con le superfici dell'involucro.

Il diagramma è stato costruito sulla base di ricerche effettuate negli Stati Uniti, in Europa e in Israele e successivamente esteso ai paesi in via di sviluppo. Ogni strategia di controllo del clima interno è caratterizzata da una specifica zona di comfort. L'area di comfort meno estesa è quella in cui non si prevede nessuna strategia di raffrescamento, in assenza di moto dell'aria. All'aumentare delle strategie di climatizzazione tale zona di comfort viene progressivamente ampliata fino a coprire la massima area del diagramma psicrometrico. Ciò significa che, utilizzando tutte le possibili strategie di raffrescamento, aumentano le possibili combinazioni di temperatura e di umidità per le quali si raggiunge il comfort termoi-grometrico. (De Santoli & Mariotti, 2011).

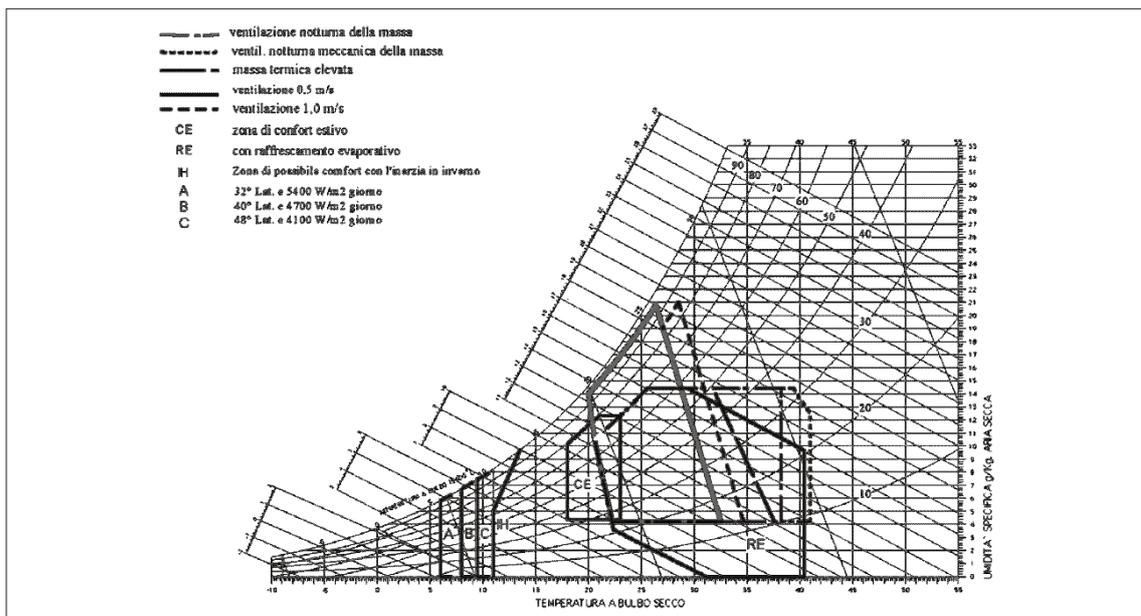


Fig. 7 -Diagramma di Givoni: la ventilazione diurna è la più semplice strategia di raffrescamento naturale che consente di aumentare i limiti di temperatura e umidità con una velocità dell'aria interna pari a circa 1 m/s.

Per valutare il grado di benessere, occorre rilevare le variabili misurabili e paragonarle tramite i diagrammi bioclimatici. Se pur all'interno della zona di benessere, occorre verificare che non vi sia la prevalenza di taluni fattori su altri, ad esempio eccesso di velocità dell'aria o scarsità di umidità relativa. Bisogna altresì evitare eccessivi gradienti termici e l'eccesso di ventilazione. In fase di progetto si possono già individuare le misure necessarie per ottenere condizioni di comfort agendo attraverso un adattamento del progetto al fine di sfruttare gli elementi climatici. L'obiettivo primario è quindi quello di ridurre il più possibile, compatibilmente con le condizioni climatiche regionali, la necessità di interventi correttivi con mezzi meccanici (riscaldamento invernale, condizionamento estivo).

Un sito archeologico reso fruibile, e in generale un museo, accoglie persone che dovrebbero ricevere negli ambienti la migliore condizione di vivibilità o di benessere o comfort climatico, ma anche oggetti e materiali che devono essere conservati rispettando parametri ambientali, alcuni dei quali sono gli stessi che condizionano anche il benessere delle persone, come la temperatura, l'umidità relativa, la ventilazione.

La massa circolante di visitatori rappresenta un potenziale pericolo per i reperti, in quanto l'apporto sia termico che igrometrico, legato alla respirazione e traspirazione del corpo umano e al tipo di abbigliamento, modifica i gradienti termici e igrometrici ambientali. L'afflusso del pubblico determina un aumento della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria. Inoltre i visitatori rappresentano i vettori di aerospore che possono essere trasportate con i capelli, con la pelle e con gli abiti a seconda delle condizioni atmosferiche esterne prevalenti. La presenza di gruppi numerosi genera gas, particelle e calore avvertiti in maniera misurabile dalle apparecchiature di monitoraggio dell'ambiente e che modificano sensibilmente l'andamento di parametri fondamentali come la temperatura e l'umidità relativa, oltre a contribuire in maniera rilevante all'aumento del deposito di polveri. Ogni individuo che entra nel museo produce mediamente: vapore acqueo (circa 50 - 100 g/ora); calore (circa 100 watt/ora); anidride carbonica (circa 50 ml/ora); e rilascia polveri pari a 0,2 g/ora composte da: microrganismi (attraverso la sudorazione, il parlare, lo starnutire); fibre legate agli indumenti; frammenti organici (pelle e capelli).

Per quanto riguarda i limiti di riferimento per i diversi parametri microclimatici, per le aree archeologiche e per l'ambiente museale in generale non esiste un vero e proprio protocollo univocamente accettato a livello internazionale. In generale, ci si attiene a linee guida e raccomandazioni che stabiliscono criteri di base e danno indicazioni sui livelli raccomandati per alcuni dei parametri principali (temperatura, umidità relativa, luce, radiazione UV). L'approccio ormai riconosciuto come più adeguato per tenere conto di tutti gli aspetti del problema è comunque quello della cosiddetta 'conservazione preventiva' con sensori d'impatto per l'ambiente museale, mirato a ridurre al minimo l'impatto dei fattori ambientali sui manufatti esposti e rallentarne quindi il degrado. Tra le misure preventive rientrano quelle basate sul controllo del microclima e il mantenimento di condizioni ambientali medie adeguate. In particolare, in base alla norma *UNI 10829:1999* sono presi in considerazione i seguenti parametri: temperatura dell'aria, umidità relativa dell'aria, massima escursione giornaliera di

temperatura, massima escursione giornaliera di umidità relativa, massimo valore di illuminamento, massima quantità di radiazione ultravioletta. Accanto a strumentazioni sempre più compatte, esteticamente non invasive e di facile utilizzo per la misurazione simultanea di UV, velocità dell'aria, temperatura, umidità relativa, sono oggi disponibili vari tipi di sensori, dosimetri e strumenti specifici per la valutazione dell'impatto cooperativo di più fattori ambientali sui manufatti, ma anche di fattori umani (ad esempio foto danneggiamento accelerato da incremento di temperatura e/o umidità) (AA. VV., 2007).

Così come si fa per le persone, è ormai prassi definire anche per i materiali e/o i manufatti di interesse storico-artistico le condizioni di benessere, ovvero intervalli di valori di temperatura e umidità relativa all'interno dei quali si può ritenere di garantire loro una corretta conservazione. Il raggiungimento e la persistenza di valori di temperatura e umidità relativa diversi da quelli che rientrano nell'intervallo di benessere per il particolare materiale o per il singolo oggetto producono danni sul lungo periodo, ma non va dimenticato che brusche variazioni o fluttuazioni di breve periodo, dell'ordine dei giorni se non delle ore, possono indurre alterazioni spesso irreversibili e che il rischio maggiore per la conservazione deriva proprio dai gradienti spaziali e temporali di tali parametri. Infatti, tenendo presente che qualsiasi oggetto si adatta nel tempo all'ambiente circostante entrando con esso in equilibrio, è soprattutto l'entità e la velocità dello spostamento da tale equilibrio ad accentuare processi di deterioramento in atto (UNI, 1999). L'entità dei danni indotti da ciascun parametro o dalla combinazione di essi dipende soprattutto dalla natura dei materiali, dalla geometria dell'oggetto, dal tempo di esposizione, dalla magnitudo del fattore di danno (concentrazione del contaminante o scostamento dai valori ottimali per umidità e temperatura) e dal tipo di meccanismi di deterioramento. La definizione di "campo accettabile" è strettamente correlata alle tipologie di materiali che costituiscono l'oggetto esposto. I campi di accettabilità sono fissati ad hoc in base ad indicazioni mirate del responsabile della conservazione. Il controllo microclimatico per la conservazione di oggetti di interesse storico, artistico e culturale, richiede particolare attenzione non solo per la grande varietà di oggetti che spesso devono essere esposti in ambienti comuni, ma soprattutto per i diversi valori termoigrometrici che devono essere mantenuti per assicurare la durabilità delle opere nel tempo.

Il mantenimento di un determinato microclima negli ambienti dediti alla conservazione risulta quindi essere fondamentale per evitare il processo di deterioramento dei materiali: tale processo viene favorito dalla fluttuazione dei valori di temperatura ed umidità relativa all'interno dell'ambiente, derivanti non solo dalle condizioni climatiche esterne, ma anche da fattori interni quali la presenza di carichi dovuti all'occupazione delle persone o alla presenza degli impianti di illuminazione. Il verificarsi di tali fenomeni comporta l'innescarsi di processi chimici, fisici e biologici che, accumulandosi nel tempo, comportano l'accelerazione del normale corso di degrado. Ai fini conservativi è dunque necessario valutare quali siano le migliori condizioni microclimatiche da mantenere nelle sale espositive o nei depositi, studiando accuratamente le diverse soluzioni proposte dalla ricerca sia in campo impiantistico che tecnologico e valutando i costi non solo sul piano economico, ma anche su quello ener-

getico e ambientale (Complesso Museale Santa Maria della Scala, 2010). Il problema della conservazione dei reperti deve dunque essere affrontato analizzando due classi fondamentali di argomenti:

- individuazione delle proprietà dei materiali costituenti i reperti;
- individuazione delle proprietà del clima e dell'ambiente in cui è conservato il reperto.

*6.2.5.1. Valori di riferimento per assicurare le condizioni ottimali di conservazione dei manufatti*

Riprendendo in parte quanto previsto dalla norma *UNI 10829: 1999, l'Ambito VI* "Gestione delle collezioni" del *D.M. 10.5.2001* prescrive gli intervalli di valori dei parametri ambientali per la conservazione di diverse categorie di opere esposte. La complessità e la varietà degli oggetti che costituiscono i beni culturali rendono particolarmente difficile l'individuazione e la definizione assoluta degli intervalli e dei limiti dei parametri ambientali, intesi come valori critici e ottimali, per la buona conservazione delle opere. Pertanto la corretta utilizzazione delle tabelle relative a tali intervalli e limiti riportate deve essere sempre e necessariamente accompagnata da una specifica metodologia di interpretazione basata sui seguenti punti:

- valutazione dello stato di conservazione del manufatto;
- studio degli andamenti dei parametri microclimatici, di illuminazione e della qualità dell'aria dell'ambiente in cui il manufatto si trova;
- studio dei parametri microclimatici, di illuminazione e della qualità dell'aria dell'ambiente in cui il manufatto si troverà;
- giudizio complessivo di valutazione "stato di conservazione/ambiente";
- conoscenza dell'interazione del manufatto con l'ambiente.

Gli obiettivi di qualità si prefiggono di:

- indicare valori soglia e intervalli di riferimento per quanto riguarda il microclima, le condizioni di illuminazione e la qualità dell'aria;
- sintetizzare le raccomandazioni (standard procedure) e le linee guida (criteri generali) per programmare e garantire una corretta conservazione. Il D.M. indica:
  - i valori termoigrometrici di riferimento per assicurare le condizioni ottimali di conservazione dei manufatti;
  - i valori limite raccomandati della concentrazione degli inquinanti aerodispersi;
  - i valori limite degli inquinanti biologici atmosferici;
  - i vincoli conservativi relativi all'esposizione a fonti luminose;
  - i controlli fotometrici raccomandati;
  - l'uniformità di illuminamento;
  - l'esposizione energetica nelle componenti di dose di luce annuale e di componente UV e radianza totale;
  - gli orientamenti gestionali di natura illuminotecnica – sistemi di esposizione temporizzati;
  - il controllo della luce naturale.

Nelle tabelle di seguito riportate sono indicati i valori dei parametri microclimatici entro i quali sarebbe opportuno conservare le diverse categorie di materiali per prevenire danni di

tipo chimico-fisico o microbiologico. L'opportunità di modificare le condizioni degli ambienti museali in funzione di quanto riportato nelle tabelle deve essere attentamente valutata in relazione allo stato di conservazione dei manufatti, all'area geografica in cui il museo si trova e alle reali possibilità di assicurare la costanza dei valori. I valori termoigrometrici consigliati vanno intesi come termini di riferimento ai quali sarebbe opportuno mantenerli; ciò significa che nell'ambiente possono essere consentiti modesti scostamenti dai valori termoigrometrici consigliati, con l'attenzione però di evitare, ove possibile, mediante semplici provvedimenti di gestione e di tipo passivo, sia brusche variazioni giornaliere che variazioni cicliche giorno-

Manufatti	Umidità relativa (%)	Temperatura (°C)
Armature in ferro, armi	<40	-
Avori, ossa	45-65	19-24
Bronzo	<55	-
Carta, cartapesta	50-60	19-24
Collezioni anatomiche	40-60	19-24
Collezioni mineralogiche, marmi e pietre	45-60	≤30
Cuoio, pelli, pergamena	50-60	-
Dischi, nastri magnetici	40-60	10-21
Erbari e collezioni botaniche	40-60	-
Film	30-50	-5 - +15*
Fotografie (b/n)	20-30	2-20**
Insetti e scatole entomologiche	40-60	19-24
Lacche orientali	50-60	19-24
Legno	40-65	19-24
Legno dipinto, sculture policrome	45-65	19-24
Libri, manoscritti	50-60	19-24
Materiale etnografico	40-60	19-24
Materiale organico in genere	50-65	19-24
Materie plastiche	30-50	-
Metalli e leghe levigati, ottone, argento, peltro, piombo, rame	<45	-
Mobili con intarsi e lacche	50-60	19-24
Mosaici e pitture murali	45-60	min 6 °C (inverno) max 25 °C (estate) max gradiente giornaliero 1.5°C/h
Oro	<45	-
Papiri	35-50	19-24
Pastelli, acquerelli, disegni, stampe	50-60	19-24
Pellicce, piume	45-60	15-21
Pitture su tela	35-50	19-24
Porcellane, ceramiche***, gres, terracotta	20-60	-
Seta	50-60	-
Tessuti, tappeti, arazzi, tappezzeria in stoffa	40-60	-
Vetri e vetrate stabili	25-60	-

Fig. 8 - Tabella dei valori termoigrometrici consigliati per assicurare le condizioni ottimali di conservazione chimico-fisica dei manufatti (D.M. 10/2001, Gazzetta Ufficiale n. 244 del 19 ottobre 2001, Serie generale).

\* In funzione della sensibilità delle pellicole.

\*\* L'intervallo è valido per fotografie con supporti in carta, materiale plastico, vetro. Invece per supporti a base di nitrato e per vetri con emulsione al collodio sono consigliate temperature più basse.

\*\*\* Per particolari manufatti ceramici cotti a temperatura piuttosto bassa il valore dell'UR deve essere <45%.

notte, dovute soprattutto all'accensione e allo spegnimento degli impianti di illuminazione, di riscaldamento, di refrigerazione e all'apertura e chiusura non programmata delle aperture. Condizioni rigorosamente controllate con apparecchiature che rilevino in continuo i parametri ambientali sono richieste in casi di mostre, aperture prolungate e altri eventi particolari che possano determinare elevato afflusso di pubblico (Luciani & Del Curto, 2010).

Viene inoltre riportata una tabella che indica i valori dei parametri ambientali entro cui è possibile realizzare condizioni di conservazione dei manufatti idonee dal punto di vista chimico-fisico utili a prevenire gli attacchi microbiologici su materiali organici, favoriti in determinati intervalli dei parametri microclimatici. Per quanto riguarda invece gli attacchi entomatici, risultano del tutto insufficienti interventi sui parametri microclimatici, a meno che non si raggiungano valori di temperatura ed umidità relativa incompatibili con il benessere sia della maggior parte dei materiali sia dell'uomo.

La classificazione dei materiali, i valori di temperatura e di umidità tabulati sono quelli maggiormente segnalati dalla letteratura specializzata. Il confronto tra le figure 8 e 9 mostra talora la non coincidenza delle condizioni di benessere chimico-fisico con quelle consigliate per la prevenzione di attacchi microbiologici; di volta in volta, il curatore della struttura museale dovrà decidere la scelta più opportuna e, in particolari condizioni, dovrà ricorrere all'uso di vetrine in modo da realizzare nello stesso ambiente differenti condizioni di conservazione.

Esistono alcune categorie di manufatti che richiedono condizioni termoigrometriche di conservazione particolarmente controllate. I valori indicati nella figura 10 vanno intesi come valori di riferimento tassativi: ciò vuol dire che il manufatto deve essere conservato mantenendo sempre temperatura ed umidità relativa all'interno degli intervalli stabiliti. Inoltre va osservato che all'interno degli intervalli indicati le variazioni giornaliere devono essere comunque ridotte al minimo, fermo restando che le variazioni stagionali devono comunque

Manufatti organici	Umidità relativa (%)	max variaz. giornaliera UR	Temperatura (° C)	max variaz. giornaliera T
Dipinti su tela	40-55	6	19-24	1,5
su tavola	50-60	2	19-24	1,5
Legno	50-60	2	19-24	1,5
archeologico				
bagnato		-		< 4*
Carta	40-55	6	18-22	1,5
pastelli, acquerelli	< 65			< 10
libri e manoscritti	45-55	5	< 21	3
materiale grafico	45-55	5	< 21	3
Cuoi, pelli e pergamene	40-55	5	4-10	1,5
Tessuti	30-50	6	19-24	1,5
di natura cellulosica				
di natura proteica	> 50-55		19-24	1,5
Collezioni etnografiche	20-35	5	15-23	2
Materiali stabili	35-65		-30	

Fig. 9 - Tabella condizioni microclimatiche per la prevenzione di attacchi microbiologici su materiali organici (D.M. 10/2001, Gazzetta Ufficiale n. 244 del 19 ottobre 2001, Serie generale).

\* La temperatura non deve raggiungere 0 °C.

essere all'interno degli intervalli prefissati. Le condizioni sopraindicate potranno essere assicurate con due diverse procedure, secondo il tipo di manufatto, conservando l'oggetto:

- a) in un contenitore in presenza di un assorbitore di umidità (bronzi, ferri, vetri);
- b) in ambienti o contenitori nei quali possa essere assicurato il controllo e la stabilità di

Manufatti	Umidità relativa (%)	Temperatura (°C)
Bronzi archeologici con corrosione da cloruri	<42	-
Ferri archeologici con corrosione da cloruri	<20	-
Vetri instabili	40 -45	-
Legno bagnato*	100	<4

Fig. 10 - Tabella, D.M. 10/2001, Gazzetta Ufficiale n. 244 del 19 ottobre 2001, Serie generale)

\* Le raccomandazioni indicate per il legno bagnato valgono anche per tutti i materiali organici di scavo.

\*\* La temperatura non deve raggiungere 0°C. La classificazione dei materiali, i valori di temperatura e di umidità tabulati sono quelli maggiormente segnalati dalla letteratura specializzata riassunta nel lavoro di C. Aghemo et al. (1994), e vengono riportati senza alcuna modifica.

#### 6.2.5.2. Vincoli conservativi relativi all'esposizione a fonti luminose

Le raccomandazioni di seguito riportate sono frutto e compendio di un articolato quadro di raccomandazioni e di proposte normative emesse, fin dall'inizio degli anni '70, dagli organismi internazionali (principalmente *ICOM* e *IES* e *CIBS*) e successivamente sviluppati, sotto diversi aspetti, sia dal gruppo di lavoro del *Comitato Termotecnico Italiano-UNI* sia dalla proposta *CT 3-22 CIE* e dal *Manuale di illuminotecnica AIDI* (1999). In tali documenti sono state inserite indicazioni nate in ambiente *ICR*, sulla base di esperienze maturate in anni di controlli eseguiti in laboratorio e sul campo presso diverse sedi museale. Tali integrazioni tengono conto delle esigenze emerse nel corso delle consulenze prestate agli organi territoriali (soprintendenze, enti locali ecc.) e delle soluzioni praticate in una casistica molto differenziata. Ciò ha permesso di individuare, definire e verificare vincoli espositivi che, oltre a tutelare la conservazione delle opere esposte, risultassero praticabili da parte dei progettisti e compatibili con le esigenze di fruizione e di salvaguardia del contesto espositivo. Il quadro di raccomandazioni e norme conservative in materia di illuminazione di manufatti che la normativa propone è, pertanto, un compromesso ragionevole tra l'azione di degrado inevitabilmente prodotta dall'esposizione alla luce dei manufatti stessi e le esigenze di fruizione, al fine di garantire condizioni di conservazione accettabili e spendibili nel tempo. Le norme sono state, al contempo, espresse in modo da lasciare lo spazio alla adattabilità delle soluzioni, specie in un contesto come quello italiano caratterizzato da architetture museali e contenitori che costituiscono essi stessi delle opere da proteggere (D'Agostino, 2002-2005).

Nella figura 11 sono indicate le raccomandazioni internazionali, nella loro definizione più recente, che classificano in quattro categorie di fotosensibilità i reperti ed i manufatti e ne stabiliscono i livelli massimi di illuminamento. Per quanto concerne gli studi sperimentali sui pigmenti e sui coloranti, che per il momento sono stati condotti in modo sistematico solo per i prodotti industriali moderni (*standard ISO blue-wool*), è prevedibile che in futuro essi siano ulteriormente sviluppati per definire in modo più dettagliato le classi di fotosensibilità.

La linea di tendenza è quella di associare questi studi a quelli condotti con il criterio del coefficiente di danno, cioè tenendo conto della diversa capacità di produrre effetti fotochimici delle varie tipologie di sorgenti, a parità di illuminamento prodotto. Nel caso di presenza di più materiali e/o tecniche, deve essere posto il limite corrispondente alla classe più protetta. Particolari precauzioni sulla componente termica della radiazione andranno adottate nel caso di manufatti polimaterici, in tutti quei casi in cui siano vincolati materiali con coefficienti di dilatazione diversi, per evitare distacchi o cretture.

Categoria fotosensibilità		Illuminamento massimo (lux)
1 Molto bassa	Reperti e manufatti relativamente insensibili alla luce: metalli, materiali lapidei e stucchi senza strato di finitura, ceramiche, gioielleria, smalti, vetri, vetrate policrome, reperti fossili.	Superiore a 300 ma con limitazioni sugli effetti termici in particolare per stucchi, smalti, vetrate e fossili.
2 Media	Reperti e manufatti moderatamente sensibili alla luce: pitture ad olio ed a tempera verniciate, affreschi materiali organici non compresi nei gruppi 3 e 4 quali quelli in corno, osso, avorio, legno	150
3 Alta	Reperti e manufatti altamente sensibili alla luce Tessili, costumi, arazzi, tappeti, tappezzeria; acquerelli, pastelli, stampe, libri, cuoio tinto; pitture e tempere non verniciate, pittura a guazzo, pitture realizzate con tecniche miste o "moderne" con materiali instabili, disegni a pennarello; piume, pelli e reperti botanici, materiali etnografici e di storia naturale di origine organica o tinti con prodotti vegetali; carta, pergamena, legni bagnati	50
4 Molto alta	Reperti e manufatti estremamente sensibili alla luce: mummie; sete, inchiostri, coloranti e pigmenti a maggior rischio di scoloritura come lacche, ecc.	50

Fig. 11 - Tabella dei livelli massimi di illuminamento per reperti e manufatti caratterizzati da diversa fotosensibilità (D.M. 10/2201Gazzetta Ufficiale n. 244 del 19 ottobre 2001, Serie generale).

*Uniformità di illuminamento.* Al fine di soddisfare sia le esigenze di conservazione che quelle di fruizione complessiva dei manufatti piani, devono essere applicati i seguenti criteri di uniformità di illuminamento:  $E_{min}/E_{medio} > 0,5$ ;  $E_{max}/E_{min} < 5$ . Nel caso di esposizione di tavole dipinte, per prevenire l'insorgenza di effetti di tensionamento, quest'ultimo rapporto assumerà il seguente valore massimo:  $E_{max}/E_{min} < 2$ . Per quanto riguarda oggetti tridimensionali, bassorilievi ecc., questi rapporti devono essere valutati caso per caso, fermo restando il criterio di mantenere la leggibilità complessiva dell'opera. Particolare attenzione, in questo caso, dovrà essere prestata ad evitare la produzione di ombre multiple che alterano in modo sostanziale la capacità di percezione delle forme.

*Esposizione energetica – Dose di luce annuale.* L'intensità dell'azione fotochimica è legata in modo diretto alla radiazione cumulata nel tempo. Nella tabella seguente sono riportati i valori annuali massimi raccomandati, espressi in lux per ora/anno (LO), per le categorie di manufatti sensibili alla luce. Occorre evidenziare che, per la categoria di fotosensibilità

4, i valori indicati implicano forti limitazioni all'esposizione continuativa dei manufatti. Ciò comporta di perseguire soluzioni espositive caratterizzate da apparati illuminotecnici particolarmente curati, che consentano la fruizione a livelli molto bassi di illuminamento (percorsi con adattamento progressivo, eliminazione di qualsiasi forma di abbagliamento sia primario che secondario, impiego di sorgenti con tonalità calda, ecc.). Altre alternative praticabili sono costituite dalla rotazione degli oggetti esposti o dall'impiego di sistemi di accensione temporizzata in presenza di pubblico.

Categoria fotosensibilità	Lux ora/anno (LO)
2 Media	500.000
3 Alta	150.000
4 Molto alta	50.000

Fig. 12 - Tabella, D.M. 10/2001, Gazzetta Ufficiale n. 244 del 19 ottobre 2001, Serie generale. Valori annuali massimi raccomandati, espressi in lux per ora/anno (LO), per le categorie di manufatti sensibili alla luce.

*Esposizione energetica – Componente UV e radianza totale.* Nella tabella seguente sono riportati i livelli massimi di densità di energia accettati per la banda ultravioletta. Essi sono espressi sia in valore assoluto che in forma relativa al flusso luminoso visibile, al fine di permettere la valutazione con le due tipologie di strumentazione più diffuse. La terza colonna (radianza totale) si riferisce ai soli manufatti igroscopici delle relative classi e definisce limitazioni all'energia totale prodotta, per irraggiamento, sulle superfici; quest'ultima può essere molto diversa a parità di illuminamento. Gli effetti termici indotti sono largamente dipendenti dall'entità della componente infrarossa associata al flusso luminoso, che varia in dipendenza del tipo di sorgente e della tipologia di filtro eventualmente impiegati.

Componente ultravioletta			
Categoria fotosensibilità	Componente UV max associata al flusso luminoso	Radianza UV max (valore assoluto)	Densità di energia totale Radianza totale Max (banda di misura 400÷4000 nm)
2 Media	75µW/lm	<1,2µW/cm <sup>2</sup>	10 W/m <sup>2</sup>
3 Alta	75µW/lm	<0,4µW/cm <sup>2</sup>	3 W/m <sup>2</sup>
4 Molto alta	10µW/lm	<0,05µW/cm <sup>2</sup>	1 W/m <sup>2</sup>

Fig. 13 - Tabella dei livelli massimi di densità di energia accettati per la banda ultravioletta (D.M. 10/2001 Gazzetta Ufficiale n. 244 del 19 ottobre 2001, Serie generale).

### Riferimenti bibliografici

- AA. VV., Istituto per i beni artistici culturali e naturali della regione Emilia-Romagna, Isac-Consiglio nazionale delle ricerche (a cura di) 2007. *Materiali e ricerche - Oggetti nel tempo. Principi e tecniche di conservazione preventiva*, Bologna, Clueb.
- Bernardi, A. 2004. *Conservare opere d'arte - Il microclima negli ambienti museali*, Padova, Il prato.
- Camuffo, D. 1998. *Microclimate for Cultural Heritage*, Amsterdam, Elsevier.

- Caneva, G., Nugari, M. P., Salvadori, O. 2005. *Biodeterioramento e conservazione.*, "La biologia vegetale per i beni culturali", Vol I., Collana Arte e Restauro, Firenze, Nardini.
- CIE, Commission Internationale de l'Eclairage, 2004. *CIE No. 157:2004 Control of damage to museum objects by optical radiation*, CIE Technical Collection.
- Complesso Museale Santa Maria della Scala, 2010. *Conservazione preventiva e controllo microclimatico nel contesto degli standard museali*, Siena, Vanzi Industrie Grafiche.
- Cuttle, C. 1988. *Lighting works of art for exhibition and conservation*, "Lighting Research and Technology" 20(2), 43-53.
- D'Agostino, V. 2002-2005. *Condizioni microclimatiche e di qualità dell'aria negli ambienti museali*, Tesi di dottorato XVIII ciclo, Università degli Studi di Napoli Federico II.
- De Santoli, L., Mariotti, M. 2011. *La ventilazione naturale. Il moto naturale dell'aria per il controllo delle condizioni ambientali*, Palermo, Flaccovio, pp. 21-22.
- D.M. 10/2201, Gazzetta Ufficiale n. 244 del 19 ottobre 2001.
- Erhardt, D., Tumosa, C. S., Mecklenburg, M. F. 2007. *Applying science to the question of museum climate*. "Museum Microclimates, National Museum of Denmark", 11-18.
- Feller, R. L. 1994. *Accelerated Aging - Photochemical and thermal aspects*, The Getty Conservation Institute, Michigan.
- Fulvi, F. 1996. *Dizionario di geografia fisica*, Roma, Newton Compton.
- Givoni, B. 1969. *Climate and Architecture*, London, Applied Science Publisher.
- Grosso, M. 1997. *Il raffrescamento passivo degli edifici*, Rimini, Maggioli Editore.
- Lorusso, S., Marabelli, M., Viviano, G. 1995. *La contaminazione ambientale ed il degrado dei materiali di interesse storico-artistico*, Roma, Bulzoni.
- Luciani, A., Del Curto, D. 2010. *Monitorare il microclima negli edifici storici. Una pratica preventiva come strumento di conoscenza*, Scienza e Beni Culturali - Pensare la prevenzione - manufatti usi e ambienti, Bressanone, pp. 203-212.
- Manieri Elia, G. 2010. *Metodo e tecniche del restauro architettonico*, Carocci, Roma, pp. 175-180.
- Marino, L. 2009. *Materiali per un atlante delle patologie presenti nelle aree archeologiche e negli edifici ridotti allo stato di rudere*, Firenze, Alinea.
- Mazzei, P. Capozzoli, A., Minichiello, F. 2005. *Il controllo dell'umidità negli ambienti museali*, Atti del Convegno AICARR "Tecnologie impiantistiche per musei", 6 maggio, Roma.
- Oesterle, E., Lieb, R. D., Lutz, M., Heusler, W. 2001. *Double-Skin Facades*, Munich, Prestel Verlag.
- Pedrotti, E. 2010. *Interazione tra luce e materia: colorimetria e fotodegrado in ambito illuminotecnico*, Scuola di Dottorato di ricerca in Ingegneria Industriale, Ciclo XXII, Università degli Studi di Padova.
- Pinna, M. 1978. *L'atmosfera e il clima*, Torino, Utet.
- Piva, G. 1985. *La tecnica di pittura ad olio e del disegno artistico*, Hoepli, Milano.
- Saunders, D., Kirby, J. 1996. *Light-induced damage: investigating the reciprocity principle*, "ICOM Committee for Conservation", 11th Triennial Meeting, Edinburgh, 87-90.
- Scharlau K. 1950. *Einführung eines Schwülemasstabes und Abgrenzung von Schwülezeiten durch Isohygrothermen*, Erdkunde, v.4, pp.188-201.
- Thom, E.C., Bosen, J.F. 1959. *The discomfort index*. Weatherwise, 12: 57-60.
- Torraca, G. 2005. *Porous building materials - Materials science for architectural conservation*, ICCROM, Roma.

## CAPITOLO 7

### Simulazione di modelli di copertura in vetro

#### 7.0. Abstract

##### Simulation models of glass covering structures

*A transparent enclosure, exposed to the sun, can become a veritable “greenhouse”, which blocks the flow of air and raises internal temperatures considerably. Large glass surfaces often bring about problems of exposure to solar radiation and the resultant heat that may limit the comfort of visitors and cause damage to the remains. For any glass item, convection is the main mechanism of cooling; the ground warms the air, which then rises, bringing in fresh air from outside, which then removes additional heat. In a closed space this mechanism can be disrupted since the warm air cannot escape, whilst, in an open space, absorbed heat is removed continuously. An effective way of removing accumulated heat from rooms (with glass surfaces) and cooling them is represented by ventilation. The design of a correct ventilation system is of very great importance, in particular for glass covering-structures; in fact, the air flow effect consents a change of indoor air, safety in the event of fire, the comfort of visitors and the preservation of finds. Today there is sophisticated and complex simulation software for flow patterns and the control of ventilation; for a correct dimensioning, it is often necessary to simulate different design solutions in accordance with the various environmental conditions. However, the great number of parameters involved creates a large amount of work when applying the detailed methods of simulation. For practical purposes, it is therefore important to use simplified methods to evaluate and propose necessary adjustments to ensure safety, comfort and preservation first.*

*In this chapter, we shall be discussing a simplified method for dimensioning, and introducing simulation tools for more accurate calculations. The methodology for the design of ventilation openings in glass roofs was borrowed from Rolf-Dieter Lieb (2010), Freie Durchströmung großer Glashallen. This simplified method allows us to calculate geometric and physical parameters; given the dimensions of its openings, it is possible to calculate the flow rate and temperature difference between internal and external air; given the temperature difference, it is possible to obtain the flow rate and its dimension. A glass, cube-shaped box and other volumes made by combining and overlapping this basic module were analyzed. By varying the geometric characteristics of the volume it was possible to obtain: the required openings for ventilation, by setting the thermal difference between the interior and exterior,*

*the temperature difference between interior and exterior, by setting the openings in input. Graphs were obtained by varying the different parameters, and comparisons were made between volumes in the same and different climatic zones. The study shows that the sun constitutes the most important parameter affecting the microclimate inside glass covering structures. The selection of the type of volume has a significant effect on the internal thermal conditions, and therefore, on the need for openings for cooling by ventilation. More specifically, the exposed horizontal surface is the most significant component because it is the main source of heat. In this regard, the shape that has the smallest base-size at equal height, is the most suitable for all conditions considered. The volume requiring the smallest percentage of openings is the highest one and has the smallest base, and vice versa.*

*In order to evaluate heat and mass transfer more accurately, sophisticated simulation software exists to obtain an efficient representation of air flows and observe the trends over time as well. An energy simulation of a building is a mathematical representation of its physical behavior. However, a simulation cannot replicate a real construction precisely because all simulations are based on a special and timely discretization and a number of key assumptions, which affect the accuracy of the results. In addition, mistakes owing to limitations in the methods may lead to overestimates or underestimates of the input data or produce unreal results. Consequently, we should pay particular attention to the interpretation of results, as they are a relative representation of the building - environment system. The I.F.I Institute's collaboration enabled us to carry out inspections and measurements on two case studies: Dalkingen and Badenweiler, both in Germany, for validation of simulation results. The study then assessed the efficacy of different types and solutions and the comparison allowed us to obtain significant responses for the purpose of design choices.*

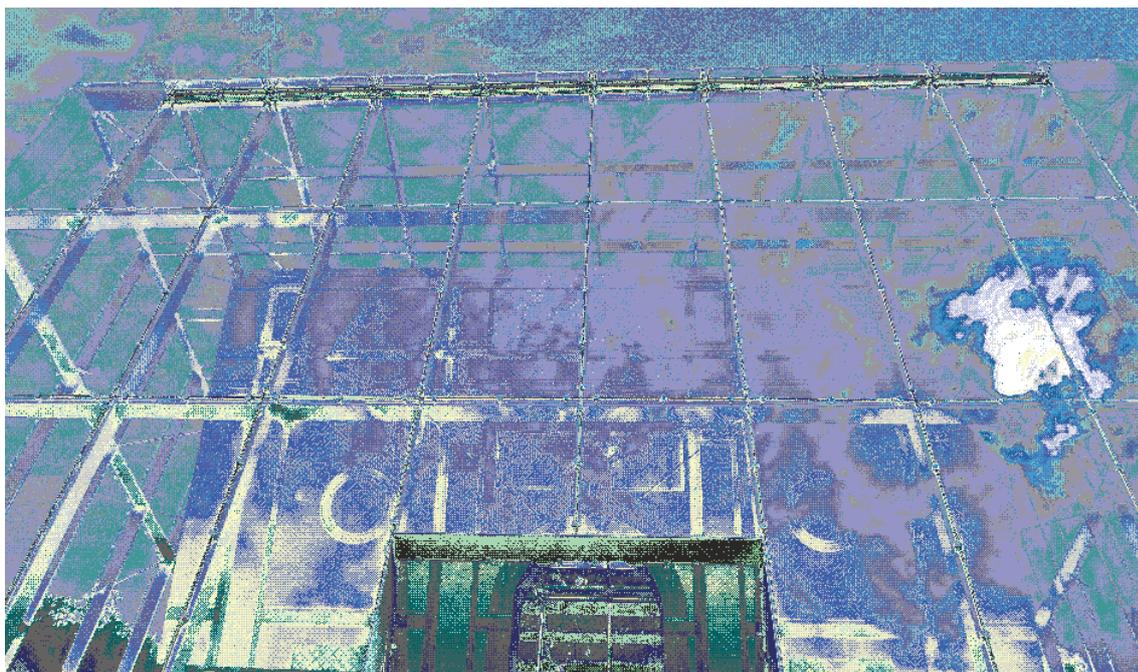


Fig. 1 - Limestor, Dalkingen, Germania (foto A. Lanza Volpe).

### 7.1. Metodi di calcolo e simulazioni energetiche

A causa delle condizioni ambientali e dell'uso, lo spazio racchiuso dall'involucro è sede di trasferimenti di calore (conduzione, convezione ed irraggiamento) e di massa (assorbimento d'acqua, evaporazione). Gli scambi di calore che si stabiliscono tra l'edificio e l'ambiente circostante dipendono in larga misura dalle caratteristiche geometriche e termofisiche della struttura, dalle condizioni climatiche esterne e dalle condizioni termiche che si mantengono nell'ambiente interno.

I regimi di flusso possono essere sostanzialmente di due tipi: stazionario e transitorio. Quando la potenza termica in un sistema non varia nel tempo e la temperatura in ciascun punto non cambia si parla di regime stazionario o permanente: in qualsiasi punto la potenza termica entrante è pari esattamente a quella uscente e non si ha alcuna variazione dell'energia interna. Con il regime stazionario si considera un comportamento termico semplificato dell'edificio; si tratta di un'ipotesi che risulta molto utile e indispensabile nelle normali applicazioni impiantistiche. Conoscendo le temperature di progetto esterna e interna, la geometria e i materiali, in regime stazionario si può determinare ad esempio la trasmittanza di un componente. Quando invece la temperatura in qualche punto varia nel tempo allora si dice che la trasmissione di calore nel sistema avviene in condizioni di regime non stazionario, detto anche regime transitorio. In tal caso, occorre considerare i flussi termici associati alla variazione della temperatura nel tempo dell'ambiente e della struttura, a loro volta dipendenti dalle caratteristiche capacitive dei materiali impiegati. In queste condizioni, il bilancio termico comprende la variazione del tempo dell'energia interna dell'aria e delle strutture e ciò rende notevolmente più complessa la valutazione dei corrispondenti flussi termici. Il bilancio di energia dell'aria ambiente comporta la determinazione degli scambi termici sulle superfici interne ed esterne delle pareti tenendo conto dell'irraggiamento solare, del vento e della presenza di corpi solidi a temperatura diverse da quelle dell'aria. Le simulazioni effettuate in regime dinamico permettono un'analisi più realistica e in particolare valutano in dettaglio i contributi apportati dall'inerzia termica dell'involucro e dalla ventilazione. Un caso particolare di flusso termico transitorio si ha quando un sistema è sottoposto a variazioni cicliche della temperatura dell'ambiente che lo circonda: in questi problemi, la temperatura di ciascun punto del sistema assume periodicamente lo stesso valore e anche la potenza termica e l'energia accumulata subiscono variazioni periodiche. Si parla in questo caso di trasmissione del calore in regime periodico o quasi stazionario. Il metodo "quasi stazionario" è più semplice e tiene conto dei vantaggi della massa termica. Basti pensare all'evoluzione della temperatura esterna: questa si può considerare, in prima approssimazione, variabile attorno ad un valore medio giornaliero fra un valore minimo (raggiunto di solito prima dell'alba) e un valore massimo (raggiunto dopo il mezzogiorno).

Per poter valutare i trasferimenti di calore e di massa si possono quindi utilizzare vari metodi, da calcoli semplificati a complessi e sofisticati *software* di simulazione che permettono la rappresentazione matematica del comportamento fisico della costruzione. A seconda delle fasi progettuali e degli obiettivi prefissati è necessario orientarsi verso uno

strumento piuttosto che verso un altro. Per un corretto dimensionamento occorre simulare diverse risposte progettuali in funzione anche delle diverse condizioni ambientali. Il numero di parametri da considerare spesso non permette una semplice applicazione di metodi dettagliati di simulazione. Ai fini pratici, risulta quindi importante procedere utilizzando metodi semplificati che permettano di valutare e proporre quei correttivi necessari a garantire la sicurezza, il benessere e la conservazione. Un metodo semplificato di dimensionamento può essere utile per determinare le caratteristiche geometriche di aperture che permettano il passaggio del necessario quantitativo d'aria, in relazione a una differenza di temperatura richiesta. Tali ipotesi potranno poi essere verificate con metodi dettagliati di simulazione fluidodinamica, con calcoli onerosi ma che tengono conto di molteplici parametri. Un buon dimensionamento può rendere molto più agevoli le fasi successive del progetto o ne riduce i tempi, un cattivo dimensionamento richiederà maggiori sforzi e una consistente serie di variazioni per raggiungere l'*optimum* (Lanza Volpe, 2012). Una prima fase di studio, corrispondente al dimensionamento delle aperture necessarie per la ventilazione all'interno degli ambienti vetrati, è stata condotta attraverso un calcolo di tipo stazionario su modelli bidimensionali; una seconda fase è stata invece orientata allo studio di modelli tridimensionali tramite simulazioni fluidodinamiche *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*) (McGrattan et al. 2007) in regime periodico che permettono una comprensione più dettagliata dei flussi d'aria, con la verifica delle caratteristiche della direzionalità del flusso d'aria e della distribuzione dei gradienti di temperatura.

Modelli di fluidodinamica computazionale sono utilizzati per prevedere il movimento dell'aria negli ambienti sin dalla metà degli anni '70. Purtroppo, può essere difficile costruire modelli realistici *CFD* di flussi d'aria perché la diffusione dei flussi e altre condizioni al contorno non possono essere ben compresi o facilmente definiti. Inoltre, i flussi d'aria all'interno degli ambienti in genere richiedono la modellazione della turbolenza. La principale funzione delle simulazioni fluidodinamiche è quella di risolvere le equazioni di Navier-Stokes e le equazioni ad esse collegate. La risoluzione per via analitica di queste equazioni è fattibile solamente in casi semplici con flussi laminari e geometrie semplici, mentre le risoluzioni di casi reali, in cui compaiono di frequente flussi turbolenti, richiedono un approccio numerico. I modelli *CFD* sono spesso classificati in base al modo in cui la turbolenza è indirizzata. La simulazione numerica diretta (*DNS*) delle equazioni di Navier-Stokes è possibile, ma richiede una risoluzione della griglia molto fine e piccoli passi di tempo e la capacità di calcolo richiesta è eccessiva. Quindi sono stati sviluppati due gruppi di modelli matematici per ridurre lo sforzo di calcolo associato alla turbolenza. Questi modelli differiscono nel modo in cui la turbolenza è approssimata. Il metodo *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (*RANS*) risolve in modo mediato nel tempo le equazioni di Navier-Stokes. Il modello *Large Eddy Simulation* (*LES*) risolve il comportamento transitorio del moto turbolento su larga scala che tende ad avere il maggiore impatto sul moto turbolento e approssima la turbolenza alla piccola scala per ridurre i tempi di calcolo. *LES* si pone come una giusta via di mezzo tra una modellazione di tipo *RANS*, più rapida ma più approssimativa e una simulazione numerica diretta *DNS*

più esatta ma dal costo computazionale proibitivo. I metodi *LES* sono quindi più adatti a risolvere i problemi di flusso transitori. *LES* richiede più tempo rispetto ai metodi *RANS*, tuttavia, limitando la soluzione a geometrie regolari, può essere utilizzato un risolutore molto veloce. Questa tecnica è stata impiegata per sviluppare un modello *LES* semplificato: *Fire Dynamics Simulator (FDS)* (Musser et al., 2001).

Il modello risolve numericamente una forma di equazioni di Navier-Stokes appropriate per le basse velocità e il flusso termico. Le derivate parziali delle equazioni di conservazione della massa, quantità di moto ed energia sono approssimate come differenze finite e la soluzione è aggiornata nel tempo su una griglia rettilinea tridimensionale. La radiazione termica viene calcolata utilizzando una tecnica agli elementi finiti sulla stessa griglia del risolutore di flusso. *Smokeview* è un programma di supporto a *FDS* che produce le immagini e l'animazione dei risultati. *FDS5* è sviluppato e mantenuto dal *Building and Fire Research Laboratory (BFRL)* del *National Institute of Standards and Technology (NIST)* (Gissi, 2009). Durante tutto il suo sviluppo il software, come suggerisce il suo nome, è stato volto a risolvere i problemi dello studio della dinamica del fuoco e della combustione, ma esso viene anche utilizzato in modo efficace per modellare il trasporto di calore a bassa velocità e il trasferimento di calore radiante e convettivo tra superfici solide e gas.

## 7.2. Metodologia di dimensionamento delle aperture

Un involucro trasparente esposto al sole può diventare una vera e propria “serra” che agisce come barriera che blocca il flusso di calore e fa sì che si stabilisca una temperatura elevata al di sotto di essa. La mancata attenzione per tale aspetto può provocare condizioni non accettabili per il comfort dei fruitori oltre che temperature dannose per i reperti da proteggere. L'irraggiamento che colpisce un vetro viene in parte riflesso, in parte assorbito, in parte trasmesso. L'incidenza di queste componenti su un vetro stabilisce il fattore di riflessione, il fattore di assorbimento, il fattore di trasmissione. Un vetro convenzionale chiaro (float) riflette circa l'8% della radiazione solare incidente, ne assorbe circa il 9% e ne trasmette il rimanente 83% nell'ambiente interno. La radiazione solare viene quindi in gran parte trasmessa all'interno, investendo le superfici presenti e aumentandone la temperatura. Queste a loro volta riemettono energia termica sotto forma di radiazioni infrarosse di lunghezza d'onda superiore ai 3  $\mu\text{m}$  per le quali il vetro risulta opaco, instaurando quel fenomeno comunemente noto come effetto serra. Questo comportamento risulta alquanto sfavorevole nei mesi estivi (Lanza Volpe, 2012).

Per diminuire l'energia entrante nell'ambiente attraverso il vetro, si può agire attraverso l'impiego di un materiale con un basso fattore solare “g”, che rappresenta la componente solare trasmessa rispetto a quella incidente. Ciò non è però sufficiente a bloccare la radiazione entrante e il conseguente accumulo di calore. Per una condizione come quella di un volume vetrato, la convezione costituisce il principale meccanismo di raffreddamento: il terreno riscalda anche l'aria sovrastante che sale verso l'alto, richiamando dall'esterno aria fresca che sottrae ulteriore calore. In un ambiente chiuso questo meccanismo viene inter-

rotto poiché l'aria calda non può uscire. In un ambiente aperto il calore assorbito viene invece continuamente allontanato. Un sistema efficace per permettere di estrarre il calore accumulato dagli ambienti vetrati e di raffrescarli è dunque costituito dalla ventilazione. Tre possibili forze possono attivare la ventilazione: ventilatori o altri impianti meccanici, il vento e le differenze termiche. I mezzi meccanici spesso non vengono scelti per ragioni di costo e il vento non può essere considerato una fonte affidabile di ventilazione, poiché pochissimi siti nel mondo sono ventilati durante le giornate più calde dell'anno. Pertanto la ventilazione naturale determinata da differenza termica e quindi da differenze di densità rappresenta il tipo di ventilazione a cui faremo riferimento (Lieb, 2012). La ventilazione può soddisfare condizioni di benessere ai fruitori, oltre che permettere la conservazione dei reperti e la sicurezza degli ambienti. Per quanto riguarda il benessere, la ventilazione influisce sulla qualità dell'aria interna e quindi sulla salute degli occupanti e permette di assicurare il ricambio d'aria in base al numero di persone presenti. Secondo la norma *UNI 10339* di riferimento per il dimensionamento di impianti aerulici nel terziario, la portata minima di aria esterna di rinnovo per ambienti museali è di 6 l/s a persona, mentre lo *Standard ASHRAE* richiede 10 l/s. La norma *UNI EN 13779* definisce i requisiti prestazionali per i sistemi di ventilazione e condizionamento degli edifici non residenziali e distingue quattro categorie di qualità dell'aria. Per mantenere una qualità media, occorrono già tra 10 e 15 l/s d'aria per persona. Nel caso in cui il ricambio d'aria è affidato a un impianto di ventilazione controllata, possono essere sufficienti anche 6 – 10 l/s per persona. La *UNI EN 15251* coniuga aspetti di carattere energetico con aspetti relativi alla qualità dell'aria negli ambienti interni e, riguardo la progettazione degli impianti di ventilazione, specifica i valori minimi di ventilazione per tre categorie di persone con diversi livelli di aspettativa. Per un normale livello di aspettativa e per edifici di nuova costruzione o ristrutturazione, prevede un ricambio pari a 7 l/s a persona. Diversi sono i parametri che influenzano il benessere: temperatura, umidità, attività svolta, abbigliamento, fattori organici, fattori psicologici e culturali, ecc. Nei mesi caldi la velocità media dell'aria non dovrebbe superare 0,5 m/s. Occorre sottolineare che le suddette portate di aria non sono in ogni caso sufficienti per rimuovere i carichi termici.

Ai fini della conservazione, la ventilazione evita l'accumulo di inquinanti pericolosi per i reperti e permette di evitare temperature dannose, inoltre può permettere di risolvere le problematiche legate al carico di umidità determinato dai visitatori del sito. Allo stesso tempo, il dimensionamento della portata di ventilazione per il raffrescamento dell'ambiente offre un vantaggio in termini di sicurezza, poiché assicura il ricambio d'aria ambiente necessario in caso d'incendio previsto dalle norme, al fine di consentire l'allontanamento di prodotti di combustione, fiamme, fumo e calore e rende minimi i danni all'edificio e alle cose (Lanza Volpe, 2012).

Già in fase preliminare occorre quindi garantire opportune aperture che permettono il passaggio del necessario quantitativo d'aria. Si illustra di seguito la metodologia per il dimensionamento di tali aperture in coperture vetrate tratta da Lieb, R. D., *Freie Durchströmung großer Glashallen*, Universität Stuttgart - IGE Institut für GebäudeEnergetik, n. 20,

Stuttgart 2010. Tale metodo si basa sul principio che le differenze di pressione costituiscono la forza motrice delle correnti d'aria. Al fine di raggiungere uno stato di equilibrio, se due spazi sono collegati, l'aria fluisce dallo spazio con alta pressione a quello con bassa pressione. Per differenze di pressione causate da operazioni meccaniche avremo:

$$\Delta P = P_1 - P_2 \text{ [Pa]}, \text{ variazione o gradiente di pressione} \quad (1)$$

$$q = \rho/2 \cdot v^2 \text{ [Pa]}, \text{ pressione di stagnazione (detta anche pressione totale)} \quad (2)$$

cioè la pressione di un punto di ristagno. Nel punto di ristagno la velocità media del fluido è nulla e tutta l'energia cinetica è convertita in energia interna e si aggiunge all'entalpia statica locale. Dove:

$\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] è la densità dell'aria

$v$  [m/s] è la velocità media locale

Affinché vi sia un flusso, la differenza di pressione deve essere superiore alla pressione di stagnazione:

$$\Delta P = P_1 - P_2 > q = \rho/2 \cdot v^2 \text{ [Pa]} \quad (3)$$

Il flusso d'aria incontra durante il moto delle resistenze. Tali forze resistenti sono relazionate all'area delle aperture e alla perdita di pressione che si verifica lungo il percorso del flusso di aria. La perdita di pressione può essere descritta come una perdita di pressione specifica  $\zeta$  in relazione con la pressione di stagnazione dell'aria accelerata:

$$\Delta P_{\text{loss}} = \zeta \cdot q \text{ [Pa]} \quad (4)$$

I valori  $\zeta$  sono coefficienti di perdita localizzata adimensionali, caratteristici della geometria di una determinata apertura e forniscono valori standard di resistenza incontrata. Si possono ricavare da apposite tabelle. Per cui affinché vi sia il moto dell'aria deve essere:

$$\Delta P > q \sum \zeta \quad (5)$$

Nel caso di correnti d'aria in camini o in altri spazi verticali la differenza di temperatura tra interno ed esterno si può ritenere costante, per cui la differenza di pressione dovuta alla differenza termica avrà un andamento lineare e sarà data da:

$$\Delta P_{\text{th}} = \Delta \rho' \cdot g \cdot \Delta h \cdot \Delta \theta_m \text{ [Pa]} \quad (6)$$

Dove:

$\Delta \rho'$  è la variazione di densità specifica dovuta alla variazione di temperatura dell'aria in [kg/m<sup>3</sup> K]

$g$  è l'accelerazione di gravità in [m/s<sup>2</sup>]

$\Delta h$  è l'altezza effettiva in elevazione, differenza di altezza tra le aperture di ingresso e di uscita dell'aria [m]

$\Delta \theta_m$  è la differenza di temperatura media [K].

Nel caso della ventilazione naturale in ambienti vetrati di grandi dimensioni, il calore, solo in piccola parte a terra, è di notevole quantità in altezza, si distribuisce sulle pareti e non in tutta la sezione trasversale. Generalmente è presente un incremento di temperatura, per cui l'incremento di pressione non sarà lineare:

$$\Delta P_{\text{th}} = \int_{h=0}^h (\Delta \rho' \Delta \theta_m) dh g \quad (7)$$

Per l'approssimazione di Boussinesq la variazione di densità risultante per piccole altezze e differenze di temperatura (in questo caso è  $\Delta\theta/T < 0,05$ ) può essere considerata costante poiché ciò rappresenta un errore trascurabile. La variazione di densità specifica deriva dalla legge generale dei gas, dove  $\Delta\rho' = \rho/T_m = 0.004 \text{ [kg/m}^3 \text{ K]}$ ,

la temperatura assoluta  $T_m$  può essere ricavata dall'equazione:

$$T_m = \theta_{zu} + \Delta\theta_m + 273.15 \text{ K} \quad (8)$$

Può essere introdotta una funzione generale del fattore di integrazione  $f$  corrispondente al rapporto tra il valore finale di pressione nel caso di riferimento e il valore finale di pressione nel caso di temperatura interna costante. Per cui:

$$\Delta P_{th} = g \Delta\rho' \Delta\theta_m h/f \quad (9)$$

Per  $f = 1$  otteniamo la spinta termica nota come effetto camino.

Le condizioni di ingresso e uscita possono essere ricavate dal seguente sistema di equazioni che derivano dal principio di conservazione dell'energia di Bernoulli:

$$f(v^2) = \Delta P_{loss} = \Delta P_{th} = f(\Delta\theta) \quad (10)$$

$$\dot{Q} = \rho c_p \dot{V} \Delta\vartheta \quad (11)$$

da cui:

$$\frac{\dot{Q}}{\rho c_p} = \dot{V} \Delta\vartheta \quad (12)$$

Dove:

$\dot{Q}$  è il flusso di calore convettivo dissipato in [kJ/s]

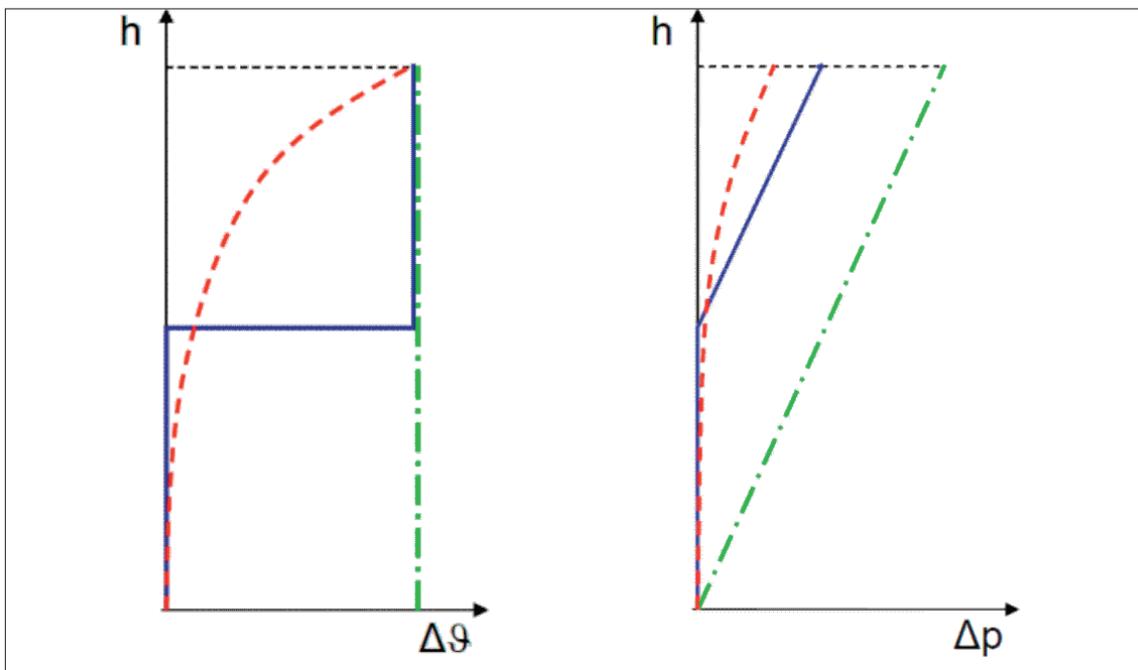


Fig. 2 - Diverse funzioni di temperatura lungo l'altezza creano diverse pressioni (Lieb, 2010).

$\rho$  è la densità dell'aria in  $[\text{kg}/\text{m}^3]$  ( $\rho = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$ )

$c_p$  è il calore specifico dell'aria  $[\text{kJ}/\text{kg K}]$  ( $c_p = 1,0 \text{ kJ}/\text{kg K}$ )

$\dot{V}$  è la portata volumetrica del flusso in  $[\text{m}^3/\text{s}]$

$\Delta\theta$  le differenze di temperatura in  $[\text{K}]$ , dove:

$$\Delta\theta = \theta_{usc} - \theta_{ing} \quad (13)$$

In funzione del significato dei termini su entrambi i lati della equazione (10), i parametri noti possono essere combinati in una costante caratteristica per l'effetto camino:

$$\Phi = g \Delta\rho' h/f \quad (14)$$

e in una costante caratteristica per l'effetto delle resistenze al flusso:

$$\Psi = \rho/2 \cdot \Sigma\zeta \quad (15)$$

dove:

$$\Sigma\zeta = \zeta_{ing} \left( \frac{A_x}{A_{ing}} \right)^2 + \zeta_{usc} \left( \frac{A_x}{A_{usc}} \right)^2 \quad (16)$$

per cui, sostituendo otteniamo:

$$\Delta P_{th} = \Phi \Delta\theta_m \quad (17)$$

$$\Delta P_{loss} = \Psi v^2 \quad (18)$$

La velocità è uguale alla portata volumetrica del flusso diviso l'area  $A_x$   $[\text{m}^2]$ :

$$v = \frac{\dot{V}}{A_x} \quad (19)$$

da cui sostituendo:

$$\Delta P_{loss} = \Psi \left( \frac{\dot{V}}{A_x} \right)^2 \quad (20)$$

Sostituendo nella (10):

$$\Phi \Delta\theta_m = \Psi \left( \frac{\dot{V}}{A_x} \right)^2 \quad (21)$$

$$\Phi \Delta\theta_m = \Psi \dot{V}^2 / A_x^2 \quad (22)$$

$$\dot{V}^2 = (\Phi \Delta\theta_m A_x^2) / \Psi \quad (23)$$

$$\dot{V} = \sqrt{\Phi \Delta\theta_m / \Psi} A \quad (24)$$

$$\dot{V}' = \sqrt{\frac{\Phi}{\Psi}} A \quad \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s} \sqrt{\text{K}}} \right] \quad (25)$$

quest'ultima può essere intesa come capacità di ventilazione specifica del flusso d'aria da cui:

$$\dot{V} = \dot{V}' \sqrt{\Delta\theta_m} \quad (26)$$

o anche:

$$\dot{V} / \dot{V}' = \sqrt{\Delta\theta_m} \quad (27)$$

Così l'equazione (24) può essere risolta per ricavare la portata volumetrica e l'incremento di temperatura, in funzione del calore da dissipare:

$$\dot{V} = \left[ \dot{Q} \frac{\dot{V}'^2}{\rho c_p} \right]^{1/3} \quad (28)$$

$$\Delta\vartheta = \left[ \dot{Q} \frac{1}{\rho c_p \dot{V}'} \right]^{2/3} \quad (29)$$

Tale metodo (Lieb, 2010), nell'ambito della progettazione delle coperture vetrate, può essere utilizzato per il dimensionamento delle aperture per la ventilazione, permettendo l'individuazione dei parametri di natura geometrica e fisica che caratterizzano l'opera da realizzare e che ne garantiscono al tempo stesso la funzionalità. Bisogna precisare che il risultato è strettamente dipendente da una corretta valutazione del carico termico che si sviluppa all'interno dell'involucro vetrato. Grazie alle relazioni ricavate:

- data la geometria, possiamo ricavare portata e differenza di temperatura;
- data la differenza di temperatura desiderata, possiamo ricavare portata e geometria.

### 7.2.1. Applicazione del metodo semplificato di calcolo

Attraverso il metodo di calcolo semplificato descritto è stato possibile effettuare uno studio sulla risposta dell'involucro vetrato in termini di capacità di modificare l'impatto del carico di irraggiamento solare in funzione delle dimensioni geometriche del volume. Si tratta di uno studio analitico comparativo, effettuato con l'obiettivo principale di ottenere una migliore comprensione sul rapporto tra l'irraggiamento solare, la forma dell'involucro vetrato e la ventilazione determinata grazie alle aperture. I risultati sono approssimati, ma rispondenti alla necessità di ventilazione e possono essere verificati in un seconda fase mediante analisi e simulazioni dettagliate (Lanza Volpe, 2012).

#### 7.2.1.1. Dati di input

Il modulo base considerato è di m<sup>3</sup> 8x8x3. Gli altri volumi analizzati sono formati dall'accostamento e dalla sovrapposizione di tale modulo base, per un massimo di m<sup>3</sup> 48x48x21. Sono stati costituiti volumi in modo da avere: stessa area di base e diversa altezza, diversa forma e stesso volume contenuto, diversi forma e volume. La copertura è stata considerata piana in tutti i casi. I volumi analizzati sono caratterizzati da pareti e copertura interamente vetrate; il vetro è stratificato 12 12.4, con uno spessore totale di mm 25,52 e un fattore solare g pari a 0,64, senza dispositivi di schermatura. Il pavimento si presume essere costituito da 100 mm di pietra arenaria.

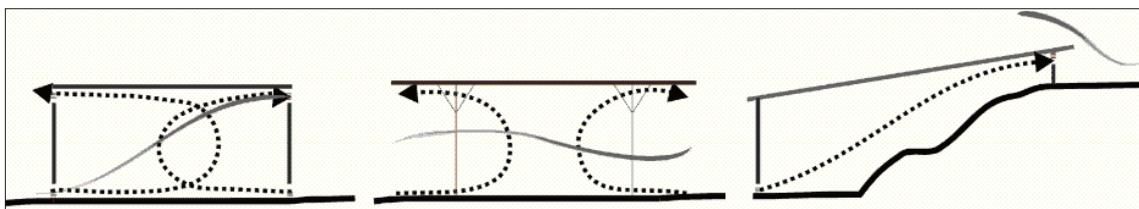


Fig. 3 - Schemi di flussi d'aria attraverso diverse coperture.

La ventilazione dovrà essere tale da compensare le variazioni delle altre componenti del bilancio termico globale: radiazione solare, persone e illuminazione. La radiazione solare massima entrante varia al variare della latitudine, del giorno, dell'ora, dell'esposizione e della tipologia di vetro. Per un confronto, è stato esaminato il comportamento termico dell'involucro in tre situazioni climatiche differenti, corrispondenti a tre diverse latitudini (Valencia, 38,5° N, Francoforte, 50,05° N e Oslo, 59,95° N), il 21 Giugno alle ore 12:00. La temperatura interna di progetto è considerata costante e corrispondente alla temperatura esterna, trascurando in tal modo l'apporto per conduttività attraverso il vetro. Per quanto riguarda la radiazione solare trasmessa per trasparenza, responsabile della maggior parte dell'energia accumulata all'interno dell'ambiente coperto, è stata utilizzata una tabella relativa alla trasmissione attraverso vetro semplice (Fig. 4), con fattori correttivi che tengono conto della tipologia di vetro effettivamente utilizzato e con fattori di accumulo opportunamente tabulati in funzione della latitudine, dell'ora del giorno, della massa media dell'ambiente e dell'esposizione. Il fattore di accumulo tiene conto del processo di accumulo termico all'interno delle strutture dell'ambiente a cui la superficie vetrata si riferisce a partire dall'alba fino all'ora considerata e quindi viene considerato anche il ritardo con cui la radiazione manifesta il suo effetto (Cammarata, 2007). Per quanto riguarda i carichi termici interni, il numero di persone considerato è pari a 8/m<sup>2</sup>, l'illuminazione artificiale costante sui reperti è pari a 18 W/m<sup>2</sup> (Lanza Volpe, 2012).

#### 7.2.1.2. Risultati

Poiché il sole costituisce il parametro più importante per un involucro interamente vetrato, la percentuale di superficie delle varie esposizioni influenza notevolmente i risultati. Utilizzando il metodo di calcolo semplificato, al variare delle caratteristiche geometriche del volume, è stato possibile ricavare:

- le aperture necessarie alla ventilazione, fissando la differenza termica tra l'aria di ingresso e di uscita;
- la differenza termica che si determina tra l'aria d'ingresso e di uscita del volume vetrato, definendo in input le aperture.

Le aperture sono poste alle estremità dell'involucro vetrato, in basso e in alto. All'interno

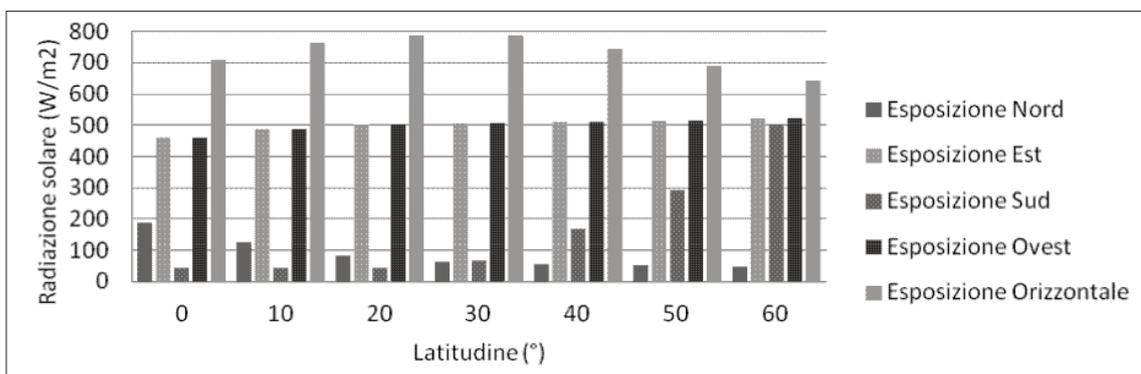


Fig. 4 - Radiazione solare massima attraverso vetro semplice, per varie latitudini Nord, ore 12:00, 21 Giugno [W/m<sup>2</sup>].

del volume, a causa del carico termico, si avrà necessariamente un incremento di temperatura rispetto all'aria esterna. La variazione di temperatura all'interno dell'involucro si può considerare proporzionale al quadrato dell'altezza considerata (Fig. 5). Questo tipo di approssimazione permette una semplificazione dei calcoli.

Sono stati ottenuti vari diagrammi, caratterizzati dallo stesso andamento, per le tre diverse zone climatiche considerate. Tali diagrammi rappresentano relazioni tra:

1. percentuale di aperture e differenza di temperatura tra ingresso e uscita (Fig. 6 a).

La percentuale di aperture è data dal rapporto tra l'area delle aperture complessive di ingresso e uscita e l'intera superficie laterale del volume, per cui il 100% di aperture rappresenta l'assenza di pareti laterali e la necessità di realizzare una tettoia aperta. La differenza di temperatura  $\Delta t_{usc}$  rappresenta l'aria calda con temperatura massima che si ha in corrispondenza dell'uscita. La percentuale di aperture necessarie diminuisce all'aumentare della differenza di temperatura imposta tra l'aria di ingresso e di uscita.

2. percentuale di aperture e altezza del volume (Fig. 6 b).

Se consideriamo volumi aventi le stesse dimensioni di base, ma altezze differenti, otter-

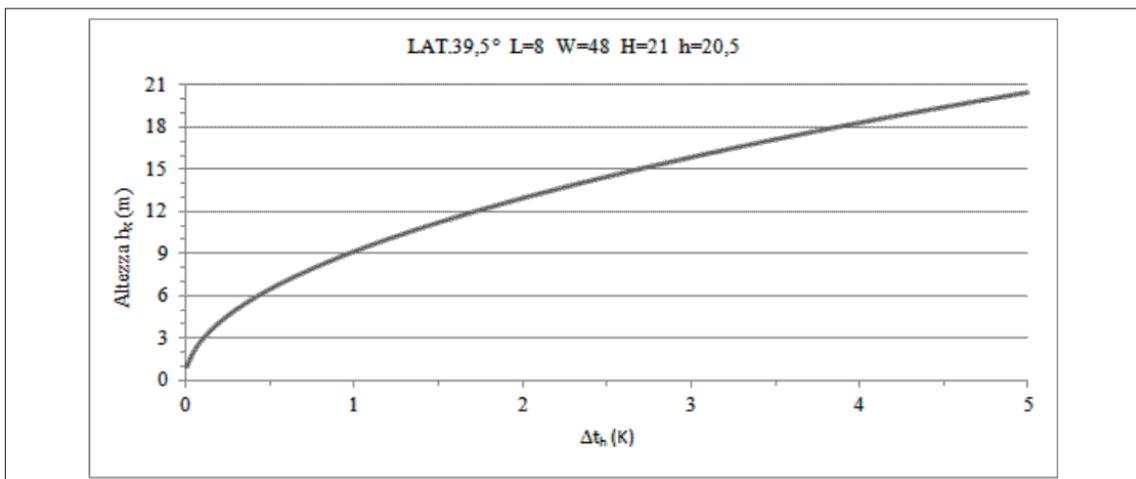


Fig. 5 - Andamento della differenza di temperatura all'interno del volume vetrato: al variare dell'altezza considerata si avranno differenze di temperatura tra interno ed esterno via via maggiori, poiché la temperatura dell'aria in alto è maggiore di quella in basso.

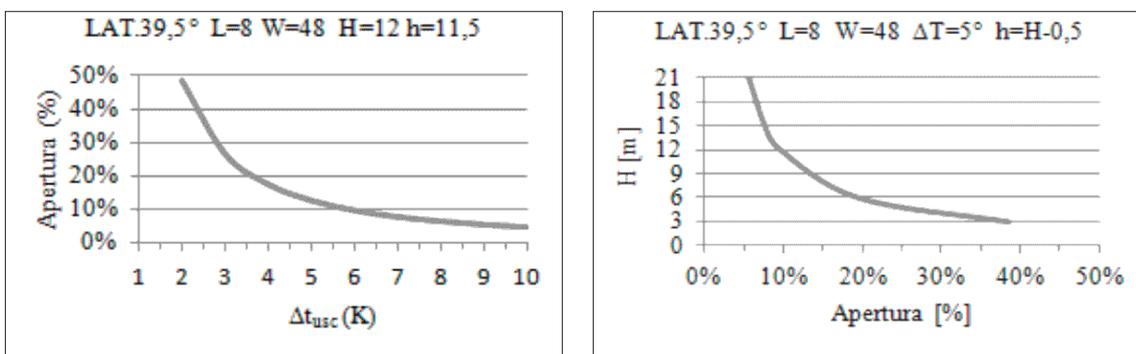


Fig. 6 - Da sinistra: variazione della percentuale di aperture in funzione della differenza di temperatura tra ingresso e uscita (a); variazione della percentuale di aperture per volumi aventi stesse dimensioni di base al variare dell'altezza (b).

remo percentuali di apertura che diminuiscono all'aumentare dell'altezza del volume. Oltre una certa altezza non vi è più un vantaggio termico e un ulteriore incremento non produce miglioramenti di rilievo poiché la percentuale necessaria di aperture tenderà a stabilizzarsi ad uno stesso valore. Per volumi bassi (3-4 m) avremo un'alta percentuale di aperture; ciò significa che la ventilazione non è efficace e occorre realizzare aperture molto ampie su tutti i lati o aprire completamente il volume, privandolo delle pareti laterali.

Sono stati effettuati confronti tra volumi appartenenti alla stessa zona climatica e tra volumi appartenenti a zone climatiche differenti. Per quanto riguarda il confronto tra volumi appartenenti a una stessa zona climatica, a parità di dimensioni di base, il volume più alto è quello che richiede la percentuale minore di aperture, per una determinata differenza di temperatura dell'aria in uscita (Fig. 7, 8); a parità di altezza e di volume, la percentuale di aperture necessaria cambia anche soltanto variando l'esposizione (Fig. 9).

Per valutare il grado di efficienza rispetto agli scambi energetici spesso si valuta il rapporto S/V. Le valutazioni geometriche sul grado di compattezza valgono in condizioni ambientali isotrope e in assenza di radiazione solare; aggiungendo alle regole geometriche gli effetti dell'orientamento (pesando quindi il valore relativo di ogni faccia), la compattezza effettiva cambia significativamente (Rogora, 2005). In questo caso, poiché si tratta di involucro completamente vetrato, il rapporto S/V non risulta essere un parametro efficace.

Lo studio dimostra che, poiché il sole costituisce il parametro più importante che caratterizza il microclima all'interno dell'involucro vetrato, la scelta del tipo di volume incide notevolmente sulle condizioni termiche all'interno e quindi sulla necessità di aperture per il

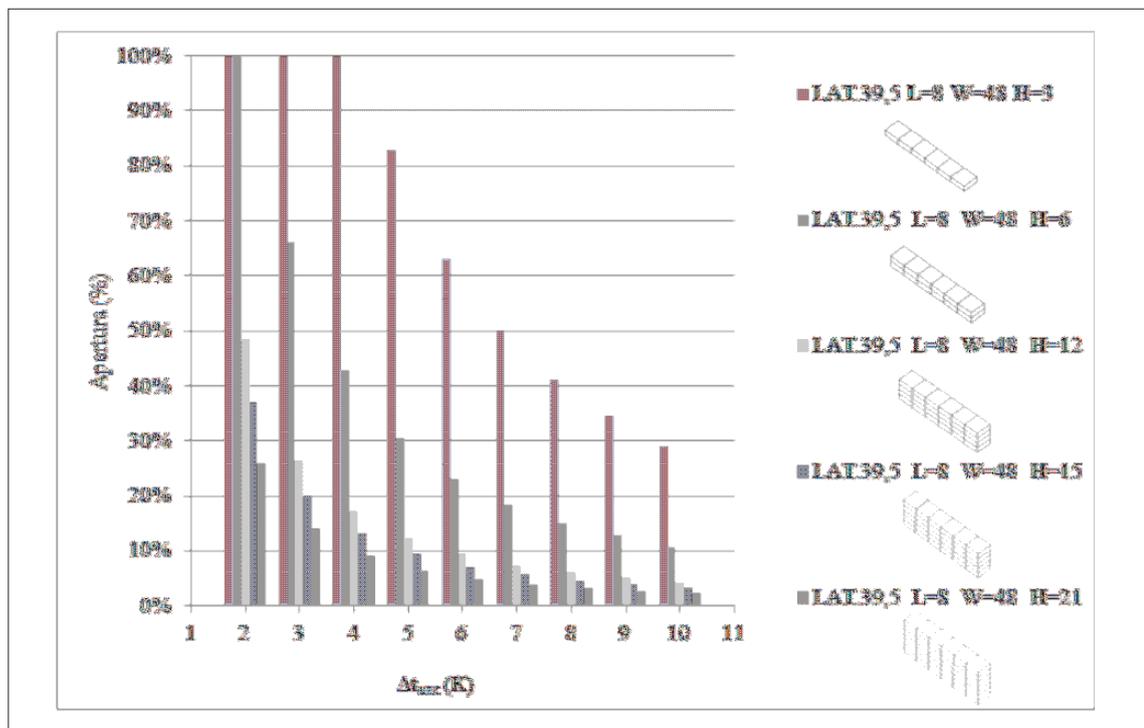


Fig. 7 - Percentuale di apertura per volumi aventi stessa latitudine, stesso orientamento, stesse dimensioni di base e altezze differenti al variare della differenza di temperatura tra ingresso e uscita.

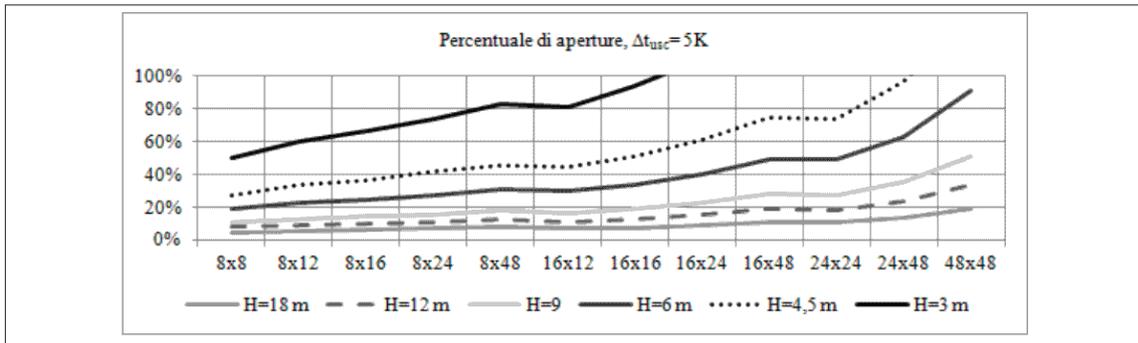


Fig. 8 - Percentuale di aperture necessaria per vari volumi con stessa latitudine ( $39,5^\circ$  N), per una differenza di temperatura tra aria in ingresso e in uscita di 5 K.

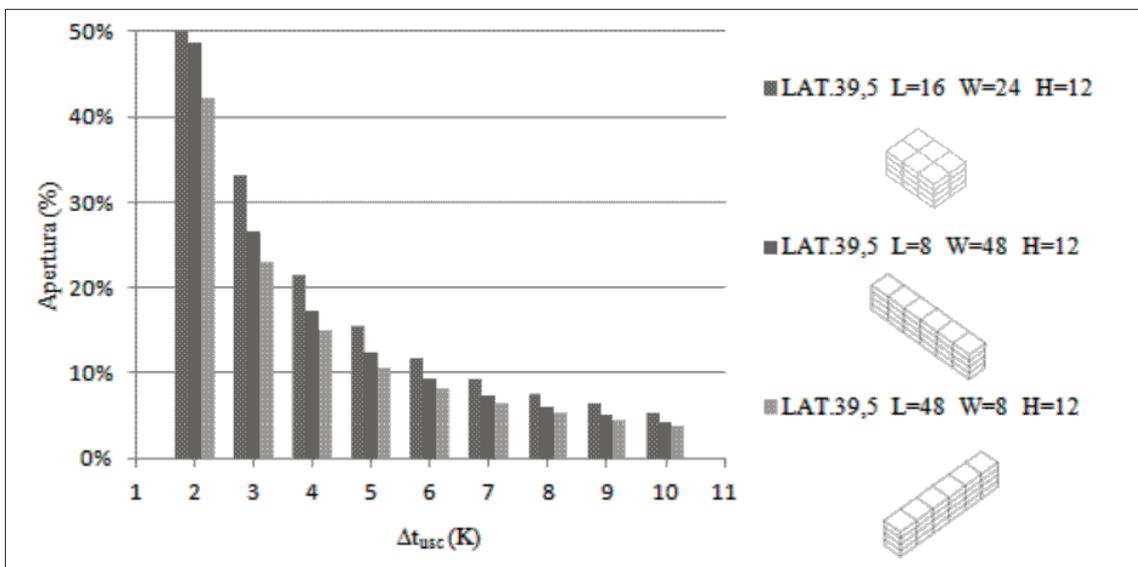


Fig. 9 - Percentuale di apertura per volumi aventi stessa latitudine, differente orientamento, stesso volume d'aria racchiuso, stessa altezza al variare della differenza di temperatura tra ingresso e uscita.

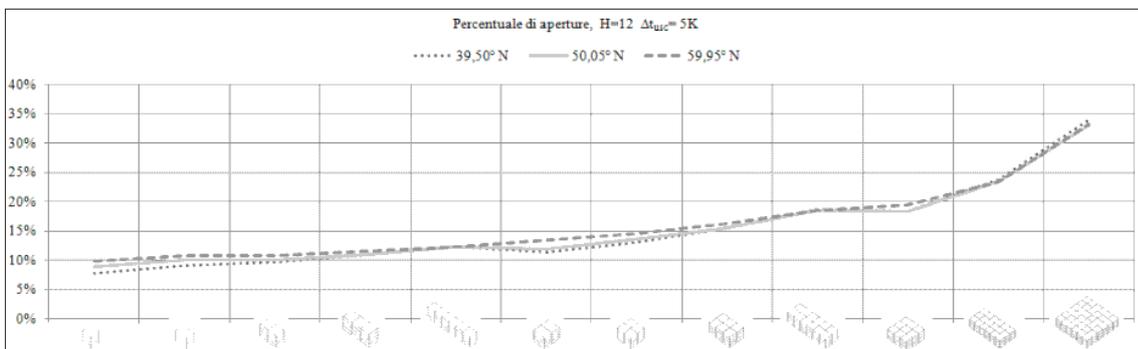


Fig. 10 - Percentuale di aperture per volumi in tre differenti latitudini, alti 12 m, con differenza di temperatura tra aria di ingresso e di uscita pari a 5 K.

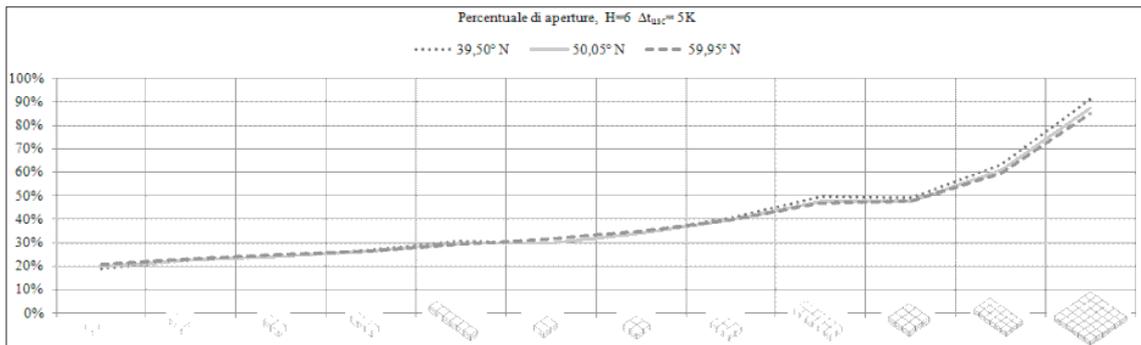


Fig. 11 - Percentuale di aperture per volumi in tre differenti latitudini, alti 6 m, con differenza di temperatura tra aria di ingresso e di uscita pari a 5 K.

raffrescamento tramite ventilazione. In particolare, l'estensione della superficie orizzontale esposta è la componente più importante poiché costituisce la principale fonte di carico termico, essendo maggiore l'irraggiamento solare attraverso essa. A questo proposito, la forma che ha la minima dimensione di base a parità di altezza è la più indicata per tutte le condizioni considerate (Fig. 10, 11). Nelle varie condizioni climatiche, il volume che richiede una percentuale minore di aperture è quello più alto e con superficie di base minore ( $m^3$  8x8x21); il volume che richiede una percentuale maggiore è quello con superficie di base maggiore e altezza minore ( $m^3$  48x48x3).

Per un confronto tra volumi, nei calcoli sono stati utilizzati modelli piani; nei casi reali avremo invece coperture di varie forme, inclinate, curve, ecc. Il suddetto metodo può essere applicato per coperture di varia conformazione poiché ciò che è determinante ai fini del dimensionamento è la differenza di altezza tra ingresso e uscita dell'aria.

Grazie al metodo semplificato di dimensionamento, è stata esaminata la risposta termica in termini di capacità della ventilazione di modificare l'impatto del carico termico e la conseguente necessità di aperture in volumi vetrati differenti e in diversi climi. Tali risultati possono essere verificati con programmi sofisticati che permettono la visualizzazione del flusso che si ha dentro l'ambiente e il suo andamento nel tempo. Nel caso di aree archeologiche, la ventilazione dovrà essere attiva tutto l'anno e pertanto durante le stagioni intermedie, autunno e primavera, si avranno periodi in cui il carico termico è molto ridotto rispetto a quello massimo di progetto e durante la stagione invernale sarà invece necessario limitare la ventilazione per favorire l'accumulo di calore. Risulta quindi importante prevedere una regolazione con sensori di controllo del microclima, in modo da poter variare con una gestione automatizzata le condizioni di apertura e le diverse modalità operative, utilizzando attuatori elettrici oppure pneumatici e garantendo il passaggio dell'aria anche in condizioni atmosferiche avverse (Lanza Volpe, 2012).

### 7.3. Simulazioni fluidodinamiche

#### 7.3.1. Validazione delle simulazioni

Al fine di comparare diverse opzioni progettuali, di valutare l'impatto specifico di un parametro, componente o sistema sulla prestazione complessiva e di controllare il rispetto delle esigenze conservative e di comfort per i visitatori sono state effettuate simulazioni energetiche. Tuttavia, una simulazione non può replicare precisamente le reali dinamiche che regolano il comportamento energetico di una costruzione in quanto essa è basata su una serie di ipotesi fondamentali che ne pregiudicano l'accuratezza. Inoltre, l'incomprensione dei limiti delle metodologie utilizzate può portare a una sovrastima o sottostima dei dati in ingresso, oppure a risultati irreali. Conseguentemente, bisogna porre particolare attenzione nell'interpretazione dei risultati, in quanto essi costituiscono una rappresentazione relativa di come funziona o può funzionare un sistema edificio - ambiente. Un software di simulazione è una risorsa preziosa se interpretata e usata in maniera appropriata; ad esempio, il confronto, effettuato sotto le stesse ipotesi, tra due o più soluzioni, risulterà significativo ai fini delle scelte progettuali (Bottiglioni, Mingozzi, 2008). Un modello di simulazione è costituito tra tre principali categorie di componenti:

1. geometria, parametri e proprietà per la sua descrizione fisica;
2. variabili in ingresso, come la temperatura esterna e la radiazione solare incidente sulle superfici;
3. dati in uscita che descrivono la reazione del sistema quando è sollecitato dalle variabili in ingresso (ASHRAE, 2005).

Poiché un software di simulazione non è in grado di rappresentare fedelmente la realtà

### 7.3. Fluid dynamic simulations

#### 7.3.1. Validation of simulations

*Energy simulations were conducted to compare different design options, to assess the specific impact of parameters, components or systems on overall performance and to verify preservation and visitor comfort requirements. However, a simulation cannot precisely replicate a real construction, because all the simulations are based on a number of key assumptions that affect the accuracy of results. In addition, the scant understanding of methodological limitations may lead to over- or under-estimation of input data, or it may lead to unreal results. Consequently, the interpretation of results requires particular attention, as they represent only a partial representation of a building-environment system. Simulation software constitutes a valuable tool, if correctly understood and properly used; for example, comparison, under the same assumptions, between two or more solutions, would be important for design choices (Bottiglioni, Mingozzi, 2008). A simulation model is made up of three main categories of component:*

- 1. geometry, parameters and properties for its physical description;*
- 2. input variables, such as the outdoor air temperature and solar radiation on surfaces;*
- 3. output data that describes the system response when it is subject to variable inputs (ASHRAE, 2005).*

*Each model needs to be validated with methods of comparison, since a software simulation is unable to accura-*

in ogni suo aspetto e in qualunque situazione, è sempre opportuno validare ogni modello con delle tecniche comparative (Binotto 2009). Per validare le simulazioni sono stati seguiti due metodi: analitico ed empirico. Il metodo analitico è rappresentato dal confronto degli output della simulazione con i risultati del metodo di calcolo semplificato; la validazione empirica ha invece consentito di assicurarsi della capacità dei modelli di offrire un'immagine consistente della realtà tramite la comparazione degli output di temperatura e velocità dell'aria con i rispettivi valori misurati in loco. A tal fine, sono stati effettuati sopralluoghi in due siti archeologici, Dalkingen e Badenweiler, entrambi in Germania, e sono stati rilevati sul sito i valori medi di temperatura e velocità dell'aria, luminanza, temperatura delle superfici. L'obiettivo è stato quello di definire un modello che rappresentasse l'edificio esistente, consentendo così la previsione più accurata del suo comportamento in determinate circostanze. Ovviamente tale tipo di approccio non può essere usato nella fase progettuale, quando non sarà possibile avere misure certe delle condizioni reali del sistema studiato. In tale fase di studio, il mezzo per validare le simulazioni sarà dunque quello analitico, tramite confronto con calcoli semplificati che presumono la conoscenza dei vari fenomeni naturali che incidono sul comportamento del sistema edificio-impianto.

A Dalkingen, in Germania, una copertura interamente vetrata protegge i resti di una porta romana (Fig. 12); si tratta di un involucro quasi cubico con una lunghezza dello spigolo di circa 20 m che sale obliquamente verso sud da un'altezza di 8 m fino a 15 m con un angolo di 23° rispetto all'orizzontale che permette di montare all'interno dell'edificio una

*tely represent reality in all its aspects and in any situation (Binotto 2009). Two methods were adopted to validate the simulations: analytical and empirical. The analytical method is a comparison between simulation results and simplified calculation method results; on the other hand, empirical validation allowed us to confirm the ability of models to give a valid image of reality, through comparison of calculation output and values measured on site. For this purpose, two archaeological sites, Dalkingen and Badenweiler, both in Germany, were visited. The average values of air temperature and velocity, luminance and surface temperature were ascertained on site. The aim was to define a model that represents the existing building, thus allowing a more accurate prediction of its behaviour under certain circumstances. Obviously, this approach cannot be used in the design phase, because measurements of the real conditions of the system studied are not available. Therefore, in this phase of study, the method of validating simulations will be analytical, through comparison of simplified calculations. These simplified methods assume knowledge of the effects of natural phenomena on the building-system.*

*At Dalkingen, Germany, a fully glazed covering structure protects the remains of a Roman gate (Fig. 12); it is an almost cube-shaped glass structure with edges measuring about 20 m in length. The cube slants upwards towards the south, from a height of 8 m to 15 m, at an angle of 23° to the horizontal, which*

replica dell'antica porta di 12 m di altezza. Per la gestione del microclima, è stato adottato un sistema di ventilazione naturale che esclude l'impiego di mezzi meccanici di ventilazione. Le aperture sono poste in basso lungo tutto il perimetro dell'involucro e in alto lungo il bordo superiore del lato Sud che, grazie all'inclinazione della copertura, ha un'altezza maggiore. L'inclinazione dell'edificio amplifica l'effetto camino risultante, così l'aria calda viene dissipata nel punto più alto e nessun accumulo di calore può svilupparsi sotto la copertura (Graf, 2010). Sensori di temperatura e velocità del vento permettono di regolare le aperture evitando il surriscaldamento al di sotto dell'involucro completamente vetrato. Si riportano di seguito i dati misurati *in loco*:

*allows a 12 m high replica of the arch to be fitted on to the building. For management of the microclimate, a natural ventilation system was adopted. The openings are at the bottom, along the entire perimeter of the enclosure, and at the top, along the upper edge of the southern façade. The inclination of this protective shelter enhances the resulting chimney effect, as the hot air is dissipated at the highest point and thus no heat accumulation can develop below the roof (Graf, 2010). Temperature and wind speed sensors are used to set the openings, preventing overheating inside the fully glazed enclosure. The following table shows the data collected on site:*

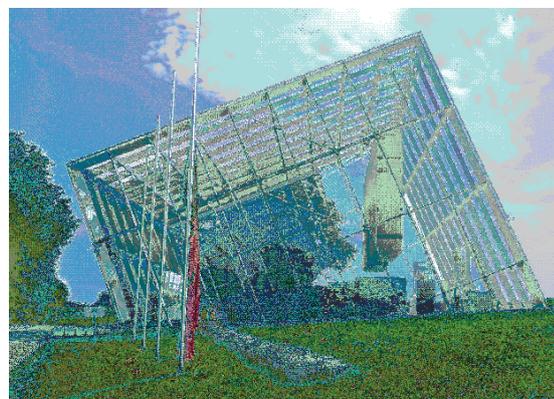
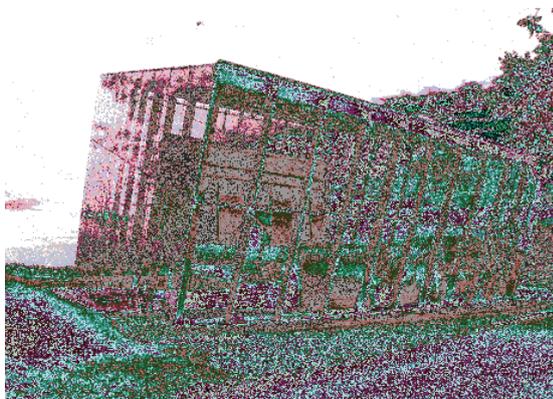
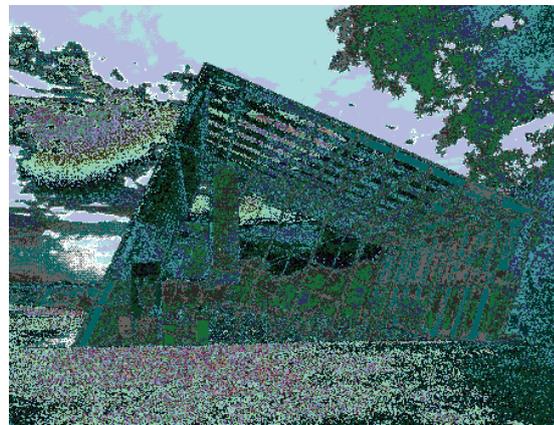
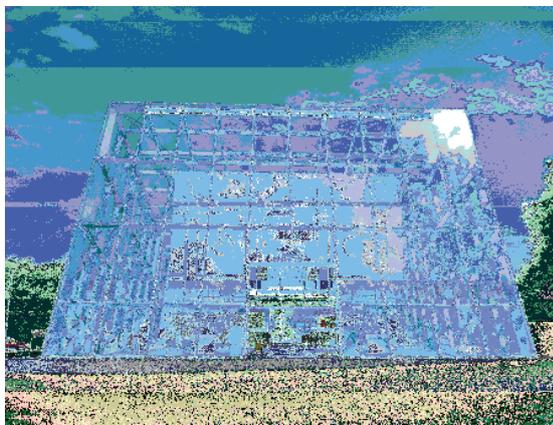


Fig. 12 - Limestor, Dalkingen (Germania), da sinistra e dall'alto, fronti sud, est, nord e ovest (foto A. Lanza Volpe).  
 Fig. 12 - Limestor, Dalkingen (Germany), from left and from top, south, east, north and west side (photo A. LanzaVolpe).

Esterno	Outside
Temperatura dell'aria: circa 32 ° C	<i>Air temperature: about 32° C</i>
Interno	Inside
Temperatura dell'aria: circa 34° C	<i>Air temperature: about 34° C</i>
In corrispondenza delle aperture in basso (ingresso) la velocità dell'aria è di circa 0,3 m/s, davanti alla porta è di circa 1 m/s	<i>At the openings, at the bottom (inlet), the air velocity is about 0.3 m/s, at the door it is about 1 m/s</i>
Temperatura del pavimento: circa 38° C	<i>Floor temperature: about 38° C</i>
Temperatura dei reperti: circa 38° C.	<i>Ruins temperature: about 38° C.</i>
Temperatura della porta ricostruttiva: circa 42° C	<i>Temperature of the reconstructed gate: about 42° C</i>
Temperatura del tetto: circa 44-45° C	<i>Roof temperature: about 44-45° C</i>
Temperatura della struttura in acciaio: circa 47° C	<i>Temperature of the steel structure: about 47° C</i>
La luminanza all'ombra è pari a circa 8000 lux, al sole varia da 18000 a 20000 lux.	<i>Shadow luminance is approximately 8000 lux, luminance in the sunshine varies from 18000 to 20000 lux.</i>
Dalle simulazioni possiamo osservare che l'aria esterna fluisce attraverso le aperture	<i>Using simulation we observed that ex-</i>

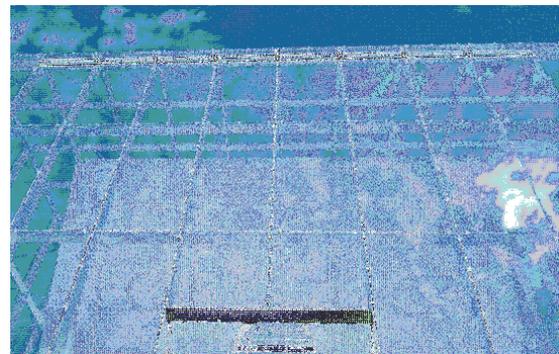
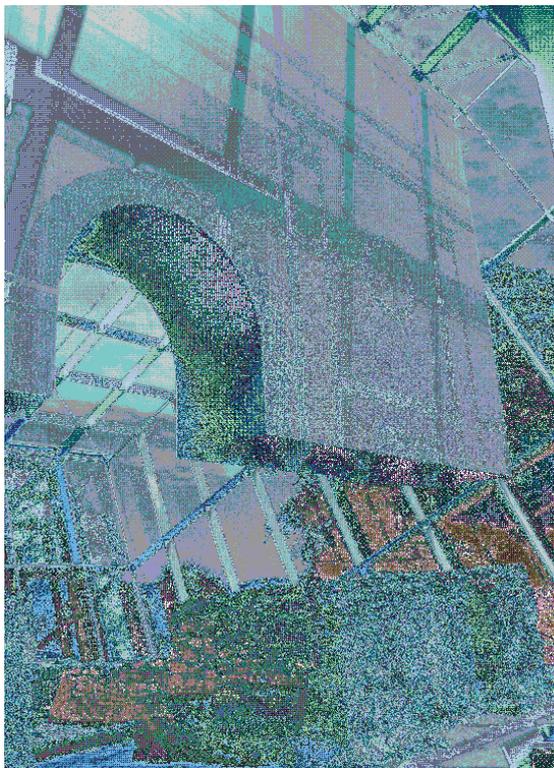


Fig. 13 - Limestor, Dalkingen (Germania), viste interne, da sinistra e dall'alto: replica dell'antica porta romana in materiale plastico (a). Aperture all'estremità superiore della facciata sud (b) e nella parte inferiore lungo l'intero perimetro (c) (foto A. Lanza Volpe).

*Fig. 13 - Limestor, Dalkingen (Germany), internal views, from left and from top: the plastic replica of the ancient Roman gate (a). Openings at the top of the southern façade (b) and at the bottom of the entire perimeter (c) (photo A. Lanza Volpe).*

poste in basso e attraverso la porta e si espande all'interno dell'ambiente. È stata riscontrata una buona conformità tra la realtà e i risultati previsionali (Lieb, 2009). Per confronto è stato anche applicato il metodo analitico. Considerando l'effettiva superficie delle aperture realizzate (circa  $m^2$  12) e utilizzando il metodo di calcolo semplificato per ricavare la temperatura, con tale metodo otteniamo che a 2 m di altezza (altezza uomo e altezza massima dei resti dell'antica porta) la temperatura interna può superare il valore della temperatura esterna di circa 0,33 gradi. Tale valore è prossimo a quello che si riscontra alla stessa altezza nelle simulazioni.

A Badenweiler, in Germania (Fig. 15), la struttura vetrata ha una conformazione a botte longitudinalmente divisa in tre parti, con la parte centrale più alta di quelle laterali. La presenza di aperture garantisce, insieme ai giunti aperti delle lastre di vetro in facciata, la ventilazione naturale. Il guscio di vetro curvo

*ternal air-flows enter through the openings at the bottom and through the door. Substantial agreement was found between real and theoretical results (Lieb, 2009). Considering the effective surface opening area (approximately  $m^2$ 12) and using simplified methods of calculation, we apprehend that, at 2 m in height (head height and maximum height of the remains), the indoor temperature may exceed the external by approximately 0.33 degrees. This value is close to the one obtained by simulations at about the same height.*

*At Badenweiler, Germany (Fig. 15), the glass structure is a longitudinal barrel-vault, divided into three parts, with the central part higher than the lateral ones. The openings and also the open joints of the glass panels of the façade consent natural ventilation. The curved glass shell is detached from the ground (Fig. 16) and between the vertical glass façades and the curved covering struc-*

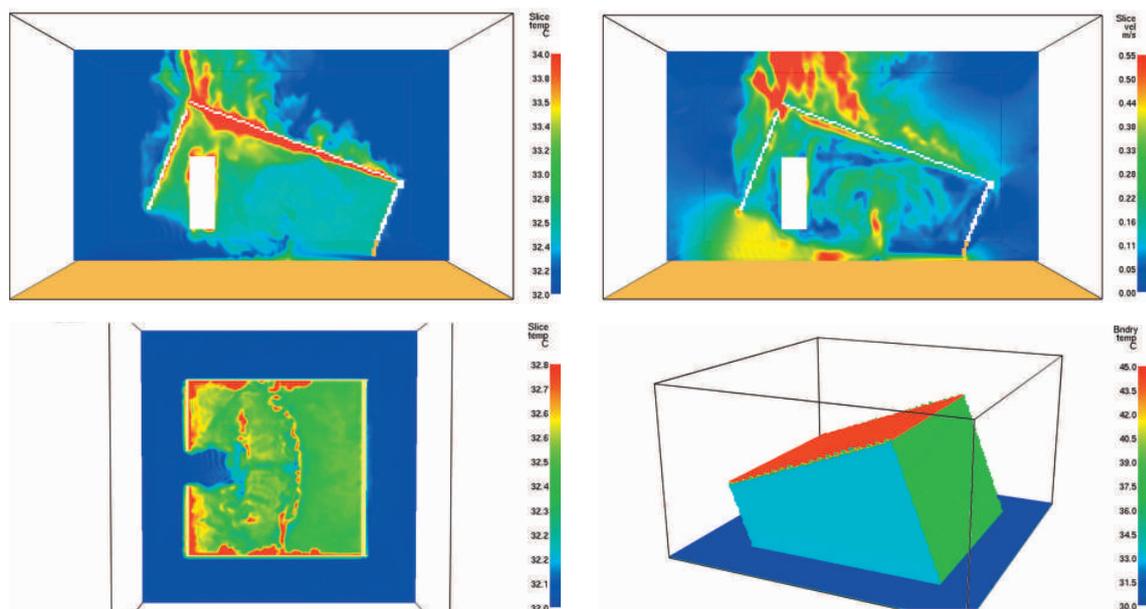


Fig. 14 - Limestor, Dalkingen (Germania), da sinistra e dall'alto, temperature, sezione verticale (a); velocità, sezione verticale (b); temperature, sezione orizzontale a un'altezza di 2 m da terra (c); temperature delle superfici (d).  
 Fig. 14 - Limestor, Dalkingen (Germany), from left and from top, vertical section for temperature (a); vertical section for velocity, (b); horizontal section, height of 2 m from the ground, for temperature (c); surfaces temperatures (d).

si distacca da terra (Fig. 16) e tra la parte di vetro verticale e la copertura curva vi è un'apertura di circa 50 cm, al fine di garantire un'aerazione sufficiente (Fig. 16 a, b). Per evitare la luce diretta, è stato comunque previsto un sistema di ombreggiamento interno costituito da teli bianchi lungo le travi ad arco (Fig. 18). L'intero sistema è controllato automaticamente grazie a sensori di luce e di vento. Si riportano di seguito i valori rilevati in loco:

Esterno

Temperatura esterna dell'aria: circa 36° C

Temperatura del pavimento all'ingresso: circa 30-31° C

Temperatura di una superficie esterna esposta al sole: circa 46° C

Interno

La copertura presenta sul lato sud una tenda per evitare la radiazione diretta.

Temperatura media dell'aria: 38° C

In corrispondenza delle aperture in basso (ingresso) la velocità dell'aria è di

*there are openings of about 50 cm in height, in order to ensure sufficient ventilation (Fig. 16 a, b). Nevertheless, a system of internal shading consisting of white sheets along the arched beams was installed to deflect direct sunlight (Fig. 18). The entire system is automatically controlled by light and wind sensors. The following table shows the on-site values measured:*

*Outside*

*Outside air temperature: about 36° C*

*Temperature of the floor at the entrance: about 30-31° C*

*Temperature of external surface exposed to the sun: about 46° C*

*Inside*

*Screen on the south side to deflect direct radiation.*

*Average air temperature: 38° C*

*At the openings at the bottom (inlet) the air velocity is about 0.9 m/s*

*Inside the average wind velocity varies*

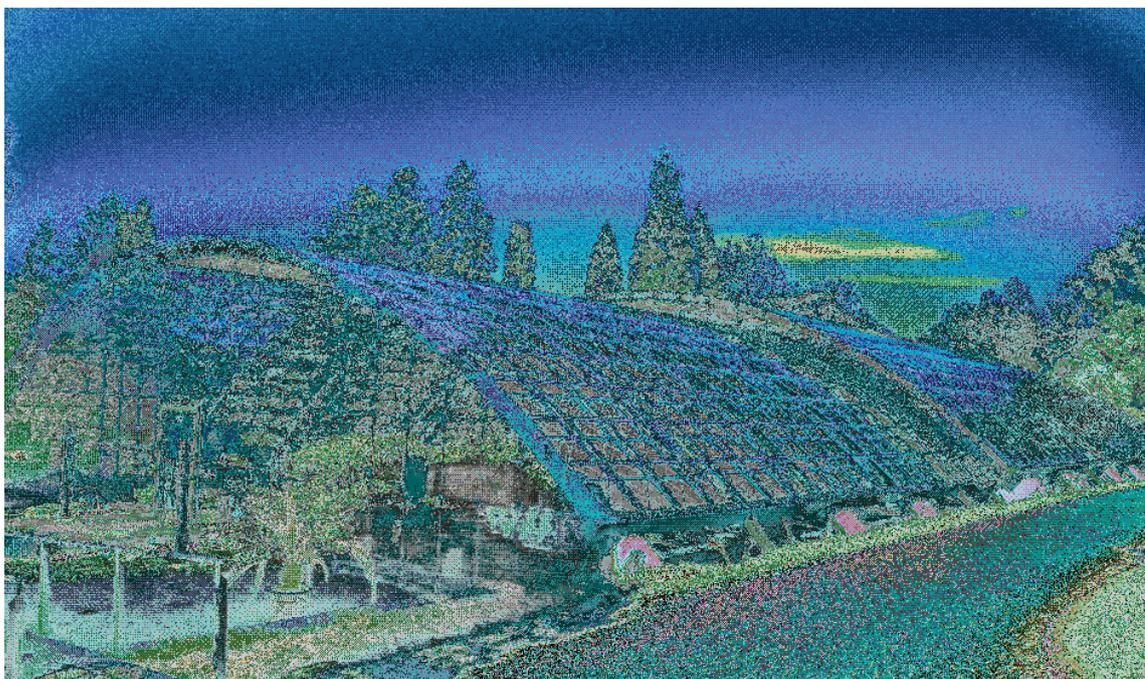


Fig. 15 - Copertura in vetro dei resti delle antiche terme romane, Badenweiler (Germania) (foto A. Lanza Volpe).  
 Fig. 15 - Glass covering structure of the ancient Roman bath ruins, Badenweiler (Germany) (photo A. Lanza Volpe).

circa 0,9 m/s.

All'interno la velocità media del vento è variabile da 0,00 a 2,5 m/s.

Temperatura dei reperti: all'ombra 35° C; al sole fino a 48° C.

La temperatura della tenda è variabile dal basso verso l'alto da 45 a 55° C

Il lato non protetto dalla tenda ha una temperatura di circa 60° C

La luminanza è all'ombra pari a circa 6000 lux.

I valori di temperatura e velocità dell'aria ottenuti dalle simulazioni non si discostano molto da quelli misurati. Si notano invece differenze per quanto riguarda le temperature delle superfici, che dal calcolo numerico risultano notevolmente maggiori. La simulazione può comunque essere considerata validata poiché ciò che risulta importante ai fini del dimensionamento delle aperture è la tempera-

*from 0.00 to 0.25 m/s*

*Temperature of the archaeological ruins: 35° C in the shade, in the sunlight up to 48° C.*

*The temperature of the screen varies from 45 to 55° C*

*The unprotected side has a temperature of about 60° C*

*The shadow luminance is approximately 6000 lux.*

*Air temperature and velocity values of simulations are not much different from those measured. There are differences in the surface temperature values; in this case the simulation results are significantly higher than the values registered. However, the simulation can still be considered valid because the air temperature near the artifacts is important for sizing of openings.*

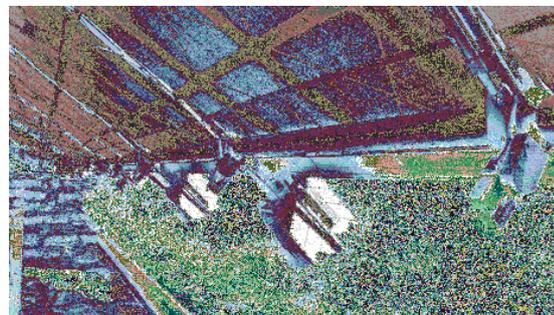


Fig. 16 - Copertura in vetro dei resti delle antiche terme romane, Badenweiler (Germania), da sinistra e dall'alto, vista esterna (a) e interna (b); apertura in basso (c) (foto A. Lanza Volpe).

Fig. 16 - Glass covering structure of the ancient Roman bath ruins, Badenweiler (Germany), from left and from top, external (a) and internal (b) views; openings at the bottom (c) (photo A. Lanza Volpe).

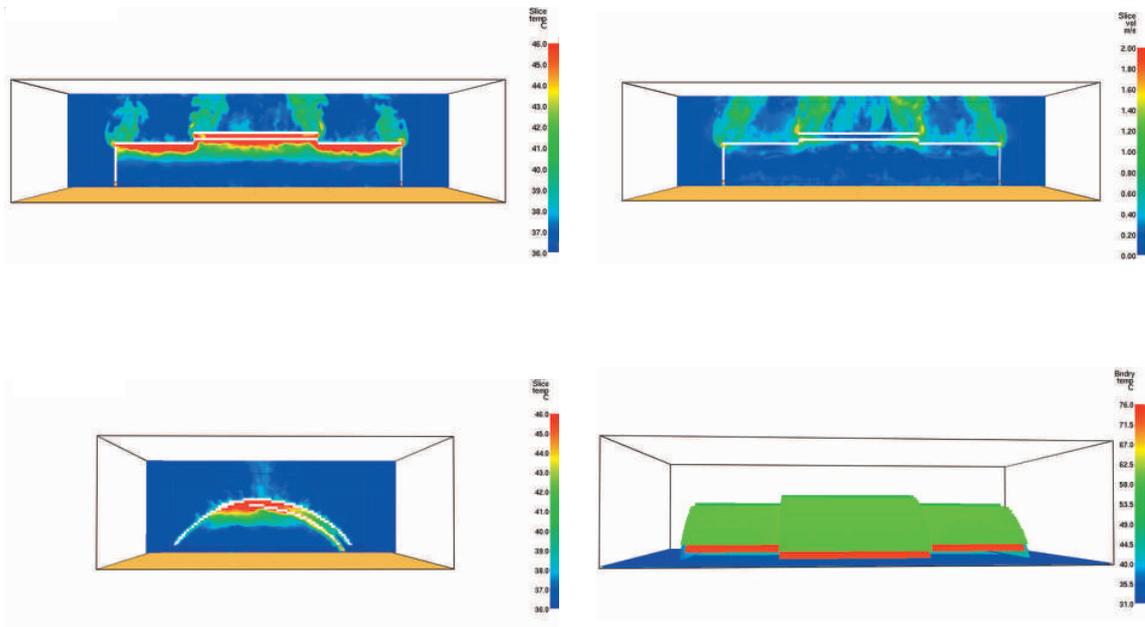


Fig. 17 - Antiche terme romane, Badenweiler (Germania), da sinistra e dall'alto, temperature, sezione verticale (a); velocità, sezione verticale (b); temperature, sezione verticale (c); temperature delle superfici (d).

Fig. 17 - Ancient Roman bath, Badenweiler (Germany), from left and from top, vertical section for temperature (a); vertical section for velocity, (b); vertical section for temperature (c); surfaces temperatures (d).

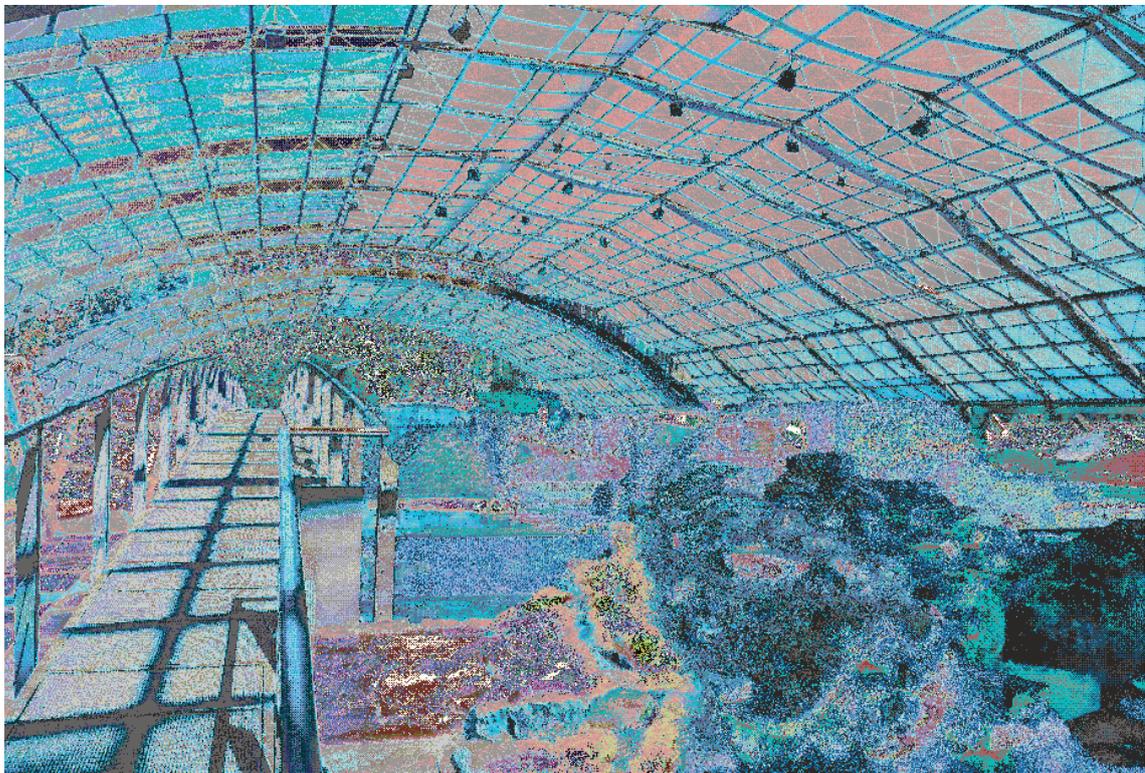


Fig. 18 - Sistema di ombreggiamento dei resti delle antiche terme romane, Badenweiler (Germania) (foto A. Lanza Volpe).  
Fig. 18 - System of internal shading of the ancient Roman bath ruins, Badenweiler (Germany) (photo A. Lanza Volpe).

tura dell'aria in corrispondenza dei reperti.

A Forres, in Scozia, non disponendo di dati misurati in loco, è stato applicato il metodo analitico. In tale sito l'involucro in vetro ha l'obiettivo principale di proteggere dal freddo una lastra scolpita in pietra arenaria, alta 6,5 m. La ventilazione naturale avviene grazie all'ingresso di aria dalle aperture poste in basso lungo il perimetro (Fig. 19) e alla fuoriuscita di aria in corrispondenza della parte perimetrale superiore. Le aperture di ingresso e quelle di uscita hanno rispettivamente un'area di circa 8 m<sup>2</sup>. Dal calcolo semplificato si ricava che tali aperture, in corrispondenza dell'altezza massima della pietra scolpita (circa 6,5 m), producono una differenza di temperatura rispetto all'esterno di circa 2,4 gradi. La simulazione fluidodinamica è stata eseguita con gli stessi parametri definiti nel calcolo semplificato. In questo caso l'ampiezza delle variazioni di temperatura interna in prossimità della pietra da proteggere è pari

*At Forres, Scotland, the analytical method was applied because data collected on site was not available. On this site the main purpose of the glass envelope is to protect a carved sandstone plate, 6.5 m high, from the cold. The natural air ventilation is through the openings at the bottom, along the perimeter (Fig. 19), to the upper perimetral part. The area of inlet and outlet openings is respectively 8 m<sup>2</sup>. Simplified calculation shows that these openings, at the maximum height of the carved stone (about 6.5 m), produce a difference of about 2.4 degrees between the external air and the air inside the box. The fluid dynamic simulations were carried out with the same parameters as the simplified calculation method. In this case the variation in internal temperature near the stone to be protected is about 2 degrees, a value very close to that calculated by the simplified method. This allowed us to validate the accuracy of the*

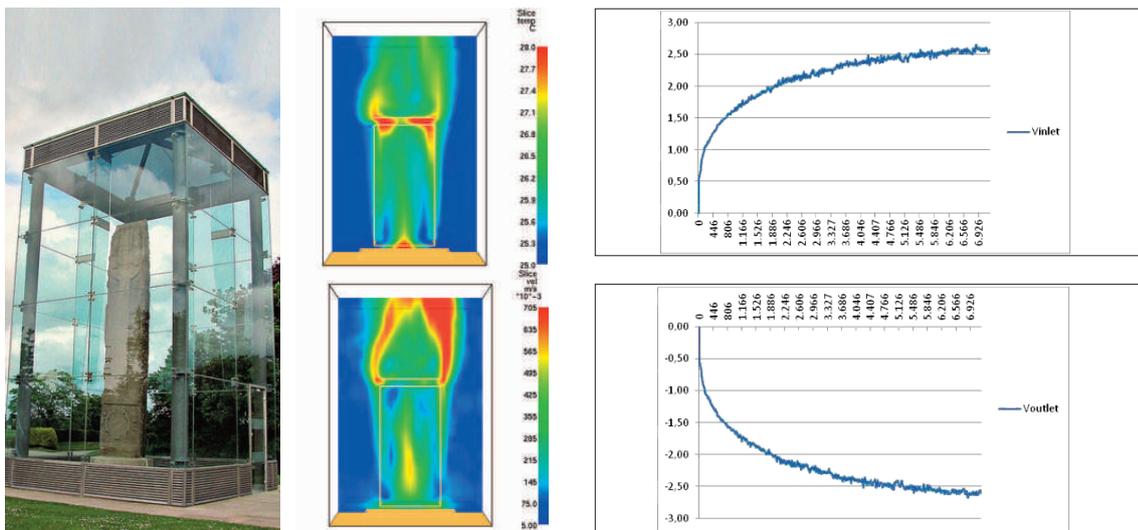


Fig. 19 - Sueno's stone, Forres (Scozia), da sinistra, vista esterna (a); temperatura, sezione verticale (b); velocità, sezione verticale (c); i grafici (d, e) mostrano la portata volumetrica di aria in m<sup>3</sup>/s in ingresso e in uscita. A partire dal tempo t pari a circa 6000 secondi si ha la stabilità del flusso, la simulazione converge.

*Fig. 19 - Sueno's stone, Forres (Scotland), from left, external view (a); vertical section for temperature (b); vertical section for velocity (c); The graphs (d, e) show the inlet and outlet volumetric air flow rate in m<sup>3</sup>/s. From the time equal to about 6000 seconds there is the flow stability, the simulation converges.*

a circa 2 gradi, valore molto prossimo a quello calcolato col metodo semplificato. Ciò ha consentito di validare la correttezza della simulazione. È stata inoltre verificata la convergenza e la stazionarietà del calcolo fluidodinamico (Fig. 19 d, e).

Sulla base del caso di Valencia (Fig. 25 g), in Spagna, è stato definito un modello per simulare le condizioni di un volume interrato con superficie vetrata in copertura. Anche in questo caso è stato applicato il metodo analitico. È stato considerato un volume seminterrato ventilato con superficie vetrata a sud, con aperture poste in basso lungo tutta la vetrata e in alto lungo la copertura sul lato nord. Il modello è stato validato utilizzando il calcolo semplificato. Con tale metodo, all'altezza di 2 m è stata ottenuta una differenza di temperatura rispetto all'esterno di circa 4 gradi. Anche dalla simulazione otteniamo un risultato analogo.

*simulation. The stationarity of computational fluid dynamics was also verified (Fig. 19 d, e).*

*On the basis of the case of Valencia (Fig. 25 g), Spain, an underground simulation model with a glazed roof was defined. In this case too, the analytical method was applied. A ventilated structure below ground was examined, with a glazed southern façade, openings at the bottom along the façade and at the top along the northern side of the covering structure. The model was validated by simplified calculation. A temperature difference of about 4 degrees on the outside was obtained with this method, at a height of 2 m from the ground. We found a similar result also by simulation.*

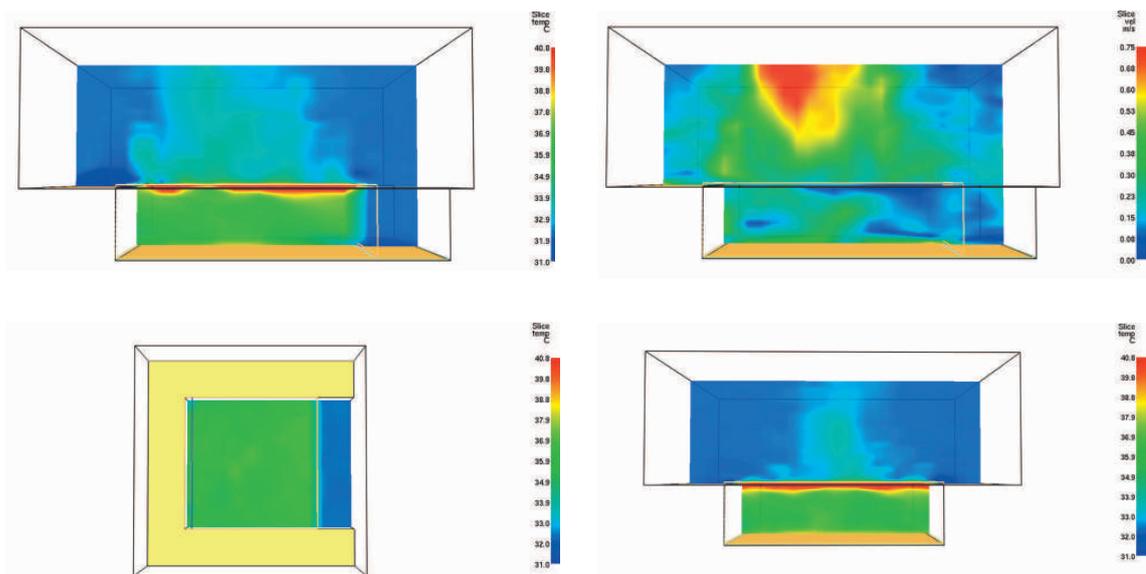


Fig. 20 - Da sinistra e dall'alto, temperature, sezione verticale (a); velocità, sezione verticale (b); temperature, sezione orizzontale a un'altezza di 2 m da terra (c); temperature, sezione verticale (d).

*Fig. 20 - From left and from top, vertical section for temperature (a); vertical section for velocity, (b); horizontal section, height of 2 m from the ground, for temperature (c); vertical section for temperature (d).*

### 7.3.2. Analisi dei risultati

La scelta dei parametri per il confronto tra i vari modelli in diverse situazioni è avvenuta tenendo conto dei fattori che influenzano le condizioni microclimatiche all'interno delle coperture: sito, tipologia di edificio e materiali dell'involucro (Clarke, 2001). Per quanto riguarda i dati in uscita, si è proceduto al raffronto, effettuato sotto le stesse ipotesi, tra due o più tipologie.

#### SITO

##### *Differenti condizioni climatiche*

Per intensità delle radiazioni solari maggiori la distribuzione dell'aria sarà la stessa ma con temperature più alte, come già ricavato anche con il metodo semplificato.

### 7.3.2. Results analysis

The parameter selection criteria for comparison between models in different situations was based on the factors affecting the internal microclimatic conditions: location, type of building and envelope materials (Clarke, 2001). As regards the output data, the comparison between two or more types was made under the same assumptions.

#### LOCATION

##### *Different climatic conditions*

With higher intensity of solar radiation, the air distribution will be the same but with higher temperatures, the same as those already obtained with the simplified method.

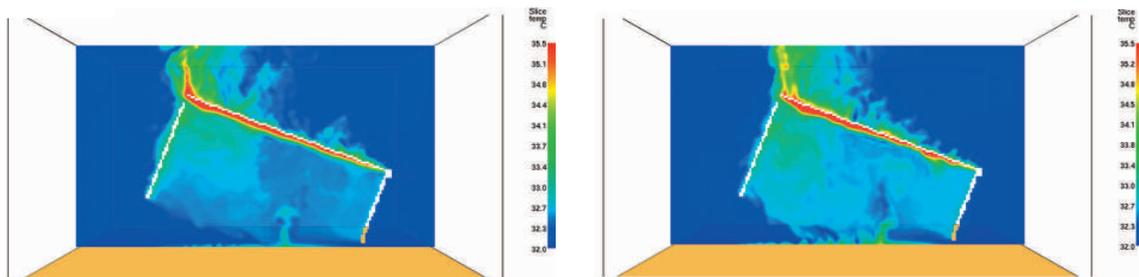


Fig. 21 - Da sinistra, temperature, sezione verticale (a); temperature, sezione verticale per radiazioni solari maggiori (b).  
Fig. 21 - From left, vertical section for temperature (a); vertical section for temperature, higher solar radiation (b).

##### *Differente orientamento*

Se invertiamo l'esposizione delle superfici (ad esempio il lato Sud diventa Est e gli altri lati cambiano orientamento di conseguenza) avremo stessa stratificazione e temperature poiché il volume è interamente vetrato e i ca-

##### *Different exposition*

By inverting the exposure of the façades (for example, the south side becomes east and the other sides change orientation accordingly) there is the same temperature stratification because the volume is

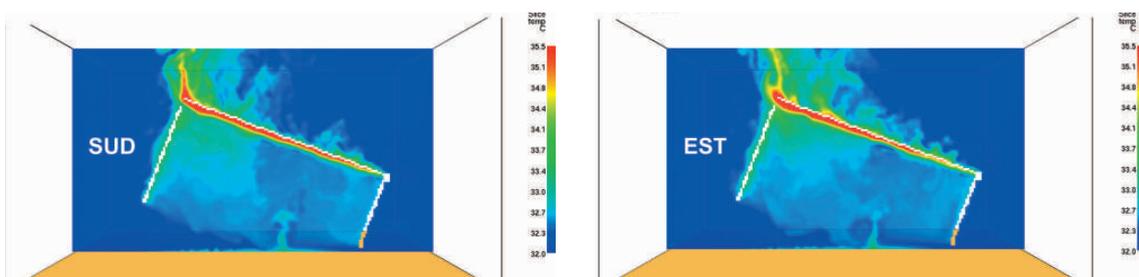


Fig. 22 - Da sinistra, temperature, sezione verticale (a); temperature, sezione verticale per differente orientamento (b).  
Fig. 22 - From left, vertical section for temperature (a); vertical section for temperature, different exposition (b).

ricchi termici sono pressoché gli stessi, variando di poco l'estensione delle diverse superfici esposte.

*fully glazed, thermal loads are almost the same and the different exposed surfaces vary only slightly in extension.*

TIPOLOGIA DI EDIFICIO

TYPE OF BUILDING

*Copertura inclinata - non inclinata*

*Sloping - not sloping covering structure*

In una copertura non inclinata, l'aria calda tenderà a permanere sotto il tetto, con minori velocità di espulsione verso l'esterno.

*If the covering structure is not sloping, the hot air tends to gather under the roof, with a lower velocity ejection to the outside.*

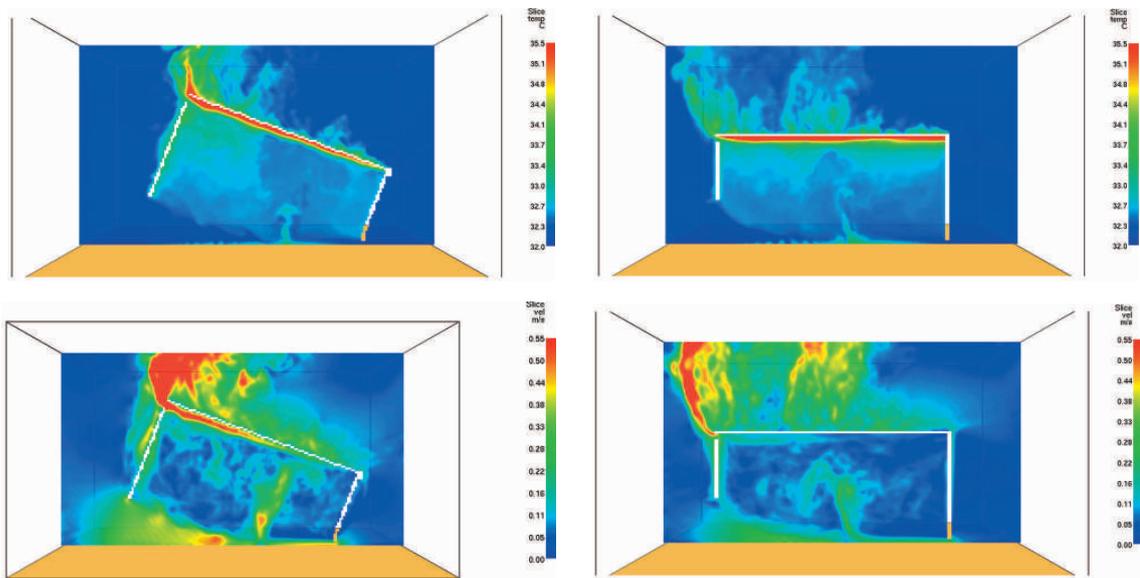


Fig. 23 - Da sinistra, temperature, sezione verticale (a); temperature, sezione verticale per volume non ruotato (b); velocità, sezione verticale (c); velocità, sezione verticale per volume non ruotato (d).  
 Fig. 23 - From left, vertical section for temperature (a); vertical section for temperature, not sloping covering structure (b); vertical section for velocity (c); vertical section for velocity, not sloping covering structure (d).

*Volume ventilato - chiuso*

*Ventilated – closed volume*

In un ambiente chiuso l'ascesa dell'aria più calda è fermata dal soffitto, l'aria si distribuisce secondo la propria densità, aria più calda e più leggera in alto e aria più fredda e più pesante in basso, formando una stratificazione stabile.

*In a closed environment warm air is prevented from rising by the roof; the air is distributed according to its density, warmer and lighter air at the top and cooler and heavier air at the bottom, with a stable stratification.*

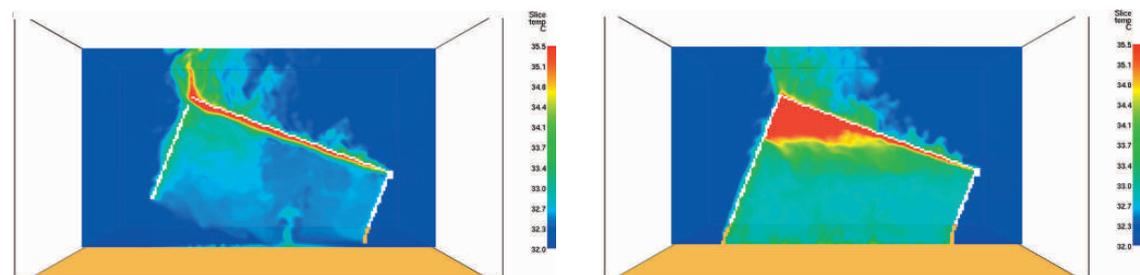


Fig. 24 - Da sinistra, temperature, sezione verticale: volume aperto (a); volume chiuso (b).  
 Fig. 24 - From left, vertical section for temperature: open volume (a); closed volume (b).

*Interramento dell'involucro*

Il terreno a una certa profondità è caratterizzato da una temperatura più o meno costante, pari circa alla media stagionale delle temperature esterne. Dunque, con un volume interrato, i maggiori scambi con il terreno, che in estate avrà una temperatura minore rispetto a quella esterna, portano a condizioni termiche più stabili e ad umidità interne più elevate. Un volume interrato chiuso non ventilato è caratterizzato da stratificazione dell'aria, il pavimento sarà più freddo e il soffitto più caldo e l'aria via via più stabile.

Nel caso di un volume seminterrato, con una sorgente di calore costituita da una superficie vetrata a sud, attraverso tale parete avviene un trasferimento d'aria calda che sale fino al soffitto dove viene bloccata e diverge scendendo verso gli strati più bassi. Se pratichiamo un'apertura nella vetrata in basso e un'apertura in copertura, l'aria esterna entra dal lato sud ed esce dall'apertura in copertura; la temperatura interna tende ad assumere valori prossimi alla temperatura esterna.

Nel caso di volume chiuso interrato, in cui sia presente una lamina di acqua sulla copertura in vetro, la temperatura immediatamente al di sotto della vetrata si mantiene più bassa e l'intero volume risulta raffrescato. Ciò è dovuto al fatto che l'acqua ha un calore specifico  $c = 4.19 \text{ KJ/Kg K}$  e una conducibilità termica pari a  $\lambda = 0.58 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , mentre per il vetro il calore specifico  $c = 0.8 \text{ KJ/Kg K}$  e la conducibilità  $\lambda = 1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . L'acqua è esposta alla radiazione solare diretta che viene così assorbita e accumulata irradiando calore uniforme a bassa temperatura all'interno dell'edificio.

*Underground structure*

*The soil at a certain depth is characterized by a more or less constant temperature, approximately equal to the average seasonal temperatures. Therefore, in an underground volume, a greater number of exchanges with the soil, which in summer has a lower temperature than outside, leads to more stable thermal conditions and higher internal humidity. A closed, non-ventilated underground volume is characterized by air stratification, colder floor, hotter roof and gradually a steadier air-flow.*

*In the case of a structure below street level, with a heat source consisting of a glazed area on the south side, the hot air is transferred through this wall, rises up to the roof where it is blocked and spreads down towards the lower layers. With an opening in the southern façade at the bottom and an opening in the roof, the external air enters from the southern side and exits through the opening in the roof; the internal temperature tends to show values close to the external temperature.*

*In the case of closed underground volumes, with a thin layer of water on the glass covering structure, the air temperature immediately below the roof is lower and the entire volume is cooled. This is because water has a specific heat  $c = 4.19 \text{ KJ / Kg K}$  and a thermal conductivity  $\lambda = 0.58 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , while for glass the specific heat is  $c = 0.8 \text{ KJ / Kg K}$  and conductivity  $\lambda = 1 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ . The water is exposed to direct solar radiation, which is then absorbed and accumulated, irradiating low heat inside the building. It is important to highlight the fact that the formation of con-*

È importante sottolineare che, per volumi interrati o parzialmente interrati, è necessario verificare la formazione di condensa. Il rischio è dovuto al fatto che la temperatura

*denstion has to be calculated for volumes totally or partially underground. In these cases, there is the risk that the temperature of the underground walls will fall*

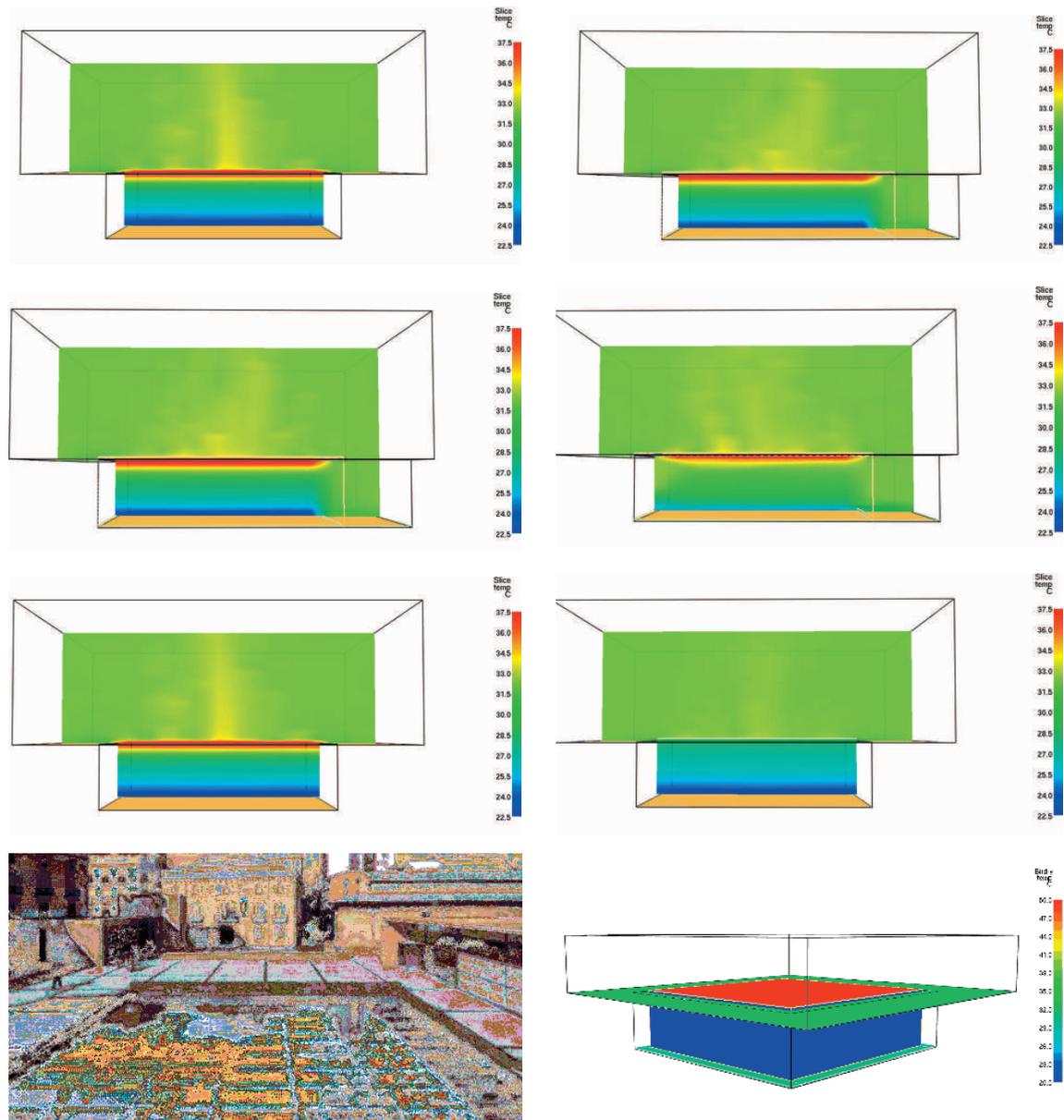


Fig. 25 - Da sinistra e dall'alto, temperature, sezione verticale: volume chiuso interrato con copertura vetrata (a); volume seminterrato con copertura e superficie a sud vetrate (b); volume seminterrato con copertura e superficie a sud vetrate (c); volume seminterrato con copertura e superficie a sud vetrate, aperture a sud e in copertura (d); volume chiuso interrato con copertura vetrata (e); volume chiuso interrato con copertura vetrata e lamina d'acqua sul vetro della copertura (f); vista esterna della copertura vetrata del sito archeologico dell'Almoína, Valençia (Spagna) (g); temperature delle superfici (h).

Fig. 25 - From left and from top, vertical section for temperature, underground closed volume with glazed roof (a); underground closed volume with glazed roof and south façade (b); underground closed volume with glazed roof and south façade and openings (d); underground closed volume with glazed roof (e); underground closed volume with foil of water on the glazed roof (f); external view, glass cover on Almoína archaeological site, Valençia (Spain) (g); surfaces temperature (h).

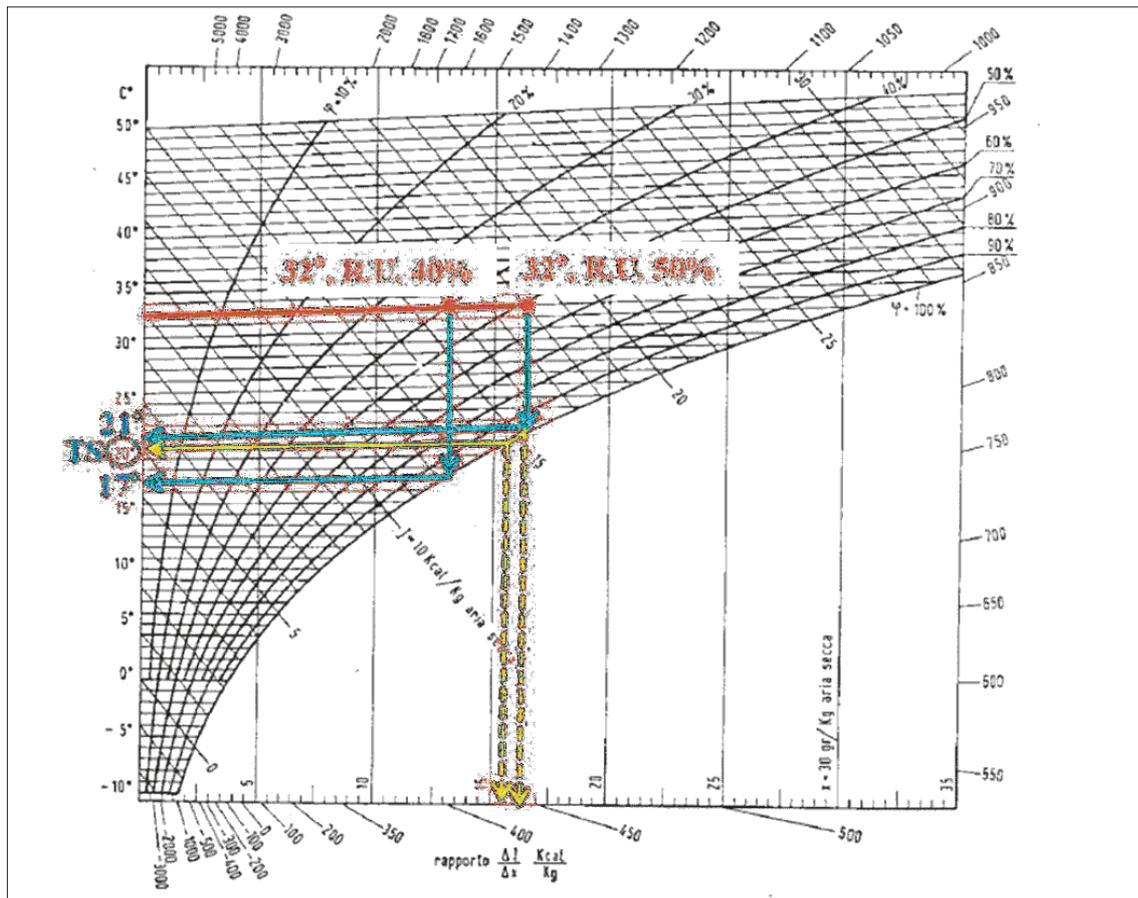


Fig. 26 - Diagramma di Mollier per la determinazione della formazione di condensa sulle superfici.  
 Fig. 26 - Mollier chart for calculation of condensation on surfaces.

delle pareti interrate avrà valori che possono facilmente risultare inferiori alla temperatura di saturazione dell'aria a contatto con esse. Se, ad esempio, la temperatura delle pareti interrate è di 20°, con una temperatura dell'aria di 32° e il 40% di umidità relativa non si formerà condensa; ma con la stessa temperatura e il 50% di umidità relativa avremo la formazione di condensa sulla parete (Fig. 26).

*below the dew point of the air in contact with them. For example, condensation will not build up if the temperature of the underground walls is 20 °, with an air temperature of 32 ° and 40% of relative humidity; but condensation will appear on the walls if the temperature is the same, with 50% of relative humidity (Fig. 26).*

ENVELOPE MATERIALS

MATERIALI DELL'INVOLUCRO

Tetto opaco

Viene simulato un involucro vetrato con copertura opaca in legno. Nel caso di copertura opaca, grazie all'ombra sul pavimento, si ha una riduzione delle temperature.

Opaque roof

*A glass enclosure with opaque wood covering structure was simulated. In the case of an opaque covering structure there is reduction in temperature owing to the floor shadow.*

*Involucro schermato-non schermato*

Viene confrontata la situazione con involucro schermato a sud e con involucro non schermato. Nel caso di involucro schermato, nonostante la temperatura inferiore

Screened – unscreened envelope

*The situation with a screened southern envelope is compared with the unscreened envelope. In the case of a screened enclosure, despite the lower floor tempe-*

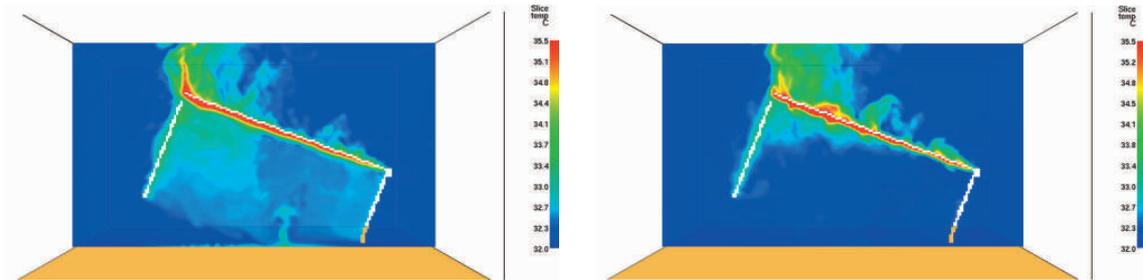


Fig. 27 - Da sinistra, temperature, sezione verticale: volume vetrato (a); volume vetrato con tetto in legno (b).  
 Fig. 27 - From left, vertical section for temperature: glazed volume (a); glazed volume with wood roof (b).

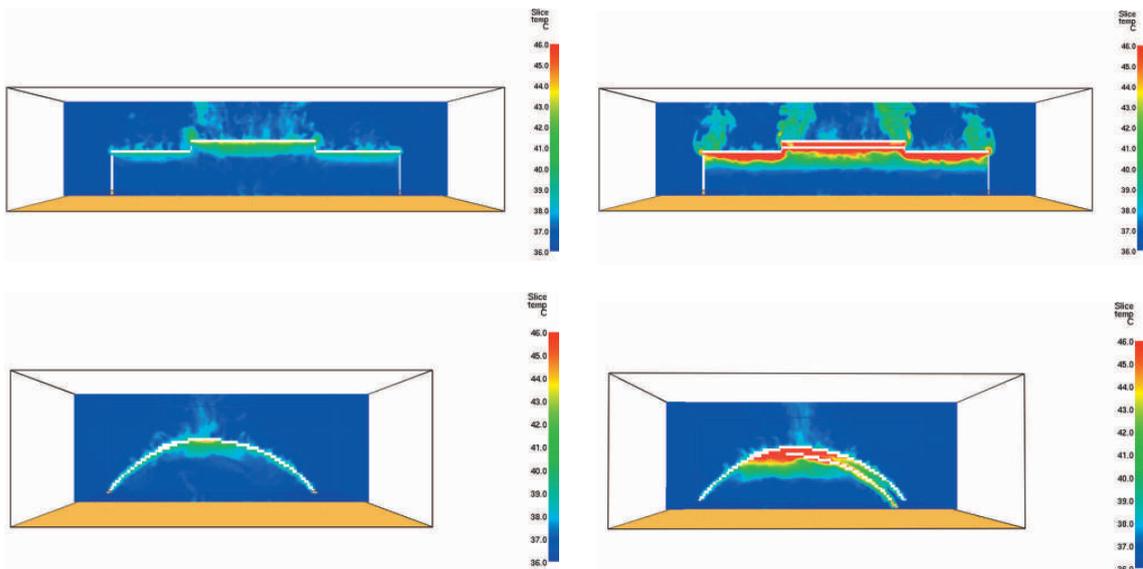


Fig. 28 - Da sinistra e dall'alto, temperature, sezione verticale: volume non schermato (a); volume con tenda schermante a sud (b); volume non schermato (c); volume con tenda schermante a sud (d).  
 Fig. 28 - From left and from top, vertical section for temperature: unshielded envelope (a); shielded envelope (b); unshielded envelope (c); shielded envelope (d).

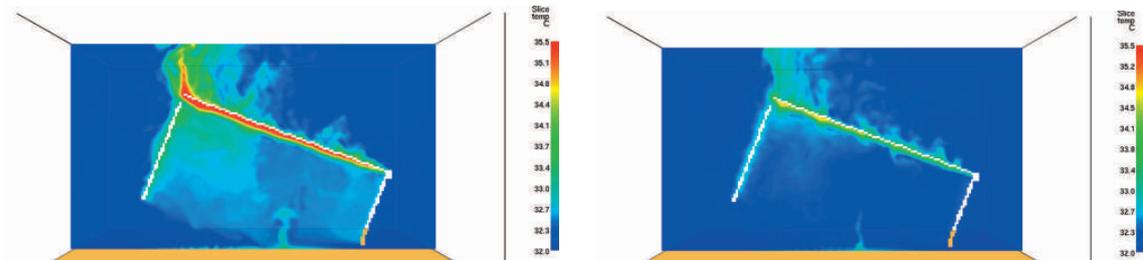


Fig. 29 - Da sinistra e, temperature, sezione verticale: volume in vetro con fattore solare  $g=0.64$  (a); volume in vetro con fattore solare  $g=0.40$  (b).  
 Fig. 29 - From left, vertical section for temperature: glazed volume with solar factor  $g=0.64$  (a); glazed volume with solar factor  $g=0.40$  (b).

del pavimento, si ha un incremento delle temperature immediatamente al di sotto della tenda schermante a causa del fatto che il calore resta intrappolato tra il vetro e la tenda stessa che scaldandosi genera moti convettivi.

*Diverso fattore solare del vetro*

Viene simulata la situazione in cui il vetro sia a controllo solare. La prima configurazione è caratterizzata da un fattore solare  $g = 0.64$ ; la seconda configurazione ha un fattore solare  $g = 0.40$ . Grazie al minore fattore solare, diminuisce la radiazione solare entrante e si ottengono temperature interne inferiori.

*Corpi interni a diversa temperatura*

Moti d'aria e variazioni di temperatura possono essere causati da corpi a diversa temperatura. Nel caso di Dalkingen l'inserimento della porta ricostruttiva in materiale plastico riflettente determina moti convettivi e un incremento della temperatura: incontrando a un certa quota la medesima temperatura, l'aria si ferma e diverge.

*rate, there is an increase in air temperature immediately below the screen because the heat is trapped between the glass and the screen itself, which creates convection.*

*Different glass solar-factor*

*The situation with the solar control glass was simulated. The solar factor is  $g = 0.64$  in the first configuration and it is  $g = 0.40$  in the second configuration. Thanks to the lower solar factor, the incoming solar radiation decreases and there are lower internal temperatures.*

*Bodies at different temperatures*

*Air motion and temperature variations can be caused by bodies at different temperatures. In the case of Dalkingen, the reconstructive plastic reflective gate creates convective motions and an increase in temperature; the air stops and is diverted, at a certain height encountering the same temperature.*

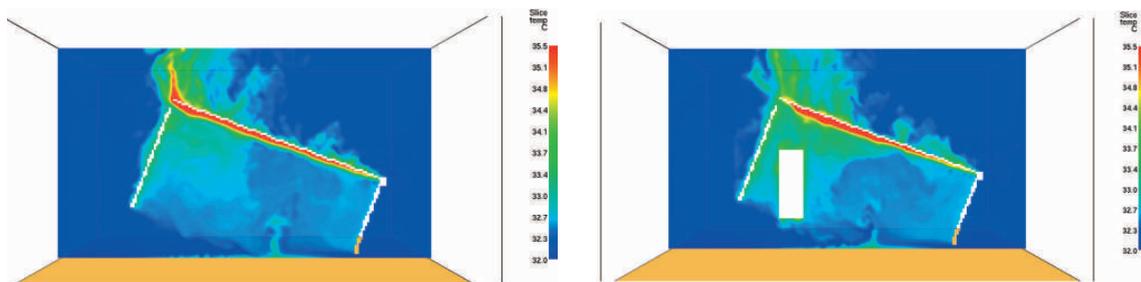


Fig. 30 - Da sinistra, temperature, sezione verticale: (a); volume con replica dell'antica porta all'interno (b).  
 Fig. 30 - From left, vertical section for temperature: (a); glazed volume with replica of the ancient gate (b).

**7.3.3. Limiti delle simulazioni**

Un modello è un'astrazione, una semplificazione della realtà. Esso introduce: approssimazioni, poiché le sue caratteristiche sono simili a quelle del processo reale ma non sono le stesse; incertezze, poiché po-

**7.3.3. Limitation of the simulations**

*A model is an abstraction; it is a simplification of reality. It introduces: approximations, since its characteristics are similar to the real processes but are not the same; uncertainties, since it may show re-*

trebbe mostrare dei risultati che nella realtà poi si andrebbero a manifestare in maniera differente; imprecisioni, poiché i valori relativi alle variabili sono vicini a quelli del processo reale ma non sono gli stessi. Dal punto di vista fisico, se consideriamo il bilancio energetico per una copertura vetrata, i flussi che entrano in gioco sono:

- flusso termico attraverso l'involucro dovuto alla differenza di temperatura fra l'aria esterna e l'aria interna;
- flusso dovuto alla radiazione solare (irraggiamento a bassa lunghezza d'onda);
- irraggiamento esterno ad elevata lunghezza d'onda;
- flusso dovuto alla ventilazione;
- calore rilasciato dai materiali all'interno del locale (irraggiamento interno ad elevata lunghezza d'onda);
- calore prodotto all'interno del locale per la presenza di persone, di motori, di lampade, ecc.

Si illustrano di seguito le condizioni fisiche dei suddetti flussi e le condizioni simulate nei modelli di simulazione.

*Flusso termico attraverso l'involucro dovuto alla differenza di temperatura fra l'aria esterna e l'aria interna.*

Il regime utilizzato per le simulazioni è periodico e parte da una situazione di equilibrio in cui la temperatura esterna è uguale a quella interna. Nel modello numerico la temperatura interna calcolata è quindi funzione dell'irraggiamento solare e non della differenza di temperatura tra esterno e interno. Tale differenza di temperatura risulta un parametro trascurabile ai fini delle prestazioni energetiche essendo il flusso energetico dovuto alla radiazione solare sicuramente preminente. A temperature più basse, le

*sults that could be different in reality; inaccuracies, because the variable values are close to those of real processes but are not the same. From the physical point of view, if we consider the energy balance for a glass covering structure, the flows involved are:*

- *heat flow through the envelope due to the temperature difference between outdoor and indoor air;*
- *flow due to solar radiation (short wavelength irradiation);*
- *long wavelength irradiation from outside;*
- *air flow due to ventilation;*
- *heat given off by the materials inside the covering structure (high wavelength irradiation from inside);*
- *heat inside the covering structure generated by people, motors, artificial light, etc.*

*The physical conditions of these flows and the conditions in the simulation models are described below.*

Heat flow through the envelope due to the temperature difference between outdoor and indoor air.

*The regime of simulations is periodic. The simulations start from a situation of equilibrium in which the outside temperature is the same as inside. Therefore, in the numerical model the indoor temperature calculated depends on solar radiation and it is not a function of the temperature difference between outside and inside. This difference in temperature is not an important parameter for energy performance because the solar radiation energy flux is certainly predominant. With lower external air temperatures, the internal absolute air temperature will be lower and thus probably more acceptable (Lieb, 2010).*

temperature assolute dell'aria all'interno degli spazi saranno più basse e quindi probabilmente più accettabili (Lieb, 2010).

*Flusso dovuto alla radiazione solare (irraggiamento a bassa lunghezza d'onda)*

Nel caso di edifici vetrati l'apporto energetico solare costituisce la porzione più significativa della totalità dei carichi (Lieb, 2010), ciò evidenzia l'importanza che si deve prestare nella modellazione della radiazione solare, in quanto incide sull'accuratezza delle prestazioni globali.

La radiazione solare a bassa lunghezza d'onda sulla superficie più esterna viene parzialmente riflessa e in parte trasmessa verso l'interno. Nell'attraversamento del vetro l'onda radiativa viene in parte assorbita, causando un innalzamento della temperatura, mentre la porzione rimanente prosegue il suo percorso. A questo incremento di temperatura consegue un processo di conduzione più veloce e la formazione di moti convettivi più importanti, infine la stessa temperatura superficiale influenza l'emissione radiativa ad alte lunghezze d'onda. La componente del fascio incidente che viene trasmessa colpirà, con uno sfasamento temporale impercettibile, alcune delle superfici interne dove si comporta alla stregua della radiazione che colpisce le superfici esterne: nel caso di superfici opache si ha assorbimento e riflessione mentre, nel caso di superfici trasparenti si ha assorbimento, riflessione e trasmissione.

Nei modelli simulati viene considerata la massima radiazione solare in ingresso sotto un cielo sereno e la sua componente trasmessa attraverso il vetro, tenendo conto del fattore solare. Una modellazione accu-

Flow due to solar radiation (short wavelength irradiation)

*In the case of glazed buildings the solar energy contribution is the most significant portion of the total load (Lieb, 2010). This highlights the importance of solar radiation modeling, as it affects the accuracy of global performance.*

*Short wavelength solar radiation on external surfaces is partly reflected and partly transmitted inside the volume. The radiative wave passing through the glass is partly absorbed, causing a rise in temperature, while the remaining portion continues along its path. This increase in temperature brings about a swifter conduction process and more convective motions. Finally, the surface temperature itself affects the amount of long wavelength radiative emissions. The component of the transmitted incident beam will strike some of the inside surfaces with an imperceptible time lag. Then it acts like the radiation striking the external surfaces: in the case of opaque surfaces there is absorption and reflection, while in the case of transparent surfaces there is absorption, reflection and transmission.*

*In the simulated models the maximum incoming solar radiation under clear-sky conditions and its component passing through the glass were examined, taking into account the solar factor. Accurate modeling of solar radiation would require calculation methods for the prediction of surface position relative to the solar beam; in addition, the thermo-physical properties involved include coefficients of absorption, reflection and emission of the elements, which depend on angle of incidence, wa-*

rata della radiazione solare richiederebbe metodi di calcolo per la previsione della posizione relativa tra le superfici e il fascio solare; inoltre, le proprietà termofisiche interessate includono i coefficienti di assorbimento, riflessione, emissione degli elementi, i quali dipendono dall'angolo di incidenza, dalla lunghezza d'onda del raggio incidente, dall'ora del giorno, dal mese e dall'anno (Binotto, 2009).

*Irraggiamento esterno ad elevata lunghezza d'onda.*

Lo scambio radiativo, ad elevata lunghezza d'onda, tra le superfici esterne e la volta celeste oppure con gli edifici circostanti e il terreno può comportare un considerevole abbassamento della temperatura superficiale, specialmente nelle notti serene. Il trattamento di questo flusso energetico richiede la stima di molti fattori tra cui: la temperatura effettiva del cielo come funzione del tipo di copertura nuvolosa prevalente; la temperatura delle costruzioni circostanti; la temperatura del terreno in funzione delle sue condizioni (umidità, composizione, copertura superficiale); il riscaldamento superficiale causato dalla radiazione a bassa lunghezza d'onda incidente e dai fattori di forma che forniscono le informazioni dell'accoppiamento tra gli elementi sopraccitati (Binotto, 2009).

Nei calcoli viene considerato a vantaggio di sicurezza, la massima radiazione solare sotto un cielo sereno e un valore di temperatura costante per la superficie del pavimento esterno.

*Flusso dovuto alla ventilazione.*

Nel calcolo numerico, a vantaggio di sicurezza, viene considerata la ventilazione determinata per differenza di temperatura e

*wavelength of the incident light, time of day, month and year (Binotto, 2009).*

Long wavelength irradiation from outside.

*The exchange of energy, by long-wave radiation, between external surfaces and the sky, or between the surrounding buildings and the ground, can result in a substantial lowering of surface temperatures, especially under clear sky conditions and at night. This energy flow modeling requires the estimation of many factors including: the effective air temperature as a function of cloud covering structure type, temperature of surrounding buildings, soil temperature as a function of its conditions (humidity, composition, surface coverage), surface heating caused by incident short wavelength radiation and by factors based on the coupling between the above-mentioned elements (Binotto, 2009).*

*In the calculations the maximum solar radiation under a clear sky and a constant external floor surface temperature are considered to safety advantage.*

Air flow due to ventilation.

*Ventilation due to temperature difference is considered in the numerical calculation while the presence of external wind is not modeled, to safety advantage. This is due to the fact that the wind cannot be called a reliable source of ventilation in all but a very few sites around the world during the hottest days of a year (Lieb, 2012).*

Heat given off by the materials inside the covering structure (long wavelength irradiation from inside).

*Inter-surface, long wavelength radiation is a function of temperature, emissivity, the extent to which the surfaces are in visual contact (represented by a view factor) and*

non l'eventuale presenza di vento all'esterno dell'edificio. Ciò è dovuto al fatto che durante le più calde giornate dell'anno il vento costituisce una fonte affidabile di ventilazione solo in pochissimi siti (Lieb, 2012).

*Irraggiamento interno ad elevata lunghezza d'onda.*

Lo scambio radiativo ad elevata lunghezza d'onda tra le superfici è funzione della temperatura, dell'emissività, dell'estensione e del tipo di contatto visuale che sussiste tra le superfici (fattore di forma) e dalla natura della riflessione superficiale (diffusa, speculare o mista). Il flusso energetico tenderà a ristabilire l'equilibrio tra le temperature superficiali raffreddando le superfici calde e riscaldando quelle più fredde (Binotto, 2009).

I reperti sono costituiti da forme e materiali differenti con diverse proprietà di assorbimento e di riflessione del calore e quindi con differente interscambio energetico tra le superfici.

Nei casi simulati viene considerata all'interno una superficie piana di pietra dello spessore di 20 cm, con conducibilità  $\lambda = 1.83 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , emissività  $\epsilon = 0.67$ , calore specifico  $c = 0.712 \text{ KJ/(kg K)}$  e densità  $d = 2200 \text{ Kg/m}^3$ . L'incremento della temperatura interna, che causa il cosiddetto effetto serra, è dipendente dalla lunghezza d'onda delle radiazioni.

Nel modello simulato la trasmissione del calore non è variabile al variare della lunghezza d'onda e viene considerata un'emissività del vetro costante in tutto lo spettro, pari a 0.837. Inoltre, in particolar modo per quanto riguarda la simulazione delle configurazioni vetrate chiuse, il flusso solare determina nel tempo un incremento della temperatura interna che è anche connesso

*of the nature of the surface reflection (diffuse, specular or mixed). The flow-path will tend to establish surface temperature equilibrium by cooling hot surfaces and heating cold ones (Binotto, 2009).*

*Archaeological remains are different in shape and materials, with different heat absorption and reflection properties and therefore with different energy interchange between surfaces.*

*A flat stone surface is considered inside the protective covering structure in the simulated cases, with a thickness of 20 cm, conductivity of  $\lambda = 1.83 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ , emissivity  $\epsilon = 0.67$ , specific heat  $c = 0.712 \text{ kJ/(kg K)}$  and density  $d = 2200 \text{ kg/m}^3$ . The increase in internal temperature, which brings about the so-called greenhouse effect, is dependent on the wavelength of the radiation.*

*In the simulated model the transmission of heat does not vary with wavelength variation and the glass emissivity is supposed to be constant over the whole spectral range, equal to 0.837. In addition, over time, the solar flux determines an increase in internal temperature, especially with regard to the glazed, closed configurations. This is also associated with the increase in absolute humidity, which is the amount of water vapor in the air usually expressed in grams per cubic meter. So we might expect the following causal chain: as the temperature rises, evaporation increases; the water absorbs more heat, further warming the air and causing more evaporation (greenhouse effect), with a similar mechanism to the one occurring in our atmosphere. In the numerical model this combination of heat and humidity was not*

all'aumento dell'umidità assoluta, quantità di vapore acqueo espressa in grammi contenuta in un metro cubo d'aria. Dovremo attenderci dunque la seguente catena causale: il vapore acqueo sale sotto la spinta dell'accresciuta temperatura; la temperatura sale sotto la spinta dell'accresciuto vapore acqueo (maggiore effetto serra), con un meccanismo simile a quello che si determina nella nostra atmosfera. Nel modello numerico non viene considerato tale effetto combinato temperatura - umidità.

*Calore prodotto all'interno del locale per la presenza di persone, di motori, di lampade, ecc.*

Nel modello numerico viene trascurato il carico termico per la presenza di persone, motori, lampade, ecc.

*considered.*

Heat inside the covering structure generated by people, motors, artificial light, etc.

*The thermal load for people, motors, artificial light, etc. was not evaluated in the simulation model.*

### Riferimenti bibliografici - References

- ASHRAE, 2005. *Energy estimating and modeling methods*, "ASHRAE Handbook 2005 - Fundamentals (SI)", 32.
- Binotto, M., Prof. Zecchin, R. (rel.), 2009-10, *Software di simulazione energetica degli edifici e loro validazione*, Tesi di Laurea - Università degli Studi di Padova.
- Bottiglioni, S. Mingozi, A. 2008. *Programmi di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici*, Bologna, Progetto BREA.
- Bryn, I., Schiefloe, P. A. 1996. *Atrium Models for the Analysis of Thermal Comfort and Energy Use*, Task 12 – Building Energy Analysis and Design Tools for Solar Applications, Subtask A.3 – Atrium Model Development, IEA SHCP – International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Program, Trondheim, SINTEF Energy.
- Cammarata, G. 2007. *Fisica tecnica - Elementi di impianti termotecnici*, 3, Università degli Studi di Catania.
- Clarke, J. A. 2001. *Energy Simulation in Building Design*, Oxford, Butterworth - Heinemann.
- Graf, J. 2010. *A glass palace for the Limes Gate at Dalkingen*, "Engineered transparency. International Conference at Glasstec", Düsseldorf, 29 and 30 September 2010.
- Gissi, E. 2009. *An introduction to fire simulation with Fds and Smokeview*, <http://www.corbezzolo.org/>.
- Heiselberg, P., Murakami, S., Roulet, C. A. 1998. *Ventilation of Large Spaces in Buildings – Analysis and Prediction Techniques*, Final Report Annex 26, Energy Efficient Ventilation of Large Enclosures, IEA ECBCS – International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings and Community Systems, Aalborg University.
- Lanza Volpe, A. 2012. *Application of natural ventilation to archaeological sites with glass covers*, "XII Convegno Nazionale di Ingegneria del Vento", Oct. 7-10, Venezia (going to press).
- Lieb, R. D. 2009. *Limestor Dalkingen. Entwärmung der Glaseinhausung*, Aachen (report tecnico fornito dal-

l'esperto della ventilazione, non pubblicato/ ventilation expert's report, not published publically).

Lieb, R. D. 2010. *Freie Durchströmung großer Glashallen*, Universität Stuttgart - IGE Institut für GebäudeEnergetik, N. 20.

Lieb, R. D. 2012. *An easy approach to calculate natural ventilation and get an adapted design*, "XII Convegno Nazionale di Ingegneria del Vento", Oct. 7-10, Venezia (going to press).

McGrattan, K., McDermott, R., Hostikka, S., Floyd, J. 2010. *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*, Gaithersburg, NIST Special Publication 1019-5.

Musser, A., McGrattan, K., Palmer, J. 2001. *Evaluation of a Fast, Simplified Computational Fluid Dynamics Model for Solving Room Airflow Problems*, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6760.

Rogora, A. 2005. *La progettazione preliminare dell'edificio*, Grosso, M. Peretti, G. Piardi, S. Scudo G. "Progettazione Ecocompatibile dell'Architettura: concetti, metodi, strumenti di analisi e valutazione, esempi applicativi", Napoli, Esselibri, pp. 337-354.

## CAPITOLO 8

### Linee guida per la progettazione di coperture archeologiche in vetro

#### 8.0. Abstract

##### **Guidelines for design of archaeological glass covering structures to meet climate needs.**

*This thesis analyzes the main aspects of conservation for the design of protective covering structures on archaeological sites, particularly those made of glass. The aim is to develop general guidelines that can be applied in different archaeological contexts and satisfy climatic requirements, essential for environmental protection, conservation, utilization and enhancement. The covering structures have to be designed and built in line with proper terms of reference in collaboration with a multi-disciplinary team. On the basis of previously-acquired knowledge, this concluding chapter summarizes what are the essential parameters for designing a glass covering structure on an archaeological site: climatic zone (latitude and exposure); light sensitivity category of the materials to be protected, type of space (shed-confined; underground-above ground; accessible-inaccessible); ventilation (natural, mechanical); type of glass. Identification and knowledge of the climatic zone constitutes the basis for the development of the project; the identification of the types of material to be protected with their light sensitivity category constitutes the first step to seeing whether solar radiation ought to be avoided. Analysis of various typological protection alternatives allows us to identify the most appropriate for the use and preservation of the specific archaeological resource. The type of space chosen is important in determining the new microclimate that will be created around the exhibits; then, depending on this, there will be a choice of type of microclimate control. As a consequence, the naturally-induced airflow represents an important parameter among all the parameters contributing to the shaping of a covering structure, especially in the case of transparent ones. Natural airflow, as described by the laws of physics, can thus be regarded as an important design criterion. It can provide a contribution not only to visitor comfort and the well-being of artifacts, but also to the saving of energy. The type of protection individuated is then enhanced through dimensioning and a thermo-fluid dynamic study. Thus, the parameters referred to in the preliminary phase have to be verified with detailed simulations that take into account all the factors which characterize the archaeological site to be protected. By integrating the simulation of thermal performance of a protective structure with its architectural design, one might well achieve an efficient covering structure.*

### 8.1. I parametri

L'inserimento di strutture protettive in contesti antichi richiede un'attenta progettazione dal punto di vista architettonico, tecnologico e fisico tecnico.

- Dal punto di vista architettonico non può prescindere dal rispetto delle qualità materiali e artistiche del manufatto esistente e va affrontato con i criteri del restauro;

- dal punto di vista strutturale deve garantire condizioni di sicurezza, utilizzare appoggi e ancoraggi idonei, riducendo al minimo il contatto fisico tra gli elementi progettati e gli antichi manufatti;

- dal punto di vista fisico tecnico deve escludere le soluzioni che sviluppano un microclima che possa generare condizioni nocive per i reperti e discomfort per i visitatori (Palmerio & Di Muzio, 2007).

La ricerca non affronta, se non funzionali alle considerazioni riportate nella tesi, gli aspetti più prettamente architettonici e di natura strutturale che contribuiscono in maniera fondamentale alla evoluzione del progetto verso la sua forma definitiva. Essa è diretta alla fase in cui il progettista dovrà verificare che la scelta tra le diverse alternative tipologiche di protezione sia idonea alla conservazione del particolare bene archeologico. La tipologia individuata deve essere ottimizzata attraverso un corretto dimensionamento e uno studio termo - fluidodinamico che permetta la valutazione di determinate caratteristiche e materiali. La "lettura" in termini fisico tecnici del sito archeologico coperto costituisce quindi una base conoscitiva per l'elaborazione del progetto.

In generale, come dovrà procedere un progettista nella valutazione del microclima sin dalle prime fasi di progettazione di una

### 8.1. The parameters

*The construction of protective structures in ancient contexts requires careful design from architectural, technological and physical point of view.*

*- From the architectural point of view, it needs to be addressed via restoration criteria;*

*- from the structural point of view, it needs to ensure safety conditions, with appropriate supports and anchor bolts, minimizing physical contact between newly-designed components and ancient constructions;*

*- from the physical point of view, it is necessary to exclude technical solutions that generate microclimate conditions that may be harmful to the archaeological items and bring discomfort to visitors (Palmerio & Di Muzio, 2007).*

*The research does not deal with the more strictly architectural and structural issues, if not functional to the thesis considerations, that significantly contribute to the development of the final project. It targets the phase in which the designer needs to assess the adequacy of his/her choices from among different types of protection. The typology individuated must be optimized through correct sizing and a thermal-fluid dynamic study that consents the assessment of certain characteristics and materials. Thus the physical "interpretation" of the covered archaeological site constitutes a basic source of knowledge for the design development phase.*

*In general, how should the designer proceed, from the initial planning phase, in the evaluation of the microclimate in-*

copertura su un sito archeologico? Gli elementi che interagiscono sono il sistema edificio - ambiente, i reperti e il pubblico fruitore. Ognuno di essi può essere fonte di diverse problematiche:

1) il sistema edificio - ambiente è immerso in uno specifico contesto climatico e ambientale e non è possibile pianificare un microclima standardizzato da applicarsi in ogni situazione;

2) i reperti presentano diversi materiali costitutivi, per cui occorre prendere contemporaneamente in considerazione i fenomeni fisici, chimici e biologici che si possono verificare in specifiche condizioni microclimatiche; essi hanno inoltre una "storia ambientale" pregressa che va rispettata e messa in relazione con la sequenza di eventi caratterizzanti il degrado dei materiali (D'Agostino, 2002/2005). In letteratura si possono trovare suggerimenti sui valori o sugli intervalli di valori ottimali per la conservazione. Bisogna però porsi una domanda: "Possono, questi valori guida, essere sempre utili per la migliore conservazione?" Valori di umidità relativa e temperatura che, in linea di principio, sono adatti ai materiali possono essere inadatti o addirittura pericolosi per particolari artefatti. Infatti, un particolare artefatto è stato sottoposto per secoli a condizioni di umidità relativa e temperatura che hanno provocato tensioni interne, le quali hanno raggiunto un nuovo equilibrio con le deformazioni permanenti della sua struttura. Un tale manufatto antico che si è adattato alle condizioni ambientali potrebbe subire seri danni se portato in un ambiente diverso, per l'incapacità di adattarsi a un nuovo microclima (ad esempio la conservazione del legno, l'esposizione alla luce di terrecotte, ecc.) (Bernardi, 2004). Per

*side a covering structure on an archaeological site? The interacting elements involved are the building-environment system, the exhibits and the public user. Each of these can be the source of various problems:*

*1) climate and environment context are specific for each building-environment system, and it is not possible to plan a standard microclimate for every situation;*

*2) the materials of the archaeological items vary, so we need to take into account a multitude of physical, chemical and biological agents in specific microclimatic conditions; archaeological items also have an "environmental history" that must be respected and placed in relation with the degradation of materials (D'Agostino, 2002/2005). Guidance values or ranges for optimal storage are available in literature. Yet one question needs to be asked: "Can these components always help to improve conservation?" Relative humidity and temperature values, which might, in principle, be suitable for certain materials, may be unsuitable or even dangerous for particular artifacts. In fact, for centuries one particular artifact was subjected to relative humidity and temperature conditions that caused internal tensions; it assumed a new state of equilibrium with permanent deformation to its structure. An ancient artifact suited to certain environmental conditions may be severely affected inside a different environment, because of its inability to adapt to a new microclimate (e.g. the preservation of wood, the exposure to light of crockery, etc.) (Bernardi, 2004). For these*

queste ragioni, è necessario avere una conoscenza accurata delle condizioni di conservazione del passato.

3) Per quanto riguarda il pubblico, vanno garantite adeguate condizioni di accessibilità e fruibilità. La conservazione va sempre confrontata con la necessità di offrire una corretta fruizione e questo aspetto non è privo di inconvenienti: i visitatori, infatti, alterano il microclima degli ambienti espositivi, trascinando polveri e inquinanti dall'esterno e apportando energia termica e vapore acqueo; inoltre, vanno comunque assicurate al pubblico condizioni di comfort ambientale che permettano la fruizione, pur tenendo conto prioritariamente delle esigenze degli oggetti conservati.

Si tratta di un insieme complesso di scelte; è evidente che vanno definite delle priorità, procedendo con criteri che permettano di individuare le problematiche principali da affrontare; a tale scopo è certamente utile una corretta valutazione e analisi dei rischi che dà la possibilità di focalizzare l'attenzione su quei fattori che risultano essere potenzialmente più dannosi (D'Agostino, 2002/2005).

Partendo da quanto appreso sui materiali dei reperti e sul loro stato di degrado, si procederà alla determinazione dei fattori che rappresentano il maggiore rischio cercando di stabilirne il *range* ottimale e di formulare una proposta di soluzioni tali da coniugare estetica e funzionalità, nel rispetto delle raccomandazioni in merito.

I fattori di rischio, legati in particolare alle coperture trasparenti, sono luce, temperatura e umidità. Per quanto riguarda l'uso del vetro, si tratta di un materiale che possiede aspetti di criticità da considerare nel processo di progettazione; tali fattori sono descritti nel para-

*reasons, it is necessary to have accurate knowledge of past storage conditions.*

*3) Adequate conditions of accessibility and usability have to be ensured. Conservation should always be assessed in terms of a need for a correct use, an aspect that is not without problems; in fact, visitors alter the microclimate of exhibition spaces, bringing in dust and polluting particles from outside as well as heat energy and water vapor. Although a comfortable environment should be ensured for users, the priority needs of stored items have to be taken into account.*

*The issue of choice is very complex and multifaceted; it is clear that priorities have to be set, with criteria to identify the main issues to be tackled. For this purpose, proper risk assessment will surely be useful to provide the opportunity to focus on more potentially harmful factors. The designer should define the factors posing the greatest risk, based on what he has learned about the composition of the remains and their state of degradation (D'Agostino, 2002/2005). He should formulate solutions that combine aesthetics and functionality, in accordance with the relevant recommendations in this regard.*

*The risk factors, related in particular to transparent covering structures, are those of light, temperature and humidity. Concerning the use of glass envelopes, it is a material that has critical aspects in the design process; these factors are described in the paragraph on the limitations of glazed systems in archaeological sites. Furthermore, the different artifacts to be protected have different responses under*

grafo riguardante i limiti dei sistemi vetrati nei siti archeologici. Occorre inoltre considerare che i diversi manufatti da proteggere hanno comportamenti diversi sotto l'esposizione alle radiazioni. Il vetro può essere usato per controllare la maggior parte dei tipi di radiazioni, come illustrato nel paragrafo sulla protezione dalle radiazioni.

## 8.2. Luce

Una copertura può essere classificata secondo la luce che la attraversa in trasparente, semi - trasparente, opaca o mista. Il maggiore fattore di rischio si avrà nel caso di involucro interamente trasparente a causa della luce intensa e delle radiazioni a lunghezza d'onda corta (ultravioletti).

*Azione preventiva: valutare l'intensità della luce e il livello di ultravioletti e individuare la categoria di fotosensibilità dei reperti da proteggere.*

Gli standard per la conservazione definiscono per ogni diversa categoria di materiali la classe di fotosensibilità. Individuare il tipo di reperto da proteggere e la sua categoria di fotosensibilità costituisce il primo passo per capire se la radiazione solare deve essere assolutamente evitata.

- *reperti con fotosensibilità da molto alta a media* (affreschi, pitture, legno, ecc.). Analizzando i siti oggetto di studio abbiamo ricavato che l'irradiazione solare annua nella mappa bioclimatica (Fig. 1) è tale che per nessuno di essi è possibile proteggere adeguatamente i reperti con fotosensibilità da molto alta a media (Fig. 3, 4). Dunque, in questi casi, per tutelare dai danni, occorre evitare la luce solare diretta e quindi anche la realizzazione di coperture trasparenti.

- *reperti con fotosensibilità molto bassa*

*exposure to radiation, although glass can be used to control most types of radiation, as illustrated in the paragraph concerned.*

## 8.2. Light

*According to the light passing through it, a covering structure can be classified in: transparent, semi-transparent, opaque or mixed. The most important risk factors will occur in the case of entirely transparent envelopes because of the intense light and the short wavelength (ultraviolet).*

*Preventive action: to evaluate light intensity and the radiation level and to identify the category of light sensitivity of the artifacts to be protected.*

*For each different category of materials, the conservation standards define the class of light sensitivity. Identifying the type of find to be protected and its light sensitivity category is the first step to seeing whether solar radiation should be avoided.*

- *finds with very high and medium light sensitivity (frescoes, paintings, wood, etc.). After analyzing the sites that are the objects of study (Fig. 1), we discovered that it is not possible to adequately protect finds with very high and medium light sensitivity from annual solar irradiation (Fig. 3, 4). Therefore, in these cases, it is necessary to protect finds from damage by avoiding direct sunlight and also avoiding the construction of transparent covering structures.*

- *finds with very low light sensitivity (stone materials, metals, etc.). In these cases, filters, screens, shading devices, etc. can reduce ultraviolet and visible radiation. Laminated glass can screen out*

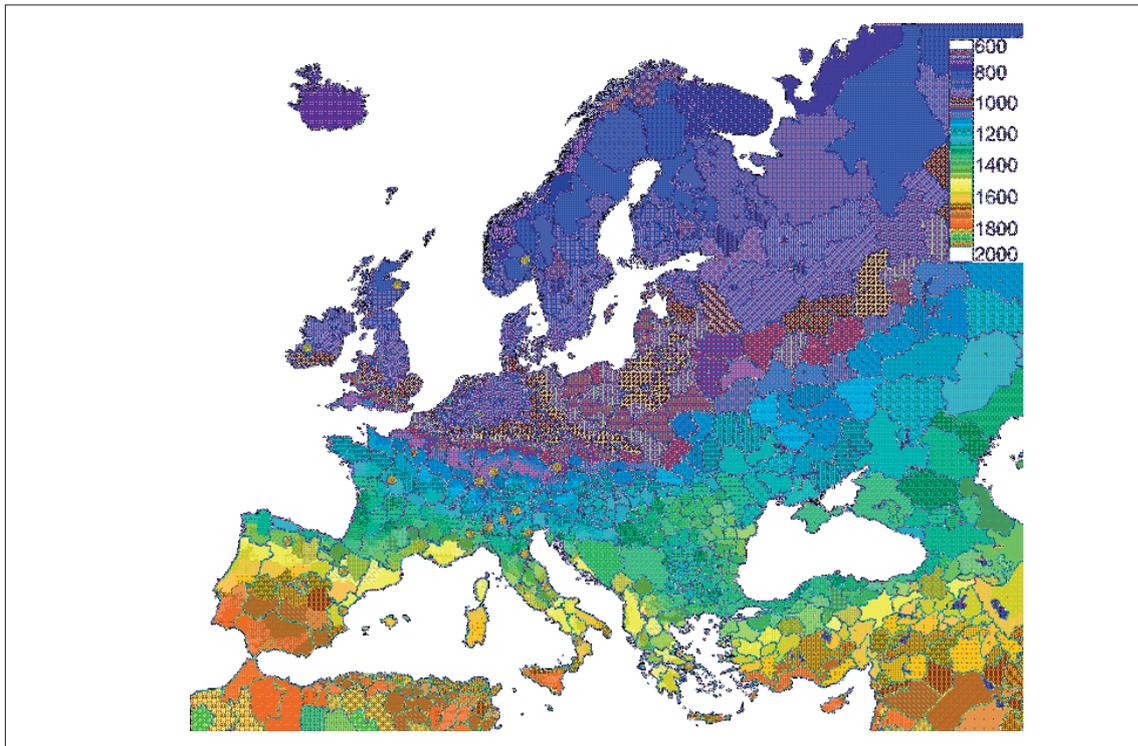


Fig. 1 - Mappa dell'Irraggiamento globale orizzontale annuo in Europa ( $\text{kWh/m}^2/\text{anno}$ ), (in aree edificate, valori mediati per regione), con individuazione dei siti analizzati.

Fig. 1 - Map of yearly sum of horizontal global irradiation ( $\text{kWh/m}^2/\text{year}$ ), in Europe (in built-up areas, averaged by regions), with the analyzed sites.

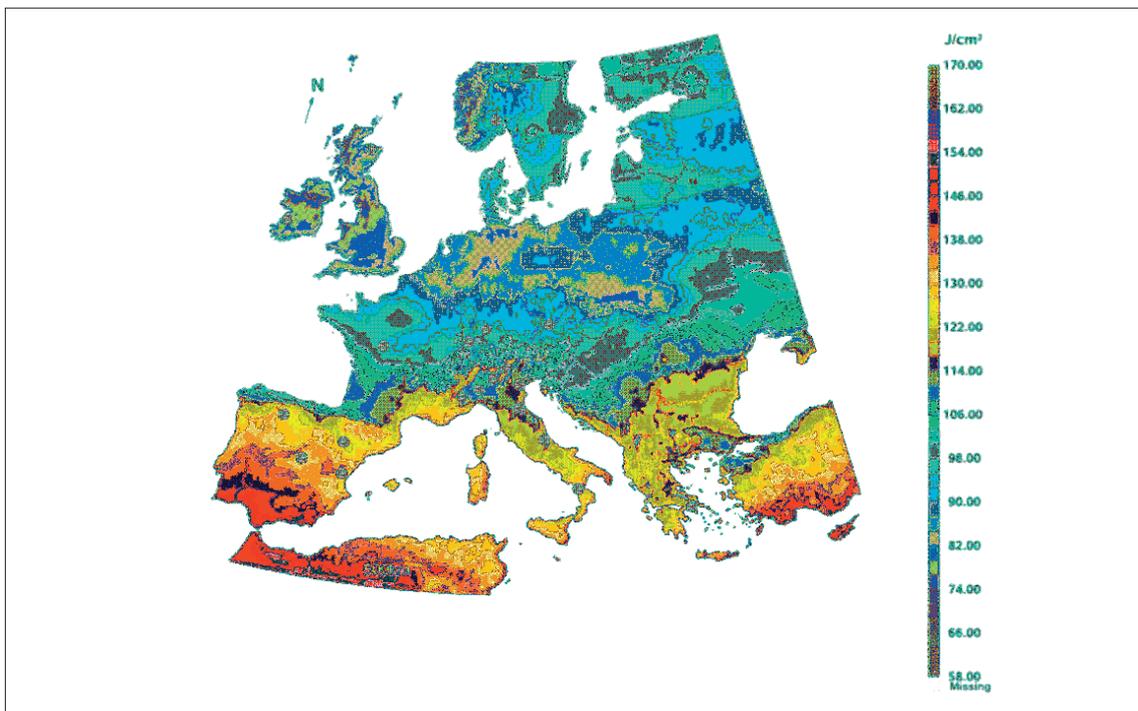


Fig. 2 - Mappa delle radiazioni UV in Europa, anni 2003-2007, ( $\text{J/cm}^2$ ), (SoDa, Eurosun project), con individuazione dei siti analizzati.

Fig. 2 - Map of UV radiation, years 2003-2007, ( $\text{J/cm}^2$ ), in Europe (SoDa, Eurosun project), with the analyzed sites.

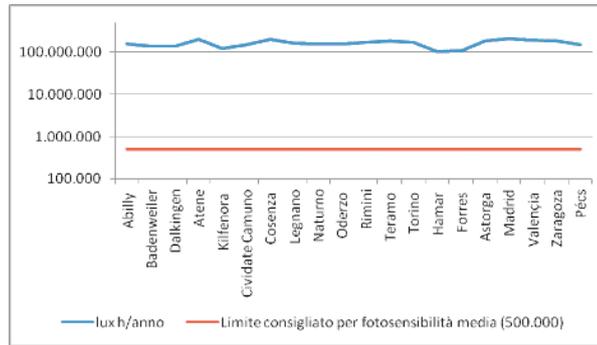


Fig. 3 - La luce naturale ha la caratteristica di cambiare da istante a istante e presenta una specifica temperatura di colore ed una propria efficienza luminosa. L'efficienza luminosa dipende dall'altezza solare: il suo valore parte dallo zero all'orizzonte e cresce in maniera uniforme fino ad una altezza di 20°; al di sopra di quest'angolo, il valore è di circa 105 lumen/W.

Efficienza luminosa del sole: circa 105 lumen/W

Lux = lumen/m<sup>2</sup> da cui: lumen = lux m<sup>2</sup>

lux m<sup>2</sup>/W=105

lux m<sup>2</sup>=105 W

W=lux m<sup>2</sup>/105 quindi: Wh/m<sup>2</sup>/anno = lux m<sup>2</sup> h/105/m<sup>2</sup>/anno = lux h/105/anno

Quindi ad esempio per il sito di Abilly, in Francia, abbiamo: 1.237.350 Wh/m<sup>2</sup>/anno = 1.237.350 x 105 lux h/anno = 129.921.750 lux h/anno.

Per i reperti di fotosensibilità media il limite fissato da norma è di 500.000 lux ora/anno. Dal grafico deduciamo che per tali reperti e per quelli di fotosensibilità maggiore l'esposizione alla luce del sole dovrebbe essere evitata.

Fig. 3 - Natural light changes from moment to moment and has a specific color temperature and luminous efficiency. The luminous efficiency depends on the height of the sun: its value starts from zero at horizon and uniformly grows to a height of 20°; above this angle, the value is about 105 lumen/W.

Sun luminous efficiency: about 105 lumen/W

Lux = lumen/m<sup>2</sup> from which: lumen = lux m<sup>2</sup>

lux m<sup>2</sup>/W=105

lux m<sup>2</sup>=105 W

W=lux m<sup>2</sup>/105 then: Wh/m<sup>2</sup>/year = lux m<sup>2</sup> h/105/m<sup>2</sup>/year = lux h/105/year

Thus, for example, for the site of Abilly, in France: 1.237.350 Wh/m<sup>2</sup>/year = 1.237.350 x 105 lux h/year = 129.921.750 lux h/year.

For finds with medium light sensitivity the limit set by the standard is 500,000 lux hours / year. From the graph we deduce that exposure to sunlight should be avoided for these finds and for those with greater light sensitivity.

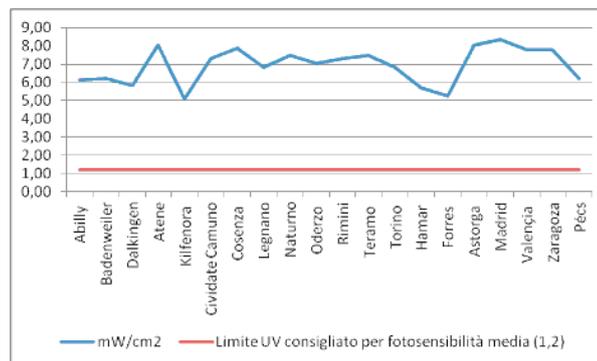


Fig. 4 - Per i reperti con fotosensibilità media il limite fissato da norma è 1,2μW/cm<sup>2</sup>. Il grafico rappresenta il confronto tra i valori UV dei siti analizzati e il limite consigliato per reperti con fotosensibilità media; deduciamo che per tali reperti e per quelli con fotosensibilità maggiore l'esposizione alla luce del sole dovrebbe essere evitata.

Fig. 4 - The limit set by standard for finds with medium light sensitivity is 1.2 μW/cm<sup>2</sup>. The graph shows the comparison between the UV values of the analyzed sites and the recommended limit for artifacts with medium light sensitivity; we deduce that the exposure to sunlight should be avoided for these finds and for those with greater light sensitivity.

(materiali lapidei, metalli, ecc.). In questi casi per ridurre l'ultravioletto e il visibile è possibile installare filtri, tende, schermature, ecc. I vetri stratificati riescono a schermare il 99% delle radiazioni ultraviolette. Per la riduzione della trasmissione luminosa è possibile utilizzare vetri a controllo solare (vetri serigrafati, vetri colorati, ecc.) oppure sistemi di schermatura.

### 8.3. Temperatura e umidità

Una copertura in vetro determina inevitabilmente un incremento delle temperature rispetto a quelle esterne e, nell'ipotesi più favorevole, tali temperature all'altezza dei reperti sono pari a quelle esterne. La variazione di temperatura all'interno degli spazi è determinata dagli scambi di calore con tutte le possibili sorgenti o pozzi di calore e dall'avvezione di nuova aria dalle aperture. Il normale equilibrio può essere mutato completamente dalla ventilazione naturale o meccanica, dall'impianto di riscaldamento e/o di condizionamento e dalla presenza di persone (Camuffo, 1998).

Temperatura e umidità relativa sono correlate. Per ogni valore di umidità relativa vi è una temperatura di rugiada, al di sotto della quale avviene la condensa: un velo d'acqua liquida si deposita sull'oggetto, mutando rapidamente in negativo le condizioni di conservazione. Se l'oggetto è costituito da materiali compatti, come, ad esempio, un metallo, il velo d'acqua ristagna in superficie e favorisce processi corrosivi. Se invece è poroso, fibroso o spugnoso, l'acqua di condensa non è visibile perché viene assorbita all'interno del materiale, dove può innescare fenomeni di rigonfiamento, solubilizzazione e cristallizzazione di sali, sviluppo di microrganismi.

*99% of ultraviolet radiation. Solar control glass (screen printed glass, coloured glass, etc.) or screening systems can reduce light transmission.*

### 8.3. Temperature and humidity

*A glass covering structure inevitably increases the internal temperature compared to the external and, in the most favorable circumstances, these temperatures, at the level of the archaeological items, may be equal to the external ones. The temperature variation inside the spaces is determined by heat exchanges with all possible heat sources and by fresh air from the openings. The normal balance can be completely changed by natural or mechanical ventilation, by heating and/or air conditioning systems and by human presence (Camuffo, 1998).*

*Temperature and relative humidity are related; for each value of relative humidity there is a dew-point temperature, below which condensation occurs: a film of liquid water accumulates on the object, rapidly changing the storage conditions in a negative manner. In fact, if the object is made from compact materials, such as, for example, a metal, a film of water may stagnate on the surface and bring about a corrosive process. Instead, if the material is porous, fibrous or spongy, the condensation is not visible because it is absorbed by the material, triggering off phenomena of swelling, solubilization and crystallization of salts and development of microorganisms.*

*Condensation (often insidious because it lacks visible signs) individuates a microclimatic situation at high risk due*

La condensa (subdola talvolta perché priva di segnali visibili) individua una delle situazioni microclimatiche a massimo rischio, a motivo dei processi citati. Il clima asciutto (ad esempio, valori di U.R. <35%) coincide con una seconda situazione di rischio molto elevato, che riguarda tutti i manufatti lignei e quelli lapidei porosi (pietre porose, affreschi, intonaci, malte in genere, ecc.) potenzialmente contenenti sali. Infine, una terza situazione di rischio elevato è quella del clima caldo umido (indicativamente, U.R. >85, T >35°), poiché determina condizioni ideali per la crescita della microflora. Tutte le altre condizioni climatiche, diverse da quelle ad elevato rischio citate, possono comunque individuare situazioni di minor rischio quando si allontanano troppo dai valori suggeriti dagli standard museali, caratteristici di ogni materiale. In uno specifico documento emanato nel 2001, il *Ministero dei Beni e le Attività Culturali* italiano ha stabilito i parametri degli standard museali. Per ogni tipologia di oggetti vengono definiti gli intervalli dei parametri ambientali entro cui è possibile avere condizioni di conservazione idonee sotto il profilo chimico-fisico ed evitare l'attacco microbiologico (Matteini, 2010).

*Azione preventiva: confrontare i valori termigrometrici consigliati per i diversi manufatti archeologici con i valori ricavati da calcoli e simulazioni. Particolare attenzione va posta alla verifica della formazione di condensa. Inoltre, tutti i cambiamenti improvvisi dei parametri microclimatici, così come i cicli giornalieri, sono pericolosi.*

Per ogni materiale vi è un intervallo climatico specifico di maggior sicurezza, ma per tutti vale il principio di un clima stabile, entro i valori assoluti, a garanzia di un basso ri-

*to the above-mentioned processes. The dry climate (for example, values of RH <35%) is a further very high-risk situation, which affects all wooden artifacts and also porous stone potentially containing salts (frescoes, plaster, mortar in general, etc.). Finally, a third type of high risk situation is characterized by hot and humid climate (indicatively RH > 85, T > 35 °), as it creates ideal growth conditions for colonization by microflora. All other climatic conditions, other than those mentioned, can still identify lower risk situations when values are too far from museum-standard. In a specific document issued in 2001, the Italian Ministry of Arts and Culture established the museum-standard parameters. The ranges of environmental parameters are defined for each type of object. It is possible to create within these ranges suitable physical-chemical conditions for storage and to avoid microbiological attack (Matteini, 2010).*

Preventive action: to compare recommended temperature and humidity values for different archaeological artifacts with the values obtained by calculations and simulations. Special attention should be given to the verification of condensation. In addition, all sudden changes in microclimatic parameters including daily cycles can produce a risk for the artifacts.

*There is a specific climatic range of greater security for each material, but a stable climate, leaving aside absolute values, ensures a low risk for all materials. Each case has its own specific conditions, but as a first approach one can consider the museum-standard values (Matteini, 2010). These recommended values are subject to*

STATO COUNTRY	SITO SITE	REPERTI REMAINS	U.R. R.H.	T T
FRANCIA FRANCE	Abilly	Resti in pietra/ <i>Stone remains.</i>	45-60	<30
GERMANIA GERMANY	Badenweiler	Resti in pietra, lastre di pietra calcarea lucida, oggetti vari come le spazzole, i sandali di legno, un rubinetto monumentale in bronzo, ecc./ <i>Stone remains, polished limestone slabs, various objects such as brushes, wooden sandals, a monumental bronze faucet, etc.</i>	45-60	<30
	Dalkingen	Resti in pietra, decorazione in opus reticulatum di pietre di tufo/ <i>Stone remains, tufa stones opus reticulatum decoration.</i>	45-60	<30
GRECIA GREECE	Atene	Resti in pietra/ <i>Stone remains.</i>	45-60	<30
IRLANDA IRELAND	Kilfenora	Muratura in pietra, croci in pietra scolpita/ <i>Stone masonry, stone carved crosses.</i>	45-60	<30
ITALIA ITALY	Cividate	Gradinate rivestite in pietra calcarea di Buhenstein/ <i>Buhenstein limestone terraces.</i>	45-60	<30
	Camuno			
	Cosenza	Resti in pietra/ <i>Stone remains.</i>	45-60	<30
	Legnano	Muratura, intonaci, tele della pinacoteca/ <i>Masonry, plasters, canvas of the gallery.</i>	35-50	19-24
	Naturno	Muratura in pietra/ <i>Stone masonry.</i>	45-60	<30
	Oderzo	Strutture e pavimentazioni in pietra/ <i>Stone structures and floors.</i>	45-60	<30
	Rimini	Mosaici policromi e affreschi, tracce di pavimenti in cocciopesto/ <i>Mosaics and frescoes, pieces of cocciopesto floors.</i>	20-60	6-25
	Teramo	Mattoni, pavimentazioni in cocciopesto/ <i>Bricks, cocciopesto floors.</i>	20-60	
	Torino	Basamenti in pietra, mosaico/ <i>Stone bases, mosaic.</i>	45-60	6-25
NORVEGIA NORWAY	Hamar	Resti in pietra calcarea/ <i>Limestone remains.</i>	45-60	
REGNO UNITO UNITED KINGDOM	Forres	Lastra in pietra arenaria rossa scolpita/ <i>Red sandstone carved slab.</i>	45-60	<30
SPAGNA SPAIN	Astorga	Resti in pietra, pavimenti in opus signinum, marmo e opus spicatum, pitture e mosaici/ <i>Stone remains, opus signinum floors, marble and opus spicatum.</i>	45-60	6-25
	Madrid	Resti in pietra e ceramica/ <i>Stone remains and pottery.</i>	20-60	<30
	Valençia	Resti in pietra, iscrizioni, elementi architettonici, monete e ceramiche/ <i>Stone remains, inscriptions, architectural elements, coins and pottery.</i>	20-60	6-25
	Zaragoza	Pavimenti decorati, resti del teatro in opus caementicium, resti scultorei/ <i>Decorated floors, opus caementicium remains of the theater, sculptural remains.</i>	45-60	<30
UNGHERIA HUNGARY	Pécs	Pareti in pietra delle cappelle affrescate con motivi ornamentali e figurativi/ <i>Stone walls of the chapels painted with ornamental and figurative motifs.</i>	45-60	6-25

Fig. 5 - Elenco dei reperti protetti nei siti studiati, con indicazione dei limiti di umidità e temperatura suggeriti dagli standard. Il sito di Badenweiler presenta reperti con fotosensibilità media che però sono racchiusi all'interno di teche protettive. Anche i siti di Legnano, Rimini, Torino, Astorga, Pécs presentano reperti con fotosensibilità media. A Legnano, per proteggere le tele della pinacoteca è stato utilizzato vetro stratificato serigrafato per punti di mm 3 e spaziatura di mm 9x9, pellicola esterna anti UV e tenda bianca microforata. A Rimini è stato utilizzato vetro stratificato con serigrafia a righe e 60% di copertura. A Torino e Astorga è stato utilizzato vetro stratificato semplice, a Pécs vetrocamera stratificato. Fig. 5 - List of artifacts protected in the studied sites, with the recommended temperature and humidity limits for the remains. The Badenweiler site has artifacts with medium light sensitivity but they are enclosed in protective glass cases. Also Legnano, Rimini, Torino, Astorga and Pécs sites have finds with medium light sensitivity. At Legnano, to protect the paintings in the gallery, silkscreened laminated glass was used, with points of 3 mm and spacing of 9x9 mm, external film anti UV and micro-perforated white awning. In Rimini silkscreened laminated glass with lines and 60% of coverage was used. In Turin and Astorga clear laminated glass and in Pécs vetrocamera stratified glazing units were used.

schio. Ricordando che ogni caso è caratterizzato da condizioni specifiche, è possibile in primo approccio considerare i valori forniti dagli standard museali (Matteini, 2010). Tali valori possono subire moderate variazioni a seconda della nazionalità della Istituzione.

Per valutare i parametri termoigrometrici all'interno dell'involucro protettivo progettato, occorre tenere conto dei fattori che influenzano il comportamento energetico dell'involucro:

- 1) clima (ubicazione ed esposizione);
- 2) tipo di spazio (aperto – semiaperto – chiuso; fuori terra – ipogeo; fruibile – non fruibile);
- 3) tipo di controllo microclimatico (ventila-

*moderate variations depending on the nationality of the institution.*

*To evaluate the thermo-hygrometric parameters inside the newly-designed, protective covering structures, it is necessary to take into account the factors that influence the energy behavior of the enclosure:*

- 1) *climate (location and exposure)*
- 2) *type of space (open – semi-open – closed; above ground - underground; accessible - not accessible);*
- 3) *type of microclimate control (natural or mechanical ventilation - air conditioning systems);*
- 4) *type of glass and possible shading device.*

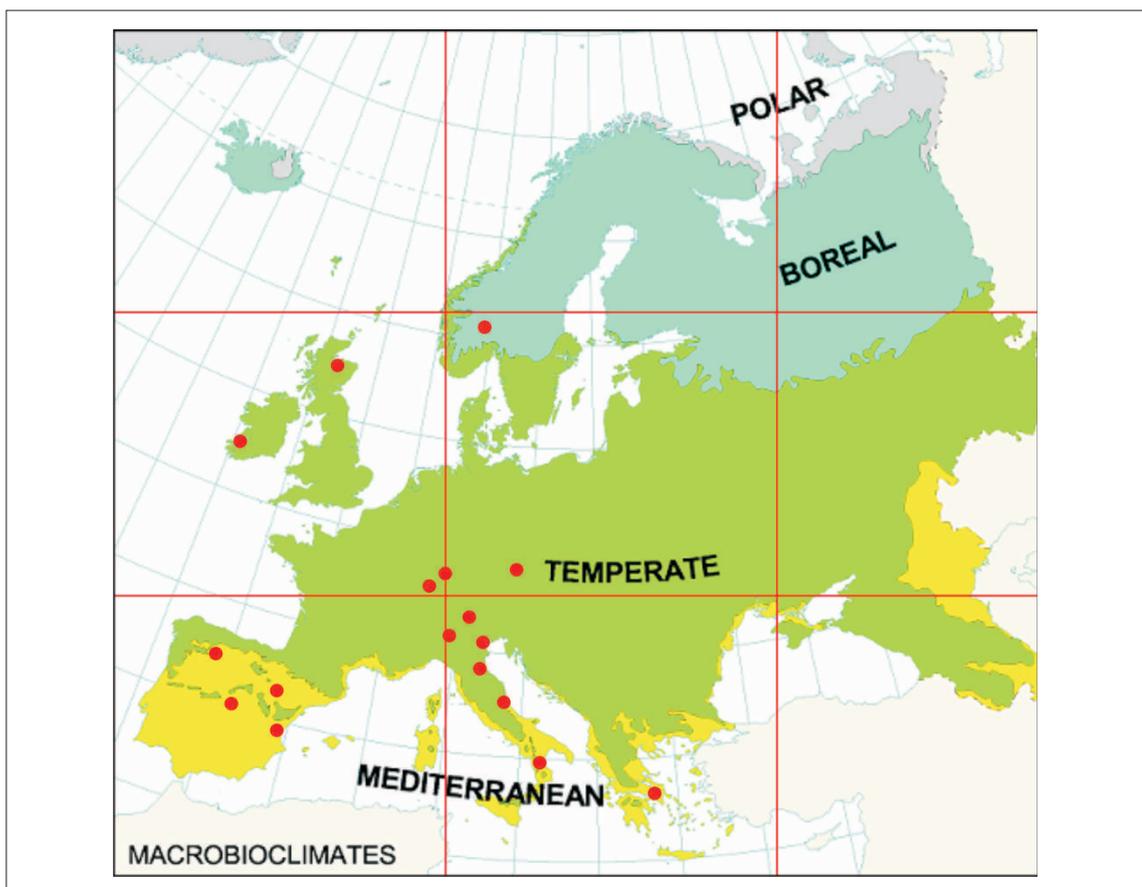


Fig. 6 - Mappa bioclimatica dell'Europa con individuazione dei siti oggetto di studio. Tali siti possono essere collocati in uno dei tre macrobioclimi: mediterraneo, temperato e boreale.

Fig. 6 - Bioclimatic Europe map with indication of the sites studied. These sites may be part of one of three groups: Mediterranean, temperate and boreal.

zione naturale – meccanica; condizionamento);

4) tipologia di vetro ed eventuale schermatura.

### 8.3.1. Clima (ubicazione ed esposizione)

L'individuazione del macrobioclima (Fig. 6) e dei corrispondenti valori medi dei parametri geografici e meteorologici può dare un'idea generale delle condizioni climatiche della regione e delle sollecitazioni ambientali sul sito. Sulla base di tali dati climatici, occorrerà determinare i parametri microclimatici all'interno dell'involucro protettivo. Si può tenere conto della presenza di eventuali elementi di ombreggiamento che può ridurre la temperatura del terreno e dell'aria, causando però un incremento dell'umidità relativa. Anche la diversa capacità termica del suolo e il suo colore possono incidere sul microclima: il colore della sabbia riflette una maggiore quantità di radiazione solare e a causa della forte capacità termica la roccia può assorbire parecchio calore durante il giorno e rilasciarlo di notte. Importante è anche l'orografia del terreno: un pendio esposto a sud è più caldo di un altro esposto a nord perché riceve maggiore radiazione solare. L'orientamento dipenderà dalle caratteristiche planimetriche del sito: esso influisce sulla radiazione solare incidente e condiziona i diversi scambi termodinamici (Ceccherini Nelli et al. 2007).

Poiché il sole costituisce il parametro più importante per un involucro interamente vetrato, la percentuale di superficie nelle varie esposizioni influenza notevolmente i risultati. La valutazione dell'intensità di radiazione per cielo sereno dipende essenzialmente dallo spessore di atmosfera attraversata e dall'angolo di incidenza e quindi dalla giacitura della

### 8.3.1. Climate (location and exposure)

*The macrobioclimate (Fig. 6) and the corresponding average values of the meteorological and geographical parameters can give a general idea of climate zone conditions. The microclimatic parameters inside the covering structures are to be determined on the basis of this climate data. One may take into account the presence of any shading elements that can reduce ground and air temperature, whilst producing an increase in relative humidity. Even the different heat capacity of the ground and its color may affect the microclimate; the bright color of the sand reflects a greater amount of solar radiation. The sand can absorb a lot of heat during the day due to the strong thermal capacity of the rock and can then release it during the night. The topography of the ground is also important: a south facing slope is warmer than a north facing slope because it receives more solar radiation. The orientation depends on the planimetric characteristics of the site; this affects the solar radiation conditions and the different thermodynamic exchanges (Ceccherini Nelli et al. 2007).*

*The percentage of surface at different exposures has a significant influence on the results, since the sun is the most important parameter for a fully glazed envelope. Evaluation of clear sky radiation intensity essentially depends on the thickness of the atmosphere traversed and on the angle of incidence, and therefore on the surface exposure and the position of the sun. In the intermediate months of the year, such as June or July, the heat input may be higher because of the angle of solar radiation incidence.*

superficie considerata e dalla posizione del sole. Nei mesi dell'anno intermedi, come in giugno o luglio, vi possono essere ingressi di calore più elevati a causa dell'angolo di incidenza della radiazione solare. Il vetro presenta valori di trasparenza e trasmissione maggiori quando la direzione della radiazione solare è ortogonale al piano di giacenza, valori che decrescono man mano che l'angolo di incidenza diminuisce. Dunque, subito dopo le superfici vetrate orizzontali, quelle esposte ad est e ad ovest risultano le più penalizzate dal punto di vista energetico, in quanto colpite dalla radiazione quando il sole è relativamente basso all'orizzonte (rispettivamente all'alba e al tramonto) e subiranno un'incidenza sempre prossima alla perpendicolare; per cui la quantità di energia ricevuta seguirà l'andamento stagionale (forte in estate e debole in inverno) (Lieb, 2010). È quindi importante tenere conto che vetrate orizzontali o negli orientamenti Est e Ovest portano a un incremento significativo dei guadagni termici in estate.

### 8.3.2 Tipo di spazio

Le coperture possono essere classificate secondo la quantità di spazio aperto in aperte, semiaperte e chiuse. Tale classificazione risulta fondamentale per la determinazione del microclima che si verrà a creare intorno ai reperti; in base al tipo di spazio, occorrerà stabilire il tipo di controllo microclimatico.

Le coperture aperte o tettoie possono confrontarsi con una parte delle rovine, con un intero complesso o con un'intera area di scavo. Hanno come scopo immediato quello di proteggere i resti archeologici dai fenomeni atmosferici (pioggia, neve, ecc.). Le condizioni microclimatiche sono uguali a

*Glass is more transparent and consents greater transmission when the direction of solar radiation is perpendicular to the plane; these values decrease as the angle of incidence decreases. Therefore, immediately after horizontal glass surfaces, east and west surfaces are at the greatest disadvantage in terms of energy, since they are struck by radiation when the sun is relatively low on the horizon (either at sunrise and sunset). The angle of incidence for these surfaces will be close to the perpendicular, so the amount of energy received will follow the seasonal trend (strong in summer and low in winter) (Lieb, 2010). So, horizontal or east and west glazing leads to significantly increased heat gains.*

### 8.3.2. Type of space

*The covering structures can be classified by the quantity of open space: open, semi-open and closed covering structures. This classification is important in determining the microclimate that will be created around the ruins; based on the type of space, a type of microclimate control needs to be established.*

*The open covering structures or shelters can protect a part of the ruins, a whole complex of finds or an entire excavation area. They have the immediate aim of protecting the archaeological remains from the weather (rain, snow, etc.). The microclimatic conditions are the same as outside and glass does not provide protection from solar radiation, as radiation damages the finds equally in the case of low sunlight.*

*The semi-open and closed covering*

quelle esterne e il vetro non fornisce riparo dalla radiazione solare, poiché nel caso di sole basso all'orizzonte le radiazioni colpiscono ugualmente i reperti.

Le coperture semiaperte e chiuse definiscono spazi confinati, che permettono una separazione climatica e spaziale dall'esterno. Esse possono assumere le forme più svariate, dettate da esigenze architettoniche e funzionali. Temperatura e umidità, in un ambiente confinato, sono i parametri climatici fondamentali; per tali tipi di coperture occorre dunque ricavare i valori che si determinano intorno ai reperti.

Nel caso di copertura semiaperta, la struttura fisica della copertura (forma, dimensioni, materiali, sistemi di schermatura, ecc.) eserciterà una forte influenza sulla sua capacità di ottimizzare l'apporto termico solare e di migliorare la ventilazione. L'estensione della superficie orizzontale esposta costituisce la principale fonte di carico termico, essendo maggiore l'irraggiamento solare attraverso essa. A questo proposito, la forma che ha la minima dimensione di base a parità di altezza è la più indicata per tutte le condizioni considerate.

Per quanto riguarda la ventilazione, nelle varie condizioni climatiche, il volume che richiede una percentuale minore di aperture per garantire un flusso d'aria adeguato è quello più alto e con superficie di base minore. In un ambiente semiaperto il calore assorbito viene continuamente allontanato: il terreno riscalda l'aria sovrastante che sale verso l'alto, richiamando dall'esterno aria fresca che sottrae ulteriore calore. In un ambiente chiuso questo meccanismo viene interrotto poiché l'aria calda non può uscire, causando il cosiddetto effetto serra (Lanza

*structures define confined spaces that consent a physical and climatic separation of the ruins from outside. They may take on various shapes, as demanded by architectural and functional needs. Temperature and humidity are the climatic parameters par excellence in a confined environment; for these types of covering structures it is therefore necessary to calculate the climate values around the finds.*

*In the case of semi-open covering structures, the physical structure (shape, dimensions, materials, shading systems, etc.) exercises a strong influence on the ability to optimize the solar heat input and to improve the ventilation. The size of the exposed horizontal surface constitutes the main source of heat load, as solar radiation passing through is strong. In this regard, the shape with the smallest base dimension at the same height is the most suitable for all conditions considered.*

*As regards the ventilation, in various climatic conditions, the volume that requires a smaller percentage of openings to ensure an adequate air flow is higher and has a lower base surface. In a semi-open environment the absorbed heat is continuously being removed; the ground warms the air above, which rises, drawing in fresh air from the outside and removing additional heat (Lanza Volpe, 2012). In a closed environment this mechanism is prevented since warm air cannot get out, causing the so-called greenhouse effect. In the case of a closed environment, rising warm air is checked by the roof, the air being distributed according to its density (warmer, lighter air at the top and cold, heavier air at the*

Volpe, 2012). Nel caso di ambiente chiuso l'ascesa dell'aria più calda è fermata dal soffitto, l'aria si distribuisce secondo la propria densità (aria più calda più leggera in alto e aria fredda più pesante in basso) formando una stratificazione stabile. Tuttavia se c'è qualche sorgente o pozzo di calore (o le pareti non sono in equilibrio termico con l'aria alla medesima quota), la conservazione della massa richiede necessariamente che l'ascesa dell'aria calda sia compensata dalla discesa di aria e viceversa. Dunque, in un ambiente chiuso, l'aria generalmente è naturalmente stratificata e moti d'aria possono essere causati da corpi a diversa temperatura (Camuffo, 1998).

Un'ulteriore distinzione riguarda le strutture che racchiudono la rovina fuori terra e le strutture di protezione su scavi ipogei, al di sotto dello spazio pubblico o nei piani interrati di edifici di nuova costruzione che ospitano resti archeologici al fine di renderli visibili dall'alto. Tale tipologia risponde all'esigenza di salvaguardare i resti, mantenendo le funzioni indispensabili alla vita quotidiana della cittadinanza (Tricoli, 2011). L'interramento del volume definisce il grado di contatto dell'involucro con il terreno: maggiori scambi con il terreno portano a condizioni termiche più stabili per l'inerzia termica del sistema e umidità interne più elevate (Rogora, 2006) che possono determinare la formazione di condensa. Risulta quindi indispensabile verificare la formazione di condensa e prevenirla attraverso un opportuno controllo microclimatico.

Gli spazi confinati possono inoltre essere fruibili dal pubblico o non fruibili, le cosiddette "vetrine archeologiche". Questo aspetto è importante in quanto la presenza di persone

*bottom) with a stable stratification. However if there is any heat source (or the walls are not in thermal equilibrium with the air at the same elevation), the conservation of mass necessarily requires the rise of hot air to be compensated by the descent of air and vice versa. Therefore, in a closed environment, the air is generally naturally stratified and air motion may be caused by bodies at different temperatures (Camuffo, 1998).*

*There is a further distinction for structures that enclose ruins above ground and protection structures for underground excavations, below a public space or in the basements of new buildings housing archaeological remains (in order to render them visible from on high). This type of covering structure preserves the remains, maintaining unchanged the essential functions needed for people's daily lives (Tricoli, 2011). Underground volume defines the degree of contact of the envelope with the ground; more exchanges with the ground lead to more stable thermal conditions for thermal inertia of the system and higher internal humidity (Rogora, 2006), which can lead to condensation. It is therefore essential to check the formation of condensation and prevent it through appropriate microclimate control.*

*Confined spaces may also be accessible to the public, or non-usable spaces, the so-called "archaeological windows" that allow viewing from outside. This aspect is rather important as the presence of people causes an increase in thermal loads in terms of temperature and water vapor.*

determina un incremento dei carichi termici in termini di temperatura e vapore acqueo.

### 8.3.3. Tipo di controllo microclimatico

All'interno di volumi confinati, a causa del carico termico, si avrà necessariamente un incremento di temperatura rispetto all'aria esterna. Per volumi semiaperti è importante prevedere in fase di progettazione un opportuno sistema di ventilazione naturale e, a seconda delle condizioni climatiche esterne, non sarà necessario installare impianti di condizionamento oppure sarà possibile limitarsi a ventilazioni meccaniche integrative. La ventilazione dovrà essere tale da compensare le variazioni delle altre componenti del bilancio termico globale: radiazione solare, persone e illuminazione.

La percentuale di aperture necessarie per un'adeguata ventilazione diminuisce all'aumentare della differenza di temperatura richiesta tra l'aria di ingresso e di uscita. Se consideriamo volumi aventi stesse dimensioni di base, ma altezze differenti, otterremo superfici aperte che diminuiscono all'aumentare dell'altezza del volume. Oltre una certa altezza non vi è più un vantaggio termico e un ulteriore incremento non produce miglioramenti di rilievo poiché la percentuale necessaria di aperture tenderà a stabilizzarsi ad uno stesso valore. Per volumi bassi (3-4 m) la ventilazione non è efficace e occorre realizzare aperture molto ampie su tutti i lati o aprire completamente il volume, privandolo delle pareti laterali (tettoie). La ventilazione dovrà essere attiva tutto l'anno e pertanto durante le stagioni intermedie, autunno e primavera, si avranno periodi in cui il carico termico è molto ridotto rispetto a quello massimo di progetto e durante la stagione invernale sarà

### 8.3.3. Type of microclimatic control

*Necessarily, the temperature within confined spaces is higher than the air outdoors, due to the thermal load. An appropriate natural ventilation system is an important parameter for semi-open volumes. In this case, because of the climatic conditions, air conditioning is not required but mechanical ventilation systems may be necessary where passive ventilation is not sufficient. Ventilation is a way of guaranteeing a suitable balance with solar radiation, human presence, lighting, etc.*

*The number of ventilation openings needed to ensure proper ventilation decreases as the temperature difference required between incoming and outgoing air increases. If we consider volumes with the same base size, the need for openings decreases with the increasing height of the volume. Above a certain height there is no thermal advantage and a further increase in height offers no significant improvement, since the required percentage of openings tends to stabilize its value. In low volumes (3-4 m in height) the ventilation is not efficient and very large openings are needed on all sides, or the volume has to be completely open, without lateral walls (shelters). Ventilation must be active throughout the year and therefore there will be periods, during fall and spring, with very small thermal loads. A lower air flow rate will be necessary during winter months to facilitate heat accumulation. It is therefore important to provide microclimate control sensors, varying opening conditions with automatic systems and different operating modes controlled by electric or pneumatic ac-*

invece necessario limitare la ventilazione per favorire l'accumulo di calore. Risulta quindi importante prevedere una regolazione con sensori di controllo del microclima, in modo da poter variare con una gestione automatizzata le condizioni di apertura e le diverse modalità operative, utilizzando attuatori elettrici oppure pneumatici e garantendo il passaggio dell'aria anche in condizioni atmosferiche avverse (Lanza Volpe, 2012).

Per quanto riguarda i volumi chiusi, occorre necessariamente prevedere sistemi meccanici di ventilazione e impianti di condizionamento per la regolazione delle temperature e del livello di umidità. Le superfici interrato, soprattutto se di grandi dimensioni, riducono la possibilità di ventilazione naturale. In questi casi, le problematiche termiche legate all'utilizzo dei vetri devono essere risolte mediante l'utilizzazione di impianti meccanici e di condizionamento. Nel caso di lamina d'acqua sulla copertura vetrata si ottiene un buon livello di isolamento.

Naturalmente è possibile prevedere sistemi di copertura che integrano più tipologie di controllo microclimatico. Nel caso della ventilazione naturale, per giungere a una ottimizzazione delle coperture occorre procedere già in fase progettuale al dimensionamento delle aperture mediante calcoli semplificati. I parametri previsti in fase preliminare potranno infine essere verificati con simulazioni fluidodinamiche che permettono la visualizzazione della distribuzione dei flussi. Si deve tenere conto che, con qualsiasi forma di ventilazione, la posizione delle prese d'aria (aperture inferiori per la ventilazione) definisce in gran parte il regime di flusso nello spazio interno e deve essere scelta attentamente per ventilare completa-

*tuators, and ensuring an adequate airflow even in adverse weather conditions (Lanza Volpe, 2012).*

*As for closed volumes, mechanical ventilation and air conditioning systems for temperature and humidity regulation are necessary. An underground volume, especially if large, reduces the possibility of natural ventilation. Even in these cases, thermal problems due to the use of glass must be resolved through mechanical and conditioning systems. Covering structures with a film of water over the glass provide good insulation.*

*Of course it is possible to have covering structures with more integrated solutions for microclimate control. In the case of natural ventilation, in order to achieve an optimization of covering structures, it is necessary, during the design phase, to proceed by sizing the openings in accordance with simplified calculations. The parameters laid down in the preliminary phase will eventually be verified with fluid dynamic simulations that consent visualization of flows. It needs to be taken into account that, with any form of ventilation, the possible position of air inlets or intakes (i.e. the lower openings for natural ventilation) will largely define the flow regime in the interior space and need to be chosen carefully in order to fully ventilate the space. These will however change during the day, so that different load cases need to be taken into account when optimizing openings in an architectural context. This again shows that it is necessary to discuss such measures at a really early stage of the architectural process, as only then is it still possible to ad-*

mente lo spazio e le superfici in cui l'irraggiamento solare causerà un incremento di temperatura più elevato. Tali prese d'aria dovranno comunque variare durante il giorno, in modo che per l'ottimizzazione delle aperture in un contesto da proteggere vengano presi in considerazione casi di carico diversi. Ciò dimostra che sia necessario discutere di tali misure in una fase molto precoce del processo architettonico, poiché solo allora sarà ancora possibile regolare i parametri di base come l'orientamento delle pareti vetrate (Lieb, 2012).

Per quanto riguarda gli impianti, bisogna considerare che un impianto di condizionamento dell'aria produce, in prossimità delle emissioni, un brusco e dannoso mutamento microclimatico e, nel caso di rapide interruzioni nel funzionamento, le repentine variazioni "microclimatiche" sono oltremodo pericolose (Ossani, 2001).

*just basic parameters such as the orientation of glazed walls (Lieb, 2012).*

*With regard to mechanical and conditioning systems, we ought to bear in mind that they can produce a sudden and harmful change in microclimatic parameters near the emission source and, in the case of power cuts, sudden microclimate changes are extremely dangerous.*

**8.3.4. Type of glass and possible shading device (Lanza Volpe, 2013 )**

*A transparent enclosure, exposed to the sun, can become a real "greenhouse" that blocks the flow of air and raises temperatures inside. Large glass surfaces often cause problems with exposure to solar radiation and its associated heat, which may limit the comfort of visitors and might also cause damage to the remains.*

STATO COUNTRY	SITO SITE	TIPO DI SPAZIO TYPE OF SPACE										CONTROLLO MICROCLIMATICO MICROCLIMATIC CONTROL		
		APERTO OPEN	CONFINATO/CONFINED								VENTILAZIONE VENTILATION		IMPIANTI CONDIZIONAMENTO CLIMATIC SYSTEMS	
			SEMIAPERTO/SEMIOPEN				CHIUSO/CLOSED				NATURALE NATURAL	MECCANICA MECHANICAL		
			FUORI TERRA ABOVE GROUND		IPOGEO UNDERGROUND		FUORI TERRA ABOVE GROUND		IPOGEO UNDERGROUND					
FRUIBILE ACCESSIBLE	VETRINA WINDOW	FRUIBILE ACCESSIBLE	VETRINA WINDOW	FRUIBILE ACCESSIBLE	VETRINA WINDOW	FRUIBILE ACCESSIBLE	VETRINA WINDOW							
FRANCIA	ABILLY		X									X		
GERMANIA	BADENWEILER		X									X		
	DAIKINGEN		X									X		
GRECIA	ATENE									X				
IRLANDA	KILFINNORA	X										X		
ITALIA	CIVIDATE CAMUNO	X												
	COSENZA				X							X		
	LEGNANO							X						X
	NATURNO		X									X		
	ODERZO				X							X		
	RIMINI		X									X		X
	TERAMO		X									X		
	TORINO									X				
NORVEGIA	HAMAR		X									X	X	X
REGNO UNITO	FORRES			X								X		
SPAGNA	ASTORGA	X												
	MADRID					X						X	X	
	VALENCIA								X					X
	ZARAGOZA	X												
UNGHERIA	PÉCS								X					X

Fig. 7 - Classificazione delle coperture studiate in base al tipo di spazio coperto e al tipo di controllo microclimatico.  
Fig. 7 - Classification of covering structures according to the type of covered space and to the type of microclimate control.

#### 8.3.4. Tipologia di vetro ed eventuale schermatura (Lanza Volpe, 2013 )

Un involucro trasparente esposto al sole può diventare una vera e propria "serra" che agisce come barriera che blocca il flusso di calore e fa sì che si stabilisca una temperatura elevata al di sotto di essa. La mancata attenzione per tale aspetto può provocare condizioni non accettabili per il comfort dei fruitori oltre che temperature dannose per i reperti da proteggere.

L'irraggiamento che colpisce un vetro viene in parte riflesso, in parte assorbito, in parte trasmesso. L'incidenza di queste componenti su un vetro stabilisce il fattore di riflessione, il fattore di assorbimento, il fattore di trasmissione. Un vetro convenzionale chiaro (float) riflette circa l'8% della radiazione solare incidente, ne assorbe circa il 9% e ne trasmette il rimanente 83% nell'ambiente interno. La radiazione solare viene quindi in gran parte trasmessa all'interno, investendo le superfici presenti e aumentandone la temperatura. Queste a loro volta riemettono energia termica sotto forma di radiazioni infrarosse di lunghezza d'onda superiore ai 3  $\mu\text{m}$  per le quali il vetro risulta opaco, instaurando quel fenomeno comunemente noto come effetto serra. Questo comportamento risulta alquanto sfavorevole nei mesi estivi.

Tramite un'opportuna scelta delle caratteristiche del vetro associata a parametri microclimatici, quali la ventilazione naturale, il raffreddamento notturno, la luce del sole, ecc. è possibile abbassare il fabbisogno energetico (Schittich et al. 1999).

##### *Prestazioni energetiche del vetro*

Oggi il progresso tecnologico ha affrontato la maggior parte delle carenze dei si-

*When sunlight strikes a sheet of glass, solar radiation is either transmitted straight through it, reflected or absorbed by the glass itself. The heat energy absorbed by the glass is then radiated both inside and outside as infrared radiation. Conventional, clear float glass reflects about 8% of incident solar radiation, absorbs about 9% and transmits the remaining 83% to the internal environment. Solar radiation is therefore largely transmitted to the indoor environment, falling on surfaces and increasing the temperature; these surfaces then re-emit a longer wavelength. This heat is unable to pass back through the glass, and so, temperatures rise in the space, in a process known as the greenhouse effect. This behavior is quite unfavorable in the summer months.*

*Energy needs may decrease through an appropriate choice of characteristics of glass associated with microclimatic parameters, such as natural ventilation, night cooling, sunlight, etc (Schittich et al. 1999).*

##### Energy performance of glazing

*Considerable recent progress in technology has provided glass products with those features which were not originally characteristic of glass, for example improvements in energy performance. The key elements in the evaluation of the energy characteristics of glass surfaces are thermal insulation, solar control and spectral selectivity.*

*Thermal insulation is the reduction of heat transfer between environments of differing temperature. Glass is normally used in buildings in very thin sheets, ty-*

stemi tradizionali conferendo caratteristiche non intrinseche al materiale, quali il miglioramento delle prestazioni energetiche. Principi fondamentali per la valutazione delle caratteristiche energetiche delle superfici vetrate sono l'isolamento termico, il controllo solare e la selettività spettrale.

Per *isolamento termico* si intendono tutti i sistemi e le operazioni atti a ridurre il flusso termico di calore scambiato tra due ambienti a temperature differenti. Tale flusso termico sarà in ingresso quando le temperature esterne sono maggiori di quelle interne e in uscita nel caso contrario, come ad esempio nel periodo invernale. In edilizia il vetro viene normalmente utilizzato in lastre di spessore molto piccolo, tipicamente da 4 a 8 mm, e quindi l'isolamento termico che può fornire una singola lastra non è molto elevato. Per migliorare l'isolamento è necessario ridurre la trasmittanza termica "U" che rappresenta il trasferimento del calore attraverso conduzione, convezione e irraggiamento fra i due ambienti separati. Una vetrata monolitica ha una trasmittanza di  $5.8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  per uno spessore di 4 mm che diventano  $5.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  per uno spessore di 8 mm.

Il *controllo solare* è la riduzione della radiazione solare che attraversa il vetro ed entra nell'edificio. In climi caldi o negli edifici con elevati carichi termici entranti, il vetro a controllo solare minimizza il guadagno solare e contribuisce a eliminare l'abbagliamento. Le caratteristiche di controllo solare, espresse tramite il fattore solare "FS" o "g", che rappresenta la percentuale di radiazione solare trasmessa rispetto a quella incidente, dipendono dalla quantità di radiazione assorbita dal vetro e dalla quantità di radiazione riflessa. Tradizionalmente esiste un compro-

*pically 4 to 8 mm thick, and so the thermal insulation that a single sheet can provide is not very high. Good thermal insulation improves energy efficiency directly by lowering the "U-value" that represents the rate of transfer of heat through conduction, convection and radiation between two separate spaces. Monolithic glass has a transmittance of  $5.8 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  for a thickness of 4 mm, which becomes  $5.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$  for a thickness of 8 mm. Thus it is almost useless to act on the sheet thickness. The U-value is mainly influenced by the quality of the glazing.*

*Solar control is the reduction of the sun's direct heat energy through glass. In a hot environment or in buildings with high internal loads, solar control glass can be used to reduce the effect of the sun's heat and to eliminate glare. Solar control, expressed by the Solar Heat Gain Coefficient "SHGC" or "g-value", varies in relation to the amount of radiation absorbed and reflected by the glass. There is a compromise between solar control and transmission of light because the greater the control by glass of incoming heat the greater the reduction in the amount of light inside (Carmody et al. 2004).*

*Solar and terrestrial radiation is spread across a large spectrum of wavelengths. One of the most compelling facts about transparent glazing materials is that they affect different wavelengths of energy differently. The most significant progress made by glass in the last twenty years has, in fact, been the development of selective surfaces that can*

messo tra controllo solare e trasmissione della luce poiché più un vetro controlla il calore entrante più si riduce la quantità di luce che entra nell'edificio. I moderni vetri a controllo solare riescono a risolvere questo equilibrio con una maggiore trasmissione della radiazione visibile e un più basso coefficiente di ombreggiamento (Carmody et al. 2004).

Poiché la radiazione solare e la radiazione terrestre si sviluppano su un ampio spettro di lunghezze d'onda, uno dei fattori più significativi in merito ai vetri è che essi possono influire su diverse lunghezze d'onda in modo diverso. Il progresso più importante per il vetro negli ultimi venti anni è stato proprio lo sviluppo di superfici selettive che possono bloccare soltanto alcune porzioni dello spettro. Variabili quali il tipo di vetro, il suo spessore e l'angolo di incidenza della radiazione entrante determinano se l'energia di una data lunghezza d'onda verrà trasmessa, assorbita o riflessa. La *selettività spettrale* indica la capacità del vetro di trasmettere la radiazione in alcune parti dello spettro, bloccandone altre. Si può ottenere per assorbimento o per riflessione. In una costruzione in cui il riscaldamento è la necessità primaria, come in un clima freddo, l'ideale sarebbe un vetro spettralmente selettivo che ammetta tutta la radiazione visibile e nel vicino infrarosso dello spettro solare e rifletta verso l'interno la radiazione terrestre del lontano infrarosso. In un edificio in cui invece il raffreddamento è la preoccupazione principale, il vetro ideale sarebbe quello che ammette solo la luce visibile, mentre respinge tutto il vicino infrarosso e il calore che lo caratterizza. Mantenendo una trasmissione luminosa alta attraverso il vetro e un fattore solare basso, sarà ammessa una luce adeguata pur bloccando

*only block certain portions of the spectrum. The variables in the glazing material, its thickness, and the angle of incidence of the incoming radiation, determine whether energy of a given wavelength will be transmitted, absorbed or reflected. Spectral selectivity indicates the ability of glass to allow solar and terrestrial radiation to be transmitted in certain parts of the spectrum whilst filtering it out in other parts. This can be achieved by reflection or absorption. In a building, such as a house in a cold climate, where heating is the primary need, the ideal spectrally selective glazing would admit all of the visible and near-infrared radiation of the sun, and reflect back into the room all of the long-wave, infrared terrestrial radiation. In a building where cooling is the primary concern, ideal glazing will admit only the visible light, while screening out all of the near-infrared heat that accompanies it. Adequate light will be permitted with high Visible Light Transmission and low Solar Heat Gain Coefficients, while blocking out significant amounts of solar radiation. The ratio of the Visible Light Transmission "VT" to Solar Heat Gain Coefficient "SHGC" or "g-value" is known as the Light-to-Solar Gain ratio, LSG. The recommended ratio is 1.25 or higher. The higher the ratio, the higher the benefit in terms of daylight. It also means that glass transmits more light than heat to the interior (Wasley & Utzinger, 1996).*

#### High-performance glazing

*There are three fundamental approaches to improving the energy perfor-*

quantità significative di radiazione solare. Il rapporto fra trasmissione luminosa "TL" e fattore solare "FS" o "g" è definito indice di selettività, "light-to-solar gain ratio", LSG. Se tale rapporto è maggiore di uno, il vetro trasmette più luce che calore. Più alto è tale rapporto, maggiore è la selettività spettrale (Wasley & Utzinger, 1996). Un componente trasparente può essere considerato selettivo se tale rapporto è maggiore di 1.25.

#### *Vetro ad alte prestazioni*

In commercio sono disponibili diversi tipi di vetro, con prestazioni energetiche migliori rispetto a quelle del vetro semplice, ottenute grazie a differenti approcci che è anche possibile combinare tra loro:

- *Composizione della lastra di vetro con altre lastre.* Le tipologie di composizione standard sono il vetro laminato e il vetrocamera. Il vetro laminato è composto da due o più lastre di vetro tra loro unite su tutta la superficie mediante uno o più intercalari di materiale plastico trasparente sottile che permette di conferire caratteristiche strutturali e di sicurezza. In genere come intercalare viene utilizzato il polivinilbutirrale "PVB", film plastico particolarmente adatto per applicazioni che richiedono forte legame, chiarezza ottica, adesione, tenacità e flessibilità. Dal punto di vista energetico, il PVB conferisce al vetro la caratteristica di selettività nei confronti delle radiazioni UV.

Il vetrocamera è costituito da due o più lastre di vetro, con interposta una sottile intercapedine di aria o gas. La presenza di più strati riduce, rispetto al caso di vetro semplice, il flusso termico trasmesso (trasmissione più bassa) essendo ovviamente maggiore la resistenza. Anche il contributo

*mance of glazing products (two or more of these approaches may be combined):*

- *To assemble various layers of glazing. The standard composition is represented by laminated glass and insulated glazing. Laminated glass is manufactured by bonding two or more layers of glass together with layers of PVB, under heat and pressure, to create a single sheet of glass. When broken, the PVB interlayer keeps the layers of glass bonded and prevents it from breaking apart. From the energy point of view, the PVB interlayer also blocks out 99% of incoming UV radiation. Insulated glazing consists of double or triple glass window panes separated by an air-filled or other gas-filled (argon, krypton or xenon) space to reduce heat transfer through a part of the envelope of the building. The contribution of the gas introduced into the cavity is important, not only because of its low thermal conductivity when compared to glass, but also because the viscous forces in the gas filling prevent the motion of natural convection inside the interspace, reducing the heat transmitted through the glazing system.*

- *To alter the glazing material. Examples are body-tinted glass and ceramic fritted glass. Body-tinted glass is a normal float glass with a special inorganic additive to obtain a high absorption coefficient of radiation. For this reason, it is used as solar control glass because it absorbs more heat than clear glass and radiates most of the absorbed heat to the outside by means of natural convection. Tinted glazing retains its transparency from the inside, although the brightness*

del gas introdotto nell'intercapedine è importante, non solo per la sua ridotta conducibilità termica rispetto al vetro, ma anche perché le forze viscosi del gas di riempimento impediscono l'insorgere dei moti di convezione naturale all'interno dell'intercapedine, riducendo così la quantità di calore trasmesso attraverso il sistema vetrato. L'isolamento termico migliora con l'inserimento nell'intercapedine di gas isolanti quali argon, kripton e xeno.

- *Alterazione nella composizione del vetro.*

Esempi di interventi sulla composizione materiale del vetro sono il vetro colorato e il vetro serigrafato. Il vetro colorato è un normale float trasparente nella cui fusione vengono aggiunti ossidi per dare la colorazione e ottenere un elevato coefficiente di assorbimento della radiazione. In tal modo può essere usato come controllo solare perché assorbe calore e irradia la maggior parte di tale calore all'esterno mediante convezione naturale. I vetri colorati mantengono la loro trasparenza dall'interno, anche se la luminosità della vista esterna è ridotta e la percezione del colore modificata. Le diverse tinte disponibili hanno effetto in particolare sulla trasmissione della radiazione visibile, sul fattore solare e sulla riflettività (Compagno, 2002). I colori più comuni sono il grigio neutro, il bronzo e il blu-verde, che non alterano molto il colore percepito e tendono a fondersi bene con gli altri colori dell'architettura. I vetri colorati con una tinta azzurra o verde chiara risultano spettralmente selettivi rispetto ai vetri colorati bronzo o grigio. Il vetro serigrafato viene stampato tramite serigrafia. Un composto ceramico polverizzato, "fritta", viene applicato su un lato con un telaio serigrafico con seta sintetica che riproduce il motivo da stampare. La fritta è composta da minuscole particelle

*of view outwards is reduced and the color changes. Every change in color or combination of different glass types affects visible transmittance, the solar heat gain coefficient and reflectivity (Compagno, 2002). The most common colors are neutral gray, bronze, and blue-green, which do not greatly alter the color perceived and tend to blend in well with other architectural colors. Ceramic fritted glass is made by silk-screening, which involves washing the annealed glass and then applying the ceramic frit paint to the interior (non-weather) side of the glass. Frit consists of tiny glass particles, pigments and various chemical products. Ceramic frit is fired in a tempering furnace to create a permanent coating. The results are an increase in solar reflection and absorption on the interior glass ply and a lower shading coefficient. The use of ceramic fritted glass increases the solar reflectance and blocks a quota of ultraviolet and infrared radiation. The patterns usually comprise lines or dots that are not perceived at a distance. The size, density and color of patterns determine the opacity and shading. The silk-screened elements can have a gradient of variation which depends on the angle of solar incidence. This explains how a material that is apparently inappropriate for functioning as a shelter and modulating daylight, provides a wide range of possible forms of regulation thanks to the use of advanced production techniques and calculation systems for correct positioning of panels (Paoletti & Romano, 2010).*

- To apply a coating to the glazing material surface. *The glass surface can*

di vetro, pigmenti e prodotti chimici. La cottura in forno, in genere associata alla tempra o all'indurimento termico del vetro, facendo vetrificare il composto, determina un rivestimento permanente, lo "smalto". Lo smalto assorbe e riflette l'energia solare. L'uso del vetro serigrafato aumenta la riflessione solare e blocca una parte di raggi ultravioletti e infrarossi, fornendo un basso fattore solare. In genere si tratta di linee o punti non percepiti nella visione a distanza, disponibili con diverse percentuali di copertura. Gli elementi serigrafati possono quindi avere un gradiente di variazione a seconda dell'angolo di incidenza della radiazione. Ecco spiegato come un materiale, apparentemente inadatto per fungere da riparo e modulazione della luce diurna, assicuri un ampio ventaglio di regolazioni possibili, grazie all'utilizzo di tecniche produttive avanzate e il ricorso a sistemi di

*be coated with microscopically thin deposits (coating), which are generally metals, noble metals or oxide layers. Recent technological developments have made a large group of coatings available, which can greatly improve the glass energy performance (Paoletta & Minucci, 2004). Mirror coatings, such as silver, are thin enough to be transparent, but thick enough to reflect wavelengths more or less equally throughout the solar spectrum. Therefore, they significantly reduce light transmission and glare, but also the solar factor. Advanced low-e coatings use various metals and thicknesses to reach a layer that interferes with certain parts of the spectrum while remaining transparent to others. A great step forward is represented by the application of low-emissivity coating that reflects ra-*

TIPO DI VETRO TYPE OF GLASS	TRATTAMENTI GLASS TREATMENTS	GAS	U (W/m <sup>2</sup> K)
Vetro monolitico 6 mm <i>Monolithic glass 6 mm</i>	-	-	5,7
Vetro stratificato 66.4 <i>Laminated glass 66.4</i>	-	-	5,3
Vetro low-e 6 mm <i>Low-e glass 6 mm</i>	low-e pirolitico	-	3,7
Vetro stratificato low-e 66.4 <i>Laminated low-e glass 66.4</i>	low-e pirolitico	-	3,5
Vetrocamera 6-12-6 <i>Insulating glass 6-12-6</i>	-	air	2,8
Vetrocamera 6-12-6 <i>Insulating glass 6-12-6</i>	-	argon	2,7
Vetrocamera 6-12-6 <i>Insulating glass 6-12-6</i>	-	kripton	2,6
Vetrocamera con tripla lastra 6-12-6-12-6 <i>Double insulated glazing 6-12-6-12-6</i>	-	air	1,9
Vetrocamera 6-12-6 low-e (TOP N+) <i>Insulating glass 6-12-6 low-e (TOP N+)</i>	low-e magnetr. #3	air	1,6
Vetrocamera 6-12-6 low-e (ENERGY N) <i>Insulating glass 6-12-6 low-e (ENERGY N)</i>	low-e magnetr. #2	air	1,5
Vetrocamera 6-12-6 low-e (ENERGY N) <i>Insulating glass 6-12-6 low-e (ENERGY N)</i>	low-e magnetr. #2	argon	1,2
Vetrocamera 6-12-6 low-e (ENERGY N) <i>Insulating glass 6-12-6 low-e (ENERGY N)</i>	low-e magnetr. #2	kripton	1,0
Vetrocamera tripla lastra 6-12-6-12-6 <i>Double insulated glazing 6-12-6-12-6 low-e</i>	low-e (on two sheets)	argon	0,7
Vetrocamera tripla lastra 6-12-6-12-6 <i>Double insulated glazing 6-12-6-12-6 low-e</i>	low-e (on two sheets)	kripton	0,5

Fig. 8 - Trasmissione di diversi tipi di vetro.

Fig. 8 - Transmittance of different types of glass.

calcolo per un corretto posizionamento delle lastre (Paoletti & Romano, 2010).

- *Coating sulla superficie del vetro.* La superficie dei vetri può essere rivestita con depositi sottili (*coating*) generalmente di metalli, metalli nobili o ossidi. I recenti sviluppi tecnologici hanno messo a disposizione di progettisti un nutrito gruppo di *coating* le cui caratteristiche possono notevolmente migliorare le prestazioni energetiche del vetro (Paolella & Minucci, 2004). Esistono *coating* riflettenti che presentano un elevato coefficiente di riflessione solare. Tali *coating* riflettono le lunghezze d'onda in tutto lo spettro solare più o meno allo stesso modo. Pertanto, si riducono notevolmente la trasmissione luminosa, l'abbagliamento e il fattore solare. Una grande evoluzione è rappresentata dall'applicazione di *coating* bassoemissivi che influenzano direttamente solo la

*diant infrared energy, encouraging radiant heat to remain on the same side of the glass from which it originated, while letting visible light pass through. This often results in more efficient windows because radiant heat originating from indoors in winter is reflected back inside, while infrared heat radiation from the sun during summer is reflected back, keeping it cooler inside. The transmittance of the glass and the solar factor are reduced by lowering the radiative heat flux (Pfrommer et al. 1995). Nowadays, there are types of glass with emissivity of 0.01 against a value of 0.89 for standard clear glass. Low-E glass is primarily designed for use in glazing units. However, solutions with hard coating may also be used in the case of monolithic or laminated glass. The solar reflectance of the low-e*

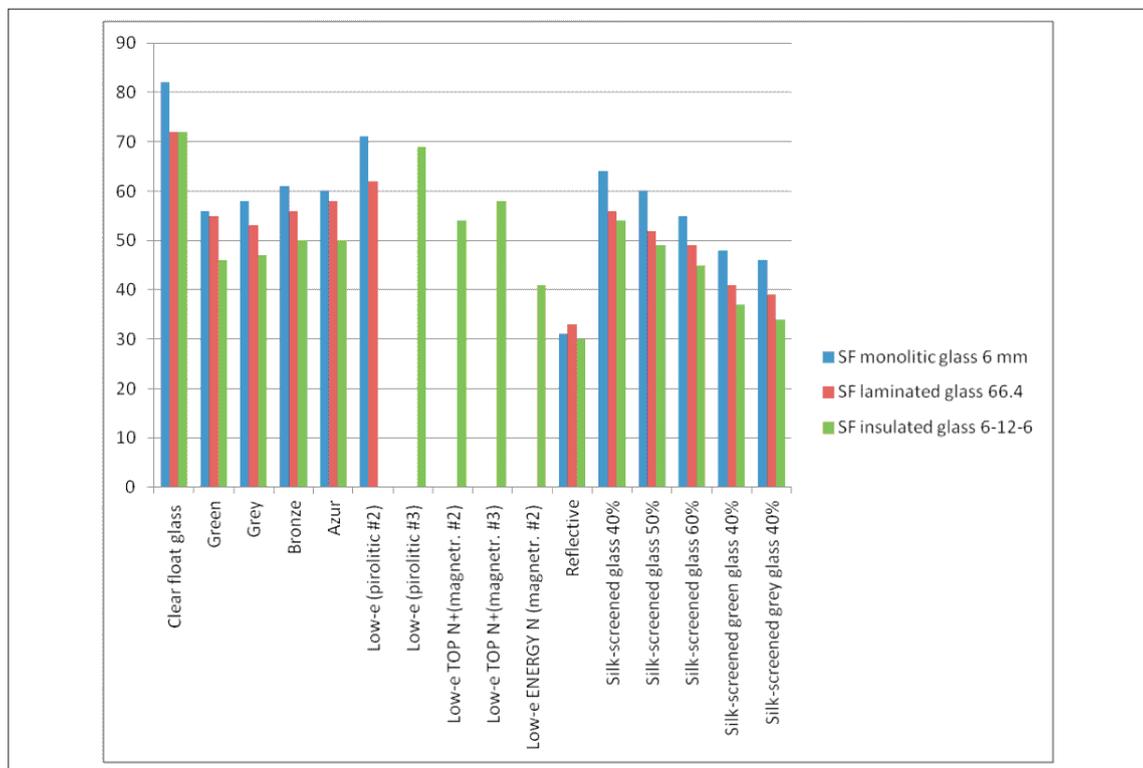


Fig. 9 - Fattore solare di diversi tipi di vetro.  
Fig. 9 - Solar factor of different types of glass.

componente irradiata del trasferimento di calore e funzionano riflettendo o assorbendo la radiazione infrarossa. Essi tendono a mantenere il calore sullo stesso lato da cui ha origine, mentre lasciano passare la luce visibile. Abbassando il flusso di calore radiativo, la trasmittanza e il fattore solare si riducono (Pfrommer et al. 1995). Attualmente si è in grado di realizzare vetri con emissività pari a 0.01 a fronte del valore di 0.89 del vetro standard. Il vetro *Low-E* è stato progettato principalmente per l'uso all'interno di vetrocamera. Tuttavia, sono state pensate delle soluzioni con *hard coating* che possono essere utilizzate anche nel caso di vetro monolitico o stratificato. La riflettanza solare dei rivestimenti *Low-E* può essere manipolata per includere parti specifiche dello spettro visibile e infrarosso. Esistono *coating* basso emissivi nel lontano infrarosso, adatti sia a climi freddi

*coatings can be manipulated to include specific parts of the visible and infrared spectrum. There are low-emissivity coatings in the long-wave infrared, in both cold and hot climates, and low emission glass throughout infrared in hot climates. Depending on the climate and orientation it is necessary to choose low-e coatings with different characteristics. In a cold climate a higher Solar Heat Gain Coefficient is required, whilst in a hot climate, a lower solar factor is needed, with a consequent reduction in the direct heat gain (Carmody et al. 2007). Depending on weather conditions, it is possible to combine different types of sheets and coatings in order to obtain thermal insulation (low transmittance), solar control (low solar control) or spectral selectivity (selectivity index greater than 1.25). In*

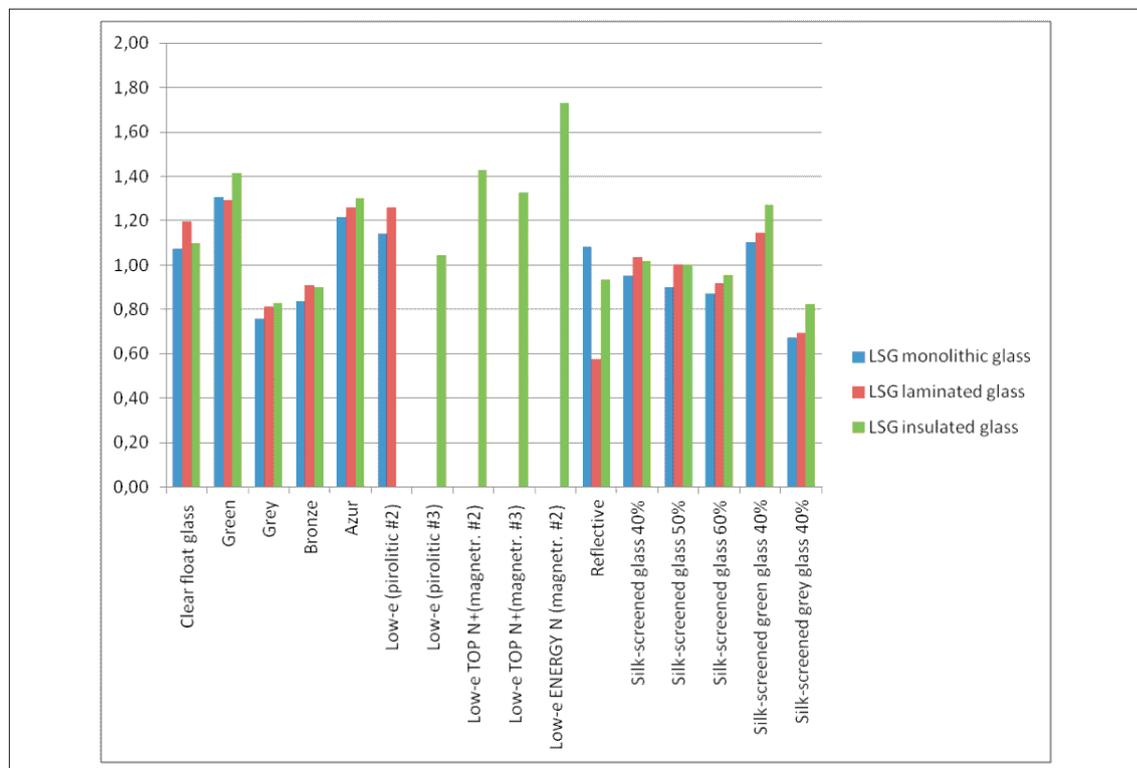


Fig. 10 - Indice di selettività di diversi tipi di vetro.  
 Fig. 10 - Selectivity index of different types of glass.

che caldi, e bassoemissivi in tutto l'infrarosso, adatti ai climi caldi. A seconda del clima e dell'orientamento occorre scegliere rivestimenti *low-e* con caratteristiche differenti. In un clima freddo occorre un fattore solare più elevato, in un clima caldo un basso fattore solare, con una conseguente riduzione del guadagno di calore diretto (Carmody et al. 2007). A seconda delle condizioni climatiche, è possibile quindi combinare differenti tipi di lastre e *coating* in modo da avere isolamento termico (bassa trasmittanza), controllo solare (basso fattore solare) o selettività spettrale (indice di selettività maggiore di 1.25). Attraverso una corretta scelta del tipo di vetro è quindi possibile diminuire l'energia entrante nell'ambiente. Occorre però sottolineare che ciò non è comunque sufficiente a bloccare la radiazione entrante e il conseguente accumulo di calore.

#### *Schermature*

È oggi possibile progettare l'involucro vetrato in combinazione con sistemi e dispositivi schermanti in grado di ridurre il carico solare in estate, senza ombreggiare in inverno. I sistemi di controllo della radiazione solare entrante possono avere diverse percentuali di schermatura e possono essere esterni, interni o integrati nell'involucro. Bisogna inoltre considerare il caso dei dispositivi di protezione solare che vengono installati all'esterno e non paralleli al vetro, e che agiscono per proiezione d'ombra, anche zenitale (Fig. 11). In generale, gli schermi esterni offrono il vantaggio di intercettare la radiazione solare prima che entri nell'ambiente e determinano quindi maggiori vantaggi dal punto di vista energetico. Le schermature interne (Fig. 12 c, d) determi-

*conclusion, through an appropriate choice of type of glass it is possible to decrease incoming energy. However, it should be emphasized that this is not sufficient to block incoming radiation and the resulting heat accumulation.*

#### *Shading devices*

*Nowadays, it is possible to design a glass envelope that has a combination of glazing and shading devices that can reduce solar gain in summer and obtain maximum radiation in winter. Solar control systems may have different percentages of shading; they may be outside, inside the building or integrated into the glass envelope. External shading devices not parallel to the glass, that act to shadow projection, (including zenithal) should also be considered (Fig. 11). In general, external shading devices have the advantage of shading windows from direct radiation, thus preventing a large part of the heat from entering and therefore determining further advantages from the energy point of view. Internal shading (Fig. 12 c, d) is not effective against overheating because the light passing through the glass is transformed into heat, which is trapped between the glass and the shading system. However, it consents the screening of direct radiation and has the advantage of being more easily accessible and maintainable. There are integrated shading treatments such as screen printing (Fig. 12 a, b) or even louvers inside glazing; in this case, the failure of a mechanical element can necessitate the replacement of the entire sheet of glass. The efficiency of the device depends on*

nano un incremento della temperatura al di sotto della copertura poiché la luce attraversando il vetro si trasforma in calore che resta intrappolato tra il vetro stesso e il sistema schermante. Esse però consentono di schermare la radiazione diretta e hanno il vantaggio di essere più facilmente accessibili e di facile

*type, location and adaptability to light variation. With regard to envelope glazing, and with glass for comparison, the increasing importance of solar shading has determined the scientific and normative definition of parameters for the performance of solar control of shading devices*

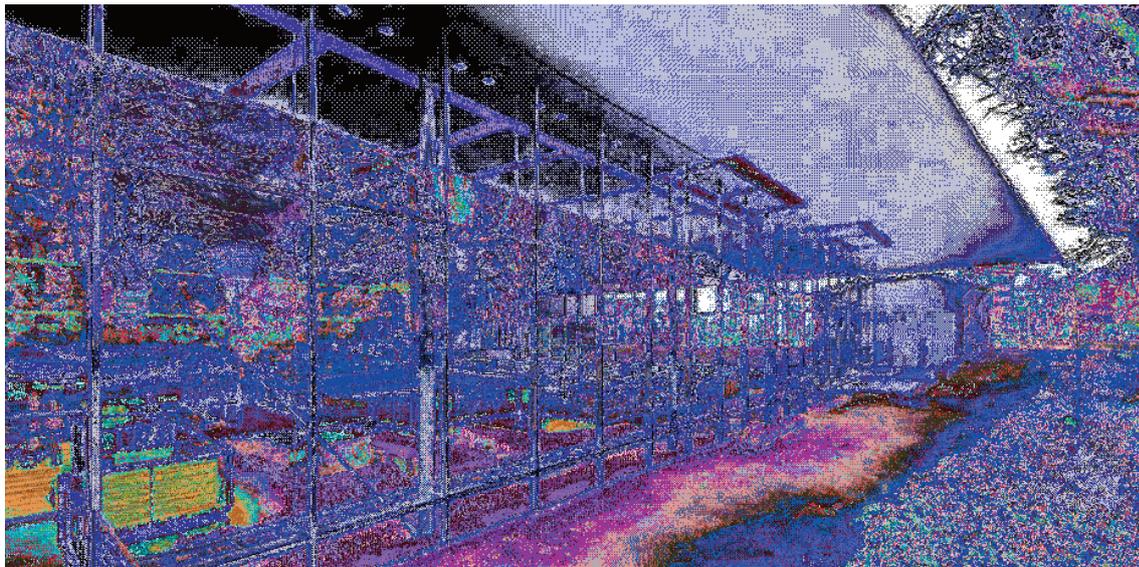


Fig. 11 - Schermature esterne: site-musée gallo-romain, Parc de Vésone (Francia) (a); Elisengarten – Archäologische Vitrine, Aachen (Germania) (b) (foto A. Lanza Volpe).

Fig. 11 - External screens: site-musée gallo-romain, Parc de Vésone (France) (a); Elisengarten – Archäologische Vitrine, Aachen (Germany) (b) (photo A. Lanza Volpe).

manutenzione. Per schermature integrate possiamo intendere i trattamenti schermanti quali la serigrafia (Fig. 12 a, b) o anche l'integrazione di lamelle all'interno di vetrocamera; in quest'ultimo caso, il guasto di un elemento meccanico può rendere necessaria la sostituzione dell'intera lastra. L'efficienza delle schermature dipende dal tipo, dalla posizione e dall'adattabilità alla variabilità della luce. L'importanza che gli schermi solari e le tende tecniche hanno via via acquisito, nel rapporto con la vetratura dell'involucro, ha determinato, per analogia con il vetro, la definizione scientifica e normativa dei parametri quantitativi della prestazione di controllo solare delle schermature (fattore solare totale; indice di protezione solare; coefficiente di ombreggiatura, ecc.) (Brivio, 2010).

(total solar factor; index of sunscreen, shading coefficient, etc.) (Brivio, 2010).

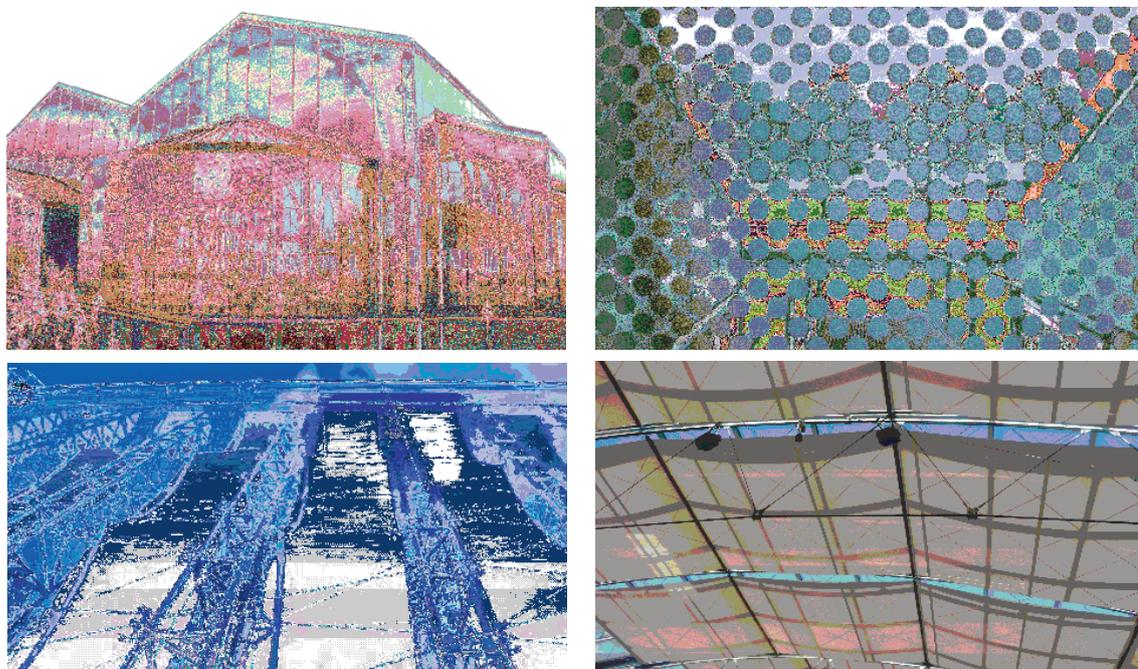


Fig. 12 - Vetro serigrafato, Parco archeologico di Xanten (Germania) (a, b) (foto A. Lanza Volpe); sistemi di ombreggiamento interni: resti della Cattedrale di Hamar (Norvegia) (c); antiche terme di Badenweiler (Germania)(d) (foto A. Lanza Volpe).  
 Fig. 12 - Silk screened glass, Archeologisch Park Xanten (Germany) (a, b) (photo A. Lanza Volpe); systems of internal shading: ruins of Hamar Cathedral (Norway) (c); ancient Roman bath ruins, Badenweiler (Germany) (d) (photo A. Lanza Volpe).

#### 8.4. Limiti dei sistemi vetrati nei siti archeologici

Il vetro è un materiale che possiede significative potenzialità di utilizzo nei contesti storici: esso mette in relazione visiva gli spazi interni con quelli esterni, permette l'ingresso e l'utilizzo della luce naturale negli ambienti confinati ed è in grado di captare l'energia solare passiva in regime invernale. La sua percezione visiva può essere meno massiccia rispetto a quella di una struttura opaca. Esso permette inoltre l'installazione di strutture a secco che può essere vantaggiosa per il montaggio e lo smontaggio rapido *in loco*. Il vetro è anche un materiale durabile e inerte che non emette sostanze nocive. Al tempo stesso possiede rilevanti aspetti di criticità, da considerare nel processo di progettazione (Loughran, 2003). Risulta dunque importante conoscere i limiti dei sistemi vetrati e scegliere i sistemi più appropriati per il contesto in cui devono essere inseriti e per i compiti che devono svolgere.

- *Riflessione*. Un vetro può apparire, visto dall'esterno, come una superficie specchiante. La riflessione è dovuta al passaggio della radiazione luminosa attraverso una superficie tra due mezzi con indice di rifrazione diversi (aria-vetro e vetro-aria). La percentuale di luce riflessa dal vetro dipende dalla differenza di questi indici di rifrazione, dalle caratteristiche del vetro (rivestimento, colorazione, ecc.), ma soprattutto dall'angolo di incidenza della radiazione solare. Quando la luce in arrivo è perpendicolare a un vetro non rivestito esso riflette molto poco. Questa riflessione cresce man mano che l'angolo di incidenza aumenta, dapprima lentamente (fino a circa 45°) e poi drasticamente, fino ad un angolo di incidenza di circa 87° quando tutta la luce incidente viene riflessa. Questo angolo è identificato come l'angolo di *cut off*. Anche con un angolo di incidenza pari a 0° vi è una certa percentuale di radiazione riflessa per ogni superficie del vetro. Per un normale vetro questa riflessione è pari a circa il 4% del totale per ogni superficie. Dal momento che ogni lastra di vetro ha due

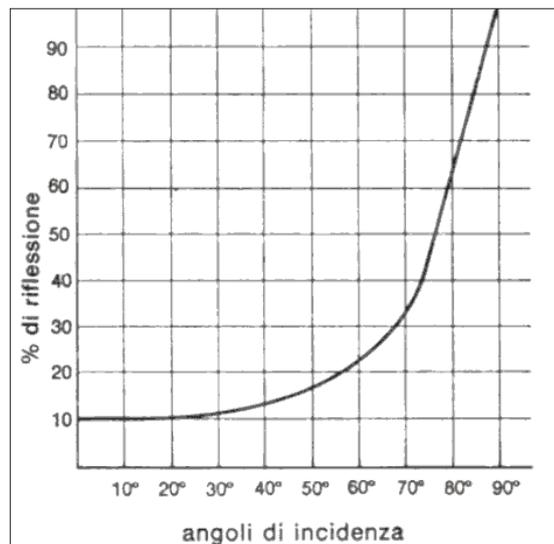
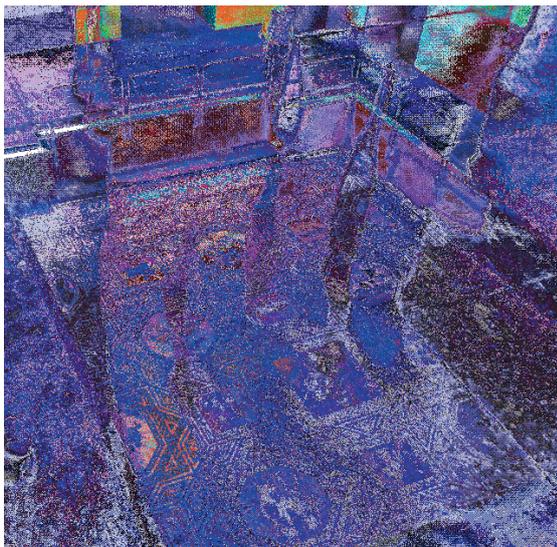


Fig. 13 - Riflessi sul vetro, Römisch-Germanisches Museum Köln, Colonia (Germania) (a) (foto A. Lanza Volpe); percentuale di riflessione del vetro al variare dell'angolo di incidenza della radiazione luminosa (b).

Fig. 13 - Reflections on the glass, Römisch-Germanisches Museum Köln, Cologne (Germany) (a) (photo A. Lanza Volpe); reflection percentage of the glass with the change in the angle of incidence of light radiation (b).

superfici riflettenti, una anteriore e una posteriore, verrà riflesso un minimo dell'8% della luce disponibile. La trasparenza può essere aumentata mediante la raffinazione relativamente costosa delle materie prime per eliminare le impurità, o attraverso *coating* anti - riflesso. Il vetro extra-chiaro è un esempio di un vetro altamente raffinato che può trasmettere il 99% della luce. A causa del suo costo è utilizzato in situazioni in cui la trasparenza è importante, come nella costruzione di collettori solari (Wasley & Utzinger, 2000). I *coating* anti - riflesso sono costituiti da rivestimenti realizzati con ossidi metallici applicati tramite *sputtering* su vetro float o altri substrati, su entrambe le facce della lastra e riducono il fattore di riflessione dall'8% di un vetro normale a meno dello 0,5%. Il *coating* è applicato in modo che il riflesso risulti praticamente invisibile per una visione a 90 gradi. In particolari condizioni di luce e angoli di visuale, si possono notare piccole differenze nella riflessione e piccoli effetti di luce. L'uso di questo trattamento, nato per scopi speciali come esigenze ottiche in prove di laboratorio, o per l'esposizione di opere d'arte, può essere vantaggioso al fine di ridurre la riflessione in tutti quei casi in cui le differenze tra le condizioni di luce esterne e interne sono tanto forti che risulta difficile vedere verso l'interno (Bonora, 2012).

- *Eccesso di luce diretta, abbagliamento*. La quantità di luce che arriva su un oggetto è correlata alla corretta conservazione e alle esigenze di una corretta fruizione e valorizzazione. L'eccesso di luce diretta può provocare danni ai reperti, soprattutto se si tratta di materiali altamente foto-sensibili, quali dipinti e affreschi. In generale, luce visibile, radiazioni UV e radiazione infrarossa possono causare danni. La scelta di vetri che limitano la trasmissione di tali radiazioni aiuterà nella riduzione di questo rischio. Il polivinilbutirrale (PVB) all'interno del vetro stratificato può schermare fino al 99% i raggi UV. Un vetro a controllo solare permetterà invece di limitare le componenti visibili e infrarosse. Per quanto riguarda

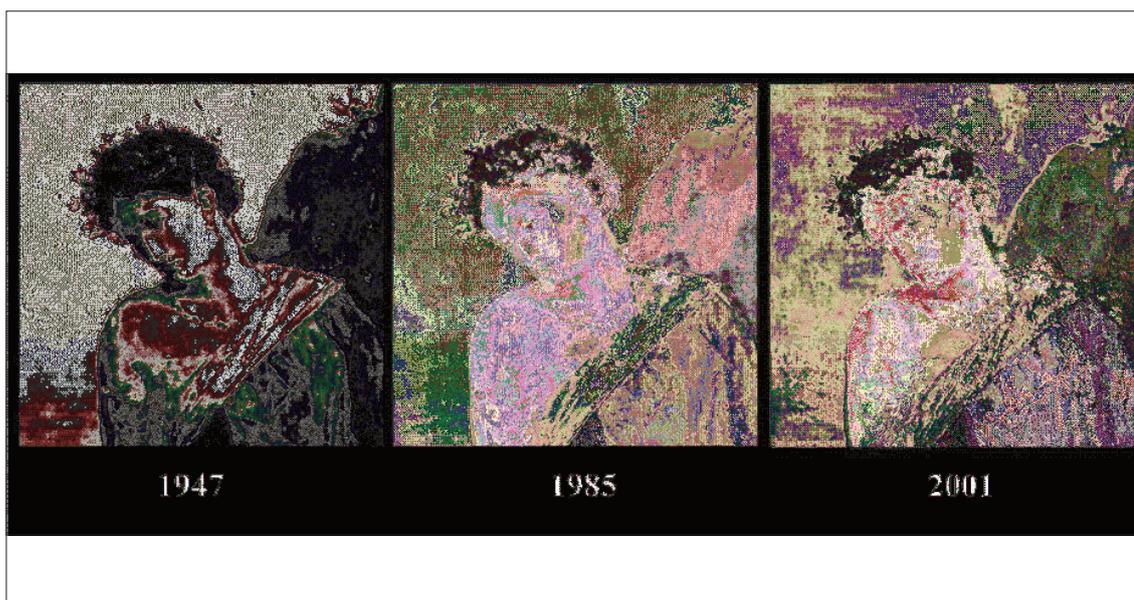


Fig. 14 - La ninfa, fotodegrado della pittura parietale, Villa Imperiale, Pompei (Italia).  
Fig. 14 - La ninfa, light degradation of wall painting, Imperial Villae, Pompei (Italy).

la fruizione, la luce è un elemento fondamentale, poiché mette in evidenza particolari altrimenti sfuggenti. Se le ampie superfici vetrate non sono controllate tramite ombreggiamento o corretto orientamento, la fruizione visiva degli spazi interni può risultare problematica a causa della trasmissione di luce eccessiva che può provocare effetti di abbagliamento e una sensazione di luce bianca che impedisce la visualizzazione di decorazioni e colori. Il basso angolo del sole estivo della mattina ad est e il basso angolo del sole invernale ad ovest possono risultare difficili da controllare senza l'uso di vetri a controllo solare, schermature o tende. La riduzione dell'abbagliamento può essere ottenuta attraverso il controllo della quantità di luce che passa attraverso il vetro, anche se va evidenziato che l'abbagliamento è una percezione individuale, variabile a seconda del soggetto. Per il controllo dell'abbagliamento occorre fare riferimento alla percentuale di trasmissione luminosa visibile ( $TL$ ). Più alto è questo valore più luminoso sarà l'interno e più elevato il livello di abbagliamento. Tipicamente un vetro chiaro di 3 mm ha un'alta trasmissione luminosa, pari al 90%; ciò significa che esso lascia passare il 90% della luce diurna. Come regola generale, i vetri con una trasmissione luminosa di circa il 70% o più bassa saranno d'aiuto nella riduzione dell'abbagliamento. Alcune situazioni possono richiedere il controllo dell'abbagliamento tramite schermature, tende o trattamenti del vetro stesso. I vetri colorati, i vetri serigrafati o i vetri rivestiti con *coating* possono agire da "filtro" che permette di ammorbidire la luce. Un'altra soluzione è costituita dalla protezione anti - abbagliamento; si tratta di un vetro trat-

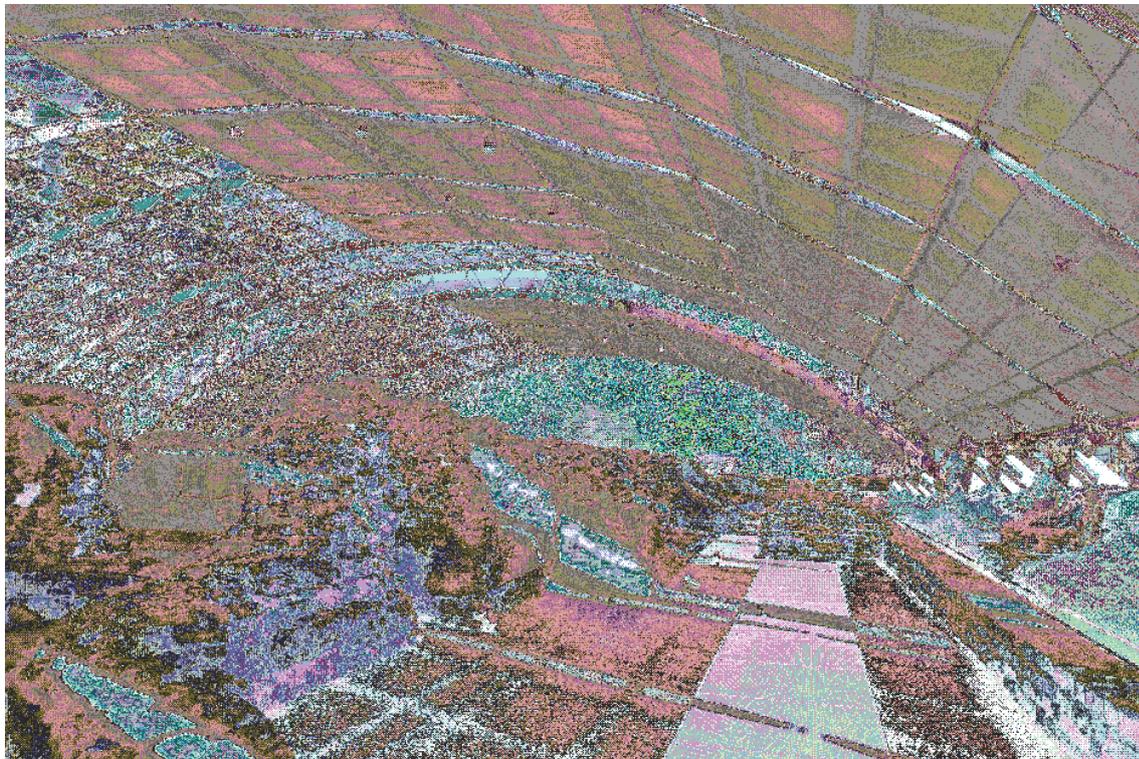


Fig. 15 - Sistema di ombreggiamento dei resti delle antiche terme romane, Badenweiler (Germania) (foto A. Lanza Volpe).

Fig. 15 - System of internal shading of the ancient Roman bath ruins, Badenweiler (Germany) (photo A. Lanza Volpe).

tato chimicamente in modo da ottenere una superficie con una trama leggermente ruvida che distribuisce la luce diretta sulla propria superficie, permettendo di affievolirla. Nel caso di luce naturale diffusa si può evidenziare invece un ulteriore problema: l'alterazione dei rapporti tra le differenti componenti cromatiche della luce entrante che può conferire ai reperti un aspetto opaco, privo di contrasti. Per quanto riguarda la luce diffusa, un parametro da considerare è l'indice di resa dei colori che misura quanto il colore degli oggetti possa essere percepito correttamente. L'indice generale di resa dei colori  $Ra$  di un vetro dà una misura della naturalezza dei colori assunti dagli oggetti illuminati attraverso la superficie vetrata. Vetri con  $Ra > 90$  vengono definiti ottimi per la resa del colore, vetri con  $Ra > 80$  buoni.

È inoltre possibile utilizzare schermature regolabili con sensori. Le protezioni andrebbero collocate all'esterno per evitare che si crei effetto serra all'interno. Ad esempio, le tende interne introducono una serie di problemi: scaldandosi generano moti convettivi, oltre a favorire lo sviluppo di batteri. Un altro problema da valutare nella progettazione di coperture vetrate è costituito dalle ombre causate dalle strutture portanti in presenza di cielo sereno che possono creare proiezioni sui pavimenti (Fig. 16).

- *Disagi climatici e dispersioni termiche.* Il vetro è un elemento che espone l'ambiente confinato, in misura maggiore degli elementi opachi costituenti l'involucro edilizio, ai disagi climatici esterni causati sia dalle fredde temperature invernali sia dal surriscaldamento

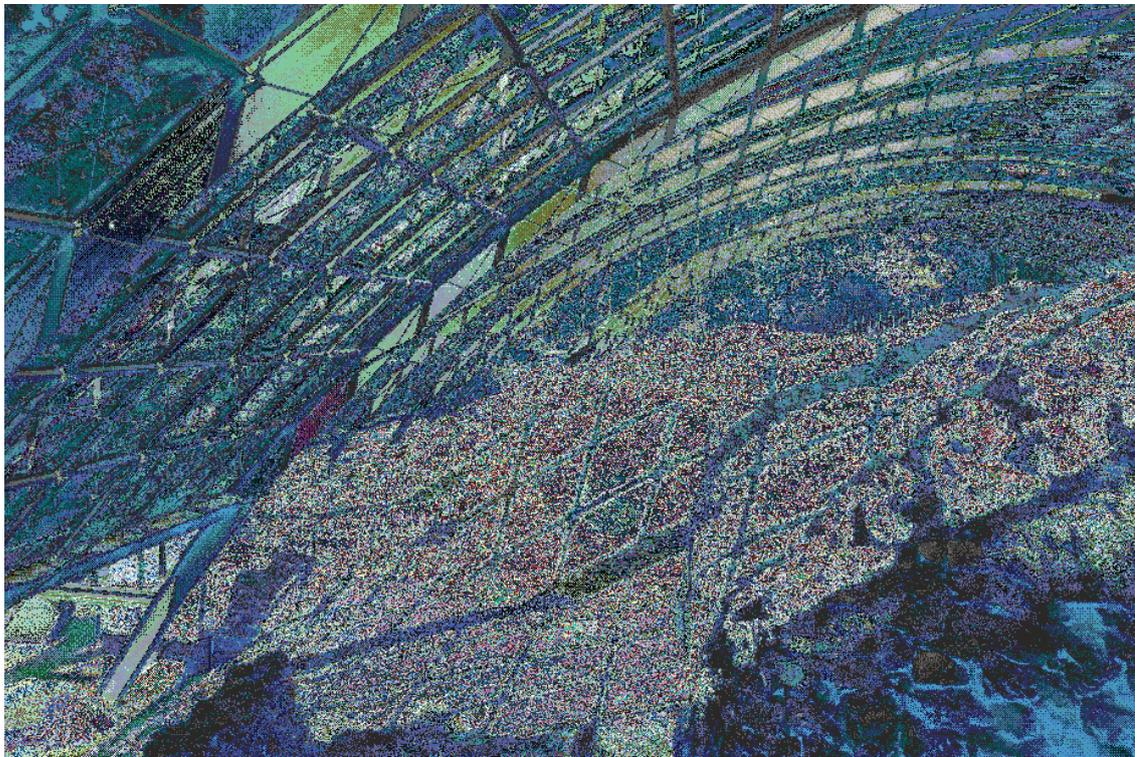


Fig. 16 - Ombre causate dalle strutture in presenza di cielo sereno che creano proiezioni sui resti delle antiche terme romane, Badenweiler (Germania) (foto A. Lanza Volpe).

Fig. 16 - Shadows caused by structures in case of clear sky that create projections on the ancient Roman bath ruins, Badenweiler (Germany) (photo A. Lanza Volpe).

estivo. In estate, un problema è costituito dall'effetto serra. Il materiale trasparente permette alle onde corte di passare attraverso la struttura protettiva; la radiazione colpisce gli interni e viene assorbita; le onde riemesse causano un aumento della temperatura, l'effetto serra, che può provocare danni ai reperti. L'antica struttura di protezione in *perspex* realizzata negli anni '70 a Piazza Armerina (Barbera, 2007) è un riferimento significativo per i problemi di conservazione causati da effetto serra. Vetri specifici a controllo solare e soprattutto le aperture per la ventilazione naturale permettono di ridurre gli effetti del guadagno di calore. In inverno, anche se il vetro può fornire benefici permettendo di riscaldare l'interno in modo naturale, il cattivo isolamento permette una maggiore dissipazione del calore rispetto ad altri materiali da costruzione. Per limitare le dispersioni termiche si può intervenire con l'uso di vetrocamera o con un rivestimento basso – emissivo; per limitare i disagi climatici dovuti al calore si può anche intervenire con l'uso di vetri a controllo solare o selettivi (Paoletta & Minucci, 2004). Nei periodi caldi il mantenimento della ventilazione degli ambienti vetrati è fondamentale.

- *Condensa*. Le superfici vetrate sono più fredde di altre superfici e quindi più inclini a condensazione. La condensa di umidità atmosferica sulla superficie interna del vetro può avvenire quando la temperatura del punto di rugiada dell'aria a contatto col vetro supera la temperatura superficiale del vetro stesso. La condensazione sulle superfici vetrate può essere osservata ad esempio in inverno, quando si verifica che la temperatura della superficie interna del vetro va sotto il punto di rugiada dell'aria. La temperatura superficiale del vetro dipende dalla trasmissione termica del vetro, dalla temperatura dell'aria interna e dalla temperatura dell'aria esterna. Il punto di rugiada è determinato da temperatura e umidità relativa dell'aria interna. L'inizio della condensazione sulla superficie interna del vetro può essere controllato sia riducendo l'umidità interna, e conseguentemente abbassando il punto di rugiada, attraverso una adeguata ventilazione, o alzando la temperatura della superficie interna della vetrata. La seconda soluzione può essere ottenuta aumentando l'isolamento termico della vetrata, per esempio tramite l'utilizzo di una vetrata isolante che incorpori un

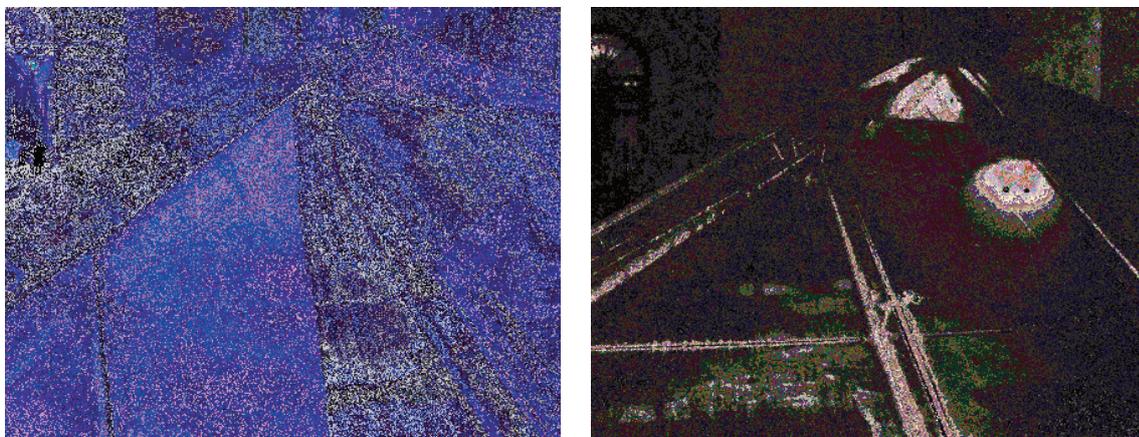


Fig. 17 - Condensa sul vetro, copertura dei mosaici, cattedrale paleocristiana, Torino (Italia) (a); vista notturna (b).  
 Fig. 17 - Condensation on the glass, cover of the mosaics, early Christian cathedral, Torino (Italy) (a); night view (b) (photo A. Lanza Volpe).

vetro basso emissivo. Esistono inoltre vetri riscaldanti costituiti da un doppio vetro con interposte due pellicole di PVB che contengono fili elettrici per la produzione di energia termica. Tale sistema è adatto quando vi è una forte umidità relativa nell'ambiente e differenze termiche elevate tra le due facce del vetro, in quanto mantiene la temperatura costante ed elimina la condensa, il vapore, la brina e la neve. La condensa può verificarsi anche all'esterno di vetrate in climi caldi e umidi dove la temperatura ambiente all'interno (attraverso condizionamento) è inferiore alla temperatura esterna e in tutti quei casi in cui la temperatura della superficie esterna risulta più bassa rispetto a quella del punto di rugiada dell'aria. La combinazione di questi fattori è estremamente difficile da prevedere ed è quindi impossibile quantificare il numero di occasioni in cui il fenomeno si può presentare; in generale, esso è relativamente raro.

- *Perdita di trasparenza e manutenzione.* Un classico problema derivante dall'uso del vetro è quello di riuscire a mantenere le proprietà ottiche ed estetiche del materiale senza generare un'attività di manutenzione onerosa che può arrivare ad assumere dimensioni consistenti con elevati gradi di complessità nel caso di vaste superfici. Nella progettazione delle coperture vetrate è importante garantire un razionale metodo di costruzione e analogamente dovrà essere progettato anche l'aspetto della gestione e della manutenzione. Polvere e sporco accumulati sulla superficie vetrata possono indebolire il collegamento visivo tra l'esterno e gli spazi interni, trasformando la copertura trasparente in una copertura traslucida (Fig. 18). Risulta quindi fondamentale considerare un'adeguata pulizia delle superfici vetrate già in fase di progettazione prevedendo eventualmente la pulizia mediante slitte o robot. Anche la progettazione della conformazione e dell'inclinazione della copertura possono essere tali da evitare l'accumulo di polvere e da permettere una facile pulizia. Le liste di copertura perpendicolari alla direzione di scorrimento dell'acqua dovrebbero essere appiattite a monte in modo che l'angolo risultante non consenta la formazione di alcun ristagno nella zona superiore. I fissaggi per punti non portano invece a un effetto barriera. Una pendenza di 3-5° permette all'acqua piovana di scorrere con un minimo effetto pulente anche

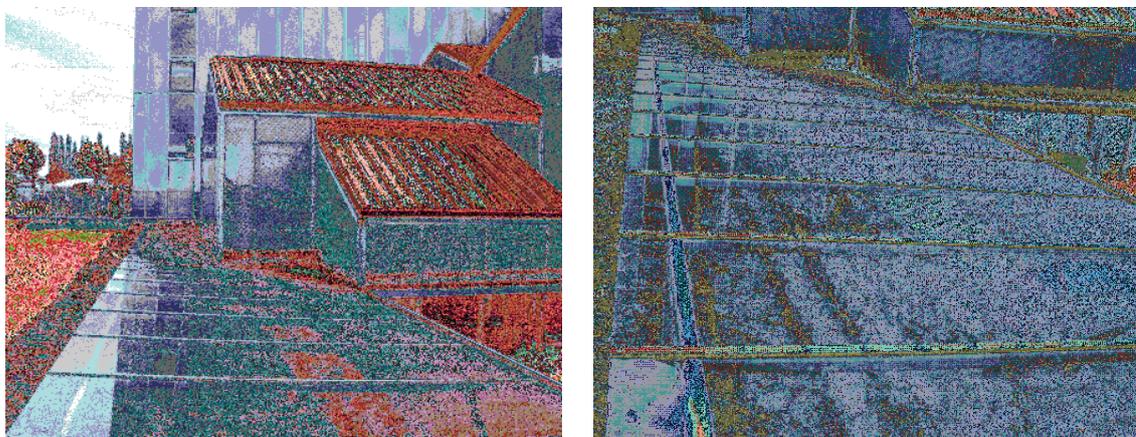


Fig. 18 - Sporco accumulato su copertura in vetro con scarsa inclinazione, Parco archeologico di Xanten (Germania).  
Fig. 18 - Dirt accumulated on glass slightly inclined cover, Archeologisch Park Xanten (Germany) (photo A. Lanza Volpe).

se sulle lastre con un'inclinazione inferiore ai 10° non è in genere possibile garantire una sufficiente auto-pulizia: sulla superficie del vetro resta polvere e in autunno le foglie. Con la serigrafia o una superficie del vetro opaca che diffonde la luce è possibile ridurre l'impressione di vetro "sporco". È possibile migliorare notevolmente la situazione con lastre lavorate superficialmente con *coating* antipolvere, idrorepellenti o antistatici: i vetri auto-pulenti donano una nitida visuale, rimangono puliti più a lungo e necessitano quindi di poca manutenzione. A questo scopo è stato sviluppato un tipo di *coating* che riduce le necessità di pulizia continua causate dai depositi di smog e polveri e riduce l'effetto di distorsione ottica dovuta al contatto dell'acqua con il vetro. La superficie dei vetri viene rivestita con uno speciale deposito in grado di realizzare un doppio effetto foto catalitico e idrofilo. L'effetto fotocatalitico consiste nella reazione innescata tramite il *coating* dai raggi UV della radiazione solare attraverso la formazione di agenti ossidanti in grado di accelerare la decomposizione di materiale organico presente sulla superficie del vetro. L'effetto idrofilo consiste nella capacità del *coating* di essere più "scorrevole" consentendo all'acqua di scivolare via senza che vi si fermino gocce o rivoli e, quindi, di lavare uniformemente lo sporco decomposto. La combinazione di questi due effetti genera l'azione autopulente.

- *Vegetazione e parassiti*. Se l'ambiente risulta scarsamente ventilato, all'interno di strutture trasparenti è possibile che si creino elevati valori di temperatura e umidità, favorevoli allo sviluppo di vegetazione e all'attacco di parassiti. La luce che attraversa il vetro può rappresentare inoltre un importantissimo fattore favorente la crescita degli organismi fotosintetici (alghe, licheni, briofite, piante superiori, ecc.). Per evitare lo sviluppo di tali condizioni risulta di fondamentale importanza il progetto di una corretta ventilazione.

- *Adattabilità alle condizioni ambientali*. Un problema legato all'uso del vetro è dato dalla gestione della componente solare e dall'ottimizzazione della luce naturale all'interno degli ambienti nelle varie condizioni ambientali. Una regolazione delle condizioni è resa possibile o attraverso schermature o attraverso *coating* selettivi. Ognuno di questi sistemi risponde

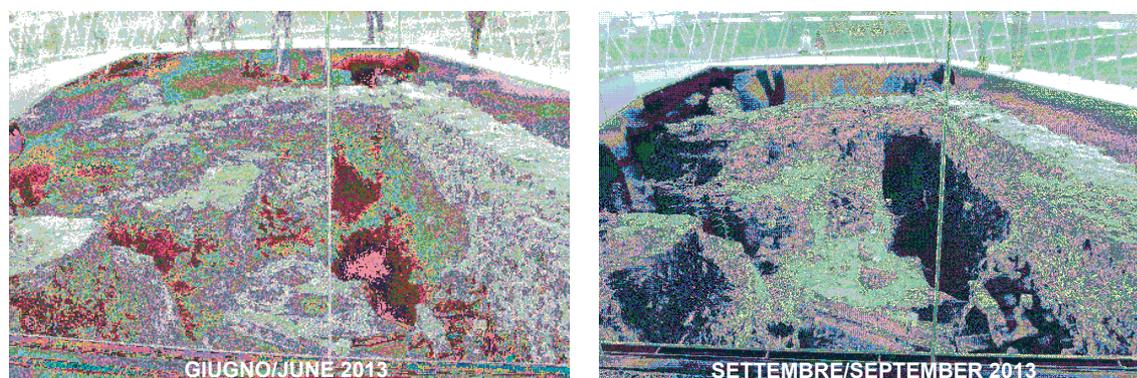


Fig. 19 - Vetrina archeologica Elisengarten, degrado biologico di reperti archeologici, Aachen (Germania) (foto A. Lanza Volpe).

Fig. 19 - Archaeological pavilion Elisengarten, biological degradation of archaeological finds, Aachen (Germany) (photo A. Lanza Volpe).

in modo diverso, supportando la progettazione della parte trasparente dell'involucro. La ricerca in questi anni ha inoltre sviluppato materiali complessi, dalle capacità dinamiche (Zacchei 2005-2007). Si tratta di prodotti ancora in fase di sperimentazione ma che costituiscono il futuro delle superfici vetrate. I vetri cromogenici (o *smart glass*) consentono di variare la colorazione del vetro e modificarne di conseguenza le caratteristiche luminose e solari. La transizione da uno stato chiaro a uno colorato, incluse le transizioni intermedie, può essere attivata da: impulsi elettrici, temperatura, radiazione solare. La tecnologia più avanzata è quella elettrocromica, già presente sul mercato dell'edilizia anche se con costi molti elevati (Compagno, 2002).

- *Impatto visivo – differenziale tecnologico*. L'impatto estetico della struttura può rischiare di prendere il sopravvento (Accardi, 2008). Il vetro di sicurezza è commercialmente disponibile in grandi lastre, ciò permette la realizzazione di coperture nella quali la parte strutturale di sostegno è poco invasiva.

- *Travisamento dell'atmosfera*. I siti archeologici sono spesso luoghi che in passato si trovavano al chiuso. Occorre sottolineare che una copertura completamente trasparente non evoca spazi interni coerentemente con le rovine esposte (Ruggieri Tricoli, 2007).

### 8.5. Protezione dalle radiazioni fornita dal vetro

I diversi materiali costituenti i siti archeologici hanno comportamenti diversi sotto l'esposizione alle radiazioni (v. Capitolo 6). Tutte le sorgenti di luce, oltre a emettere radiazione visibile, emettono anche radiazione ultravioletta e infrarossa (Fig. 21); dunque non soltanto le radiazioni solari, ma anche l'illuminazione artificiale interna può causare danni sui reperti.

Dal momento che ogni radiazione è portatrice di energia, nessun metodo è in grado di proteggere gli oggetti in modo assoluto, tranne quello di disporli lontano da luce, a bassa temperatura e al riparo da condizioni atmosferiche aggressive. In generale, il danno da radiazione può essere causato da radiazioni ultraviolette e, in misura minore, dalla luce visi-

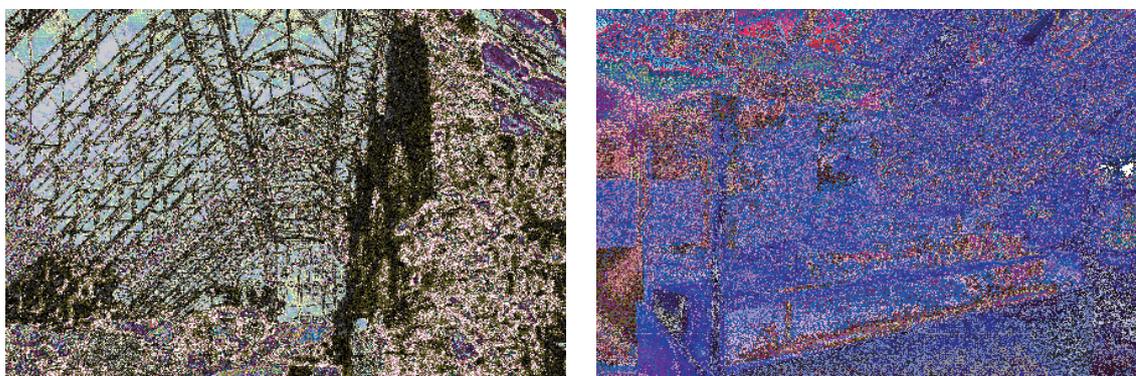


Fig. 20 - Copertura dei resti dell'antica Cattedrale di Hamar (Norvegia) (a); Plastico delle antiche terme romane - riconfigurazione, Badenweiler (Germania) (b) (foto A. Lanza Volpe).

Fig. 20 - Cover of the remains of the ancient Cathedral at Hamar (Norway) (a); Scale model of the ancient Roman bath ruins - reconfiguration, Badenweiler (Germany) (photo A. Lanza Volpe).

bile a onda corta (viola e blu). L'assorbimento della radiazione solare da parte delle superfici determina inoltre un rialzo della temperatura che favorisce i processi di degrado. Per proteggere l'opera dal danno dovuto all'illuminazione occorre eliminare la radiazione proveniente dalle sorgenti (naturali o artificiali) nello spettro ultravioletto e infrarosso, in quanto queste radiazioni non sono utili per la visione. Il vetro può essere usato per controllare la maggior parte dei tipi di radiazioni.

### *- Protezione dalle radiazioni UV*

Alcuni tipi di vetro proteggono dalla radiazione UV anche se nessun prodotto darà un protezione completa: le radiazioni ultraviolette possono essere bloccate quasi del tutto attraverso l'uso di vetri stratificati con *PVB* che trasmettono solo lo 04% degli UV. Anche il vetro colorato e il vetro con *coating* offrono una discreta protezione dai raggi UV. Il fattore di trasmissione UV e il fattore di danno che riguarda la trasmissione della radiazione di lunghezze d'onda nell'intervallo da 300 nm a 600 nm, cioè quegli oggetti che tendono a scolorire, possono essere utilizzati per quantificare il livello di protezione.

### *- Controllo della luce*

Il vetro permette livelli di trasmissione della luce che variano tra una percentuale molto bassa (che riducono l'abbagliamento) e il 90%, che può essere raggiunto per il vetro extra chiaro. Inoltre, a seconda del tipo di rivestimento o di vetro usato, questi livelli di trasmissione della luce possono essere combinati con più o meno equivalenti livelli di fattore solare (bassa selettività) o con fattori solari più bassi per più alte prestazioni (alta selettività). La selettività, data dal rapporto fra trasmissione luminosa e fattore solare, è un valore compreso tra zero e due: lo zero si ha con un vetro opaco che ha un livello di trasmissione luminosa nullo; un valore pari a due dà la migliore selettività possibile, poiché la luce rappresenta circa il 50% dello spettro solare. Più il valore è vicino a due, più selettiva sarà la vetratura. La radiazione luminosa può essere controllata usando vetri colorati, serigrafati, rivestiti con coating o traslucidi o anche integrando sistemi di schermatura oscuranti interni o esterni, fissi o mobili.

### *- Protezione dalla radiazione infrarossa a onde corte e dal calore*

Con grandi superfici vetrate il sole può provocare eccessivo calore all'interno di ambienti. Le radiazioni entrano negli ambienti tramite trasmissione diretta o indiretta dopo essere state assorbite dal vetro. Questa radiazione solare entrante raggiunge pareti, pavimenti e oggetti, che in parte la assorbono e si riscaldano, rilasciando poi calore sotto forma di radiazione termica infrarossa con lunghezza d'onda superiore a 2.500 nm (radiazione infrarossa a onda lunga). Tuttavia, molta di questa radiazione ad alta lunghezza d'onda è respinta dal vetro verso l'interno. Questo fa sì che la temperatura all'interno dell'ambiente aumenti gradualmente, causando il cosiddetto effetto serra, auspicabile durante i periodi freddi ma non nei periodi caldi. Il vetro a controllo solare è caratterizzato da un adeguato

fattore solare; esso fornisce protezione contro la radiazione infrarossa a onda corta e dal calore in generale. Un vetro colorato o un vetro con *coating* a controllo solare con un basso fattore solare limitano il passaggio di calore diminuendo il surriscaldamento. Il basso fattore solare dei vetri deve comunque essere accompagnato da una buona ventilazione degli ambienti che permetta di non accumulare calore. La scelta del tipo di vetro dovrebbe anche tenere conto dei requisiti di isolamento termico, caratterizzati da una bassa trasmittanza, in modo da diminuire il trasferimento di calore dall'esterno verso l'interno. Il vetrocamera limita il passaggio di calore grazie allo spazio isolante di aria o gas tra le lastre. L'applicazione di rivestimenti di vetro rappresenta un ulteriore passo in avanti nella qualità dell'isolamento termico. La quantità di flusso solare dipenderà anche dall'esposizione della superficie vetrata, con apporti maggiori attraverso la copertura e le esposizioni est ed ovest.

- *Controllo della radiazione infrarossa a onde lunghe*

Il controllo dalle radiazioni infrarosse a onde lunghe riguarda la possibilità di prevenire in inverno la dispersione del calore emesso dagli oggetti all'interno dell'ambiente vetrato e in estate l'ingresso del calore emesso dagli oggetti che si trovano all'esterno. Per controllare la radiazione infrarossa a onde lunghe viene utilizzato il vetro basso emissivo con *coating* e facce di applicazione differenti per diverse condizioni climatiche. Questi rivestimenti sono in generale magnetronici se assemblati all'interno di vetrocamera, oppure pirolitici, con un rendimento leggermente inferiore, ma applicabili anche su vetri monolitici.

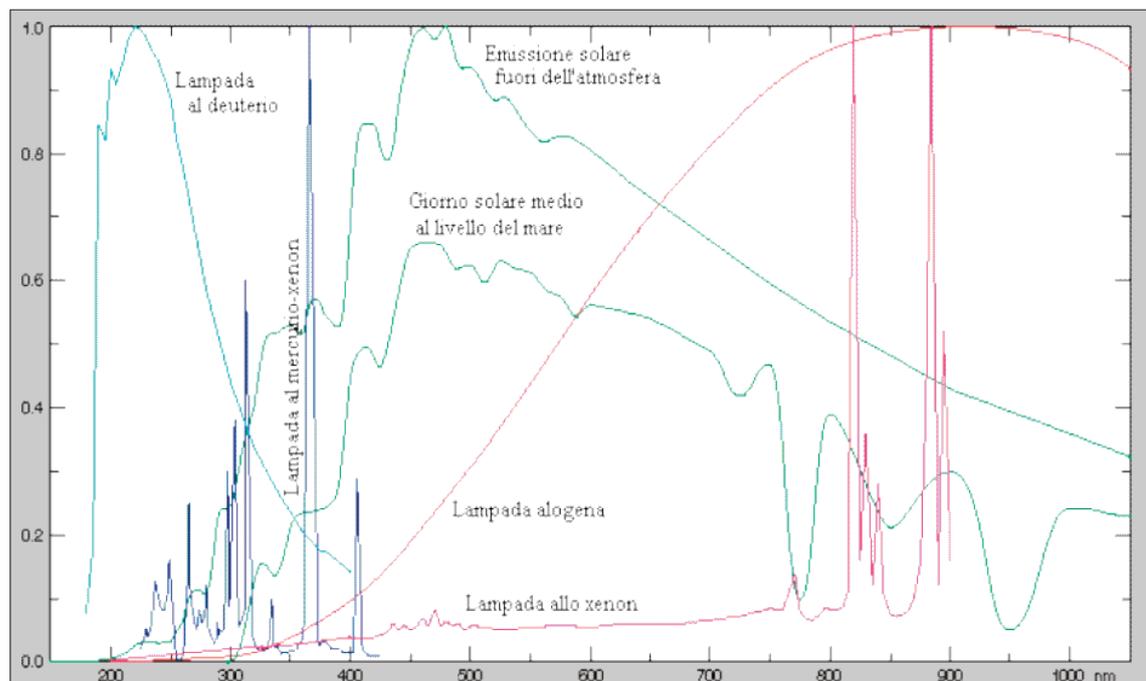


Fig. 21 - Spettro di emissione di diversi tipi di illuminazione.  
 Fig. 21 - Emission spectrum of different types of lighting.

## 8.6. Conclusioni

I reperti archeologici e gli antichi manufatti sono inevitabilmente esposti al fenomeno del degrado, in relazione al carattere instabile dei materiali che li costituiscono. Il degrado avviene in modo naturale e progressivo con l'invecchiamento dell'oggetto e l'alterazione delle sue proprietà chimico-fisiche. È noto, però, che condizioni microclimatiche non idonee e procedure di gestione non corrette possono accelerarne i processi e portare, nel lungo periodo, alla perdita dei beni conservati (Lanza Volpe, 2012). L'evoluzione tecnologica del vetro ha favorito la realizzazione di numerose coperture vetrate con diverse finalità: protezione dagli agenti atmosferici (pioggia, vento, gelo, ecc.) e dall'azione umana (atti vandalici), valorizzazione e migliore fruizione dei siti (Tricoli, 2011). L'impatto delle opere di protezione sui siti archeologici non sempre è un beneficio ed è quindi utile definire una metodologia scientifica per la progettazione. In particolare, l'uso di un materiale trasparente come il vetro rappresenta un ambito molto complesso poiché pone problematiche maggiori rispetto alla scelta di un involucro opaco. La ricerca sviluppa le linee guida e le procedure di progettazione che tengono conto delle caratteristiche ambientali dei siti archeologici. Si auspica che possa aiutare gli operatori nel valutare i requisiti delle coperture nelle diverse zone climatiche e che possa costituire base empirica per le strategie future in materia di protezione dei contesti storici. Occorre però sottolineare che nella gestione del microclima non è possibile applicare schemi standardizzati, in quanto nel settore della conservazione si ha a che fare con materiali che richiedono condizioni climatiche non standard, per cui la progettazione, le prestazioni

## 8.6. Conclusions

*Archaeological and historical artifacts are inevitably exposed to degradation, because of the unstable nature of the materials that constitute them. Degradation is mainly due to natural processes and advances in tandem with the age of the object and with the alterations in its physical-chemical properties. However, inadequate micro-climatic conditions and incorrect management can speed up the process and result, in the long term, in the loss of the conserved artifacts (Lanza Volpe, 2012). The technological evolution of glass has favored the construction of many glass covering structures with various objectives: protection against the weather (rain, wind, frost, etc.) and human action (vandalism), as well as enhancement and better exploitation of the sites (Tricoli, 2011). The impact of protective structures on archaeological sites is not always beneficial and it is therefore useful to outline a scientific methodology for design. In particular, the use of transparent materials such as glass represents a very complex issue, since it raises more problems than that of an opaque envelope. The research develops guidelines and design procedures that take into account the environmental characteristics of archaeological sites. It is hoped that these will help practitioners in assessing requirements for covering structures in the various climatic regions and create an empirical base for future strategies in the preservation of historical contexts. However, it is not possible to apply standardized schemes in the management of microclimate, as the materials require non-standard weather conditions in the field of conservation. Design, performance and maintenance of covering*

e la manutenzione delle coperture saranno molto specifiche per ogni sito. Si sottolinea inoltre la necessità, nella prima fase della progettazione di tali strutture, di destinare una parte considerevole del *budget* a una manutenzione continua e ad eventuali modifiche necessarie (Aslan, 1997). Per quanto riguarda le condizioni microclimatiche che si determinano all'interno delle coperture vetrate, come afferma il Dott. Ing. Lieb, *building professional*, consulente e specialista di fisica delle costruzioni e del clima, «Prima di tutto è necessario comprendere che ci sarà sempre una parte dello spazio interno sotto la copertura che avrà temperature più elevate dell'esterno». Quindi è ragionevole localizzare tale spazio al di fuori della portata degli utenti e, nel caso di coperture archeologiche, lontano dai reperti. «(...) Pertanto, può essere considerata adeguata qualsiasi tipo di copertura che permetta all'aria riscaldata di raccogliersi lontano dagli spazi utilizzati. Se tali parametri non possono essere accettati è anche possibile che soltanto la ventilazione meccanica permetta di raggiungere le condizioni volute e ugualmente se devono essere assicurate temperature inferiori a quelle esterne. Bisogna tuttavia sottolineare che per quanto riguarda gli utenti sono importanti le temperature percepite e che un'ombreggiatura appropriata dello spazio così come una migliore ventilazione naturale o meccanica diminuiranno tale temperatura percepita» (Lieb, 2012).

*structures are very specific to each site. In the initial design phase of these structures, an emphasis should be laid on the need to set aside a considerable part of the budget for continuous maintenance and for possible necessary changes (Aslan, 1997). Regarding the microclimate within the glass enclosures, in the words of Lieb, a construction expert, consultant and specialist in building, physics and climate, «First of all it is necessary to understand that there will always be some part of the inner space underneath the roof, that needs to have higher temperatures than on the outside». Thus it makes sense to locate such a space outside the reach of users and, in the case of archaeological covering structures, far from the remains. «Therefore any roof type that allows for heated air to collect away from used spaces will be helpful. If such parameters in architecture cannot be met it is quite possible that only mechanical ventilation will still be able to achieve comfort conditions. The same is true if temperatures below external temperatures are required. It should be mentioned however that perceived temperatures are mostly requested by users and that appropriate shading of the space will decrease the perceived temperature as well as providing a better natural or mechanical ventilation» (Lieb, 2012).*

### Riferimenti bibliografici - References

- Accardi, A. R. D. 2008. *Architectures "on ruins" and ambiguous transparency: The glass in preservation and communication of archaeology*, "Journal of Cultural Heritage", 9.
- Aslan, Z., 1997. *Protective Structures for the Conservation and Presentation of Archaeological Site*, "Journal of Conservation and Museum Studies", 3:16-20, DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jcms.3974>
- Barbera, P. 2007. *Architettura-archeologia. Dibattiti e progetti per la Villa del Casale a Piazza Armerina*, "d'Architettura", 33, pp. 114-121.
- Bernardi, A. 2004. *Conservare opere d'arte - Il microclima negli ambienti museali*, Padova, Il prato.
- D. M. 10 Maggio 2001, Ministero per i Beni e le Attività Culturali, *Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei (art. 150, comma 6, D.L. n. 112/1998)*, G.U. 19 ottobre 2001, n. 244, S.O.
- Bonora, M. 2012. *150 pagine di vetro per l'architettura*, Ferrara, Edizioni Cartografica.
- Brivio, S. F. 2010. *Schermature solari e tende tecniche - Metodi e soluzioni di progetto, tipologie, risparmio energetico*, Milano, Gruppo24Ore.
- Camuffo, D. 1998. *Microclimate for Cultural Heritage*, Amsterdam, Elsevier.
- Carmody, J., Selkowitz, S., Lee, E., Arasteh, D. & Willmert, T. 2004. *Window Systems for High Performance Buildings*, New York, Norton & Company.
- Carmody, J., Selkowitz, S., Arasteh, D., & Heschong, L. 2007. *Residential Windows: A Guide to New Technology and Energy Performance*, New York, Norton & Company.
- Ceccherini Nelli, L., D'Audino, E., Trombadore, A., Sala, M. (a cura di). 2007. *Schermature solari*, Firenze, Alinea.
- Compagno, A. 2002. *Intelligent Glass Facades*, Berlin, Birkhäuser.
- D'Agostino, V. 2002/2005. *Condizioni microclimatiche e di qualità dell'aria negli ambienti museali*, Tesi di Dottorato in Conservazione integrata dei Beni Culturali ed Ambientali, XVIII Ciclo, Università degli Studi di Napoli Federico II.
- Daneo, A. & D'Este, A. 2009. *Considerazioni controintuitive sull'isolamento termico dei vetrocamera con gas*, Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro, 39 (1): 13-17.
- Loughran, P., 2003. *Falling Glass: Problems and Solutions in Contemporary Architecture*, Boston, Birkhauser - Publishers for Architecture.
- Lanza Volpe, A. 2012. *Application of natural ventilation to archaeological sites with glass covers*, IN – VENTO, XXII Convegno Nazionale di Ingegneria del Vento, ANIV, Venezia, 7-10 Ottobre 2012 (in corso di pubblicazione).
- Lanza Volpe, A. 2013. *Transparent and sustainable materials*, Bártoło, H. et al., "Green Design, Materials and Manufacturing Processes", Proceedings of the 2nd international conference on sustainable intelligent manufacturing, Lisbon, Portugal, June 26-29, 2013, CRC Press/Balkema - Taylor & Francis Group, London, 559-562.
- Lieb R. D. 2010. *Freie Durchströmung großer Glashallen*, Universität Stuttgart - IGE Institut für GebäudeEnergetik, N. 20, Stuttgart.
- Lieb R. D. 2012. *An easy approach to calculate natural ventilation and get an adapted design*, IN – VENTO, XXII Convegno Nazionale di Ingegneria del Vento, ANIV, Venezia, 7-10 Ottobre 2012 (in corso di pubblicazione).
- Matteini, M. 2010. *Tecnologie per i Beni Culturali*, Arkos – Scienza e Restauro, V. 23, Aprile - Giugno 2010.
- McCluney, R. & Jindra, P. 2000. *Industry Guide to Selecting the Best Residential Window Options for the Florida Climate*, Cocoa, Florida Solar Energy Center - University of Central Florida.
- Ossani, I. 2001. *Salvaguardare, per conservare, i reperti museali che risentono delle modificazioni climatiche del-*

*l'ambiente in cui sono collocati*, Museo Informa: notiziario del Sistema Museale, 10.

Palmerio, G., Di Muzio, A. 2007. *Strutture protettive in archeologia*, Carbonara, G., "Restauro architettonico e impianti", IX, Torino, Utet, pp. 402-487.

Paoletta, A., Minucci, R. (ed.) 2004. *L'efficienza energetica degli edifici. L'uso del vetro per la riduzione degli effetti negativi derivanti dai mutamenti climatici*, Roma, Edicomprint.

Paoletti, I. & Romano, M. G. 2010. *Transparent roofing. History and technologies*, Frames, 146: 108-113.

Pfrommer, P., Lomas, K. J., Seale, C., & Kupke, C. 1995. *The radiation transfer through coated and tinted glazing*, Solar Energy, 54(5), 287-299.

Rogora, A. 2005. *La progettazione preliminare dell'edificio*, in Grosso, M. Peretti, G., Spiardi, S., Scudo, G. (a cura di), "Progettazione ecocompatibile dell'architettura", Napoli, Esselibri Simone.

Ruggieri Tricoli, M. C. 2007. *Musei sulle rovine. Architetture nel contesto archeologico*, Milano, Lybra.

Schittich, C., Staib, G., Balkow, D., Schuler, M., Sobek, W., 1999. *Glass Construction Manual*, Basel, Birkhäuser.

Tricoli, A., 2011. *La città nascosta. Esperienze e metodi per la valorizzazione del patrimonio archeologico urbano*, Palermo, Offset.

Wasley, J. H. & Utzinger, M. 2000. *Vital Signs: Glazing Performance*. Johnson Controls Institute for Environmental Quality in Architecture, School of Architecture and Urban Planning, University of Wisconsin-Milwaukee.

## BIBLIOGRAFIA/ REFERENCES

- AA. VV., Istituto per i beni artistici culturali e naturali della regione Emilia-Romagna, Isac-Consiglio nazionale delle ricerche (a cura di) 2007. *Materiali e ricerche - Oggetti nel tempo. Principi e tecniche di conservazione preventiva*, Bologna, Clueb.
- AA. VV. 2007. *Il vetro, Manuale tecnico*, Saint Gobain, edito a cura della Direzione Commerciale SGS.
- AA. VV. 1971. *La lumière et la protection des objets et specimens exposés dans les musées et galeries d'art*, Parigi, ICOM AFE.
- Aghemo, C., Filippi, M., Prato, E. 1994. *Condizioni Ambientali per la Conservazione dei Beni di Interesse Storico Artistico*, Torino, Comitato Giorgio Rota.
- Alagna, A. 2000. *La riqualificazione tecnologica per la qualità ambientale: l'involucro edilizio*, D.P.C.E. Università degli Studi di Palermo.
- Accardi, A. R. D. 2008. *Architectures "on ruins" and ambiguous transparency: The glass in preservation and communication of archaeology*, "Journal of Cultural Heritage", 9.
- Accardo, G., Gianni, E., Seccaroni, C., 1995. *Evoluzione della modellistica di vetrine per la conservazione di manufatti artistici*, "Materiali e Strutture: problemi di conservazione", 3, pp. 115-126.
- Allard, F. 2002. *Natural ventilation in building, a design handbook*, London, James & James.
- Altomonte, S., 2004. *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica - strumenti e criteri per un'architettura sostenibile*, Firenze, Alinea.
- Amendolea, B. 1996. *I siti archeologici, un problema di musealizzazione all'aperto*, "Atti del Secondo Seminario di Studi", Roma.
- Andersen, K. T. 1995. *Natural ventilation in atria*, Vol. 101, USA, ASHRAE Transactions.
- Anderson, J. 1995. *Computational Fluid Dynamics: the basics with applications*, USA, McGraw Hill.
- ASHRAE, 2005. *Energy estimating and modeling methods*, "ASHRAE Handbook 2005 - Fundamentals (SI)", 32.
- Aramini, F. 1998. *Illuminazione e microclima. Materiali per l'aggiornamento nel restauro*, ICR, Roma, Edizioni De Luca.
- Arasteh, D. 1995. *Advances in Window Technology*, Lawrence Berkeley National Laboratory Report No:LBL-36891.
- Ashurst, J. 2007. *Conservation of Ruins*, Burlington, Elsevier.
- Aslan, Z. 1997. *Protective Structures for the Conservation and Presentation of Archaeological Site*, "Journal of Conservation and Museum Studies", 3:16-20, DOI: <http://dx.doi.org/10.5334/jcms.3974>
- Aramini, F. 1998. *Illuminazione e microclima. Materiali per l'aggiornamento nel restauro*, ICR, Roma, Edizioni De Luca.
- Balocco, C., Farneti, F., Minutoli, G. 2009. *I sistemi di ventilazione naturale negli edifici storici. Palazzo Pitti a Firenze*

e Palazzo Marchese a Palermo, Firenze, Alinea.

Bano, V. 2008. *Trasparenze di sintesi. Applicazioni e linee di sviluppo dei materiali polimerici nel progetto di architettura*, Tesi di dottorato Ciclo XXI, Università degli Studi di Ferrara.

Barbera, P. 2007. *Architettura-archeologia. Dibattiti e progetti per la Villa del Casale a Piazza Armerina*, "d'Architettura", 33, pp. 114-121.

Bellini, A., (a cura di), 1994. *Tecniche della conservazione*, Milano, Franco Angeli.

Bellomo, M. 1999. *Materiali e tecnologie per le coperture in aree archeologiche: una riflessione sull'argomento*, in Marino L., Pietramellara, C., Nenci, C. (a cura di), "Tecniche edili Tradizionali", Firenze, Alinea, pp. 63-64.

Berducou, M. 1990. *La conservation en archéologie. Méthodes et pratique de la conservation-restauration des vestiges archéologiques*, Parigi, Masson.

Bernardi, A. 2004. *Conservare opere d'arte - Il microclima negli ambienti museali*, Padova, Il prato.

Bernardi, A. 1993. *Aspetti metodologici per il controllo del microclima nei musei: individuazione delle cause di alterazione e soluzioni possibili*, Atti del Convegno Ambiente, città e museo: esperienze italiane, Ferrara, pp. 35-48.

D. M. 10 Maggio 2001, Ministero per i Beni e le Attività Culturali, *Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei (art. 150, comma 6, D.L. n. 112/1998)*, G.U. 19 ottobre 2001, n. 244, S.O.

Bertolini, L. 2006. *Materiali da costruzione*, Vol. 2: Degrado, prevenzione, diagnosi, restauro, Milano, CittàStudi.

Binotto, M., Prof. Zecchin, R. (rel.), 2009-10, *Software di simulazione energetica degli edifici e loro validazione*, Tesi di Laurea - Università degli Studi di Padova.

Blandini, L., Froli, M., Lani, L. 2006. *Sviluppi recenti delle costruzioni in vetro strutturale e acciaio*, Costruzioni Metalliche, n.4.

Bonora, M. 2012. *150 pagine di vetro per l'architettura*, Ferrara, Edizioni Cartografica.

Bottigioni, S. Mingozzi, A. 2008. *Programmi di calcolo delle prestazioni energetiche degli edifici*, Bologna, Progetto BREA.

Brill, T.B. 1980. *Light, its interaction with art and antiquities*, New York, Plenum Press.

Brivio, S. F. 2010. *Schermature solari e tende tecniche - Metodi e soluzioni di progetto, tipologie, risparmio energetico*, Milano, Gruppo24Ore.

Bryn, I., Schiefloe, P. A. 1996. *Atrium Models for the Analysis of Thermal Comfort and Energy Use*, Task 12 – Building Energy Analysis and Design Tools for Solar Applications, Subtask A.3 – Atrium Model Development, IEA SHCP – International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Program, Trondheim, SINTEF Energy.

Cammarata, G. 2007. *Fisica tecnica - Elementi di impianti termotecnici*, 3, Università degli Studi di Catania.

Camuffo, D. 1998. *Microclimate for Cultural Heritage*, Amsterdam, Elsevier.

Camuffo, D. 1990. *Ambienti e Musei. Microclimatologia di ambienti chiusi e conservazione di opere pittoriche*, Atti dell'Accademia Nazionale dei Lincei, Giornata dell'Ambiente, 82, pp. 157– 166.

Camuffo, D., Bernardi, A., 1985. *Fattori microclimatici e conservazione dei beni artistici*, Brescia, Edizioni del laboratorio.

Caneva, G., Nugari, M. P., Salvadori, O. 2005. *Biodeterioramento e conservazione.*, "La biologia vegetale per i beni culturali", Vol I., Collana Arte e Restauro, Firenze, Nardini.

Cannaviello, M. 2010. *Prestazioni dell'involucro in regime estivo. Criteri per la riqualificazione energetica*, Firenze, Alinea.

Carbonara, G. 2001. *Trattato di Restauro Architettonico*, vol. I, V, VI e VII, Torino, Utet.

Carmody, J., Selkowitz, S., Lee, E., Arasteh, D. & Willmert, T. 2004. *Window Systems for High Performance Build-*

- dings*, New York:, Norton & Company.
- Carmody, J., Selkowitz, S., Arasteh, D., & Heschong, L. 2007. *Residential Windows: A Guide to New Technology and Energy Performance.*, New York, Norton & Company.
- Ceccherini Nelli, L., D'Audino, E., Trombadore, A., Sala, M. (a cura di). 2007. *Schermature solari*, Firenze, Alinea.
- CIE, Commision Internationale de l'Eclairage 2004. *CIE No. 157:2004 Control of damage to museum objects by optical radiation*, CIE Technical Collection.
- Clarke, J. A. 2001. *Energy Simulation in Building Design*, Oxford, Butterworth - Heinemann.
- Clerici, A., Sfratato, F. 2010. *La geologia nella pratica edilizia. Materiali lapidei: caratteristiche, attività estrattive, durabilità e processi di degrado*, Palermo, Flaccovio.
- Colajanni, S. De Vecchi, A., Lanza Volpe, A., 2008. *Roccia e vetro per una copertura trasparente*, "Interni&Musei 5, Prospettive per un museo archeologico: il caso di Modica" (a cura di Maria Clara Ruggieri e Aldo R. D. Accardi), Palermo, Offset Studio, pp. 41-47.
- Compagno, A. 2002. *Intelligent Glass Facades*, Berlin, Birkhäuser.
- Complesso Museale Santa Maria della Scala, 2010. *Conservazione preventiva e controllo microclimatico nel contesto degli standard museali*, Siena, Vanzi Industrie Grafiche.
- Conio, C. 1995. *La tecnologia della trasparenza*, Milano, Tecnomedia.
- Corrao, R., De Giovanni, G. 2009. *Trasparenza e leggerezza*, edA esempi Di Architettura, anno III, n. 6, Padova, Il Prato.
- Costanzo, M. 2008. *Sverre Fehn. Il museo di Hamar. Lund & Slatto. La Christal Cathedral*, «Hortus», rivista on-line del Dipartimento Architettura e Progetto - "Sapienza" Università di Roma, 13.
- Croce, S., Poli, T. 2013. *Transparency, Facciate in vetro tra architettura e sperimentazione*, Roma, Il Sole 24 ORE.
- Crous, J., Crous, G., Bubbico, G. 2004. *Vetro. Manuale completo*, Firenze, Giunti Editore.
- Cutnell, J. D., Johnson, K. W. 2010. *Elementi di fisica*, Bologna, Zanichelli.
- Cuttle, C. 1988. *Lighting works of art for exhibition and conservation*, "Lighting Research and Technology" 20(2), 43-53.
- Cuttle, C., Ne'eman, E. 1999. *Control of damage to museum objects by exposure to optical radiation*, Warsaw, CIE 24th Session.
- D'Agostino, V. 2002/2005. *Condizioni microclimatiche e di qualità dell'aria negli ambienti museali*, Tesi di Dottorato in Conservazione integrata dei Beni Culturali ed Ambientali, XVIII Ciclo, Università degli Studi di Napoli Federico II.
- D'Agostino, S., Cairoli Giuliani, F., Conforto M. L., Guidoboni, E. 2009. *Raccomandazioni per la redazione di progetti e l'esecuzione di interventi per la conservazione del costruito archeologico*, Napoli, Cuzzolin.
- Daneo, A., D'Este, A. 2009. *Considerazioni controintuitive sull'isolamento termico dei vetrocamera con gas*, Rivista della Stazione Sperimentale del Vetro, 39 (1): 13-17.
- Daneo, A., Falcone, R., Sommariva, G., Vallotto, M. 2001. *I film sottili (coating) su vetro: caratteristiche, materiali e metodologie di analisi*, "Rivista della Stazione sperimentale del vetro", 1, p. 6.
- De Giovanni, G. 2001. *Valorizzazione e fruizione dell'architettura ritrovata*, "Morgantina e Solunto. Analisi e problemi conservativi" (Sposito, A. (a cura di)), Palermo, Alloro, pp.109-113.
- De la Torre M. "The Conservation of Archaeological Sites in the Mediterranean Region - An International Conference Organized by the Getty Conservation Institute and the Paul Getty Museum", 6-1 2 May 1995, The Getty Conservation Institute, Los Angeles.
- Del Curto, D. (a cura di), 2011. *Ambiente interno e conservazione. Il controllo del clima nei musei e negli edifici storici*, Firenze, Nardini.
- Demas, M. 2001. *Annotated bibliography on protective shelters for archeological sites*, "Conservation and ma-

## BIBLIOGRAFIA

---

- nagement of Archeological sites”, 5 (1-2), pp. 91-105.
- De Ponte, S. 1996. *Architetture di luce: luminoso e sublime notturno nelle discipline progettuali e di produzione estetica*, Roma, Gangemi.
- De Santoli, L., Mariotti, M. 2011. *La ventilazione naturale. Il moto naturale dell'aria per il controllo delle condizioni ambientali*, Palermo, Flaccovio.
- Dezzi Bardeschi, C. 2008. *Archeologia e conservazione. Contributi per una storia*, Milano, Maggioli.
- Di Salvo, S. 2012. *Luce e colori sulle rovine. Strategie museografiche per la comunicazione dell'archeologia*, Roma, Aracne.
- Di Muzio, A. 2011. *Rovine protette. Conservazione e protezione delle testimonianze archeologiche*, Roma, L'Erma di Bretschneider.
- Doehne, E., Price, C. 2010. *Stone conservation: an overview of current research*, Los Angeles, Getty.
- D.M. 10/2201, Gazzetta Ufficiale n. 244 del 19 ottobre 2001.
- Erhardt, D., Tumosa, C. S., Mecklenburg, M. F. 2007. *Applying science to the question of museum climate*. “Museum Microclimates, National Museum of Denmark”, 11–18.
- European Commission, 1999. *A green Vitruvius: Principles, and Practice of Sustainable Architectural Design*, Directorate General XVII for Energy and Architect's Council of Europa, James and James Science Publishers.
- Fassina, V., Ott, H., Zezza, F. 1994. *Materiali lapidei e monumenti: metodologie per l'analisi del degrado e la conservazione*, atti del 3° Simposio internazionale, Soprintendenza ai Beni artistici e storici di Venezia, Venezia 22-25 giugno.
- Feller, R. L. 1994. *Accelerated Aging - Photochemical and thermal aspects*, The Getty Conservation Institute, Michigan.
- Fernandez, F. 2008. *Alterazione e degrado dei materiali lapidei naturali. Fenomeni, cause, riconoscimento e classificazione*, Trento, UNI Service.
- Fisichella, V. 2005. *La trasparenza in architettura*, “Architettura dettagliata. Note per una progettazione esecutiva”, (De Giovanni, G. (a cura di)), Padova, Il Prato.
- Franceschi, S., Germani, L. 2007. *Il degrado dei materiali nell'edilizia. Cause e valutazione delle patologie*, Roma, Dei.
- Frascarolo, M. (a cura di), 2011. *Manuale di progettazione Illuminotecnica*, Milano, Collana TecnoTipo.
- Frettoloso, C. 2010. *Dal consumo alla fruizione: tecnologie innovative per il patrimonio archeologico*, Firenze, Alinea.
- Froli, M., Lani, L. 2007. *Analisi strutturale di grandi lastre in vetro stratificato rinforzate con cavi in acciaio*, “Costruzioni metalliche”, 2, pp.29-43.
- Fulvi, F. 1996. *Dizionario di geografia fisica*, Roma, Newton Compton.
- Garau, A. 1999. *Le armonie del colore: analisi strutturale dei colori, la teoria delle mescolanze, la trasparenza percettiva*, Torino, Hoepli.
- Gasparoli, P. 2002. *Le superfici esterne degli edifici: degradi, criteri di progetto tecniche di manutenzione*, Firenze, Alinea.
- Giannini, C., Roani, R. 2000. *Dizionario del restauro e della diagnostica*, Firenze, Nardini.
- Gissi, E. 2009. *An introduction to fire simulation with Fds and Smokeview*, <http://www.corbezzolo.org/>.
- Givoni, B. 1969. *Climate and Architecture*, London, Applied Science Publisher.
- Graf, J. 2010. *A glass palace for the Limes Gate at Dalkingen*, “Engineered transparency. International Conference at Glasstec”, Düsseldorf, 29 and 30 September 2010.
- Grosso, M. 1997. *Il raffrescamento passivo degli edifici*, Rimini, Maggioli.

- Heiselberg, P., Murakami, S., Roulet, C. A. 1998. *Ventilation of Large Spaces in Buildings – Analysis and Prediction Techniques*, Final Report Annex 26, Energy Efficient Ventilation of Large Enclosures, IEA ECBCS – International Energy Agency, Energy Conservation in Buildings and Community Systems, Aalborg University.
- Guaitoli, M. T. 2009. *Emergenza sostenibile. Metodi e strategie dell'archeologia urbana*, Atti della Giornata di Studi (Bologna, 27 marzo 2009).
- Guzzo, P. G. 2000. *Coperture per aree e strutture archeologiche*, "ARKOS" num. mon. I Grandi restauri. Materiali e Strumenti, 1, p. 2.
- Hix J., 1996. *The Glasshouse*, Londra, Phaidon Press Limited.
- Iannone, F. 2001. *Modelli e software per il calcolo automatico della ventilazione naturale negli spazi confinati*, Bari, Wip.
- Kaltenbach F. 2004. *Translucent materials: glass, plastics, metals*, Basilea, Birkhäuser.
- Krewinkel, H. 1998. *Glass Buildings: material, structure and detail*, Basilea, Birkhäuser.
- Langella C. 2003. *Nuovi paesaggi materici. Design e tecnologia dei materiali*, Firenze, Alinea.
- Lani, L. 2003. *Il vetro come materiale costruttivo*, consultabile sul sito web [www.ingegneri.info](http://www.ingegneri.info) (28/11/13).
- Lanza Volpe, A. 2011. *Valeria Tatano e A.A. V.V. Oltre la Trasparenza*, "Agathón", 2, Palermo, Offset.
- Lanza Volpe, A. 2012. *Application of natural ventilation to archaeological sites with glass covers*, "IN – VENTO XXII Convegno Nazionale di Ingegneria del Vento", ANIV, Venezia, 7-10 Ottobre 2012 (in corso di pubblicazione).
- Lanza Volpe, A. 2013. *Transparent and sustainable materials*, Bártoło, H. et al., "Green Design, Materials and Manufacturing Processes", Proceedings of the 2nd international conference on sustainable intelligent manufacturing, Lisbon, Portugal, June 26-29, 2013, CRC Press/Balkema - Taylor & Francis Group, London, 559-562.
- Lanza Volpe, A. 2013. *Il vetro nelle coperture archeologiche*, Ruggieri Tricoli, M. C., Germanà, M. L., (a cura di), "Urban archaeology enhancement - Valorizzare l'archeologia urbana", Pisa, ETS.
- Laurenti, M. C. 2006. *Le coperture delle aree archeologiche. Museo aperto*, Roma, Gangemi.
- Lazzerini G, Lazzerini, S. 2007, *Vernici all'acqua per vetro piano*, – Vitrover, 5.
- Lefteri C., 2006. *Il vetro. Materiali per un design d'ispirazione*, Modena, Logos.
- Lieb, R. D. 2009. *Limestor Dalkingen. Entwärmung der Glaseinhausung*, Aachen (not published publically).
- Lieb R. D. 2010. *Freie Durchströmung großer Glashallen*, Universität Stuttgart - IGE Institut für GebäudeEnergetik, N. 20, Stuttgart.
- Lieb R. D. 2012. *An easy approach to calculate natural ventilation and get an adapted design*, IN – VENTO, XXII Convegno Nazionale di Ingegneria del Vento, ANIV, Venezia, 7-10 Ottobre 2012 (in corso di pubblicazione).
- Lorusso, S., Marabelli, M., Viviano, G. 1995. *La contaminazione ambientale ed il degrado dei materiali di interesse storico-artistico*, Roma, Bulzoni.
- Loughran, P., 2003. *Falling Glass: Problems and Solutions in Contemporary Architecture*, Boston, Birkhauser - Publishers for Architecture.
- Luciani, A., Del Curto, D. 2010. *Monitorare il microclima negli edifici storici. Una pratica preventiva come strumento di conoscenza*, Scienza e Beni Culturali - Pensare la prevenzione - manufatti usi e ambienti, Bressanone, pp. 203-212.
- Lund & Slaatto. 2004. *The protective structure for Hamar Cathedral Ruins*, Living Architecture, 19, pp.116-125.
- Magaudda, G. 1994. *Il biodeterioramento dei beni culturali*, Roma, ENEA e Borgia.
- Manacorda, D. 2008. *Lezioni di archeologia*, Roma - Bari, Laterza.
- Manieri Elia, G. 2010. *Metodo e tecniche del restauro architettonico*, Carocci, Roma.
- Manzelle, M. 1996. *La copertura di un sito archeologico: un problema architettonico*, "Dal sito archeologico al-

## BIBLIOGRAFIA

---

- l'archeologia del costruito", Atti del Convegno di Studi Scienza e Beni Culturali XII, Bressanone 3-6-luglio 1996, Padova, pp. 473-482,
- Marabelli, M. 1995. *Conservazione e restauro dei metalli d'arte*, Accademia del Lincei Anno CCCXCII, Roma.
- Marino, L., (a cura di), 2003. *Dizionario di Restauro Archeologico*, Firenze, Alinea.
- Marino, L. 2009. *Materiali per un atlante delle patologie presenti nelle aree archeologiche e negli edifici ridotti allo stato di rudere*, Firenze, Alinea.
- Marino, L., Pietramellara, C. (a cura di). 1998. *Tecniche edili tradizionali: contributi per la conoscenza e la conservazione del patrimonio archeologico*, Firenze, Alinea.
- Marrone, E. 1974. *Degradazione dei materiali*, Roma, Officina.
- Masetti Bitelli, L. 1999. *La conservazione e il restauro oggi: archeologia recupero e conservazione*, Firenze, Nardini.
- Matteini, M. 2010. *Tecnologie per i Beni Culturali*, Arkos – Scienza e Restauro, V. 23, Aprile - Giugno 2010.
- Matteini, M., Moles, A. 2007. *La chimica nel restauro, i materiali dell'arte pittorica*, Firenze, Nardini.
- Mazzei, P. Capozzoli, A., Minichiello, F. 2005. *Il controllo dell'umidità negli ambienti museali*, Atti del Convegno AICARR "Tecnologie impiantistiche per musei", 6 maggio, Roma.
- Mazzeo, a., 2004. *Il ruolo delle energie alternative nelle regole delle trasformazioni ambientali. Prime problematiche di sostenibilità, compatibilità ed eco – efficienza in siti archeologici*, Catanzaro, Rubbettino.
- McCluney, R., Jindra, P. 2000. *Industry Guide to Selecting the Best Residential Window Options for the Florida Climate*. Cocoa, Florida Solar Energy Center - University of Central Florida.
- Marcfarlane A., Martin G. 2003. *Una storia invisibile: come il vetro ha cambiato il mondo*, Bari, GLF editori Laterza.
- McGrattan, K., McDermott, R., Hostikka, S., Floyd, J. 2010. *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*, Gaithersburg, NIST Special Publication 1019-5.
- Melucco Vaccaro, A. 1999. *Archeologia e restauro*, Milano, Viella.
- Mencuccini, C., Silvestrini, V. 1999. *Fisica II. Elettromagnetismo – ottica*, Napoli, Liguori.
- Merzenich C. 1991. *Vetrine ad impianto passivo di climatizzazione: una bibliografia ragionata*, Kermes, 11, pp. 3-11.
- Minissi, F. 1987. *Perché e come proteggere i siti archeologici*, in "Restauro", n.90, pp. 78-85.
- Minissi, F. 1985. *Ipotesi di impiego di coperture metalliche a protezione di zone archeologiche*, "Restauro, Quaderni di Restauro dei Monumenti e di Urbanistica dei Centri Antichi", Edizioni Scientifiche Italiane 81, p. 27.
- Minissi, M. 1978. *Processi di musealizzazione*, "Conservazione dei beni storico artistici e ambientali, Restauro e musealizzazione", Roma, De Luca.
- Molnár T., Bachman, T. 2010. *Early christian cemetery complex Sopiana/Pécs*, in Cruz, P. J. S. 2010. *Structures and Architecture*, Icsa 2010 - 1st International Conference on Structures and Architecture (Guimaraes 21-23 July 2010), Londra, Taylor & Francis.
- Moor A., 1997. *Architectural glass art: form and technique in contemporary glass*, Londra, Mitchell Beazely.
- Moretti, M. 2004. *Materie prime del vetro*, consultabile sul sito web: [www.glassway.org/vetro/](http://www.glassway.org/vetro/) (28/11/13).
- Musser, A., McGrattan, K., Palmer, J. 2001. *Evaluation of a Fast, Simplified Computational Fluid Dynamics Model for Solving Room Airflow Problems*, U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6760.
- Newman, H. 1993. *Dizionario del vetro*, Milano, Garzanti.
- Oesterle, E., Lieb, R. D., Lutz, M., Heusler, W. 2001. *Double-Skin Facades*, Munich, Prestel Verlag.
- Ossani, I. 2001. *Salvaguardare, per conservare, i reperti museali che risentono delle modificazioni climatiche del-*

- l'ambiente in cui sono collocati*, "Museo Informa: notiziario del Sistema Museale", 10.
- Palmerio, G., Di Muzio, A. 2007. *Strutture protettive in archeologia*, Carbonara, G., "Restauro architettonico e impianti", IX, Torino, pp. 402-487.
- Paoletta, A., Minucci, R. (ed.) 2004. *L'efficienza energetica degli edifici. L'uso del vetro per la riduzione degli effetti negativi derivanti dai mutamenti climatici*, Roma, Edicomprint.
- Paoletti, I., Magarotto, E. 2008. *Trasparenze colorate*, "NF Involucri innovativi", 01, pp.136-141.
- Paoletti, I., Romano, M. G. 2010. *Transparent roofing. History and technologies*, "Frames", 146: 108-113.
- Pedeli', C., Pulga, S. 2002. *Pratiche conservative sullo Scavo Archeologico. Principi e metodi*, Firenze, Al'insegna del Giglio.
- Pedrotti, E. 2010. *Interazione tra luce e materia: colorimetria e fotodegrado in ambito illuminotecnico*, Scuola di Dottorato di ricerca in Ingegneria Industriale, Ciclo XXII, Università degli Studi di Padova.
- Pfrommer, P., Lomas, K. J., Seale, C., & Kupke, C. 1995. *The radiation transfer through coated and tinted glazing*, Solar Energy, 54(5), 287-299.
- Pinna, M. 1978. *L'atmosfera e il clima*, Torino, Utet.
- Ranellucci, S. 2009. *Coperture archeologiche. Allestimenti protettivi sui siti archeologici*, Roma, DEI.
- Ranellucci, S. 1999. *Linee metodologiche per la conservazione dei siti archeologici*, "Opus: quaderno di storia dell'architettura e restauro", vol. 6, pp. 447-480.
- Re E., 1997. *Trasparenza al limite: tecniche e linguaggi per un'architettura del vetro strutturale*, Firenze, Alinea.
- Ricci, A. 2006. *Attorno all nuda pietra. Archeologia e città tra identità e progetto*, Roma, Interventi Donzelli.
- Rogora, A. 2005. *La progettazione preliminare dell'edificio*, in Grosso, M. Peretti, G., Spiardi, S., Scudo, G. (a cura di), "Progettazione ecocompatibile dell'architettura", Napoli, Esselibri Simone.
- Romanelli M., (a cura di), 2000. *Il vetro progettato: architetti e designer a confronto con il vetro quotidiano*, Milano, Electa.
- Romano, R., 2011. *Smart skin envelope, integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative per il risparmio energetico*, Firenze, University Press.
- Ruggieri Tricoli, M. C., Germanà, M. L., (a cura di), *Urban archaeology enhancement - Valorizzare l'archeologia urbana*, Pisa, ETS.
- Ruggieri Tricoli, M. C. 2012. *Presentazione di Maria Clara Ruggieri Tricoli*, in Di Salvo, S., *Luce e colori sulle rovine. Strategie museografiche per la comunicazione dell'archeologia*, Roma, Aracne, pp. 5-6.
- Ruggieri Tricoli, M. C. 2007. *Musei sulle rovine. Architetture nel contesto archeologico*, Milano, Lybra.
- Ruggieri Tricoli, M. C., Zito, R. M. 2007. *Conservare e valorizzare i siti archeologici: una griglia tipologica* in "Agathón 2006", Palermo, Offset Studio, pp. 17-22.
- Ruggieri, Tricoli, M. C. 2006. *Musei tra le rovine: l'archeologia urbana alla prova della musealizzazione*, in "ARKOS", 13, pp. 22-28.
- Ruggieri, Tricoli, M. C., Rugino, S. 2005. *Luoghi, storie, musei*, Palermo, Flaccovio.
- Ruggieri Tricoli, M. C., Sposito, C. 2004. *I siti archeologici. Dalla definizione del valore alla protezione della materia*, Palermo, Flaccovio.
- Ruggieri, Tricoli, M. C. 2000. *I fantasmi e le cose. La messa in scena della storia nella comunicazione museale*, Milano, Lybra.
- Saiz-Jimenez, C. 1995. *The deterioration of Monuments*, "The Science of the Total Environment", Vol 67, Elsevier.
- Sala, M., Secchi, S., Torricelli, M. C. 1995. *La luce del giorno: tecnologie e strumenti per la progettazione*, Firenze, Alinea.
- Santamouris, M. 2002. *Natural ventilation in buildings*, Londra, James & James.

- Santoro, S., Santopuoli, N. 2000. *La protezione delle aree archeologiche: ricerca e prassi operativa*, "ARKOS", num. mon. I Grandi restauri. Materiali e Strumenti, 1, pp. 3-5.
- Saunders, D., Kirby, J. 1996. *Light-induced damage: investigating the reciprocity principle*, "ICOM Committee for Conservation", 11th Triennial Meeting, Edinburgh, 87-90.
- Scharlau K. 1950. *Einführung eines Schwülemasstabes und Abgrenzung von Schwülezeiten durch Isohygrothermen*, Erdkunde, v.4, pp.188-201.
- Scheebart, P. 1982. *L'architettura di vetro*, Milano, Adelphi.
- Schittich, C., Staib, G., Balkow, D., Schuler, M., Sobek, W., 1999. *Glass Construction Manual*, Basel: Birkhäuser.
- Schittich, C., Staib, G., Balkow, D., Schuler, M., Sobek, W. 1999. *Atlante del vetro*, Torino, Utet.
- Schmidt, H. 1988. *Schutzbauten*, Stuttgart, Theiss.
- Schober H. Gugeler, J. 2002. *Glasdach über der römischen Badruine in Badenweiler*, "Glas" 1, pp. 29-35.
- Schuman J, Rubinstein F, Papamichael K., Beltrán L, Lee E. S. Selkowitz S., 1992. *Technology review: glazing systems*, Windows and Daylighting Group - Energy and Environment Division - Lawrence Berkeley Laboratory - University of California, Berkeley.
- Sease, C., 1996. *A short history of archaeological conservation*, "Archaeological conservation and its consequences", preprint degli atti del Convegno di Copenhagen, 26-30 agosto 1996, Londra, International Institute for Conservation, pp. 157-161.
- Sinopoli, N., Tatano, V. (a cura di) 2002. *Sulle tracce dell'innovazione. Tra tecniche e architettura*, Roma, FrancoAngeli.
- Sposito, A. (a cura di), 2009. *Nanotech for Architecture. Innovative technologies, techniques and nanostructured materials*, Atti del 1° Convegno Internazionale, Palermo 26-28 Marzo 2009.
- Sposito, A. 2004. *Coprire l'Antico*, Palermo, Flaccovio.
- Sposito, A. (a cura di), 2004. *La conservazione affidabile per il patrimonio architettonico/Reliable Conservation of Architectural Heritage*, Tavola rotonda internazionale, Atti a cura di M. L. Germanà, Palermo (27-28 settembre 2002), Palermo, Flaccovio.
- Sposito, A. (a cura di), 1999. *Beni Archeologici: conoscenza conservazione gestione*, in A.A.V.V., "Sylloge Archeologica", Palermo, D.P.C.E, p. 11.
- Stanley Price, N., Matero, F. G. 2002. *Conservation and management of archaeological sites. Special issue on protective shelters*, v. 5, 1-2, Roma, ICCROM.
- Stanley-Price, N., Jokilehto, E. J. 2001. *The decision to shelter archaeological sites: three case-studies from Sicily*, "Conservation and Management of Archaeological Sites", Special Issue on Protective Shelters, 5 (1/2), pp. 19-34.
- Stanley Price, N. (a cura di), traduzione di Nardi, L. 1986. *La conservazione sullo scavo archeologico. Con particolare riferimento all'area Mediterranea*, Roma, ICCROM.
- Stanley Price, N. (ed.) 1984. *Conservation on Archaeological Excavations with particular reference to the Mediterranean area*, Roma, ICCROM.
- Tanizaki, J. 2002. *Libro d'ombra, "Opere"*, Milano, Bompiani.
- Tatano, V. (a cura di) 2008. *Oltre la trasparenza. Riflessioni sull'impiego del vetro in architettura*, Roma, Officina.
- Thom, E.C., Bosen, J.F. 1959. *The discomfort index*. Weatherwise, 12: 57-60.
- Thomson, G. 1986. *The museum Environment*, Londra, Butterworths.
- Torraca, G. 2005. *Porous building materials - Materials science for architectural conservation*, ICCROM, Roma.
- Torricelli, M. C. 1995. *La luce del giorno. Daylight : Tecnologie e strumenti per la progettazione*, Firenze, Alinea.

- 
- Torsello, B. P. 1988. *La materia del restauro*, Venezia, Marsilio.
- Tricoli, A. 2011. *La città nascosta. Esperienze e metodi per la valorizzazione del patrimonio archeologico urbano*, Palermo, Offset.
- Urtane, M. 2000. *Visible Archaeological Remains in Towns and Parks*, International Journal of Heritage Studies, vol. V, n. 1, Wiltshire.
- Vaccaro Melucco, A. 1990. *I nodi attuali nella conservazione delle aree archeologiche*, "Restauro", 110, Napoli.
- Van Uffelen, C., Bergamin, A. 2009. *Vetro*, Milano, Motta Architettura.
- Varagnoli, C. 2006. *Conservare il passato. Metodi ed esperienze di protezione e restauro nei siti archeologici*, Roma, Gangemi.
- Vaudetti, M., Minucciani, V., Canepa, S., 2012. *The archaeological musealization*, Torino, Umberto Allemandi & C.
- Vivio, B. A. 2010. *Franco Minissi. Musei e restauri. La trasparenza come valore*, Roma, Gangemi.
- Wasley, J. H. & Utzinger, M. 2000. *Vital Signs: Glazing Performance*. Johnson Controls Institute for Environmental Quality in Architecture, School of Architecture and Urban Planning, University of Wisconsin-Milwaukee.
- Weisskopf, V.F. 1994. *L'interazione della luce con la materia*, "Le scienze, quaderni: il colore", Milano, Le Scienze.
- Wienke, U. 2005. *Aria calore luce*, Roma, DeI.
- Wiggington M., Harris J., 2002. *Intelligent Skins*, Londra, Architectural Press.
- Wiggington M., 1996. *Glass in architecture*, Londra, Phaidon.
- Zacchei, V. 2005-2007. *Film d'Architettura: uso di strati con funzione di coating attivi per il sistema involucro. Un modello di simulazione a supporto della scelta progettuale*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Tecnologia dell'Architettura, XX Ciclo, Università degli Studi di Ferrara, Università IUAV di Venezia, Università degli Studi di Bologna.
- Zito, R. M. 2009. *Architetture trasparenti: il vetro nella comunicazione museale*, in Corrao R., De Giovanni G., *Trasparenza e leggerezza*, edA esempi di Architettura, anno III, n.6, Padova, I Prato.
- Zito, R. M. 2008. *Vecchi edifici e nuove architetture*, Interiors and Museums 3, Palermo, Offset, p.12.

This research tackles the issue of glass covering structures as protection for archaeological sites. The choice of this subject was influenced by the following considerations: the last decades have been characterized by an increase in protective transparent covering structures; the use of protective covering structures in archaeological contexts and what constitutes their design has been, and continues to be, a highly debated subject among experts around the world; constant innovation in glass continues to increase its possibilities in architecture. This material has many advantages such as apparent lightness and transparency, but in archeology it raises issues related to protection, preservation, enhancement of ruins and public use. The aim of the research was to develop some basic criteria for design and construction of glass covering structures, verifying the relationship between ruins, protective structures and microclimatic conditions.

Annalisa Lanza Volpe, engineer, master degree cum laude in Building Engineering at the University of Palermo. During the PhD studies she has been visiting researcher at the I.F.I. Institut für Industrieaerodynamik GmbH, University of Applied Sciences, Aachen (Germany) for some months. She is interested in the theories of sustainable buildings and is concerned about glazing applications, giving particular attention to the natural ventilation systems.