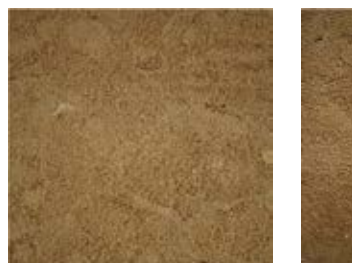




University of Palermo
Department of Architecture
PhD in Architecture, Arts and Planning
Sustainable Planning of Architecture and Design:
Human Centered Approach
XXXVII cycle
Coordinator Prof. Marco Rosario Nobile

Development of a dynamic repertoire of the typological and performance characteristics of historic walls on an ICT basis

PhD candidate
Eng. Erica La Placa



Supervisor

Prof. Calogero Vinci
(University of Palermo)

Co-Supervisors

Ing. Enrico Genova
(ENEA)

-

Prof. Roberta Zarccone
(ENSA Paris Malaquais)

Academic Year
2023-2024



**Università
degli Studi
di Palermo**



University of Palermo
Department of Architecture
PhD in Architecture, Arts and Planning
Sustainable Planning of Architecture and Design:
Human Centered Approach
XXXVII cycle
Coordinator Prof. Marco Rosario Nobile

Development of a dynamic repertoire of the typological and performance characteristics of historic walls on an ICT basis

PhD candidate
Eng. Erica La Placa

Supervisor
Prof. Calogero Vinci
(University of Palermo)

Co-Supervisors
Ing. Enrico Genova
(ENEA)

- **Prof. Roberta Zarcone**
(ENSA Paris Malaquais)

Academic Year
2023-2024

INDICE

Elenco delle figure	8
Elenco delle tabelle	11
Elenco delle formule	12
INTRODUCTION	14
Research field	15
Research approach	17
Research questions	18
Thesis objectives	19
Limitations and expectations	19
Thesis organization	20
Theoretical framework	21
INTRODUZIONE	24
CAPITOLO 1	
METODI DI CLASSIFICAZIONE DI TIPI MURARI	33
1.1 Classificare i tipi murari: dall'approccio "Evolutivo" all'approccio costruttivo-prestazionale	36
1.2 Per una definizione dei caratteri identitari del patrimonio costruito in pietra. La classificazione delle murature come presupposto per la conoscenza, conservazione e valorizzazione del patrimonio costruito	38
1.3 Dai trattati alla sistematizzazione geometrico-costruttiva: conoscere per ri-conoscere	39
1.4 Dai "manuali di recupero dei centri storici" alla definizione della "qualità muraria" in termini tipologici prestazionali	45
1.5 Considerazioni	53
Bibliografia	54
CAPITOLO 2	
CLASSIFICAZIONE E CARATTERIZZAZIONE COSTRUTTIVA DELLE MURATURE: definizione dei tipi	57
2.1 Caratterizzazione meccanica e correlazione tra NTC 2018 e I.Q.M.	60
2.2 Identificazione e analisi quali-quantitativa dei tipi murari	66
Bibliografia	68
Appendice A	69
Appendice B	75
Appendice C	81

CAPITOLO 3

ANALISI STATISTICHE PER LA CLASSIFICAZIONE DELLE MURATURE	87
3.1 Cluster analysis	89
3.1.1 Raccolta dei dati	89
3.1.2 Struttura del dataset	90
3.1.3 Algoritmi di clustering e silhouette	91
3.2 Random forest analysis	92
3.3 Casi studio	93
3.3.1 Dataset	93
3.3.2 Analisi e risultati della cluster analysis applicata ai casi studio	93
3.3.3 Analisi e risultati della random forest applicata ai casi studio	101
3.4 Considerazioni	103
Bibliografia	104

CAPITOLO 4

CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DEI MATERIALI LAPIDEI NATURALI E DELLE MURATURE	105
4.1 Materiali lapidei naturali	109
4.2 Prove di conducibilità termica in laboratorio	110
4.3 Prove di conduttanza termica in opera	124
4.3.1 Casi studio	127
4.3.2 Risultati	128
4.4 Considerazioni	140
Bibliografia	141

CAPITOLO 5

MODELLAZIONE PARAMETRICA DI TIPI MURARI	143
5.1 Stato dell'arte	146
5.2 Modellazione parametrica di tipi murari	147
5.2.1 Modellazione parametrica e termofisica di murature regolari	148
5.2.2 Modellazione parametrica e termofisica di murature caotiche	155
5.3 Generazione e validazione del modello FEM di muratura caotica	160
5.4 Considerazioni	164
Bibliografia	166

CAPITOLO 6

RICONOSCIMENTO SEMI-AUTOMATICO DI TIPI MURARI	169
6.1 Stato dell'arte	172
6.2 Processi di segmentazione delle immagini	173
6.3 Metodologia applicata	175

6.3.1 Segmentazione di immagini di tipi murari	175
6.3.2 Restituzione semi-automatica di parametri geometrici di tipi murari	180
6.4 Sviluppo repertorio dinamico e accrescitivo delle murature su base ICT	181
6.5 Considerazioni	185
Bibliografia	186
CHAPTER 7	
CONCLUSIONS AND FUTURE DEVELOPMENTS	187
7.1 Conclusions	188
7.2 Future developments	191
CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	192

ELENCO DELLE FIGURE

Capitolo 1

Fig. 1. 1 La pietra da taglio, mura di città © Milani GB (1925) L'ossatura murale. S. Lattes & C. Editori, Torino	35
Fig. 1. 2 Opus romani © Amico G (1726) L'Architetto pratico. Stamperia di Gio: Battista Aiccardo, Palermo	40
Fig. 1. 3 Murature composte discendenti dall'èmplekton © Margani G. Costruzione e recupero dell'opera muraria. Regola dell'arte e interventi di consolidamento. Enna: Il Lunario; 2009	44
Fig. 1. 4 Apparecchi costruttivi di Palermo © Giuffrè A, Carocci C (1999) Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione del centro storico di Palermo. Editori Laterza, Roma-Bari	47
Fig. 1. 5 Apparecchi costruttivi di Ortigia © Giuffrè A (2006) Sicurezza e conservazione dei centri storici: il caso Ortigia. Codice di pratica per gli interventi antisismici nel centro storico. Editori Laterza, Roma - Bari	48
Fig. 1. 6 Tabella C8.5.I Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura NTC 2018	50

Capitolo 2

Fig. 2.1 Tabella riassuntiva le tipologie murarie e le proprietà meccaniche correlate © NTC 2018	62
Fig. 2.2 Tabella riassuntiva dei coefficienti correttivi da applicare ai tipi murari © NTC 2018	62
Fig. 2.3 Grafici di correlazione tra i valori di IQM e i valori dalla NTC 2018	63
Fig. A.1 Correlazione tra I.Q.M. e Circolare n. 7 del 21/01/2019 per il caso studio di Gangi	74
Fig. B.1 Correlazione tra I.Q.M. e Circolare n. 7 del 21/01/2019 per il caso studio di Petralia Sottana	80
Fig. C.1 Correlazione tra I.Q.M. e Circolare n. 7 del 21/01/2019 per il caso studio di Alcamo	85

Capitolo 3

Fig. 3. 1 Fotografia "tipo" effettuata durante la campagna di rilievo delle murature a faccia vista	94
Fig. 3.2 Mappa georeferenziata delle murature indagate durante la campagna fotografica di rilievo	94
Fig. 3.3 Cluster analysis dataset Castel di Lucio	95
Fig. 3.4 Cluster analysis dataset Patti	96
Fig. 3.5 Cluster analysis dataset Santo Stefano	97
Fig. 3.6 Cluster analysis dataset Tusa	98
Fig. 3.7 Cluster analysis dataset complessivo	98
Fig. 3.8 Variabilità dell'I.Q.M. all'interno dei 3 cluster	99
Fig. 3.9 Boxplots delle dimensioni geometriche per i tre gruppi di cluster a) altezza elemento b) larghezza elemento c) spessore malta	100
Fig. 3.10 Variabile di importanza	101
Fig. 3. 11 Correlazione tra tipi murari e IQM per azioni fuori dal piano	102
Fig. 3. 12 Correlazione tra tipi murari e IQM per azioni nel piano	102
Fig. 3. 13 Correlazione tra tipi murari e IQM per azioni verticali	102

Capitolo 4

Fig. 4.1 Mappa dei comuni Siciliani nella quale sono stati analizzati i materiali	110
Fig. 4.2 Provino cilindrico di travertino	111
Fig. 4.3 Pesatura provino di travertino pre-essiccazione	111
Fig. 4.4 Essiccazione dei provini di travertino in forno	111
Fig. 4.5 Pesatura provini di travertino post-essiccazione	111
Fig. 4.6 Variazione peso dei provini di travertino durante l'essiccazione in forno	112
Fig. 4.7 Riduzione % del peso dei provini di travertino durante l'essiccazione in forno	112
Fig. 4.8 Fox 50 Heat Flow Meter - TA Instrument	113
Fig. 4.9 a) Provini materiali lapidei naturali testati in laboratorio: biocalcarenite, gesso selenitico, travertino	115
Fig. 4.9 b) Provini materiali lapidei naturali testati in laboratorio: calcare, calcare, marna arenitica	116
Fig. 4.9 c) Provini materiali lapidei naturali testati in laboratorio: calcare solfifero, quarzarenite, arenaria arcossica	117
Fig. 4.10 FP2C neotim	119

Fig. 4.11 Sonda a filo caldo FP2C neotim	119
Fig. 4.12 Applicazione della sonda a filo caldo a contatto con i provini	120
Fig. 4.13 Svolgimento della misura di conducibilità su provini di quarzarenite	120
Fig. 4.14 Fotografia reale di una muratura	125
Fig. 4.15 Fotografia termica corrispondente della muratura	125
Fig. 4.16 Sistema di monitoraggio Almemo Ahlborn	126
Fig. 4.17 Sistema di monitoraggio HFM Extratech	126
Fig. 4.18 Schema applicazione sensori a parete per la misurazione in situ delle temperature di parete e del flusso termico con Datalogger Almemo	127
Fig. 4.19 Schema applicazione sensori a parete per la misurazione in situ delle temperature di parete e del flusso termico con Datalogger Extra Tech	127
Fig. 4.20 Applicazione dei sensori nella parete interna del muro a Petralia Sottana	129
Fig. 4.21 Porzione muratura esterna a Petralia Sottana	129
Fig. 4.22 Andamento delle temperature durante lo svolgimento della prova a Petralia Sottana	129
Fig. 4.23 Andamento del flusso termico durante lo svolgimento della prova a Petralia Sottana	130
Fig. 4.24 Conduttanza termica ricavata con il metodo delle medie progressive a Petralia Sottana	130
Fig. 4.25 Applicazione a parete interna dei sensori Almemo ed Extra Tech a Bompietro	131
Fig. 4.26 Applicazione a parete esterna dei sensori Almemo ed Extra Tech a Bompietro	131
Fig. 4.27 Confronto tra le temperature esterne misurate con due strumentazioni differenti (Almemo – ExtraTech)	131
Fig. 4.28 Confronto tra le temperature interne misurate con due strumentazioni differenti (Almemo – ExtraTech)	132
Fig. 4.29 Confronto tra i flussi termici misurati con due strumentazioni differenti (Almemo – ExtraTech)	132
Fig. 4.30 Conduttanza calcolata con il metodo delle medie progressive	133
Fig. 4.31 Muratura esterna SM2.1 Petralia Sottana	134
Fig. 4.32 Applicazione dei sensori all'interno del muro SM2.1 Petralia Sottana	134
Fig. 4.33 Andamento delle temperature durante lo svolgimento della prova a Petralia Sottana	134
Fig. 4.34 Andamento del flusso termico durante lo svolgimento della prova a Petralia Sottana	135
Fig. 4.35 Conduttanza termica ricavata con il metodo delle medie progressive	135
Fig. 4.36 Applicazione sensori di temperatura su muratura esterna a Geraci Siculo	136
Fig. 4.37 Applicazione sensori di temperatura su muratura interna a Geraci Siculo	136
Fig. 4.38 Andamento delle temperature durante lo svolgimento della prova a Geraci Siculo	136
Fig. 4.39 Andamento del flusso termico durante lo svolgimento della prova a Geraci Siculo	137
Fig. 4.40 Conduttanza termica ricavata con il metodo delle medie progressive	137
Fig. 4.41 Conduttanza termica ricavata con il metodo delle medie progressive a Mistretta	138
Fig. 4.42 Conduttanza termica ricavata con il metodo delle medie progressive a Mistretta	138
Fig. 4.43 Andamento delle temperature durante lo svolgimento della prova a Mistretta	138
Fig. 4.44 Andamento del flusso termico durante lo svolgimento della prova a Mistretta	139
Fig. 4.45 Conduttanza termica ricavata con il metodo delle medie progressive	139
 Capitolo 5	
Fig. 5.1 a) Configurazione M1 b) Configurazione M2 c) Configurazione M3 d) Configurazione M4	149
Fig. 5.2 Definizione della trasmissione del calore nei modelli su Comsol Multiphysics. a) isolamento termico b) flusso termico esterno c) flusso termico interno	151
Fig. 5.3 Mesh del modello M2 su Comsol Multiphysics	152
Fig. 5. 4 Sezioni trasversali yz effettuate per x=2,13 m a) Configurazione M1 b) Configurazione M2 c) Configurazione M3 d) Configurazione M4	153
Fig. 5. 5 Temperature nelle sezioni trasversali xz a) Configurazione M1 b) Configurazione M2 c) Configurazione M3 d) Configurazione M4	154
Fig. 5. 6 Flussi termici nelle sezioni trasversali xz a) Configurazione M1 b) Configurazione M2 c) Configurazione M3 d) Configurazione M4	154
Fig. 5. 7 Modellazione parametrica Grasshopper	156

Fig. 5.8 Mesh degli elementi lapidei in Cast3m	157
Fig. 5.9 Mesh della malta in Cast3m	157
Fig. 5. 10 Mappa di temperature	159
Fig. 5. 11 Mappa flusso termico	159
Fig. 5. 12 Profilo di temperatura di parete interna	159
Fig. 5. 13 Andamento temporale del flusso termico	160
Fig. 5. 14 Validazione del modello FEM - confronto fra dati sperimentali e risultati della simulazione per la temperatura di parete interna nel primo intervallo temporale selezionato	162
Fig. 5. 15 Validazione del modello FEM - confronto fra dati sperimentali e risultati della simulazione per la temperatura di parete interna nel secondo intervallo temporale selezionato	162
Fig. 5. 16 Mappa termica a $t=50700$	163
Fig. 5. 17 Mappa termica a $t=759900$	163
Fig. 5. 18 Profili di temperatura per gli istanti di tempo considerati. a) $t=14$ - b) $t=211$	164
 Capitolo 6	
Fig. 6. 1 Schema digital process image	175
Fig. 6. 2 Matrice associata ad un'immagine binaria	175
Fig. 6. 3 Foto di una muratura di tipo SM1	176
Fig. 6. 4 Foto della muratura SM1 trasformata in immagine binaria attraverso la sostituzione dei valori dei pixel in bianco e nero	176
Fig. 6. 5 Trasformazione dell'immagine binaria attraverso la segmentazione con operatore di Roberts	177
Fig. 6. 6 Trasformazione dell'immagine binaria attraverso la segmentazione con operatore di Prewitt	177
Fig. 6. 7 Trasformazione dell'immagine binaria attraverso la segmentazione con operatore di Sobel	177
Fig. 6. 8 Foto di una muratura di tipo SM1	178
Fig. 6. 9 Immagine segmentata con "Image Segmenter" corrispondente alla muratura SM1	178
Fig. 6. 10 Elaborazione dell'immagine della muratura di tipo SM3 con Meta AI Segmentation	179
Fig. 6. 11 Immagine segmentata della muratura di tipo SM3 con Meta AI Segmentation	179
Fig. 6. 12 Elaborazione dell'immagine della muratura di tipo SM1 con Meta AI Segmentation	179
Fig. 6. 13 Immagine segmentata della muratura di tipo SM1 con Meta AI Segmentation	179
Fig. 6. 14 Immagine raster trasformata in vettoriale della muratura di tipo SM1	180
Fig. 6.15 Immagine vettoriale importata su CAD della muratura di tipo SM1	180
Fig. 6. 16 Immagine segmentata di muratura in conci regolari con Matlab	181
Fig. 6. 17 Immagine segmentata di muratura in mattoni regolari con Matlab	181
Fig. 6. 18 Matrice con dati di tipo geometrico estratti su Matlab dall'immagine segmentata di muratura di tipo SM1	181
Fig. 6. 19 Esempio di Scheda Tecnica Informativa	182
Fig. 6. 20 Schema del sistema di riconoscimento semi-automatico	184

ELENCO DELLE TABELLE

Capitolo 2

Tab. 2.1 Attribuzione delle categorie murarie in base ai punteggi di I.Q.M.	63
Tab. 2.2 Materiali indagati nei contesti locali	68
Tab. A.1 Correlazione tra I.Q.M. e Circolare n. 7 del 21/01/2019 per il caso studio di Gangi	73
Tab. B.1 Correlazione tra I.Q.M. e Circolare n. 7 del 21/01/2019 per il caso studio di Petralia Sottana	79
Tab. C.1 Correlazione tra I.Q.M. e Circolare n. 7 del 21/01/2019 per il caso studio di Alcamo	84

Capitolo 4

Tab. 4.1 Determinazione della densità apparente per i provini di travertino	112
Tab. 4.2 Valore di conducibilità termica della quarzarenite ricavata in lab. e confrontata con la norma 1745	114
Tab. 4.3 Valore di conducibilità termica del travertino ricavato in lab. e confrontato con la UNI EN ISO 10456	114
Tab. 4.4 Valori dimensionali e densità apparente relativi ai materiali testati in laboratorio	118
Tab. 4.5 Test di conducibilità termica dei materiali testati nel laboratorio GSA ENSA Paris-Malaquais	121
Tab. 4.6 Valori di conducibilità termica dei materiali ricavati in lab. e confrontati con i dati presenti nelle norme di riferimento	122
Tab. 4.7 Valori di conducibilità termica del gesso selenitico ricavati in lab. e confrontati con la norma UNI EN ISO 10456	122
Tab. 4.8 Valori di conducibilità termica del travertino ricavati in lab. e confrontati con i dati presenti nelle norme di riferimento	123
Tab. 4.9 Valori di conducibilità termica della biocalcarenite ricavati in lab. e confrontati con i dati presenti nelle norme di riferimento	123
Tab. 4.10 Valori di conducibilità termica della quarzarenite e dell'arenaria arcossica ricavati in lab. e confrontati con i dati presenti nelle norme di riferimento	123
Tab. 4.11 Prove svolte in situ per la misurazione delle temperature e del flusso termico	128

Capitolo 5

Tab. 5.1 Proprietà termiche dei materiali applicati al modello Comsol	150
Tab. 5.2 Risultati delle simulazioni dei modelli Comsol	155
Tab. 5.3 Materiali impiegati nel modello Cast3m	156
Tab. 5.4 Materiali impiegati nel modello Comsol	161

ELENCO DELLE FORMULE

Capitolo 2

Eq. 2.1 $I.Q.M. = RE.EL. (OR + PD + F.EL + SG + D.EL + MA)$

M.A. Malta di buona qualità/efficace contatto tra elementi/ zeppe;

P.D. Ingranamento trasversale/presenza di diatoni;

F.EL. Forma degli elementi;

D.EL. Dimensione degli elementi;

S.G. Sfalsamento fra i giunti verticali;

O.R. Presenza di filari orizzontali;

R.EL. Resistenza adeguata degli elementi.

Capitolo 3

Eq. 3.1
$$D_{Gower}(x_1, x_2) = 1 - \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p s_j(x_1, x_2)$$

p è il numero totale di variabili

$s_j(x_1, x_2)$ è una funzione che calcola la similarità e dissimilarità tra i valori delle variabili j per le osservazioni x_1 e x_2

Capitolo 4

Eq. 4.1
$$\lambda = \frac{Q}{A} \times \frac{s}{\Delta T} \left[\frac{W}{mK} \right]$$

Eq. 4.2
$$R = \frac{1}{\lambda} \times s \left[\frac{m^2K}{W} \right]$$

Capitolo 5

Eq. 5.1
$$U = \frac{1}{R_t}$$

Eq. 5.2
$$R_t = R_{si} + \frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} + \dots + R_s$$

Eq. 5.3
$$-n \cdot q = q_0$$

Eq. 5.4
$$q_0 = h(T_{est} - T)$$

Eq. 5.5
$$h = \begin{cases} \frac{k}{L} \left(0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{\frac{1}{4}}}{(1 + (\frac{0.49k}{\mu C_p})^{\frac{9}{16}})^{\frac{4}{9}}} \right) & \text{if } Ra_L \leq 10^9 \\ \frac{k}{L} \left(0.825 + \frac{0.38 Ra_L^{\frac{1}{6}}}{(1 + (\frac{0.49k}{\mu C_p})^{\frac{9}{16}})^{\frac{8}{27}}} \right)^2 & \text{if } Ra_L > 10^9 \end{cases}$$

Eq. 5.6
$$h = \frac{k Ra_L}{H 24}$$

Eq. 5.7

$$\lambda = \frac{q}{T_{par,int} - T_{par,est}}$$

Eq. 5.8

$$\begin{cases} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + div(q) = f \\ q = -\lambda grad(T) \end{cases}$$

Eq. 5.9

$$q = h(T_{air} - T_{wall})$$

Eq. 5.10

$$\underline{\underline{C}} + \dot{T} + (\underline{\underline{K}} + \underline{\underline{H}})T = \underline{Q} + \underline{Q_C}$$

$\dot{T}$ è la temperatura ai nodi

T è la derivata temporale della temperatura ai nodi

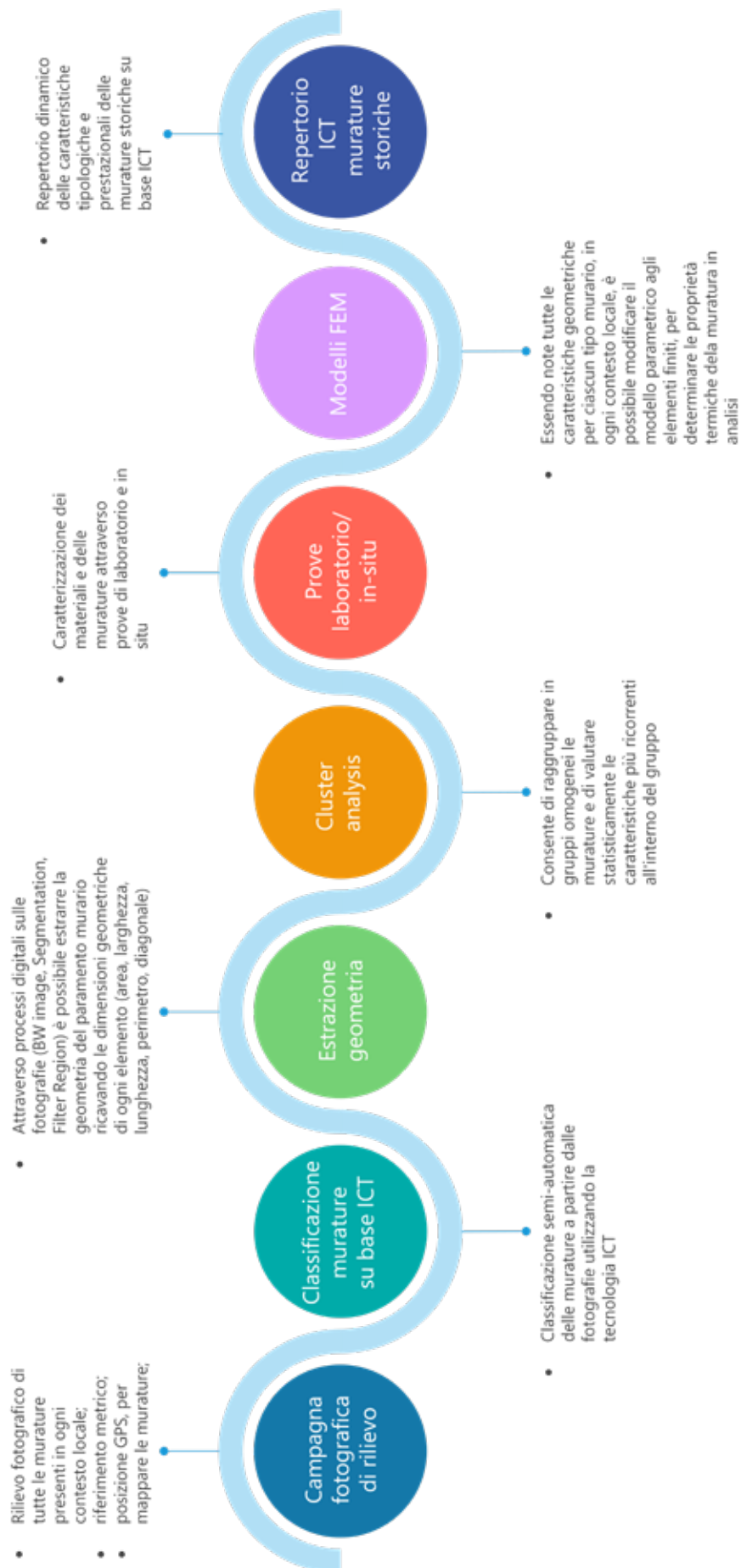
$\underline{Q}$ è il flusso termico integrato ai nodi

$\underline{\underline{C}}$ è la matrice di capacità termica

$\underline{\underline{K}}$ è la matrice di conducibilità

$\underline{\underline{H}}$ è la matrice dei coefficienti convettivi

$\underline{Q_C}$ è il termine che rappresenta hT_{air}



Introduction

Research field

From an epistemological perspective and in terms of the scientific method, this research, conducted within the doctoral program “Architecture, Arts, and Planning,” proposes a heuristic approach (εὕρισκω, literally “discover”) for the typological and performance characterization of historic masonry walls and the development of an ICT-based repertoire. The experimental verifications, strategies, techniques, and procedures applied have progressively led to results unknown when the project started. These results enabled the generation of new knowledge on such a broad and significant topic from a scientific point of view, but also from a cultural, economic, environmental, and social point of view. This topic - the recovery and valorization of the existing built heritage- has been widely debated in recent decades.

This area of research holds particular significance in Italy and, more broadly, across Europe, where existing buildings account for a substantial portion of the built heritage.

This scenario highlights the urgent need to implement targeted strategies for the recovery, upgrading, and functional and performance retrofitting of these buildings—especially those constructed using traditional techniques, particularly masonry structures. These structures are often considered vulnerable and inadequate from the performance point of view, in terms of indoor comfort, energy efficiency, structural safety, and environmental sustainability, according to contemporary housing needs. Consequently, these structures are at risk of abandonment and eventual deterioration.

The existing built heritage in Europe, largely composed of historic and minor buildings, is a crucial element not only for its cultural value but also for its ability to meet housing needs. The housing crisis in Europe affects 17% of the population, who live in inadequate spaces [1].

The rehabilitation of the existing built heritage aims to tackle the housing crisis, in order to reduce land consumption by minimizing the waste of natural resources and to preserve the distinctive characteristics of the urban fabric. The rehabilitation of traditional buildings could contribute to the preservation of the cultural and historical value of city centres, by improving the environmental context, and by reducing the demand for new construction. This, in turn, would lower the consumption of land and raw materials.

The topic of building rehabilitation is among the primary objectives of European policies, including the 2030 Agenda for Sustainable Development, the European Green Deal, and the Renovation Wave program [2]. These strategic plans emphasize the necessity of the recovery of existing buildings not only to improve their energy and structural performance but also to reduce greenhouse gas emissions, thereby contributing to the fight against climate change. As nearly 75% of existing buildings are energy inefficient, large-scale energy retrofitting interventions are essential. For residential buildings, the average primary energy consumption should decrease by 16% by 2030 and by 20-22% by 2035, with the ultimate goal of achieving a net-zero emissions built heritage by 2050. Moreover, 55% of the energy reduction target must be achieved through the renovation of the worst-performing buildings.

Research on the energy efficiency of historic buildings has made significant progress over the past decades, evolving from pioneering approaches to systematic and methodologically rigorous studies. However, despite the advancements achieved, the need to accurately define the behavior and current performance of historic buildings remains. This objective requires an in-depth analysis of the construction, complemented

by a detailed understanding of its materials and components, with particular focus on their thermo-physical properties.

In this context, the focus of the doctoral research focuses on load-bearing masonry envelopes, which represent a critical element in evaluating energy efficiency.

Historic masonry walls, frequently exhibit uncertainties, regarding their mechanical and thermal, physical performance, and more generally their response to environmental stressors. These walls are often characterized by a heterogeneous composition and construction techniques that vary significantly even within the same geographic or urban context, as well as frequent heterogeneous layering within a single building.

The variety of materials, the different assembly methods, and the pathologies that may affect masonry structures can further complicate the accurate definition of their energy and mechanical performance.

While studies aimed at the mechanical characterization of masonry can be considered well-established, the energy performance of buildings has gained prominence only recently, especially in the current context where European policies emphasize the rehabilitation of the existing built heritage.

This renewed scientific interest in methods for assessing the characteristics and, more broadly, the quality of masonry not only guides potential interventions in alignment with the required standards but also ensures—especially in the case of monumental or high-value architecture—that such interventions respect conservation and restoration principles.

To address these needs and demands, an interdisciplinary approach to understanding masonry is essential. This involves investigation methods integrating traditional approaches with physical and chemical analysis of materials, in situ and laboratory measurements of thermo-physical properties, and energy simulation models. In this regard, the repertoire proposed by the present research—an “incremental” database of the characteristics and energy performance of various types of historic masonry—could serve as a valuable tool for designers and industry professionals in planning compatible interventions.

That said, although the energy efficiency of historic buildings has become an increasingly important research topic in recent years, it is essential to continue exploring and defining the performance of masonry structures, considering the significant heterogeneity and specificity resulting from the diversity of lithotypes used and construction practices across different geographic contexts.

In order to avoid crude simplifications often arising from inadequate understanding of this construction system, intervention strategies can be developed by improving the energy efficiency, but also respecting the historical and cultural value of these buildings. This can only be achieved through a scientific and multidisciplinary approach, which acknowledges this heterogeneity and appreciates the complexity of masonry. Moreover, these strategies ensure the use and accessibility of masonry structures, as indispensable prerequisites for their long-term preservation.

In the current historical context, the risk that the existing built heritage may be subjected to interventions that are disrespectful or even incompatible with conservation requirements cannot be overlooked. Within the scientific debate, the concept of “performance retrofitting”—which has surpassed the notion of mere “adaptation”—has become firmly established, not only in the structural domain but also in interventions aimed at improving energy efficiency.

In this regard, essential prerequisites for performance retrofitting interventions are, on the one hand, the rehabilitation and recognition of the importance of the “local” dimension and the specific nature of construction contexts (environmental, geographical, geological, social, economic, and technical-cultural) to correctly interpret the unique characteristics

of each building. On the other hand, it is crucial to put each specific case within a broader framework, identifying relationships (such as the spread of a construction culture) and patterns (the relationship between the use of a lithotype and the corresponding construction solution or masonry technique). This approach allows for broader considerations and the achievement of replicable results.

As outlined, the research employs an interdisciplinary methodological approach, integrating fields such as technical architecture, the history of construction techniques, drawing, surveying and representation, building physics, statistics, and computer science in close correlation with one another. Consequently, it has been necessary to identify several macro-areas of investigation, which, when systematically interconnected, contribute to shaping the structure of what can be considered the objective of this doctoral thesis: a dynamic repertoire of the typological and performance characteristics of historic masonry, based on ICT (Information and Communications Technologies) for the acquisition, processing, management, and automated utilization of data and information.

At this point, it is appropriate to define the boundaries within which this research was conducted. The study draws inspiration from and develops by examining in particular the Sicilian context—a setting that is highly representative due to the variety of natural stone materials available (ranging from limestone to quartz sandstone, from volcanic rocks to gypsum), with significantly diverse physical and mechanical properties. Consequently, this is also emblematic of the multiplicity of construction solutions that interpret this heterogeneity differently across various local contexts.

In Sicily—especially in the small villages of the inner and mountainous areas, construction practices have traditionally relied almost exclusively on local resources—Therefore, traditional stone architecture reflects both the unique characteristics of the rocks used and the culture and technical skill of the workers who built them. This has contributed to making Sicily's architectural heritage extraordinarily diverse in terms of construction solutions, representative of a broader landscape.

Research approach

This research primarily falls within the field of Architectural Engineering, but it is also connected to the history of construction techniques, computer science, statistics, and building physics. The main goal of this thesis is to develop a dynamic repertoire of the typological and performance characteristics of historic masonry based on ICT.

This research is structured in several macro-themes:

- The typological classification of historic masonry, also in relation to the different natural stone materials used, through a statistical analysis method;
- The characterization of the most commonly used natural stone materials in Sicily for masonry construction;
- The thermo-physical characterization and the qualitative-quantitative mechanical characterization (I.Q.M.) of masonry;
- The development of parametric FEM models of masonry, allowing the evaluation of energy and mechanical performance;
- The development of a semi-automatic masonry recognition system through images based on ICT;
- The development of the dynamic repertoire of the typological and performance characteristics of historic masonry.

Research questions

Although additional themes and various areas for further exploration emerged during the research, it is useful to highlight the questions and assumptions that guided this research, and the relevance they had to the above-mentioned heuristic approach:

- In relation to the state of the art, how can we improve the understanding of the performance of existing masonry buildings?
- Is it possible to assess the thermal performance of masonry through a qualitative-quantitative analysis using a correlation between geometric-constructive parameters and associated thermal properties?
- How can digital models contribute to evaluating the energy performance of historic masonry? How reliable are these models? What parameters should be considered during modeling in relation to their relevance? Which type of model is most appropriate (models that realistically replicate the masonry being examined or typologically representative models)?
- Is it possible to develop an automatic masonry recognition system that can associate a “masonry type” to an image (particularly of the wall surfaces)?
- Is it possible, through image processing, to automatically determine the geometric-dimensional data associated with the elements constituting the masonry and the type of masonry bond?
- Compared to “traditional” repositories, is it possible to make information (data from technical standards, scientific works, results from laboratory and in-situ tests, FEM simulations, tables, etc.) related to masonry accessible through a dynamic and “incremental” repertoire?

And finally...

- How and to what extent can the recovery of the existing built heritage, through a reliable assessment of the thermal, as well as mechanical, characteristics of masonry, contribute to achieving the climate neutrality goals set by European strategic plans (Agenda 2030, Green Deal, Renovation Wave program) while respecting identity characteristics and architectural quality?

In response to the numerous questions, the research conducted over the three years allowed to answer to some of them, while, due to the rapid evolution of ICT techniques, it also redefined the boundaries of the research itself.

In particular, regarding the various scientific areas involved in the study, it was necessary to incorporate specific interdisciplinary insights, especially for issues that have been less explored so far.

As for the final question, the demands arising from European policies and strategic plans guided the study not only towards high-quality architectural heritage—specifically masonry buildings—but also towards “minor” architecture, which often forms the fabric of our historic city centers and defines their image, blending quality and identity.

Thesis objectives

As mentioned, the main goal of this doctoral research is the development of a dynamic repertoire of the typological and performance characteristics of historic masonry based on ICT.

The repertoire aims at the systematic collection of data and information related to the building envelope of masonry structures, with particular attention to energy and mechanical performance, aiming at providing a tool for the knowledge, conservation, and rehabilitation of the existing heritage.

The study also aims to investigate the potential of ICT—specifically, image recognition systems—in order to make the repertoire dynamic and implementable, and to evaluate if and to what extent these systems can help reduce the subjectivity of the user when determining the parameters to assess masonry characteristics.

In this regard, the repertoire could be developed as a versatile tool for different user types, allowing them to either access existing data (static use of the repertoire) or contribute to its expansion. Another goal of the thesis is to design an “incremental” repertoire by developing an application capable of acquiring and processing data related to a specific masonry surface (photographs, geographic location, etc.), providing the user with the main characteristics of the examined masonry as output.

To achieve the main objective, it was necessary to set intermediate goals, useful for defining the data that will be included and made available in the dynamic repertoire. The first of these intermediate goals is the definition of a method, as objective as possible and less influenced by the user’s specific expertise (cluster analysis), for the typological classification of masonry (“types”) based on geometric-constructive features.

For the implementation of the data merging into the repertoire, an additional intermediate goal was the mechanical and thermo-physical characterization of the different identified masonry types, through in-situ and laboratory tests, as well as through qualitative-quantitative methods and numerical models. In particular, the focus is primarily on the theme that, compared to the state of the art, appears to be of greater originality: the reliable assessment of the energy performance of historic masonry—often subject to rough evaluations—in order to guide restoration interventions on the built heritage in a coherent manner.

Finally, another goal of the study is to propose a system to automatically extract information and data—such as the geometric-dimensional data associated with the elements constituting the masonry and the type of masonry bond—by processing images of walls with exposed masonry.

Limitations and expectations

On one hand, this research fundamentally defines a specific methodology, which has been tested mainly on a few case studies selected according to criteria that will be specified later (Chapter 3). On the other hand, due to the possibility of “feeding” the proposed repertoire, this research lays the foundations for a broader classification work, by developing a semi-automatic classification system for historic masonry based on ICT, proposing a method integrating traditional classification methods that does not aim to replace the direct analysis of technicians and specialized operators.

One limitation of the research could be identified in the fact that the study focuses exclusively on masonry in the Sicilian context. This choice is obviously motivated by the

need to conduct numerous surveys and direct investigations on a large number of cases. While this might seem like a limitation, in fact, as previously stated, the geographical area selected for the study is certainly representative of the wide lithological variety characterizing the region and strongly influences the methods of masonry construction. Moreover, the centuries-old stratification of cultures present on the island has forged the skills of local craftsmen and fostered the development of different construction solutions and techniques.

In this regard, it is important to specify that the proposed research defines a replicable method, which has been applied to several case studies in order to verify its validity.

It is also noted that the experimental results obtained from the laboratory tests should be considered as an initial campaign for the characterization of natural stone materials. It is deemed necessary to expand the number of laboratory tests to be conducted on a significant number of samples, in order to statistically determine reliable values with a limited measurement error.

Finally, while the research conducted has fully defined the structure of a repertoire on masonry as previously specified, the development of the application capable of automatically implementing the repertoire was carried out up to the design of the application's logical structure. Further in-depth work and specific IT expertise are needed for the implementation of this application.

Thesis organization

The **first chapter** defines the state of the art, focusing on the methods to classifying masonry through an examination of the different approaches used and their evolution from the tradition of architectural treatises to the present day.

The **second and third chapters** outline the assumptions made for populating the dataset, through the identification of geometric-constructive parameters, and the type of statistical analysis used for the “objective” definition of masonry types in different geographic-lithological contexts.

The **fourth chapter** presents the experimental work carried out for the thermo-physical characterization of the natural stone materials used in the masonry of the selected case study centers.

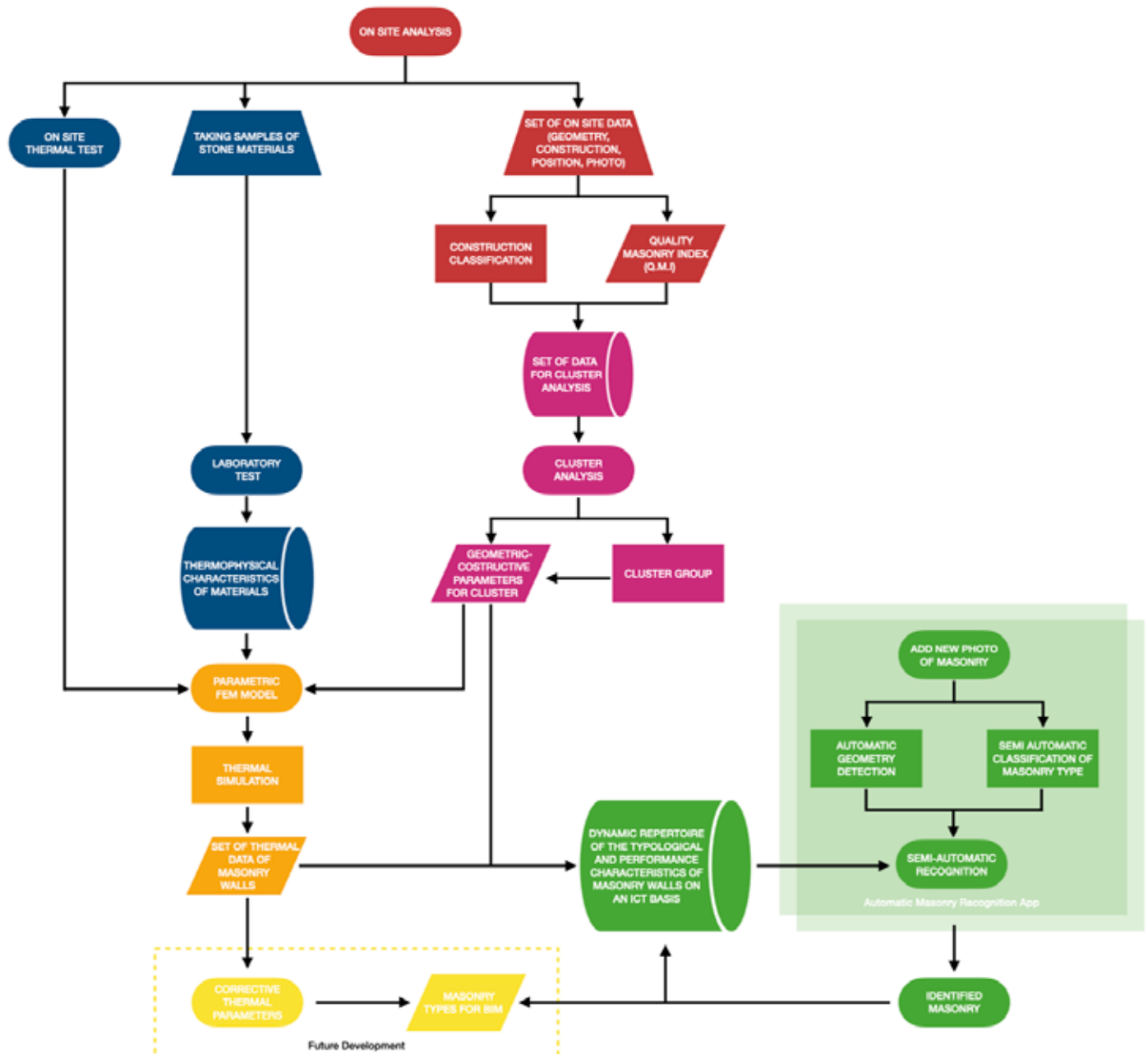
The **fifth chapter** illustrates the methodology used and the results obtained through the development of a parametric model, designed with the support of Co-supervisor Prof. Roberta Zarcone during the period spent abroad at École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais - Paris.

The **sixth chapter** defines the semi-automatic recognition system for masonry types proposed, which is the subject of patent application N. 102023000023781 filed in Italy on November 10, 2023, in the name of the University of Palermo, titled “Semi-Automatic Image Search Method for Masonry Works,” extended to an international application filed on November 7, 2024, with the number PCT/IB2024/061030.

The **seventh chapter**, along with the conclusions, outlines the present and future application potential of the dynamic repertoire, defines the possible categories of users, and discusses the practical implications.

The appendix includes summary sheets of some case studies explored in the research. The sheets analyze the masonry types found in specific local contexts, summarizing the most significant information.

Theoretical Framework



The diagram illustrates the research topics explored in this work, showing the logical connections that were developed throughout the research.

The first part, shown in red in the diagram, presents the activities—carried out in parallel with the study of the state of the art—undertaken for the in-situ analysis. This operation, conducted after a thorough examination of the local context, includes geometric-constructive, typological, and photographic surveys. The collection of in-situ data and subsequent systematic processing allows for the identification and classification of the masonry types found, the manual extraction of the qualitative and quantitative parameters useful for creating the dataset, as well as for evaluating the masonry quality index (mechanical characterization).

All the collected data are gathered into a structured dataset, which forms the basis for subsequent statistical processing through cluster analysis. This initially allows the grouping of masonry types into homogeneous clusters (cluster group) and also enables the identification of the most recurring geometric-constructive parameters for each cluster. The statistical analyses help reduce the subjectivity of the user in determining the masonry type, as they are based on the evaluation of the qualitative and quantitative data present in the dataset, making the typological classification semi-automatic.

The second part, shown in blue in the diagram, addresses the characterization of natural stone materials and masonry in terms of their thermophysical properties. On one hand, conducting experimental tests in situ allows for the investigation of the thermal properties of masonry in place, in its entire structural section. On the other hand, it is necessary to characterize the properties of the natural stone materials used in construction through laboratory investigations, in order to obtain experimental data such as thermal conductivity and apparent density. It should be noted that during the research, a limited number of diagnostic investigations were conducted on-site due to the objective difficulties arising from environmental conditions (tests had to be conducted in the winter period), the long duration required for the tests (at least two weeks), and the limited availability of instruments to carry out the tests (thermoflucs). For this reason, in order to ensure a reliable assessment of the thermal properties of the masonry, digital FEM models of masonry were used to simulate the response to thermal stresses.

The FEM modeling phases are shown in orange. The geometry of the FEM models is based on the masonry types previously investigated and is carried out after identifying the most recurrent geometric-constructive parameters of the type through cluster analysis. Additionally, the material properties to be associated with the models are derived from the thermophysical characterization of the natural stone materials conducted in laboratory. Finally, the FEM models are calibrated using the data measured in situ through experimental tests on the masonry, in order to obtain thermally valid models.

The results of the thermal simulations constitute a collection of thermal data related to the masonry; the obtained data, along with the geometric-constructive data determined by the cluster analysis, and the thermal, physical, and mechanical characteristics of the masonry, are integrated into the dynamic repository of typological and performance characteristics of masonry.

The last research topic explored, represented in green in the diagram, is the dynamic repository of typological and performance characteristics of masonry based on ICT. The semi-automatic recognition system for masonry allows to identify the masonry type by analyzing photographic images. Once a new photographic image of the masonry is acquired, the system compares it with the images present in the repository and associates it with the corresponding masonry type. Furthermore, the system automatically identifies the geometry of the elements and allows for the extraction of quantitative data related to

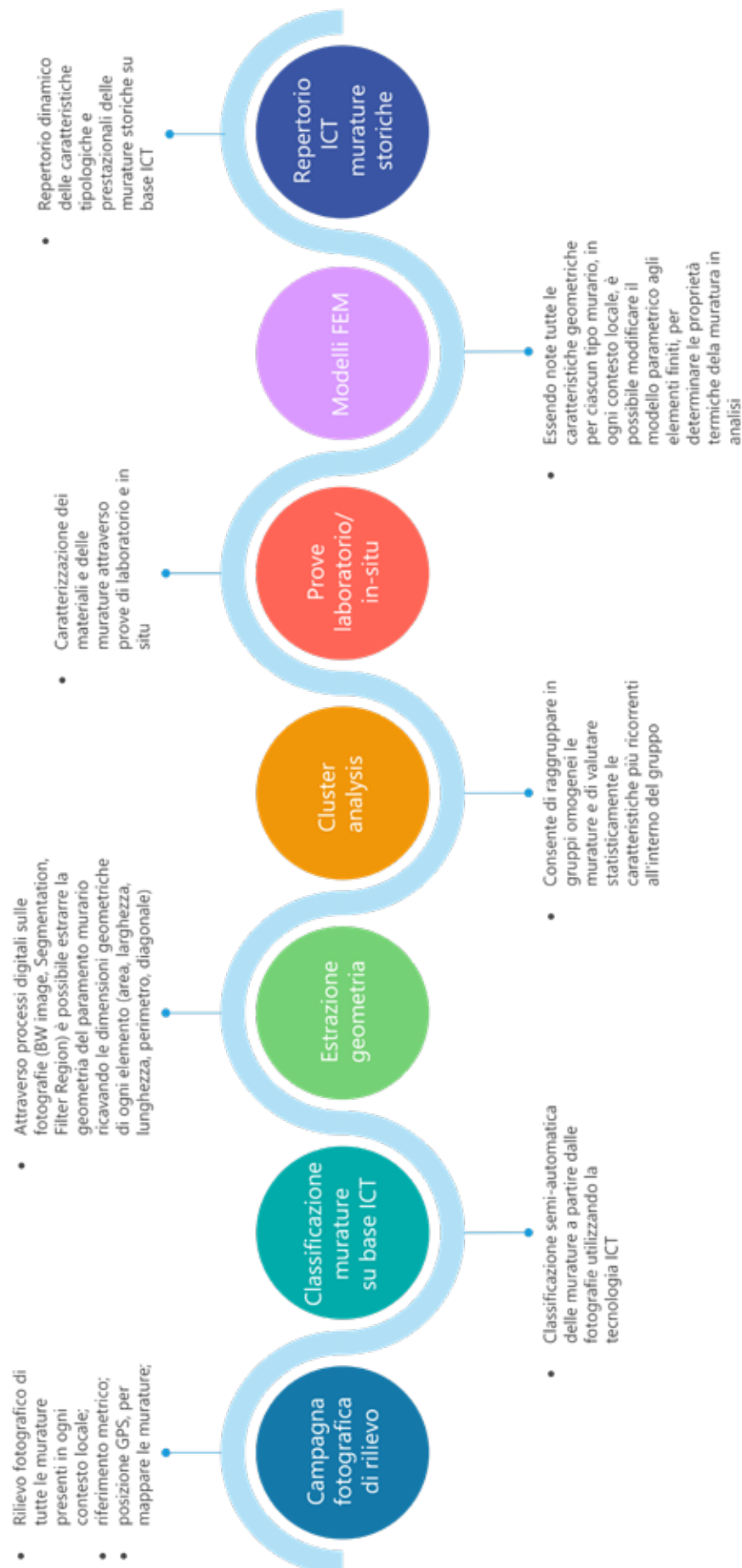
the wall surface. All the information derived from the photographic image is acquired by the repository, making it dynamic and incremental.

Finally, in the last part of the diagram, highlighted in yellow, possible future developments of the research work are identified, such as the definition of corrective parameters that would allow for the qualitative estimation of thermophysical properties through visual analysis of the exposed wall surface. Another potential development could involve the ability to directly export BIM models of the different masonry types from the repository, which could be configured according to various stone materials and geometries.

Note

[1] Pronti per il 55%: per edifici più verdi nell'UE - Consilium n.d. <https://www.consilium.europa.eu/it/infographics/fit-for-55-making-buildings-in-the-eu-greener/#0> (accessed November 20, 2024).

[2] Renovation wave n.d. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en (accessed February 5, 2023).



Introduzione

Ambito di ricerca

Dal punto di vista epistemologico e del metodo scientifico, la presente ricerca, svolta nell'ambito del dottorato di ricerca "Architettura, Arti e Pianificazione", propone un approccio euristico (εὐρίσκω, letteralmente "scopro") per la caratterizzazione tipologica e prestazionale delle murature storiche e lo sviluppo di un repertorio su base ICT. Le verifiche sperimentali, le strategie, le tecniche e i procedimenti applicati hanno infatti progressivamente condotto a risultati non noti al momento dell'originaria elaborazione del progetto di ricerca e hanno consentito di generare nuove conoscenze su un tema molto ampio e di notevole rilevanza dal punto di vista scientifico – ma anche culturale, economico, ambientale e sociale - per alcuni aspetti già ampiamente dibattuto nel corso degli ultimi decenni: il recupero e la valorizzazione del patrimonio edilizio esistente .

Questo ambito di ricerca acquisisce particolare rilevanza in Italia e, a più ampia scala, in Europa, dove l'edilizia esistente rappresenta una quota significativa del patrimonio costruito.

Tale scenario evidenzia l'urgenza di implementare strategie mirate per il recupero, la riqualificazione e l'adeguamento funzionale e prestazionale di questi edifici - specialmente quelli realizzati con tecniche costruttive tradizionali, in particolare in muratura - spesso considerati vulnerabili e inadeguati dal punto di vista prestazionale in termini di comfort abitativo, efficienza energetica, sicurezza strutturale e sostenibilità ambientale alle esigenze contemporanee dell'abitare e pertanto esposti al rischio di abbandono e conseguente distruzione.

Il patrimonio edilizio esistente in Europa, composto in larga parte da edifici storici e minori, è un elemento cruciale non solo per la sua valenza culturale, ma anche per la sua capacità di contribuire al soddisfacimento delle esigenze abitative; la crisi abitativa in Europa investe infatti il 17% della popolazione che vive in spazi non adeguati. [1]

Il recupero del patrimonio edilizio esistente si pone come una necessità per contrastare la crisi abitativa, per ridurre il consumo di suolo minimizzando lo spreco di risorse naturali e preservare le caratteristiche distintive del tessuto urbano. Il recupero degli edifici tradizionali consentirebbe di preservare il valore culturale e storico dei centri abitati, migliorando il contesto ambientale e riducendo la domanda di nuove costruzioni, riducendo di conseguenza il consumo di suolo e di materie prime.

Il tema del recupero edilizio rientra nei principali obiettivi delle politiche europee, tra cui l'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile, il Green Deal europeo e il programma "Renovation Wave" [2]. I piani strategici sottolineano infatti la necessità di intervenire sull'edilizia esistente, non solo per migliorare le prestazioni energetiche e strutturali, ma anche per ridurre le emissioni di gas serra, contribuendo così alla lotta contro il cambiamento climatico. Poiché quasi il 75% degli edifici esistenti è inefficiente energeticamente, è dunque necessario predisporre interventi di riqualificazione energetica su vasta scala. Per gli edifici residenziali il consumo medio di energia primaria dovrebbe ridursi del 16% entro il 2030 e del 20-22% entro il 2035 con l'obiettivo finale di arrivare al 2050 con la totalità degli edifici del parco nazionale ad emissioni zero. Inoltre, il 55% della riduzione energetica dovrà essere conseguito mediante la ristrutturazione di edifici che hanno le prestazioni peggiori.

La ricerca sull'efficienza energetica degli edifici storici ha compiuto negli ultimi decenni significativi progressi, evolvendosi da approcci pionieristici a studi sistematici e metodologicamente rigorosi. Tuttavia, nonostante i risultati ottenuti, persiste la necessità di definire in modo accurato il comportamento e le prestazioni attuali dell'edilizia storica. Questo obiettivo richiede un'analisi approfondita della costruzione, accompagnata da una conoscenza dettagliata dei materiali e dei componenti che la informano, con particolare attenzione alle loro caratteristiche termo-fisiche.

Note

[1] Pronti per il 55%: per edifici più verdi nell'UE - Consilium n.d. <https://www.consilium.europa.eu/it/infographics/fit-for-55-making-buildings-in-the-eu-greener/#0> (accessed 20-11-2024).

[2] Renovation wave n.d. https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/renovation-wave_en (accessed 5-01-2023).

In questo contesto, il focus della ricerca di dottorato si concentra sull'involucro in muratura portante, che rappresenta un elemento cruciale nella valutazione dell'efficienza energetica. Le murature storiche - spesso caratterizzate da una composizione eterogenea e da tecniche costruttive spesso molto diverse anche nell'ambito dello stesso contesto geografico o urbano, oltre ad una frequente stratificazione anche all'interno di un medesimo edificio - presentano spesso, per tale ragione, una serie di incertezze relative alle prestazioni meccaniche e termo-fisiche e, in genere, alla loro risposta alle sollecitazioni ambientali.

La variabilità dei materiali, le differenti modalità di assemblaggio e le patologie che possono interessare le strutture murarie complicano ulteriormente la corretta definizione delle loro prestazioni energetiche e meccaniche.

Se gli studi finalizzati alla caratterizzazione meccanica delle murature possono essere considerati ormai consolidati, le prestazioni energetiche dell'edificio hanno assunto un ruolo rilevante solo in tempi più recenti, soprattutto nel contesto attuale in cui le politiche Europee spingono verso la riqualificazione del patrimonio esistente.

Questo nuovo slancio di interesse scientifico nei confronti dei metodi di valutazione delle caratteristiche e, in generale, della qualità delle murature non solo indirizza in modo coerente con i requisiti richiesti gli eventuali interventi da attuare, ma contribuisce - in particolare - a garantire che tali interventi siano rispettosi delle istanze di conservazione e restauro nel caso di architetture monumentali o di pregio.

Per rispondere a tali esigenze e istanze, è fondamentale un approccio interdisciplinare alla conoscenza delle murature attraverso metodi di indagine che, partendo dagli approcci più tradizionali, integrino analisi fisiche e chimiche dei materiali, misurazioni in situ e in laboratorio delle proprietà termo-fisiche e modelli di simulazione energetica. A tal fine, il repertorio proposto dalla presente ricerca - che integra un database "accrescitivo" delle caratteristiche e delle prestazioni energetiche dei diversi tipi di murature storiche - potrebbe costituire un utile strumento per i progettisti e i tecnici del settore per il progetto di interventi compatibili.

Ciò premesso, sebbene negli ultimi anni l'efficientamento energetico degli edifici storici sia diventato un tema di ricerca sempre più rilevante, è essenziale continuare a esplorare e definire le prestazioni delle murature in relazione alla notevole eterogeneità e specificità derivante dalla differenza dei litotipi utilizzati e delle culture costruttive nei diversi contesti geografici. Solo attraverso un approccio scientifico e multidisciplinare che tenga conto di questa eterogeneità e che sia consapevole della complessità, a fronte delle grossolane semplificazioni spesso derivanti da un'inadeguata conoscenza di questo sistema costruttivo, è possibile sviluppare strategie di intervento che non solo migliorino l'efficienza energetica, ma che rispettino anche il valore storico e culturale di questi edifici, garantendo così la loro fruibilità ed utilizzo, presupposto indispensabile per una conservazione duratura.

Nell'attuale contesto storico, infatti, non è trascurabile il rischio che il patrimonio edilizio esistente sia sottoposto a interventi irrispettosi o addirittura incompatibili con le esigenze della conservazione; nel dibattito scientifico è ormai consolidato il ricorso al concetto di miglioramento prestazionale - che ha superato il concetto di "adeguamento" - non solo nell'ambito strutturale ma anche negli interventi volti all'incremento dell'efficienza energetica. In tal senso, presupposti imprescindibili per interventi di miglioramento prestazionale sono da una parte il recupero e la consapevolezza della rilevanza della dimensione "locale" e della specificità dei contesti costruttivi (ambientali, geografici, geologici, sociali, economici e delle culture tecniche) per interpretare correttamente le peculiarità di ogni costruzione, dall'altra la necessità di inserire ogni caso specifico in un contesto più ampio, individuando relazioni (diffusione di una cultura costruttiva) e ricorrenze (relazione tra uso di un litotipo e soluzione costruttiva-apparecchiatura muraria) che consentano di delineare considerazioni con una valenza più ampia e pervenire a risultati replicabili.

Come specificato, la ricerca sviluppata impiega un approccio metodologico interdisciplinare, dove materie come architettura tecnica, storia delle tecniche costruttive, disegno, rilievo e rappresentazione, fisica tecnica, statistica e informatica, sono in stretta correlazione tra loro. Di conseguenza, è stato necessario individuare diversi macro-ambiti di indagine, che messi a sistema tra loro contribuiscono alla definizione della struttura di quello che può essere considerato l'obiettivo di questa tesi di dottorato: un repertorio dinamico delle caratteristiche tipologiche e prestazionali delle murature storiche su base ICT

(Information and Communications Technologies) per l'acquisizione, l'elaborazione, la gestione e la fruizione automatizzata dei dati e delle informazioni.

Appare a questo punto opportuno definire anche i confini all'interno dei quali la ricerca è stata condotta. La ricerca trae spunto e si sviluppa, in particolare, esaminando il contesto Siciliano, un contesto certamente rappresentativo per la varietà di materiali lapidei naturali disponibili (dalle calcareniti alle quarzareniti, dalle rocce vulcaniche ai gessi) - con proprietà fisiche e meccaniche anche molto diverse - e, di conseguenza, anche particolarmente emblematico per la molteplicità di soluzioni costruttive che declinano in modo differente questa eterogeneità nei vari contesti locali.

Infatti, nell'Isola - in particolare nei piccoli centri delle aree interne e montane in cui la cultura costruttiva è da sempre fondata quasi esclusivamente sulle risorse locali - le architetture in pietra tradizionali riflettono sia le caratteristiche peculiari delle rocce utilizzate sia la cultura e il livello tecnico delle maestranze che le hanno realizzate. Questo ha contribuito a rendere il patrimonio architettonico siciliano estremamente vario dal punto di vista delle soluzioni costruttive e, di conseguenza, rappresentativo rispetto ad un panorama più vasto.

Approccio di ricerca

La ricerca sviluppata rientra principalmente nell'ambito dell'Architettura tecnica, ma si relaziona con la storia delle tecniche costruttive, l'informatica, la statistica, la fisica tecnica. Lo scopo principale della tesi è lo sviluppo di un repertorio dinamico delle caratteristiche tipologiche e prestazionali delle murature storiche su base ICT.

La ricerca si struttura in diversi macro-temi di ricerca:

- la classificazione tipologica delle murature storiche, anche in relazione ai differenti materiali lapidei naturali utilizzati, con un metodo di analisi statistica;
- la caratterizzazione dei materiali lapidei naturali maggiormente utilizzati in ambito siciliano per la costruzione muraria;
- la caratterizzazione termofisica e la caratterizzazione meccanica quali-quantitativa (I.Q.M.) delle murature;
- lo sviluppo di modelli FEM parametrici di murature che consentono di valutare le prestazioni energetiche e meccaniche;
- lo sviluppo di un sistema di riconoscimento semi-automatico delle murature attraverso le immagini su base ICT;
- lo sviluppo del repertorio dinamico delle caratteristiche tipologiche e prestazionali delle murature storiche.

Domande di ricerca

Sebbene durante la ricerca siano emerse ulteriori tematiche e diversi spunti di approfondimento, appare utile evidenziare quali sono state le domande e i presupposti dai quali la ricerca ha mosso e la rilevanza che queste hanno avuto rispetto all'approccio euristico che ha informato la ricerca:

- rispetto allo stato dell'arte, come è possibile migliorare la conoscenza delle prestazioni degli edifici in muratura esistenti?
- è possibile valutare attraverso un'analisi quali-quantitativa le prestazioni termiche di una muratura utilizzando una correlazione tra i parametri geometrico-costruttivi e le proprietà termiche associate?
- in che modo i modelli digitali possono contribuire alla valutazione delle prestazioni energetiche delle murature storiche? Quanto sono affidabili questi modelli? Quali parametri prendere in considerazione in fase di modellazione in relazione alla loro rilevanza? Che tipo di modello è più appropriato (modelli che riproducono in modo più realistico possibile la muratura esaminata o modelli tipologicamente rappresentativi)?
- è possibile sviluppare un sistema di riconoscimento automatico delle murature in grado di associare ad

un'immagine (in particolare dei paramenti) un "tipo" murario?

- è possibile attraverso l'elaborazione delle immagini determinare automaticamente i dati geometrico-dimensionali associati agli elementi costituenti la muratura e il tipo di apparecchiatura muraria?
- rispetto ai repertori "tradizionali", è possibile rendere fruibili le informazioni (dati forniti da Norme Tecniche, lavori scientifici, risultati di prove di laboratorio e in situ, simulazioni FEM, abachi, ecc) inerenti alle murature attraverso un repertorio dinamico e "accrescitivo"?
- in che modo e quanto il recupero del patrimonio edilizio esistente attraverso una valutazione attendibile delle caratteristiche termiche, oltre che meccaniche, delle murature può contribuire al raggiungimento della neutralità climatica auspicata dai piani strategici europei (Agenda 2030, Green Deal, programma "Renovation Wave") nel rispetto delle caratteristiche identitarie e della qualità architettonica?

Rispetto ai numerosi quesiti, la ricerca sviluppata nel corso dei tre anni ha consentito da una parte di dare risposta ad alcuni di questi, dall'altra - anche in relazione al rapido evolversi delle tecniche ICT - ha ridefinito i confini della ricerca stessa.

In particolare, riguardo alle diverse competenze scientifiche coinvolte nello studio, è stato necessario prevedere approfondimenti interdisciplinari specifici, soprattutto per le questioni ancora poco indagate.

Riguardo invece all'ultimo quesito, le istanze derivanti dalle politiche e dai piani strategici europei hanno indirizzato lo studio non solo sul patrimonio architettonico di pregio - nello specifico quello realizzato in muratura - ma anche sull'edilizia "minore" che spesso costituisce il tessuto dei nostri centri storici e ne definisce l'immagine coniugando qualità e identità.

Obiettivi della tesi

Come anticipato, l'obiettivo principale della ricerca dottorale è lo sviluppo di un repertorio dinamico delle caratteristiche tipologiche e prestazionali delle murature storiche su base ICT.

Il repertorio mira alla raccolta sistematica di dati e informazioni relative all'involucro degli edifici in muratura, ponendo particolare attenzione alle prestazioni energetiche e meccaniche, con lo scopo di fornire uno strumento atto alla conoscenza, alla conservazione e al recupero del patrimonio esistente.

Lo studio ha inoltre come obiettivo quello di indagare le potenzialità delle ICT - in particolare i sistemi di riconoscimento automatico delle immagini - al fine di rendere dinamico e implementabile il repertorio, e di valutare se e quanto questi sistemi possano contribuire a ridurre la discrezionalità dell'utente rispetto alla determinazione dei parametri che contribuiscono alla valutazione delle caratteristiche delle murature.

In tal senso, il repertorio potrebbe essere sviluppato come strumento versatile rispetto al target degli utenti che possono accedere semplicemente a dati già disponibili (fruizione statica del repertorio) ovvero implementarlo. Infatti, altro obiettivo della tesi è quello di progettare un repertorio "accrescitivo" attraverso lo sviluppo di un'applicazione in grado di acquisire ed elaborare i dati relativi ad uno specifico paramento murario (fotografie, posizione geografica, ecc.) fornendo come output all'utente le principali caratteristiche della muratura esaminata.

Per raggiungere l'obiettivo principale è stato necessario fissare obiettivi intermedi, utili alla definizione dei dati che confluiscono e sono successivamente resi disponibili nel repertorio dinamico. Primo, tra questi obiettivi intermedi, è definizione di un metodo, quanto più oggettivo possibile e meno influenzato dalle competenze specifiche dell'utente (cluster analysis), per la classificazione tipologica delle murature ("tipi") su base geometrico-costruttiva.

Ai fini dell'implementazione dei dati che confluiscono nel repertorio, un ulteriore obiettivo intermedio è la caratterizzazione meccanica e termo-fisica dei diversi tipi murari individuati, con prove in situ e in laboratorio ovvero con metodi quali-quantitativi e modelli numerici. In particolare, l'attenzione si rivolge principalmente al tema che, rispetto allo stato dell'arte, appare di maggiore originalità: la valutazione attendibile delle performance energetiche delle murature storiche, spesso oggetto di valutazioni grossolane, al fine di indirizzare in modo coerente gli interventi di recupero del patrimonio costruito.

Infine, un ulteriore obiettivo che lo studio si pone è quello di proporre un sistema per estrarre automaticamente informazioni e dati - quali i dati geometrico-dimensionali associati agli elementi costituenti la muratura e al tipo di apparecchiatura muraria - elaborando le immagini di muri con paramento a vista.

Limitazioni e aspettative

Se da una parte la ricerca definisce fondamentalmente una metodologia specifica, che è stata testata in particolare su alcuni casi studio selezionati secondo criteri che saranno di seguito specificati (Capitolo 3), dall'altra – proprio in ragione della possibilità di “alimentare” il repertorio proposto – getta le basi per un lavoro di classificazione più ampio. La ricerca sviluppa infatti un sistema di classificazione semi-automatica delle murature storiche su base ICT, proponendosi come metodo che si integra ai metodi tradizionali di classificazione e che non ha la pretesa di sostituirsi all'analisi diretta di tecnici e operatori specializzati.

Un limite della ricerca potrebbe essere individuato nel fatto che lo studio indaga esclusivamente murature nel contesto Siciliano; la scelta è ovviamente motivata dalla necessità di svolgere numerose ricognizioni e indagini dirette su un numero elevato di casi. Nonostante questa possa apparire un limite, in realtà, come specificato precedentemente, l'ambito geografico scelto per l'indagine è certamente rappresentativo per l'ampia varietà litologica che caratterizza il territorio e che determina fortemente i modi della costruzione muraria. Inoltre, la secolare stratificazione di culture presenti nell'Isola ha informato la capacità delle maestranze locali e ha favorito l'affermazione di soluzioni e tecniche costruttive differenti.

In quest'ottica, è doveroso specificare che il lavoro di ricerca proposto definisce un metodo replicabile che è stato applicato ad alcuni casi studio al fine di verificarne la validità.

Si specifica inoltre che i risultati sperimentali ottenuti dalle prove in laboratorio vanno considerati come una prima campagna di caratterizzazione dei materiali lapidei naturali; si ritiene necessario ampliare il numero di prove di laboratorio da svolgere su un numero consistente di provini, per determinare statisticamente valori attendibili e con un limitato errore di misurazione.

Infine, se il lavoro di ricerca condotto ha definito compiutamente la struttura di un repertorio sulle murature nei termini già specificati, lo sviluppo dell'applicazione in grado di implementare in modo automatico il repertorio stesso è stato condotto fino alla progettazione della struttura logica dell'applicazione stessa, per l'implementazione della quale sono necessari ulteriori approfondimenti e specifiche competenze informatiche.

Organizzazione della tesi e approccio di ricerca

Il primo capitolo definisce uno stato dell'arte con particolare riguardo ai modi della classificazione delle murature attraverso la disamina dei differenti approcci utilizzati e alla loro evoluzione dalla tradizione dei trattati di Architettura fino alla contemporaneità.

Il secondo e il terzo capitolo delineano i presupposti presi a riferimento per la popolazione del dataset, attraverso l'individuazione dei parametri geometrico-costruttivi, e il tipo di analisi statistica utilizzata per la definizione “oggettiva” dei tipi murari nei diversi ambiti geografici-litologici.

Il quarto capitolo illustra la parte sperimentale che è stata condotta per la caratterizzazione termo-fisica dei materiali lapidei naturali che informano le murature dei centri scelti come casi studio.

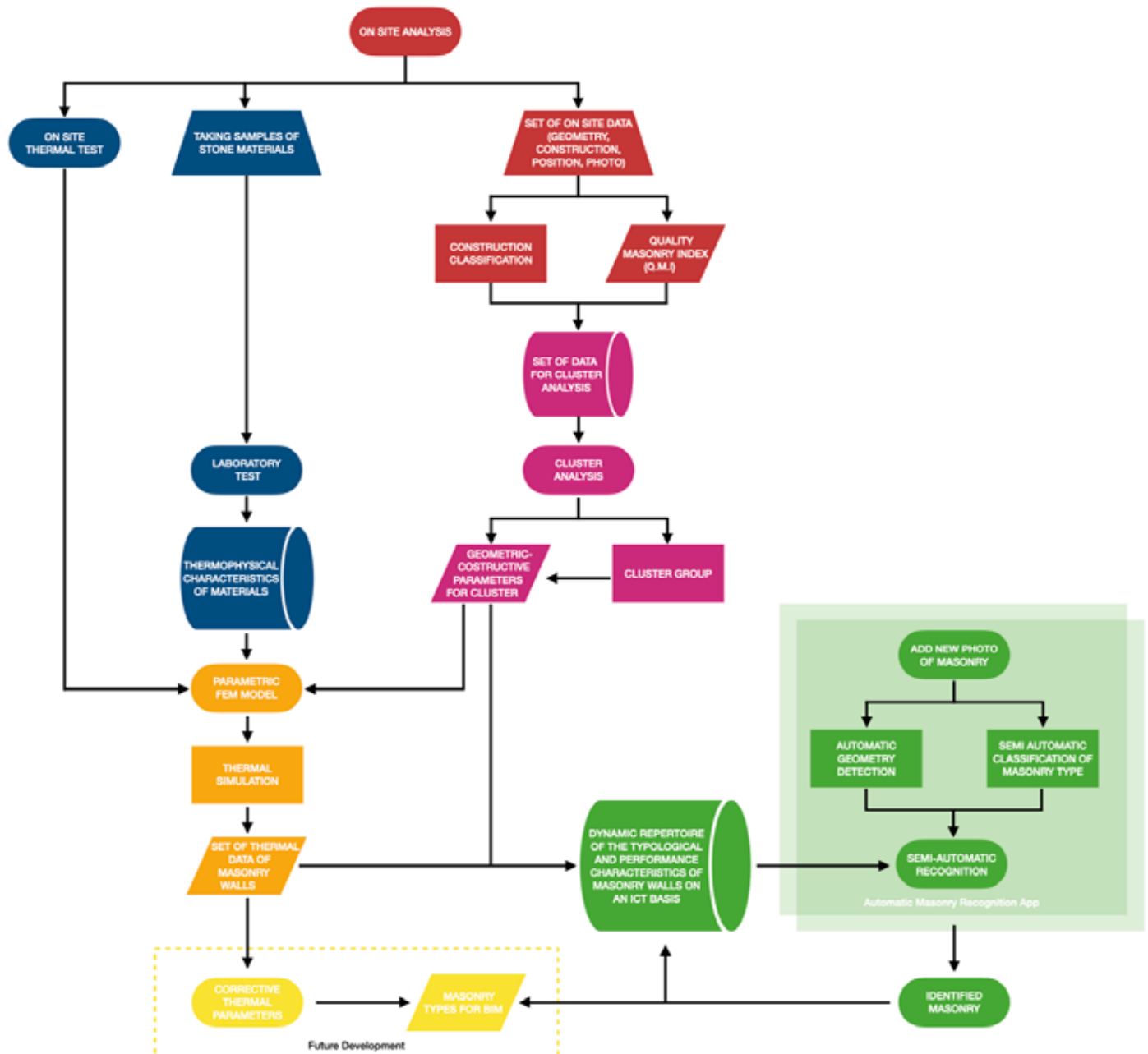
Il quinto capitolo illustra la metodologia utilizzata e i risultati ottenuti attraverso la messa a punto di un modello parametrico progettato con il supporto della Co-Tutor prof.ssa Roberta Zarcone nel periodo svolto all'estero presso École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais - Parigi.

Nel sesto capitolo è definito il sistema di riconoscimento semi-automatico di tipi murari proposto, oggetto della domanda di brevetto N. 102023000023781 depositata in Italia il 10 novembre 2023, a nome dell'Università degli Studi di Palermo con il titolo “Metodo di ricerca semi-automatico di immagini di opere murarie”, estesa a deposito internazionale avvenuto in data 7 novembre 2024 con il n° PCT/IB2024/061030.

Il settimo capitolo, con le conclusioni, precisa le potenzialità applicative presenti e future del repertorio dinamico, definisce le possibili categorie di utenti e le ricadute applicative.

In appendice sono riportate le schede riassuntive di alcuni casi studio approfonditi nella ricerca. Le schede analizzano i tipi murari riscontrati in alcuni contesti locali, riassumendo le informazioni più significative.

Quadro teorico



Lo schema illustra le tematiche di ricerca approfondite nel presente lavoro mostrando le connessioni logiche che si sono sviluppate nel corso della ricerca.

La prima parte, riportata in rosso nello schema, mostra le attività – condotte in parallelo con lo studio dello stato dell'arte - condotte per l'analisi in situ. Questa operazione, svolta dopo un attento approfondimento del contesto locale, prevede i rilievi geometrico-costruttivi, tipologici, e fotografici. La raccolta dei dati in situ e la successiva elaborazione sistematica permettono l'individuazione e la classificazione dei tipi murari riscontrati e l'estrapolazione manuale dei parametri quali-quantitativi utili alla creazione del dataset oltre che alla valutazione dell'indice di qualità muraria (caratterizzazione meccanica).

Tutti i dati raccolti confluiscono in un dataset strutturato che rappresenta la base per la successiva elaborazione statistica tramite cluster analysis; questa consente in primo luogo di raggruppare in gruppi omogenei (cluster group) i tipi murari e permette, inoltre, l'individuazione dei parametri geometrico-costruttivi maggiormente ricorrenti per ogni cluster. Le analisi statistiche permettono di ridurre la soggettività dell'utente nell'individuazione del tipo murario poiché si basano sulla valutazione dei dati quali-quantitativi presenti nel dataset, rendendo la classificazione tipologica semi-automatica.

La seconda parte, riportata in blu nello schema, individua la tematica relativa alla caratterizzazione dei materiali lapidei naturali e delle murature secondo gli aspetti termo-fisici. Se da un lato lo svolgimento di prove sperimentali in situ consente di indagare le proprietà termiche di una muratura in opera nella sua intera sezione costruttiva, dall'altro è necessario caratterizzare le proprietà dei materiali lapidei naturali impiegati nelle costruzioni, attraverso indagini di laboratorio al fine di ottenere dati sperimentali come la conducibilità termica e la densità apparente. Si sottolinea che nel corso della ricerca sono state condotte un numero limitato di indagini diagnostiche in opera sulle murature, sia per le difficoltà oggettive derivanti dalle condizioni ambientali (prove da eseguire in periodo invernale), sia per i tempi molto lunghi richiesti dalle prove (almeno due settimane) e la disponibilità di un numero limitato di strumenti per eseguire le prove stesse (temoflussimetri). Per tale ragione, per soddisfare l'esigenza di una valutazione attendibile delle proprietà termiche delle murature, si è proceduto con la modellazione digitale di modelli FEM di murature al fine di simulare la risposta alle sollecitazioni termiche.

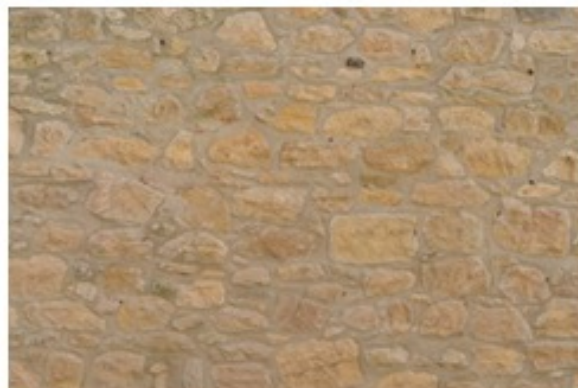
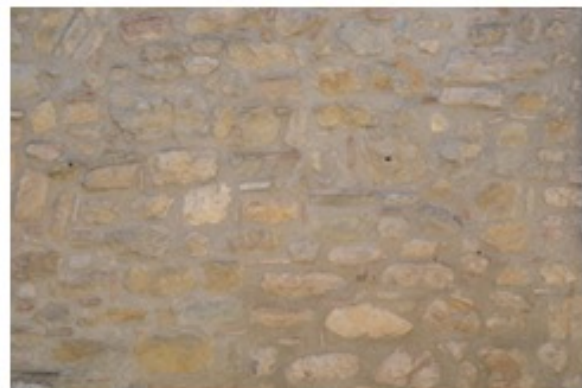
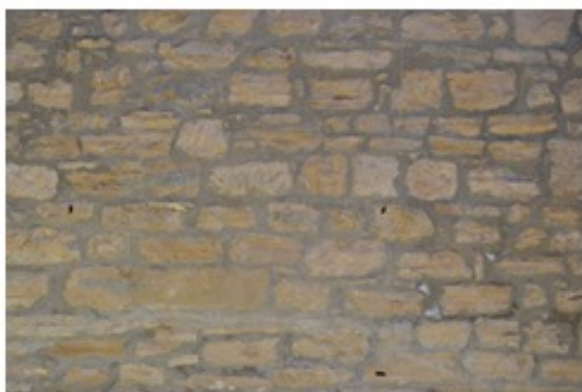
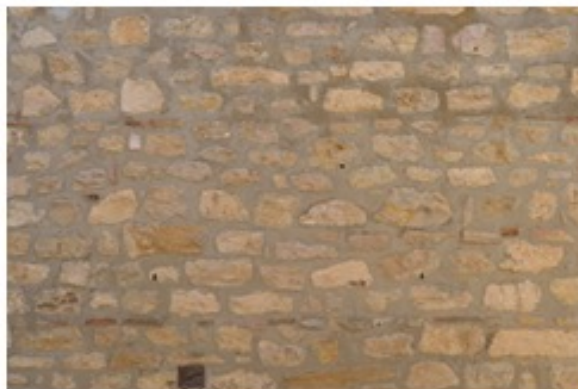
In arancione si riportano le fasi della modellazione FEM. La geometria dei modelli FEM si basa sui tipi murari precedentemente indagati, e si svolge dopo aver identificato i parametri geometrico-costruttivi maggiormente ricorrenti del tipo tramite la cluster analysis; inoltre, le proprietà materiche da associare ai modelli derivano dalla caratterizzazione termo-fisica dei materiali lapidei naturali svolta in laboratorio. Infine i modelli FEM sono calibrati tramite i dati misurati in situ attraverso lo svolgimento di prove sperimentali sulle murature, al fine di ottenere modelli validi da un punto di vista termico.

I risultati delle simulazioni termiche costituiscono una raccolta di dati termici relativi alle murature; i dati ottenuti confluiscono - insieme ai dati geometrico-costruttivi determinati dalla cluster, alle caratteristiche termiche, fisiche e meccaniche delle murature - nel repertorio dinamico delle caratteristiche tipologiche e prestazionali delle murature.

L'ultima tematica di ricerca approfondita, rappresentata in verde nello schema, è il repertorio dinamico delle caratteristiche tipologiche e prestazionali delle murature su base ICT.

Il sistema di riconoscimento semi-automatico delle murature permette di individuare il tipo di muratura analizzando le immagini fotografiche; il sistema una volta acquisita la nuova immagine fotografica della muratura la confronta con le immagini presenti all'interno del repertorio e la associa al tipo murario. Inoltre, il sistema individua automaticamente la geometria degli elementi e permette di estrarre i dati quantitativi associati al paramento. Tutte le informazioni ricavate dall'immagine fotografica vengono acquisite dal repertorio rendendolo dinamico e accrescitivo.

Infine, nell'ultima parte dello schema, evidenziato in giallo, si individuano dei possibili sviluppi futuri del lavoro di ricerca come la definizione di parametri correttivi che permettano di stimare qualitativamente le proprietà termo-fisiche attraverso l'analisi visiva del paramento a vista. Un ulteriore sviluppo può essere ipotizzato riguardo alla possibilità di esportare direttamente dal repertorio modelli BIM dei diversi tipi murari, configurabili in funzione dei diversi materiali lapidei e della geometria.



CAPITOLO 1

METODI DI CLASSIFICAZIONE DI TIPI MURARI

Methods of Classification of Masonry wall Types



Abstract

This chapter presents a comprehensive analysis of masonry construction techniques, emphasizing the necessity for a multidimensional understanding of masonry to fully grasp its functional and mechanical aspects. The purely typological approach to masonry classification was critically analyzed, advocating for a system that integrates historical construction techniques and site organization. The proposed classification is based on constructive and functional systems, which highlights the mechanical properties of masonry involving the entire cross-section. A distinction is made between internal and external facings, acknowledging their differing processing methods.

The research underscores the intrinsic relationship between materials and construction techniques, noting that more complex construction sites correspond to higher economic capabilities, allowing for the use of materials sourced from distant locations. Conversely, simpler constructions often utilize local stone, reflecting a selective recovery of high-quality materials. The classification framework presented offers insights into the typical construction methods of Palermo's eighteenth-century architecture, emphasizing the critical role of professionals such as engineers, architects, and masons in selecting appropriate techniques and materials to ensure structural functionality.

Furthermore, this document discusses the evolution of masonry techniques, influenced by technological innovations, the discovery of new materials, natural disasters, and climate change. This evolution is characterized by non-linear progress, necessitating a multidisciplinary interpretation of local specifics. In Italy, recent regulatory changes, particularly the 2018 Technical Standards for Construction (NTC), reflect a long-standing mutation process in the classification and systematization of masonry characteristics.

This research also proposes a systematic analysis of the materials used, supported by geological studies and laboratory tests aimed at identifying natural stone materials and characterizing their thermophysical properties. This systematic data collection facilitates a statistical classification based on quantitative and qualitative parameters, contributing to a deeper understanding of historical masonry crucial for its conservation and enhancement in contemporary architecture.

Finally, the methodology developed in this research lays the groundwork for creating a dynamic repository of typological and performance characteristics of historical masonry, leveraging ICT technologies. This approach aims to promote systematic knowledge sharing regarding historical masonry, enhancing access to technical information for professionals in the field. The establishment of a dedicated platform will not only facilitate data collection and cataloging but also disseminate best practices and innovative methodologies for restoration interventions.

Tav. 1.

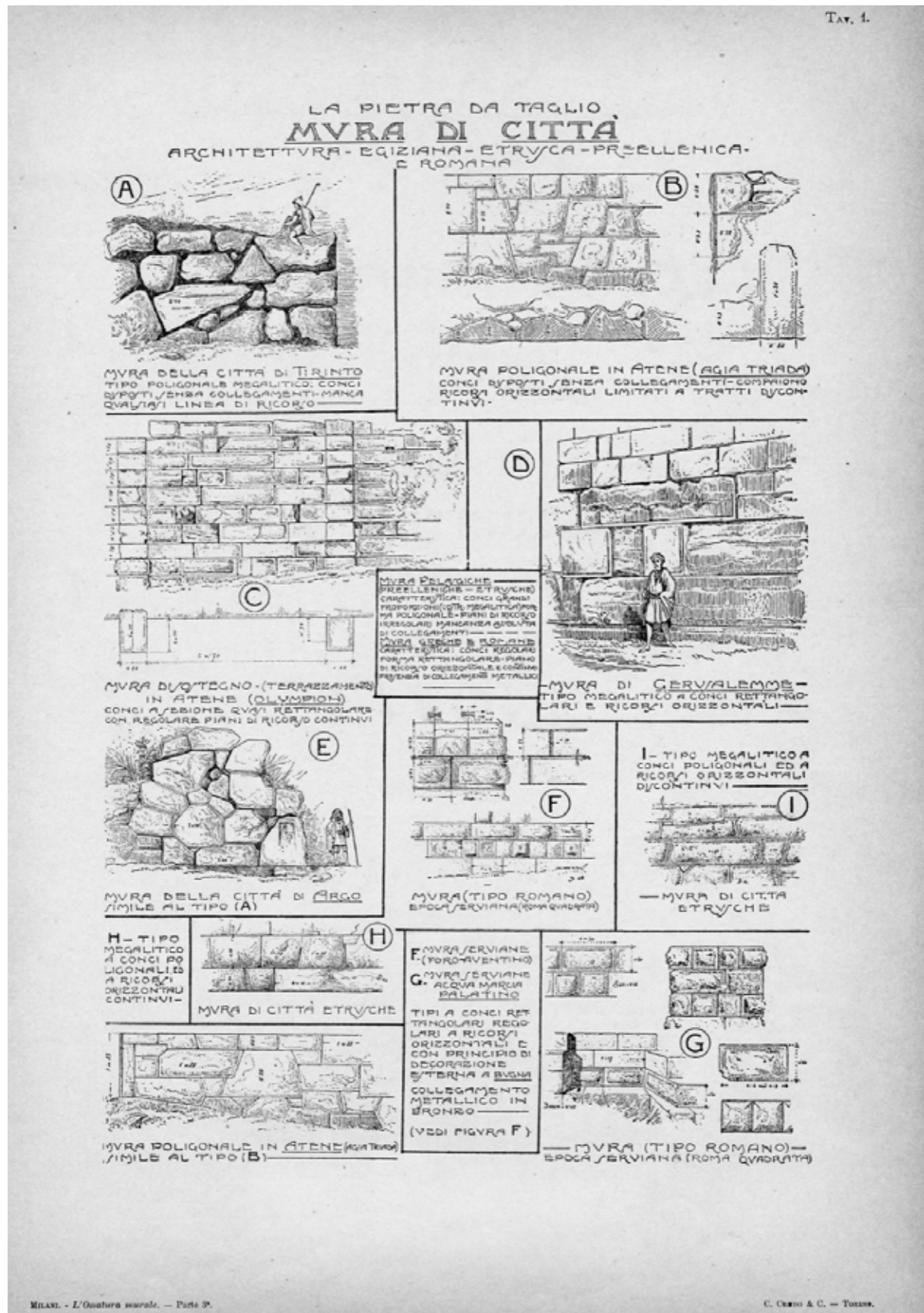


Fig. 1. 1 La pietra da taglio, mura di città © Milani GB (1925) L'ossatura murale. S. Lattes & C. Editori, Torino.

1.1 CLASSIFICARE I TIPI MURARI: DALL'APPROCCIO "EVOLUTIVO" ALL'APPROCCIO COSTRUTTIVO-PRESTAZIONALE

Alla fine del Settecento, l'approccio "archeologico" allo studio delle murature ha consolidato un metodo di sistematizzazione dei tipi murari fondato su un'interpretazione evolutiva lineare, ripresa dai Trattati di Architettura, che privilegia in modo quasi esclusivo la tecnica costruttiva romana. L'interpretazione evolutivo-lineare continuerà a trovare conferma anche nella letteratura tecnica della prima metà del XX secolo; ad esempio, nell'opera di Giovan Battista Milani (Milani 1925) l'interesse verso il rapporto tra struttura e forma - nella costruzione muraria in particolare - è esteso ad un contesto cronologico più ampio, ma comunque strettamente correlato al mutare del linguaggio architettonico in termini storico-cronologici (Fig. 1.1). Esaminando le strutture murarie, infatti, Milani indaga i caratteri costruttivi e classifica le murature in base agli stili architettonici: partendo dalla costruzione greca e romana, amplia la trattazione ai periodi successivi. Riguardo alle murature gotiche, ad esempio, evidenzia come queste coniugassero la funzione statica con quella decorativa; infatti, i conci lapidei venivano tagliati con forme determinate e messe in opera secondo gli schemi progettuali. Durante il Rinascimento, erano utilizzate le pietre grezze per la costruzione del nucleo resistente (funzione statica) e le pietre lavorate venivano impiegate come strato di finitura (funzione decorativa). Questo inedito approccio alla classificazione riflette l'importanza attribuita al rapporto tra materiale e forma rispetto alla funzione da svolgere. L'autore propone un'ulteriore classificazione in relazione agli elementi costituenti - individuando quelli principali e quelli di collegamento - e introducendo due tipi di muratura: l'ossatura muraria in pietra da taglio e l'ossatura muraria in pietra artificiale o naturale. Le murature in pietra da taglio sono prive di malta e la trasmissione dei carichi viene garantita dal contatto tra le superfici perfettamente piane degli elementi e la capacità strutturale è assicurata dalla qualità della pietra da taglio e dalla sua messa in opera. Nell'altro tipo di muratura la malta svolge un ruolo importante, di coesione e collegamento tra le pietre, rendendo omogeneo il nucleo resistente.

Se l'opera di Milani è uno degli ultimi testi della prima metà del '900 che tratta dal punto di vista statico-costruttivo il tema delle murature; al contrario, gli studi improntati ad un approccio specialistico di tipo archeologico continueranno ad avere grande diffusione e successo anche in tempi più recenti: si citano per tutti i testi fondamentali di Giuseppe Lugli (1957) e Jean-Pierre Adam (1988) che riflettono chiaramente il metodo teorico-scientifico nello studio della costruzione muraria che caratterizza la disciplina dell'archeologia classica.

Solo a partire dagli ultimi decenni del XX secolo - a seguito di un rinnovato interesse nei confronti del patrimonio costruito in muratura, non solo di tipo monumentale, e a una maggiore consapevolezza rispetto alla sua vulnerabilità, specificatamente nei confronti dell'azione sismica - parallelamente all'indirizzo metodologico di tipo "archeologico" ha cominciato a delinearsi una visione più orientata agli aspetti costruttivo-prestazionali, che focalizza l'attenzione sulla "qualità" della muratura. Ciò ha condotto ad una lettura delle murature come sistema complesso, correlato alla variabilità del contesto ambientale, economico e culturale in grado di produrre una notevole eterogeneità di soluzioni e specificità anche in ambiti circoscritti.

Questo nuovo approccio evidenzia come nel campo delle tecniche costruttive - tra i fenomeni che da sempre hanno determinato in modo più repentino e radicale un cambiamento - l'innovazione tecnologica, la scoperta di nuovi materiali, le catastrofi naturali e, argomento di grande attualità, i cambiamenti climatici siano stati da sempre e continuano ad essere tra i principali attivatori di quelle "mutazioni genetiche" che hanno

provocato un salto improvviso nel processo evolutivo della costruzione muraria.

In tal senso, il passaggio dall'idea di un'evoluzione lineare della tecnica muraria a quella di un'evoluzione/regressione a salti trova conferma proprio in questi studi più recenti che, a partire dalla rinnovata attenzione per il patrimonio edilizio minore, focalizzano l'attenzione sulle specificità locali e, soprattutto, promuovono la necessità di un'interpretazione multidisciplinare.

In particolare in Italia, le importanti ricadute che hanno condotto ad una rivoluzione del quadro normativo, in particolare le NTC (2018), riguardo all'istanza di sicurezza statica - soprattutto a seguito degli eventi sismici degli ultimi decenni - riflettono questo processo di mutazione avviata già da tempo nell'ambito della ricerca sui criteri di "classificazione" e sistematizzazione delle caratteristiche materiche, costruttive e meccaniche delle murature storiche del patrimonio edilizio, prescindendo dalla rilevanza del singolo edificio a vantaggio di una più ampia visione del "contesto".

Questo cambiamento è stato agevolato anche dal mutato approccio delineato dalle teorie del restauro e dalla conseguente evoluzione del concetto di "patrimonio", che ha progressivamente spostato l'attenzione dal concetto ottocentesco di "monumento" a quello di contesto e, di conseguenza, all'idea di "identità locali" anche in termini costruttivi.

Nel corso del Novecento, infatti, dal concetto di "monumento" di ottocentesca istituzione – correlato anche alla promozione della nascente identità nazionale - si è passati a quello di "ambiente urbano o paesistico che costituisca la testimonianza di una civiltà particolare, di un'evoluzione significativa o di un avvenimento storico" (Carta di Venezia 1964), "ai complessi di edifici d'interesse monumentale, storico o ambientale" (Carta del restauro, 1972), a quello di "città storica", (Carta di Washington 1987), e infine a quello di "paesaggio" come "determinata parte di territorio, così come è percepita dalle popolazioni, il cui carattere deriva dall'azione di fattori naturali e/o umani e dalle loro interrelazioni" (Consiglio europeo 2000).

Pertanto, se dal punto di vista teorico è ormai consolidata una visione sistemica e più ampia di "patrimonio costruito" - che correla aspetti materiali e immateriali, come nel caso delle costruzioni storiche, esito della cultura tecnica, delle risorse materiali disponibili e delle istanze economico-sociali che connotano un ambiente in un determinato periodo storico - in parallelo sono stati introdotti, con ricadute sul piano normativo e tecnico, nuovi approcci per la tutela e la conservazione. Questo processo ha trovato concreto riscontro nel superamento della prassi della "tutela passiva" e nell'introduzione del concetto di "tutela attiva" fondata su un'inedita accezione di bene culturale "quale testimonianza materiale avente valore di civiltà" (Commissione Franceschini 1967). La "tutela attiva" promuove da una parte interventi mirati alla "conservazione integrata" su base interdisciplinare (architettura, ingegneria, archeologia) che tengono conto sia degli aspetti propriamente tecnici sia della proposta di funzioni compatibili (Dichiarazione di Amsterdam 1975), dall'altra la valorizzazione finalizzata essenzialmente ad un incremento della conoscenza e ad una fruizione sostenibile (Codice dei beni culturali e del paesaggio 2004). In tal senso sono orientati anche i documenti più recenti prodotti nel panorama internazionale; nella Carta di Cracovia (2000), ad esempio, si ribadisce che "la conservazione è l'insieme delle attitudini della collettività volte a far durare nel tempo il patrimonio ed i suoi monumenti. Essa si esplica in relazione ai significati che assume la singola opera, con i valori ad essa collegati"; nella "Convenzione-Quadro del Consiglio d'Europa sul valore del patrimonio culturale per la società" (Faro 2005) e nella più recente (ICOMOS 2008), che si basano su un'interpretazione sociale della questione, ponendo come presupposto che la conoscenza e l'uso del patrimonio rientrino nel diritto di partecipazione dei cittadini alla vita culturale.

Da queste premesse la ricerca svolta si pone come obiettivo, tra gli altri, individuare

in modo quanto più oggettivo possibile queste caratteristiche ricorrenti nelle murature siciliane (tipi ricorrenti) e riuscire a quantificarle per valutarne la qualità. Lo studio ha pertanto preso spunto da una considerazione preliminare: quali caratteri nella costruzione tradizionale, e in particolare nella costruzione muraria, contribuiscono a definire l'identità di un contesto non solo dal punto di vista dell'immagine ma anche dal punto di vista costruttivo; se da una parte l'identità è infatti certamente riferibile all'unicità di alcune opere architettoniche - si pensi ai monumenti che diventano spesso "identitari" rispetto a città o luoghi - dall'altra c'è un altro tipo di identità, quella che crea delle assonanze e rende riconoscibili alcune caratteristiche ricorrenti all'interno di un contesto materico-costruttivo omogeneo. Un'identità che sempre più spesso identifica la qualità dei centri storici, soprattutto dei centri minori, e della costruzione tradizionale che li informa.

In termini più generali, la domanda che ci si è posti è: è possibile identificare, misurare e quantificare oggettivamente questa "identità" delle murature?

Per rispondere a tale quesito, si è partiti da una ricognizione dei diversi metodi per la classificazione e caratterizzazione delle murature storiche.

1.2 PER UNA DEFINIZIONE DEI CARATTERI IDENTITARI DEL PATRIMONIO COSTRUITO IN PIETRA. LA CLASSIFICAZIONE DELLE MURATURE COME PRESUPPOSTO PER LA CONOSCENZA, CONSERVAZIONE E VALORIZZAZIONE DEL PATRIMONIO COSTRUITO

Da quanto scritto in precedenza appare evidente come gli approcci per la classificazione e caratterizzazione delle murature finora proposti, fondamentalmente informati e improntati ad ambiti di ricerca o a competenze tecnico-scientifiche specifiche, hanno perseguito finalità spesso molto diverse.

Come anticipato, se un primo contributo alla questione è stato certamente fornito dagli studi volti a sistematizzare dal punto di vista "storico-archeologico" i diversi tipi murari, documentandoli cronologicamente e in relazione ai diversi linguaggi architettonici, un secondo più recente contributo ha orientato l'interesse verso gli aspetti materico-costruttivi, in particolare sulle caratteristiche dell'apparecchiatura e le proprietà fisico-meccaniche al fine di indirizzare le scelte progettuali verso interventi di recupero rispettosi della qualità e del valore storico, anche in relazione alle criticità e alle vulnerabilità evidenziate in occasione degli eventi sismici degli ultimi decenni che hanno drammaticamente evidenziato la fragilità di molti centri storici (Giuffrè 1991, Giuffrè 2006).

Basandosi sullo stato dell'arte - descritto in questo capitolo - uno degli obiettivi che la presente ricerca si è posta, riguardo alla classificazione e alla metodologia da adottare per l'individuazione dei parametri di riferimento per una descrizione dei "tipi murari", è quello di implementare un sistema di schedatura (trattato nel cap. 2) nel quale i dati (caratteristiche materico-costruttive, geometriche, fisiche e meccaniche) possano essere acquisiti non solo in modo "tradizionale" attraverso sistemi di rilievo e prove sperimentali consolidati, ma anche attraverso metodi di *machine learning* (caratteristiche geometriche e dati dimensionali).

Il dataset potrà infine essere elaborato attraverso un processo di cluster analysis per individuare le caratteristiche statisticamente ricorrenti e individuare, di conseguenza, "tipi" murari oggettivamente rappresentativi. Infine, come sarà chiarito nei capitoli successivi, tutti i dati sistematizzati costituiranno un repertorio fruibile attraverso una piattaforma per la valutazione della qualità muraria nel senso più generale (qualità costruttiva, meccanica e caratteristiche energetiche) e implementabile.

1.3 DAI TRATTATI ALLA SISTEMATIZZAZIONE GEOMETRICO-COSTRUTTIVA: CONOSCERE PER RI-CONOSCERE

In passato i Trattatisti hanno esplorato nelle proprie opere la costruzione in pietra con un rigore metodologico e un approccio analitico che quasi sempre tratteggia un chiaro parallelismo con l'evoluzione del linguaggio architettonico, privilegiando soprattutto gli aspetti tecnico-costruttivi ed estetico-formali.

Per citare solo i casi più emblematici, Marco Vitruvio Pollione nel "De Architectura" offre una classificazione delle murature, fondamento della disciplina architettonica, in base a due criteri: il materiale utilizzato e la tecnica costruttiva. Le murature in pietra o in mattoni, simbolo di solidità e durabilità, sono esaltate per la loro resistenza e per la varietà litologica delle pietre. Vitruvio approfondisce anche le tecniche murarie, classificando i diversi tipi di "opus", e sottolineando l'importanza del rispetto delle regole del buon costruire.

Anche Leon Battista Alberti nel "De re aedificatoria" offre una classificazione delle murature che riflette la matura consapevolezza rinascimentale dello stretto rapporto tra materia e forma. Egli distingue le murature in base ai materiali utilizzati, enfatizzando l'importanza della qualità della pietra, del mattone e della malta. La pietra, simbolo di eternità e solidità, è esaltata per la sua resistenza e bellezza, mentre il mattone, più versatile e facilmente lavorabile, è lodato per la sua capacità di adattarsi a diverse forme architettoniche. Alberti analizza anche le tecniche costruttive, evidenziando l'importanza della disposizione dei materiali e della qualità della malta, che deve garantire coesione e stabilità. Così come per Vitruvio, anche per Alberti le murature devono rispondere alle esigenze strutturali, ma al contempo devono esprimere un'armonia estetica, riflettendo i principi di proporzione e simmetria.

Per passare al contesto siciliano, di specifico interesse per la presente ricerca, nel XVIII secolo Giovanni Amico ne "L'Architetto pratico" (Amico 1726) riprende un precetto di Vitruvio che evidenzia un approccio localistico al tema della costruzione e la rilevanza di una conoscenza delle specifiche caratteristiche dei materiali disponibili in un determinato luogo:

«Secondo i precetti di Vitruvio lib. 2. cap. 2., prima d'ogn'altro è necessario: nell'Edificazione, che l'Architetto sia ben pratico del Materiale d'ogni paese, che si trova atto alle fabbriche, perchè si trova sempre diverso fecondo la varietà, e natura de' luoghi; pertanto, bisogna cavare questa cognizione dall'uso, dall'esperienza, e da pratici del luogo, ove si deve alzare l'Edificio».

Riguardo la "maniera di murare", G. Amico propone una classificazione basata sempre su sei tipi di opus romani: la maniera "reticulata", "incerta", "quadrelli o mattoni" con nucleo interno in conglomerato, "di cementi" (in getto con listature in mattoni), "di pietre quadrate e ben incatenate", "a cassa". Non manca, inoltre, un riferimento alla consuetudine costruttiva siciliana:

«In Sicilia s'usano per lo più le murature di pietre incerte, e quadrate alla rustica, riempiendosi li vani con pietre minute, e malta di calcina ben calcate colli martelli».

Riguardo l'apparecchiatura muraria, Amico richiama alcune regole del buon costruire, la disposizione dei conci con le "vene" e i piani di sedimentazione disposti in orizzontale per far sì che la pietra "non si apra", la disposizione a giunti sfalsati e la riduzione dello spessore del giunto di malta.

Nel XIX secolo, Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc (Viollet-le-Duc 1858) - sostenitore della

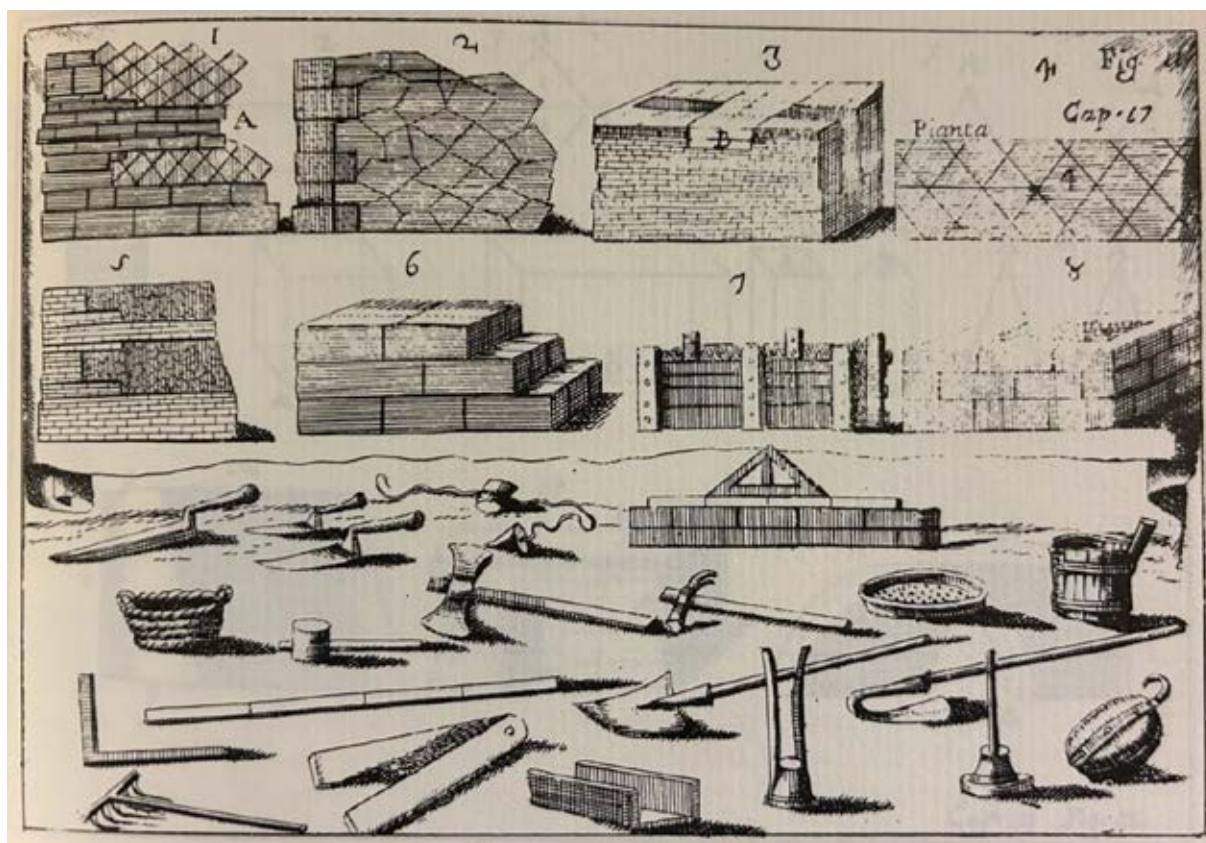


Fig. 1. 2 Opus romani © Amico G (1726) L'Architetto pratico. Stamperia di Gio: Battista Aiccardo, Palermo

necessità di una coerenza tra materiali, struttura e forma – nel suo *Dictionnaire Raisonné de L'Architecture Française*, non dedica tuttavia una voce specifica alla *maçonnerie*, rimandando alla più generale voce *construction*, all'interno della quale riprende la consolidata contrapposizione tra tecnica costruttiva greca e tecnica romana, seguita da considerazioni che ripercorrono nella trattazione un'impostazione di tipo storiografica.

È inoltre importante sottolineare come nei trattati l'attenzione sia quasi esclusivamente rivolta ad edifici emblematici. Questo riflette una gerarchia nella rilevanza attribuita agli edifici, dove le architetture monumentali sono considerate anche come il fulcro della pratica costruttiva. L'importanza dell'architettura minore emergerà in modo più significativo a partire dal periodo della rivoluzione industriale, nel XIX secolo. Durante questa fase, si assiste a un cambiamento nelle pratiche edilizie e nella percezione dell'architettura, con un crescente interesse per le costruzioni residenziali, le strutture rurali e gli edifici di uso quotidiano e con un'attenzione crescente alle tecniche costruttive e sui materiali, riflettendo un cambiamento nella percezione dell'architettura e delle sue funzioni nella società.

Dalla fine del XIX secolo, come è noto, all'interesse per la muratura portante comincia ad affiancarsi quello per nuovi sistemi costruttivi – in ferro prima (Roisecco 1972) e in calcestruzzo di cemento armato dopo. Inoltre, la presunta inaffidabilità strutturale della muratura, soprattutto nel caso dell'edilizia minore, sarà avvalorata dalle conseguenze disastrose del sisma di Messina del 1908, alimentando in tal modo un pregiudizio che condurrà nel secondo dopoguerra alla diffusione quasi esclusiva dei sistemi costruttivi a struttura intelaiata, a demolizioni sconsiderate o ad "adeguamenti" incolti e, come esito finale, ad un progressivo disinteresse nei confronti della costruzione in muratura portante a tal punto da ridurre solo a pochi cenni la trattazione su questo tema nei manuali, nei trattati e nella letteratura tecnica.

È sintomatico, a riguardo, come anche i testi fondamentali per la formazione degli Ingegneri e degli Architetti, ancora alla fine degli anni '70, trattino in modo sintetico l'argomento muratura. L'opera "Edilizia" di Enrico Mandolesi (1978) dedica pochi cenni al tema delle pareti esterne portanti in pietra; il tema troverà però una più ampia trattazione nelle lezioni di Mandolesi, come dimostra la raccolta di dispense di "Architettura tecnica" dal titolo "Configurazione verso l'esterno dell'organismo architettonico" per i corsi della Facoltà di ingegneria dell'Aquila. In particolare, i setti murari portanti - in rapporto alla conformazione che può assumere l'elemento costruttivo di base in pietra - sono classificati in base a due criteri costruttivi: sovrapposizione e giustapposizione "a cumulo" (pietrame informe o irregolare) e sovrapposizione e giustapposizione "in piano" (conci). Inoltre, riprendendo un approccio alla classificazione consolidato, basato sul rapporto tra forma degli elementi costituenti e apparecchiatura costruttiva, sono individuate nell'ampia casistica tipologica due grandi famiglie: le murature a secco (murature costituite da trovanti o ciottoli di fiume; murature a scheggioni, scapoli o similari; murature ciclopiche o megalitiche; murature isodome) e le murature con malta, considerate un'evoluzione delle murature a secco. I tipi di murature con malta individuati sono:

- a) opera incerta in scheggioni e scapoli di pietrame, irregolari lavorati "a spacco";
- b) opera incerta in ciottoli di fiume, arrotondati e spesso con faccia appiattita;
- c) opera incerta mista in pietrame e ciottoli di fiume;
- d) opera incerta poligonale di conci poliedrici irregolari con lavorazione "a spacco";
- e) opera incerta di elementi piatti irregolari che consentono una posa secondo piani orizzontali, tipica delle murature realizzate con materiale scistoso;
- f) opera incerta in conci parallelepipedi irregolari caratterizzati da volumetria fortemente differenziata;
- g) opera squadrata in conci parallelepipedi con diversa dimensione posati in opera in piano ma sfalsati, senza la creazione di ricorsi continui;
- h) opera squadrata in conci parallelepipedi con diversa altezza e di lunghezza pari o non, disposti "in piano" determinando ricorsi orizzontali di diverso spessore;
- i) opera squadrata in conci parallelepipedi unificati, detta isodoma.

Con lo stesso approccio, negli anni '80, nel testo "Architettura tecnica" di Caleca (1998) le murature sono classificate in funzione dei materiali impiegati, delle caratteristiche geometriche e delle tecniche costruttive (pietrame informe, pietra squadrata, muri in conglomerato, muri di mattoni pieni in laterizio, a struttura mista).

Nell'ultimo decennio del XX secolo, contestualmente alla pubblicazione dei primi "Manuali di recupero dei centri storici" e dei "Codici di pratica", si afferma un approccio alla conoscenza delle murature - spesso a scala locale, a conferma di una imprescindibile specificità della costruzione in pietra - che basa la sistematizzazione dei "tipi" sulla relazione tra caratteristiche geometrico-costruttive ed efficacia strutturale.

La configurazione e la morfologia degli elementi architettonici, infatti, rivestono un ruolo di primaria importanza, in quanto plasmano e orientano le diverse fasi del processo costruttivo, contribuendo così alla definizione delle soluzioni tecnologiche più idonee per una costruzione in pietra. In più, questa interazione tra forma e funzione si rivela essenziale, poiché ogni elemento non solo consente la realizzazione di strutture solide e durature, ma "comunica" l'identità dei contesti utilizzando il linguaggio architettonico ed esprimendo valori estetici: attraverso la sua articolazione formale, l'architettura diventa

un linguaggio simbolico. Come ribadito nella già citata Carta di Cracovia del 2000, le forme architettoniche, pertanto, non sono meri elementi decorativi; esse incarnano idee, raccontano storie e riflettono la cultura di una società, rendendo l'architettura un vero e proprio manifesto visivo del pensiero umano e della sua evoluzione nel tempo. In tal modo, l'importanza della forma trascende la mera funzionalità, erigendo un ponte tra la materia e l'immateriale, il visibile e l'invisibile.

Di seguito vengono riportati, per un'esemplificazione necessariamente non esaustiva, alcuni proposte di classificazione elaborate da alcuni autori che hanno approfondito nei termini sopra specificati il rapporto costruzione-qualità nelle murature. Questa analisi comparativa mira a fornire una conoscenza più approfondita dei diversi approcci, evidenziando le loro implicazioni pratiche e teoriche nel contesto della classificazione delle murature storiche.

In Palermo pietra su pietra (Campisi and Mutolo 2003) le autrici fanno riferimento ai materiali usati nella costruzione muraria palermitana e alle relative tecniche costruttive, individuando attraverso delle schede alcuni tipi di murature ricorrenti. Le modalità costruttive erano influenzate da molteplici fattori, tra cui il tipo di fabbrica e, in particolare, il costo dei materiali. Un estratto del testo chiarisce la relazione intrinseca tra materiale e tecnica costruttiva:

«...a cantieri più complessi e ricchi corrispondevano possibilità economiche elevate e potevano consentire anche ingenti spese da convogliare nei trasporti onerosi di materiali provenienti addirittura da luoghi distanti rispetto alla città, mentre edifici in costruzione più modesti si rifacevano per la pietra alle nostre pirrere, vale a dire cave cittadine, ovvero alla pietra locale, se direttamente improntati al recupero selettivo in situ del materiale lapideo di riconosciuta bontà, risultato di dismissioni...Le scelte costruttive in tema di strutture verticali portanti erano ricondotte all'individuazione della più idonea tipologia di muratura. La differenziazione degli apparecchi murari teneva conto anche della loro ubicazione all'interno del setto...»

Le scelte costruttive relative alle strutture verticali portanti erano orientate verso l'individuazione della tipologia muraria più adeguata. La diversificazione degli apparecchi murari considerava anche la loro posizione all'interno del setto murario (fondazione, primo ordine, ecc.). La classificazione proposta dalle autrici offre un'opportunità di approfondimento sulle modalità costruttive tipiche dell'edilizia settecentesca palermitana. Attraverso le schede e i disegni presentati, emerge il ruolo cruciale delle figure professionali coinvolte nel cantiere, come ingegneri, architetti e muratori, nella selezione delle tecniche e dei materiali da impiegare in specifiche porzioni dell'edificio, al fine di garantire la funzionalità statica, come dimostrato dall'uso di pietre idonee per i cantonali.

Nonostante l'interesse significativo delle murature analizzate per la comprensione delle tecniche costruttive del Settecento, si rilevano pochi riferimenti al costruito minore, un ambito che merita un'analisi e una caratterizzazione più approfondite.

Alfonso Acocella (2004), ad esempio, approfondisce il tema delle murature in pietra, analizzando l'evoluzione nel tempo, a partire dai tempi egizi fino alla contemporaneità. Il metodo di classificazione delle costruzioni in muratura impiega le differenze di forma dei singoli elementi seguendo l'evoluzione temporale. In riferimento alle murature contemporanee l'autore distingue i muri in regolari e irregolari, e descrive dettagliatamente le tecniche costruttive associate per ciascun tipo di muratura indagata, sottolineando l'importanza di adottare una buona malta per le murature irregolari.

Tiziano Mannoni (2005) esplora le tecniche murarie della Liguria, proponendo una

classificazione che va oltre gli aspetti formali delle superfici visibili. Nel lavoro viene sottolineata l'importanza di comprendere il comportamento statico delle murature in relazione alla ricorrenza di caratteristiche geometrico-costruttive. La ricerca si concentra sulle tecniche di apparecchiatura e cerca di dedurre regole generali e particolari dall'analisi visiva delle superfici esterne. Si riporta di seguito il criterio per una buona classificazione descritto dall'autore:

«Se si tiene conto delle possibili risorse naturali, di come esse siano state estratte, lavorate e messe in opera per una buona funzione statica, oltre che estetica, è utile e necessario non partire dalla descrizione oggettiva dell'opera finita, ma da quella di ogni sua parte tecnicamente importante, indipendentemente l'una dall'altra: gli elementi costruttivi (A), la loro disposizione (B), i giunti fra elemento ed elemento (C), la terza dimensione (D) ».

Questo criterio dimostra la necessità di una conoscenza approfondita delle murature, per comprenderne appieno gli aspetti funzionali e meccanici. L'autore critica l'approccio puramente tipologico, poiché non tiene conto della storia delle tecniche costruttive e dell'organizzazione del cantiere. La classificazione proposta nel contributo si basa su sistemi costruttivi e funzionali, evidenziando che le proprietà meccaniche di una muratura coinvolgono tutta la sezione trasversale. L'autore fa un'ulteriore distinzione separando i paramenti interni da quelli esterni poiché possono differire nella lavorazione. La ricerca, infine, suggerisce che la comprensione delle tecniche costruttive delle murature richiede un approccio multidimensionale, che sia in grado di integrare gli aspetti estetici, funzionali e strutturali per una corretta analisi architettonica.

Allo stesso modo, Margani (2009) presenta una sintesi di tipi murari, che trovano evidenze in tutta l'area mediterranea, ed in particolare in Sicilia, dove l'intenso avvicendamento culturale che caratterizza la sua lunga storia, ha generato un singolare sincretismo di tradizioni e stili diversi. Tale sincretismo si riscontra anche in architettura, estrinsecandosi nelle strutture murarie e producendo un repertorio particolarmente vasto. In seguito ad un'analisi della casistica locale e allo studio della trattatistica, gli esempi più ricorrenti di murature isolate sono stati classificati dall'autore in tre categorie principali: 1) murature in opera quadrata; 2) murature "composte"; 3) murature intelaiate. La prima categoria identifica muri in elementi lapidei squadrati, disposti ad apparecchio omogeneo, ossia collocati con continuità lungo l'intero spessore. La seconda categoria individua invece muri a tre strati, costituiti da due paramenti esterni e un nucleo interposto (Fig. 1. 3); ad essa appartengono tre tipi distinti: 2a) muratura greca con riempimento (èmplekton); 2b) muratura romana in opus caementicium; 2c) muratura "ordinaria". La terza categoria riguarda infine pareti formate da un'intelaiatura in legno inserita in un'apparecchiatura in materiale lapideo o fittile. Le murature composte vengono definite dall'autore come strutture murarie caratterizzate da una configurazione a tre strati, articolata da due paramenti esterni e un nucleo interposto. Questa tipologia di muratura offre una buona resistenza meccanica e flessibilità, rendendola adatta a diverse applicazioni architettoniche. Le murature "ordinarie" possono presentare finiture variabili, contribuendo così all'estetica degli edifici. Questo tipo di murature composte combinano funzionalità e bellezza, riflettendo le tradizioni locali e le esigenze strutturali.

Oltre alle pubblicazioni che trattano il tema del rapporto tra tipi murari e qualità in termini generali, si ritiene opportuno ricordare il contributo - soprattutto in termini di metodologia di ricerca - fornito dagli scritti su singole opere architettoniche di grande rilevanza per le quali viene tracciato un percorso di conoscenza che dal cantiere delle indagini preliminari,

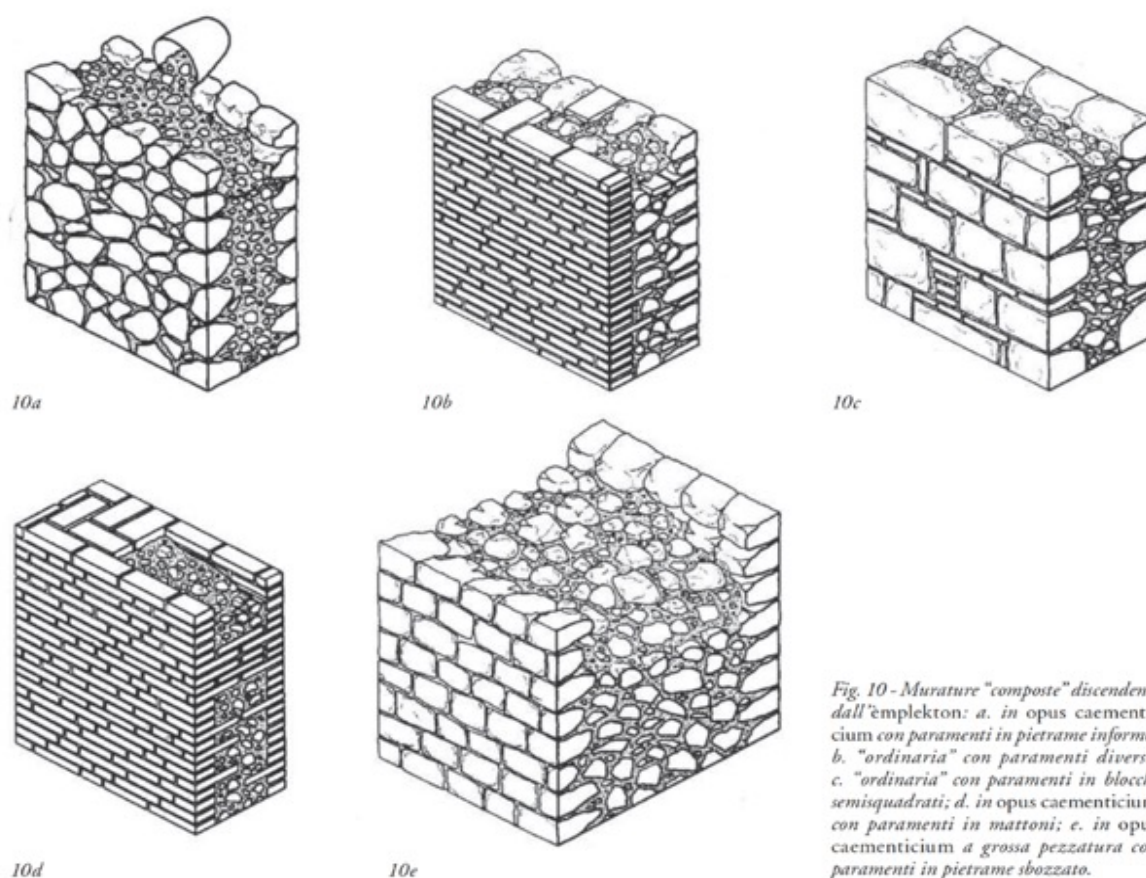


Fig. 10 - Murature "composte" discendenti dall'emplekton: a. in opus caementicium con paramenti in pietrame informe; b. "ordinaria" con paramenti diversi; c. "ordinaria" con paramenti in blocchi semisquadrati; d. in opus caementicium con paramenti in mattoni; e. in opus caementicium a grossa pezzatura con paramenti in pietrame sbozzato.

Fig. 1. 3 Murature composte discendenti dall'emplekton © Margani G. Costruzione e recupero dell'opera muraria. Regola dell'arte e interventi di consolidamento. Enna: Il Lunario; 2009.

attraverso i report delle prove in situ, arriva fino alle proposte di interventi.

In tal senso, Leone (1995) riferendosi al Duomo di Catania sottolinea l'importanza del progetto di recupero basato su una conoscenza approfondita dell'edificio, con un approccio multidisciplinare e un iter metodologico per l'attuazione degli interventi proposti. Le fasi dell'iter sono riportate sinteticamente: indagine storica, rilievo geometrico, definizione tipologica, descrizione dell'apparecchiatura tecnico-costruttiva, conoscenza delle patologie presenti e delle interazioni tra manufatto e ambiente, individuazione delle proprietà meccaniche dei materiali.

Rimanendo nel contesto siciliano, in particolare nella tradizione costruttiva palermitana, Giovanni Fatta (Fatta 1996) approfondisce alcuni dei sistemi costruttivi del Teatro Massimo di Palermo, progettato da G.B. F. Basile. Le opere murarie sono distinte in base alla funzione da svolgere, e hanno tecniche costruttive e materiali differenti per ciascun uso. Un estratto del testo chiarisce la relazione tra qualità del materiale, tecnica costruttiva e funzione:

«...il materiale usato per tale muratura veniva denominato "calcestruzzo" ed era composto da frantumi, di pezzatura non maggiore di 5 cm, di quella che l'esperienza indicava come migliore pietra calcarea compatta del palermitano, ossia la pietra dolomitica delle cave di Boccadifalco, ben mescolata ad un impasto semidraulico... Basile decise di impostare sulla fondazione in "calcestruzzo" una muratura in conci della cava di Denisinni, ossia di una pietra resistentissima e parimenti costosa...».

La costruzione del Teatro Massimo rappresenta la massima espressione architettonica di G.B.F. Basile, dalla quale si evince l'uso sapiente dei materiali da costruzione e delle tecniche costruttive innovative, messe a sistema per la costruzione di una grande opera architettonica.

In questi ultimi casi, anche la ricerca archivistica dei documenti è uno strumento utile per la comprensione delle murature e dei cantieri storici. Fonti quali capitolati, libretti di misura e stima, perizie e altri documenti storici sono fondamentali per supportare l'analisi dei rilievi degli elementi costruttivi. Questi materiali non solo offrono preziose informazioni sulle pratiche edilizie del passato, ma contribuiscono anche a una maggiore consapevolezza della loro evoluzione nel tempo, favorendo un approccio più informato e contestualizzato nella conservazione e nel restauro delle strutture storiche.

Quanto sopra esposto, ha consentito il passaggio dalla valutazione qualitativa delle prestazioni legata ad una lettura geometrico-costruttiva e al rispetto della regola dell'arte alla strutturazione di metodi di valutazione quali-quantitative delle prestazioni meccaniche e di un rinnovato quadro normativo di riferimento. Tuttavia, se la caratterizzazione meccanica delle murature può considerarsi in una fase già relativamente matura dal punto di vista della ricerca, rispetto allo stato dell'arte risulta ancora solo parzialmente indagato e, soprattutto, non sistematizzato lo studio della qualità in termini di "prestazioni energetiche" delle murature storiche, argomento oggetto di questa tesi.

1.4 DAI "MANUALI DI RECUPERO DEI CENTRI STORICI" ALLA DEFINIZIONE DELLA "QUALITÀ MURARIA" IN TERMINI TIPOLOGICI PRESTAZIONALI

A partire dalla fine degli anni '70 del secolo scorso, da una parte l'evidenza della fragilità del patrimonio costruito tradizionale, resa esplicita all'opinione pubblica dai danni e dalle irrimediabili perdite causate dai terremoti (1968 Sicilia occidentale, 1976 Friuli-Venezia Giulia, 1980 Irpinia, 1997 Marche e Umbria, 2009 Abruzzo), dall'altra la constatazione da parte degli studiosi e dei tecnici della deficitaria conoscenza della costruzione muraria - dovuta anche alla scarsa rilevanza attribuita all'argomento già nei percorsi di formazione di Ingegneri e Architetti - ha condotto ad un rinnovato interesse dimostrato da un notevole incremento della produzione di letteratura tecnica riguardante il tema delle murature storiche. In questo contesto un ruolo fondamentale ha certamente avuto il nuovo approccio alla conservazione e al restauro del patrimonio architettonico attraverso una visione interdisciplinare e una consapevolezza della rilevanza delle specificità locali che caratterizzano i materiali e la cultura tecnica.

In quest'ottica, i primi manuali del recupero dei centri storici vengono pubblicati a partire dalla fine degli anni '70 del XX secolo, con la necessità di preservare l'identità culturale e storica di centri maggiori e minori. Come è noto, i manuali si concentrano dettagliatamente su aspetti come le tecniche costruttive tradizionali, l'uso dei materiali locali e pratiche di intervento che rispettano l'integrità storico-costruttiva.

I manuali italiani del recupero dei centri storici (Barrera et al. 1981; Comune di Roma 1989; De Sivio and Iovino 1993; Giovannetti 1992; Giovanetti and Marconi 1997; Di Francesco et al. 2023) contengono un repertorio di materiali, di tecniche, delle strutture e delle forme tipiche della costruzione, costituiti da immagini fotografiche, disegni esecutivi e particolareggiati dei diversi centri storici. Obiettivo comune ai diversi manuali di recupero è la conservazione dei principi e delle regole costruttive di un determinato contesto e di un sapere tecnico ormai in disuso. I manuali diverranno un indispensabile presupposto culturale per indirizzare le attività di recupero e di restauro, migliorando in modo compatibile la qualità strutturale, con il fine ultimo di tutelare e valorizzare l'identità dei centri storici.

Inoltre, i manuali portano all'attenzione dei privati e delle Pubbliche Amministrazioni il valore dell'architettura minore dei centri storici, indagando e caratterizzando elementi tecnici e soluzioni costruttive esito della cultura tecnica delle maestranze locali, quasi mai codificata dalla trattatistica "ufficiale".

Nell'ambito del filone di ricerca avviato con la pubblicazione dei manuali di recupero, certamente un chiaro indirizzo metodologico che privilegia l'analisi della qualità della muratura finalizzata alla valutazione della sicurezza statica può essere individuato negli studi condotti a partire dagli anni '80 da Antonino Giuffrè. Questi studi sono in particolare rivolti all'analisi degli elementi costruttivi e dei sistemi di apparecchiatura strutturale al fine di consentire un giudizio di "qualità" basato sull'osservazione del paramento murario lapideo (Giuffrè 1991, 2006).

Nei suoi scritti Giuffrè evidenzia l'importanza di un'analisi estesa non solo ai paramenti ma anche alle sezioni orizzontali e verticali - "dal di dentro" - del setto murario per giungere ad una conoscenza adeguata delle murature storiche, poterne valutare la qualità e la sicurezza. La buona qualità del paramento murario è associata da Giuffrè al rispetto della "regola d'arte del costruire", in particolare con le seguenti caratteristiche: preponderanza delle pietre grandi su quelle piccole; accurato ingranamento tra pietre nel piano del muro e nel suo spessore; riempimento dei vuoti con pietre minute (rinzeppature) e scaglie di mattone (rincocciature); orizzontamenti posti ad intervalli regolari (60-100 cm).

Secondo Giuffrè, il tecnico che deve formulare un giudizio sulla qualità muraria deve basarsi su elementi oggettivi riscontrabili sul paramento murario o ricorrere a saggi mirati; infatti, la descrizione "accurata di questi aspetti strutturali, ha il doppio scopo di fornire la conoscenza della tecnica originale, interessante dato sociologico, e di permettere un giudizio sulla sua efficienza antisismica nel controllare l'equilibrio dei muri" (Giuffrè 2006). Per il caso-studio di Palermo (Giuffrè and Carocci 1999) e di Ortigia l'autore non si limita a proporre un abaco dei tipi murari ricorrenti prevalenti, ma perviene alla proposta dei relativi criteri di "intervento di tipo conservativo". L'abaco, definendo una "regola d'arte locale" nella costruzione degli apparecchi costruttivi, individua tre tipi di sezioni murarie alle quali associa una diversa qualità meccanica (Fig. 1. 4 - Fig. 1. 5).

La descrizione dei setti murari è sistematizzata all'interno di schede di compilazione-tipo che individuano i parametri ritenuti fondamentali: descrizione, localizzazione, caratteristiche (struttura, apparecchiatura, dimensione elementi, percentuale elementi posti di punta o di fascia, distribuzione dimensionale conci, eventuale presenza di intonaci); le schede sono inoltre corredate da disegni in scala di paramenti e sezioni che individuano gli elementi caratterizzanti quali la localizzazione dei ripianamenti e delle buche pontali.

Già negli studi dei primi anni '90 Luigia Binda (2001), evidenzia la varietà delle murature storiche e la loro classificazione in base a diversi criteri, sottolineando che le differenze nelle murature non derivano solo dai materiali utilizzati (come pietre, mattoni e malte), ma anche dalle tecnologie costruttive adottate. Nello studio, l'autrice propone una classificazione delle sezioni trasversali delle murature, distinguendo le murature in mattoni da quelle in pietra. Le murature in mattoni possono essere classificate in base allo spessore e alla distribuzione dei mattoni, mentre le murature in pietra presentano una maggiore varietà, con classi che includono muri monostrato, a due o tre strati, e muri a secco. Inoltre, l'autrice sottolinea l'importanza di considerare la tipologia degli edifici storici (come case, palazzi, chiese, torri, castelli) e le loro specifiche caratteristiche strutturali per una corretta valutazione della loro capacità portante e per l'applicazione di tecniche di restauro appropriate. La complessità geometrica e volumetrica delle strutture richiede un'indagine sistematica per modellare il comportamento delle murature, tenendo

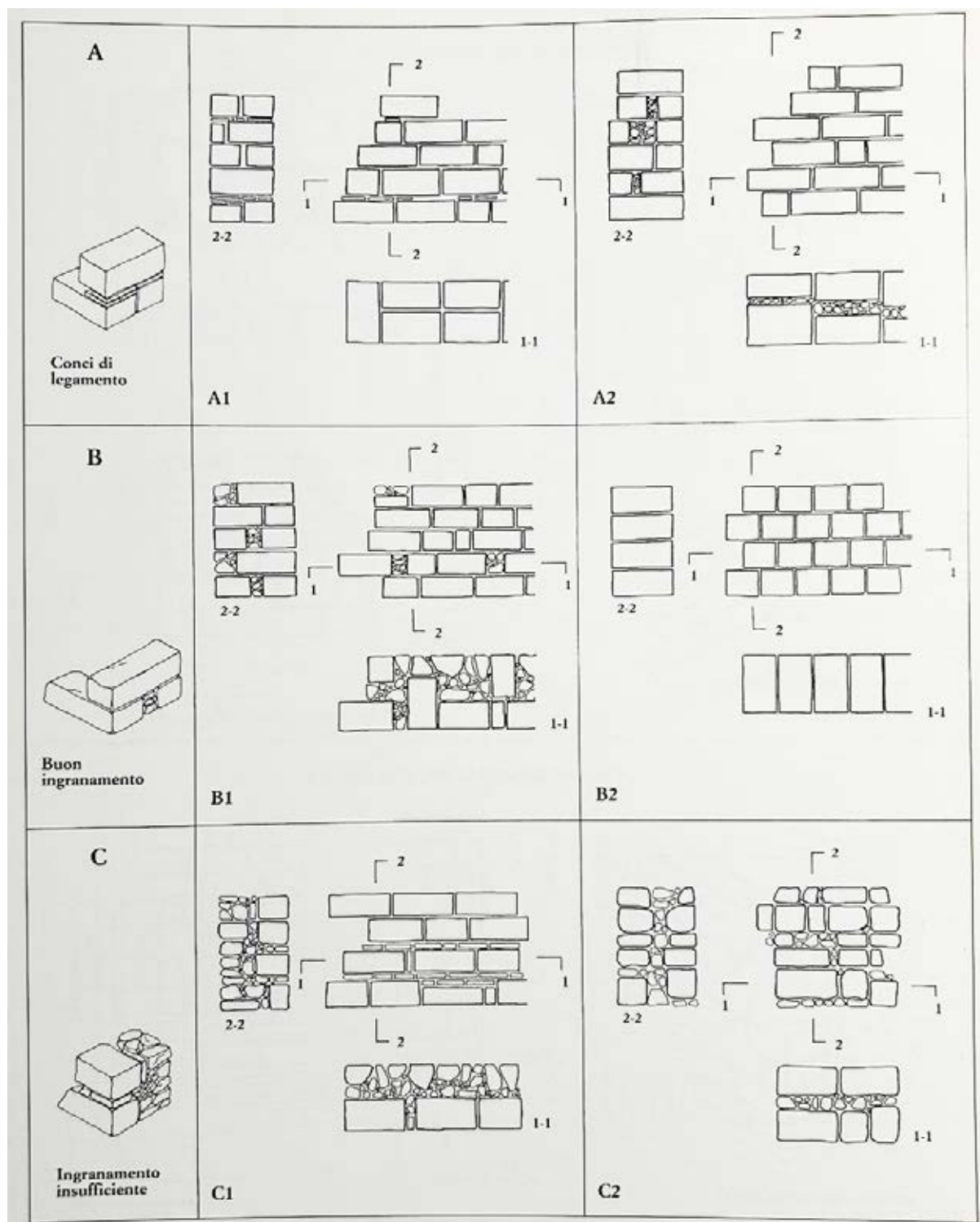


Fig. 1. 4 Apparecchi costruttivi di Palermo © Giuffrè A, Carocci C (1999) Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione del centro storico di Palermo. Editori Laterza, Roma-Bari

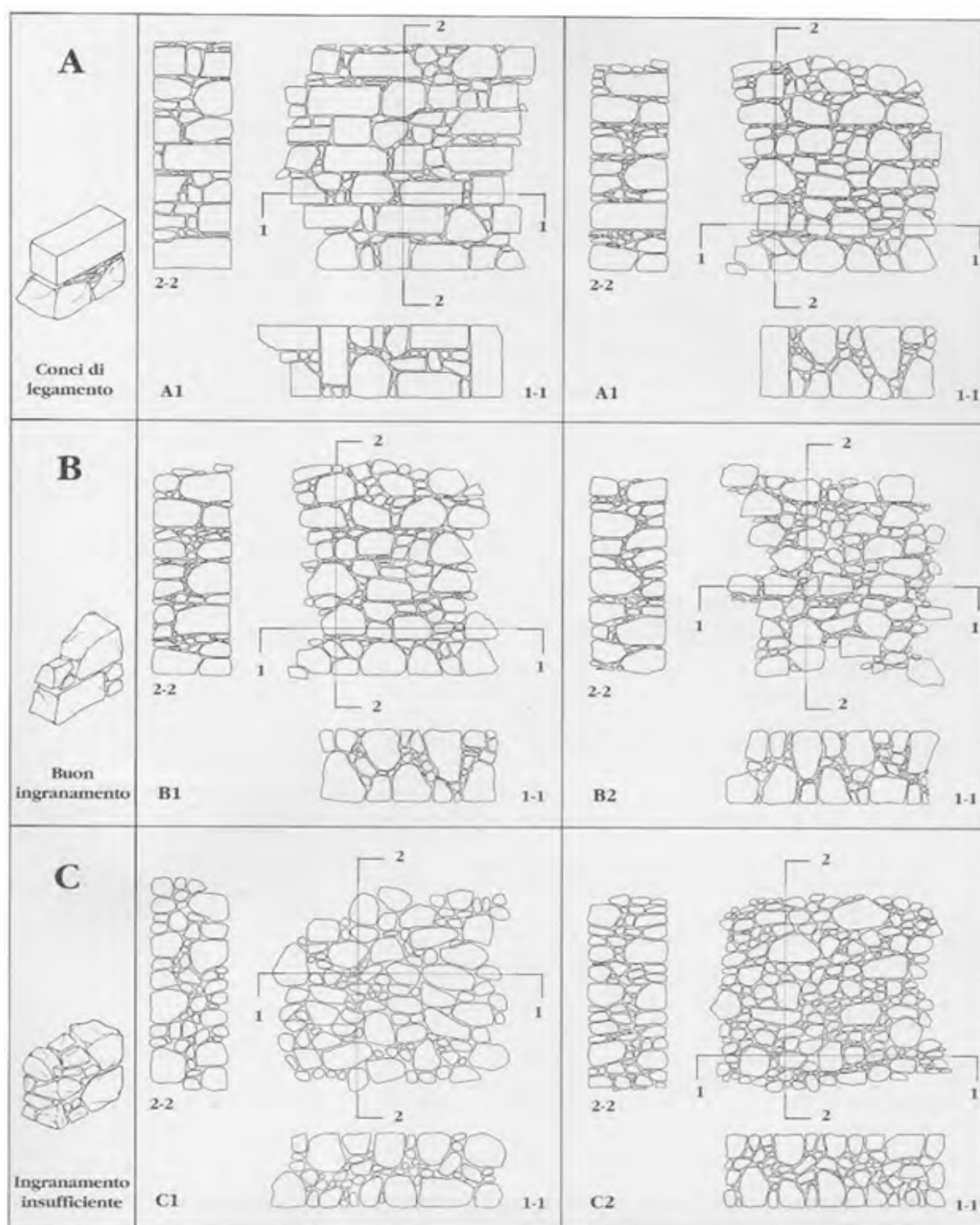


Fig. 1. 5 Apparecchi costruttivi di Ortigia © Giuffrè A (2006) Sicurezza e conservazione dei centri storici: il caso Ortigia. Codice di pratica per gli interventi antisismici nel centro storico. Editori Laterza, Roma - Bari

conto delle diverse stratificazioni e dei vincoli tra di esse. La stessa autrice evidenzia la necessità di un approccio metodologico che consideri le specificità di ciascun tipo di edificio e le trasformazioni storiche subite, per garantire interventi di restauro efficaci e rispettosi del patrimonio architettonico. Uno studio della stessa autrice (Binda et al. 2005), basandosi sui danni provocati agli edifici dal sisma di Umbria e Marche del 1997, si concentra sulla qualificazione morfologica delle sezioni murarie. La metodologia di analisi delle murature, messa a punto dagli autori a partire dai primi anni Novanta, tratta la questione della conoscenza strutturale degli edifici esistenti considerando diversi livelli di analisi: rilievo geometrico (con rappresentazione assonometrica del complesso); evoluzione strutturale dell'edificio; riconoscimento dei materiali; morfologia delle sezioni murarie (ammorsamenti, discontinuità, etc.); osservazione dei meccanismi di danno. Inoltre, si sottolinea l'importanza del rilievo e della verifica di eventuali tecniche di intervento pregresse.

Rispetto a tale panorama di ricerche sul tema delle prestazioni meccaniche delle murature già maturo, la prima rilevante trasposizione normativa può essere probabilmente considerata la Circolare n. 617/2009 "Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008, C8A - Appendice al cap. C8: Costruzioni in muratura. Dati necessari e identificazione del livello di conoscenza" che definisce le modalità di analisi e di descrizione della "tipologia della muratura" in relazione a:

- geometria elementi (nicchie, cavità, canne fumarie, volte -spessore e profilo-, tipologia fondazioni) in superficie e in spessore;
- valutazione della qualità muraria con riferimento agli aspetti della "regola d'arte": presenza di diatoni, forma, tipologia e dimensione elementi, tessitura, orizzontalità giaciture, regolare sfalsamento dei giunti, qualità e consistenza della malta;
- caratterizzazione di malte (tipo di legante, tipo di aggregato, rapporto legante/aggregato, livello di carbonatazione) e di pietre e/o mattoni (caratteristiche fisiche e meccaniche) mediante prove sperimentali. Malte e pietre sono prelevate in situ, avendo cura di prelevare le malte all'interno (ad almeno 5-6 cm di profondità nello spessore murario);
- quadro fessurativo e deformativo.

Un'ulteriore novità introdotta dalla Circolare 617/2009, riguarda il fatto che per la prima volta il documento rileva la necessità - considerata la notevole varietà di materiali e tecniche, sia a livello geografico che storico - di definire "regole dell'arte" locali cui far riferimento per il giudizio di qualità.

Rispetto a questo mutato quadro normativo e considerato quanto previsto dalle NTC 2008 riguardo alla sicurezza sismica, Curti, Lemme e Podestà (Curti et al. 2008) hanno proposto una ricerca mirata alla definizione di un repertorio delle tipologie murarie più ricorrenti nella Regione Molise, sulla base dei rilievi effettuati dopo l'evento sismico del 2002.

Per gli autori, anche in questo caso, la valutazione della sicurezza degli edifici in muratura è basata sul livello di conoscenza, sia in termini di parametri meccanici, sia in termini di dettagli costruttivi o tecnologici. Inoltre, gli esiti del percorso di conoscenza possono essere sintetizzati in una scheda di rilievo dei particolari costruttivi (apparecchiatura degli elementi, posa in opera, qualità della malta e degli elementi, presenza di zeppe, presenza di ricorsi, presenza di diatoni, etc.) che assumono un ruolo fondamentale nella definizione della resistenza e della deformabilità della muratura.

La scheda proposta da Curti, Lemme e Podestà – in seguito utilizzata in numerosi censimenti di vulnerabilità sismica del costruito storico - e prevede tre differenti ambiti di informazione:

Per il I livello:

- dati identificativi del paramento murario (comune, edificio e macroelemento);
- lettura dei dettagli costruttivi (materiali, lavorazione, dimensione elementi e stato di conservazione, tipo di malta e stato di conservazione);

Per il II livello:

- tessitura dei paramenti (attraverso l'analisi dell'apparecchiatura e della posa in opera).

Per una valutazione del “grado di monolicità”, nella scheda è inoltre richiesto - ad avvalorare la rilevanza dei collegamenti trasversali tra strati del medesimo setto murario - di segnalare la presenza di diafani o di vuoti e di identificare lo spessore del paramento esterno e dell'eventuale paramento interno.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) 2018 e la Circolare 7 del 2019 rappresentano un'ulteriore fondamentale evoluzione per la classificazione strutturale delle murature, in quanto forniscono un quadro normativo e metodologico essenziale per garantire la sicurezza e l'affidabilità delle strutture murarie. Questi documenti non solo stabiliscono i requisiti minimi di progettazione e costruzione, ma offrono anche linee guida dettagliate per la valutazione delle prestazioni delle murature esistenti, un aspetto cruciale in un contesto di crescente attenzione alla conservazione del patrimonio architettonico.

La Circolare 7 del 2019, che integra e chiarisce le NTC 2018, offre ulteriori dettagli operativi e interpretativi, come nelle Tabelle C8.5.I e C8.5.II (Fig.1.6), dove si fa riferimento a specifiche tipologie murarie alla quale si possono ricondurre le murature oggetto di analisi.

Tabella C8.5.I -Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura, da usarsi nei criteri di resistenza di seguito specificati (comportamento a tempi brevi), e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura. I valori si riferiscono a: f = resistenza media a compressione, τ_0 = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), f_{v0} = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio.

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	- -	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	- -	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	- -	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,4-2,2	0,028-0,042	- -	900-1260	300-420	13 ÷ 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadriati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

(*) Nella muratura a conci sbozzati i valori di resistenza tabellati si possono incrementare se si riscontra la sistematica presenza di zeppe profonde in pietra che migliorano i contatti e aumentano l'ammorsamento tra gli elementi lapidei; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente pari a 1,2.

(**) Data la varietà litologica della pietra tenera, il peso specifico è molto variabile ma può essere facilmente stimato con prove dirette. Nel caso di muratura a conci regolari di pietra tenera, in presenza di una caratterizzazione diretta della resistenza a compressione degli elementi costituenti, la resistenza a compressione f_{p0} può essere valutata attraverso le indicazioni del § 11.10 delle NTC.

(***) Nella muratura a mattoni pieni è opportuno ridurre i valori tabellati nel caso di giunti con spessore superiore a 13 mm; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente riduttivo pari a 0,7 per le resistenze e 0,8 per i moduli elastici.

Fig. 1. 6 Tabella C8.5.I Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura NTC2018

Nello specifico, le tabelle aggiornano i valori medi per i parametri meccanici da utilizzare ai fini di verifiche strutturali. Le tipologie murarie classificate dalla circolare e riportate nella tabella sono: muratura in pietrame disordinata; muratura a conci sbozzati con paramenti di spessore disomogeneo; muratura in pietre a spacco con buona tessitura; muratura irregolare di pietra tenera; muratura a conci regolari di pietra tenera; muratura a blocchi lapidei squadriati; muratura in mattoni pieni e malta di calce; muratura in mattoni semipieni con malta cementizia. Questo tipo di classificazione mette in relazione la tessitura della muratura con la forma e la dimensione degli elementi e, per alcuni casi specifici, introduce genericamente il materiale lapideo (tufo, calcarenite) presente nella muratura.

La norma correla i tipi di murature ai valori di resistenza meccanica che possono variare in funzione dei materiali lapidei utilizzati, della forma degli elementi e/o delle tecniche costruttive impiegate.

Ulteriore classificazione riportata nella normativa è la classificazione rispetto alla funzione svolta: murature portanti, non portanti o di chiusura verticale.

Rimanendo nel tema della classificazione strutturale, la metodologia proposta da Borri e De Maria già nel 2002, in una ricerca per la Regione Umbria e perfezionata poi in ambito ReLUIS (Borri and De Maria 2019), si basa sulla valutazione dell'Indice di Qualità Muraria. L'IQM rappresenta un approccio sistematico e scientifico per valutare le prestazioni strutturali delle murature storiche esistenti, utilizzando dei parametri quali-quantitativi quantificati da un esame visivo del paramento. L'IQM è descritto da un indice numerico che varia su una scala da 0 a 10 e stima la capacità di una muratura di resistere a diverse azioni meccaniche, quali carichi verticali, forze orizzontali nel piano e forze fuori dal piano. Il metodo da loro proposto è stato messo in correlazione con la norma di riferimento, riscontrando una buona corrispondenza nelle valutazioni. Essendo un metodo di calcolo rapido ed esaustivo consente di stimare le caratteristiche meccaniche delle murature, individuando una buona classificazione di tipi murari.

Un tema di notevole rilevanza negli ultimi anni è certamente quello relativo alle schede per il rilievo delle caratteristiche delle murature finalizzate a valutare la qualità strutturale delle murature. Si citano di seguito alcuni dei più significativi esempi.

Il manuale per la compilazione delle schede di qualità muraria, redatto dalla Regione Toscana (Vignoli et al. 2019), è un documento che fornisce linee guida dettagliate per la valutazione e la documentazione delle murature, con particolare attenzione alla qualità strutturale degli edifici esistenti. La scheda di qualità muraria (SQM) è organizzata in tre sezioni principali: la prima riguarda la collocazione della muratura, richiedendo informazioni generali sull'edificio, come la sua ubicazione, l'età di costruzione e le prove eseguite. La seconda sezione si concentra sulla tipologia muraria, descrivendo le caratteristiche macroscopiche del paramento e della sezione muraria, inclusi i materiali utilizzati e le tecniche costruttive. La terza parte è dedicata alla valutazione delle caratteristiche meccaniche della muratura, considerando la conformità ai parametri della "regola dell'arte". La classificazione delle murature si basa su criteri regionali e nazionali, con distinzioni tra murature storiche e moderne. Il manuale sottolinea l'importanza di indagini approfondite per una corretta caratterizzazione e documentazione, supportata da riferimenti normativi. Il documento rappresenta un utile strumento per garantire una valutazione accurata e sistematica della qualità delle murature, fondamentale per la sicurezza degli edifici.

Nell'ambito della valutazione della qualità muraria e della classificazione tipologica delle murature è stata sviluppata la scheda CARTIS (CARatterizzazione TIpologica - Strutturale

dei comparti urbani) nell'ambito del Progetto triennale ReLUIs 2014-2016 e in stretta collaborazione con il Dipartimento di Protezione Civile (Dipartimento Protezione Civile and ReLuis 2023).

Lo studio di caratterizzazione tipologico strutturale proposto indaga le caratteristiche costruttive locali nel panorama costruttivo nazionale sotto il profilo qualitativo. Sull'intero territorio nazionale, infatti, le tecniche costruttive si sono differenziate nel corso dei secoli, in ragione di culture e condizionamenti locali, che in taluni casi hanno notevolmente inciso sulle caratteristiche e sulla qualità della costruzione, determinando sostanziali differenze anche in termini di risposta sismica.

La scheda CARTIS è uno strumento fondamentale per la valutazione della qualità muraria e per la caratterizzazione tipologica e strutturale degli edifici ordinari, in particolare in contesti soggetti a eventi catastrofici come i terremoti. Essa si concentra su edifici multipiano, escludendo beni monumentali e strutture speciali, e si basa su una classificazione della muratura in tre categorie: regolari, sbazzate e irregolari, a seconda della tessitura e della lavorazione dei materiali.

Questa classificazione è stata concepita per facilitare il riconoscimento e la caratterizzazione delle tipologie costruttive, tenendo conto della varietà delle tecniche edilizie presenti nel panorama italiano. La classificazione si fonda su criteri di tessitura e lavorazione dei materiali, e si rifà a metodologie già esistenti, come quelle del manuale AeDES (Baggio et al. 2014), ma con l'intento di fornire un supporto più dettagliato per la valutazione della qualità meccanica degli edifici.

Tra i punti di forza della classificazione muraria proposta, si evidenzia la sua capacità di adattarsi alla diversità delle costruzioni italiane, permettendo una valutazione più accurata delle caratteristiche strutturali locali. Inoltre, la suddivisione in categorie consente di semplificare il processo di analisi, rendendo più accessibile la raccolta di dati e la successiva valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici.

Tuttavia, pur essendo utile, la classificazione potrebbe risultare troppo generica in alcuni casi, non riuscendo a catturare le specificità di determinate tecniche costruttive o materiali particolari. Pertanto, sebbene la classificazione proposta rappresenti una metodologia applicabile all'intero territorio nazionale, è fondamentale considerare anche altre variabili e altri approcci per una valutazione più completa e precisa della vulnerabilità sismica.

La classificazione dettagliata della muratura è essenziale per comprendere le caratteristiche costruttive locali e le loro implicazioni sulla risposta sismica degli edifici. La scheda CARTIS, sviluppata nell'ambito del Progetto ReLUIs, mira a fornire un'analisi omogenea e sistematica delle tipologie edilizie, contribuendo così a una migliore valutazione dell'esposizione e della vulnerabilità del patrimonio edilizio.

Indagando le murature secondo gli aspetti prestazionali sono da considerare, oltre che le capacità meccaniche, anche le prestazioni energetiche. La norma (UNI/TS 11300-4:2016) riporta un abaco che fornisce indicazioni sulle principali strutture murarie utilizzate in Italia e sulla loro diffusione sul territorio nazionale. Si tratta di un elenco ancora incompleto che necessita di aggiornamenti e integrazioni. In questo caso la norma riporta 19 esempi di chiusure verticali associati ad alcune aree geografiche italiane. La quasi totalità dei casi citati nella norma fanno riferimento a murature in mattoni (in laterizio o cemento), solamente tre casi riportano la muratura in pietra, con blocchi di tufo oppure pietra ed intercapedine. Si evince che la classificazione effettuata nella norma non tiene conto né delle caratteristiche termiche proprie dei diversi litotipi, né delle tecniche costruttive associate. Questa classificazione, se pur parzialmente utile per la valutazione delle performance energetiche da norma, non rispecchia l'ampia varietà dei materiali e delle tecniche costruttive impiegate nella costruzione storica, ma si riduce ad un elenco di casi

studio non esaustivi. Inoltre, gli esempi di muratura riportati nella norma appartengono esclusivamente ad alcune le regioni come: Lombardia, Romagna, Toscana, Campania, Abruzzo, Liguria e Veneto.

1.5 CONSIDERAZIONI

I metodi di classificazione attualmente disponibili offrono l'opportunità di esaminare le murature storiche sotto molteplici angolazioni: aspetti costruttivi, strutturali, funzionali, geometria formale e valore estetico, tra gli altri. È evidente che, se considerati separatamente, tali approcci sono insufficienti per fornire un quadro esaustivo e informato delle specificità murarie.

Inoltre, gran parte della letteratura esistente tende a trattare le murature in modo generico, senza un'adeguata considerazione delle peculiarità costruttive locali. Solo un numero limitato di studiosi ha dedicato la propria attenzione a un'analisi approfondita delle murature in contesti specifici, come alcune regioni italiane. Questa mancanza di un'analisi dettagliata e contestualizzata limita la comprensione delle variabili che influenzano la qualità e la prestazione delle murature, rendendo necessaria l'adozione di metodologie più integrative e specifiche per il contesto locale. Pertanto, è fondamentale sviluppare approcci di classificazione che uniscano i diversi aspetti in una classificazione coerente, multi-parametrica e multidisciplinare, capace di riflettere la complessità e la ricchezza delle murature storiche.

La classificazione presentata nel presente studio di ricerca, dettagliatamente esaminata nel capitolo successivo, propone un approccio integrato e multidisciplinare volto all'analisi delle caratteristiche tipologiche e prestazionali delle murature storiche. Questo metodo di indagine prevede un'accurata analisi in situ delle murature esistenti nel contesto locale, accompagnata da un rilievo fotografico dei paramenti a vista e, quando possibile, delle sezioni trasversali parzialmente crollate. Si intende così ottenere una visione complessiva e dettagliata delle strutture murarie e delle tecniche costruttive, utile per una valutazione più approfondita.

In aggiunta, è prevista un'analisi approfondita dei materiali utilizzati, supportata dallo studio di carte geologiche e da prove di laboratorio, mirate all'individuazione dei materiali lapidei naturali e alla caratterizzazione delle loro proprietà termofisiche. Questo passaggio è cruciale per comprendere non solo la composizione dei materiali, ma anche il loro comportamento in relazione alle condizioni ambientali e alle sollecitazioni meccaniche.

Infine, la raccolta sistematica di tutti i dati raccolti durante lo studio di un determinato contesto consente di effettuare una classificazione statistica basata sui parametri quantitativi e qualitativi presenti nel dataset. Questo approccio mira a garantire il massimo livello di obiettività e rigore scientifico, contribuendo così a una comprensione più approfondita e sistematica delle murature storiche, fondamentale per la loro conservazione e valorizzazione nel contesto architettonico contemporaneo.

L'elaborazione della metodologia di classificazione proposta nel presente lavoro di ricerca costituisce un fondamento essenziale per la creazione di un repertorio dinamico delle caratteristiche tipologiche e prestazionali delle murature storiche, basato su tecnologie ICT. Questo approccio intende promuovere una condivisione sistematica della conoscenza relativa alle murature storiche, facilitando così l'accesso a informazioni tecniche per professionisti e tecnici del settore. La realizzazione di una piattaforma dedicata, concepita per essere facilmente fruibile, permetterà non solo la raccolta e la catalogazione di dati, ma anche la diffusione di best practices e metodologie innovative per gli interventi di recupero.

Bibliografia

- Acocella A (2004) L'architettura di pietra. Antichi e nuovi magisteri costruttivi. Lucense Alinea
- Adam JP (1988) L'arte di costruire presso i romani. Materiali e tecniche, X ed. aprile 2011. Longanesi, Milano
- Amico G (1726) L'Architetto pratico. Stamperia di Gio: Battista Aiccardo, Palermo
- Baggio C, Bernardini A, Colozza R, et al (2014) Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (AeDES)
- Barrera F, Guenzi C, Pizzi E, Tamagno E (1981) L'arte di edificare. Manuali in Italia 1750-1950, 1st edn. BE-MA, Milano
- Binda L, Cardani C, Saisi E, Valluzzi MR (2005) Studio della vulnerabilità degli edifici dei centri storici in zona sismica. In: Fiorani D, Esposito D (eds) Tecniche costruttive dell'edilizia storica: conoscere per conservare. Viella
- Binda LA (2001) State of the Art of Research on Historic Structures in Italy
- Borri A, De Maria A (2019) Il metodo IQM per la stima delle caratteristiche meccaniche delle murature: allineamento alla circolare n. 7/2019
- Campisi T, Mutolo S (2003) Palermo pietra su pietra. Apparecchi murari dell'edilizia settecentesca. Ila Palma, Palermo
- Carta di Cracovia (2000) Principi per la conservazione ed il restauro del patrimonio costruito
- Carta di Venezia (1964) Carta internazionale sulla conservazione e il restauro di monumenti e insiemi architettonici
- Carta di Washington (1987) Carta internazionale per la salvaguardia delle città storiche
- Circolare n. 617/2009 Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008.
- Codice dei beni culturali e del paesaggio (2004) Codice dei beni culturali e del paesaggio, ai sensi dell'articolo 10 della legge 6 luglio 2002, n. 137. Decreto legislativo del 22 gennaio 2004 pubblicato in Gazzetta Ufficiale n. 45 del 25 febbraio 2004
- Commissione Franceschini (1967) Atti della commissione
- Comune di Roma (1989) Manuale del recupero del Comune di Roma. DEI, Roma
- Consiglio europeo (2000) Convenzione europea del paesaggio, art. 1
- Curti E, Lemme A, Podestà S (2008) Indicazioni per la valutazione della qualità muraria. In: Curti E, Lemme A, Podestà S (eds) Sisma Molise 2002: dall'emergenza alla ricostruzione. Edifici in muratura, cap. 3. DEI
- De Sivo B, Iovino R (eds) (1993) Manuale del recupero delle antiche tecniche costruttive Napoletane. CUEN, Napoli
- Di Francesco C, Fabbri R, Bevilacqua F (2006) Atlante dell'architettura ferrarese. Elementi costruttivi tradizionali. ITA
- Dichiarazione di Amsterdam (1975) Carta Europea del Patrimonio Architettonico
- Dipartimento Protezione Civile, ReLuis (2023) Allegato B - Scheda Cartis
- Faro (2005) Convenzione Quadro del Consiglio d'Europa sul valore del patrimonio culturale per la società
- Fatta G (1996) La fabbrica del Teatro Massimo. Bollettino degli Ingegneri della Provincia di Palermo 1:3-22
- Giovanetti F, Marconi P (1997) Manuale del recupero del centro storico di Palermo. Flaccovio, Palermo
- Giovannetti F (ed) (1992) Manuale del recupero di Città di Castello. DEI
- Giuffrè A (2006) Sicurezza e conservazione dei centri storici: il caso Ortigia. Codice di pratica per gli interventi antisismici nel centro storico. Editori Laterza, Roma - Bari
- Giuffrè A (1991) Letture sulla meccanica delle murature storiche, 2006th edn. Kappa

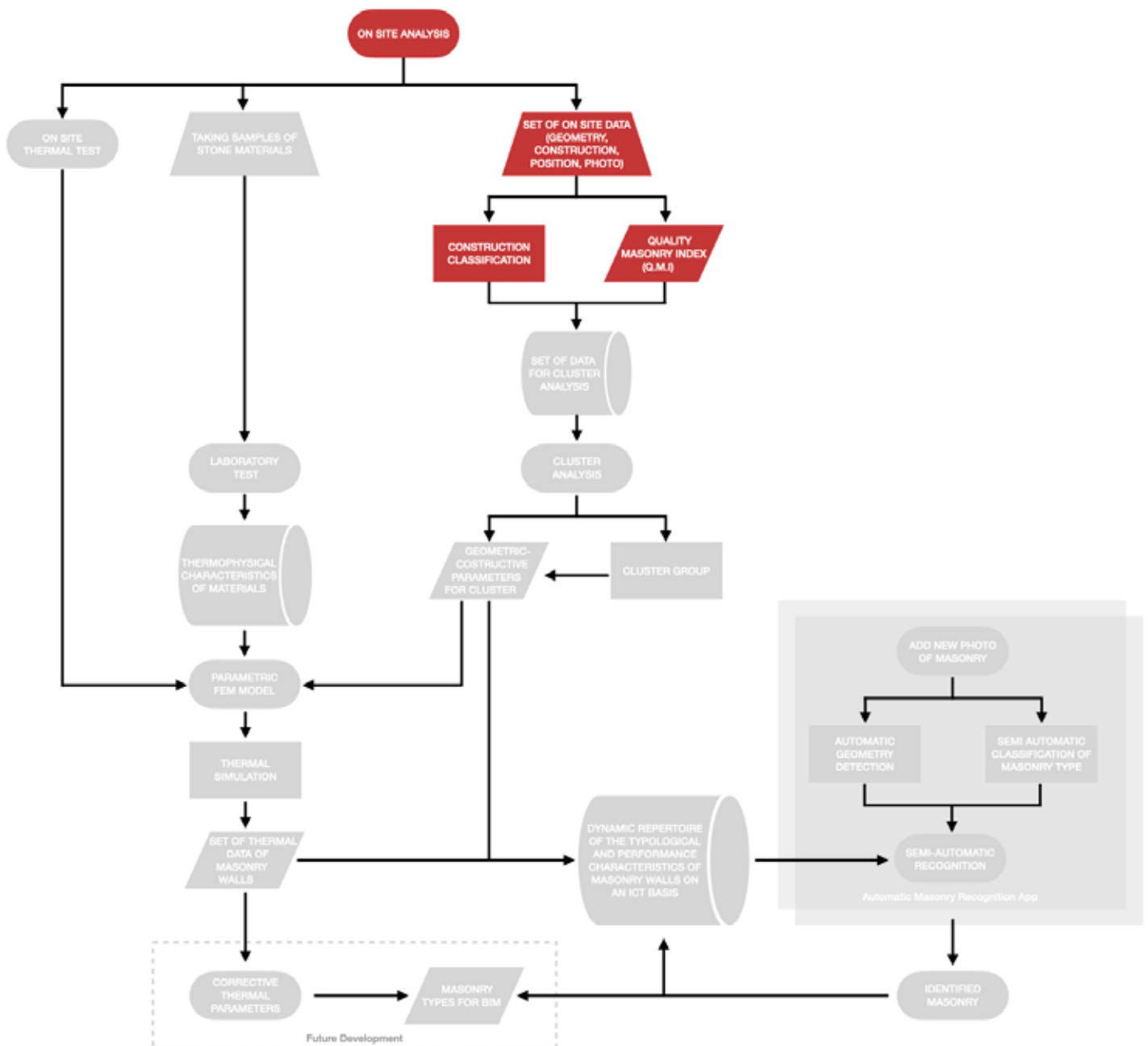
- Giuffrè A, Carocci C (1999) Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione del centro storico di Palermo. Editori Laterza, Roma-Bari
- ICOMOS (2008) Dichiarazione di Quebec sulla conservazione dello Spirito dei luoghi
- Imbornone P, Fiandaca O (1992) Elementi costruttivi in gesso. Repertorio di antichi magisteri. Palermo
- Leone G (1995) Il duomo di Catania. Un metodo di indagine per la determinazione delle caratteristiche meccaniche della muratura. Catania, pp 7–27
- Lugli G (1957) La Tecnica Edilizia Romana, con particolare riguardo a Roma e Lazio. G. Bardi Editore, Roma
- Mandolesi E (1978) L'Edilizia. UTET, Torino
- Mannoni T (2005) Archeologia della produzione architettonica. Le tecniche costruttive
- Margani G (2009) Costruzione e recupero dell'opera muraria. Regola dell'arte e interventi di consolidamento. Il Lunario, Enna
- Milani GB (1925) L'ossatura murale. S. Lattes & C. Editori, Torino
- NTC (2018) Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni». Decreto ministeriale del 17 gennaio 2018 pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20-02-2018
- Pastore P (2005) Traditional building techniques and constructive models of Apulia. Bari
- Roiseco G (1972) L'architettura del ferro. Bulzoni
- Schiavi A, Cellai G, Secchi S, et al (2019) Stone masonry buildings: Analysis of structural acoustic and energy performance within the seismic safety criteria. Constr Build Mater 220:29–42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.192>
- UNI/TS 11300-4:2016 Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 4: Utilizzo di energie rinnovabili e di altri metodi di generazione per la climatizzazione invernale e per la produzione di acqua calda sanitaria
- Vignoli A, Boschi S, Signorini N, et al (2019) Abaco delle murature della regione toscana. Manuale per la compilazione delle schede di qualità muraria
- Violet-le-Duc E (1858) Dictionnaire Raisonné de L'Architecture Française du XIe au XVIe siècle. A. Morel Éditeur



CAPITOLO 2

CLASSIFICAZIONE E CARATTERIZZAZIONE COSTRUTTIVA DELLE MURATURE:
definizione dei tipi

Classification and construction characterisation of masonry: definition of the types



Abstract

Chapter 2 provides a comprehensive examination of the classification and characterization of masonry structures, focusing on their critical role in the conservation and refurbishment of architectural heritage. The study begins by describing the historical significance of masonry as a primary construction material, particularly in regions with rich cultural and architectural traditions. It emphasizes the need for a nuanced understanding of the various types of masonry, which are influenced by local materials, construction techniques, and historical contexts.

The chapter systematically categorizes masonry types based on geometric and constructive parameters, integrating both qualitative and quantitative data to enhance the objectivity of the classification process. This approach addresses the inherent subjectivity that can arise from the operator's experience and perspective during field assessments. By employing statistical analyses, the research aims to establish a more standardized framework for masonry classification, which is essential for effective conservation practices.

A significant portion of the chapter is dedicated to the challenges associated with characterizing the thermal and mechanical properties of traditional masonry. The literature on natural stone materials is notably limited, particularly concerning their performance in historical contexts. The chapter discusses how the physical properties of natural stone, such as density and porosity, vary depending on the extraction site, which in turn affects the traditional use of these materials in masonry construction. This variability necessitates a localized approach to analysis, as broader territorial assessments may yield generic data that fail to capture the unique characteristics of specific masonry types.

Furthermore, the chapter explores the implications of historical construction practices on contemporary restoration efforts. It highlights the importance of understanding the transformations that buildings have undergone over time, including alterations in materials and techniques. This historical perspective is crucial for ensuring that restoration interventions are compatible with the original architectural intent and structural integrity of the building. In the context of energy efficiency, the chapter examines how the recurring characteristics of local masonry influence the thermal performance of historic buildings. The complexity of the thermal envelope, often exacerbated by historical modifications and the presence of non-removable finishes, poses significant challenges for accurate thermal characterization. The chapter opens the perspective on a detailed thermal analysis and modeling of individual buildings, supported by an understanding of local masonry typologies. This approach not only enhances the accuracy of structural and behavioral models but also minimizes the need for destructive testing.

La compatibilità con l'edificio storico, sia nel caso di manutenzione, restauro o miglioramento delle prestazioni, si basa sullo sforzo di conoscere le caratteristiche dei materiali e componenti tecnici dell'edificio e di identificarne e comprenderne le trasformazioni storicizzate. Questo processo di analisi richiede un approccio caso per caso, ma è favorito anche dalla conoscenza dei caratteri ricorrenti delle pratiche costruttive storiche, peculiari del contesto geografico, culturale ed economico in cui l'edificio si trova. I manuali italiani per i centri storici - come (Giovanetti and Marconi 1997) e (Di Francesco et al. 2006) - dimostrano l'importanza che le caratteristiche costruttive ricorrenti delle aree locali hanno sia nell'analisi delle caratteristiche specifiche dell'edificio sia nella progettazione degli interventi per la sua conservazione e uso compatibile.

Nel campo dell'efficienza energetica, il ruolo delle caratteristiche ricorrenti locali è significativo per esaminare e modellare l'involucro termico, spesso eterogeneo negli edifici storici. La difficoltà nel caratterizzare l'involucro storico dal punto di vista termofisico è principalmente legata alle discontinuità delle pareti in muratura, causate dalle trasformazioni storiche e dalla varietà dei materiali utilizzati nella stessa area ma in periodi di costruzione differenti. Questa eterogeneità è spesso combinata con la presenza di rivestimenti non removibili, come intonaci decorati, che nascondono l'opera muraria.

Insieme alla caratterizzazione dei materiali costruttivi locali, un'analisi termica dettagliata e la modellazione del singolo edificio possono essere efficacemente supportate dall'analisi tipologica delle murature storiche locali. La conoscenza delle caratteristiche costruttive ricorrenti delle murature storiche, nei diversi contesti locali. Attraverso una comprensione dettagliata dei materiali e delle tecniche impiegate, può integrare le informazioni rilevate direttamente nell'edificio, sopperendo ai limiti di praticabilità delle indagini distruttive e migliorando sensibilmente l'accuratezza del modello strutturale e comportamentale previsto.

Le difficoltà legate alla conoscenza approfondita delle murature derivano dalla grande varietà litologica dei materiali impiegati e dalle diverse tecniche costruttive che rendono complessa la determinazione delle proprietà termo-fisiche. Inoltre, i metodi di indagine e di misura delle proprietà termo-fisiche sono complicati per la moltitudine di fattori che le influenzano, oltre che, per i costi elevati di applicazione. Le tecniche conoscitive non invasive come la termografia a infrarossi offrono una visione parziale delle caratteristiche interne, che non consente di determinare con certezza la struttura delle murature oggetto di studio. Infine, la letteratura relativa ai materiali lapidei naturali è limitata in particolare per le murature di tipo tradizionale dove i dati risultano carenti e troppo generici. Anche le norme tecniche, che trattano le caratteristiche termigrometriche dei materiali lapidei, forniscono dei criteri troppo generici per la caratterizzazione termica delle murature tradizionali.

Le caratteristiche costruttive, che possono essere esaminate in profondità attraverso la tipologia della muratura locale, sono rilevanti anche per l'analisi meccanica delle strutture storiche. L'importanza che lo studio dettagliato delle tecniche costruttive locali ha dimostrato in questo campo suggerisce che il metodo sia adatto a supportare un'analisi combinata delle prestazioni strutturali ed energetiche. La tipologia muraria si basa sul rilievo e sull'analisi delle caratteristiche costruttive delle pareti, seguita dall'identificazione delle caratteristiche frequenti, stabilite secondo una gerarchia per le caratteristiche ricorrenti in base allo scopo dello studio. Poiché la procedura si basa sul rilievo e sul confronto delle pareti ispezionate, l'identificazione delle tipologie è necessariamente influenzata dall'osservatore, specialmente se l'analisi è limitata a un contesto locale anziché a diverse aree. Pertanto, si rende necessaria l'introduzione di una metodologia rigorosa che permetta di individuare il tipo di paramento murario a partire dall'analisi visiva

ed assegnare ad esso le caratteristiche meccaniche e termofisiche pertinenti.

La caratterizzazione delle murature è un'attività complessa. Le murature storiche, infatti, non sono strutturalmente omogenee e presentano materiali lapidei naturali di diversa natura anche all'interno della stessa muratura.

I metodi di classificazione disponibili in letteratura, come l'indice di qualità muraria (I.Q.M.), forniscono strumenti utili per l'individuazione dei parametri geometrico-costruttivi che permettono, dopo un'analisi approfondita, di determinare gli elementi ricorrenti suggerendo una classificazione tipologica delle murature.

Il lavoro di ricerca proposto definisce le murature attraverso la caratterizzazione tipologico-costruttiva, meccanica e termo-fisica esaminando caso per caso i materiali lapidei naturali e le murature al fine di fornire un'analisi complessiva.

Nel lavoro di ricerca svolto la caratterizzazione tipologico-costruttiva rappresenta il complemento alle indagini da svolgere caso per caso su ogni edificio e non rappresenta dunque uno strumento semplificativo, ma piuttosto un mezzo per analizzare i caratteri ricorrenti delle murature storiche al fine di ricavarne informazioni utili per la loro caratterizzazione complessiva.

In questo capitolo viene esaminato il metodo I.Q.M. (Indice di Qualità Muraria) e la sua correlazione con le Norme Tecniche per le Costruzioni (N.T.C. 2018), al fine di analizzare tanto la struttura del metodo proposto dai ricercatori quanto i parametri qualitativi e quantitativi definiti per il calcolo dell'I.Q.M.

Successivamente si descrive il sistema di classificazione per tipi introdotto nel presente lavoro. Questo si basa parzialmente sul metodo I.Q.M., ma è esteso e integrato con ulteriori parametri, i quali si rivelano fondamentali anche per l'elaborazione dell'analisi statistica per *cluster*, proposta nel capitolo successivo.

2.1 CARATTERIZZAZIONE MECCANICA E CORRELAZIONE TRA NTC 2018 E I.Q.M.

Le costruzioni in muratura vengono così definite nella Circolare 7 del 2019 (N.T.C. 2018):

«La muratura in una costruzione esistente è il risultato dell'assemblaggio di materiali diversi, in cui la tecnica costruttiva, le modalità di posa in opera, le caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti e il loro stato di conservazione, determinano il comportamento meccanico dell'insieme».

Per valutare le caratteristiche meccaniche della muratura esistente la norma consiglia lo svolgimento di prove in opera o in laboratorio; ove questo non sia possibile si può procedere con prove non distruttive. La norma esplicita che:

«A seguito delle indagini, è necessario valutare, per ogni prova, il grado di rappresentatività sia della classe tipologica attribuita al materiale, sia dei valori medi delle caratteristiche meccaniche dell'edificio da utilizzare nelle modellazioni. A questo scopo possono essere utili metodi che, avvalendosi della lettura visiva dei paramenti e della sezione, consentano di ottenere delle stime di tali caratteristiche attraverso indicatori di qualità muraria, purché elaborati con procedure di comprovata attendibilità».

Il normatore riconosce la possibilità di valutare la qualità muraria, come strumento aggiuntivo, attraverso una lettura visiva dei paramenti e della sezione e dall'analisi dei tipi murari.

La valutazione della qualità muraria è ormai riconosciuta, anche a livello normativo, come uno dei punti focali per l'analisi del comportamento strutturale di una muratura storica esistente. Il livello di conoscenza, introdotto nelle (NTC 2018) e dettagliato nella circolare esplicativa 7 del 2019, mira a fornire un dato numerico che permette di effettuare un'analisi strutturale di un manufatto esistente in muratura attraverso il riconoscimento visivo di parametri geometrici quali-quantitativi.

Le indicazioni fornite dalle norme si concretizzano nell'introduzione dell'Indice di Qualità Muraria (I.Q.M.) come strumento aggiuntivo per la valutazione della risposta alle sollecitazioni che, una determinata tipologia muraria, può subire. Questo indice è stato perfezionato dal progetto ReLUIS avanzato dall'unità di ricerca del Politecnico di Milano e dello IUAV di Venezia ed ha consentito l'utilizzo di una metodologia di indagine qualitativa su delle murature.

L' I.Q.M. è uno strumento valido per valutare le caratteristiche di una muratura. Si calcola scomponendo l'analisi secondo le tre possibili sollecitazioni (verticali, ortogonali e nel piano) e analizzando per ognuna di esse le tecniche del buon costruire che assicurano un buon comportamento meccanico d'insieme. L'I.Q.M. consente di valutare la qualità di una muratura anche laddove non è possibile effettuare prove in opera, o laddove i costi elevati non consentono una conoscenza approfondita. La valutazione visiva della qualità muraria non solo facilita la valutazione delle proprietà meccaniche, ma rappresenta anche un approccio pratico e non distruttivo per la diagnosi e la conservazione degli edifici storici.

La circolare n. 7 ha apportato delle modifiche significative per le modalità di determinazione dei parametri meccanici da utilizzare per le murature esistenti. Nella tabella C8.5.I della circolare (Fig. 2.1), vengono riportati i valori di riferimento dei parametri meccanici delle murature, introducendo alcune nuove tipologie di muratura; inoltre, sono stati aggiornati alcuni valori dei parametri di resistenza e i moduli elastici associati ai tipi murari.

I coefficienti correttivi riportati nella tabella C8.5.II (Fig. 2.2) sono stati ridotti a tre, malta di buone caratteristiche, presenza di ricorsi o listature, presenza sistematica di elementi di collegamento trasversale tra i paramenti; nel caso in cui le tre condizioni fossero presenti contemporaneamente, è possibile applicare due soli coefficienti (quelli di valore maggiore). Per calcolare il valore di I.Q.M. per ciascun tipo di azione sollecitante associato ad ogni tipologia muraria individuata, si applica la seguente Eq. 2.1:

$$I.Q.M. = RE.EL. (OR + PD + F.EL + SG + D.EL + MA) \quad (2.1)$$

M.A. Malta di buona qualità/efficace contatto tra elementi/ zeppe;

P.D. Ingranamento trasversale/presenza di diatoni;

F.EL. Forma degli elementi;

D.EL. Dimensione degli elementi;

S.G. Sfalsamento fra i giunti verticali;

O.R. Presenza di filari orizzontali;

R.EL. Resistenza adeguata degli elementi.

Per ciascun parametro si attribuisce un punteggio numerico differente per le azioni verticali, fuori dal piano e nel piano, definiti in una tabella dagli autori (Borri et al. 2015).

Tabella C8.5.I -Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura, da usarsi nei criteri di resistenza di seguito specificati (comportamento a tempi brevi), e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura. I valori si riferiscono a: f = resistenza media a compressione, τ_0 = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), f_{v0} = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio.

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	- -	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	- -	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	- -	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,4-2,2	0,028-0,042	- -	900-1260	300-420	13 + 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadrati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

(*) Nella muratura a conci sbozzati i valori di resistenza tabellati si possono incrementare se si riscontra la sistematica presenza di zeppe profonde in pietra che migliorano i contatti e aumentano l'ammorsamento tra gli elementi lapidei; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente pari a 1,2.

(**) Data la varietà litologica della pietra tenera, il peso specifico è molto variabile ma può essere facilmente stimato con prove dirette. Nel caso di muratura a conci regolari di pietra tenera, in presenza di una caratterizzazione diretta della resistenza a compressione degli elementi costituenti, la resistenza a compressione f_{pu} può essere valutata attraverso le indicazioni del § 11.10 delle NTC.

(***) Nella muratura a mattoni pieni è opportuno ridurre i valori tabellati nel caso di giunti con spessore superiore a 13 mm; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente riduttivo pari a 0,7 per le resistenze e 0,8 per i moduli elastici.

Fig. 2.1 Tabella riassuntiva le tipologie murarie e le proprietà meccaniche correlate © NTC 2018.

Tabella C8.5.II -Coefficienti correttivi massimi da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone; ricorsi o listature; sistematiche connessioni trasversali; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato; ristilatura armata con connessione dei paramenti.

Tipologia di muratura	Stato di fatto			Interventi di consolidamento			
	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Iniezione di miscele leganti (*)	Intonaco armato (**)	Ristilatura armata con connessione dei paramenti (**)	Massimo coefficiente complessivo
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	1,3	1,5	2	2,5	1,6	3,5
Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo	1,4	1,2	1,5	1,7	2,0	1,5	3,0
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	1,1	1,3	1,5	1,5	1,4	2,4
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,5	1,2	1,3	1,4	1,7	1,1	2,0
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,6	-	1,2	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	-	1,2	1,2	1,2	-	1,4
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	(***)	-	1,3 (****)	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	1,2	-	-	-	1,3	-	1,3

(*) I coefficienti correttivi relativi alle iniezioni di miscele leganti devono essere commisurati all'effettivo beneficio apportato alla muratura, riscontrabile con verifiche sia nella fase di esecuzione (iniettabilità) sia a-posteriori (riscontri sperimentali attraverso prove soniche o similari).

(**) Valori da ridurre convenientemente nel caso di pareti di notevole spessore (p.es. > 70 cm).

(***) Nel caso di muratura di mattoni si intende come "malta buona" una malta con resistenza media a compressione f_m superiore a 2 N/mm². In tal caso il coefficiente correttivo può essere posto pari a $f_m^{0.15}$ (f_m in N/mm²).

(****) Nel caso di muratura di mattoni si intende come muratura trasversalmente connessa quella apparecchiata a regola d'arte.

Fig. 2.2 Tabella riassuntiva dei coefficienti correttivi da applicare ai tipi murari © NTC 2018.

Con il valore dell'I.Q.M. ottenuto si classifica la muratura secondo tre categorie, dalla A (la migliore) alla C (la peggiore), come riportato in Tab.2.1.

Categoria muraria Tipo di azione	A	B	C
Azioni verticali	$5 \leq I.Q.M. \leq 10$	$2,5 \leq I.Q. < 5$	$0 \leq I.Q. < 2,5$
Azioni orizzontali ortogonali	$7 \leq I.Q. \leq 10$	$4 < I.Q. < 7$	$0 \leq I.Q. \leq 4$
Azioni orizzontali complanari	$5 < I.Q. \leq 10$	$3 < I.Q. \leq 5$	$0 \leq I.Q. \leq 3$

Tab. 2.1 Attribuzione delle categorie murarie in base ai punteggi di I.Q.M.

In base alle diverse azioni, il comportamento meccanico delle murature può essere classificato come segue:

Per azioni verticali:

- Una muratura di categoria A difficilmente subisce lesioni e può essere considerata di buona qualità.
- Una muratura di categoria B ha bassa probabilità di collassare, ma può lesionarsi e può essere considerata di media qualità.
- Una muratura di categoria C ha elevate probabilità di subire lesioni o di andare fuori piano per instabilità, specie se di spessore limitato e se molto caricata. Questa categoria di muratura va considerata sempre di scarsa qualità.

Per azioni orizzontali fuori piano:

- Una muratura di categoria A è in grado di mantenere un comportamento monolitico. Ha bassa probabilità di lesionarsi o di collassare per azioni fuori piano, se le pareti sono ben collegate fra loro e ai solai.
- Una muratura di categoria B non è in grado di mantenere un comportamento monolitico, ma comunque non si disgrega se sottoposta ad azioni orizzontali fuori piano. Per tale categoria di murature è probabile avere lesioni o spancamenti in caso di sisma, ma è difficile che esse collassino se sono ben collegate agli orizzontamenti.
- Una muratura di categoria C tende a disgregarsi in caso di azioni cicliche ripetute ed è probabile il collasso, anche in presenza di efficaci collegamenti.

Per azioni orizzontali nel piano:

- Una muratura di categoria A ha basse probabilità di lesionarsi; infatti, può essere definita come una muratura di buona qualità.
- Una muratura di categoria B, in caso di sisma, ha buone probabilità di lesionarsi, specialmente se le pareti sono sottili o se sono poche rispetto all'area coperta dall'edificio. Si definisce muratura di media qualità.
- Una muratura di categoria C ha molte probabilità di lesionarsi nel piano delle pareti e le lesioni che subirà, sicuramente, saranno di grande entità; pertanto, in questa categoria rientrano le murature di scarsa qualità.

I valori relativi alle caratteristiche meccaniche per le murature possono essere calcolati con il metodo della correlazione tra I.Q.M. e le norme N.T.C. 2018: ogni correlazione è rappresentata su un diagramma cartesiano in cui le ascisse riportano il valore I.Q.M.

ottenuto, mentre le ordinate rappresentano il parametro meccanico d'interesse (Forza di Compressione f_m , Resistenza al taglio τ_0 , Modulo di Young E, modulo di taglio G) (Fig. 2.3).

La correlazione permette di validare da un punto di vista normativo i dati ottenibili, evidenziando, come spesso accade, una corrispondenza reciproca tra i metodi, permettendo così di stimare con buona approssimazione e con approccio tipologico, i parametri meccanici che caratterizzano ciascun tipo murario.

Anche alla luce di recenti considerazioni critiche sul metodo I.Q.M. (Borri et al. 2020), si è ritenuto opportuno svolgere un confronto tra i risultati ottenuti per le caratteristiche meccaniche delle murature, quali la forza di compressione (f), la resistenza al taglio (τ_0), il modulo di taglio (G), il modulo di Young (E), determinati attraverso le correlazioni proposte da Borri e De Maria (Borri and De Maria 2019; Borri et al. 2020), e i valori deducibili dalle Tabelle C8.5.I e C8.5.II della Circolare n. 7 del 21/01/2019 applicati al contesto locale.

Individuando, fra le tipologie murarie proposte dalla Circolare, quelle più simili ai tipi definiti nei diversi contesti locali e considerando i coefficienti correttivi della tabella C8.5.II, si sono ottenuti i valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) per ogni tipo murario. Questi valori sono riportati in opportune tabelle specifiche per ogni contesto locale. Inoltre, sono stati definiti dei diagrammi a radar per mettere in evidenza le differenze tra i valori ricavati tramite IQM e NTC2018, riferiti a f , τ_0 , E, G.

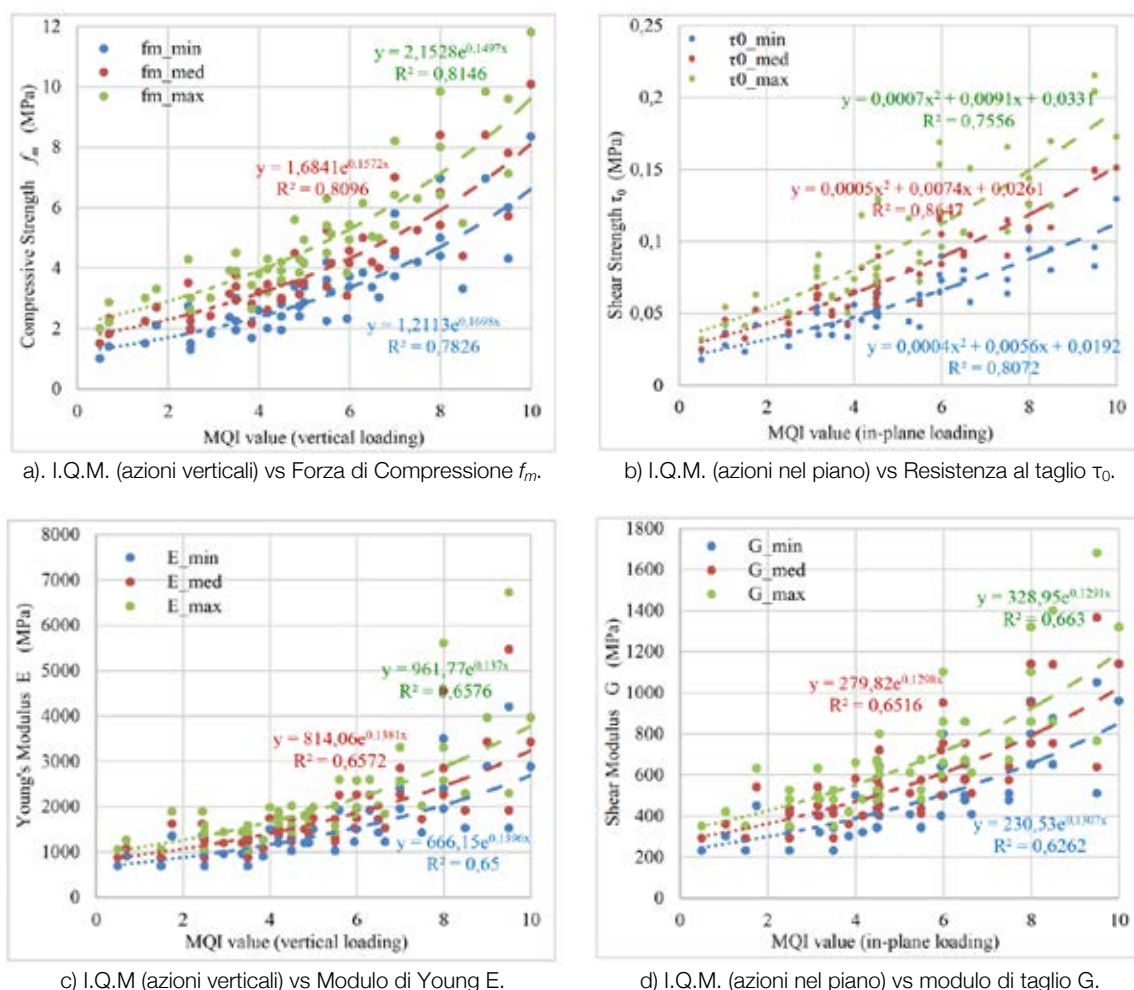


Fig. 2.3 Grafici di correlazione tra i valori di IQM e i valori dalla NTC2018.

Il confronto tra i due approcci, ovvero il metodo IQM (Indice di Qualità Muraria) e le normative di riferimento (NTC2018 e circolare n°7 del 2019), risulta cruciale per determinare la correttezza dei dati ottenuti rispetto allo stato attuale delle strutture murarie. Da una parte, il metodo IQM consente una valutazione più approfondita e specifica delle proprietà sia qualitative che quantitative della muratura in esame, mentre dall'altra, le normative vigenti, pur fornendo una classificazione più generale dei tipi murari, risultano meno dettagliate e in alcuni casi limitanti. Considerando esclusivamente le murature realizzate in pietra si evince che la norma le classifica esclusivamente in sei categorie, con coefficienti migliorativi che si limitano a tre per ciascun tipo murario, trascurando molte delle variabili che caratterizzano le specificità di una muratura reale.

L'applicazione di entrambi i metodi è stata effettuata considerando i vari contesti locali, evidenziando come, in alcuni casi, la normativa tecnica tenda a sovrastimare le caratteristiche meccaniche della muratura. Questo determina una percezione errata delle reali condizioni strutturali, il che potrebbe tradursi in interventi di miglioramento strutturale di entità ridotta rispetto al necessario. Tale sottostima potrebbe indurre in errore i progettisti, favorendo soluzioni economiche ma potenzialmente non adeguate. Al contrario, valori sottostimati dalla normativa possono portare a interventi strutturali eccessivamente invasivi e dispendiosi dal punto di vista economico.

Dunque, si ritiene indispensabile utilizzare entrambi gli approcci di valutazione, sia il metodo IQM che le normative vigenti, come la NTC 2018, per limitare gli scenari esposti. Progettare interventi che tengano conto di un intervallo di valori compreso tra quelli forniti dal metodo IQM e quelli suggeriti dalle normative potrebbe rappresentare un equilibrio ottimale. Questa strategia non solo consentirebbe di ridurre i costi associati agli interventi strutturali, ma garantirebbe anche un livello di sicurezza e qualità adeguato alla conservazione e al recupero, ed inoltre per il miglioramento delle prestazioni meccaniche delle strutture murarie. Tale approccio integrato risulta fondamentale per ottimizzare i progetti di restauro e miglioramento strutturale, mantenendo al contempo il rispetto delle normative e un elevato standard di qualità ingegneristica.

2.2 IDENTIFICAZIONE E ANALISI QUALI-QUANTITATIVA DEI TIPI MURARI

Il metodo di classificazione tipologico-costruttiva proposto nel presente lavoro di ricerca trae spunto dal metodo I.Q.M. L'individuazione dei parametri geometrico-costruttivi utili al calcolo dell'I.Q.M. risultano molto utili anche dal punto di vista termico. Dunque, analizzando le caratteristiche costruttive maggiormente ricorrenti nei contesti locali, si giunge all'individuazione dei tipi murari di seguito proposta.

Il presente studio si concentra esclusivamente sulle murature in materiale lapideo naturale. In particolare, la caratterizzazione delle proprietà termo-fisiche delle murature tradizionali in pietra presenta notevoli difficoltà, dovute alle peculiarità costruttive degli apparecchi murari.

L'ambito geografico scelto per l'indagine è la Sicilia, territorio certamente rappresentativo per l'ampia varietà litologica che la caratterizza e che determina fortemente le modalità e le tecniche costruttive. Inoltre, la secolare stratificazione di culture presenti nell'Isola ha informato la capacità delle maestranze locali e ha favorito l'affermazione di soluzioni e modalità di messa in opera differenti.

Da qui nasce la scelta di indagare maggiormente le murature in materiale lapideo naturale, selezionando i contesti e i materiali opportunamente. La scelta del contesto è ovviamente motivata dalla necessità di svolgere numerose ricognizioni e indagini dirette su un numero elevato di casi.

Per contesto locale si intende un'area in cui si osservano caratteristiche omogenee e ricorrenti nei materiali e nelle tecniche costruttive del patrimonio edilizio storico. Il contesto locale generalmente coincide con un unico centro storico e le costruzioni rurali circostanti. Diversi contesti locali sono caratterizzati dall'uso prevalente dello stesso litotipo. Tuttavia, le proprietà fisiche dei materiali lapidei naturali, come la densità apparente, variano a seconda della cava di estrazione, influenzando così l'uso tradizionale di quella pietra nella muratura.

Le tipologie di muratura sono state identificate per ciascun contesto locale, basandosi sull'osservazione di tutte le superfici murarie esterne visibili nel centro storico. Questo processo manuale di analisi prevede il rilievo geometrico-dimensionale in situ e l'analisi visiva del paramento murario esterno a faccia vista. Il rilievo è stato integrato con l'ispezione delle superfici interne corrispondenti, quando possibile, e con l'esame delle sezioni trasversali in strutture danneggiate, ove disponibili. L'attenzione è stata concentrata sulle seguenti caratteristiche principali: dimensione e forma delle unità murarie, continuità e geometria dei giunti orizzontali, alternanza reciproca dei giunti verticali nei corsi sovrapposti, presenza e frequenza di conci e teste non trasversali, spessore dei giunti di malta.

Le caratteristiche ricorrenti nelle murature storiche, rilevate durante l'analisi in situ, vengono descritte in modo sistematico per mezzo di tipi murari in ogni contesto locale.

Infatti, attraverso l'analisi preliminare vengono identificati i parametri maggiormente ricorrenti dei diversi tipi murari.

La classificazione delle murature in materiale lapideo naturale, proposta nel presente lavoro di ricerca prevede tre gruppi di murature, ciascuno dei quali viene identificato attraverso un codice, connesso alle caratteristiche prevalenti dell'apparecchio:

- *Stone Masonry 1*, (SM1) per le strutture costruite con conci regolari;
- *Stone Masonry 2*, (SM2) per le murature in conci sbozzati;
- *Stone Masonry 3*, (SM3) per le murature caotiche realizzate con pietrame informe o appena sbozzato.

I tre gruppi murari proposti consentono di classificare la maggior parte delle murature in materiale lapideo naturale. Nel gruppo SM1 si raggruppano tutte le murature regolari, realizzate con conci squadrati di dimensione pressoché costante, che presentano filari orizzontali a spessore omogeneo e che garantiscono un adeguato sfalsamento dei giunti verticali. Murature di buona qualità appartengono a questo gruppo.

Di contro, al gruppo SM3 appartengono le murature caotiche in materiale lapideo naturale, composti da elementi di piccole dimensioni, disposti senza ricorsi o filari orizzontali e con la quasi totalità dei giunti verticali non sfalsati.

Infine, al gruppo SM2 appartengono le murature intermedie tra le SM1 e le SM3. In questo tipo di murature è frequente riscontrare conci sbozzati di dimensioni variabili, disposti su filari parzialmente orizzontali e con i giunti verticali parzialmente sfalsati.

Le specificità riscontrabili all'interno del gruppo vengono messe in evidenza con l'individuazione del tipo (es. SM1.1, SM1.2, SM1.3); inoltre, le specificità riscontrate non incidono esclusivamente sulle prestazioni meccaniche della muratura, ma anche sulle prestazioni termoigrometriche.

L'analisi dettagliata delle murature e l'individuazione di tipi omogenei di murature consentono di raffigurare la muratura del tipo attraverso le rappresentazioni grafiche del paramento e delle sezioni trasversali (verticali ed orizzontali) per ciascun tipo di muratura. La rappresentazione grafica non è la riproduzione di un caso di studio specifico, ma una rappresentazione critica che riassume sistematicamente le caratteristiche dell'apparecchio

murario osservato in esempi reali dello stesso tipo. Il disegno mostra superfici e sezioni trasversali di un muro, dove le dimensioni delle unità murarie e dei giunti di malta sono la media degli intervalli misurati in loco. Allo stesso modo, vengono rappresentate graficamente, secondo le caratteristiche osservate, la posizione e la frequenza di conci, di testa ed elementi di regolarizzazione (utilizzati per riempire macro-vuoti interni o per ottenere corsi orizzontali). Lo spessore del muro disegnato dipende dalla dimensione misurata nei casi reali ma è approssimato per ragioni di generalità.

Inoltre, ad ogni tipo murario viene associata una breve descrizione utile all'identificazione delle caratteristiche principali del tipo.

Per ogni tipo si redige una scheda che mostra il ridisegno dell'apparecchio murario e sintetizza i principali dettagli materico-costruttivi.

La scheda, inoltre, fornisce anche l'intervallo di dimensioni per le unità murarie e i giunti di malta, e descrive la geometria ricorrente dei giunti orizzontali e verticali. Inoltre, la scheda stima il rapporto percentuale tra pietra e malta nella sezione trasversale, nonché il contenuto di vuoti (quest'ultimo solo quando sono state ottenute informazioni affidabili dalle sezioni trasversali reali).

In aggiunta, ogni scheda riporta alcune immagini rappresentative del tipo di muratura individuato nel contesto locale, per favorire una migliore comprensione del tipo.

In molti casi di studio è stata osservata la presenza di diversi materiale lapideo naturale nello stesso muro, spesso perché diverse proprietà meccaniche rendono ciascuna pietra adatta a specifiche esigenze costruttive. Pertanto, in ciascun contesto locale, i tipi murari possono essere corredati dalla descrizione dei materiali e delle soluzioni utilizzate per le parti rilevanti della muratura, come base, angoli, cornici e contorni delle aperture. Nel caso in cui siano stati osservati diversi materiali lapidei naturali nelle parti ordinarie dello stesso tipo di muro, la scheda indica il materiale prevalente e informa sul contenuto degli altri materiali (espresso come percentuale rispetto alla superficie muraria analizzata).

I contesti locali sono stati selezionati per analizzare i materiali lapidei naturali comunemente utilizzati nell'architettura storica siciliana come: calcarenite, calcare compatto, arenaria quarzosa e gesso. Le rocce vulcaniche ampiamente utilizzate in gran parte della Sicilia orientale non sono trattate in questo studio. Il repertorio contenente i diversi contesti locali mira a includere anche i materiali lapidei naturali utilizzati in aree circoscritte, ma significative per rilevanza e dimensione del corrispondente patrimonio edilizio storico: questo è il caso del travertino nel patrimonio architettonico di Alcamo. In Tab. 2.2 si riassumono i materiali delle unità murarie esaminati in ciascun contesto locale.

La classificazione tipologica proposta risulta influenzata dalla soggettività dell'operatore durante l'individuazione dei parametri geometrico-costruttivi in situ. Se da un lato tale soggettività può costituire un vantaggio, qualora l'operatore possieda un'elevata esperienza nelle murature e nelle tecniche costruttive, dall'altro può rappresentare un limite, poiché la classificazione potrebbe risultare imprecisa e i dati potrebbero essere trattati in modo non omogeneo. Per questo motivo, sono state impiegate analisi statistiche al fine di rendere la classificazione dei tipi il più possibile oggettiva, basandola su un'analisi integrata di dati qualitativi e quantitativi.

Questo processo, descritto ampiamente nel capitolo successivo, ha richiesto una categorizzazione sistematica dei dati raccolti in situ.

In appendice si riportano alcuni dei casi di studio nella quale sono state indagate le murature dei Comuni di: Gangi, Petralia Sottana ed Alcamo.

Contesto locale	Arenaria arciosa	Biocalcarenrite	Calcarenrite	Calcare	Quarzarenite	Gesso selenitico	Argillite	Marna arenitica	Conglomerati	Gneiss	Travertino	Mattoni
Alcamo			●								●▲■*	
Bompietro				▲ ■								
Castel di Lucio					●+							
Comiso				■								
Gangi			●▲									
Mistretta					▲■							
Palermo		■										
Patti			●+							●+		●
Petralia Sottana					●▲■*				●▲■*			●
Santo Stefano di Camastra	●■+											
Scicli				■				■				
Sutera						■						
Tusa					●+		●+					

Legenda

- Classificazione tipologica murature
- ▲ Prove in opera

- Prove di laboratorio
- * Modellazione FEM
- + Analisi cluster

Tab. 2.2 Materiali indagati nei contesti locali.

Bibliografia

Borri A, Corradi M, Castori G, De Maria A (2015) A method for the analysis and classification of historic masonry. Bulletin of Earthquake Engineering 13:2647–2665. <https://doi.org/10.1007/S10518-015-9731-4/FIGURES/14>

Borri A, Corradi M, De Maria A (2020) The failure of masonry walls by disaggregation and the masonry quality index. Heritage 3:1162–1198. <https://doi.org/10.3390/HERITAGE3040065>

Borri A, De Maria A (2019) Il metodo IQM per la stima delle caratteristiche meccaniche delle murature: allineamento alla circolare n. 7/2019

Di Francesco C, Fabbri R, Bevilacqua F (2006) Atlante dell'architettura ferrarese. Elementi costruttivi tradizionali. Milano

Genova E, La Gennusa M, La Placa E, Vinci C (2021) Integrating thermal and mechanical characteristics of historic masonry categories: development of a Sicilian database. IOP Conf Ser Earth Environ Sci 863:1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/863/1/011001>

Giovanetti F, Marconi P (1997) Manuale del recupero del centro storico di Palermo. Flaccovio, Palermo

La Placa E, Genova E, La Gennusa M, Vinci C (2024) The masonry type of Petralia Sottana

La Placa E, Genova E, Nasello C, Vinci C (2022) Integrated mechanical and thermal analysis of historic masonry walls in Sicily: the case study of Gangi. Gangemi editore SpA international, Messina, pp 709–718

NTC (2018) Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni». Decreto ministeriale del 17 gennaio 2018 pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n.42 del 20-02-2018

Vignoli A, Boschi S, Signorini N, et al (2019) Abaco delle murature della regione toscana. Manuale per la compilazione delle schede di qualità muraria

Zuccaro G, Dolce M, De Gregorio D, et al (2015) La scheda Cartis per la caratterizzazione tipologico-strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari. Valutazione dell'esposizione In analisi di rischio sismico

APPENDICE A – Contesto Locale - Gangi

Materiali lapidei naturali

Le murature storiche di Gangi, fondate non di rado sulla roccia affiorante, sono composte da conci di pietra, cavata di frequente dal sito stesso della costruzione. Il materiale lapideo prevalente è una calcarenite composta da granuli arenacei, resti fossili e granuli di quarzo cementati da una matrice di carbonato di calcio.

Tipi murari

I caratteri costruttivi ricorrenti delle murature sono stati descritti con sei tipi murari: tre sono contraddistinti dall'uso di conci squadrate in apparecchi di tipo pseudo-isodomo (SM1.1, SM1.2, SM1.3), due da conci sbazzati (SM2.1, SM2.2) e uno da pietrame informe con apparecchio caotico (SM3).

Indice di Qualità Muraria

I dettagli costruttivi rilevati per individuare i tipi murari (in particolare le dimensioni dei conci, la loro forma e disposizione, la presenza di diatoni e ortostati, la geometria dei giunti di malta) hanno consentito di stimare l'Indice di Qualità Muraria associabile a ciascuna tipologia. Ad esempio, si osservano una migliore risposta alle azioni verticali nel piano e fuori dal piano per il tipo SM1.1 e una risposta più scadente per il tipo SM3.

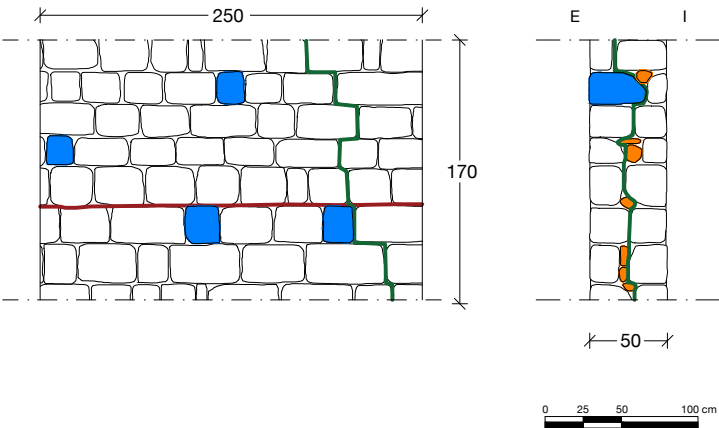
L'indice di qualità muraria per azioni verticali risulta associabile alla categoria A ($5 \leq I.Q.M. \leq 10$) per i tipi SM1.1, SM1.2, SM1.3, SM2.2; della categoria B ($2,5 \leq I.Q.M. < 5$) fa parte il tipo SM2.1, infine, nella categoria C ($0 \leq I.Q.M. < 2,5$) rientra il tipo SM3. Tale valutazione dà indicazioni sulla possibilità d'innescò e sulla gravità delle lesioni, in particolare per i tipi murari in categoria B o C (I.Q.M. medio e scarso).

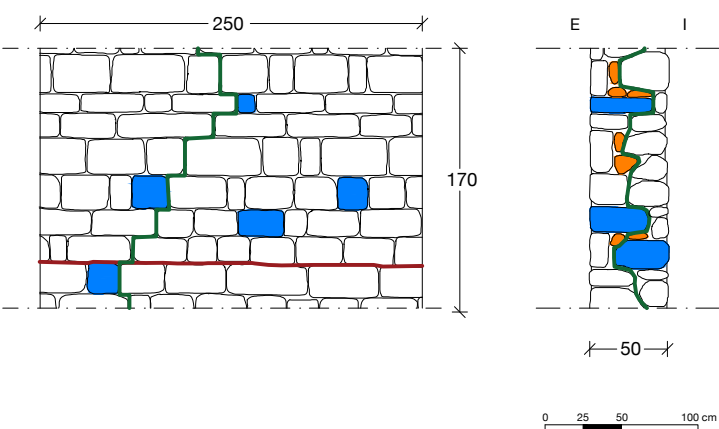
Il valore d'indice per azioni orizzontali fuori piano è associabile alla categoria A ($7 \leq I.Q.M. \leq 10$) per il tipo murario SM1.1, alla categoria B ($4 < I.Q.M. < 7$) per i tipi SM1.2, SM1.3 e SM2.2, alla categoria C ($0 \leq I.Q.M. \leq 4$) per i tipi murari SM2.1 e SM3. Nelle condizioni più critiche, cioè nelle murature valutate come B e C, il collasso è probabile in caso di sisma agente in direzione ortogonale al piano, poiché gli strati che compongono la parete avranno un comportamento differenziato.

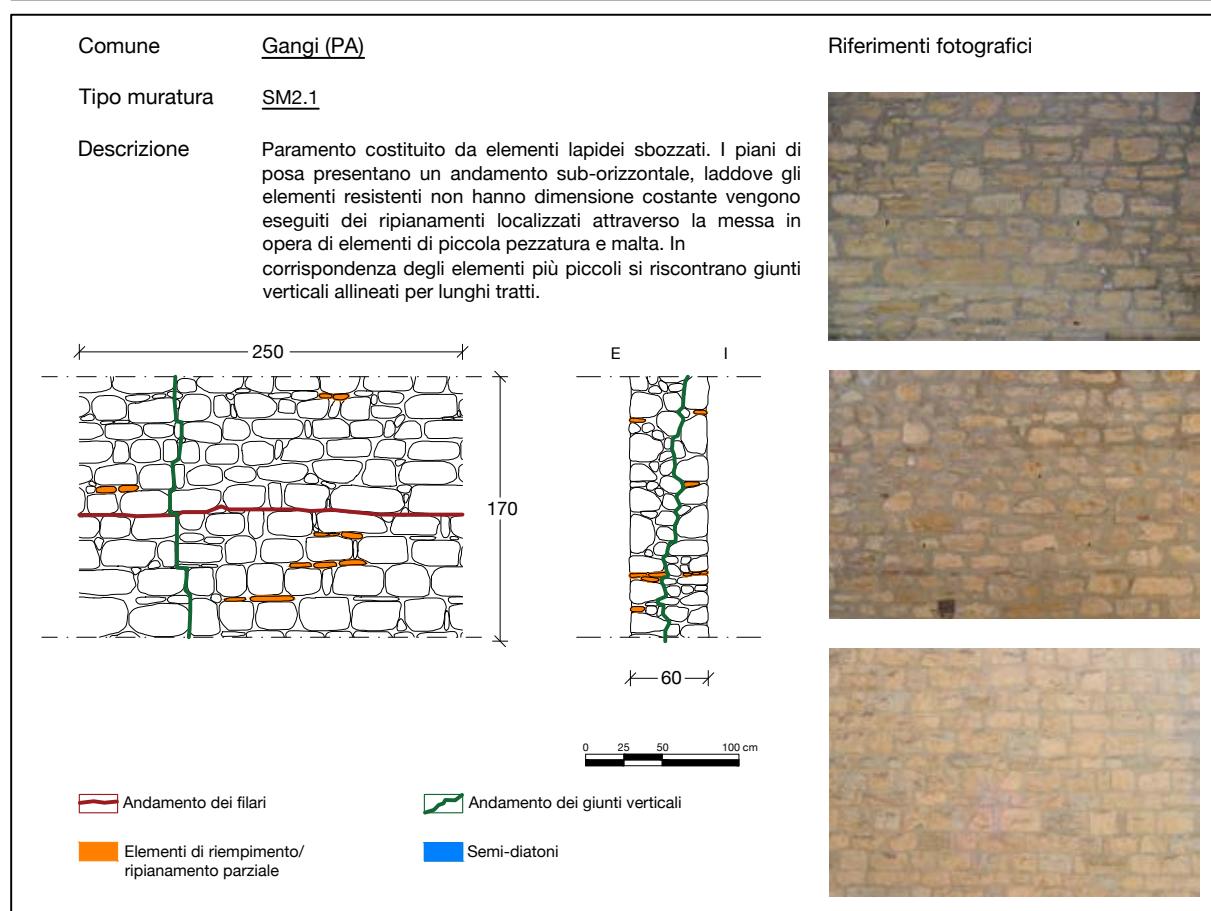
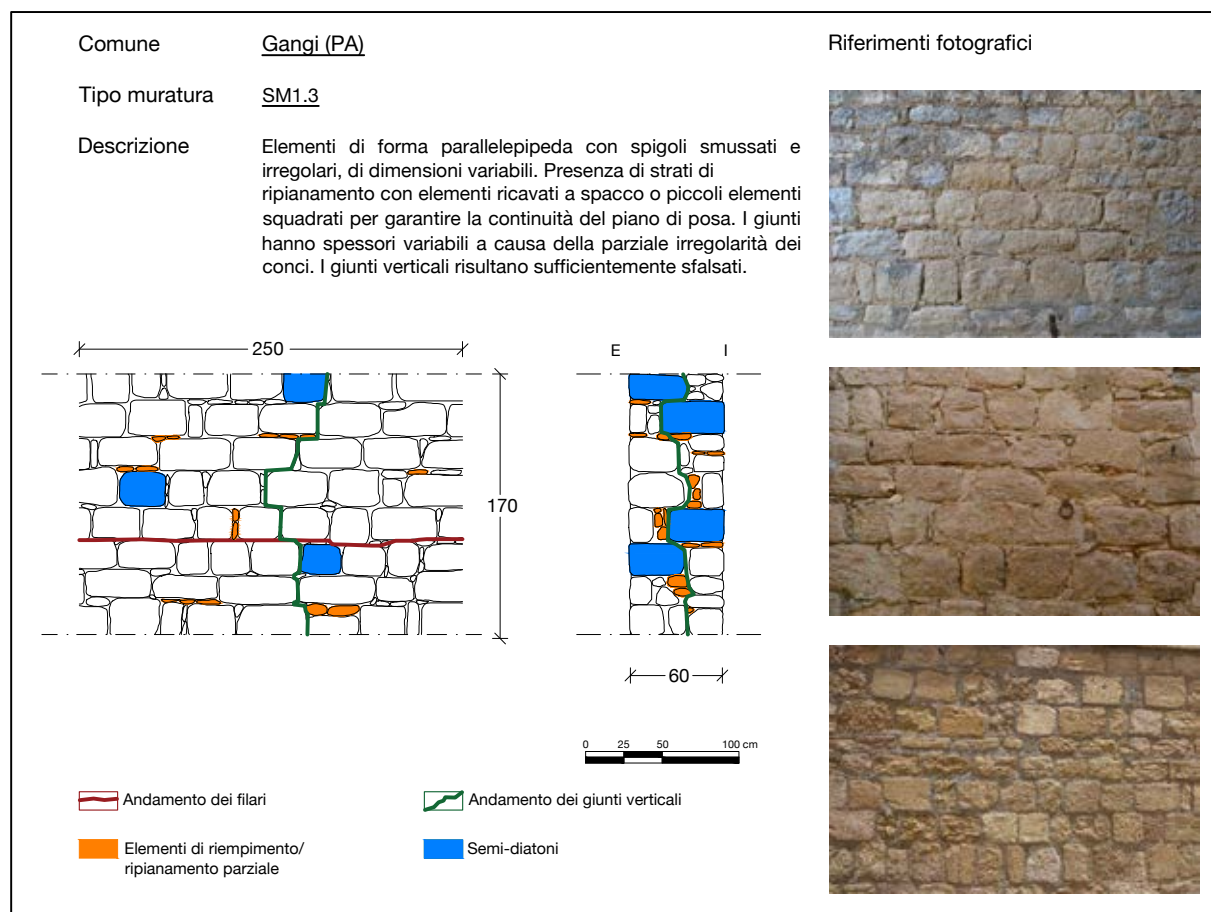
Per azioni orizzontali nel piano, si è ottenuto un valore di I.Q.M. associabile alla categoria A ($5 < I.Q.M. \leq 10$) per i tipi SM1.1, SM1.2 e SM1.3; il tipo SM2.2 rientra nella categoria B ($3 < I.Q.M. \leq 5$), i tipi SM2.1 e SM3 nella categoria C ($0 \leq I.Q.M. \leq 3$).

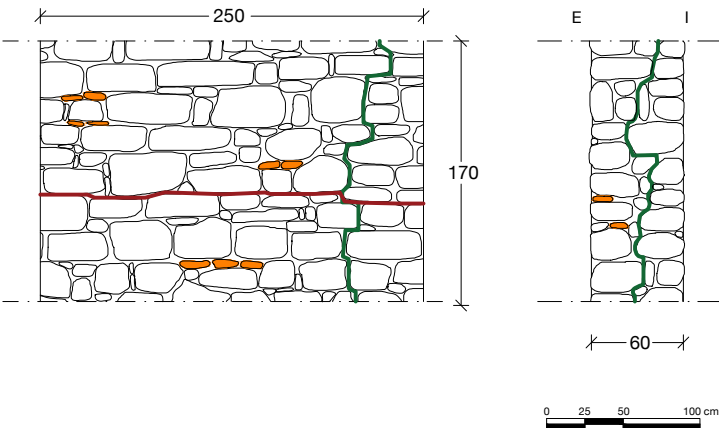
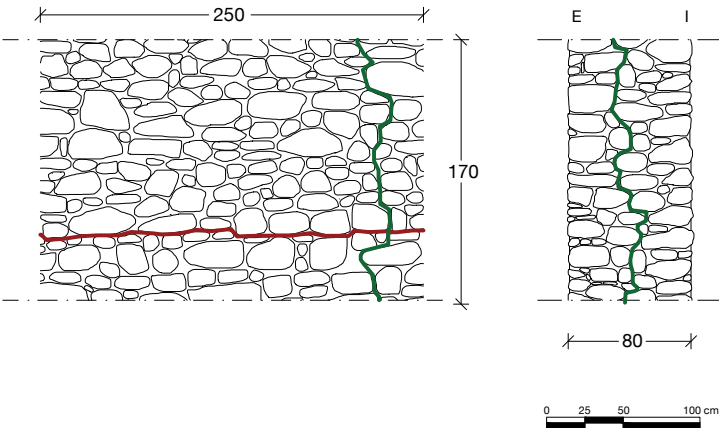
Correlazione IQM – NTC2018 circolare n°7 del 2019

Da un'analisi dei risultati si nota che per le murature regolari (SM1.1, SM1.2) e caotiche (SM3) i valori ottenuti tramite IQM e NTC2018 per f , τ_0 , ed E sono paragonabili tra loro, mentre per il valore G la differenza è notevole nelle murature di tipo SM1.1, SM1.2, SM1.3. Per le murature di categoria SM1.3, SM2.1 e SM2.2 le differenze tra i valori calcolati per f e τ_0 , si mantiene pressoché costante. Il modulo di Young per le categorie SM1.3 risulta ampiamente differente, mentre per SM2.1, SM2.2 e SM3 risulta coincidente.

Comune	<u>Gangi (PA)</u>	Riferimenti fotografici
Tipo muratura	<u>SM1.1</u>	
Descrizione	Paramento murario ben organizzato ad assestamento pseudo-isodomo. Gli elementi, di dimensioni medie, vengono disposti con la faccia maggiore a vista, tranne in alcuni casi in quanto vengono collocati ortogonalmente alla muratura consentendo l'ammorsamento con il setto interno, fungono quindi da semi-diatoni. I piani di posa sono orizzontali senza l'ausilio di elementi di ripianamento.	
  Andamento dei filari  Andamento dei giunti verticali  Elementi di riempimento/riplanamento parziale  Semi-diatoni		  

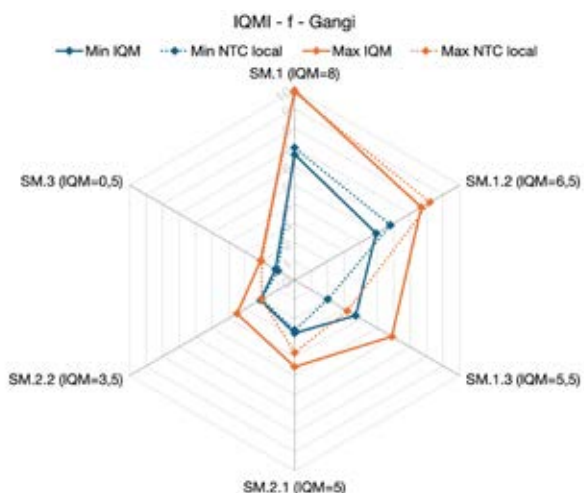
Comune	<u>Gangi (PA)</u>	Riferimenti fotografici
Tipo muratura	<u>SM1.2</u>	
Descrizione	Paramento murario ben organizzato ad assestamento pseudo-isodomo. Alternanza tra filari con conci disposti di piatto e di fascia. Questa disposizione degli elementi sul paramento esterno consente di migliorare l'ammorsamento della muratura definendo un comportamento monolitico dell'intero setto.	
  Andamento dei filari  Andamento dei giunti verticali  Elementi di riempimento/riplanamento parziale  Semi-diatoni		  



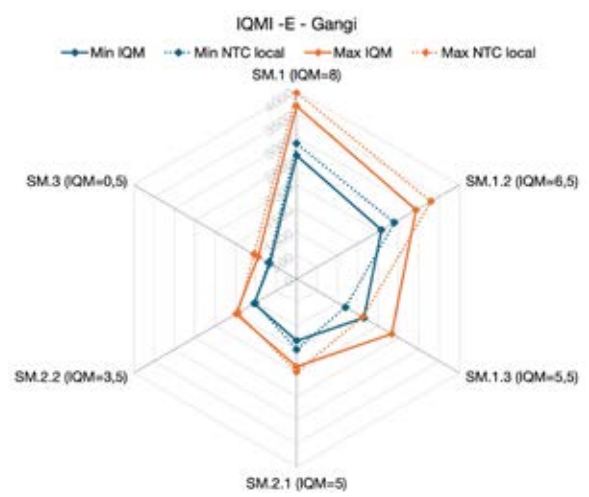
Comune	<u>Gangi (PA)</u>	Riferimenti fotografici
Tipo muratura	<u>SM2.2</u>	
Descrizione	Paramento costituito da elementi lapidei sbozzati e di forma irregolare. Presenza di elementi di modeste dimensioni. piani di posa risultano orizzontali o sub-orizzontali per brevi tratti. I giunti verticali frequentemente non risultano sufficientemente sfalsati, tuttavia gli elementi di grande dimensione ne interrompono l'allineamento.	
  Andamento dei filari  Elementi di riempimento/riplanamento parziale  Andamento dei giunti verticali  Semi-diatoni		  
Comune	<u>Gangi (PA)</u>	Riferimenti fotografici
Tipo muratura	<u>SM3</u>	
Descrizione	Paramento con pietrame informe, con tessitura caotica. Evidenti problemi di ingranamento tra gli elementi. I piani di posa non sono identificabili, questo porta al contatto diretto degli elementi in corrispondenza di aree ristrette sollecitando differientemente gli elementi stessi. Giunti di malta di grandezza notevole.	
  Andamento dei filari  Elementi di riempimento/riplanamento parziale  Andamento dei giunti verticali  Semi-diatoni		  

Tipologia muraria	IQM/paramento	I.Q.M.	Correlazione I.Q.M.		Tabelle C8.5.I e C8.5.II dalla Circolare 7 del 2019		Tipologia muraria norma
			Min	Max	Min	Max	
			[N·mm ⁻²]	[N·mm ⁻²]	[N·mm ⁻²]	[N·mm ⁻²]	
SM.1	IQM _v - f	9,5	6,60	9,98	6,96	9,84	Muratura a blocchi lapidei squadri
	IQM _i - τ ₀	8	0,09	0,15	0,108	0,144	
	IQM _i - G	8	627,22	922,83	960	1320	
	IQM _v - E	9,5	2626	3677	2880	3960	
SM.1.2	IQM _v - f	8,00	4,94	7,67	5,8	8,2	Muratura a blocchi lapidei squadri
	IQM _i - τ ₀	6,50	0,07	0,12	0,09	0,12	
	IQM _i - G	6,50	507	746,91	800	1100	
	IQM _v - E	8,00	2084	2932	2400	3300	
SM.1.3	IQM _v - f	6,50	3,70	5,90	2	3,2	Muratura a conci regolari di pietra tenera
	IQM _i - τ ₀	5,50	0,06	0,10	0,04	0,08	
	IQM _i - G	5,50	439,79	648,68	400	500	
	IQM _v - E	6,50	1654,37	2337,57	1200	1620	
SM.2.1	IQM _v - f	3,50	2,07	3,49	2	2	Muratura a conci sbazzati, con paramenti di spessore disomogeneo
	IQM _i - τ ₀	3,00	0,04	0,06	0,035	0,051	
	IQM _i - G	3,00	308,37	455,98	340	480	
	IQM _v - E	3,50	1042,29	1486,03	1020	1440	
SM.2.2	IQM _v - f	5,00	2,77	4,54	2,6	3,8	Muratura in pietre a spacco con buona tessitura
	IQM _i - τ ₀	5,00	0,05	0,09	0,056	0,074	
	IQM _i - G	5,00	409,65	604,52	500	660	
	IQM _v - E	5,00	1313,14	1863,79	1500	1980	
SM.3	IQM _v - f	0,50	1,16	2,07	1	2	Muratura in pietrame disordinata
	IQM _i - τ ₀	0,50	0,02	0,03	0,018	0,032	
	IQM _i - G	0,50	216,22	320,52	230	350	
	IQM _v - E	0,50	656,67	944,70	690	1050	

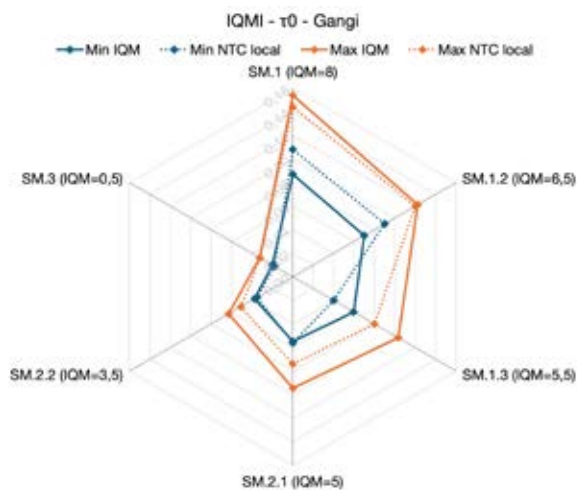
Tab. A.1 Correlazione tra I.Q.M. e Circolare n. 7 del 21/01/2019 per il caso studio di Gangi.



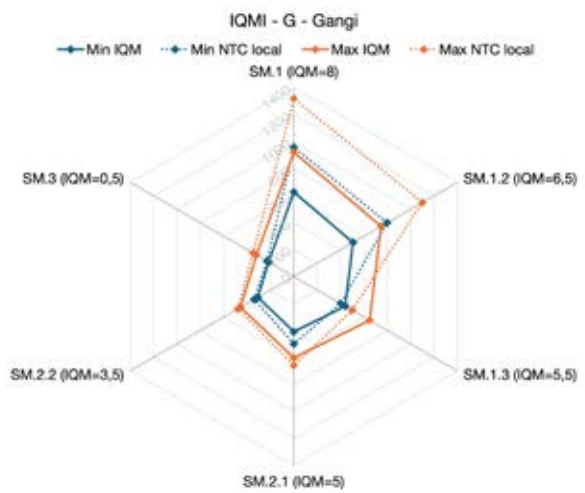
Confronto tra le forze di compressione f calcolate con IQM e con NTC 2018



Confronto tra il modulo di Young E calcolato con IQM e con NTC 2018



Confronto tra i valori di resistenza al taglio τ_0 calcolati con IQM e con NTC 2018



Confronto tra il modulo di taglio G calcolato con IQM e con NTC 2018

Fig. A.1 Correlazione tra I.Q.M. e Circolare n. 7 del 21/01/2019 per il caso studio di Gangi.

APPENDICE B – Contesto Locale – Petralia Sottana

Materiali lapidei naturali

Le murature storiche di Petralia Sottana sono composte da conci di pietra, cavata di frequente dal sito stesso della costruzione. I materiali ampiamente diffusi nel territorio sono l'arenaria quarzosa e i conglomerati. Il primo materiale veniva principalmente utilizzato per le parti più sollecitate della muratura, mentre il conglomerato - generalmente sotto forma di pietrame irregolare - veniva impiegato per le parti ordinarie. Ulteriore materiale presente nelle costruzioni è la pietra calcarea tenera, ma il suo utilizzo nella costruzione non è comune. Infine, il gesso, ampiamente disponibile nei dintorni di Petralia Sottana, veniva generalmente impiegato come legante.

Tipi murari

Sono stati individuati cinque tipi di muratura. Il primo tipo è caratterizzata da corsi regolari di elementi lapidei quasi a spigolo vivo (SM1). Altri due tipi di murature ricorrenti presentano elementi lapidei meno regolari e sono state classificate come SM2, differenziandosi principalmente per la continuità e la regolarità dei giunti orizzontali. Infine, per la categoria SM3 sono state identificate due tipologie composte da pietrame irregolare, disposto in maniera caotica, distinte in base alle dimensioni medie degli elementi lapidei.

Indice di Qualità Muraria

L'indice di qualità muraria per azioni verticali risulta associabile alla categoria A ($5 \leq I.Q.M. \leq 10$) per i tipi SM1, SM2.1; della categoria B ($2,5 \leq I.Q.M. < 5$) fa parte il tipo SM2.2, infine, nella categoria C ($0 \leq I.Q.M. < 2,5$) rientra il tipo SM3.1 e SM3.2. Queste categorie forniscono indicazioni sulla possibilità d'innescio e sulla gravità delle lesioni, in particolare per i tipi murari in categoria B o C che presentano un I.Q.M. medio-scarso.

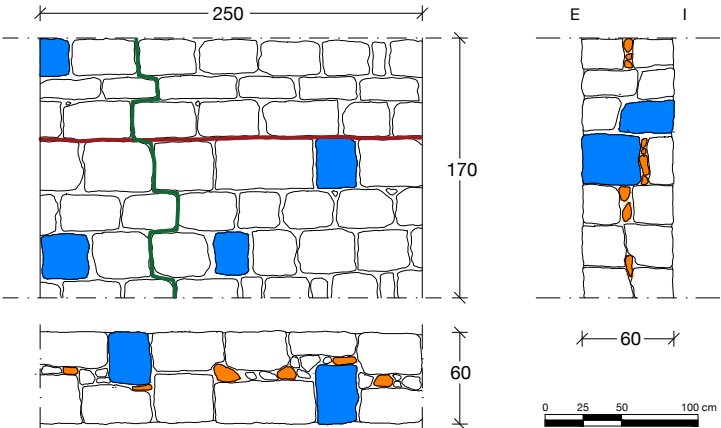
Il valore d'indice per azioni orizzontali fuori piano è associabile alla categoria A ($7 \leq I.Q.M. \leq 10$) per il tipo murario SM1, SM2.1, alla categoria C ($0 \leq I.Q.M. \leq 4$) per i tipi murari SM2.2 e SM3.1 e SM3.2. Nelle condizioni più critiche, cioè nelle murature valutate C, il collasso è probabile in caso di sisma agente in direzione ortogonale al piano, poiché gli strati che compongono la parete avranno un comportamento differenziato.

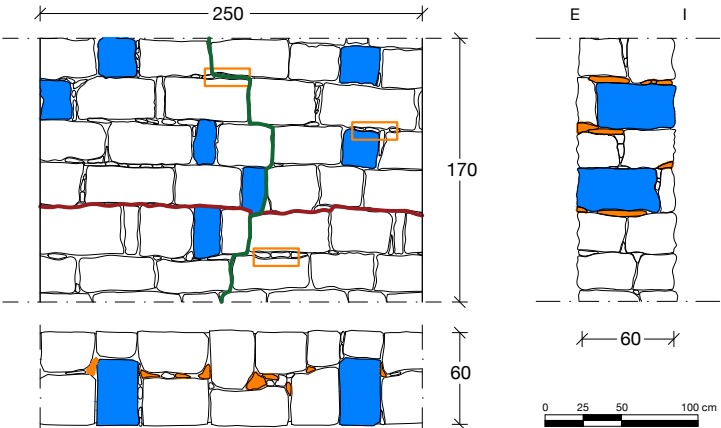
Per azioni orizzontali nel piano, si è ottenuto un valore di I.Q.M. associabile alla categoria A ($5 < I.Q.M. \leq 10$) per i tipi SM1, SM2.1; il tipo SM2.2 rientra nella categoria B ($3 < I.Q.M. \leq 5$); i tipi SM3.1 e SM3.2 nella categoria C ($0 \leq I.Q.M. \leq 3$).

Correlazione IQM – NTC2018 circolare n°7 del 2019

I valori ottenuti sono stati correlati con i valori indicati nelle tabelle C8.5.I e C8.5.II della circolare 7 del 2019, al fine di effettuare una verifica di controllo dei valori di I.Q.M.

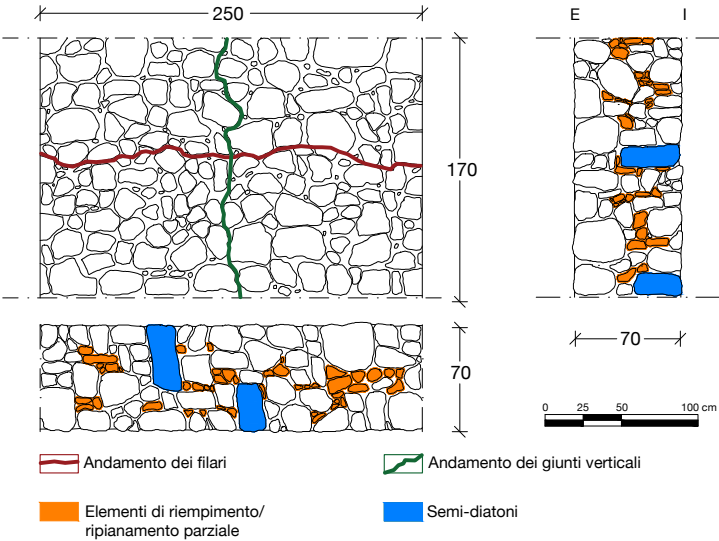
Da un'analisi dei risultati si nota una netta corrispondenza tra i valori di f e τ_0 ottenuti per i tipi murari di Petralia Sottana calcolati con entrambe le metodologie di calcolo. I valori calcolati di E e G risultano maggiormente discordanti tra IQM e NTC2018.

Comune	<u>Petralia Sottana (PA)</u>	Riferimenti fotografici
Tipo muratura	<u>SM1</u>	
Descrizione	Paramento murario ad assestamento regolare pseudo-isodomo con pietre locali mediamente squadrate. I blocchi sono disposti in corsi ordinati ad andamento rettilineo allettati con malta di calce o di gesso. Le pietre sono disposte con la faccia di maggiore dimensione a vista sul paramento. I giunti risultano sufficientemente sfalsati e l'ammorsamento della muratura è garantito dalla presenza di semidiatoni.	
 		
		

Comune	<u>Petralia Sottana (PA)</u>	Riferimenti fotografici
Tipo muratura	<u>SM2.1</u>	
Descrizione	Paramento murario ad andamento semiregolare realizzato con pietre locali sbozzate di forma pressochè parallelepipedica allettate con malta di calce o di gesso. Gli elementi sono disposti secondo corsi sub orizzontali grazie alla posa in opera di riempimenti localizzati di malta ed elementi di piccola pezzatura. I giunti verticali risultano sufficientemente sfalsati.	
 		
		

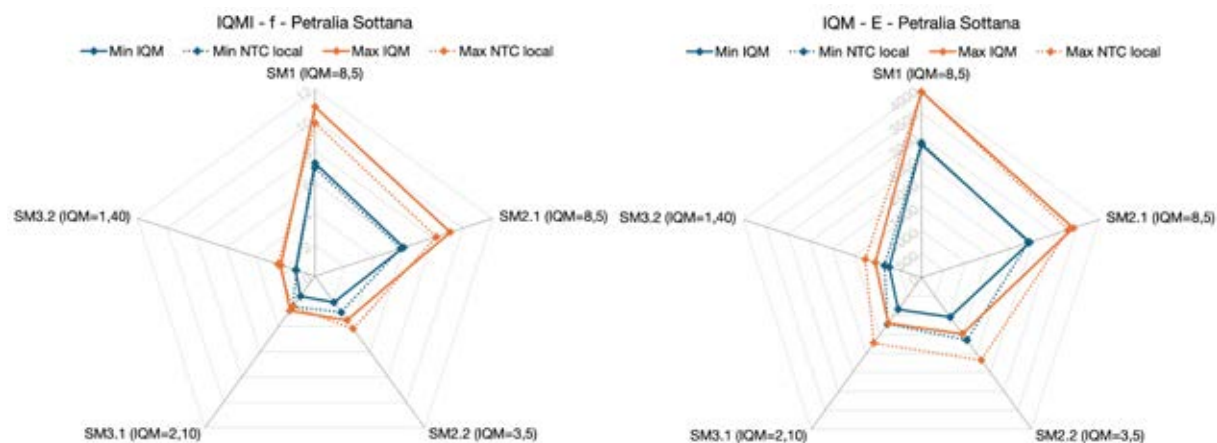
Comune	<u>Petralia Sottana (PA)</u>	Riferimenti fotografici
Tipo muratura	<u>SM2.2</u>	
Descrizione	Paramento murario ad andamento semiregolare realizzato con pietre locali sbozzate di forma pressocchè parallelepipedica allettate con malta di calce o di gesso. Gli elementi sono disposti secondo corsi sub orizzontali. Le altezze degli elementi sono differenti all'interno dello stesso filare, ciò comporta la formazione di piani di regolarizzazione con malta e zeppe. I giunti risultano sono sfalsati.	
— Andamento dei filari — Andamento dei giunti verticali ■ Elementi di riempimento/riplanamento parziale ■ Semi-diatoni		

Comune	<u>Petralia Sottana (PA)</u>	Riferimenti fotografici
Tipo muratura	<u>SM3.1</u>	
Descrizione	Paramento murario ad assestamento caotico di pietre locali sbozzate di media e piccola dimensione, allettate con malta di calce o di gesso. I piani di posa sono sub-orizzontali, i ripianamenti sono realizzati con rinzeppature di pietrame minuto o spessori di malta variabili. Si può riscontrare all'allineamento dei giunti verticali soprattutto nei casi in cui i conci sono di dimensioni ridotte.	
— Andamento dei filari — Andamento dei giunti verticali ■ Elementi di riempimento/riplanamento parziale ■ Semi-diatoni		

Comune	<u>Petralia Sottana (PA)</u>	Riferimenti fotografici
Tipo muratura	<u>SM3.2</u>	
Descrizione	Paramento murario ad assestamento caotico di pietre sbazzate di media e piccola dimensione allettate con malta di calce o di gesso. I piani di posa orizzontali non sono individuabili in tutto il paramento, i ripianamenti sono realizzati con rinzeppature di pietrame minuto o spessori di malta variabili. Si può riscontrare all'allineamento dei giunti verticali soprattutto nei casi in cui le pietre sono di dimensioni ridotte.	
		 

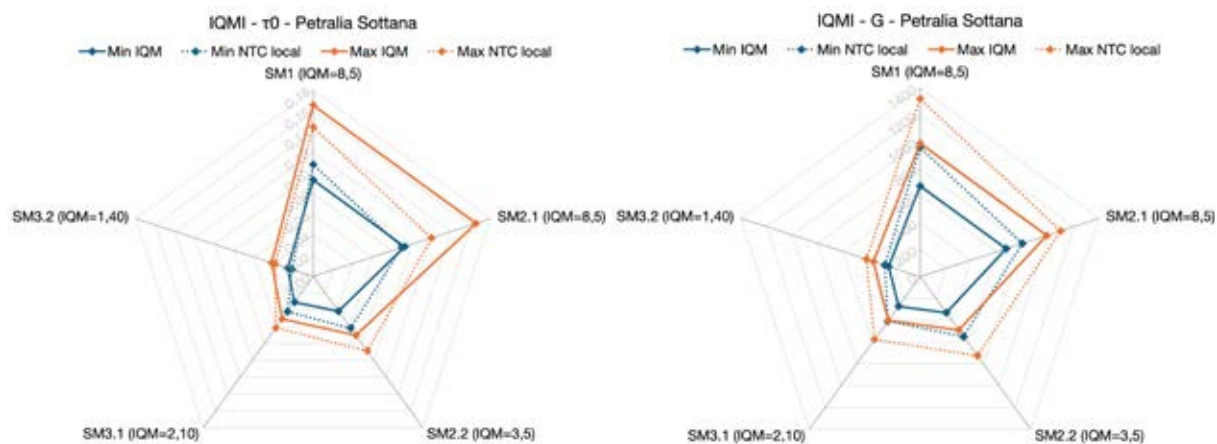
Tipologia muraria	IQM/paramento	I.Q.M.	Correlazione I.Q.M.		Tabelle C8.5.I e C8.5.II dalla Circolare 7 del 2019		Tipologia muraria norma
			Min	Max	Min	Max	
			[N·mm ⁻²]	[N·mm ⁻²]	[N·mm ⁻²]	[N·mm ⁻²]	
SM.1	IQM _v -f	10	7,27	10,89	6,96	9,84	Muratura a blocchi lapidei squadri
	IQM _i - τ ₀	8,5	0,09	0,17	0,108	0,144	
	IQM _i - G	8,5	673,37	990,23	960	1320	
	IQM _v - E	10	2836,07	3965,42	2880	3960	
SM.2.1	IQM _v -f	9,00	5,99	9,14	5,8	8,2	Muratura a blocchi lapidei squadri
	IQM _i - τ ₀	8,50	0,09	0,17	0,09	0,12	
	IQM _i - G	8,50	673,37	990,23	800	1100	
	IQM _v - E	9,00	2431,28	3409,65	2400	3300	
SM.2.2	IQM _v -f	3,50	2,07	3,49	2,86	4,18	Muratura a conci regolari di pietra tenera
	IQM _i - τ ₀	3,50	0,04	0,07	0,0616	0,0888	
	IQM _i - G	3,50	331,06	489,28	550	726	
	IQM _v - E	3,50	1042,29	1486,03	1650	2178	
SM.3.1	IQM _v -f	2,10	1,58	2,73	2,4	2,4	Muratura irregolare di pietra tenera
	IQM _i - τ ₀	2,10	0,03	0,05	0,042	0,0612	
	IQM _i - G	2,10	271,37	401,63	408	576	
	IQM _v - E	2,10	840,15	1202,87	1224	1728	
SM.3.2	IQM _v -f	1,10	1,30	2,29	1,25	2,5	Muratura in pietrame disordinata
	IQM _i - τ ₀	1,40	0,03	0,04	0,0216	0,0384	
	IQM _i - G	1,40	245,70	363,89	276	420	
	IQM _v - E	1,10	720,23	1034,29	828	1260	

Tab. B.1 Correlazione tra I.Q.M. e Circolare n. 7 del 21/01/2019 per il caso studio di Petralia Sottana.



Confronto tra le forze di compressione f calcolate con IQM e
con NTC 2018

Confronto tra il modulo di Young E calcolato con IQM e
con NTC 2018



Confronto tra i valori di resistenza al taglio τ_0 calcolati con IQM
e con NTC 2018

Confronto tra il modulo di taglio G calcolato con IQM e
con NTC 2018

Fig. B.1 Correlazione tra I.Q.M. e Circolare n. 7 del 21/01/2019 per il caso studio di Petralia Sottana.

APPENDICE C – Contesto Locale – Alcamo

Materiali lapidei naturali

Le murature realizzate nel contesto di Alcamo sono state realizzate in travertino, una roccia calcarea, lavorata con precisione, che ha contribuito alla solidità strutturale delle costruzioni e alla qualità estetica dei manufatti architettonici.

Tipi murari

I tipi di murature riscontrate nel contesto locale di Alcamo sono quattro, di cui SM1.1 dove prevale la presenza di conci squadrate con un assestamento regolare della muratura; SM1.2 nella quale si riscontra la presenza di conci sbazzati con un assestamento regolare della muratura; il tipo SM2.2 è caratterizzato da pietrame informe di varia dimensione con assestamento del paramento parzialmente regolare; infine, SM3.1 per murature caotiche realizzate con pietrame informe o appena sbazzato di piccole dimensioni.

Indice di Qualità Muraria

L'indice di qualità muraria per azioni verticali risulta associabile alla categoria A ($5 \leq I.Q.M. \leq 10$) per i tipi SM1.1, SM1.2; della categoria B ($2,5 \leq I.Q.M. < 5$) fa parte il tipo SM2.2, infine, nella categoria C ($0 \leq I.Q.M. < 2,5$) rientra il tipo SM3.

Il valore d'indice per azioni orizzontali fuori piano è associabile alla categoria A ($7 \leq I.Q.M. \leq 10$) per il tipo murario SM1, SM1.2, alla categoria C ($0 \leq I.Q.M. \leq 4$) per i tipi murari SM2.2 e SM3.

Per azioni orizzontali nel piano, si è ottenuto un valore di I.Q.M. associabile alla categoria A ($5 < I.Q.M. \leq 10$) per i tipi SM1, SM1.2; il tipo SM2.2 rientra nella categoria B ($3 < I.Q.M. \leq 5$); il tipo SM3 nella categoria C ($0 \leq I.Q.M. \leq 3$).

Correlazione IQM – NTC2018 circolare n°7 del 2019

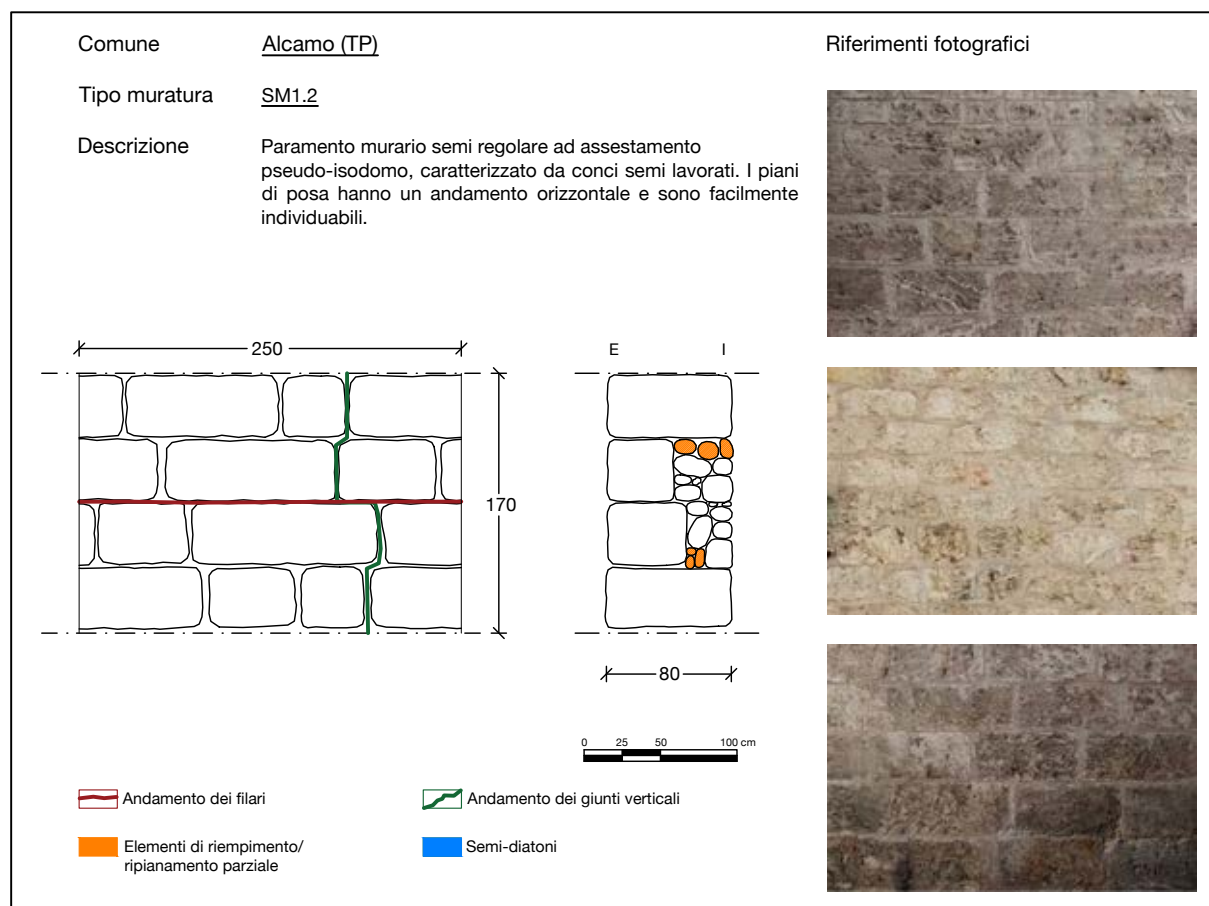
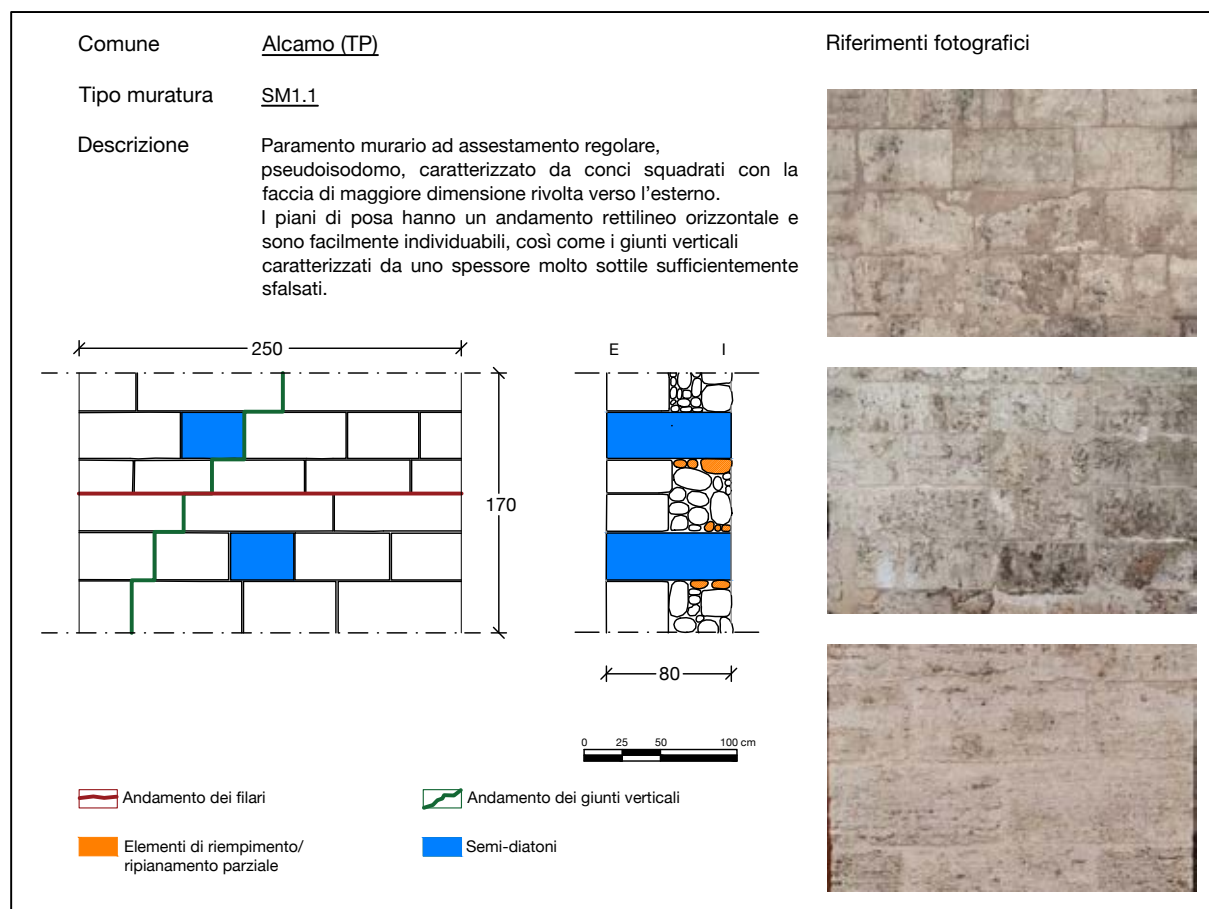
I valori ottenuti sono stati correlati con i valori indicati nelle tabelle C8.5.I e C8.5.II della circolare 7 del 2019, al fine di effettuare una verifica di controllo dei valori di I.Q.M.

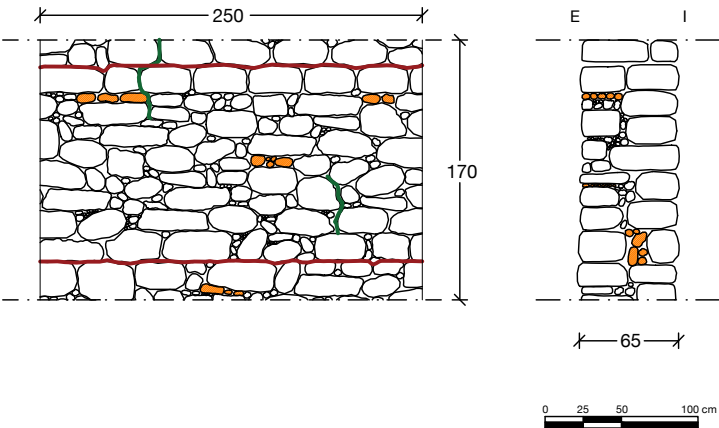
Da un'analisi dei risultati si nota una netta corrispondenza tra i valori di f e τ_0 ottenuti per i tipi murari di Alcamo calcolati con entrambe le metodologie di calcolo. I valori calcolati di E e G risultano maggiormente discordanti tra IQM e NTC2018.

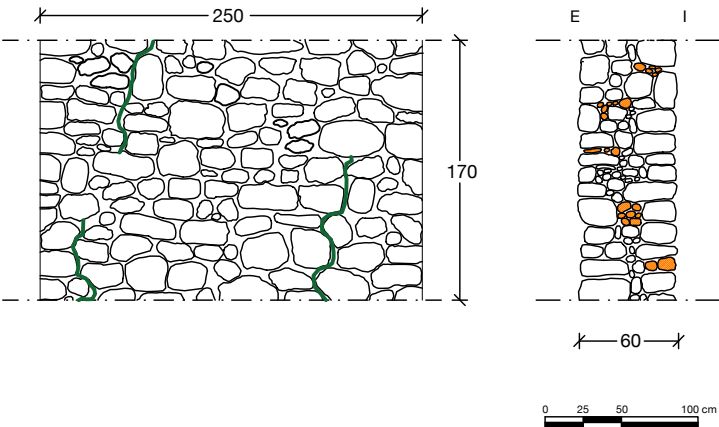
Vi sono casi in cui l'attribuzione dei punteggi relativi all'indice di qualità muraria, effettuato su ogni tipologia muraria, è coerente con i valori massimi e minimi riportati dalla normativa. Infatti, i valori di correlazione della f_m , τ_0 , E e G rientrano per la maggior parte dei casi analizzati all'interno del range previsti dalla circolare 7 del 2019.

In alcuni casi la correlazione risulta più cautelativa rispetto alla normativa; infatti, i valori risultano più bassi rispetto ai range riportati nelle tabelle.

Altri casi ancora riportano dei valori di normativa più cautelativi rispetto alla correlazione, ciò viene riscontrato sia per murature ad assestamento regolare che per quelle ad assestamento caotico. Per la maggior parte dei casi, però, i valori dei diversi parametri meccanici sono ascrivibili all'interno dei range dei valori minimi e massimi riportati in normativa, fornendo delle valide indicazioni sui valori di ogni tipologia muraria.

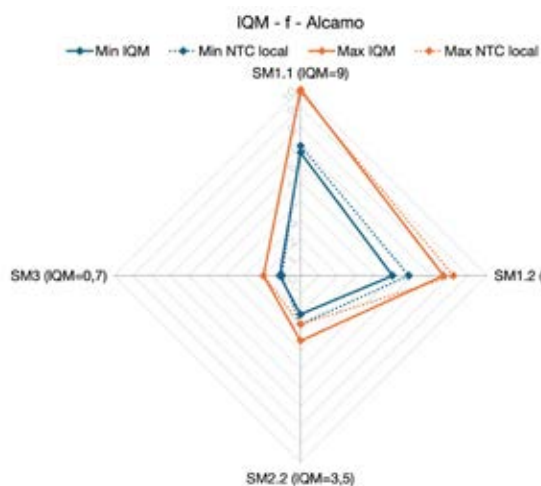


Comune	<u>Alcamo (TP)</u>	Riferimenti fotografici
Tipo muratura	<u>SM2.2</u>	
Descrizione	Paramento murario semi regolare caratterizzato da pietrame informe, di varia dimensione, appena sbizzato o totalmente non lavorato. I piani di posa sono individuabili e hanno un andamento sub-orizzontale. Parziale ingranamento trasversale.	
  Andamento dei filari  Andamento dei giunti verticali  Elementi di riempimento/riplanamento parziale  Semi-diatoni		  

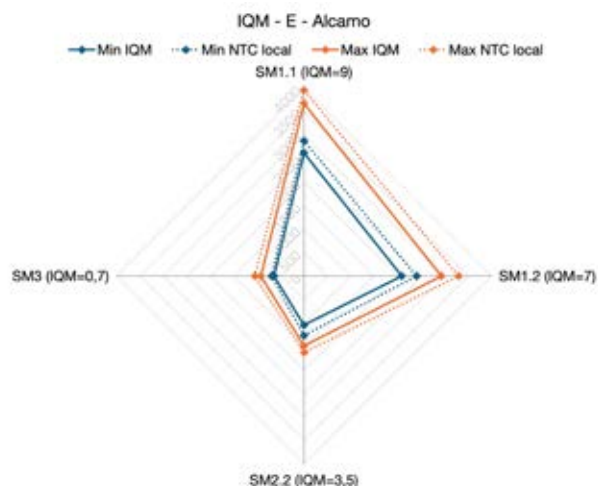
Comune	<u>Alcamo (TP)</u>	Riferimenti fotografici
Tipo muratura	<u>SM3</u>	
Descrizione	Paramento murario caratterizzato da pietrame informe, di varia dimensione, a tessitura caotica con scarso ingranamento tra i vari elementi. Presenza sporadica di elementi di grandi dimensioni. La varietà di forma contribuisce alla creazione di vuoti, riempiti opportunamente con malta o elementi di piccola dimensione. Piani di posa non individuabili. Muratura di scarsa qualità.	
  Andamento dei filari  Andamento dei giunti verticali  Elementi di riempimento/riplanamento parziale  Semi-diatoni		  

Tipologia muraria	IQM/paramento	I.Q.M.	Correlazione I.Q.M.		Tabelle C8.5.I e C8.5.II dalla Circolare 7 del 2019		Tipologia muraria norma
			Min	Max	Min	Max	
			[N·mm ⁻²]	[N·mm ⁻²]	[N·mm ⁻²]	[N·mm ⁻²]	
SM1.1	IQM _v -f	9,5	6,60	9,98	6,96	9,84	Muratura a blocchi lapidei squadriati
	IQM _i - τ_0	9	0,10	0,18	0,108	0,144	
	IQM _i - G	9	722,92	1062,56	960	1320	
	IQM _v - E	9,5	2626	3677	2880	3960	
SM1.2	IQM _v -f	8,00	4,94	7,67	5,8	8,2	Muratura a blocchi lapidei squadriati
	IQM _i - τ_0	7,00	0,08	0,13	0,09	0,12	
	IQM _i - G	7,00	544	801,46	800	1100	
	IQM _v - E	8,00	2084	2932	2400	3300	
SM2.2	IQM _v -f	3,50	2,07	3,49	2,6	2,6	Muratura in pietre a spacco con buona tessitura
	IQM _i - τ_0	3,50	0,04	0,07	0,0395	0,057	
	IQM _i - G	3,50	331,06	489,28	384,2	542,4	
	IQM _v - E	3,50	1042,29	1486,03	1265,6	1627,2	
SM.3	IQM _v -f	0,30	1,12	1,99	1	2	Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)
	IQM _i - τ_0	0,70	0,02	0,03	0,018	0,032	
	IQM _i - G	0,70	222,45	329,69	230	350	
	IQM _v - E	0,30	636,75	916,60	690	1050	

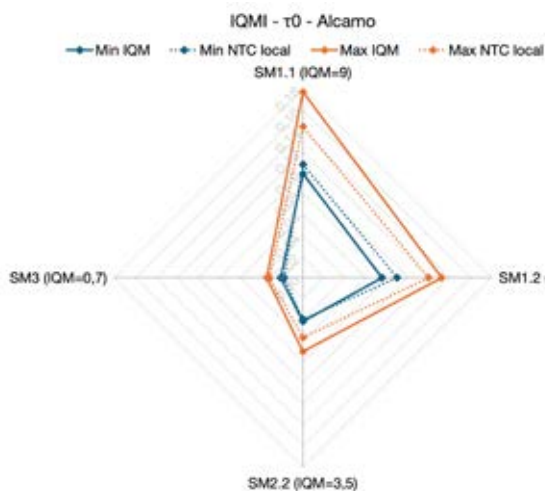
Tab. C.1 Correlazione tra I.Q.M. e Circolare n. 7 del 21/01/2019 per il caso studio di Alcamo.



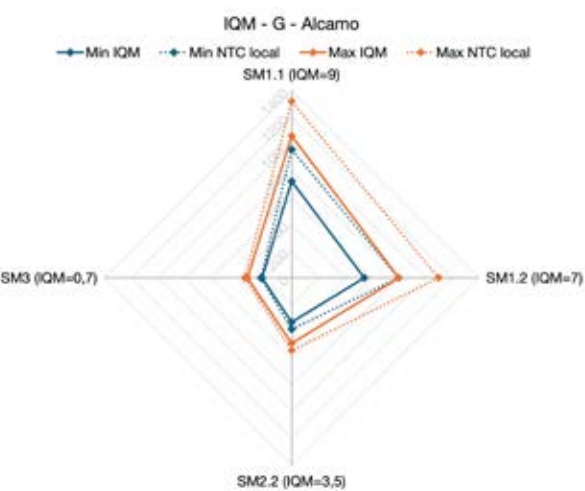
Confronto tra le forze di compressione f calcolate con IQM e con NTC 2018



Confronto tra il modulo di Young E calcolato con IQM e con NTC 2018



Confronto tra i valori di resistenza al taglio τ_0 calcolati con IQM e con NTC 2018



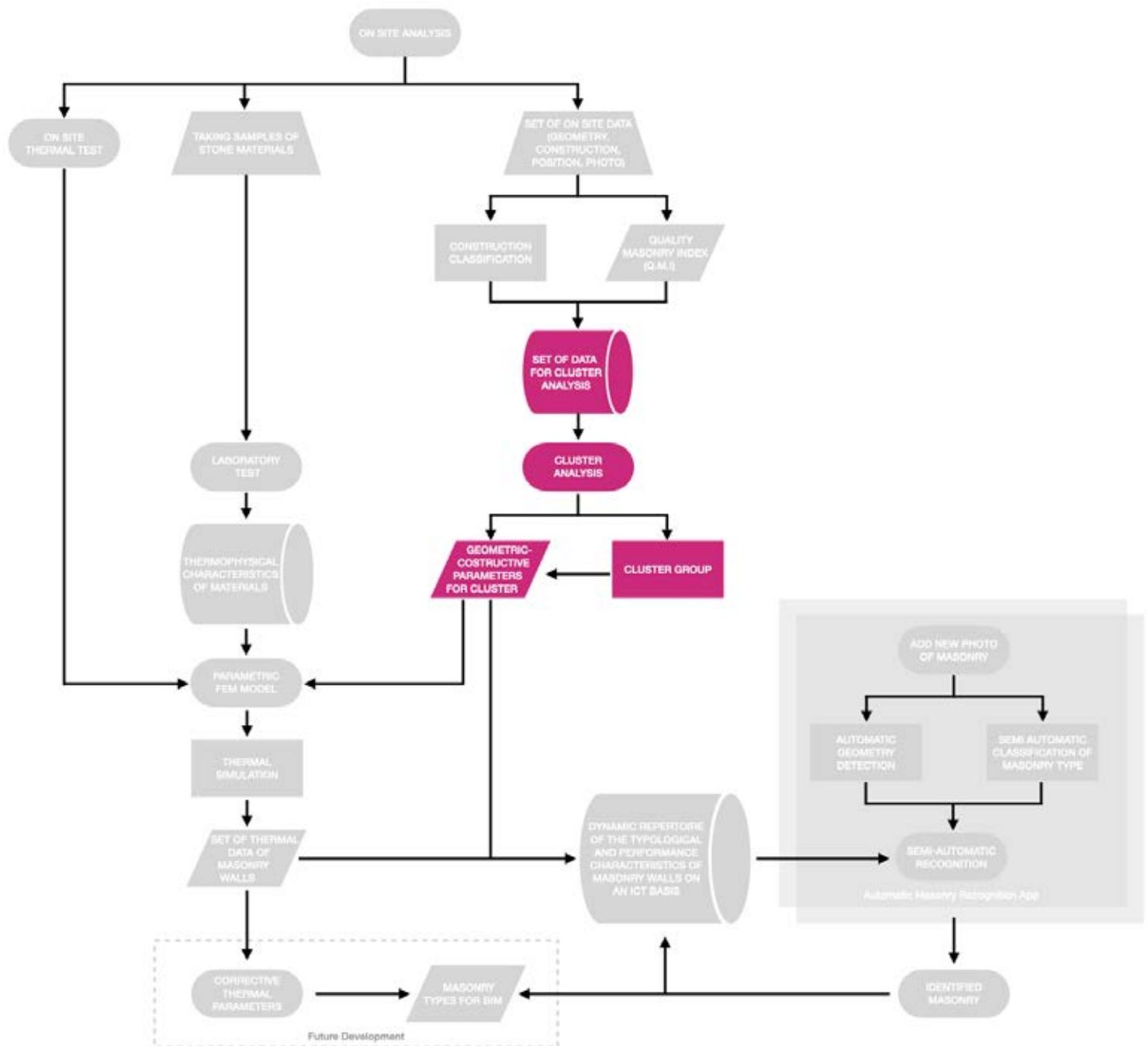
Confronto tra il modulo di taglio G calcolato con IQM e con NTC 2018

Fig. C.1 Correlazione tra I.Q.M. e Circolare n. 7 del 21/01/2019 per il caso studio di Alcamo.

CAPITOLO 3

ANALISI STATISTICHE PER LA CLASSIFICAZIONE DELLE MURATURE

Statistical analysis for the classification of masonry



Abstract

Chapter 3 focuses on the statistical analysis and classification of masonry types, underlining the importance of systematic data collection and analysis in understanding historical masonry structures. It begins by outlining the methodological framework employed for the classification of masonry types, which is based on both qualitative and quantitative parameters. The initial phase involves on-site visual analysis, where the operator's expertise plays a crucial role in identifying and categorizing recurring masonry characteristics. This visual assessment is complemented by a rigorous data collection process, which aims to create a comprehensive dataset that includes various local contexts. The chapter highlights the significance of a robust dataset, noting that the validity and reliability of statistical analyses are heavily dependent on the quality and quantity of the collected data. It discusses the challenges associated with gathering extensive datasets, particularly in specific local contexts where the number of visible masonry examples may be limited. The necessity for data standardization and normalization is clearly made evident, as it directly impacts the precision and effectiveness of the statistical results. Various techniques for handling missing data, such as imputation and elimination of incomplete records, are also addressed.

Subsequently, the chapter delves into the application of cluster analysis, which is performed using R software. This analysis is conducted both individually for each local context and collectively, integrating observations from all studied areas. The results of the cluster analysis reveal homogeneous groupings within specific locales, while a comprehensive evaluation enhances the overall dataset, thereby improving the clustering outcomes. The chapter presents findings from case studies, where the average silhouette width index indicates the presence of four clusters despite a lack of significant structure due to a limited number of observations.

Furthermore, the chapter introduces the Random Forest method as a complementary analytical tool, providing insights into the classification accuracy of masonry types. The Out-Of-Bag (OOB) error rate is discussed, illustrating the model's predictive capabilities and the importance of variable significance in the classification process.

In conclusion, the chapter underscores the critical role of statistical methodologies in the classification and analysis of historical masonry. It advocates for a comprehensive approach that combines visual assessments with robust statistical techniques, ultimately contributing to a deeper understanding of masonry characteristics and their performance under mechanical stress. The findings not only validate the manual classification of masonry types but also pave the way for future research aimed at expanding the repertoire of historical masonry knowledge.

Lo schema generale mostra il processo inerente alle analisi statistiche (colore fucsia) connesse alle operazioni preliminari di rilievo in opera e di elaborazione dei dati (colore rosso), con la successiva fase di modellazione FEM (colore arancione) analizzata nel capitolo 5 e il repertorio dinamico delle caratteristiche tipologiche e prestazionali delle murature storiche approfondito nel capitolo 6.

Il metodo di classificazione descritto nel capitolo precedente ha consentito di identificare i tipi murari ricorrenti in specifici contesti locali. Tale sistema di classificazione si fonda sull'analisi visiva del paramento murario visibile e sull'identificazione di parametri quali-quantitativi ricorrenti. Come già descritto, l'analisi visiva in situ risente delle conoscenze e delle competenze tecniche dell'operatore, il quale, è chiamato ad esaminare le caratteristiche della muratura, riconoscendone e classificandone i parametri ricorrenti.

Al fine di aumentare la robustezza della classificazione per tipi murari e valutarne l'affidabilità, e al fine di rendere il processo analitico il più oggettivo possibile, i dati raccolti in situ sono stati sottoposti a indagini statistiche, permettendo una valutazione quantitativa e sistematica dei risultati ottenuti. Le analisi statistiche mitigano la soggettività per la classificazione dei tipi murari.

Uno tra gli obiettivi di queste analisi è quello di fornire uno strumento tecnico capace di classificare le murature, in materiale lapideo naturale, in gruppi omogenei (*cluster*) attraverso metodologie standardizzate che siano replicabili nei diversi contesti.

Le analisi statistiche che si adattano alle finalità della ricerca sono la *cluster analysis* e la *random forest*. La prima è stata utilizzata per raggruppare in gruppi omogenei (*cluster group*) le murature indagate nei diversi contesti locali, mentre la seconda, la *random forest*, è stata utilizzata per valutare la bontà delle osservazioni rilevate rispetto alle murature presenti nel *dataset*.

3.1 CLUSTER ANALYSIS

La *cluster analysis* è un metodo statistico per l'analisi di dati, il cui scopo principale è raggruppare le osservazioni in gruppi omogenei detti "*cluster*", in funzione di determinati parametri affini presenti nel *dataset* analizzato (Dahlström et al. 2024). Questo tipo di processo identifica le strutture presenti nel *dataset*, rendendo più semplice l'interpretazione dei dati stessi.

I vantaggi offerti dall'applicazione di un approccio statistico per la classificazione delle murature sono molteplici. Primo fra tutti, la capacità di analizzare in modo sistematico il *dataset* contenente i parametri quali-quantitativi delle murature di un determinato contesto locale.

Uno tra gli obiettivi della *cluster analysis* applicata alla presente ricerca è l'ottenimento di raggruppamenti omogenei (*cluster*) delle murature osservate, e successivamente, il confronto con i tipi murari determinati secondo l'approccio classico, fondato sull'osservazione diretta dell'operatore..

3.1.1 Raccolta dei dati

Il primo passo per la definizione del metodo di classificazione statistica prevede la raccolta dei dati da analizzare. Nel lavoro di ricerca si propone una campagna fotografica di rilievo, accurata e dettagliata, avente lo scopo di documentare tutte le murature a paramento visibile presenti in un determinato contesto locale per estrarre i dati quali-quantitativi utili alla creazione del *dataset* per la successiva elaborazione statistica.

Durante la campagna fotografica, è necessario prestare particolare attenzione alla standardizzazione delle condizioni di scatto, al fine di ottenere immagini omogenee

e facilmente confrontabili tra loro. Infatti, ogni immagine fotografica va scattata perpendicolarmente alla muratura, inquadrando una porzione di paramento di dimensioni note.

La campagna fotografica di rilievo si focalizza principalmente sui paramenti murari esterni visibili. Dove le condizioni lo permettono, vanno inclusi anche i parametri che descrivono le sezioni trasversali, specialmente in corrispondenza di edifici parzialmente crollati. Questo consente di valutare la stratigrafia interna, fornendo informazioni utili al fine dell'analisi meccanica della parete/muratura. Infine, ove possibile è consigliato valutare e rilevare anche i paramenti interni delle murature, che in alcuni casi specifici possono mostrare tecniche costruttive differenti.

Il riferimento metrico di dimensioni note va inserito in ogni immagine, poiché consente nelle fasi successive di analisi di riportare le fotografie alla scala reale e di estrapolare con precisione sia i parametri quali-quantitativi e sia la geometria delle murature.

Ogni immagine fotografica deve essere georeferenziata, attraverso l'uso di dispositivi con GPS integrato; ciò fornisce informazioni utili alla creazione di mappe nella quale sono associate le coordinate spaziali del punto in cui è stata acquisita la fotografia.

Tutti i dati vengono successivamente estratti dalle immagini fotografiche alimentando il *database*, che non risulta ancora "pronto" per lo svolgimento delle analisi statistiche.

3.1.2 Struttura del dataset

Le analisi di tipo statistico necessitano di un dataset strutturato di informazioni, contenenti un cospicuo numero di dati; nel caso specifico per la validazione del metodo di classificazione delle murature i dati sono stati raccolti tramite rilievi fotografici con immagini georeferenziate, come descritto precedentemente. Ciò ha permesso di individuare i parametri geometrici estraendo i dati quali-quantitativi direttamente dalle immagini.

D'altro canto, la creazione di un *dataset* sufficientemente vasto può far nascere una problematica in contesti locali specifici, dove il numero di murature con paramento a vista è limitato a pochi casi studio, dando luogo ad un *dataset* povero di dati.

La creazione del *dataset* rappresenta il primo passo per lo sviluppo dell'analisi statistica. Il *dataset* deve contenere variabili strutturate e normalizzate, poiché la qualità dei dati raccolti influisce direttamente sulla precisione e sull'efficacia dei risultati.

I dati raccolti devono essere trasformati in variabili, queste possono essere di tipo quantitativo (numeriche) o qualitativo (categoriche).

Poiché le variabili numeriche possono avere unità di misura differenti è necessario normalizzare le variabili riducendole ad un intervallo fisso $[0,1]$ oppure usando la standardizzazione.

Per quanto riguarda le variabili categoriche devono essere trasformate in formato numerico tramite codifica *one-hot* utilizzando i valori binari $[0,1]$.

Anche i dati mancanti vanno trattati, utilizzando tecniche di imputazione (sostituzione dei valori mancanti con la media, la mediana, o il valore più frequente della variabile) o in alternativa si procede con l'eliminazione dei dati incompleti (rimozione delle righe o colonne che contengono valori mancanti).

Il *dataset* è strutturato con osservazioni e variabili. Le prime sono rappresentate dalle righe presenti all'interno del *dataset* (dunque ciascuna parete esaminata è un'osservazione), mentre le seconde sono associate alle colonne; le variabili vengono utilizzate per effettuare la *cluster analysis*.

3.1.3. Algoritmi di clustering e silhouette

Per effettuare la *cluster analysis* è necessario selezionare gli algoritmi di classificazione

maggiormente adeguati a processare i dati presenti nel dataset (Verellen and Allacker 2022; Mouraz et al. 2022).

Nello specifico gli algoritmi di classificazione impiegati in primo luogo per l'individuazione dei tipi murari sono gli algoritmi gerarchici non divisivi (Daisy – Pam). I metodi non gerarchici consentono di elaborare l'analisi dei *cluster* fin quando non vengono elaborati dei *cluster* ben strutturati. Per i metodi non gerarchici ci si avvale di un indice di bontà “*average silhouette width*” che è compreso nel *range* tra -1 e 1 con i seguenti intervalli di valutazione: <0.26 assenza di struttura; 0.26-0.50 struttura debole; 0.51-0.70 struttura plausibile; >0.71 struttura forte.

Per valutare la bontà dei raggruppamenti è stata utilizzata l'ampiezza della *silhouette*, misura che riflette quanto un oggetto è simile al proprio *cluster* rispetto ai *cluster* vicini.

Per svolgere una *cluster analysis* sono necessarie tre decisioni interconnesse: il calcolo della distanza, la scelta di un algoritmo di *clustering* e la selezione del numero di *cluster*. La distanza di Gower, con la sua natura flessibile per gestire dati misti, è stata scelta come metrica di distanza.

L'analisi dei cluster consente di esplorare come un campione possa essere composto da sottogruppi distinti sulla base di un insieme di variabili. Nel clustering di dati misti, come in questo caso di studio, che comprende variabili continue, ordinali e nominali, la distanza di Gower (1971) emerge come una scelta appropriata, consentendo una valutazione completa della somiglianza tra le osservazioni.

La distanza di Gower è applicata per misurare la diversità tra due *record*, considerando una combinazione di variabili categoriali e quantitative. Questa metrica, la cui scala varia da 0 (identico) a 1 (massimamente dissimile), offre una valutazione dettagliata della differenza tra le osservazioni, tenendo conto della natura eterogenea delle variabili coinvolte.

L'implementazione della distanza di Gower interessa il calcolo delle dissomiglianze parziali tra individui, utilizzando una formula generale che tiene conto della natura delle variabili coinvolte. In particolare, le metriche specifiche sono descritte per variabili quantitative, ordinali e nominali.

La distanza di Gower viene calcolata mediante la seguente (Eq.3.1):

$$D_{Gower}(x_1, x_2) = 1 - \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p s_j(x_1, x_2) \quad (3.1)$$

p è il numero totale di variabili

$s_j(x_1, x_2)$ è una funzione che calcola la similarità e dissimilarità tra i valori delle variabili j per le osservazioni x_1 e x_2

Per il *clustering*, viene adottato l'algoritmo di “Partizionamento Attorno ai Medoidi” di (PAM), che differisce dal *K-means* nell'utilizzo di medoidi come rappresentanti dei *cluster*. La distanza di Gower si integra efficacemente con l'algoritmo *K-medoids*, una tecnica classica di partizionamento nel *clustering* che organizza un set di dati contenente n oggetti in k *cluster* predefiniti. La bontà del valore di k può essere valutata tramite indicatori come il metodo di *silhouette*, particolarmente adatto al *clustering K-medoids* e utilizzato per identificare il numero ideale di *cluster*. Il numero ottimale di *cluster*, k, è quello che massimizza la *silhouette* media su un intervallo di possibili valori di k.

La scelta del numero di *cluster* riveste un ruolo cruciale nell'analisi di *clustering*, e la “*larghezza della silhouette*” si configura come un indicatore prezioso per guidare questa decisione (Kaufman and Rousseeuw 1990b, a). Tale misura funge da strumento di valutazione della coesione interna e della separazione tra i *cluster*, offrendo una guida durante il processo di selezione del numero ottimale di *cluster*. La larghezza della *silhouette* è calcolata per ciascun oggetto e rappresenta la differenza normalizzata tra la dissimilarità media con gli altri oggetti nello stesso *cluster* e la dissimilarità media con gli oggetti nel *cluster* più vicino diverso.

L'indice di *silhouette* complessivo per l'intero *clustering* è la media delle larghezze di *silhouette* per tutti gli oggetti. L'indice varia da -1 a 1, dove un valore più alto indica un *clustering* migliore, con oggetti ben assegnati ai loro *cluster* in base alle somiglianze interne. Un valore negativo può verificarsi quando gli oggetti sono più simili agli oggetti negli altri *cluster* rispetto al proprio.

La “*larghezza di silhouette*” misura la qualità del *clustering*, fornendo indicazioni sulla coerenza delle osservazioni all'interno dei rispettivi *cluster*. Calcolando la *silhouette* media per diversi valori di *k* (il numero di *cluster*), è possibile identificare il numero ottimale di *cluster* che produce risultati migliori. Infine, il metodo della *silhouette* media offre una guida chiara nella scelta di *k*, aiutando a identificare il punto in cui le osservazioni all'interno dei *cluster* sono più coerenti.

L'algoritmo di *clustering* viene eseguito per vari valori di *k*. È importante trovare un equilibrio tra la scelta del numero dei *cluster*. Se il numero di *cluster* è troppo basso, si può incorrere in una sotto-aggregazione, cioè i dati con caratteristiche simili sono raggruppati insieme in modo eccessivo, perdendo dettagli significativi. Al contrario, un numero eccessivo di *cluster* può portare a una sovra-aggregazione, dove i dati vengono suddivisi in gruppi troppo piccoli, rendendo difficile identificare pattern distintivi.

La *cluster analysis* qui discussa è stata applicata ad alcuni contesti locali in Sicilia per valutarne l'efficacia del metodo e la replicabilità in altri contesti. Le analisi svolte sono riportate nel paragrafo 3.3 applicativo del caso di studio, nel quale si mostrano i risultati e le criticità.

3.2 RANDOM FOREST

Una differente analisi statistica implementata per la valutazione metrica della bontà della classificazione manuale dei tipi murari è la *random forest* (Breiman 2001). Quest'ultima si differenzia dalla *cluster* per le finalità, per i tipi di algoritmi che si usano e per i risultati ottenibili.

La *random forest*, infatti, è un algoritmo che combina diversi modelli di algoritmi di *machine learning* per migliorare le prestazioni complessive del modello.

Vengono utilizzati dei modelli di apprendimento automatico definiti “alberi decisionali” che consentono di prendere decisioni sulla base dei valori delle variabili di *input* (parametri). Gli alberi decisionali vengono creati selezionando il parametro migliore, quindi, l'algoritmo analizza l'intero set di dati cercando la caratteristica migliore e suddivide i dati. Questo processo si ripete per ciascun sottoinsieme del *dataset* e si arresta quando viene superata una certa soglia di soddisfazione.

Gli alberi decisionali sono suscettibili all'*overfitting*, cioè rischiano di adattarsi troppo ai dati di addestramento e non riescono a generalizzare bene su nuovi dati di input. Gli algoritmi di *random forest* combinando i diversi alberi decisionali riescono a mitigare il problema.

La *random forest* riesce a risolvere problemi di classificazione per dataset molto ampi. Utilizzare questo tipo di algoritmo di classificazione consente di: valutare la bontà delle osservazioni rilevate, individuare le correlazioni esistenti tra i diversi parametri ed infine, restituire un valore di accuratezza definito come *out of box* (OOB). Questo valore è rappresentativo dell'errore di previsione del modello calcolato ed è dovuto all'esclusione parziale dei dati presenti nel sottoinsieme di addestramento. In altre parole, il modello *random forest* utilizza tutti i dati per addestrare gli alberi decisionali, ma durante questo processo, alcuni dei dati presenti nel dataset non vengono utilizzati in ciascun albero. Il valore OOB è calcolato utilizzando i dati esclusi dagli alberi decisionali.

Così come la *cluster analysis*, anche la *random forest* è stata applicata ad alcuni casi di studio che si riportano di seguito.

3.3 CASI DI STUDIO

Al fine di valutare e testare le analisi statistiche discusse sono stati analizzati quattro contesti locali appartenenti alla provincia di Messina e ricadenti nel parco dei Nebrodi: Castel di Lucio, Patti, Santo Stefano di Camastra e Tusa.

Questi contesti locali sono accomunati dall'uso degli stessi materiali lapidei naturali, quali la quarzarenite e l'arenaria, e dalle stesse tecniche costruttive.

I tipi murari maggiormente riscontrati in situ sono stati classificati manualmente con i seguenti tipi murari: SM2.1, SM2.2, SM3.1 e SM3.2.

3.3.1 Dataset

Il *dataset* è costituito da un foglio di calcolo in cui vi sono 70 variabili (colonne) contenenti: il numero progressivo delle foto scattate, il nome della foto, le informazioni relative alla posizione (coordinate GPS, Comune, provincia e regione), le informazioni sul tipo di materiale lapideo, il tipo murario, le dimensioni degli elementi/conci (altezza massima, altezza minima, altezza media, spessore massimo, spessore minimo, spessore medi, larghezza massima, larghezza minima, larghezza media, etc.), le dimensioni del giunto di malta, presenza di rinzeppature, materiale delle rinzeppature, parametri utili al calcolo dell'I.Q.M. come la resistenza degli elementi, la qualità della malta, presenza di diatoni, forma degli elementi, dimensione degli elementi, sfalsamento dei giunti verticali, orizzontalità dei filari, etc.

Ogni riga del dataset riporta le osservazioni relative ad ogni muratura fotografata. La dimensione del dataset è fortemente influenzata dall'estensione del contesto locale, ma soprattutto dal grado di conservazione degli edifici in muratura.

Il rilievo in situ delle murature attraverso le immagini fotografiche si è tradotto in: 32 immagini di murature per il comune di Castel di Lucio, 31 per Patti, 55 per Tusa e 65 per Santo Stefano di Camastra. Complessivamente sono state analizzate 183 immagini fotografiche di murature con paramento a vista da cui sono stati estratti 12.993 parametri. In Fig. 3. 1 si riporta un esempio di muratura fotografata con i riferimenti metrici utili alla successiva fase di restituzione alla scala reale. In Fig. 3. 2 si riporta la mappa ottenuta tramite le coordinate delle fotografie georeferenziate per il comune di Santo Stefano di Camastra.

3.3.2 Analisi e risultati della cluster analysis applicata ai casi studio

La *cluster analysis* è stata sviluppata con il *software* R. L'analisi è stata condotta singolarmente per ciascun contesto locale indagato e successivamente, raggruppando in un unico *dataset* le osservazioni provenienti da tutti i contesti locali.



Fig. 3. 1 Fotografia “tipo” effettuata durante la campagna di rilievo delle murature a faccia vista.

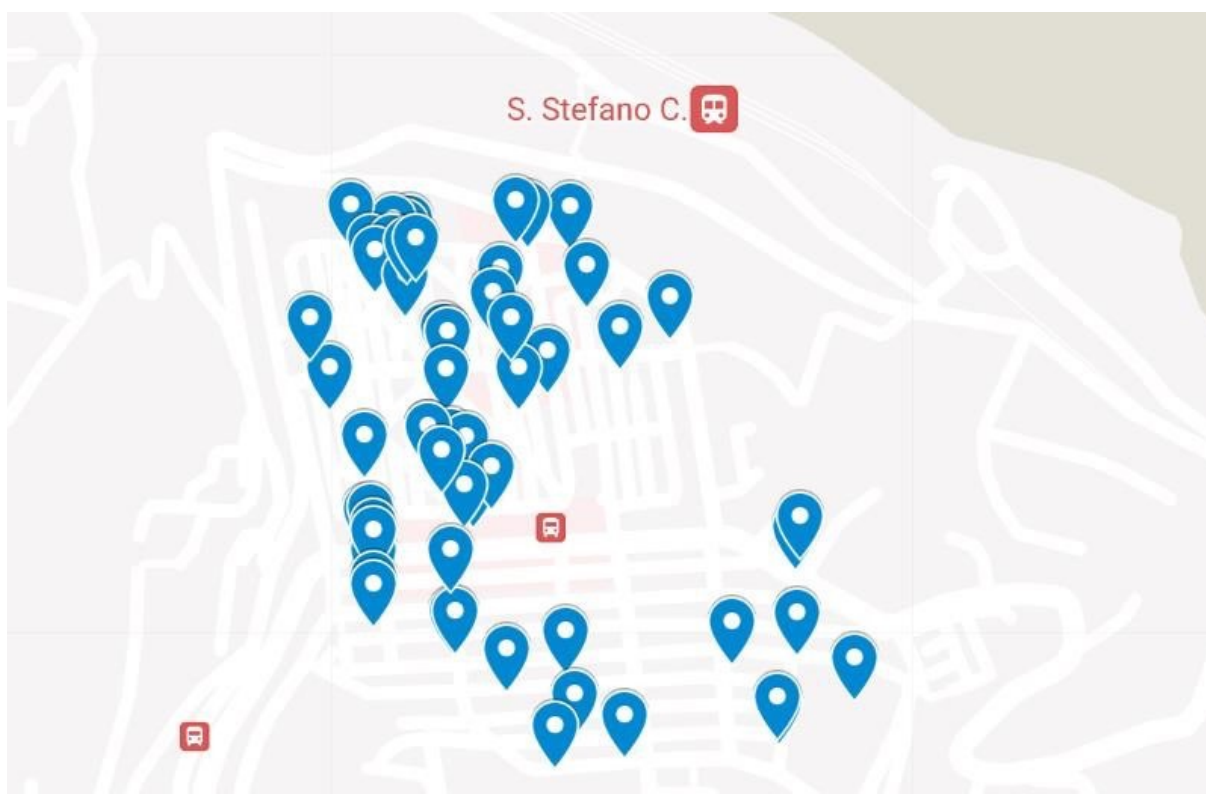


Fig. 3.2 Mappa georeferenziata delle murature indagate durante la campagna fotografica di rilievo.

Le analisi per singolo Comune permettono di indagare nello specifico i raggruppamenti omogenei locali, mettendo in evidenza eventuali criticità. D'altro canto, una valutazione complessiva permette di aumentare il numero di osservazioni del *dataset* rendendo migliore l'analisi dei *cluster*.

Per il comune di Castel di Lucio (Fig. 3. 3) si è riscontrato un indice di *average silhouette width* pari a 0.27 che, secondo l'indice di bontà, indica che non è stata trovata nessuna struttura, nonostante si individuino 4 raggruppamenti (*cluster*). Questo risultato potrebbe essere influenzato dal ridotto numero di osservazioni per il caso di studio considerato; infatti, per ottenere risultati migliori e omogenei è necessario introdurre un buon numero di osservazioni nel *dataset*.

Nel Comune di Patti (Fig. 3. 4) si è ottenuto un indice di *average silhouette width* pari a 0.54 che indica una struttura plausibile. Inoltre, si sono individuati 9 *cluster*.

Per il Comune di Santo Stefano (Fig. 3. 5) si è ottenuta una struttura debole con indice pari a 0.47. Osservando il grafico si evince che il *cluster* 1 è il più popolato ed inoltre le osservazioni contenute hanno dei valori di indice maggiore di 0.47, evidenziando una struttura plausibile.

Infine, per il caso di Tusa (Fig. 3. 6) si è ottenuto un *average* pari a 0.53 con 7 *cluster*, indicando una struttura plausibile. I *cluster* 1, 3, 4 sono quelli con il maggior numero di osservazioni.

Per ultimo, è stato analizzato un *dataset* complessivo contenente i dati di tutti e quattro i Comuni indagati. L'utilità di questa ulteriore analisi è quella di verificare la possibilità di individuare dei gruppi omogenei all'interno di un *dataset* complessivo che considera murature simili per alcune caratteristiche ma differenti per altre. In Fig. 3. 7 si riporta il grafico che mostra l'ottenimento di 3 gruppi omogenei con un *average silhouette width* pari a 0,46 con una struttura debole.

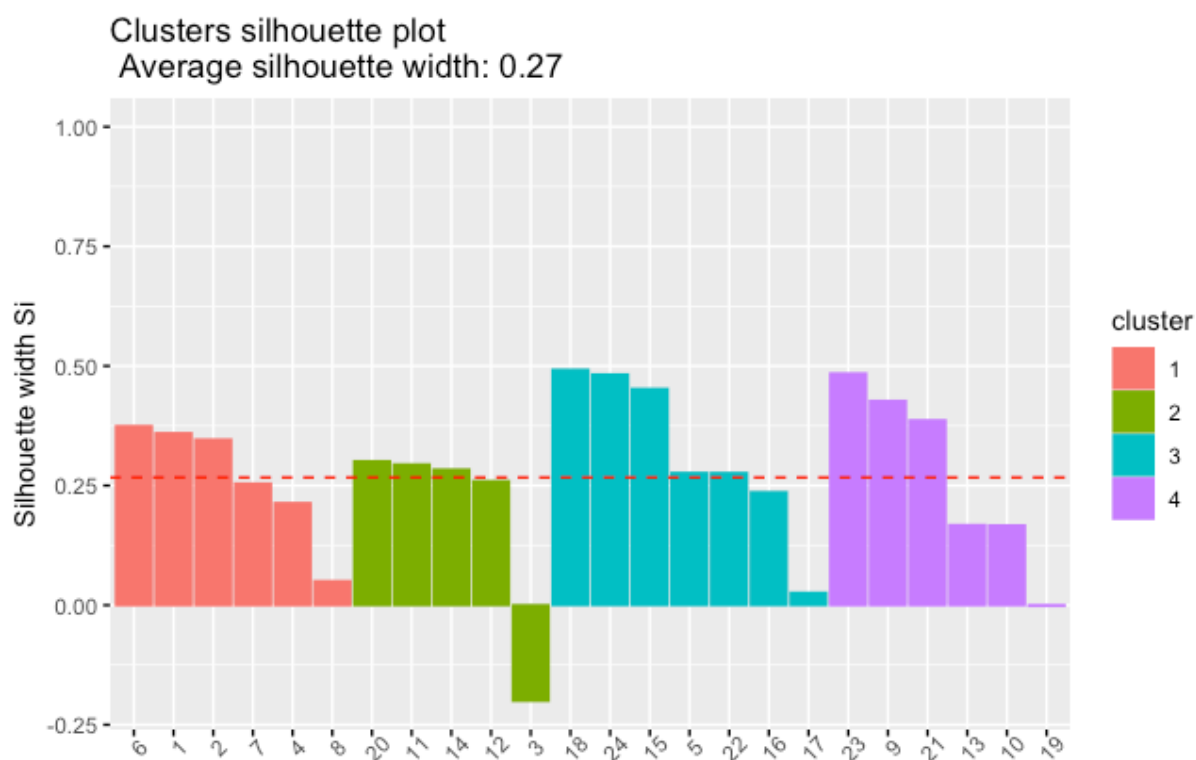


Fig. 3.3 Cluster analysis dataset Castel di Lucio.

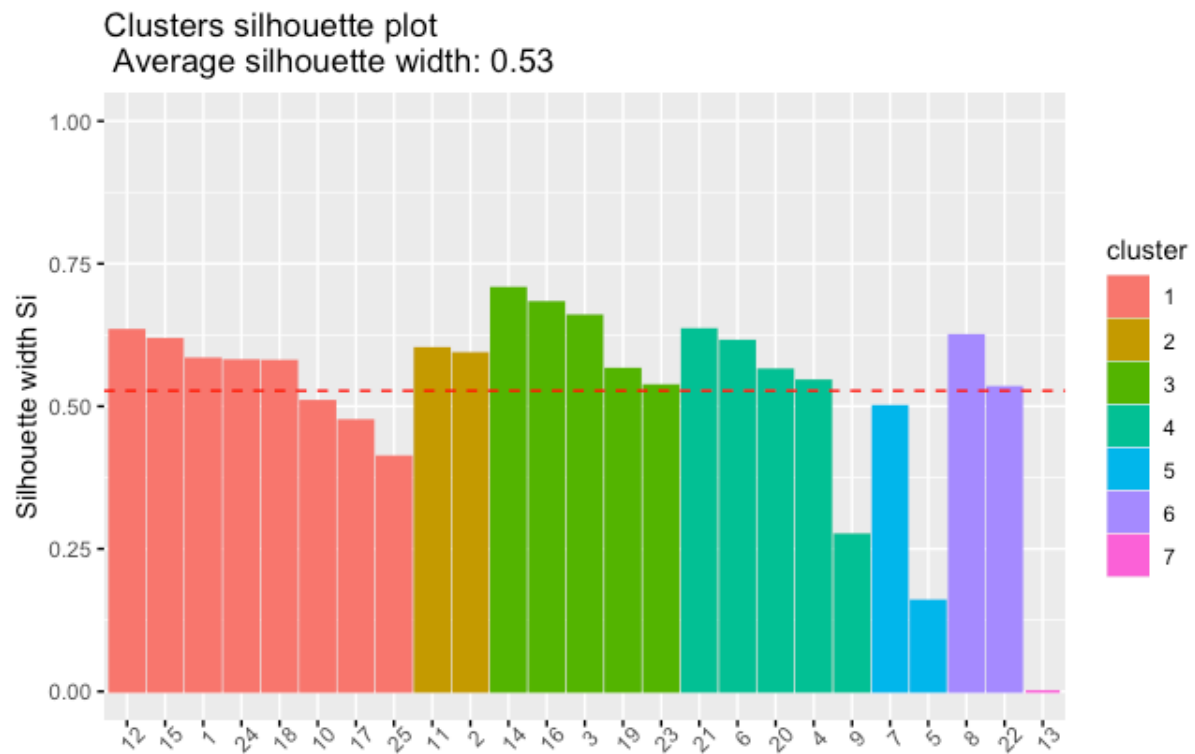


Fig. 3.4 Cluster analysis dataset Patti.

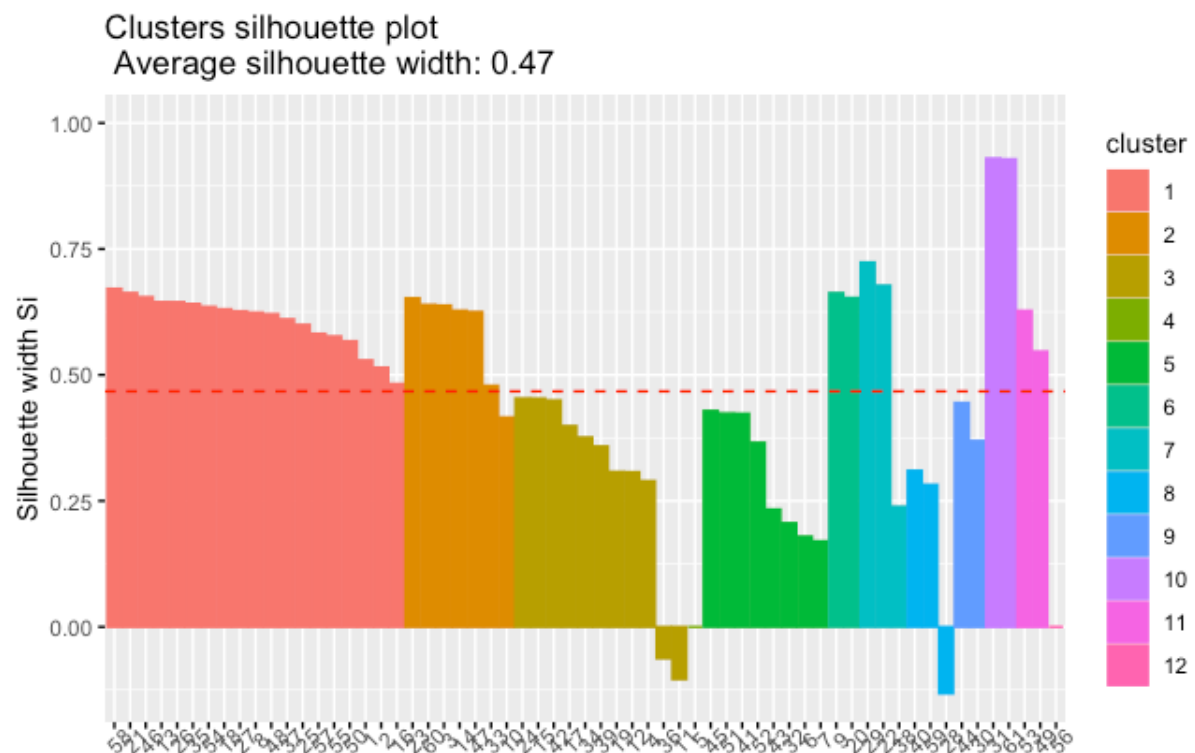


Fig. 3.5 Cluster analysis dataset Santo Stefano.

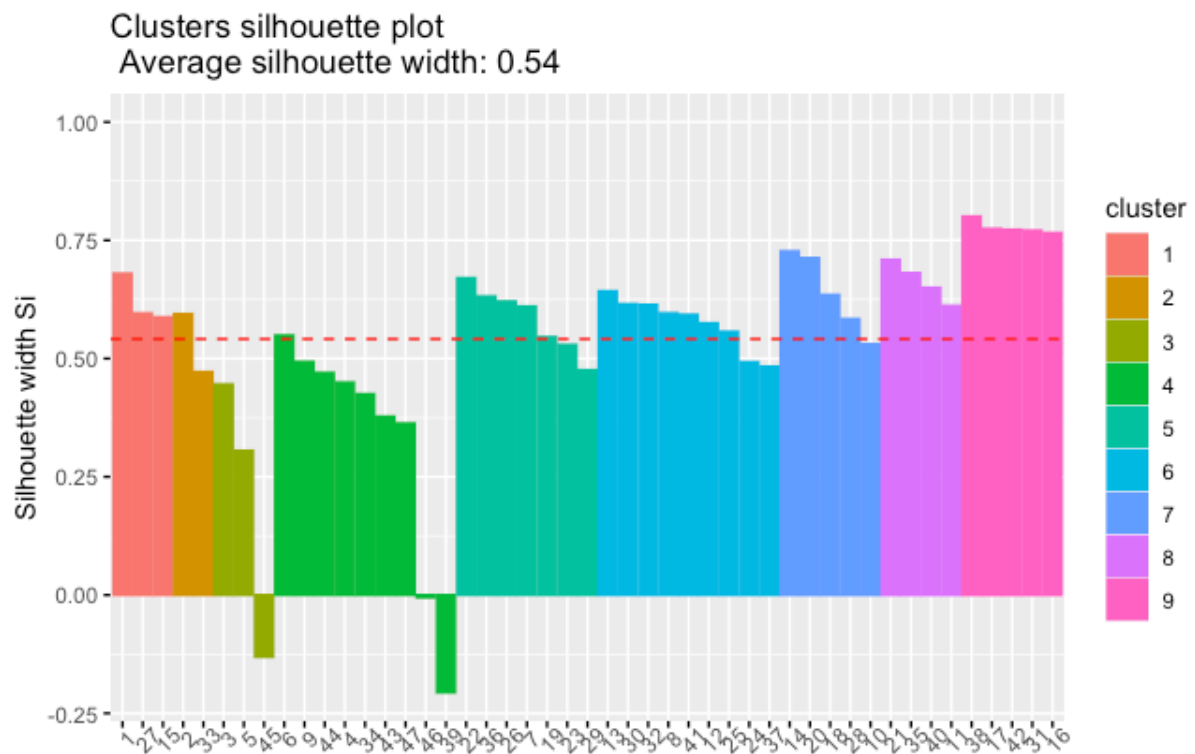


Fig. 3.6 Cluster analysis dataset Tusa.

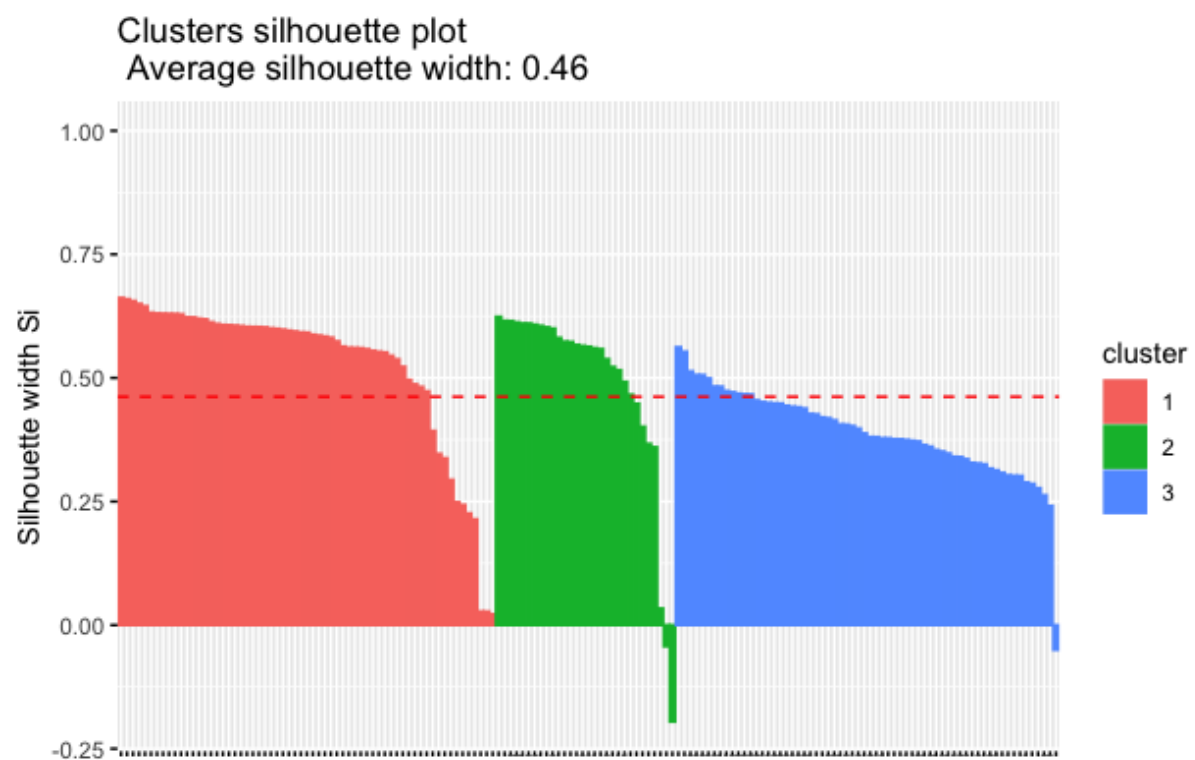


Fig. 3. 7 Cluster analysis dataset complessivo.

Per quest'ultima *cluster analysis* sono state indagate alcune delle caratteristiche relative ai tre *cluster* ottenuti. All'interno del *cluster* 1 si trovano principalmente le osservazioni relative al Comune di Santo Stefano di Camastra con 60 osservazioni e 3 osservazioni del Comune di Castel di Lucio. Nel *cluster* 2, invece, vi sono 25 osservazioni per il Comune di Patti, 4 per Castel di Lucio e 1 per Santo Stefano di Camastra. Infine, appartengono al *cluster* 3 il Comune di Castel di Lucio con 17 osservazioni e Tusa con 47 osservazioni.

Un altro risultato ottenuto dall'analisi *cluster* è che tutte le murature realizzate in arenaria appartengono al *cluster* 1, mentre le quarzareniti appartengono al *cluster* 2 e 3.

Si è deciso di valutare la variabilità dell'I.Q.M. (verticale, fuori dal piano, nel piano) calcolato come valor medio all'interno di ciascun *cluster*, poiché rappresenta un indice molto importante per la caratterizzazione meccanica delle murature. I vari I.Q.M., calcolati per i diversi tipi di sollecitazioni, hanno dei valori più elevati per i *cluster* 1 e 3, dunque, è possibile affermare che le murature appartenenti a questi *cluster* hanno una migliore capacità di resistere alle sollecitazioni; mentre le murature appartenenti al *cluster* 2, avendo ottenuto dei valori di I.Q.M. inferiori, resistono meno alle sollecitazioni meccaniche. In Fig. 3. 8 si riportano a confronto i risultati ottenuti.

Infine, sono stati analizzati i dati geometrici (altezza degli elementi, larghezza degli elementi, spessore del giunto di malta) associati ai 3 *cluster* come riportato in Fig. 3. 9. Si osserva che per i *cluster* 1 e 3 l'altezza degli elementi è simile, mentre per il *cluster* 2 risulta inferiore rispetto ai primi due. La larghezza degli elementi è maggiore per il *cluster* 1, intermedia per il *cluster* 3 e minore per il *cluster* 2. Infine, lo spessore del giunto di malta ha valori simili per i *cluster* 1 e 3, mentre per il *cluster* 2 risulta inferiore.

L'analisi per *cluster* consente di limitare la soggettività dell'operatore durante le fasi di classificazione dei tipi murari individuabili tramite la classificazione dei gruppi SM1, SM2, SM3; basandosi su un'analisi statistica come la *cluster analysis* è possibile valutare oggettivamente le informazioni ricavate. I risultati ottenuti consentono di ricavare aggregazioni per variabili simili e di valutarne i valori medi all'interno dei gruppi omogenei (*cluster*); questi risultati consentono di individuare i parametri utili e maggiormente influenti per la classificazione in tipi murari.

L'ottenimento di gruppi omogenei (*cluster*) validi necessita di un *dataset* ampio di osservazioni. Ne consegue che risulta strettamente necessario ottenere un cospicuo numero di dati da analizzare. Inoltre, la campagna fotografica di rilievo deve seguire il protocollo definito nella metodologia che risulta appropriata.

La qualità del *dataset* è frutto delle capacità soggettive dell'osservatore, poiché da esso dipende l'estrazione dei dati dalle immagini fotografiche e dunque la compilazione del *dataset* stesso. Se da un lato l'analisi *cluster* rappresenta la possibilità di ottenere dei dati oggettivi, allo stesso modo il processo è ancora parzialmente influenzato dalle capacità e dalle conoscenze dell'osservatore.

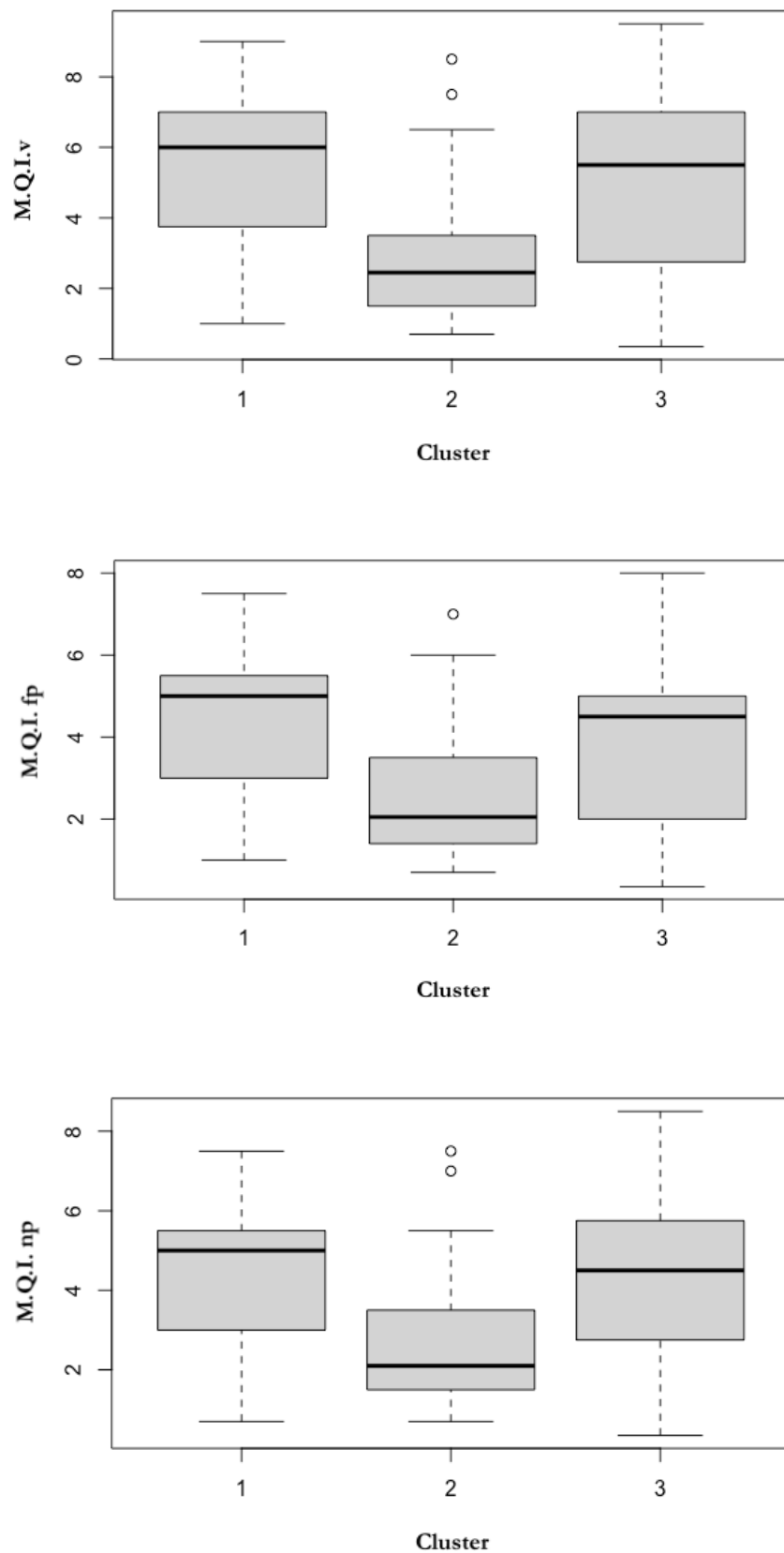
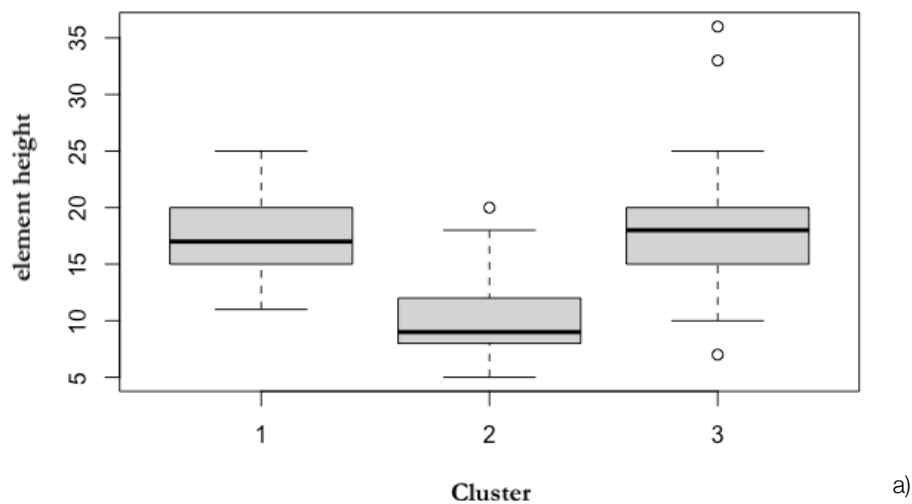
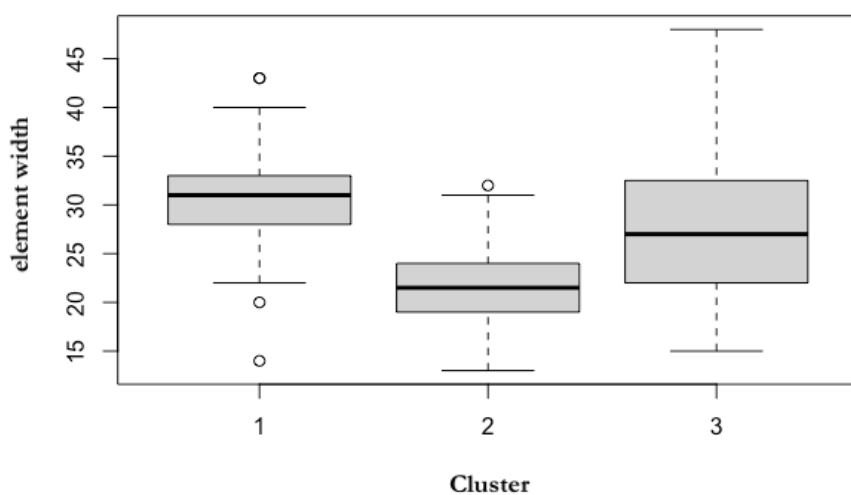


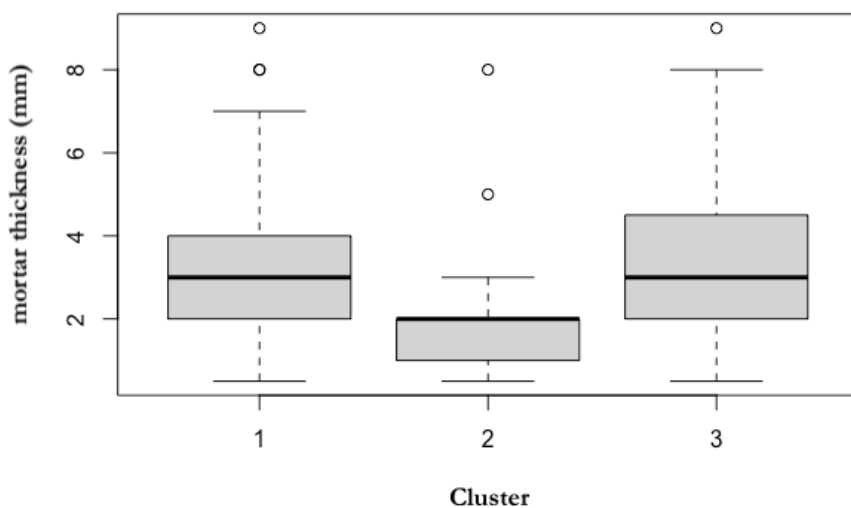
Fig. 3.8 Variabilità dell'I.Q.M. all'interno dei 3 cluster.



a)



b)



c)

Fig. 3.9 Boxplots delle dimensioni geometriche per i tre gruppi di cluster a) altezza elemento b) larghezza elemento c) spessore malta.

3.3.3 Analisi e risultati della random forest applicata ai casi studio

Infine, volendo ricavare una valutazione sulla bontà delle osservazioni rilevate dalle murature si è analizzato il *dataset* più numeroso tra i quattro precedentemente analizzati, cioè quello relativo al Comune di Santo Stefano di Camastra, impiegando la random forest. Il dataset contiene 63 osservazioni e 67 variabili, per un totale di 4.221 elementi (dati qualitativi e quantitativi).

I risultati ottenuti dall'analisi mostrano un OOB del 37,74%, che consente di affermare che la classificazione dei tipi murari svolta manualmente è valida e che per il 72,26% la corrispondenza tra i raggruppamenti effettuati tramite *random forest* è corretta.

Un altro risultato importante, restituito da questo tipo di analisi, è la variabile di importanza (Fig. 3. 10). Restituisce il peso della variabile nel processo di suddivisione. Dalla figura Fig. 3. 10 si evince che le variabili più importanti sono l'altezza e la larghezza dell'elemento e l'orizzontalità dei parametri.

Ulteriore risultato è la forte correlazione tra il tipo murario e l'indice di qualità muraria. Attraverso le *box plot* riportate in Fig. 3. 11, Fig. 3. 12, Fig. 3. 13 si evince che per le murature del gruppo SM2 l'I.Q.M. calcolato ha valori più elevati e di conseguenza una migliore risposta alle sollecitazioni meccaniche. Spostandosi da SM2 verso SM3 l'I.Q.M. ha valori inferiori.

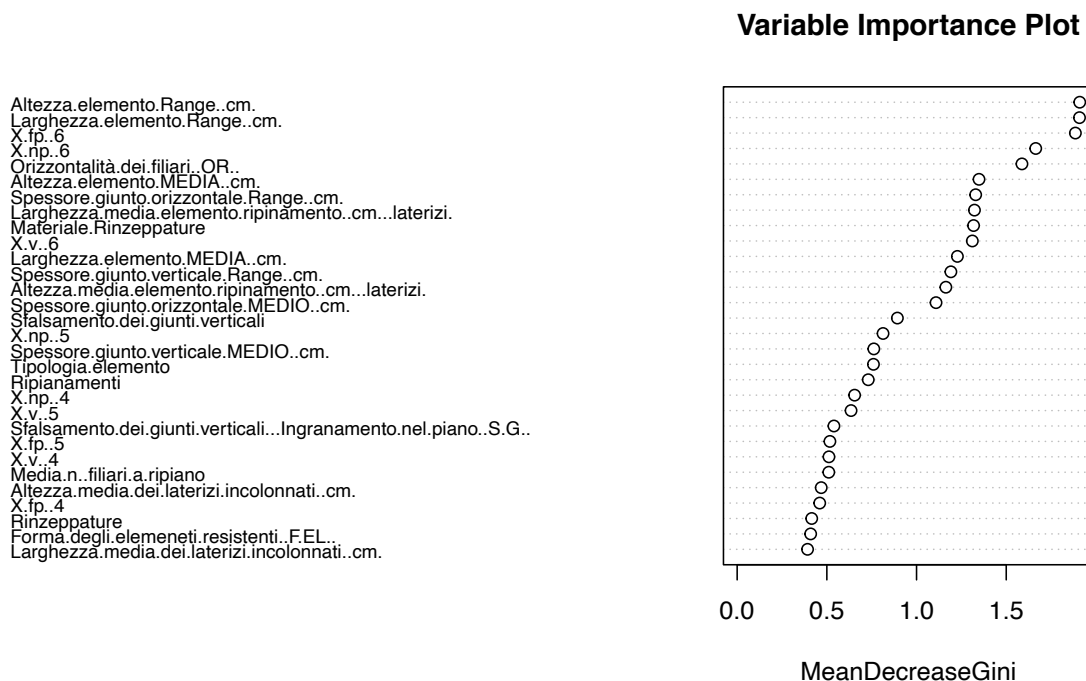


Fig. 3. 10 Variabile di importanza

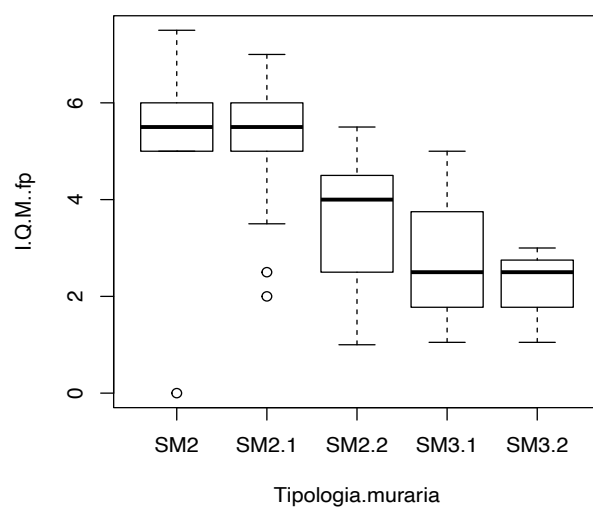


Fig. 3.11 Correlazione tra tipi murari e IQM per azioni fuori dal piano.

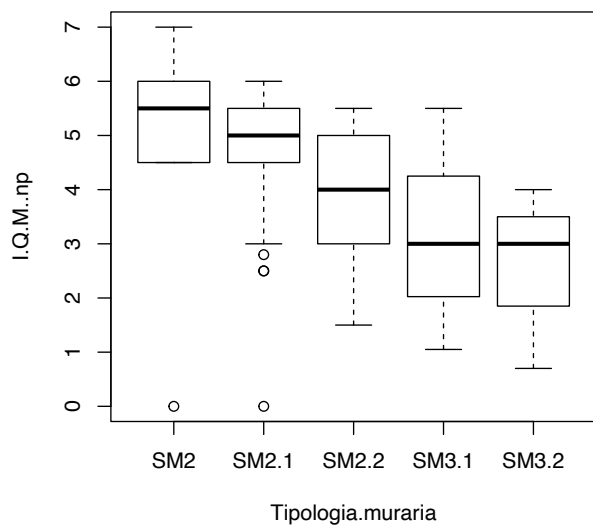


Fig. 3.12 Correlazione tra tipi murari e IQM per azioni nel piano.

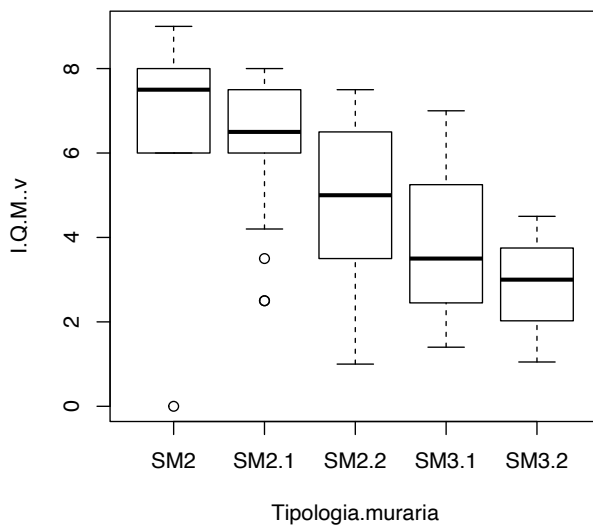


Fig. 3.13 Correlazione tra tipi murari e IQM per azioni verticali.

3.4 CONSIDERAZIONI

L'applicazione di analisi statistiche alla classificazione in tipi murari si configura come uno strumento metodologicamente efficace e versatile, che consente di validare il metodo di classificazione esposto nel capitolo 3, rendendolo applicabile in altri contesti locali. Tale approccio permette di rendere maggiormente oggettivi i criteri di classificazione delle murature, superando la soggettività che spesso caratterizza l'analisi visiva tradizionale, e sviluppando una base scientifica per la comparazione tra i diversi tipi murari.

L'approccio statistico utilizzato offre diversi vantaggi, tra cui la possibilità di analizzare in modo sistematico e ripetibile i parametri quali-quantitativi delle murature in differenti contesti territoriali.

Tuttavia, esistono alcune criticità insite nell'adozione di un approccio statistico che devono essere attentamente considerate. Una delle principali difficoltà è rappresentata dalla necessità di disporre di un dataset ampio e dettagliato relativo alle murature analizzate. Senza una base dati adeguata, infatti, le analisi statistiche rischiano di risultare non significative. La validità e l'affidabilità dei risultati dipendono strettamente dalla quantità e qualità dei dati raccolti, il che impone un rigoroso lavoro preliminare di catalogazione e standardizzazione dei dati.

Questa esigenza, tuttavia, non deve essere vista esclusivamente come un ostacolo, ma anche come un'opportunità. Infatti, la necessità di raccogliere una vasta gamma di dati sulle murature non solo contribuisce alla validità delle analisi, ma apre anche la possibilità di ampliare il repertorio delle murature storiche.

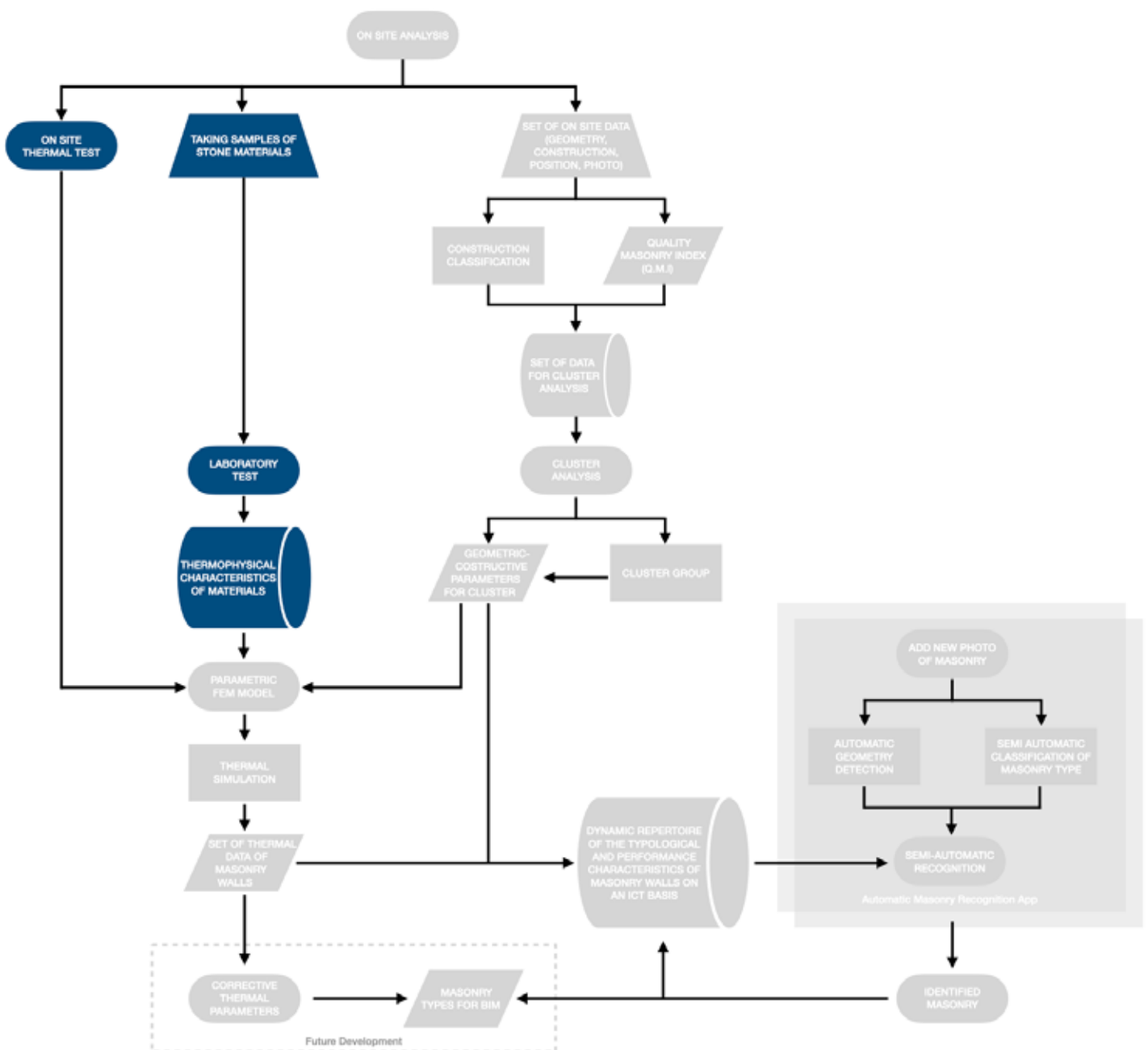
Bibliografia

- Almeida C, Guedes JP, Arêde A, Costa A (2016) Geometric indices to quantify textures irregularity of stone masonry walls. *Constr Build Mater* 111:199–208. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.02.038>
- Batool F, Hennig C (2021a) Clustering with the Average Silhouette Width. *Comput Stat Data Anal* 158:107190. <https://doi.org/10.1016/J.CSDA.2021.107190>
- Breiman L (2001) Random forests. *Mach Learn* 45:5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324/METRICS>
- Dahlström L, Johari F, Broström T, Widén J (2024) Identification of representative building archetypes: A novel approach using multi-parameter cluster analysis applied to the Swedish residential building stock. *Energy Build* 303:113823. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2023.113823>
- Genova E, La Placa E, Vinci C Cluster analysis of masonry types to analyze the energy performance of historic buildings: preliminary results
- Kaufman L, Rousseeuw PJ (1990a) Finding groups in data: An introduction to cluster analysis. <https://doi.org/10.1002/9780470316801>
- Kaufman L, Rousseeuw PJ (1990b) Finding Groups in Data
- La Placa E, Genova E, Vittorietti M, et al (2024) Cluster Analysis as a Basis for Local Masonry Typology. In: Corrao R, Campisi T, Colajanni S, et al. (eds) *Proceedings of the 11th International Conference of Ar.Tec. (Scientific Society of Architectural Engineering)*. Springer, Cham, pp 407–422
- Mouraz CP, Almeida RMSF, Mendes Silva J (2022) Combining cluster analysis and GIS maps to characterise building stock: case study in the historical city centre of Viseu, Portugal. *Journal of Building Engineering* 58:104949. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104949>
- Verellen E, Allacker K (2022) Method for identifying clusters of buildings with a similar renovation potential. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Institute of Physics, p 49DUMMY
- Zhang S, Beyer K (2019) Numerical investigation of the role of masonry typology on shear strength. *Eng Struct* 192:86–102. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.04.026>

CAPITOLO 4

CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DEI MATERIALI LAPIDEI NATURALI E DELLE MURATURE

Experimental characterization of natural stone and masonry



Abstract

This chapter presents a comprehensive analysis of the thermal characterization of natural stone and masonry structures, emphasizing the significance of experimental methodologies in assessing their thermophysical properties. This research aims to establish a robust database that supports finite element modeling (FEM) for traditional masonry wall types, facilitating a deeper understanding of their thermal behavior. The chapter outlines the methodological evolution encountered during the doctoral research, which initially aimed at conducting extensive in situ tests to characterize a wide variety of masonry types. However, operational challenges necessitated a strategic shift towards a more integrated approach, combining in situ measurements with FEM calibration.

The chapter begins by discussing the inherent complexities associated with the characterization of historical masonry, which often comprises heterogeneous materials and construction techniques developed over extended periods. This variability increased the complexity of the collection of representative data, as the performance of masonry elements can significantly differ based on their composition and construction history. The need for a detailed understanding of the thermophysical properties of these materials is underscored, particularly in line with the current policies that aim to energy efficiency and sustainability in the conservation of historical buildings.

Key factors influencing the accuracy of thermal measurements are discussed, including the selection of measurement points, environmental conditions, and the presence of thermal bridges or heat sources. The use of infrared thermography is highlighted as a critical tool for identifying optimal measurement locations, ensuring that external influences are minimized.

Furthermore, the chapter addresses discrepancies between normative data and actual material performance, underscoring the importance of empirical data in refining energy performance calculations for historical building envelopes. The findings contribute to the development of effective FEM models, enabling the simulation of thermal performances in masonry structures where direct measurements are impractical. This integrated research approach enhances the understanding of thermal dynamics in masonry and provides a framework for future studies aimed at improving the energy efficiency of historical buildings.

In conclusion, the chapter emphasizes the necessity of expanding the existing database of thermophysical properties through systematic experimental investigations. By collating data from various sources and ensuring its accessibility to professionals in the field, the research aims to foster a more accurate analysis of the energy performance of historical masonry.

La caratterizzazione termica dei materiali lapidei naturali e delle murature è rappresentata graficamente in blu nello schema generale. I collegamenti tra le diverse tematiche dello schema sottolineano l'importanza di ciascuna di esse per lo sviluppo di ulteriori aree di ricerca. In particolare, l'analisi dei materiali lapidei naturali non solo consente la determinazione delle loro proprietà termofisiche, utili per l'alimentazione di un *database* dedicato, ma è anche cruciale per lo sviluppo di modelli agli elementi finiti (FEM) relativi a murature di tipo tradizionale. I dati ottenuti da prove sperimentali in laboratorio, infatti, sono essenziali per popolare i modelli FEM (sviluppati nel capitolo 5) con valori rappresentativi delle caratteristiche termofisiche dei materiali indagati.

Ulteriore tematica di ricerca approfondita nel presente capitolo è la caratterizzazione termofisica delle murature attraverso misurazioni in opera della conduttanza termica di parete. L'approccio di ricerca di questo approfondimento tematico ha subito un'evoluzione metodologica durante la ricerca dottorale. Inizialmente, l'obiettivo era quello di condurre un ampio numero di prove in opera per caratterizzare termicamente un numero elevato di tipi murari. Tuttavia, le difficoltà operative riscontrate hanno portato a una revisione dell'approccio. Infatti, le misure in opera sono state svolte sia per ampliare il repertorio con i dati termici relativi alle murature sia per calibrare i modelli FEM; la calibrazione dei modelli FEM consente di estendere l'analisi termica alle murature in cui non è possibile eseguire direttamente la misurazione in opera. Questo approccio integrato, nato dalle problematiche operative in situ, consente di rendere la modellazione FEM uno strumento efficace per la simulazione delle caratteristiche termiche delle murature in un contesto più ampio.

Sia dal punto di vista strutturale sia da quello energetico, parte essenziale dell'analisi riguarda le soluzioni materico-costruttive. Tuttavia, non di rado la caratterizzazione dei componenti tecnici è ostacolata dall'eterogeneità costruttiva, che è particolarmente evidente nelle opere murarie, spesso frutto di interventi edilizi realizzati in un arco temporale lungo, con variazioni anche significative di materiali e prassi esecutive.

Le indagini strumentali volte a caratterizzare le prestazioni delle murature storiche, attraverso prove in laboratorio e in opera, sono complicate dall'eterogeneità materico-costruttiva della parete. Quest'ultima aumenta il numero di prove necessarie affinché i risultati siano rappresentativi delle prestazioni del componente tecnico. Inoltre, negli edifici monumentali, le esigenze di conservazione possono anche limitare in modo significativo il ricorso alle indagini distruttive.

Soprattutto nella costruzione muraria, l'uso prevalente di materiali di facile reperibilità – in genere locali – si traduce in una varietà di lapidei, naturali e artificiali, che diventa un carattere peculiare. Ricche raccolte di dati trattano anche delle proprietà dei materiali dell'edilizia storica; tuttavia, la letteratura sottolinea la necessità di approfondire le proprietà termo-igrometriche dei materiali da muratura, anche in ragione delle discrepanze che, nel calcolo delle caratteristiche di parete, derivano dall'uso di raccolte di dati differenti. Ancora dal punto di vista termico, non sono trascurabili le difficoltà di esecuzione di misure in opera di conduttanza o trasmittanza termica: i molteplici fattori che incidono sull'accuratezza della misura, indicati nella stessa norma di riferimento, limitano la scelta dei punti di misura e accrescono l'onere per conseguire risultati rappresentativi, impiegabili per l'analisi termica dell'edificio.

Le raccolte normative relative alle caratteristiche termofisiche dei materiali contengono dati applicabili all'involucro dell'edificio storico, ma spesso le soluzioni presenti nelle norme differiscono dalle soluzioni reali e determinano un margine di errore nel calcolo delle prestazioni energetiche.

Di seguito si riportano le principali norme di riferimento per la determinazione delle

proprietà termiche dei materiali e delle murature.

La UNI EN ISO 6946:2018 fornisce il metodo per il calcolo della resistenza termica e della trasmittanza termica di alcuni componenti e degli elementi per edilizia costituiti da strati termicamente omogenei. La norma fornisce inoltre un metodo approssimato che può essere utilizzato per gli elementi contenenti strati non omogenei. Di fatto, la UNI 6946 rappresenta la norma di calcolo generale.

La UNI EN ISO 10456:2018 specifica i metodi di determinazione delle proprietà termiche e igrometriche per i materiali omogenei da costruzione.

La norma UNI 10351:2021 fornisce il metodo per il reperimento dei valori di riferimento per conduttività termica, resistenza al passaggio del vapore e calore specifico dei materiali da costruzione in base all'epoca di installazione. La norma integra quanto non presente nella UNI EN ISO 10456 con particolare riferimento ai materiali isolanti per l'edilizia a seconda se siano o meno dotati di marcatura CE.

La norma UNI/TR 11552:2014 fornisce un abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici, e ne definisce i parametri termo-fisici. Tali parametri possono essere utilizzati per le valutazioni energetiche di edifici esistenti in assenza di informazioni dettagliate sui materiali che lo compongono e qualora non si possa effettuare una determinazione rigorosa di calcolo. La valutazione energetica degli edifici esistenti risulta spesso complicata dalla mancanza di informazioni certe sulle stratigrafie dei componenti di involucro e sulle proprietà termofisiche dei materiali.

La UNI 1745:2020 fornisce le regole per determinare i valori termici di resistenza termica e conduttività termica di muratura e prodotti per muratura.

Analizzando la normativa di riferimento si osserva che i dati attualmente disponibili non sono ancora sufficienti a coprire completamente la variabilità dei materiali lapidei naturali presenti sul territorio nazionale. Di conseguenza, l'affidabilità delle valutazioni energetiche degli edifici storici si riduce, poiché le norme tecniche non forniscono dati di conducibilità termica per tutti i principali litotipi.

Le malte impiegate per la costruzione delle murature presentano un'elevata variabilità. Sono state trovate malte a base di calce, di gesso, materiale utilizzato anche per lo strato di finitura esterna. In altri casi, sono state rinvenute murature con riempimenti e ripianamenti a base di terra e paglia. Vista la complessità e la varietà dell'uso delle malte nei diversi contesti indagati, si è deciso di non trattare questa tematica di notevole interesse e meritevole di indagini più approfondite. Nel presente lavoro di ricerca, nel trattare le malte, si è fatto riferimento ai valori presenti nelle norme di riferimento e in letteratura.

La conoscenza materica è strettamente necessaria per un'analisi approfondita dell'apparecchio murario e delle sue proprietà termo-fisiche. Infatti, in questo capitolo si indagano anche le proprietà termofisiche dei materiali lapidei naturali attraverso prove sperimentali di laboratorio.

Tuttavia, per un'analisi dettagliata delle prestazioni energetiche di una muratura, la sola conoscenza del materiale non risulta esaustiva per determinare le proprietà termiche della muratura in opera. Nonostante diverse raccolte tecniche esaminino i materiali tradizionali dell'edilizia storica, come le norme internazionali UNI EN ISO 10456 e UNI EN 1745, i dati presenti riguardano una casistica limitata di tipi murari.

Considerando l'importanza del tema e la necessità di caratterizzare opportunamente le murature si sono svolte ulteriori prove sperimentali di conduttanza termica in opera dell'intera sezione muraria.

4.1 MATERIALI LAPIDEI NATURALI

La ricerca si sviluppa, in particolare, esaminando il contesto siciliano, un contesto certamente rappresentativo per la varietà di materiali lapidei naturali disponibili (dalle calcareniti alle quarzareniti, dalle rocce vulcaniche ai gessi) - con proprietà fisiche e meccaniche anche molto diverse - e, di conseguenza, anche particolarmente significativo per la molteplicità di soluzioni costruttive che declinano in modo differente questa eterogeneità nei vari contesti locali.

Infatti, nell'Isola - in particolare nei piccoli centri delle aree interne e montane in cui la cultura costruttiva è da sempre fondata quasi esclusivamente sulle risorse locali - le architetture in pietra tradizionali riflettono sia le caratteristiche peculiari delle rocce utilizzate sia la cultura e il livello tecnico delle maestranze che le hanno realizzate. Questo ha contribuito a rendere il patrimonio architettonico siciliano estremamente vario dal punto di vista delle soluzioni costruttive e, di conseguenza, rappresentativo rispetto ad un panorama più vasto.

Il *focus* della ricerca sulla caratterizzazione termofisica dei materiali lapidei naturali si concentra sui materiali maggiormente diffusi nel territorio siciliano, come la calcarenite, la quarzarenite e il gesso; altri materiali invece sono circoscritti in alcuni contesti locali che sono rilevanti per la consistenza del materiale stesso, come il caso del travertino ad Alcamo.

Per tali ragioni, i materiali selezionati per essere testati in laboratorio (Fig. 4.1) sono i seguenti:

- biocalcarenite, roccia sedimentaria bioclastica con minuti clasti poligenici di varia forma e con gli spigoli smussati, composta da sabbia da 2 a 1/16 di mm, molto porosa e di colore giallo paglierino. Provenienza Palermo;
- travertino, roccia di deposizione chimica in ambiente continentale, stratificato, con presenza di vuoti (fenestre) sparsi, molto compatta e resistente, colore bianco-grigiastro. Provenienza Alcamo;
- quarzarenite, roccia sedimentaria di natura clastica e composizione prevalentemente quarzarenitica, tessitura clastica a taglia arenitica, con granuli ben selezionati di varia forma e geometria. Presenta fessura riempita per deposizione secondaria. Estremamente resistente, compatta e di colore giallo dorato con porzioni di alterazione limonitica, di colore bruno giallastro. Provenienza Mistretta;
- gesso selenitico primario, roccia sedimentaria di origine chimica, con macro-cristalli a geminazione prevalente a coda di rondine, con livellette intercalate di dimensione massima di 2 cm, presenza di frammisto di granuli sabbiosi, abbastanza poroso, colore traslucido nel gesso e giallastro nei livelletti intercalari. Provenienza Sutera;
- calcare solfifero, roccia di origine chimica, molto compatta e di colore biancastra. Provenienza Bompieto;
- arenaria arcossica, roccia sedimentaria, costituita da granuli medio fini, molto compatta e resistente, di colore grigio-verde. Provenienza Santo Stefano di Camastra;
- calcare, roccia sedimentaria a grana assortita, compatta e di colore beige; Provenienza Scicli;
- marna arenitica, (grana medio-fine), compatta di colore biancastro. Provenienza Scicli;
- calcare, a grana compatta di colore bianco. Provenienza Comiso;



Fig. 4.1 Mappa dei comuni Siciliani nei quali sono stati analizzati i materiali.

4.2 PROVE DI CONDUCIBILITÀ TERMICA IN LABORATORIO

Una campagna di caratterizzazione termo-fisica dei materiali lapidei naturali è stata condotta nell'ambito della ricerca dottorale al fine di ampliare la raccolta dei dati di letteratura disponibili.

Le prove svolte indagano differenti materiali lapidei naturali impiegando provini di forma e dimensioni differenti, in funzione del macchinario utilizzato per effettuare le prove.

Le prime prove sperimentali di misura della conducibilità termica sono state condotte presso il laboratorio per gli Ambienti Indoor e le Tecnologie Sostenibili del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Palermo. Ulteriori prove sono state svolte durante il periodo di ricerca estero svolto a Parigi presso l'*École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais* all'interno del laboratorio GSA (*Laboratoire Géométrie Structure Architecture*), i test di conducibilità termica sono stati effettuati utilizzando la strumentazione presente nei laboratori CPDM (*Comportement Physico-Chimique et Durabilité des Matériaux*) dell'*Université Gustave Eiffel* a Parigi.

I primi materiali analizzati nell'ambito della ricerca di dottorato sono la quarzarenite di Mistretta e il travertino di Alcamo.

Per ogni tipologia di roccia analizzata, è stato prelevato un concio da murature preesistenti parzialmente crollate. Da ogni elemento sono state estratte, tramite carotatrice, delle carote; successivamente, ogni carota è stata tagliata per ricavare almeno tre provini cilindrici di diametro (ϕ) pari a 6 cm e spessore pari a 2 cm. Le fasi di taglio hanno consentito la preparazione di provini cilindrici in cui le due facce risultano piane e parallele, con una tolleranza di 1 grado. Ottenuti i provini delle misure adeguate allo svolgimento delle prove di conducibilità termica è stato necessario essicarli.

Il protocollo della norma (UNI EN 1936:2007) "Metodi di prova per pietre naturali", prevede che i provini siano essiccati a 70 ± 5 °C fino al raggiungimento di un peso costante. Si assume che, quando la differenza tra le due pesate ad un intervallo di 24 ± 2 h non sia

superiore allo 0,1% della massa del provino, il provino sia essiccato.

I provini ricavati sono stati essiccati in forno, valutando la differenza in peso tra le pesate a 24h e 28h, terminando la prova quando la variazione in peso era prossima allo 0,1% della massa del provino.

In Fig. 4.2 si mostra un provino cilindrico in travertino, dal quale si evince la dimensione geometrica prevalente (ϕ), in Fig. 4.3 e Fig. 4.4 sono visibili le pesate del provino (in grammi) prima e dopo l'essiccazione in forno, infine, in Fig. 4.5 si riporta la fase di essiccazione in forno dei provini. Ogni campione ottenuto è stato pesato prima, durante e dopo l'essiccazione. Questo processo ha consentito di valutare le variazioni in peso dei campioni durante la prova (Fig. 4.6) ed inoltre di valutare la quantità di peso (in percentuale) persa a 24h e a 48h (Fig. 4.7).

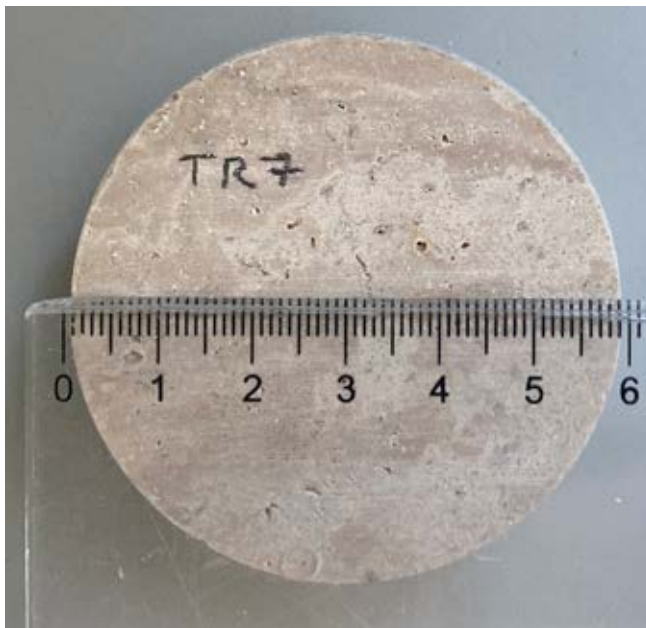


Fig. 4.2 Provino cilindrico di travertino



Fig.4.3 Pesatura provino di travertino
pre-essiccazione.



Fig. 4.4 Essiccazione dei provini di travertino in forno



Fig. 4.5 Pesatura provino di travertino
post-essiccazione.

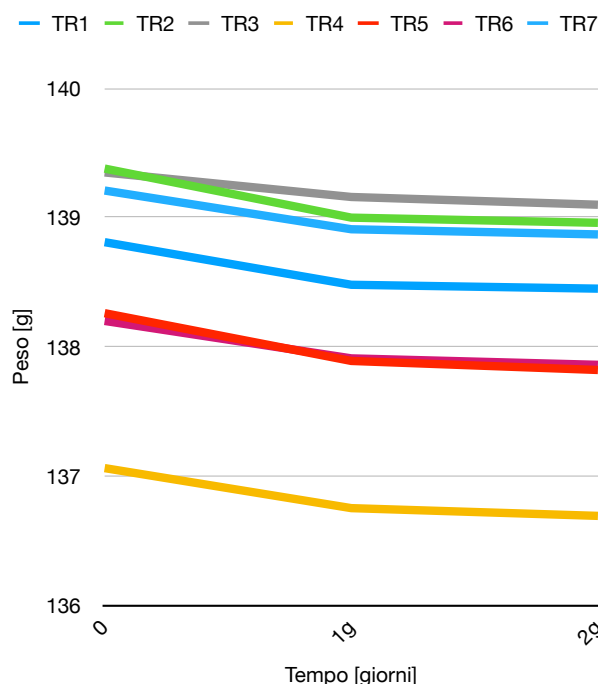


Fig. 4.6 Variazione peso dei provini di travertino durante l'essiccazione in forno.

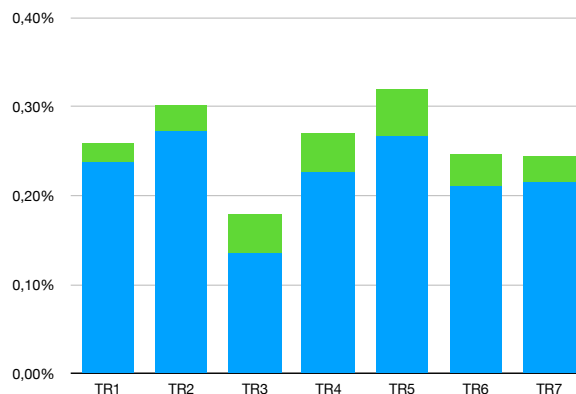


Fig. 4.7 Riduzione % del peso dei provini di travertino durante l'essiccazione in forno.

provino	r [cm]	ϕ [cm]	s [cm]	A [cm ²]	V [cm ³]	ρ_b [kg m ⁻³]	$\rho_{b, dry}$ [kg m ⁻³]
TR1	2,95	5,90	1,98	27,34	54,13	2.564,26	2.557,61
TR2	3,00	6,00	1,99	28,27	56,27	2.477,17	2.469,70
TR3	2,90	5,80	2,00	26,42	52,84	2.637,13	2.632,40
TR4	2,95	5,90	1,98	27,34	54,13	2.531,93	2.525,09
TR5	3,00	6,00	1,97	28,27	55,70	2.482,21	2.474,31
TR6	2,85	5,70	2,01	25,52	51,29	2.694,46	2.687,84
TR7	2,95	5,90	2,00	27,34	54,68	2.545,93	2.539,71
Valori medi	2,94	5,89	1,99	27,22	54,15	2.561,87	2.555,24

Tab. 4.1 Determinazione della densità apparente per i provini di travertino.

Il processo di essiccazione dei campioni è stato utile per calcolare la densità apparente ($\rho_{b, dry}$) per ciascun materiale lapideo oggetto di studio. La densità apparente è stata calcolata come il rapporto medio tra peso secco e volume di ogni provino.

In Tab. 4.1 si riporta il calcolo della densità apparente nel caso specifico del travertino di Alcamo; questo processo è stato effettuato per tutti i materiali analizzati, i dati sono riportati in Tab. 4.4.

La tolleranza degli strumenti di misura è stata di $\pm 0,1$ mm per le misurazioni dimensionali e di $\pm 0,01$ g per le misurazioni del peso.

Fine ultimo di questi processi è stata la determinazione della conducibilità termica dei diversi materiali lapidei, attraverso lo svolgimento di prove di laboratorio.

Queste prove sono state effettuate con lo strumento *Fox50 TA Instrument* che utilizza campioni cilindrici per testare la conducibilità termica nel range da 0.1 a 10 Wm⁻¹K⁻¹. Questo strumento (Fig. 4.8) risulta idoneo per testare materiali a media conducibilità come plastica, ceramica, vetro, materiali compositi, cemento e pietre. L'area dei trasduttori di flusso termico (cioè la superficie di misura sul campione) è pari a 25 x 25 mm.



Fig. 4.8 Fox 50 Heat Flow Meter - TA Instrument.

Il flusso di calore medio viene utilizzato per calcolare la conducibilità termica (λ) (Eq. 4.1) e la resistenza termica (R) (Eq. 4.2), secondo la legge di Fourier.

$$\lambda = \frac{Q}{A} \times \frac{s}{\Delta T} \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (4.1)$$

$$R = \frac{1}{\lambda} \times s \left[\frac{m^2K}{W} \right] \quad (4.2)$$

E' stato effettuato un confronto tra i valori misurati in laboratorio rispetto ai dati presenti nelle norme. In tal senso, i valori di conducibilità termica presenti nelle norme di riferimento (UNI EN ISO 10456 -UNI 10351) sono stati interpolati linearmente in funzione della densità apparente ($\rho_{b,dry}$).

In Tab. 4.2 si riportano i valori ottenuti dalle misure sperimentali svolte in laboratorio relativi alla quarzarenite di Mistretta, mentre in Tab. 4.3 si trovano i valori del travertino di Alcamo. I dati sono stati confrontati con i valori presenti nelle norme di riferimento, la UNI EN ISO 1745 e la UNI EN ISO 10456. Si specifica che l'utilizzo del segno negativo indica che il valore misurato è maggiore rispetto a quello riportato nella norma.

I valori ottenuti per la quarzarenite sono stati confrontati con i dati indicati nella UNI EN ISO 1745. La conducibilità ottenuta in laboratorio è pari a $3,09 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e si discosta dalla norma del -16% circa.

La conducibilità termica del travertino è pari a $1,809 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e rispetto alla norma si ottiene un valore inferiore del +21,04%. In questo caso, la λ del travertino nella normativa di riferimento risulta maggiore rispetto a quanto misurato in laboratorio.

Le discrepanze mostrate tra i valori dimostrano che è necessario effettuare un numero maggiore di prove in laboratorio al fine di determinare statisticamente i valori corrispondenti di conducibilità termica per i diversi materiali.

Inoltre, svolgere molte prove di laboratorio consentirebbe di ampliare il repertorio dei materiali con l'obiettivo di ampliare i dati disponibili nella normativa tecnica. Questo supporterebbe i tecnici del settore fornendo dati sulle proprietà termiche dei materiali più corrispondenti ai diversi litotipi e più adeguati alle murature storiche.

Materiale		Quarzarenite
Provenienza		Mistretta (ME)
$\rho_{b, dry}$	$[kg \cdot m^{-3}]$	2.163,26
λ_{mis}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	3,09
UNI EN ISO 1745 - Sandstone		Quartz
$\lambda_{inter1745}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	2,6
$(\lambda_{inter1745} - \lambda_{mis}) / \lambda_{mis}$	$[-]$	-15,86%

Tab. 4.2 Valore di conducibilità termica della quarzarenite ricavata in lab. e confrontata con la norma 1745.

Materiale		Travertino
Provenienza		Alcamo (TP)
$\rho_{b, dry}$	$[kg \cdot m^{-3}]$	2.555,24
λ_{mis}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	1,809
UNI EN ISO 10456 – Natural, sedimentary rock		
$\lambda_{inter10456}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	2,190
$(\lambda_{inter10456} - \lambda_{mis}) / \lambda_{mis}$	$[-]$	+21,04%

Tab. 4.3 Valore di conducibilità termica del travertino ricavato in lab. e confrontato con la UNI EN ISO 10456.

Le prove di conducibilità seguenti sono state effettuate durante il periodo di ricerca estero svolto a Parigi presso l'*École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais* (ENSA) e all'interno del laboratorio GSA utilizzando la strumentazione presente nei laboratori CPDM dell'*Université Gustave Eiffel* di Parigi.

La ricerca svolta ha indagato nove materiali lapidei naturali impiegati nelle costruzioni storiche, nel territorio siciliano: biocalcarenite (Palermo), calcare (Scicli), calcare solfifero (Bompietro), calcare compatto (Comiso), marna arenitica (Scicli), quarzarenite (Mistretta), gesso selenitico (Sutera), arenaria arcossica (Santo Stefano di Camastra) e il travertino (Alcamo) (Fig. 4.9 a-b-c).

I materiali selezionati per le indagini termiche risultano impiegati nelle costruzioni tradizionali in diversi contesti locali, all'interno dei quali le costruzioni appaiono comparabili tra loro per omogeneità costruttiva e materica.

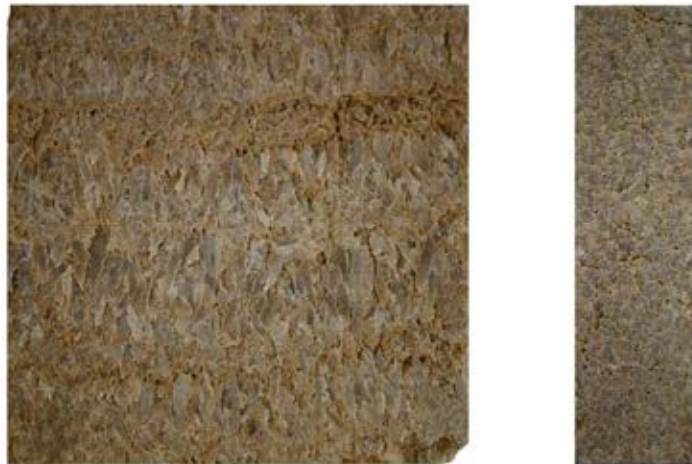
La quasi totalità dei materiali lapidei naturali analizzati sono stati prelevati in situ, da porzioni di muratura parzialmente crollata; esclusivamente la quarzarenite di Mistretta è stata reperita dalla cava di estrazione, poiché risulta ancora attiva e fornisce materiale per il recupero dell'edilizia preesistente e per le nuove costruzioni; a tale scopo si è deciso di testare le proprietà termiche del materiale.

Per ogni campione analizzato sono stati ricavati, tramite taglio con sega circolare ad acqua, più provini di forma parallelepipedica, di dimensioni 20 x 20 x 5 cm. Il processo di taglio dei campioni di forma irregolare, prelevati in situ, è risultato in alcuni casi molto complesso. Per alcuni materiali lapidei (come il conglomerato e il calcare prelevati a Petralia) non è stato possibile ricavare nessun provino a causa di rotture improvvise durante il taglio.

**BIOCALCARENITE
(Palermo)**



**GESSO SELENITICO
(Sutera)**



**TRAVERTINO
(Alcamo)**



Fig. 4.9 a) Provini materiali lapidei naturali testati in laboratorio: biocalcarenite, gesso selenitico, travertino.

**CALCARE
(Comiso)**



**CALCARE
(Scicli)**



**MARNA ARENITICA
(Scicli)**



Fig. 4.9 b) Provini materiali lapidei naturali testati in laboratorio: calcarea, calcarea, marna arenitica.

**CALCARE SOLFIFERO
(Bompietro)**



**QUARZARENITE
(Mistretta)**



**ARENARIA ARCOSICA
(Santo Stefano di
Camastra)**



Fig. 4.9 c) Provini materiali lapidei naturali testati in laboratorio: calcare solfifero, quarzarenite, arenaria arcosica.

Tutti i provini ricavati da ciascun campione sono stati essiccati secondo il protocollo già descritto. Inoltre, tra tutti i provini ottenuti ne sono stati selezionati accuratamente due per ciascun materiale lapideo naturale al fine di svolgere le prove nel laboratorio GSA dell'ENSA *Paris-Malaquais*. La selezione è avvenuta prendendo i provini che rispondevano a tutti i requisiti necessari per lo svolgimento delle prove. In Tab. 4.4 si riportano i valori di densità apparente ricavati per tutti i provini testati in laboratorio.

Le misure di conducibilità termica sono state effettuate utilizzando una sonda a filo caldo con lo strumento *FP2C neotim* (Fig. 4.10). La sonda a filo caldo produce localmente un basso riscaldamento del materiale (pochi gradi sopra il campione) e misura l'incremento di temperatura nel tempo (durata di pochi minuti). Mediante l'elaborazione matematica del segnale attraverso il software in dotazione, si ottiene il valore della conduttività termica.

Questo tipo di sonda misura la conduttività termica da $0,02$ a $5 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, e la temperatura da -60 a 100°C . Questo sistema di misura è stato sviluppato dal CSTB (*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*), sulla base delle norme tecniche ASTM D5930-97 (*Standard Test Method for the Thermal Conductivity of Plastics by Means of a Transient Line Source Technique*) e RILEM AAC 11-3.

Prima di procedere alla misurazione della conducibilità termica è stato necessario calibrare lo strumento con l'ausilio di un materiale isolante di proprietà note. Le prove sono state svolte applicando la sonda a filo caldo a contatto diretto tra due campioni dello stesso materiale. Utilizzando il software di interfaccia, sono stati definiti dei parametri quali la resistenza termica, la durata della prova, ecc, che variano in funzione del peso specifico del materiale. Ogni prova si è svolta in 80 secondi, (tempo idoneo secondo il manuale dello strumento per i materiali lapidei).

Materiale	Provino	b	h	s	A	V	$\rho_{b,w}$	$\rho_{b,dry}$
[-]	[-]	[m]	[m]	[m]	[m ²]	[m ³]	[kg m ⁻³]	[kg m ⁻³]
Quarzarenite	Q_6	0,20	0,20	0,0455	0,04	0,00182	2.180,22	2.469,78
	Q_4	0,201	0,201	0,044	0,04	0,00178	2.017,84	2.520,19
	Valori medi	0,20	0,20	0,04	0,04	0,00180	2.099,03	2.494,98
Biocalcarenrite	C_1	0,202	0,202	0,047	0,04	0,00192	1.611,75	1.247,27
	C_2	0,20	0,20	0,046	0,04	0,00184	1.527,17	1.245,65
	Valori medi	0,20	0,20	0,05	0,04	0,00188	1.569,46	1.246,46
Calcare	COM_1	0,20	0,20	0,047	0,04	0,00188	2.315,43	2.304,26
	COM_2	0,20	0,20	0,0465	0,04	0,00186	2.370,43	2.360,75
	Valori medi	0,20	0,20	0,05	0,04	0,00187	2.342,93	2.332,50
Travertino	TR_1	0,20	0,20	0,041	0,04	0,00164	2.524,39	2.515,85
	TR_2	0,20	0,20	0,0456	0,04	0,00182	2.509,32	2.484,65
	Valori medi	0,20	0,20	0,04	0,04	0,00173	2.516,86	2.500,25
Calcare Solififero	BOMP_1	0,20	0,20	0,042	0,04	0,00168	1.946,43	1.883,33
	BOMP_2	0,20	0,20	0,046	0,04	0,00184	1.929,08	1.872,28
	Valori medi	0,20	0,20	0,04	0,04	0,00176	1.937,75	1.877,81
Calcare	SC1.1	0,20	0,20	0,05	0,04	0,00200	1.883,25	1.836,50
	SC1.2	0,20	0,20	0,0485	0,04	0,00194	1.890,46	1.847,94
	Valori medi	0,20	0,20	0,05	0,04	0,00197	1.886,86	1.842,22
Marna arenitica	SC2.2	0,20	0,20	0,0485	0,04	0,00194	2.417,27	2.439,43
	SC2.3	0,20	0,20	0,047	0,04	0,00188	2.423,94	2.476,33
	Valori medi	0,20	0,20	0,05	0,04	0,00	2.420,60	2.457,88
Arenaria arcossica	STE1	0,198	0,198	0,0485	0,04	0,00190	2.703,81	2.692,76
	STE3	0,20	0,20	0,05	0,04	0,00200	2.639,75	2.631,25
	Valori medi	0,20	0,20	0,05	0,04	0,00195	2.671,78	2.662,01
Gesso selenitico	G_2	0,2	0,198	0,051	0,04	0,00202	1.933,60	1.870,92
	G_3	0,2	0,205	0,049	0,04	0,00201	1.896,57	1.822,85
	Valori medi	0,20	0,20	0,05	0,04	0,00201	1.915,08	1.846,88

Tab. 4.4 Valori dimensionali e densità apparente relativi ai materiali testati in laboratorio.

Come già descritto, ogni prova prevede l'utilizzo di due provini dello stesso materiale lapideo. Infatti, la sonda viene interposta a contatto con i due provini, come specificato nelle Fig. 4.11, Fig. 4.12 e Fig. 4.13.

Per ricavare la conducibilità termica dei diversi materiali sono state svolte 6 prove valide per ogni materiale lapideo, per un totale di 60 misurazioni.

In Tab. 6 si riportano i risultati delle misure di conducibilità svolte per tutti i materiali in laboratorio; nello specifico vi sono: una colonna con la potenza espressa in W calibrata in funzione della densità del materiale; la percentuale di misura scartata; il coefficiente di correlazione; il colore del test che indica se la prova è ottimale (colore verde, V), buona (colore arancione, A), scadente (colore rosso, R); il valore della conducibilità termica di ogni prova ed infine il valore medio per ogni materiale.

I risultati ottenuti delle prove sono stati suddivisi in diverse tabelle in funzione del tipo di materiale lapideo (Tab. 6-7-8-9-10). All'interno di ogni tabella i valori di conducibilità termica sono stati confrontati con i valori indicati nelle diverse norme di riferimento, tra cui la UNI EN ISO 10456, la UNI EN ISO 1745 e la UNI 10351. I dati delle norme sono stati interpolati linearmente rispetto alla massa volumica apparente per poi essere confrontati (in termini percentuali) con i dati ottenuti in laboratorio; si specifica che la norma UNI EN ISO 1745 attribuisce dei valori di conducibilità costanti a determinati intervalli di densità, dunque non è stato possibile interpolare linearmente i dati.



Fig. 4.10 FP2C neotim.

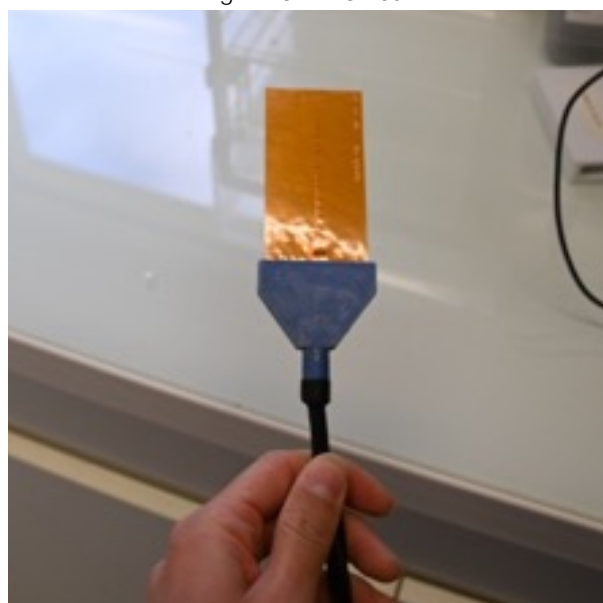


Fig. 4.11 Sonda a filo caldo FP2C neotim.



Fig. 4.12 Applicazione della sonda a filo caldo a contatto con i provini.



Fig. 4.13 Svolgimento della misura di conducibilità su provini di quarzarenite.

I valori ricavati per i calcari sono riportati in Tab. 4.6. La conducibilità λ ottenuta per il calcare di Scicli è pari a $0,985 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ con una densità apparente $\rho_{b,dry}$ pari a $1.842,22 \text{ kgm}^{-3}$. Per il calcare solfifero proveniente da Bompietro si ottiene una λ pari a $1,056 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e $\rho_{b,dry}$ pari a $1.877,81 \text{ kgm}^{-3}$. Il calcare proveniente da Comiso ha ottenuto una conducibilità pari a $1,586 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e una densità $2.332,5 \text{ kgm}^{-3}$. Infine, la marna arenitica di Scicli presenta una conducibilità λ pari a $1,96 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e $\rho_{b,dry}$ pari a $2.457,88 \text{ kgm}^{-3}$.

I valori di conducibilità termica dei calcari sono stati confrontati in primis con la UNI EN ISO 10456 tenendo in considerazione i materiali indicati con il nome di *limestone* (calcare). Il calcare di Scicli si discosta del +18,10%, il calcare solfifero di Bompietro del +15,22%, mentre il calcare di Comiso del +19,72% ed infine la marna arenitica del +6,47%. Da questo primo confronto si evince che la norma sovrastima i valori riportati sotto il nome "limestone" rispetto ai valori ottenuti in laboratorio. Il materiale che si discosta meno è la marna arenitica.

Ulteriori confronti sono stati effettuati con i *limestone* (calcari) riportati nella UNI EN ISO 1745. Qui le differenze risultano maggiori rispetto alla norma precedente, infatti variano da un massimo del +45,02% per il calcare di Comiso ad un minimo del +17,35% per la marna arenitica di Scicli.

Infine, l'ultimo confronto è stato effettuato con la UNI 10351 confrontando prima i valori riportati per i calcari e successivamente per i tufi. Anche qui le discrepanze aumentano in termini percentuali, si passa dal -56,18% per il calcare di Comiso, a +49,35% per il calcare di Scicli. La migliore corrispondenza dei valori si è ottenuta con i tufi presenti nella UNI 10351, dove i valori variano da -7% ad un massimo del +4%. Nonostante la netta corrispondenza, la norma più appropriata è la UNI EN ISO 10456 poichè fa riferimento in modo esplicito ai calcari, mentre nella UNI 10351 non vi è alcuna specifica in merito alle tipologie di roccia corrispondente ai tufi (vulcanici e non).

Materiale	N test	Potenza	Scarto	Coef. Correlaz.	Esito test	λ
		[W]	[%]			[Wm ⁻¹ K ⁻¹]
Quarzarenite	1	1,5	7	0,99817	A	4,520
	2	1,5	12	0,99844	A	4,408
	3	1,5	12	0,99842	A	4,313
	4	1,5	12	0,99844	A	4,570
	5	1,5	12	0,99784	A	4,357
	6	3	12	0,99749	A	4,569
Valori medi	/	/	/	/	/	4,456
Biocalcarenite	1	0,2	15	0,99777	A	0,346
	2	0,2	28	0,99966	V	0,354
	3	0,2	28	/	V	0,354
	4	0,25	29	0,99967	V	0,347
	5	0,23	28	0,99933	A	0,363
	6	0,28	19	0,99883	A	0,355
Valori medi	/	/	/	/	/	0,353
Calcare	1	1,5	41	0,99974	V	1,680
	2	1,5	18	0,99965	V	1,505
	3	1,5	20	0,99952	A	1,591
	4	1,5	20	0,99885	A	1,550
	5	1,5	12	0,99902	A	1,610
	6	1,5	12	0,99849	A	1,580
Valori medi	/	/	/	/	/	1,586
Travertino	1	1,52	20	0,99899	A	2,062
	2	1,52	20	0,99949	A	2,100
	3	1,52	12	0,99969	V	2,131
	4	1,52	7	/	A	2,130
	5	1	12	0,99843	A	1,906
	6	1,2	5	0,99900	A	2,010
Valori medi	/	/	/	/	/	2,057
Calcare Solfifero	1	1	28	0,99965	V	1,210
	2	1	4	0,99972	V	0,987
	3	1	6	0,99968	V	1,020
	4	1,2	11	0,99966	V	1,040
	5	1,2	5	0,99946	A	1,010
	6	1,2	12	0,99966	V	1,070
Valori medi	/	/	/	/	/	1,056
Calcare	1	1	49	/	V	1,015
	2	1	22	0,99966	V	0,948
	3	1	15	0,99940	A	0,945
	4	0,9	51	0,99967	V	1,030
	5	1	24	0,99968	V	0,991
	6	1	20	0,99926	A	0,979
Valori medi	/	/	/	/	/	0,985
Marna arenitica	1	1	5	0,99966	V	1,94
	2	1,2	6	0,99969	V	1,92
	3	1,5	10	0,99963	A	1,91
	4	1,2	10	0,99946	A	1,98
	5	1,2	11	0,99965	V	2,03
	6	1,2	10	0,99905	A	1,98
Valori medi	/	/	/	/	/	1,960
Arenaria arcosica	1	1,2	10	0,99952	A	2,58
	2	1,5	10	0,99921	A	2,69
	3	1,8	25	0,99965	V	2,91
	4	1,8	15	0,99908	A	2,91
	5	1,7	15		A	2,863
	6	1,8	16	0,99967	V	2,79
Valori medi	/	/	/	/	/	2,791
Gesso selenitico	1	0,5	12	0,99972	V	0,757
	2	0,5	12	0,99971	V	0,767
	3	0,5	19	0,99965	V	0,820
	4	0,5	15	0,99967	V	0,803
	5	0,5	16	0,99961	A	0,774
	6	0,5	15	0,99918	A	0,790
Valori medi	/	/	/	/	/	0,785

Tab. 4.5 Test di conducibilità termica dei materiali testati nel laboratorio GSA ENSA Paris-Malaquais.

Materiale		Calcare	Calcare solifero	Calcare	Marna arenitica
Provenienza		Scicli 1 (RG)	Bompietro (PA)	Comiso (RG)	Scicli 2 (RG)
$\rho_{b, dry}$	$[kg \cdot m^{-3}]$	1.842,22	1.877,81	2.332,5	2.457,88
λ_{mis}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	0,985	1,056	1,586	1,960
UNI EN ISO 10456 - Limestone		soft/semi hard	soft/semi hard	hard/extra hard	hard/extra hard
$\lambda_{inter10456}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	1,163	1,217	1,899	2,087
$(\lambda_{inter10456} - \lambda_{mis}) / \lambda_{mis}$	[-]	+18,10%	+15,22%	+19,72%	+6,47%
UNI EN ISO 1745 - Limestone		compact stone	compact stone	very hard rock	very hard rock
$\lambda_{inter1745}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	1,4	1,4	2,3	2,3
$(\lambda_{inter1745} - \lambda_{mis}) / \lambda_{mis}$	[-]	+42,13%	+32,58%	+45,02%	+17,35%
UNI 10351 - Calcare					
$\lambda_{inter10351}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	1,471	1,489	0,695	1,447
$(\lambda_{inter1745} - \lambda_{mis}) / \lambda_{mis}$	[-]	+49,35%	+40,99%	-56,18%	-26,16%
UNI 10351 - Tufi					
$\lambda_{inter10351}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	1,019	1,065	1,656	1,819
$(\lambda_{inter10351} - \lambda_{mis}) / \lambda_{mis}$	[-]	+3%	+1%	+4%	-7%

Tab. 4.6 Valori di conducibilità termica dei materiali ricavati in lab. e confrontati con i dati presenti nelle norme tecniche di riferimento.

Materiale		Gesso selenitico
Provenienza		Sutera (CL)
$\rho_{b, dry}$	$[kg \cdot m^{-3}]$	1.846,88
λ_{mis}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	0,785
UNI EN ISO 10456 - Gypsum		
$\lambda_{inter10456}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	0,649
$(\lambda_{inter10456} - \lambda_{mis}) / \lambda_{mis}$	[-]	-17,36%

Tab. 4.7 Valori di conducibilità termica del gesso selenitico ricavati in lab. e confrontati con la norma UNI EN ISO 10456.

Ulteriore valore di conducibilità termica si è ottenuto per il gesso selenitico proveniente da Sutera (CL) (Tab. 4.7). La λ è pari a $0,785 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e $\rho_{b, dry}$ $1.846,88 \text{ kgm}^{-3}$. Gli unici valori riferiti al gesso presenti nella normativa tecnica sono stati riscontrati nella UNI EN ISO 10456 sotto il nome di *Gypsum*. Il confronto con tale norma mostra una discrepanza pari al -17,36%, che indica una sottostima del valore da parte dei legislatori.

Il travertino proveniente da Alcamo (TP) mostra una conducibilità termica λ pari a $2,057 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e una densità apparente $\rho_{b, dry}$ pari a $2.500,25 \text{ kgm}^{-3}$ (Tab. 4.8).

Anche questa volta la norma utilizzata per il confronto è la UNI EN ISO 10456 confrontando i valori sotto il nome di *Natural, sedimentary rock*. Il confronto con tale norma mostra una buona corrispondenza pari al +3,21%.

Per quanto riguarda la biocalcarenite proveniente da Palermo (Tab. 4.9), si sono ottenuti dei risultati sulla conducibilità termica λ pari a $0,353 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ e $\rho_{b, dry}$ pari a $1.246,46 \text{ kgm}^{-3}$. In questo caso la conducibilità è stata confrontata con la UNI ISO 10456 due volte, tenendo in considerazione *limestone extra soft* e *natural sedimentary rock*. Con il primo materiale si ottiene una buona corrispondenza pari al -2,05%, mentre confrontando con il secondo materiale si ottiene una differenza notevole pari al +39,69%.

Infine, i risultati ottenuti per le arenarie sono riportati in (Tab. 4.10) e sono stati confrontati con la norma UNI EN ISO 1745.

La quarzarenite proveniente da Mistretta ha una conducibilità termica λ pari a $4,445$

Materiale		Travertino
Provenienza		Alcamo (TP)
$\rho_{b, dry}$	$[kg \cdot m^{-3}]$	2.500,25
λ_{mis}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	2,057
UNI EN ISO 10456 – Natural, sedimentary rock		
$\lambda_{inter10456}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	2,123
$(\lambda_{inter10456} - \lambda_{mis}) / \lambda_{mis}$	[-]	+3,21%

Tab. 4.8 Valori di conducibilità termica del travertino ricavati in lab. e confrontati con i dati presenti nelle norme di riferimento.

Materiale		Biocalcarenite
Provenienza		Palermo (PA)
$\rho_{b, dry}$	$[kg \cdot m^{-3}]$	1.246,46
λ_{mis}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	0,353
UNI EN ISO 10456 – Limestone extra soft		
$\lambda_{inter10456}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	0,346
$(\lambda_{inter10456} - \lambda_{mis}) / \lambda_{mis}$	[-]	-2,05%
UNI EN ISO 10456 – Natural, sedimentary rock		
$\lambda_{inter10456}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	0,493
$(\lambda_{inter10456} - \lambda_{mis}) / \lambda_{mis}$	[-]	+39,69%

Tab. 4.9 Valori di conducibilità termica della biocalcarenite ricavati in lab. e confrontati con i dati presenti nelle norme di riferimento.

Materiale		Quarzarenite	Arenaria Arcosica
Provenienza		Mistretta (ME)	Santo Stef. Di Camastra (ME)
$\rho_{b, dry}$	$[kg \cdot m^{-3}]$	2.494,98	2.662,01
λ_{mis}	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	4,445	2,791
UNI EN ISO 1745 - Sandstone		Quartz	Siliceous
$\lambda_{inter1745}$	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	2,6	2,3
$(\lambda_{inter1745} - \lambda_{mis}) / \lambda_{mis}$	[-]	-41,51%	-17,59%

Tab. 4.10 Valori di conducibilità termica della quarzarenite e dell'arenaria arcossica ricavati in lab. e confrontati con i dati presenti nelle norme di riferimento.

$Wm^{-1}K^{-1}$ e una densità apparente $\rho_{b, dry}$ pari a 2.494,98 kgm^{-3} . In questo caso la differenza tra la conducibilità misurata e la norma è notevole, vi è una differenza del -41,51%.

Per quanto riguarda l'arenaria arcossica proveniente da Santo Stefano di Camastra (ME), la λ come da misura è pari a 2,791 $Wm^{-1}K^{-1}$ e $\rho_{b, dry}$ è pari a 2.662,01 kgm^{-3} . Anche qui il confronto tra i valori riporta una discrepanza pari al -17,59%.

Si specifica che la norma UNI EN ISO 1745 riporta un unico valore per un intervallo ampio di densità apparente, ciò limita la possibilità di interpolare linearmente i dati e genera di fatto un grafico a scaletta.

I dati presenti nella letteratura scientifica e nella normativa di riferimento consentono di avere informazioni generali sulle proprietà termofisiche dei materiali lapidei naturali. Questi dati sono sicuramente utili per una stima complessiva delle prestazioni delle murature e dunque dell'edificio, ma risultano poco adeguati ad un'analisi energetica dettagliata.

Collezionare in un database tutti i dati sperimentali ottenuti, sia sui materiali testati in laboratorio che sulle murature tramite prove in-situ, consentirebbe di ridurre le discrepanze ottenute tra le misure e i calcoli termici; inoltre permetterebbe un'analisi energetica più attendibile, e di conseguenza, favorirebbe un recupero energetico degli edifici storici compatibile con i materiali della costruzione.

I dati ottenuti mostrano una buona corrispondenza con le norme di riferimento per alcuni materiali e alcune discrepanze, anche notevoli, in altrettanti materiali, da cui deriva la necessità di aumentare il numero di prove su campioni lapidei. Questo consentirebbe di fornire valori più adeguati ai diversi litotipi utilizzati come materiale da costruzione. Inoltre, far confluire le prove effettuate dai diversi professionisti in un unico repertorio accessibile a tutti potrebbe consentire modellazioni sensibilmente più accurate.

Il processo di svolgimento delle prove è complesso e poco accessibile, anche in termini economici, e di fatto pochi sono pochi i casi in cui si possono eseguire indagini accurate e dettagliate sull'edificio.

4.3 PROVE DI CONDUTTANZA TERMICA IN OPERA

Per ampliare il repertorio sulle proprietà termiche delle murature storiche in ambito siciliano, sono state svolte alcune misure in opera di conduttanza termica nei Comuni di: Bompietro, Petralia Sottana, Geraci Siculo e Mistretta. Le prove svolte hanno consentito di indagare dettagliatamente murature realizzate in quarzarenite, calcarenite e calcare solfifero.

Le prove termo-fisiche sono state eseguite in conformità alla norma tecnica di riferimento (UNI ISO 9869-1:2015) "Elementi per l'edilizia - Misurazione in situ della resistenza termica e della trasmittanza termica." La norma descrive il metodo del termoflussimetro per la misurazione delle proprietà di trasmissione termica dei componenti piani degli edifici costituiti principalmente da strati opachi perpendicolari al flusso termico e non sottoposti a flussi di calore laterali e a effetti di bordo. Le proprietà che possono essere calcolate sono:

- la resistenza termica R [m^2KW^{-1}] e la conduttanza termica Λ [$Wm^{-2}K^{-1}$], se si misurano le temperature delle due superfici che delimitano il componente;
- la resistenza termica totale R_T e la trasmittanza termica U [$Wm^{-2}K^{-1}$] se si rilevano le temperature dell'aria dei due ambienti delimitati dalle superfici del componente esaminato.

Genericamente il sistema di monitoraggio è composto da un *datalogger* che memorizza le misurazioni cicliche rilevate dei sensori (temperature e flusso termico), che sono collegati tramite cavi al datalogger. Le termocoppie (sensori di temperatura) sono dei trasduttori di temperatura basati sulle proprietà di alcuni materiali metallici di generare una forza elettromotrice se sottoposti a determinate condizioni di temperature sul proprio dominio fisico (effetto *Seebeck*). Il termoflussimetro (sensore del flusso termico) è un trasduttore che fornisce un segnale elettrico, in funzione diretta del flusso di calore che lo attraversa. Le proprietà essenziali di entrambi i sensori sono la bassa resistenza termica - al fine di minimizzare gli effetti perturbativi - e un'elevata sensibilità.

Generalmente i sensori vengono applicati a parete utilizzando una pasta termica, il nastro adesivo di carta o la resina epossidica. In quest'ultimo caso però il sensore si danneggia in fase di rimozione e non può essere più riutilizzato. La scelta del sistema di applicazione è influenzata dalla durata complessiva della misura e dalla possibilità di verificare frequentemente i sensori applicati in opera, ma anche dalle esigenze di

conservazione della superficie.

Tramite i sensori applicati si possono acquisire le misure di: temperatura di parete interna ($T_{p,in}$) ed esterna ($T_{p,ext}$), temperatura dell'aria interna ($T_{a,in}$) ed esterna ($T_{a,ext}$), flusso termico sulla superficie della parete interna (q). I sensori di temperatura superficiali consentono di ricavare la conduttanza termica di parete; mentre, i sensori di temperatura dell'aria permettono di ricavare la trasmittanza termica.

La UNI ISO 9869-1:2015 definisce: l'apparato di misura, la procedura di calibrazione, la modalità di svolgimento della prova in opera, la modalità di analisi dei dati ed infine il metodo per la stima dell'errore.

Tra i criteri più importanti, presenti nella norma, per ottenere un calcolo stabile del valore di Λ è opportuno stabilire le condizioni di acquisizione dei dati, tra cui: la differenza di temperatura tra l'aria dell'ambiente interno rispetto a quello esterno deve essere sufficientemente elevata, la prassi tecnico-scientifica prevede un differenziale di temperatura medio pari a 20 K; è opportuno evitare o minimizzare qualsiasi fluttuazione di temperatura (per es. fra giorno e notte) durante tutto il periodo di misurazione; infine, la durata della prova deve avere un periodo sufficientemente lungo (minimo 72h).

La scelta del punto di misura in opera per lo svolgimento della prova deve essere accurata poiché diversi fattori possono influenzare i risultati.

L'analisi preliminare svolta con la termocamera permette di indagare le pareti sfruttando la tecnologia ad infrarossi, supportando l'operatore nell'individuazione del punto di misura (Fig. 4.14 - Fig. 4.15). Per l'applicazione dei sensori sulle murature storiche, utile ai fini della presente ricerca, vanno rispettate alcune condizioni, tra cui: il paramento murario esterno sia a vista (per determinare il tipo di muratura indagata); l'esposizione del muro sia a Nord (per limitare l'effetto dell'irraggiamento solare); lo strato di finitura interna abbia una superficie liscia (per consentire un'adeguata adesione della piastra flussimetrica alla superficie); non vi siano effetti perturbativi come sorgenti di calore nella vicinanza della strumentazione o ponti termici; l'ambiente interno sia riscaldato con una temperatura media costante; non sia presente isolamento termico sulle pareti oggetto di studio; la presenza di persone all'interno dell'ambiente sia limitata e l'attività svolta negli ambienti non sia di disturbo alla misurazione.

Le murature di tipo tradizionale necessitano di un numero maggiore di prove ripetute su più porzioni di muratura per limitare la variabilità costruttiva della stessa e per ricavare risultati più attendibili.

Tutti i parametri sopra elencati rendono l'applicazione della strumentazione di difficile impiego e limita molto lo svolgimento delle prove in situ. Inoltre, le prove devono essere svolte nella stagione invernale, per garantire una rilevante differenza di temperatura tra l'ambiente interno e quello esterno senza marcate fluttuazioni giornaliere.



Fig. 4.14 Fotografia reale di una muratura

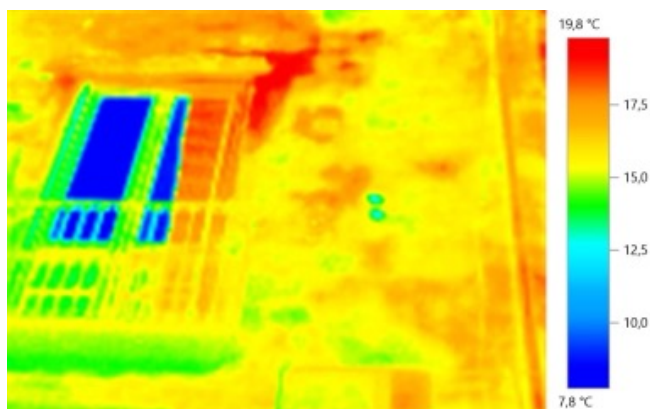


Fig. 4.15 Fotografia termica corrispondente della muratura

Generalmente attraverso il *datalogger* è possibile impostare la durata complessiva della prova e l'intervallo temporale tra una misura e l'altra.

A fine prova, i dati acquisiti in opera sul datalogger vanno scaricati sul dispositivo per l'elaborazione.

La fase successiva è l'elaborazione dei dati per ricavare le grandezze volute (Λ, U), utilizzando il metodo delle medie progressive disponibile nella norma UNI ISO 9869-1:2015.

La validità della prova va verificata secondo la stessa norma.

Nella ricerca sviluppata sono stati utilizzati due strumenti differenti per la rilevazione dei parametri sperimentali in opera. Il primo sistema di monitoraggio è composto da:

- datalogger ALMEMO 2690-8° Ahlborn (Fig. 4.16) tramite il quale sono stati raccolti e memorizzati le misure rilevate dai sensori;
- sensori di misura della temperatura superficiale: termocoppie di tipo T (accuratezza standard: $\pm 1^\circ\text{C}$);
- sensore di misura del flusso termico: piastra termoflussimetrica Ahlborn FQA019C (accuratezza: 5% del valore misurato).

Il secondo sistema di monitoraggio è composto da:

- datalogger wireless HFM Extratech (Fig. 4.17);
- sonde di temperature superficiale PT1000 di classe A, con un range di misura da -20°C a $+150^\circ\text{C}$ ($\pm 15\%$ IEC 751);
- sonda di flusso con sensibilità (nominale) $50 \mu\text{V W}^{-1}\text{m}^{-2}$, *range* operativo da -30°C a $+70^\circ\text{C}$, resistenza termica del sensore: $< 6.25 \cdot 10^{-3} \text{ Km}^2 \text{ W}^{-1}$, range da $+2000$ a -2000 Wm^2 .

La differenza tra i due sistemi deriva dalla fase di installazione dei sensori, ed è funzionale alla necessità di avere un vano di apertura nei pressi del punto di misura o meno. Infatti, il sistema *Ahlborn* utilizza un unico datalogger per memorizzare le temperature interne ed esterne, tramite i sensori collegati via cavo; ciò implica la necessità di un'apertura in



Fig. 4.16 Sistema di monitoraggio Almemo Ahlborn



Fig. 4.17 Sistema di monitoraggio HFM Extratech

presenza del punto di prova, per consentire il passaggio della strumentazione. Mentre il secondo sistema di monitoraggio è costituito da due moduli bluetooth che vanno collocati rispettivamente all'interno e all'esterno; questo di fatto semplifica l'installazione dei sensori anche laddove non ci siano aperture.

In Fig. 4.18, Fig. 4.19 si mostrano i due schemi di monitoraggio con i punti di applicazione dei sensori sopra indicati.

4.3.1 Casi di studio

Le murature indagate si trovano nei Comuni di Petralia Sottana, Geraci e Mistretta accomunate dalla presenza di quarzarenite, e di Bompietro per il calcare. I tipi di muratura indagata sono SM1, SM2, SM3. Le prove sono state svolte utilizzando entrambe le strumentazioni disponibili.

Le criticità riscontrate nell'applicazione dei sensori si sono rivelate significative. Molte di esse derivano dall'impossibilità di rispettare integralmente le condizioni sperimentali necessarie per il corretto svolgimento delle misurazioni previste nella normativa di riferimento. In particolare, risulta difficile garantire una differenza di temperatura adeguata tra l'ambiente interno ed esterno; inoltre, numerose abitazioni in muratura situate nei centri storici risultano disabitate (quindi in assenza di impianto di riscaldamento funzionante), mentre quelle occupate spesso sono state oggetto di interventi di riqualificazione energetica (installazione di isolamento termico sulle pareti). Un'ulteriore problematica riguarda l'orientamento delle superfici murarie, che dovrebbero idealmente essere esposte a nord o mantenute in ombra per l'intera durata della misura in opera. Ancora, si riscontra frequentemente la presenza di fattori perturbativi, come dispositivi di riscaldamento localizzati in prossimità dei punti di misura. A complicare ulteriormente la situazione vi è la disponibilità limitata dei proprietari a consentire l'installazione della strumentazione. Tali vincoli hanno significativamente inciso sullo svolgimento delle prove sperimentali.

Gli edifici individuati come caso di studio sono quelli che hanno rispettato tutte le condizioni sperimentali per l'applicazione dei sensori. Le prove svolte sono elencate in Tab. 4.11, nella quale si riportano le coordinate GPS dell'edificio.

Le misure svolte hanno avuto una durata minima di 14 giorni e massima di 50 giorni. Nella presente ricerca l'applicazione dei sensori sulla superficie interna della parete

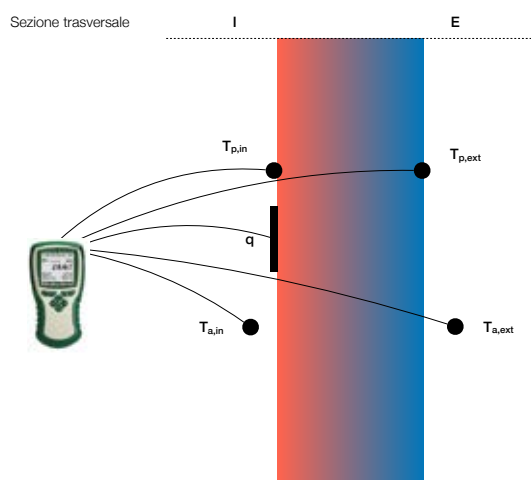


Fig. 4.18 Schema applicazione sensori a parete per la misurazione in situ delle temperature di parete e del flusso termico con Datalogger Almemo

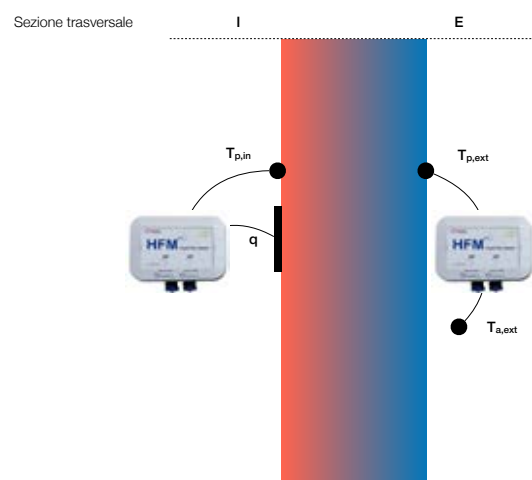


Fig. 4.19 Schema applicazione sensori a parete per la misurazione in situ delle temperature di parete e del flusso termico con Datalogger Extra Tech.

Luogo	Coordinate Edificio	Materiale	Data inizio	Data fine	Durata in giorni	Strumento
Petralia Sottana	37,80568 ° N, 14,09223 ° E	quarzarenite	04/02/22	26/02/22	22	Datalogger Almemo Ahlborn
Bompietro	37,74476 ° N, 14,09241 ° E	calcare solfifero	11/07/22	25/07/22	14	Datalogger Almemo Ahlborn
Petralia Sottana	37,80767° N, 14,09286 ° E	calcarenite	22/10/22	11/12/22	50	Datalogger Extra tech Datalogger Almemo Ahlborn
Geraci	37,85547 ° N, 14,15368 ° E	quarzarenite	16/01/23	06/02/23	21	Datalogger Almemo Ahlborn
Mistretta	37,92790° N, 14,36174° E	quarzarenite	04/03/24	04/04/24	31	Datalogger Extra tech

Tab. 4.11 Prove svolte in situ per la misurazione delle temperature e del flusso termico.

perimetrale è stata effettuata mediante l'utilizzo di nastro adesivo in carta, mentre i sensori sulla superficie esterna sono stati applicati impiegando un sottile velo di pasta di gesso. Quest'ultimo metodo, adottato con successo in alcune misure precedenti a quelle esposte nella presente ricerca, consente di far aderire rapidamente la termocoppia alla superficie ruvida del paramento, e non influenza lo svolgimento della prova stessa. I sensori di temperatura, con entrambe le strumentazioni, sono stati applicati sulle superfici del muro (interna ed esterna), al fine di ricavare la conduttanza termica di parete. Nonostante questa scelta limiti parzialmente i dati misurati e di conseguenza la possibilità di ricavare la trasmittanza termica, si ritiene che la scelta di rilevare esclusivamente le temperature di parete vada a vantaggio di sicurezza per la buona riuscita della prova; in alcune circostanze potrebbe capitare che uno o più sensori si stacchino involontariamente dalla parete invalidando la prova stessa.

Tutte le misure sono state effettuate impostando un ciclo di misura con un intervallo di 5 minuti.

4.3.2 Risultati

I risultati ottenuti sono stati elaborati tramite foglio di calcolo utilizzando il metodo delle medie progressive descritto nella norma di riferimento.

Si riportano di seguito i risultati e le elaborazioni grafiche di ogni misura.

La prima misura è stata effettuata presso un'abitazione privata a Petralia Sottana. I sensori sono stati applicati su un muro spesso 61 cm all'interno presenta una finitura ad intonaco (Fig. 4.20) sul lato esterno elementi di dimensioni variabili disposti in maniera caotica (Fig. 4.21); la muratura è stata classificata di tipo SM3. L'esposizione del muro è a sud, ma risulta ombreggiato dall'edificio adiacente durante tutto il giorno, una condizione necessaria per limitare l'influenza della radiazione solare. Il test ha avuto una durata di 24 giorni con 6.208 misurazioni effettuate con un intervallo di cinque minuti. In Fig. 4.22 è possibile valutare l'andamento delle temperature durante lo svolgimento della prova.

In Fig. 4.23 si riporta l'andamento del flusso termico misurato durante la prova, mentre in Fig. 4.24 è possibile valutare il valore della conduttanza termica, ottenuto elaborando i dati di misurazione e utilizzando il metodo delle medie progressive, come descritto nella norma UNI ISO 9869-1:2015. La conduttanza calcolata ha un valore pari a $1,8 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

La seconda misurazione è stata effettuata a Bompietro, su una muratura regolare (SM1) in calcare con uno spessore di 53 cm. L'analisi termografica preliminare non ha mostrato differenze significative fra i due punti di misura contigui.

Entrambe le strumentazioni (*Almemo*, *HFM Extratech*) sono state collocate in opera sulla stessa porzione di muratura (Fig. 4.25, Fig. 4.26) con l'obiettivo di confrontare e valutare l'effettivo funzionamento della strumentazione a parità di condizioni (ambientali, strutturali, costruttive).



Fig. 4.20 Applicazione dei sensori nella parete interna del muro a Petralia Sottana.



Fig. 4.21 Porzione muratura esterna a Petralia Sottana.

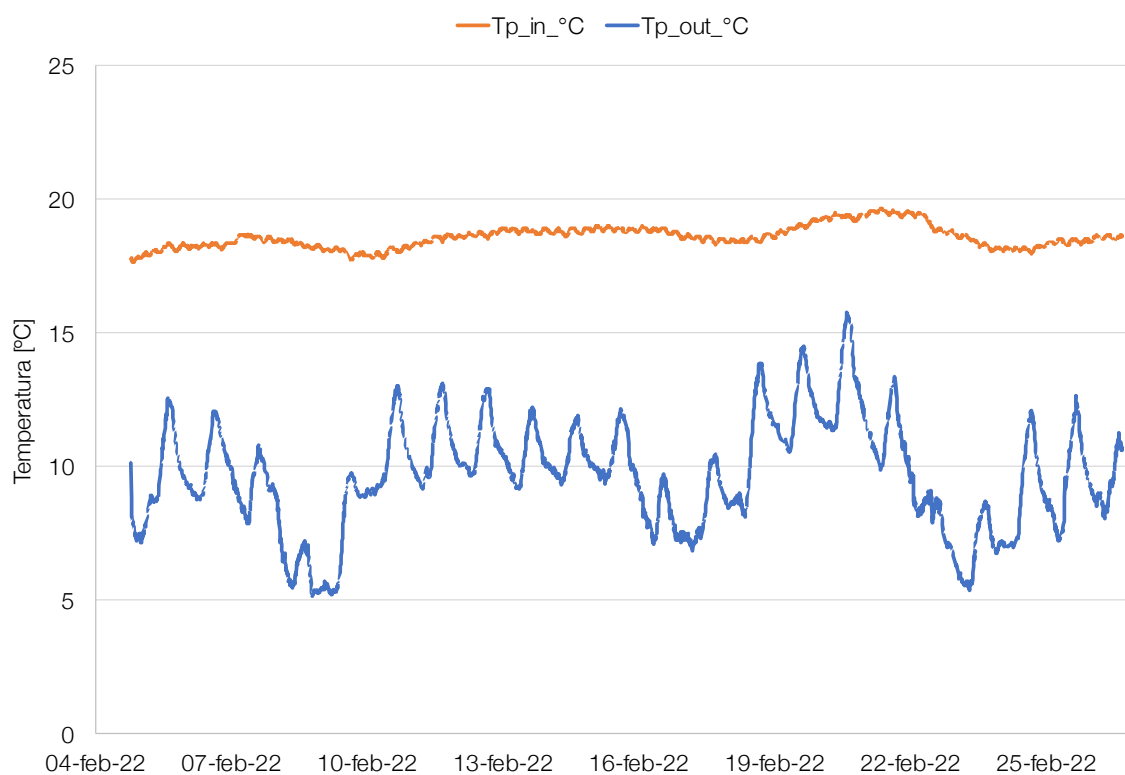


Fig. 4.22 Andamento delle temperature durante lo svolgimento della prova a Petralia Sottana.

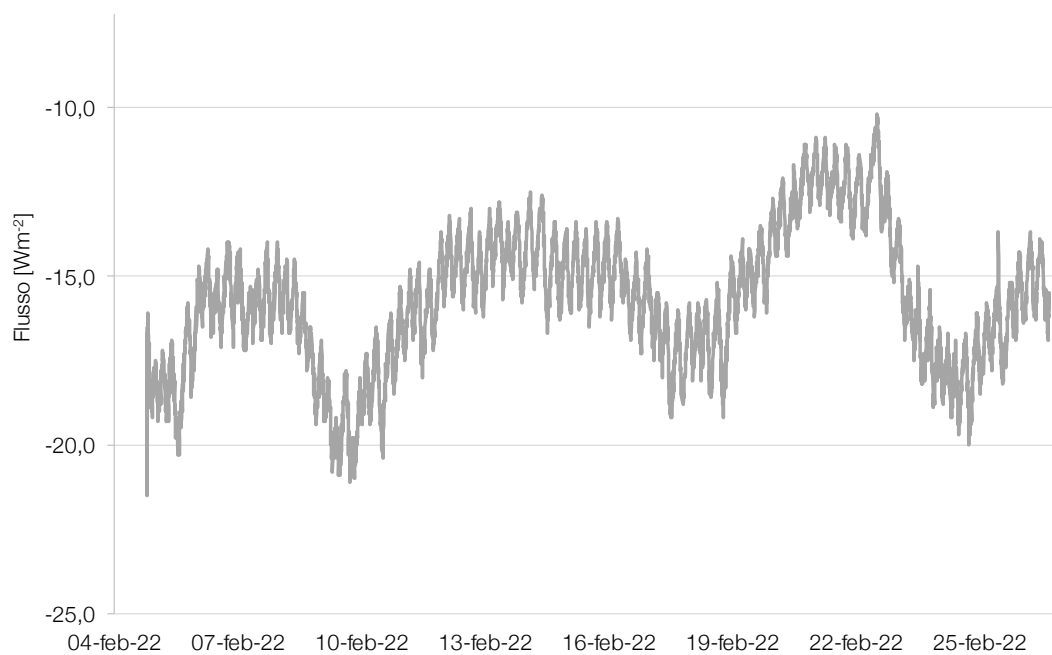


Fig. 4.23 Andamento del flusso termico durante lo svolgimento della prova a Petralia Sottana.

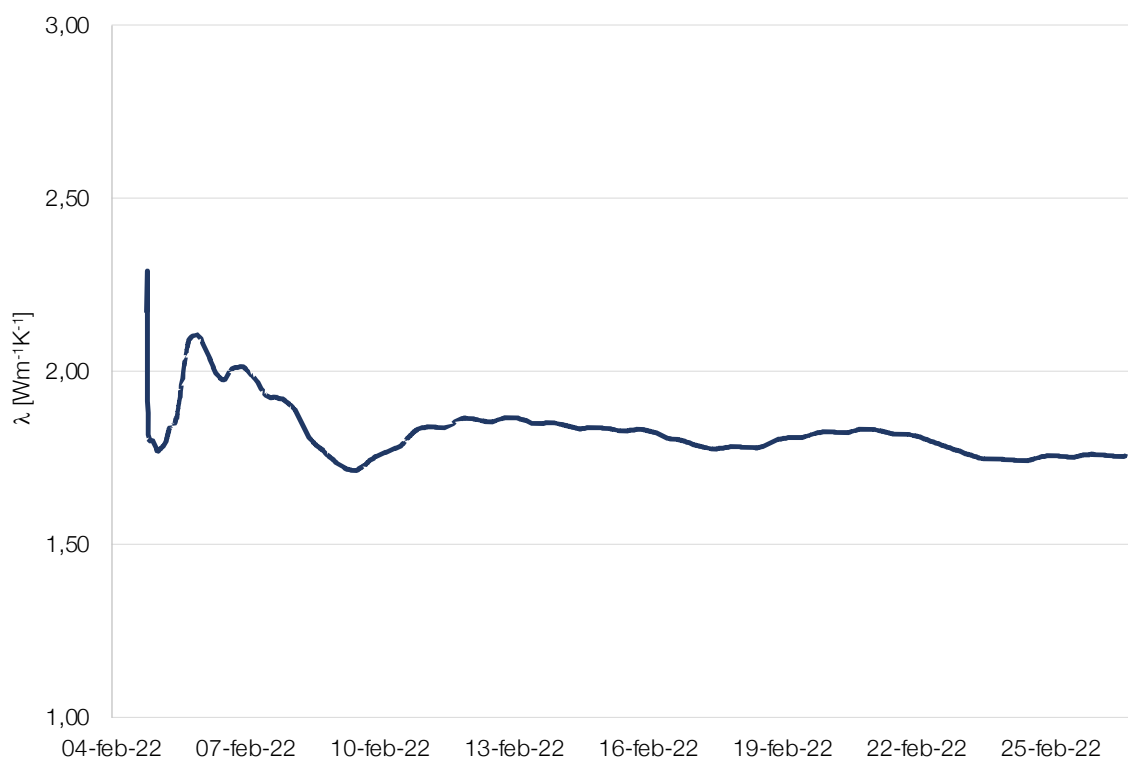


Fig. 4.24 Conduttanza termica ricavata con il metodo delle medie progressive a Petralia Sottana.

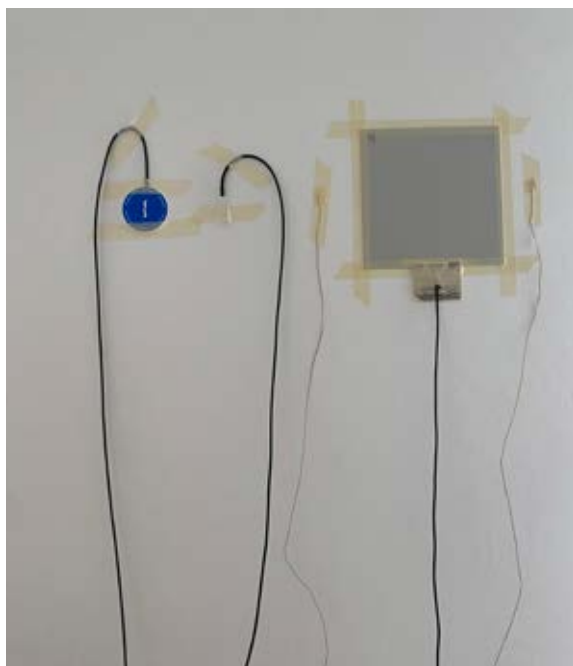


Fig. 4.25 Applicazione a parete interna dei sensori Almemo ed Extra Tech a Bompietro.



Fig. 4.26 Applicazione a parete esterna dei sensori Almemo ed Extra Tech a Bompietro.

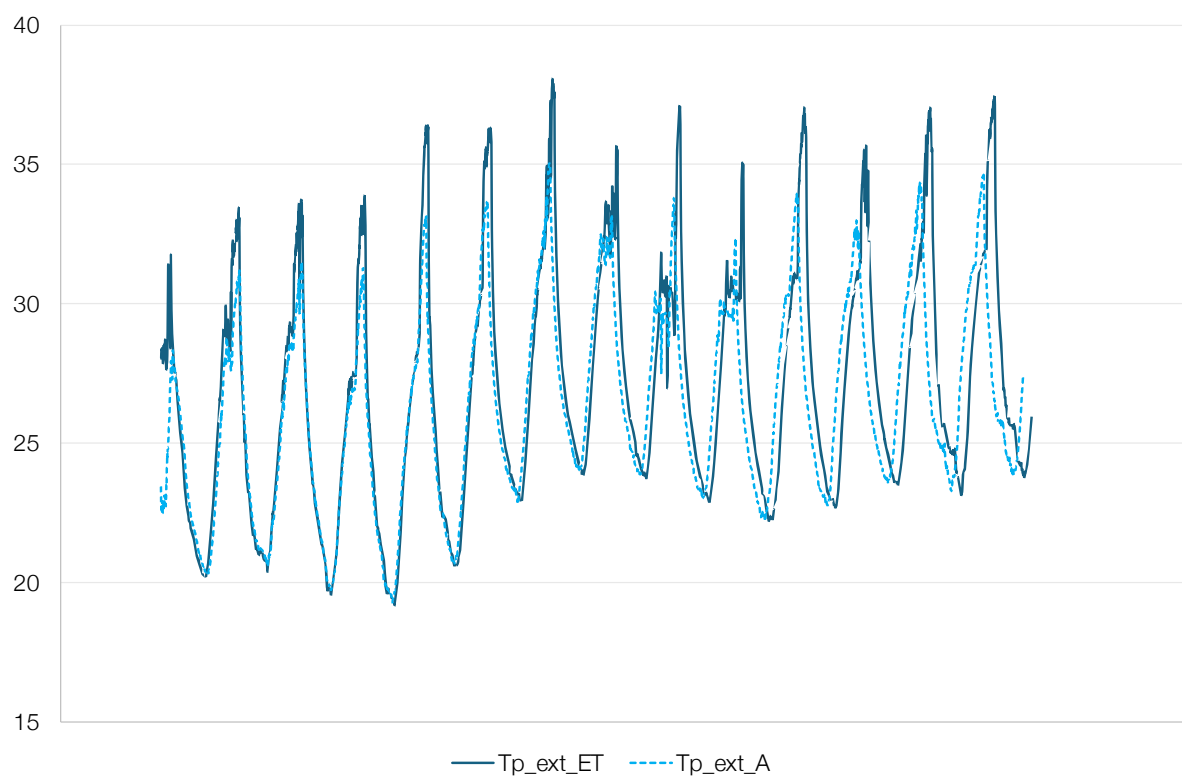


Fig. 4.27 Confronto tra le temperature esterne misurate con due strumentazioni (Almemo – ExtraTech).

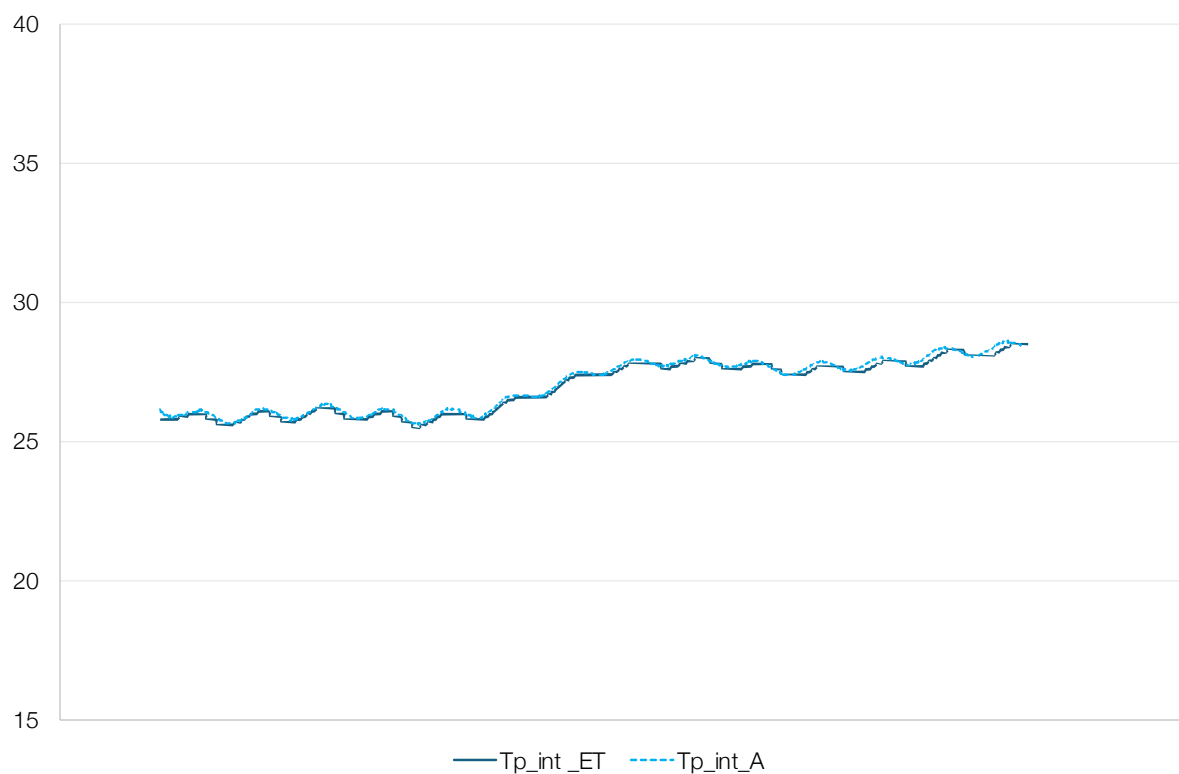


Fig. 4.28 Confronto tra le temperature interne misurate con due strumentazioni (Almemo – ExtraTech).

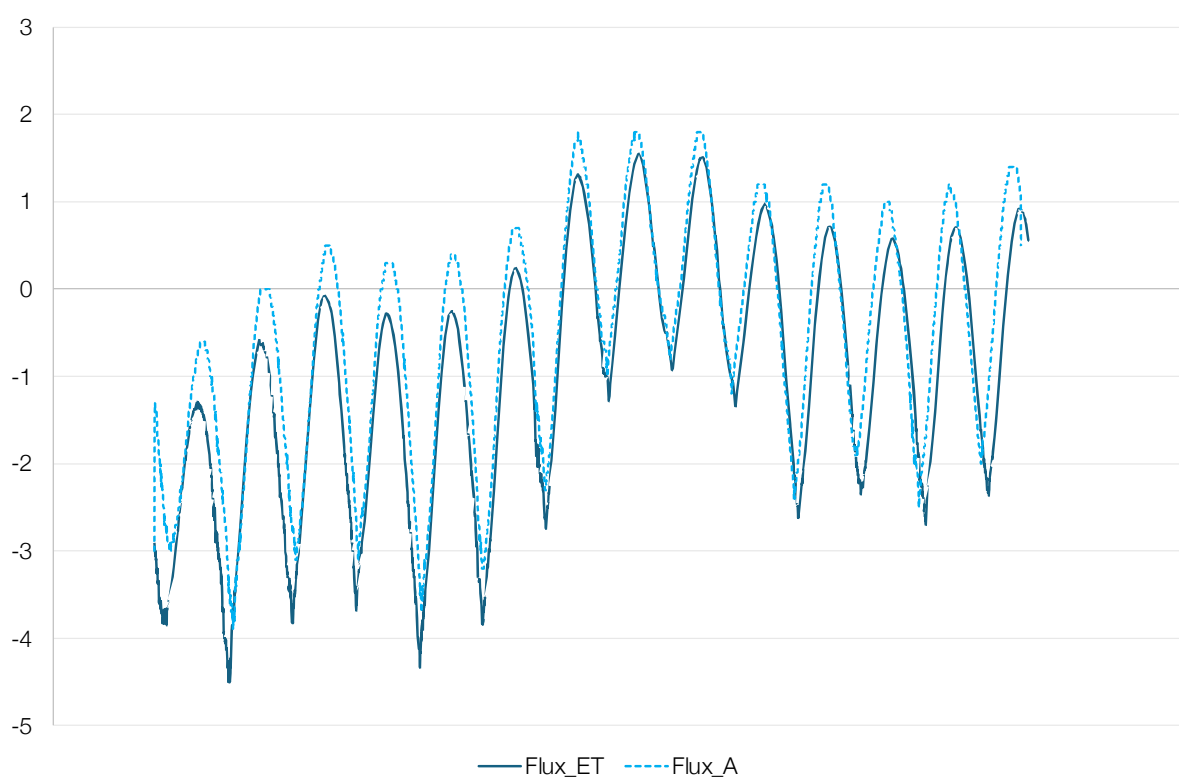


Fig. 4.29 Confronto tra i flussi termici misurati con due strumentazioni (Almemo – ExtraTech).

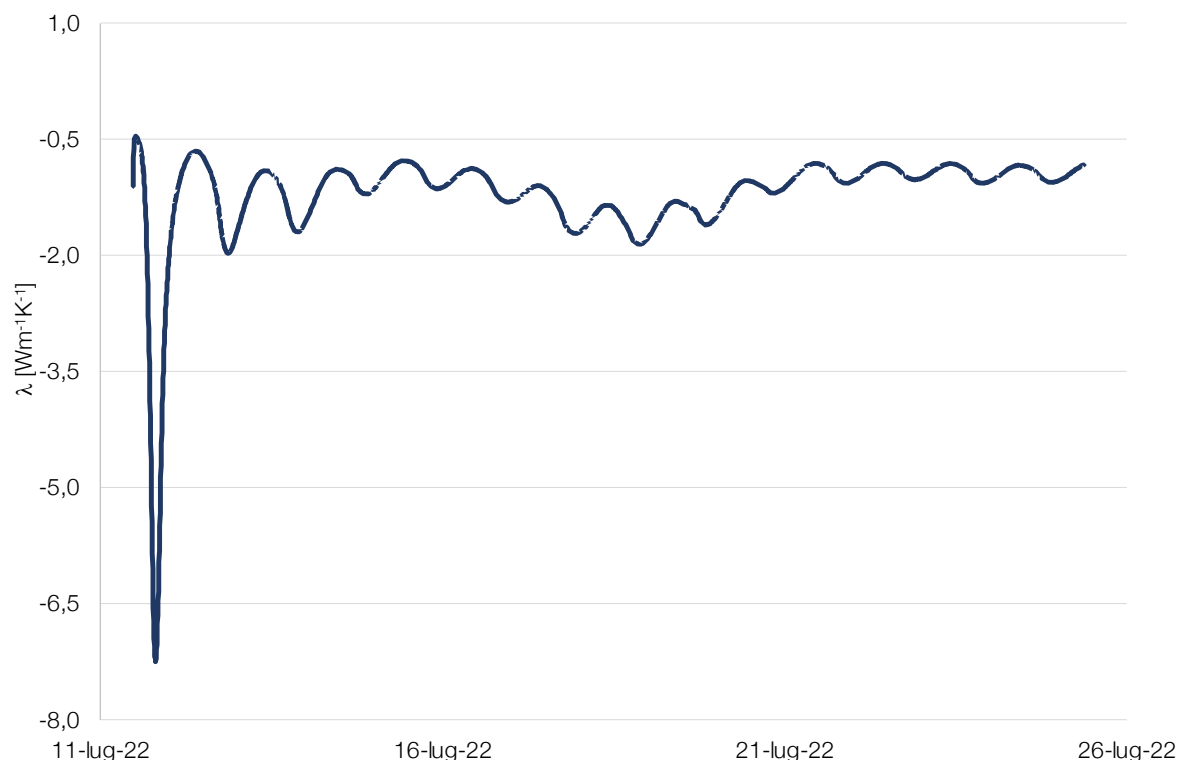


Fig. 4.30 Conduttanza calcolata con il metodo delle medie progressive.

Sono state confrontate le temperature misurate esternamente (Fig. 4.27) ed internamente (Fig. 4.28), e il flusso termico (Fig. 4.29). Tale analisi ha permesso di confrontare la strumentazione usata per le misure in opera, senza riportare discrepanze sostanziali nelle rilevazioni.

Dalle misurazioni effettuate è stato possibile calcolare con il metodo delle medie progressive il valore della conduttanza pari circa a $1,4 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (Fig. 4.30).

Il terzo test è stato condotto a Petralia Sottana su una muratura spessa 73 cm di tipo SM2.1, realizzata in calcarenite. Il lato esterno del muro mostra la muratura a faccia vista, mentre il lato interno risulta intonacato. Il muro è esposto a nord-est ed è ombreggiato durante tutta la giornata.

Nella superficie interna i sensori sono stati applicati utilizzando uno strato di nastro di carta adesiva (Fig. 4.31), mentre sul lato esterno è stato utilizzato uno strato sottile di pasta di gesso per applicare le termocoppie sulla superficie del muro (Fig. 4.32). Il test è iniziato il 22 ottobre e si è concluso l'11 dicembre 2022 con 14.188 misurazioni effettuate a intervalli di cinque minuti. Il valore della conduttanza termica, ottenuto dai dati di misurazione utilizzando il metodo delle medie progressive come descritto nella norma UNI ISO 9869-1:2015, è di $1,0 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

In Fig. 4.33 si riporta l'andamento delle temperature registrate durante la prova in situ dal quale si evince che la variazione di temperatura tra interno ed esterno si mantiene in media superiore agli 8K, anche se nel primo periodo di misura risulta inferiore. In Fig. 4.34 si riporta il flusso termico ed infine in Fig. 4.35 si riporta il grafico della conduttanza termica, ottenuto con il metodo delle medie progressive.



Fig. 4.31 Applicazione dei sensori all'interno del muro di tipo SM2.1 a Petralia Sottana.



Fig. 4.32 Muratura esterna di tipo SM2.1 a Petralia Sottana.

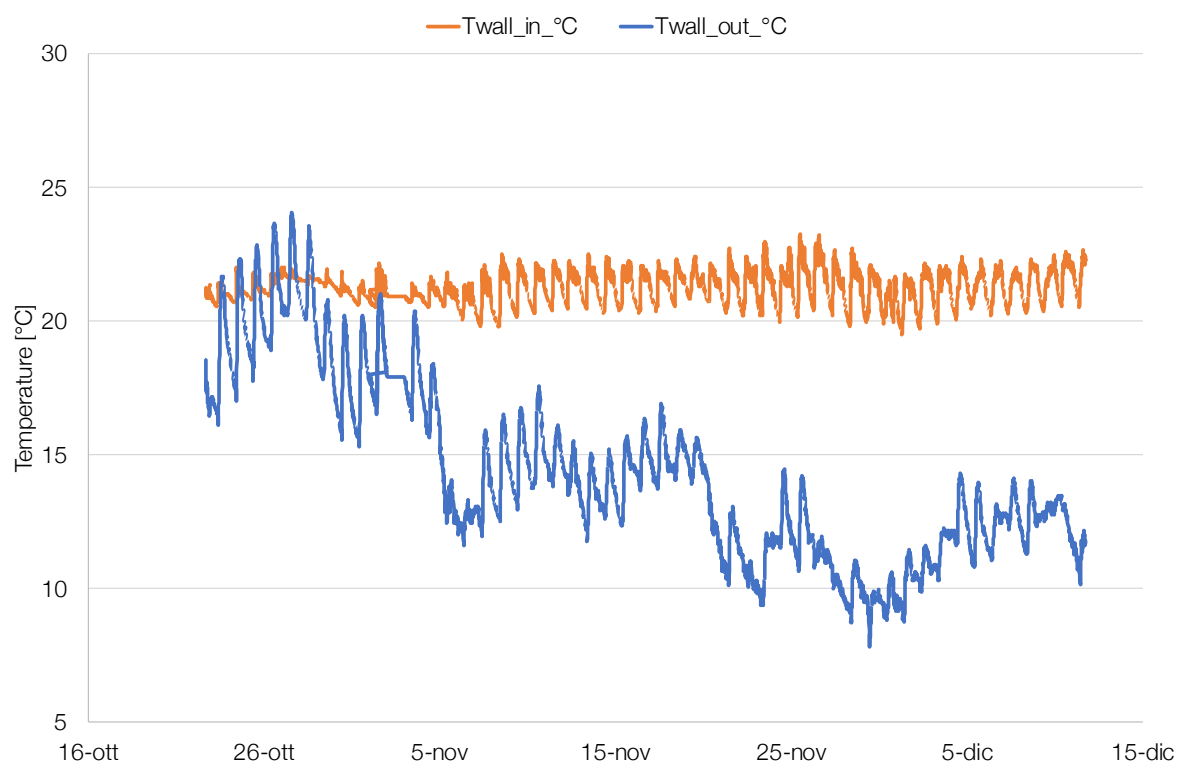


Fig. 4.33 Andamento delle temperature durante lo svolgimento della prova a Petralia Sottana.

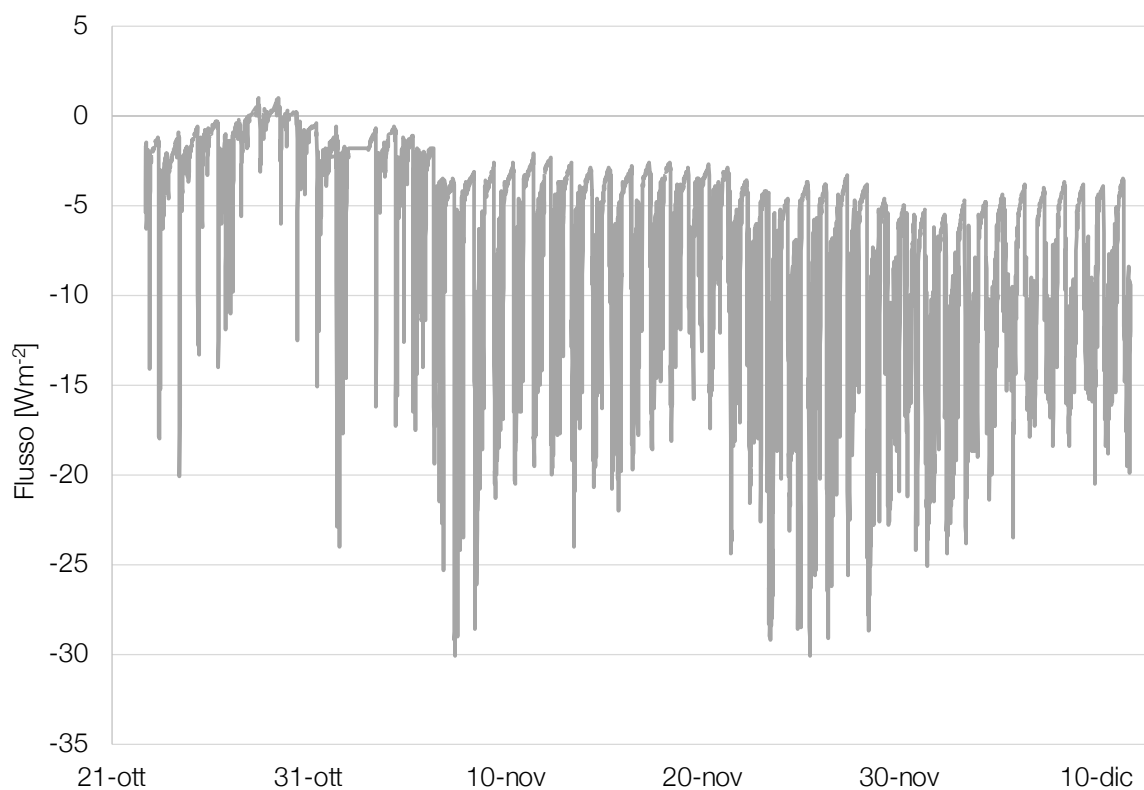


Fig. 4.34 Andamento del flusso termico durante lo svolgimento della prova a Petralia Sottana.

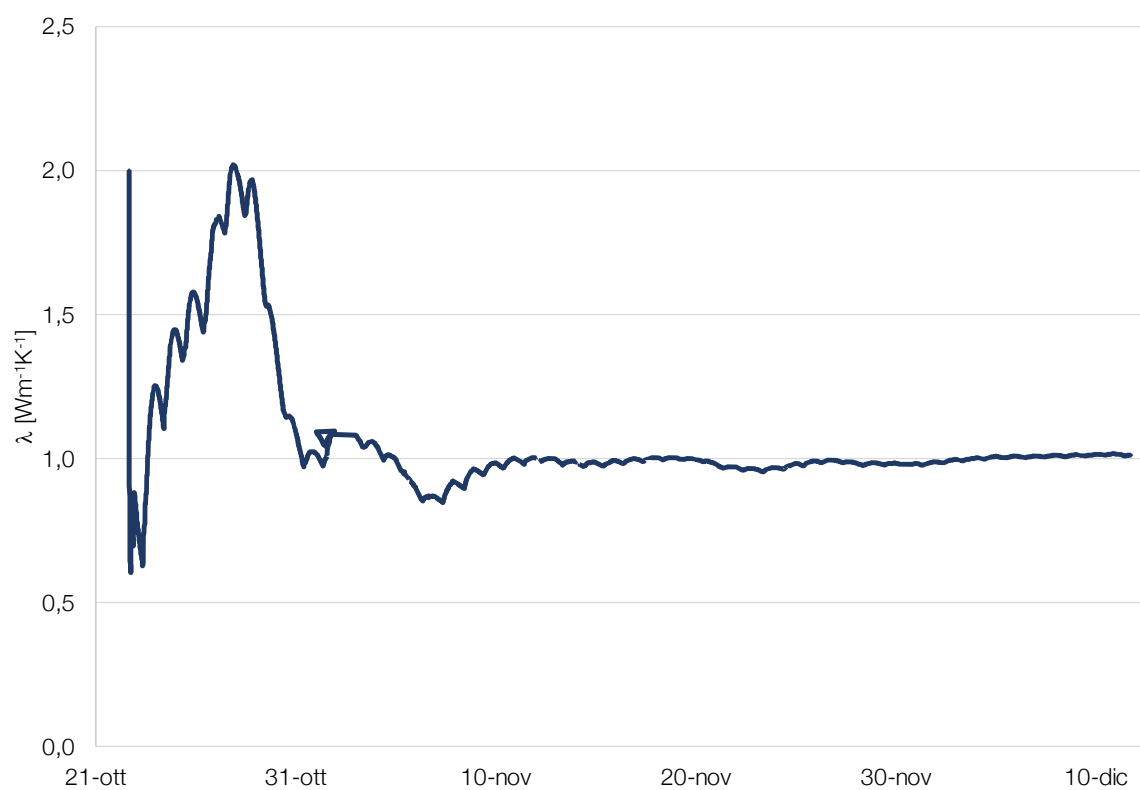


Fig. 4.35 Conduttanza termica ricavata con il metodo delle medie progressive.



Fig. 4.36 Applicazione sensori di temperatura su muratura esterna a Geraci Siculo.



Fig. 4.37 Applicazione sensori di temperatura su muratura esterna a Geraci Siculo.

Ulteriore misura in opera è stata effettuata a Geraci Siculo dal 16/01/23 al 06/02/23 per una durata di 21 giorni, su una muratura di tipo SM3 realizzata con elementi in quarzarenite. La muratura, esposta a nord, ha uno spessore di 70 cm.

I sensori sono stati applicati utilizzando sempre la stessa metodologia (Fig. 4.36-Fig. 4.37). Le misure di flusso e temperature sono state effettuate con un intervallo di cinque minuti, effettuando complessivamente 29.590 misurazioni.

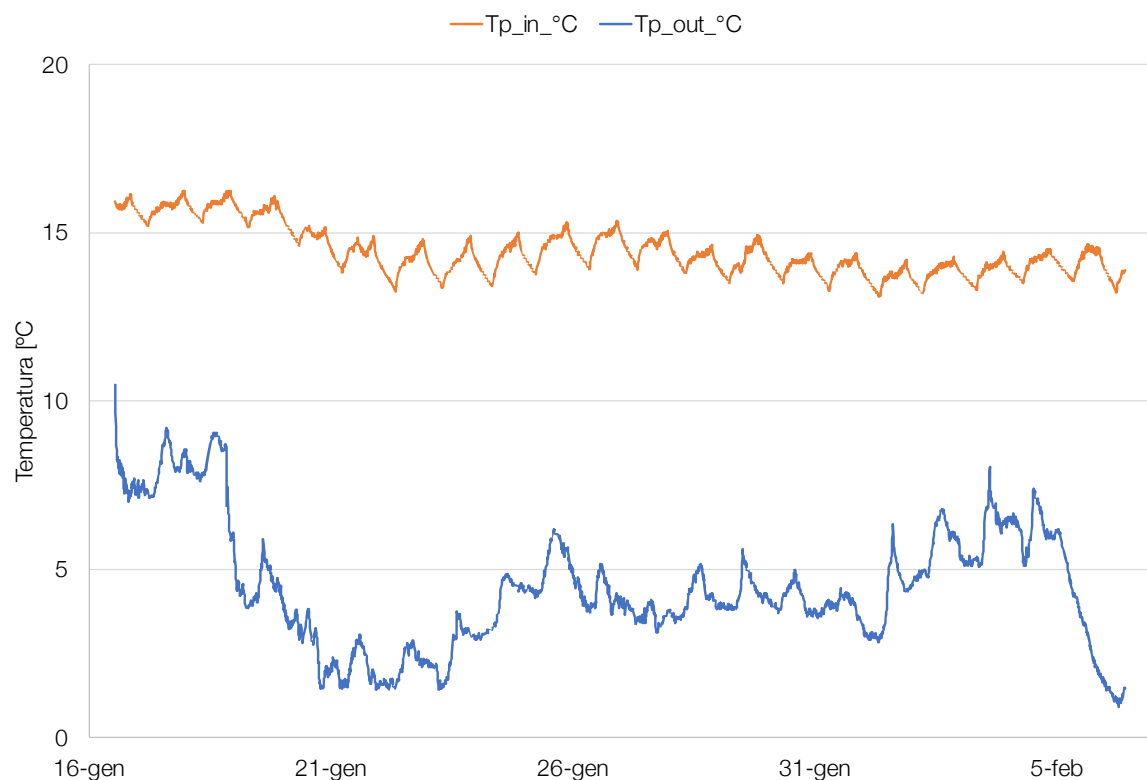


Fig. 4.38 Andamento delle temperature durante lo svolgimento della prova a Geraci Siculo.

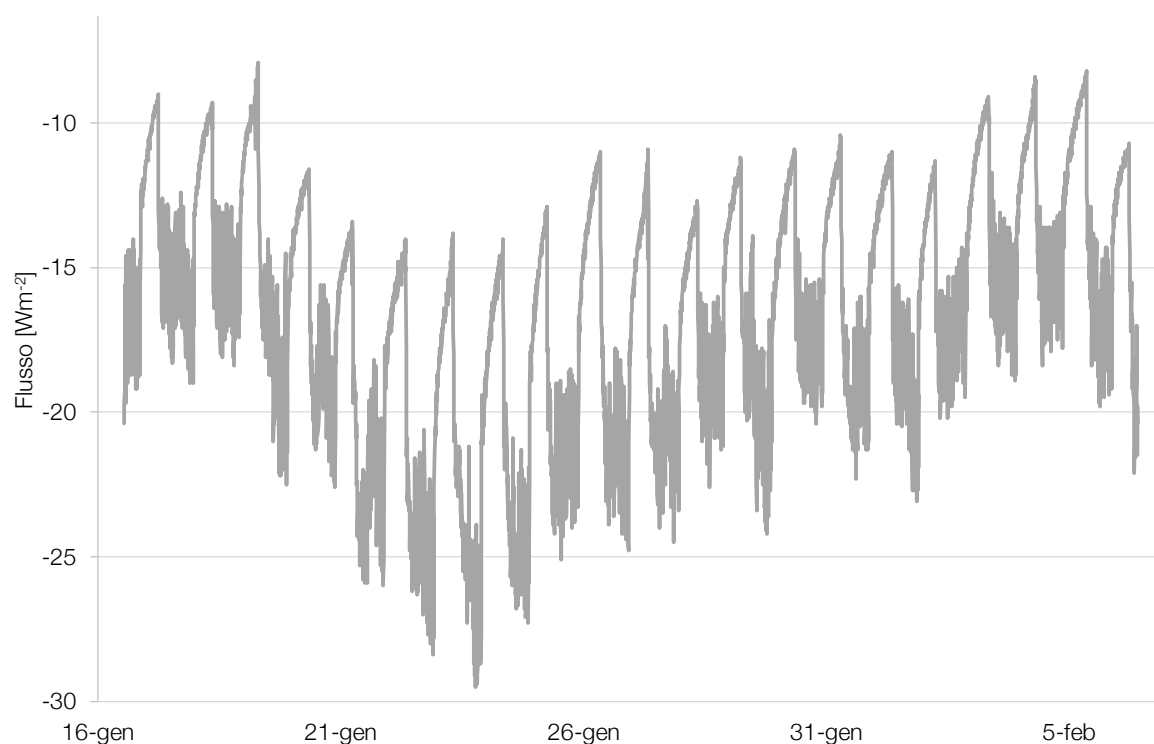


Fig. 4.39 Andamento del flusso termico durante lo svolgimento della prova a Geraci Siculo.

Il grafico di temperatura (Fig. 4.38) mostra la differenza ottimale tra le temperature interne ed esterne ($\Delta T_m \geq 10K$), consentendo di mantenere il flusso termico (Fig. 4.39) uscente dall'interno verso l'esterno per l'intera durata della prova.

La conduttanza ricavata tramite la media progressiva è pari circa a $1,65 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$. Dal grafico (Fig. 4.40) è evidente la convergenza della misura, avendo la conduttanza un valore pressoché costante.

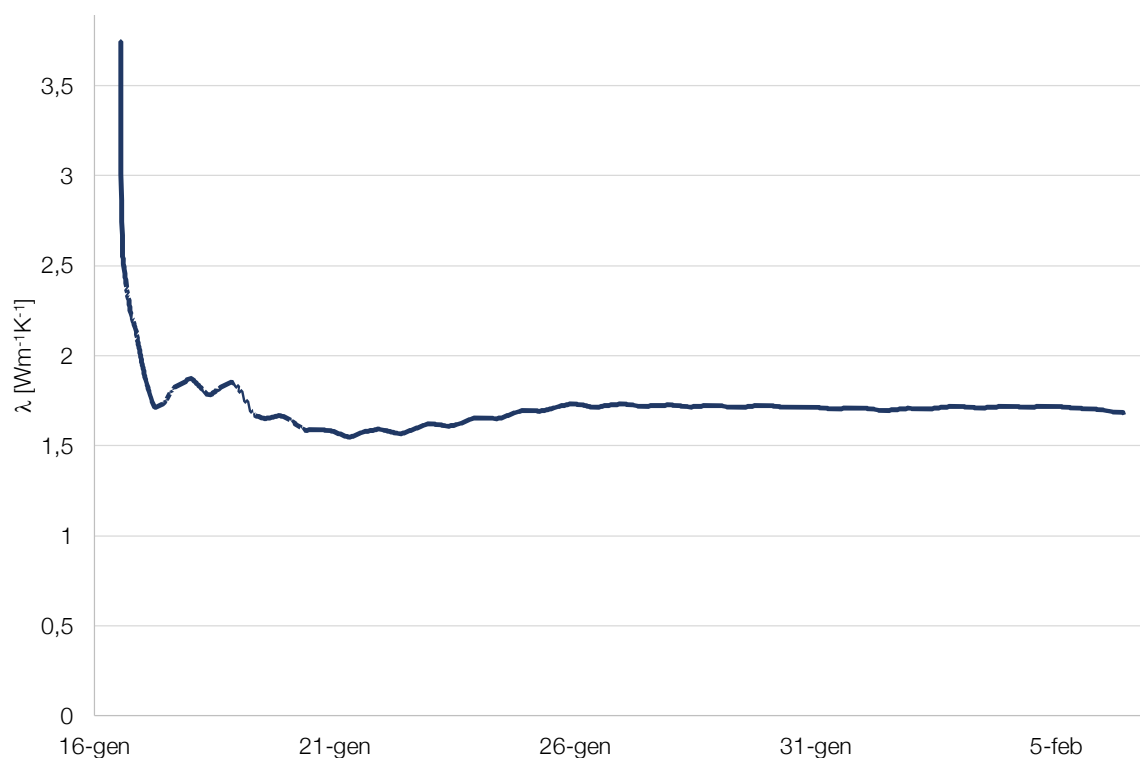


Fig. 4.40 Conduttanza termica ricavata con il metodo delle medie progressive.



Fig. 4.41 Conduttanza termica ricavata con il metodo delle medie progressive a Mistretta.



Fig. 4.42 Conduttanza termica ricavata con il metodo delle medie progressive a Mistretta.

La quinta misura in opera è stata effettuata a Mistretta su una muratura di tipo SM2 realizzata con elementi in quarzarenite (Fig. 4.41 - Fig. 4.42). La prova si è svolta dal 04/03/2024 al 04/04/2024 per una durata complessiva di 31 giorni e per un numero di misurazioni pari a 35.676.

Il grafico del flusso termico è riportato in (Fig. 4.43). Il grafico con le temperature (Fig. 4.44), interne ed esterne, misurate durante la prova in situ mostra che la variazione di media si è mantenuta intorno ai 9K ($\Delta T_m \geq 9K$); in alcuni momenti, durante lo svolgimento della prova, si è verificato che le temperature esterne fossero più alte rispetto a quelle interne, invertendo di fatto il flusso termico di parete; questo fa sì che non si possa utilizzare la media progressiva per il calcolo della conduttanza. Infatti, per determinare la conduttanza

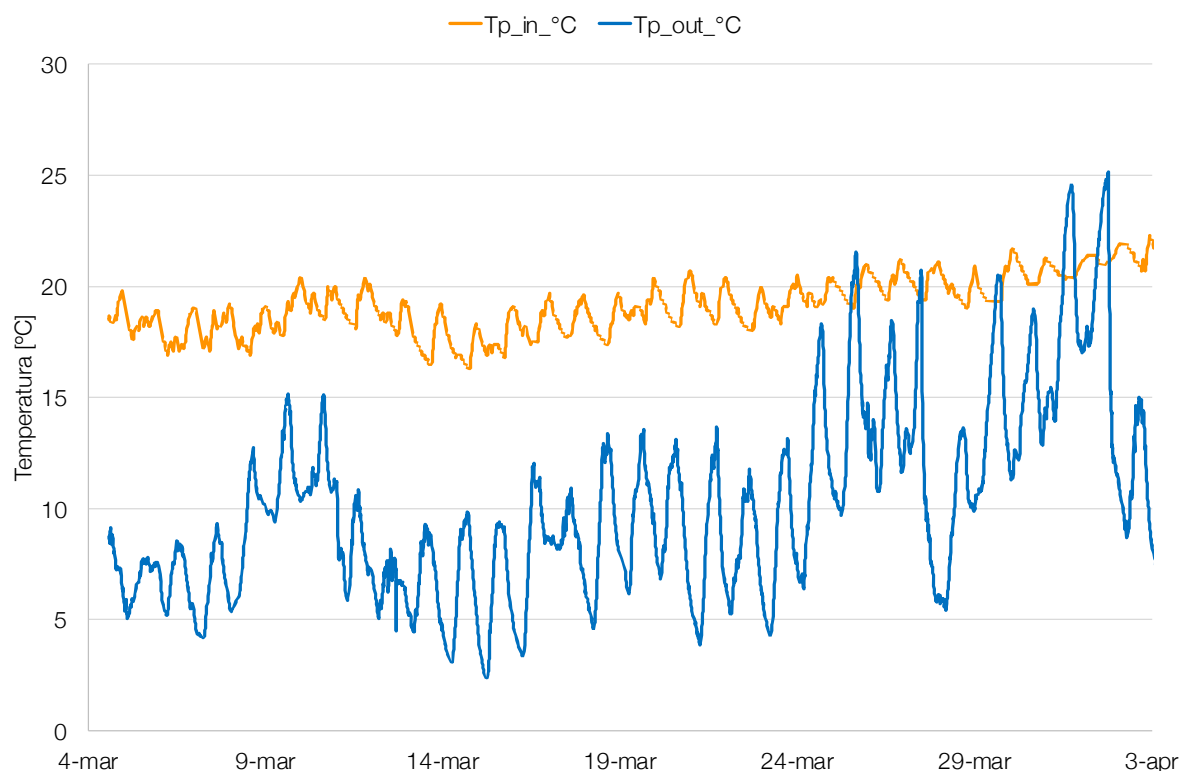


Fig. 4.43 Andamento delle temperature durante lo svolgimento della prova a Mistretta.

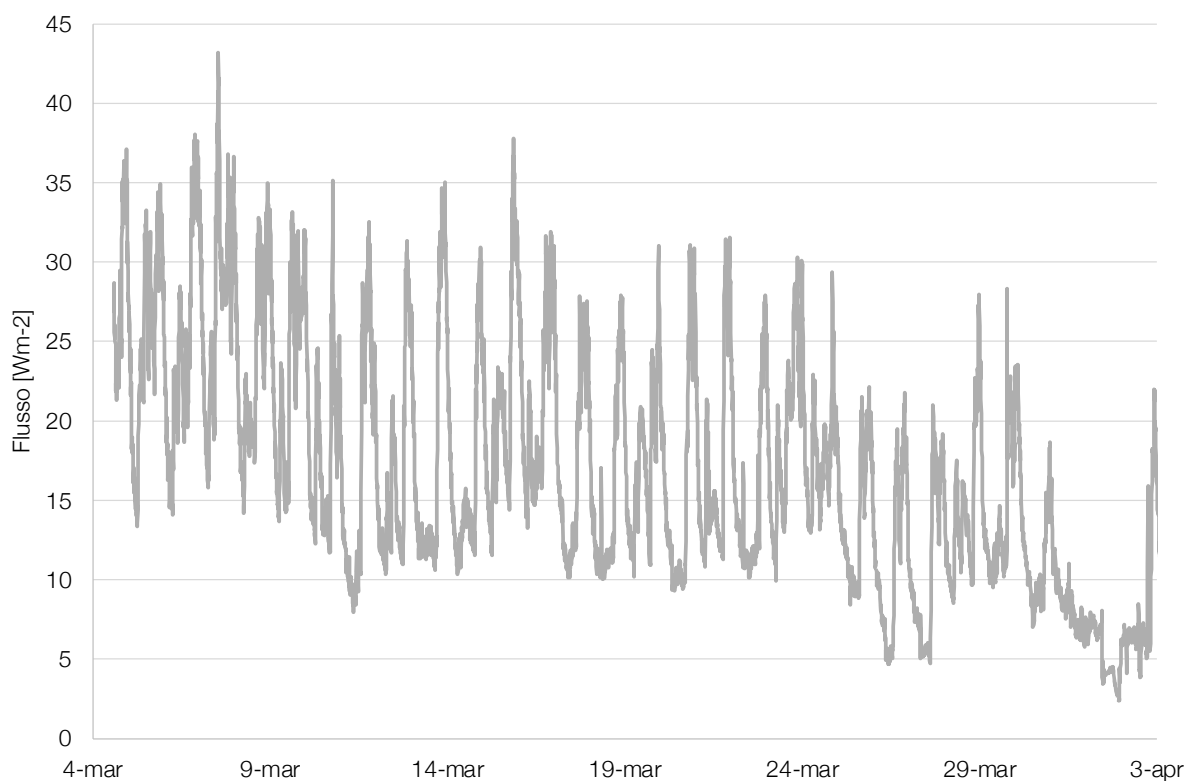


Fig. 4.44 Andamento del flusso termico durante lo svolgimento della prova a Mistretta.

si è tenuto conto delle misure in opera esclusivamente fino al 25 marzo alle ore 9:00, momento in cui il ΔT di parete è maggiore di 7K, escludendo dall'elaborazione dei dati la parte finale della misura. Il valore di conduttanza ricavato è pari a $2,0 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (Fig. 4.45).

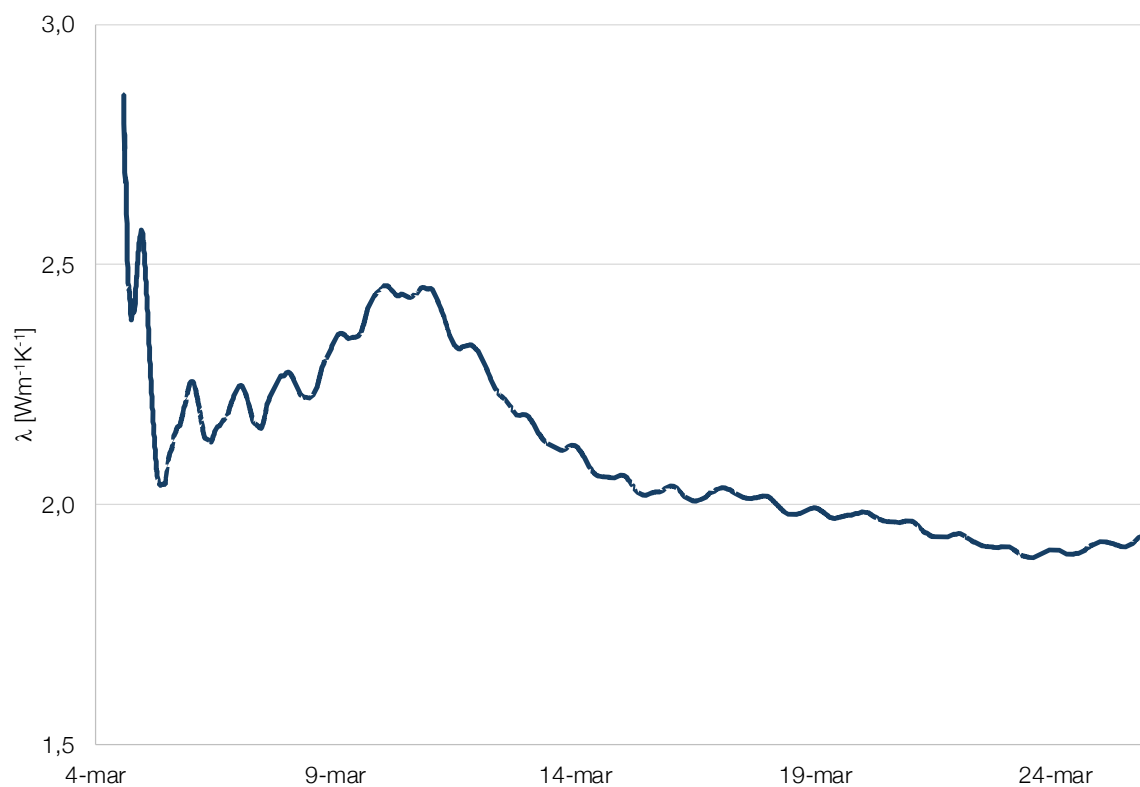


Fig. 4.45 Conduttanza termica ricavata con il metodo delle medie progressive.

4.4 CONSIDERAZIONI

La caratterizzazione sperimentale dei materiali lapidei naturali e delle murature storiche trattati nel presente capitolo ha consentito di approfondire l'analisi di alcuni tra i materiali lapidei naturali maggiormente utilizzati nelle costruzioni storiche in Sicilia. L'analisi si è sviluppata con l'intento di fornire un contributo tanto al miglioramento della comprensione delle murature in quanto sistemi complessi, quanto ad un arricchimento del repertorio delle proprietà prestazionali dei materiali utilizzati. L'obiettivo è duplice: da un lato, incrementare la conoscenza tecnica e fisica delle murature storiche, in particolare riguardo alla loro prestazione termica; dall'altro lato, ampliare la banca dati relativa alle caratteristiche dei materiali da costruzione, a supporto di una modellazione accurata, necessaria per assicurare appropriatezza e compatibilità dell'intervento di miglioramento energetico. Le informazioni ottenute, utili per le finalità scientifiche, possono risultare fondamentali anche per progettisti, ingegneri e architetti che si avvicinano alla progettazione di interventi di recupero, con l'obiettivo di supportarli nella realizzazione degli interventi, che mirino al soddisfacimento dei requisiti di qualità, compatibilità e sostenibilità imposti dalle normative europee e internazionali.

Le indagini sono state condotte mediante prove sperimentali di laboratorio, alcune delle quali realizzate in Italia e altre in Francia, con il fine di caratterizzare le proprietà termofisiche di una selezione di materiali lapidei naturali di comune impiego nell'edilizia storica. Tra questi, si citano biocalcarenite calcare, calcare solfifero, calcare compatto, marna arenitica, quarzarenite, gesso selenitico, arenaria arcossica e travertino. Le prove in laboratorio sono state indirizzate all'analisi delle principali proprietà termo-fisiche, come la conducibilità termica. I risultati ottenuti dalle prove ampliano il repertorio dei dati disponibili.

Accanto alla caratterizzazione dei singoli materiali, sono state condotte prove in opera su murature storiche realizzate con diverse tipologie di materiali lapidei naturali, presenti nel territorio siciliano. Le murature analizzate sono state quelle in quarzarenite, calcarenite e calcare solfifero, situate nei Comuni di Bompietro, Petralia Sottana, Geraci Siculo e Mistretta. Le prove in situ sono state eseguite con l'obiettivo di ottenere dati relativi alle proprietà termiche delle murature, come la conduttanza e la trasmittanza termica, parametri cruciali per la valutazione del comportamento termico degli edifici storici. Sebbene le difficoltà iniziali nell'applicazione dei sensori in situ abbiano reso complesso il processo di misurazione, le prove hanno comunque permesso di ottenere risultati significativi, utilizzabili per la calibrazione di modelli numerici avanzati, oltre che per l'ampliamento del repertorio.

In particolare, i dati raccolti sono stati utilizzati per la calibrazione dei modelli FEM (*Finite Element Method*) descritti nel capitolo 6.

Bibliografia

Akkurt GG, Aste N, Borderon J, et al (2020) Dynamic thermal and hygrometric simulation of historical buildings: Critical factors and possible solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 118:109509. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109509>

Alaimo R, Giarrusso R, Montana G (2023) I materiali lapidei dell'edilizia storica di Palermo: conoscenza per il restauro. *Terra e Ambiente* 1–160

Borri A, Corradi M, De Maria A, Sisti R (2018) Calibration of a visual method for the analysis of the mechanical properties of historic masonry. *Procedia Structural Integrity* 11:418–427. <https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2018.11.054>

Borri A, De Maria A (2019) Il metodo IQM per la stima delle caratteristiche meccaniche delle murature: allineamento alla circolare n. 7/2019

Carbonara G (2015) Energy efficiency as a protection tool. *Energy Build* 95:9–12. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2014.12.052>

Genova E, Fatta G (2018) The thermal performances of historic masonry: In-situ measurements of thermal conductance on calcarenite stone walls in Palermo. *Energy Build* 168:363–373. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.03.009>

Genova E, Kilian R (2017) Thermal and hygrometric properties of traditional calcarenite stones in the area of Palermo. *Energy Procedia* 122:1081–1086. <https://doi.org/10.1016/J.EGYPRO.2017.07.431>

Genova E, La Gennusa M, La Placa E, Vinci C (2021) Integrating thermal and mechanical characteristics of historic masonry categories: development of a Sicilian database. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 863:1–8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/863/1/011001>

La Placa E, Genova E, La Gennusa M, Vinci C (2024) The masonry type of Petralia Sottana

La Placa E, Genova E, Nasello C, Vinci C (2022) Integrated mechanical and thermal analysis of historic masonry walls in Sicily: the case study of Gangi. *Gangemi editore SpA international, Messina*, pp 709–718

Lucchi E (2017) Thermal transmittance of historical stone masonries: A comparison among standard, calculated and measured data. *Energy Build* 151:393–405. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.07.002>

Martínez-Molina A, Tort-Ausina I, Cho S, Vivancos JL (2016) Energy efficiency and thermal comfort in historic buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 61:70–85. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.03.018>

Sousa LC, Sousa H, Castro CF, et al (2014) A new lightweight masonry block: Thermal and mechanical performance. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 14:160–169. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.08.003>

Tejedor B, Lucchi E, Bienvenido-Huertas D, Nardi I (2022) Non-destructive techniques (NDT) for the diagnosis of heritage buildings: Traditional procedures and futures perspectives. *Energy Build* 263:112029. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.112029>

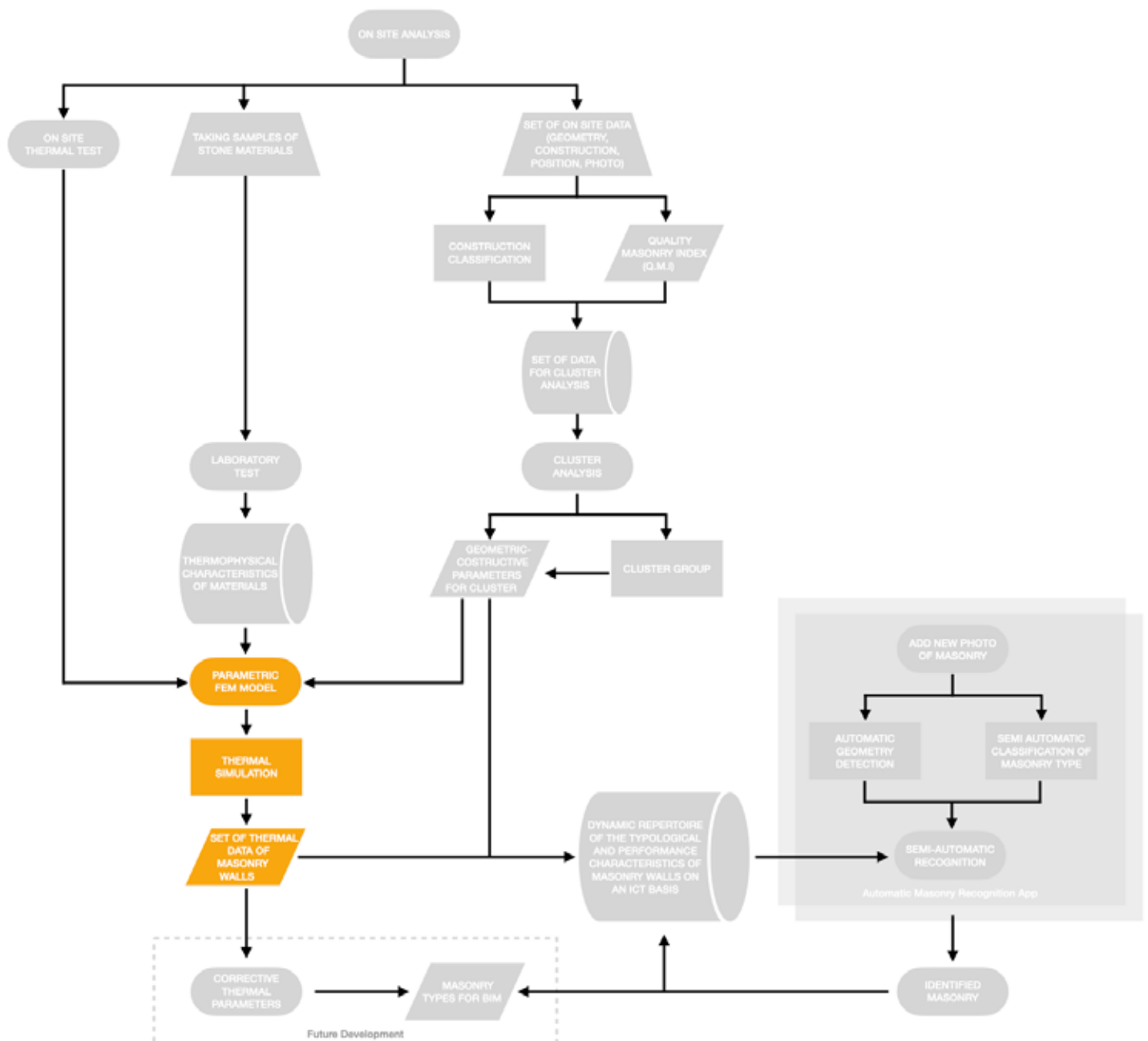
UNI EN 1936:2007 Metodi di prova per pietre naturali - Determinazione della massa volumica reale e apparente e della porosità totale e aperta

UNI ISO 9869-1:2015 Isolamento termico - Elementi per l'edilizia - Misurazione in situ della resistenza termica e della trasmittanza termica - Parte 1: Metodo del termoflussimetro. <https://store.uni.com/uni-iso-9869-1-2015>. Accessed 9 Aug 2024

CAPITOLO 5

MODELLAZIONE PARAMETRICA DI TIPI MURARI

Parametric modeling of masonry wall types



Abstract

This chapter focuses on the development of digital models for historical masonry to evaluate their thermal properties through simulation, particularly in scenarios where in situ testing is challenging. The primary objective is to establish numerical corrective parameters for calculating the thermal properties of masonry types based on geometric parameters. The significance of defining parametric models is emphasized, as they offer flexibility, control, optimization, and integration with mathematical analysis and simulations.

Two types of finite element parametric models are defined within the research: one for regular masonry, characterized by uniform, rectangular elements, and another for irregular masonry, composed of smaller, chaotically arranged elements. The regular masonry model is developed using COMSOL Multiphysics software, which facilitates the creation of parametric geometries with predefined elements. In contrast, modeling chaotic masonry presents a more complex challenge due to the irregular arrangement of its components.

The chapter also discusses the validation of the developed models through simulations that account for various boundary conditions, including heat transfer, and real meteorological data. The results highlight the thermal distribution within the masonry over defined time intervals, revealing the effects of thermal inhomogeneity due to the geometry of the domain and the differing thermophysical properties of the materials involved.

Furthermore, the chapter addresses the existing gaps in data regarding the physical and thermal properties of historical materials, which are crucial for developing effective models that integrate microclimatic factors. It underscores the necessity for a standardized methodology for validating hygrothermal simulation models to enhance the comparability of results and facilitate the adoption of more accurate models in the conservation of historical buildings.

In conclusion, the chapter advocates for active collaboration within the scientific community to create a shared database of material data, which would be instrumental in calibrating models and improving the understanding of the thermal behavior of historical masonry. This approach aims to contribute to the preservation and conservation of cultural heritage by providing a robust framework for evaluating the thermal performance of historical structures.

Tra le sfide attuali, sicuramente vi è la conoscenza dettagliata delle proprietà termiche dei materiali utilizzati negli edifici storici. Questa operazione è molto complessa e richiede approcci di modellazione sofisticati. La disponibilità limitata di dati e la variabilità delle condizioni ambientali sono ulteriori difficoltà che il presente lavoro di ricerca ha affrontato nel capitolo 4.

La norma UNI EN ISO 6946 fornisce i criteri per determinare la trasmittanza termica (U) delle pareti, dei solai, dei tetti e di altre strutture piane, tenendo in considerazione sia i materiali che compongono l'elemento che gli strati d'aria adiacenti.

Il calcolo della trasmittanza termica U [$\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$] di una chiusura opaca verticale viene semplificato e ricondotto ad uno o più strati omogenei.

La trasmittanza termica U si calcola come l'inverso della resistenza termica totale del paramento murario (Eq. 5.1). Quest'ultima, secondo l'analogia delle resistenze, viene calcolata sommando i contributi di ogni strato che compone la parete (Eq. 5.2).

$$U = \frac{1}{R_t} \quad (5.1)$$

$$R_t = R_{si} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \dots + R_{se} \quad (5.2)$$

L'utilizzo di queste formule risulta poco adeguato alle murature di tipo tradizionale, poiché la forma e le dimensioni degli elementi sono variabili e presentano un certo livello di incertezza legato agli aspetti costruttivi, di conseguenza non possono essere assimilate a strati omogenei.

Nel caso delle murature storiche la conoscenza dettagliata dei materiali e della geometria è molto complessa, e l'utilizzo di queste formule non consente di determinare in modo appropriato le proprietà termiche delle murature.

La norma specifica per determinare le proprietà termiche delle murature (UNI EN 1745:2020) fornisce le proprietà termofisiche di alcuni elementi in pietra naturale e rimanda alla UNI ISO 6946 per il calcolo della trasmittanza termica U .

Inoltre, la norma (UNI 10351:2021) specifica che laddove la conoscenza delle caratteristiche costruttive-materico della muratura siano carenti, è necessario determinare le proprietà termiche attraverso prove in situ.

Come riportato nel capitolo 4, queste prove risultano di difficile applicazione poiché risentono di molteplici fattori di potenziale disturbo, quali le modalità di applicazione del sistema di monitoraggio, la variabilità delle condizioni ambientali e il loro scostamento dalle condizioni ideali, la presenza di variabili aleatorie e incontrollabili legate al comportamento degli occupanti, le incertezze sull'esatta tipologia costruttiva in assenza di indagini distruttive o semi-distruttive, come citato nella norma (UNI ISO 9869-1:2015).

Per superare queste difficoltà, si può ricorrere alla simulazione di murature con l'ausilio di modelli digitali; la modellazione consente di caratterizzare termicamente le murature senza dover ricorrere necessariamente allo svolgimento di prove in situ, limitando i costi e i tempi, e fornendo un'analisi termica dettagliata (per i modelli validati e calibrati).

5.1 STATO DELL'ARTE

Gutland et al. (2022) hanno impiegato una combinazione di modelli geometrici complessi ad alta risoluzione e modelli semplificati per simulare la variabilità geometrica nelle murature a sacco. In particolare, hanno utilizzato uno *script* in *Python* per generare stocasticamente la geometria dei muri basandosi su parametri come le dimensioni delle pietre e dei giunti di malta, nonché della percentuale dei vuoti. Questo approccio prevedeva la disposizione casuale degli elementi lapidei e della malta sia nel paramento che nel nucleo per imitare il processo di costruzione delle murature storiche. Inoltre, gli autori hanno eseguito una serie di simulazioni igrotermiche considerando quattro diverse condizioni al contorno (calore, essiccazione, umidità e dati meteorologici reali) per analizzare l'impatto di queste variazioni sul trasferimento di calore e umidità. I risultati delle geometrie generate stocasticamente sono stati confrontati con modelli semplificati per valutare la loro adeguatezza in termini di trasferimento di calore e umidità. Questo confronto ha permesso di evidenziare le differenze significative tra i modelli stocastici e quelli semplificati, sottolineando l'importanza di un approccio più dettagliato per la valutazione delle prestazioni delle pareti storiche.

I risultati ottenuti hanno mostrato che la variabilità geometrica e la presenza di vuoti nelle pareti possono ridurre il trasporto di calore e umidità. Le simulazioni hanno rivelato che le geometrie stocastiche presentano una maggiore variabilità nei risultati rispetto ai modelli semplificati, evidenziando come le irregolarità geometriche e le proprietà igroscopiche dissimili tra malta e pietra possano influenzare il comportamento termico e igrometrico delle pareti. In particolare, è emerso che i modelli 2D paralleli, che considerano il giunto di malta, sono i più appropriati per rappresentare il comportamento delle pareti storiche. Gli autori hanno sottolineato l'importanza di considerare la variabilità geometrica e costruttiva nella modellazione igrotermica degli edifici storici. Sebbene i modelli stocastici forniscano risultati più accurati non sono sempre praticabili a causa dei tempi di configurazione e simulazione che risultano elevati.

Infine, tra le difficoltà riportate nell'articolo vi è quella di astrarre la geometria dei muri a sacco, poiché può portare ad un grado di incertezza intrinseca nei modelli igrotermici. La mancanza di dati pubblicati per sistemi di costruzione storici e la variabilità delle proprietà igroscopiche dei materiali complicano ulteriormente la creazione di modelli affidabili.

Nell'articolo di review (Huerto-Cardenas et al. 2020) gli autori affrontano un tema cruciale: la validazione dei modelli di simulazione igrotermica per edifici storici. La ricerca si propone di esaminare le metodologie attualmente utilizzate per la validazione di tali modelli, evidenziando le sfide e le opportunità che emergono da questo campo di studio. La metodologia adottata dagli autori si basa su una revisione sistematica della letteratura esistente riguardante la simulazione igrotermica degli edifici storici. Gli autori hanno identificato i parametri che vengono utilizzati più frequentemente per la validazione dei modelli, come temperatura, umidità relativa e flusso di calore, parametri fondamentali per la comprensione del comportamento igrotermico degli edifici storici.

Al fine di valutare l'accuratezza dei modelli, gli autori hanno selezionato gli indici statistici più utilizzati e hanno ribadito l'importanza di standardizzare questi parametri al fine di fornire una misura chiara della discrepanza tra i dati misurati e quelli simulati. La validazione dei modelli è una sezione cruciale per valutare l'accuratezza dei modelli di simulazione. Nonostante l'esistenza di numerosi studi sulla simulazione igrotermica, vi sono ancora lacune significative nella standardizzazione delle metodologie di validazione. Molti studi utilizzano approcci diversi per la calibrazione e la validazione, il che rende difficile confrontare i risultati e trarre conclusioni generali. Inoltre, gli autori sottolineano

la mancanza di dati dettagliati relativi alle proprietà fisiche e termiche dei materiali storici impiegati nell'edilizia storica, che risultano necessari per sviluppare modelli che integrino efficacemente anche i fattori microclimatici. Infine, gli autori sottolineano come la variabilità delle condizioni ambientali e l'interazione con il microclima circostante complichino ulteriormente la modellazione, rendendola più accurata.

In conclusione, l'articolo evidenzia l'importanza di sviluppare una metodologia standardizzata per la validazione dei modelli di simulazione igrotermica, che possa essere in grado di migliorare la comparabilità dei risultati e facilitare l'adozione di modelli più accurati nella conservazione degli edifici storici. Inoltre, gli autori propongono alla comunità scientifica una collaborazione attiva al fine di creare un *database* condiviso di dati sui materiali, da utilizzare per la calibrazione dei modelli.

In (Schoplocher et al. 2023) gli autori propongono un'analisi comparativa tra il modello a parametri *lumped* (LPM) e il metodo degli elementi finiti (FEM) con l'obiettivo di migliorare le simulazioni delle prestazioni degli edifici. La metodologia adottata si fonda su simulazioni FEM dettagliate, che permettono di calcolare in modo più preciso il trasferimento di calore interno e l'effetto dei ponti termici, rispetto al LPM, noto per la sua rapidità di calcolo e per la buona accuratezza nei carichi termici ed energetici.

Il lavoro di ricerca evidenzia la necessità di trovare un equilibrio tra la complessità del modello e la velocità di calcolo; questi aspetti richiedono ulteriori ricerche per ottimizzare le simulazioni e migliorarne l'applicabilità pratica nel settore della progettazione edilizia.

Grazie allo sviluppo tecnologico e agli strumenti di disegno e modellazione è possibile creare una copia digitale degli edifici, con un'elevata definizione tecnologica. Infatti, è possibile ricreare l'organismo edilizio, scomponendolo nel sistema tecnologico e definendolo in ogni elemento tecnico. Ciò consente di facilitare il lavoro dei progettisti durante le fasi di progettazione, definendo un sistema integrato di informazioni, ed inoltre, durante le fasi realizzative consente di migliorare gli standard di sicurezza facilitando la gestione del cantiere.

L'obiettivo di questo capitolo è definire dei modelli digitali di murature storiche per valutarne le proprietà termiche attraverso la simulazione, laddove lo svolgimento delle prove in situ risulta di difficile applicazione. Lo sviluppo futuro di questi modelli è quello di ottenere dei parametri correttivi numerici per calcolare le proprietà termiche dei tipi murari sulla base di parametri geometrici.

Definire modelli parametrici è di fondamentale importanza in diversi campi di ricerca. Questi modelli offrono diversi vantaggi: flessibilità e controllo, ottimizzazione e design interattivo, automazione del processo, adattabilità, integrazione con l'analisi matematica e simulazioni FEM.

5.2 MODELLAZIONE PARAMETRICA DI TIPI MURARI

Nel presente lavoro di ricerca sono stati definiti due tipi di modelli: un modello parametrico agli elementi finiti per murature di tipo regolare (elementi sbazzati assimilabili a parallelepipedi regolari), un modello parametrico agli elementi finiti per murature di tipo irregolare (elementi di piccole dimensioni, disposti in maniera caotica). Il primo modello è stato definito con il software *Comsol Multiphysics* v. 5.6; vista la semplicità geometrico-costruttiva della muratura regolare si è scelto di utilizzare questo software che consente la creazione di geometria parametrica con elementi predefiniti "base" come i parallelogrammi. Modellare geometricamente una muratura caotica è un'operazione molto più complessa, soprattutto nella definizione della geometria che si basa su parametri; dunque, è stato necessario utilizzare *Grasshopper* (linguaggio di programmazione visiva eseguito all'interno

dell'applicazione *Rhinoceros 3D*) per modellare parametricamente la geometria della sezione costruttiva; successivamente il modello ottenuto è stato importato sul *software Castem23* per effettuare l'analisi termica.

I modelli parametrici sono stati utilizzati in questa ricerca poiché consentono di modificare la geometria in maniera dinamica; è necessario far variare i parametri definiti come le dimensioni degli elementi, della sezione trasversale o del giunto di malta, per ottenere un nuovo modello di muratura. La flessibilità di questi modelli consente di avere un maggior controllo sulle forme e di apportare modifiche rapide senza dover ridefinire l'intero modello; inoltre, permette di esplorare più varianti di una soluzione geometrica con piccole modifiche ai parametri.

Considerando le variabili introdotte nel modello e valutando le possibili combinazioni si possono ottenere tantissimi modelli di murature diverse tra loro. Questo consente di valutare le proprietà termiche di una moltitudine di murature diverse tra loro, facilitando la ricerca e determinando un'analisi appropriata delle prestazioni energetiche.

Infine, la possibilità di integrare il modello con l'analisi matematica permette di svolgere simulazioni agli elementi finiti, come le analisi termiche per caratterizzare termicamente le murature o analisi meccaniche per valutarne la risposta alle sollecitazioni meccaniche.

5.2.1 Modellazione parametrica e termofisica di murature regolari

La modellazione FEM (*Finite Element Method*) di murature di tipo regolari è stata definita in ambiente Comsol Multiphysics v5.6 impiegando una geometria parametrica. Nella prima fase di ricerca sono state modellate 4 configurazioni murarie definite come Modello 1, Modello 2, Modello 3, Modello 4 (M1, M2, M3, M4), che rappresentano alcune modalità costruttive di murature regolari desunte dall'analisi dei contesti locali discussi nel capitolo 2.

I modelli descritti di seguito individuano le modalità costruttive al variare della dimensione degli elementi, della forma, dello spessore della sezione trasversale, della presenza di elementi diatonici – semidiatonici, ed infine, dalla percentuale di malta.

Nello specifico le murature modellate hanno le seguenti caratteristiche:

- M1 - Muratura regolare monostrato in conci sbozzati - dimensione prevalente: larghezza- altezza e spessore comparabili - malta tra i conci: 2%;
- M2 - Muratura regolare a due strati in conci sbozzati - dimensione prevalente: larghezza - altezza e spessore comparabili - conci diatonici passanti nella sezione trasversale - malta tra i due strati: 8%;
- M3 - Muratura regolare a due strati in conci sbozzati - dimensione prevalente: larghezza - altezza e spessore comparabili - conci semi-diatonici nella sezione trasversale - malta tra i due strati: 8%;
- M4 - Muratura regolare composta da due strati, in conci sbozzati - dimensione prevalente larghezza - altezza e spessore comparabili - conci semi-diatonici nella sezione trasversale -malta tra i due strati:12%.

Si riportano in (Fig. 5.1) le immagini dei quattro modelli 3D. I modelli sono stati creati dimensionando parametricamente ogni elemento. Le dimensioni geometriche del parallelogramma (che simboleggia il concio in pietra), impiegato come geometria di base per la creazione dei modelli M1, M2, M3, M4, sono: larghezza (L1) 60 cm, altezza (H1) 35 cm, spessore (S1) 28 cm. Gli spessori dei giunti sono rappresentati dai seguenti parametri: *smx* che rappresenta la dimensione dello spessore di giunto di malta lungo la direzione x, *smy* che rappresenta la dimensione dello spessore di giunto di malta lungo la direzione y, ed infine, *smz* che rappresenta la dimensione dello spessore di giunto di malta lungo la

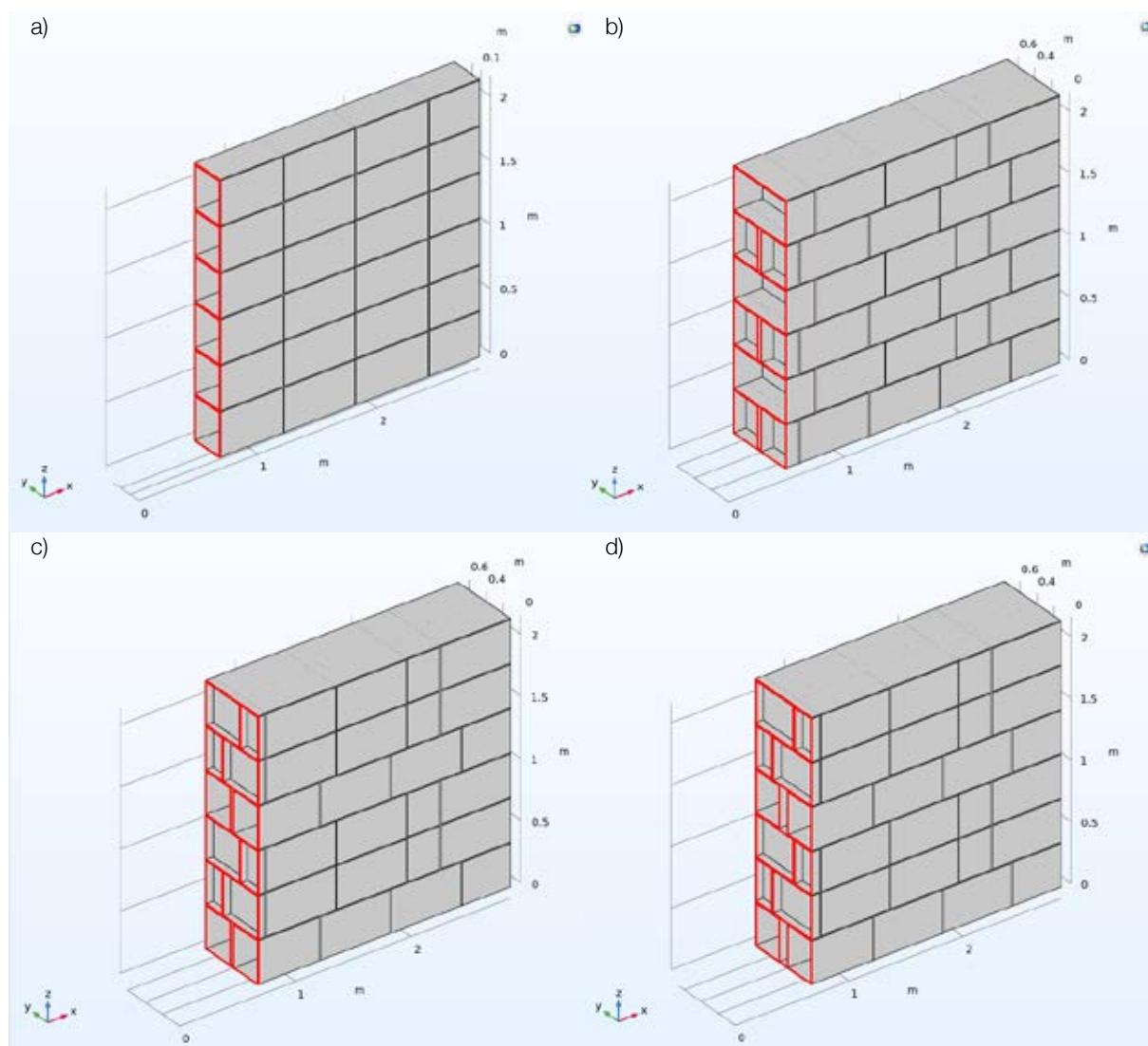


Fig. 5.1 a) Configurazione M1 b) Configurazione M2 c) Configurazione M3 d) Configurazione M4.

direzione z . Il sistema di riferimento xyz consente di individuare univocamente le direzioni principali del modello simulato. Ogni muratura modellata ha la propria base giacente sul piano di riferimento xy , si sviluppa in altezza secondo la direzione z , uscente dal piano xy . La sezione costruttiva trasversale è rappresentata sul piano yz . L'origine del sistema di riferimento coincide con il vertice del primo elemento modellato.

I conci sono stati definiti utilizzando elementi 3D di base (parallelepipedi), attribuendo i parametri geometrici definiti precedentemente ($L1$, $H1$, $S1$). La posizione degli elementi nello spazio tridimensionale è stata definita mediante coordinate parametriche attribuite al sistema di riferimento. Stabilita la geometria del setto murario, determinata dall'assemblaggio dei singoli conci e della malta, si è definita la nomenclatura dei domini "muro" e "malta" per consentire l'identificazione degli stessi in maniera univoca.

La fase successiva della modellazione ha previsto l'inserimento e l'attribuzione dei materiali ai domini definiti. In Tab. 5.1 sono state riportate le informazioni relative ai materiali applicati e le relative proprietà termofisiche. Il materiale lapideo utilizzato per l'elaborazione del modello è il calcare compatto, poiché per la modellazione avanzata è importante indagare le murature in cui ci sia una differenza marcata fra le proprietà della pietra e quelle della malta, rispetto ai casi in cui i due componenti abbiano caratteristiche termofisiche omogenee. Le proprietà termiche dei materiali sono state dedotte dalla (UNI

Materiale lapideo	Densità (ρ)	Calore specifico (c_p)	Conducibilità (λ)
	[kgm ⁻³]	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	[W m ⁻¹ K ⁻¹]
Calcare compatto	1.990	1.000	1,40
Malta	500	1.000	0,12

Tab. 5.1 Proprietà termiche dei materiali applicati al modello Comsol.

EN 1745:2020).

Il potenziale dei modelli parametrici risiede nella possibilità di sostituire le proprietà caratteristiche dei materiali impiegati nella costruzione (λ , ρ , c_p), e le dimensioni geometriche (h , l , s , ecc.), consentendo, a partire dallo stesso modello FEM, di simulare diversi tipi murari ricavando le proprietà termiche della muratura.

La fase successiva nella definizione del modello ha riguardato la selezione delle equazioni associate per la trasmissione del calore nei solidi. I domini di calcolo sono stati definiti manualmente attribuendo a ciascuno di essi le relative proprietà termofisiche definite in Tab. 5.1. Sulle superfici di dominio che rappresentano l'intradosso e l'estradosso della parete oggetto di studio sono state imposte le condizioni al contorno del Cauchy, mediante la definizione del flusso termico e della temperatura superficiale. In Fig. 5.2 a) si riportano le superfici sottoposte alla condizione di adiabaticità; per la parete esterna (Fig. 5.2b) sono state imposte le condizioni corrispondenti di convezione naturale applicata ad una piastra verticale di lunghezza caratteristica L lambita da aria a temperatura $T_{est}=0^\circ\text{C}$; per la parete interna (Fig. 5.2c) è stata imposta la condizione di convezione naturale all'interno di un camino formato da due piastre parallele alte H e distanti L , lambite da aria a $T_{int}=20^\circ\text{C}$.

Le equazioni che modellano lo scambio termico convettivo applicato sulla superficie esterna seguono le equazioni 5.3, 5.4, 5.5:

$$-n \cdot q = q_0 \quad (5.3)$$

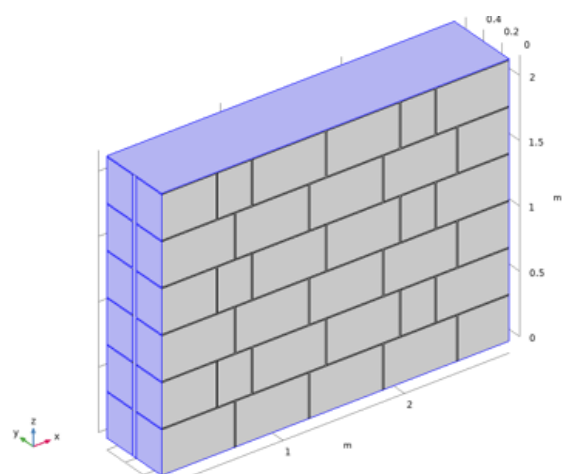
$$q_0 = h(T_{est} - T) \quad (5.4)$$

$$h = \begin{cases} \frac{k}{L} \left(0.68 + \frac{0.67 Ra_L^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0.49k}{\mu C_p} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{4}{9}}} \right) & \text{if } Ra_L \leq 10^9 \\ \frac{k}{L} \left(0.825 + \frac{0.38 Ra_L^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.49k}{\mu C_p} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2 & \text{if } Ra_L > 10^9 \end{cases} \quad (5.5)$$

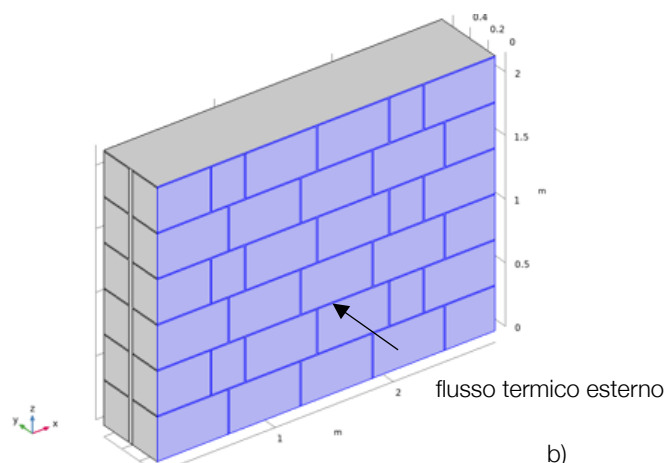
in cui $L=2$ m, le proprietà termofisiche sono invece riferite al mezzo di scambio termico convettivo, ovvero l'aria. Per la parete interna il coefficiente di scambio termico convettivo è stato calcolato mediante l'Eq. 5.6:

$$h = \frac{k Ra_L}{H 24} \quad (5.6)$$

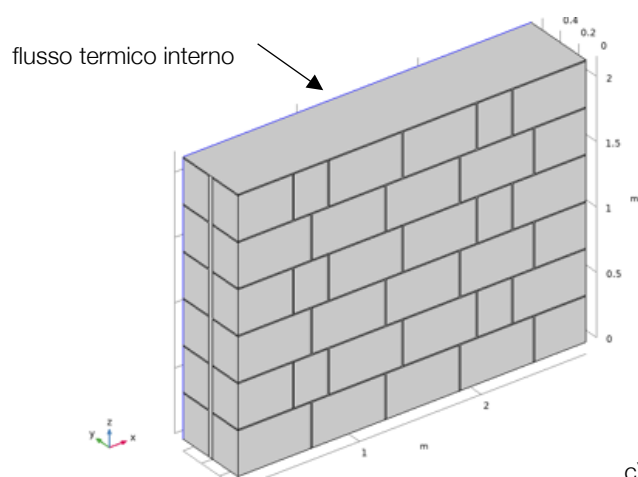
in cui l'altezza caratteristica H è pari a 2 m e la lunghezza caratteristica L è pari a 5 m.



a)



b)



c)

Fig. 5.2 Definizione della trasmissione del calore nei modelli su Comsol Multiphysics. a) isolamento termico b) flusso termico esterno c) flusso termico interno.

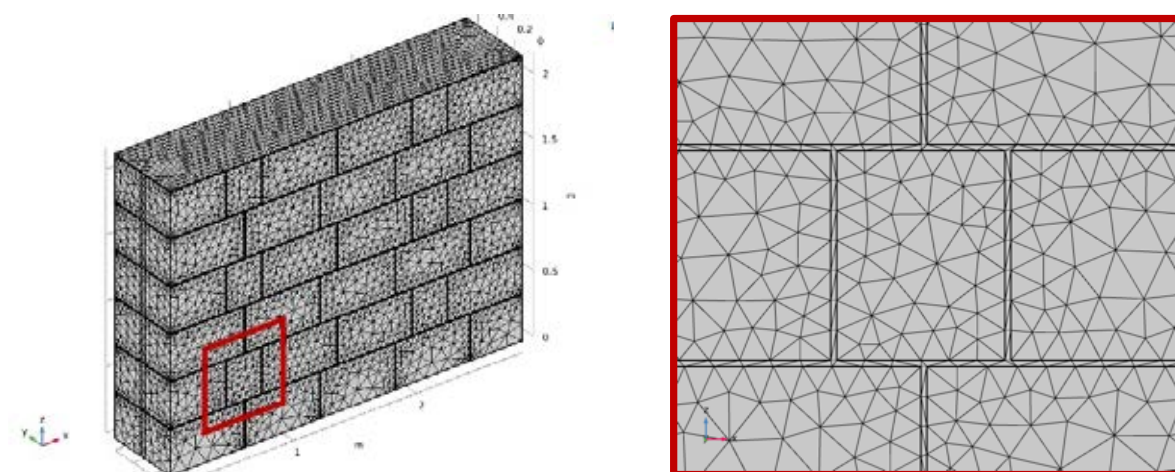


Fig. 5.3 Mesh del modello M2 su Comsol Multiphysics

Il mesh generato per ciascun modello è composto da elementi tetraedrici. Di seguito si riporta il numero degli elementi associati per ciascun modello: 309.853 elementi triangolari con 438400 gradi di libertà per M1, 689697 elementi triangolari con 950545 gradi di libertà per M2, 715472 elementi triangolari con 984983 gradi di libertà per M3, 740909 elementi triangolari con 1019270 gradi di libertà per M4. In Fig. 5.3 si riporta, a titolo esemplificativo, il mesh ottenuto per il modello M2; si evidenzia che in prossimità dei bordi il mesh diventa più fitto.

Le simulazioni sono state eseguite in regime stazionario, al fine di valutare l'effetto di distorsione del flusso termico in prossimità dei conci diatoni o semi-diatoni che difatti generano l'effetto di un ponte termico.

Le proprietà termiche prese in considerazione per la comparazione dei risultati sono la temperatura e il flusso termico, in quanto ritenute rappresentative per la valutazione delle prestazioni energetiche di una muratura. Da queste, infine, è stata calcolata la conduttanza termica mediante l'Eq. 5.7:

$$\lambda = \frac{q}{T_{par,int} - T_{par,est}} \quad (5.7)$$

In (Fig. 5.4) è possibile confrontare le mappe termiche ottenute sezionando i domini mediante un piano parallelo al piano yz e passante per la coordinata x=2,13 m. Graficamente si evince come la presenza di conci diatoni e semi-diatoni influenzino la trasmissione del calore, in particolar modo per la distribuzione della temperatura. Nel caso della configurazione M1 si riscontra un gradiente termico lineare sull'asse y, ripetuto omogeneamente lungo tutta della sezione; la diffusione del calore è influenzata essenzialmente dalla conducibilità termica del materiale lapideo. Per la muratura M2 si nota che la successione regolare dei conci diatoni nella sezione porta ad una trasmissione del calore più marcata in presenza degli stessi, generando l'effetto tipico di un ponte termico. La minore conducibilità della malta interposta fra i conci che formano i due setti murari porta ad un aumento localizzato di gradiente termico, limitandone il passaggio di calore. Nei casi M3 e M4 la disuniformità della distribuzione fra la malta e il concio forma evidenti distorsioni delle linee isoterme, mettendo in risalto l'effetto del ponte termico imputabile alla presenza di conci semi-diatoni. Nella configurazione M4 l'effetto dovuto alla maggior presenza di malta tra i due strati di muratura, si traduce in una maggiore discontinuità e

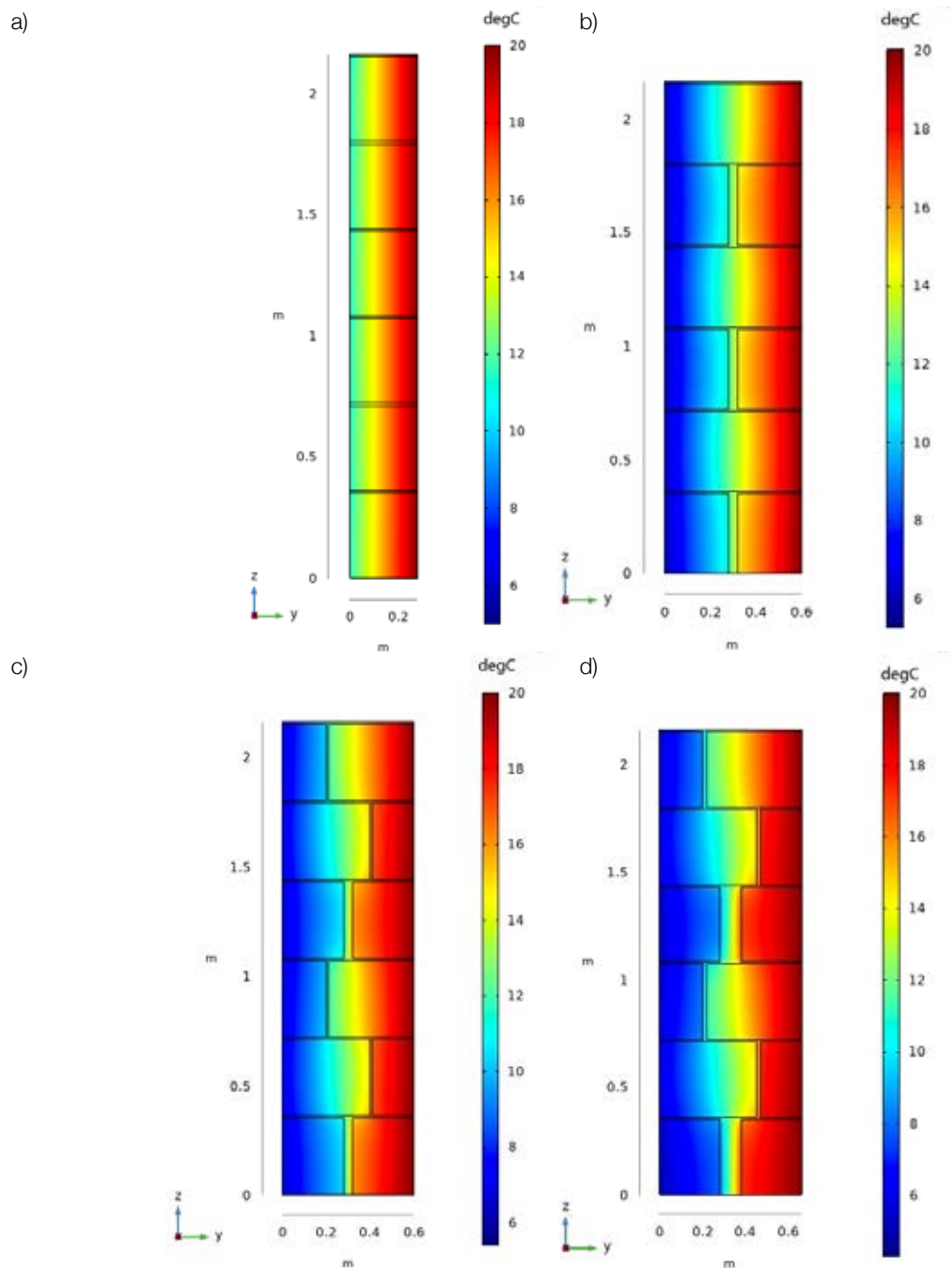


Fig. 5. 4 Sezioni trasversali yz effettuate per $x=2,13$ m a) Configurazione M1 b) Configurazione M2 c) Configurazione M3 d) Configurazione M4.

dunque si determina uno strato di maggiore resistenza termica.

In (Fig. 5.5) si riportano le mappe termiche ottenute sezionando il dominio mediante un piano parallelo al piano xz e passante per la coordinata $y=smy/2+0,05m$. Nella configurazione M1 tutta la sezione si trova in condizione di isotermità, non avendo alcuna discontinuità lungo la coordinata y. Nel configurazione M2 si evidenzia l'effetto ponte termico dei conci diatonici che tendono ad avere una temperatura minore rispetto ai conci circostanti, la differenza si attesta nell'intorno di 1K. Nelle configurazioni M3 e M4 si nota lo stesso effetto per i conci semi-diatonici, che risulta particolarmente marcato nella configurazione M4, in cui la differenza di temperatura fra i conci ortostati e i conci semi-diatonici è di circa 4,5 K.

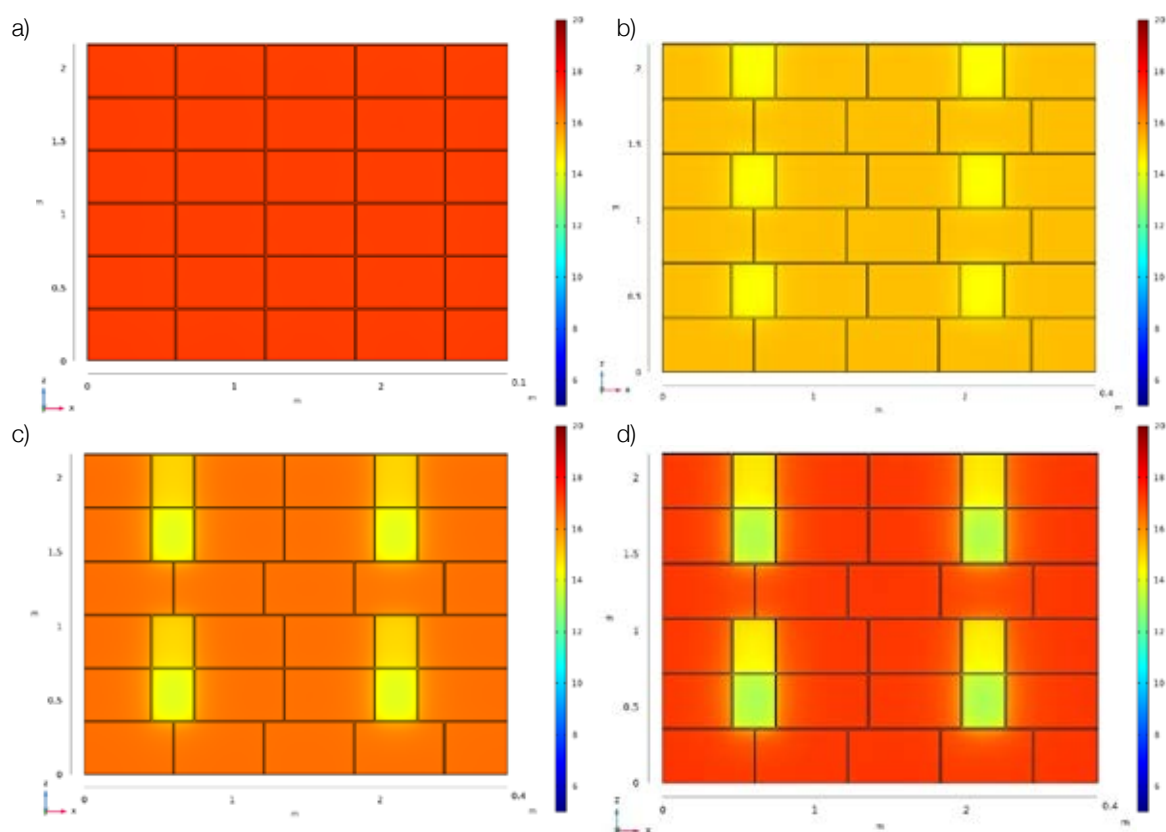


Fig. 5. 5 Temperature nelle sezioni trasversali xz a) Configurazione M1 b) Configurazione M2
c) Configurazione M3 d) Configurazione M4.

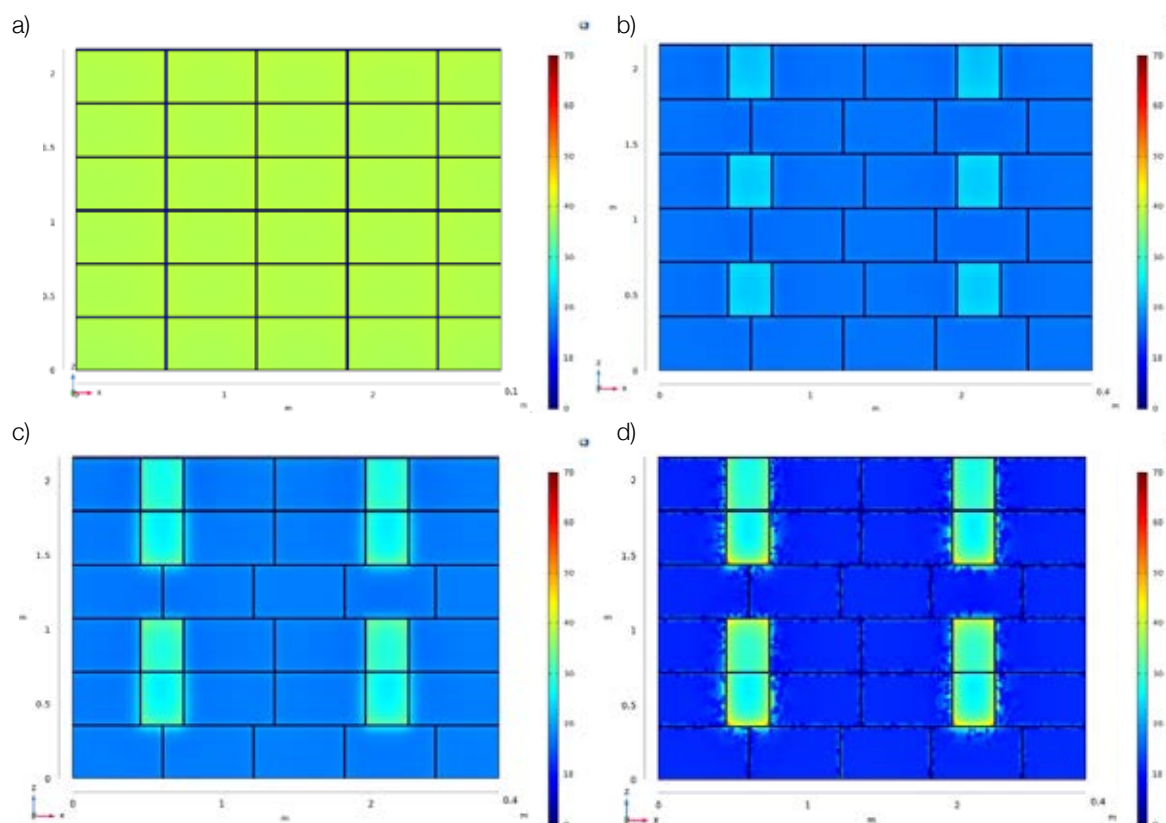


Fig. 5. 6 Flussi termici nelle sezioni trasversali xz a) Configurazione M1 b) Configurazione M2
c) Configurazione M3 d) Configurazione M4.

Muratura	Spessore della muratura	Temperatura media superficiale interna $T_{par,int}$	Temperatura media superficiale esterna $T_{par,est}$	Flusso termico q	Conduttanza Λ
	[m]	[°C]	[°C]	[W·m ⁻²]	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]
M1	0,28	20	11,39	38,32	4,45
M2	0,60	20	6,04	17,16	1,23
M3	0,60	20	6,55	15,35	1,14
M4	0,66	20	5,24	12,69	0,86

Tab. 5.2 Risultati delle simulazioni dei modelli Comsol.

In (Fig. 5.6) si riportano le distribuzioni superficiali del flusso termico ottenute sezionando il dominio mediante un piano parallelo al piano xz e passante per la coordinata $y=smy/2+0,05m$. Si osserva un comportamento analogo a quello osservato in Fig. 5.5: la tipologia M1 presenta una distribuzione superficiale uniforme del flusso termico, nella tipologia M2 i conci diatoni presentano un incremento di flusso termico pari al 55% rispetto ai conci regolari circostanti. Nelle tipologie M3 e M4, in corrispondenza dei conci semi-diatoni si assiste a incrementi che oscillano dal 50% al 120% rispetto ai conci regolari circostanti, toccando picchi di flusso termico pari a 40 Wm^{-2} nella configurazione M4.

Infine, è stato calcolato il flusso termico medio sulla superficie interna e la conduttanza termica. I risultati, espressi in (Tab. 5.2), mostrano come la muratura nella configurazione M1 presenti valori di flusso termico medio e conduttanza termica nettamente più elevati rispetto agli altri casi. Questo è causato dallo spessore ridotto della sezione trasversale e dall'assenza di elementi di discontinuità che fungono da strato a conducibilità ridotta. Nelle configurazioni M2 e M3 si presentano analoghe prestazioni termiche globali, sebbene il flusso termico medio nella configurazione M3 sia inferiore del 10,5% rispetto alla configurazione M2.

Poiché nei modelli i conci hanno una conducibilità termica maggiore della malta, la presenza di conci diatoni nelle murature peggiora le prestazioni termiche, poiché genera un ponte termico dovuto all'omogeneità materica derivante dalla presenza dei diatoni passanti in corrispondenza della sezione trasversale. Invece, nel caso di conci semi-diatoni si riscontra un miglioramento delle prestazioni termiche, in quanto la discontinuità strutturale costituisce una resistenza alla diffusione termica conduttiva. Sicuramente, la configurazione M4 presenta prestazioni termiche migliori rispetto a tutti i casi precedenti; si ha un effetto dovuto al maggior spessore della sezione trasversale, inoltre, la successione tra conci e malta consente di ostacolare l'effetto dei ponti termici in prossimità dei conci semi-diatoni.

I risultati più significativi confermano che se le caratteristiche termo-fisiche della muratura monostrato dipendono soprattutto dal tipo di materiale lapideo naturale impiegato, quelle delle murature a due strati con presenza di conci diatoni sono influenzate dai conci passanti poiché si genera l'effetto di ponte termico tra le due facce della muratura. Un effetto simile si ottiene anche per le murature nella quali sono presenti i semi-diatoni, ma questo effetto è ridotto dalla discontinuità materica che si genera all'interno della sezione trasversale. Infine, una notevole riduzione della trasmittanza è riferibile sia alle proprietà termiche della malta che alla presenza di discontinuità materica che si genera nelle murature pluristrato.

5.2.2 Modellazione parametrica e termofisica di murature caotiche

Durante il periodo di ricerca estero svolto a Parigi presso l'*École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais* all'interno del laboratorio GSA (*Laboratoire Géométrie*

Structure Architecture) è stato possibile approfondire e definire la modellazione parametrica e termofisica delle murature caotiche.

La modellazione parametrica di una muratura caotica fatta da elementi di forma irregolare è più complessa rispetto alla modellazione di una muratura regolare, dove si possono utilizzare forme di geometria elementare per la definizione del modello.

Per realizzare il modello parametrico di muratura caotica, è stato utilizzato il plug-in *Grasshopper* (Fig. 5.7) nel modellatore 3D *Rhinceros*. La modellazione si basa sulla definizione di parametri che possono variare all'interno di certi *range*: la dimensione della sezione trasversale, il numero di elementi all'interno della sezione, lo spessore della malta all'interno della sezione e sulle pareti esterne.

Il modello geometrico più appropriato per la simulazione di una muratura si è definito a partire da un contorno rettangolare all'interno del quale sono stati precisati il numero di punti, che corrispondono al numero di conci presenti nella sezione trasversale del muro. Successivamente, a partire dai punti definiti si è costruita una tassellatura del tipo Voronoi, che si basa su modelli matematici versatili ed è capace di suddividere lo spazio in poliedri mutualmente disgiunti (Mumm 2004). Ottenuta la tassellatura si è definito lo spessore della malta con una semplice operazione di offset.

Infine, la geometria creata parametricamente è stata esportata in un file di testo contenente le coordinate geometriche di ogni vertice dei poligoni.

Uno degli obiettivi che hanno mosso questo approfondimento è stato quello di automatizzare il processo di simulazione termica, per la valutazione delle prestazioni energetiche di diversi tipi murari.

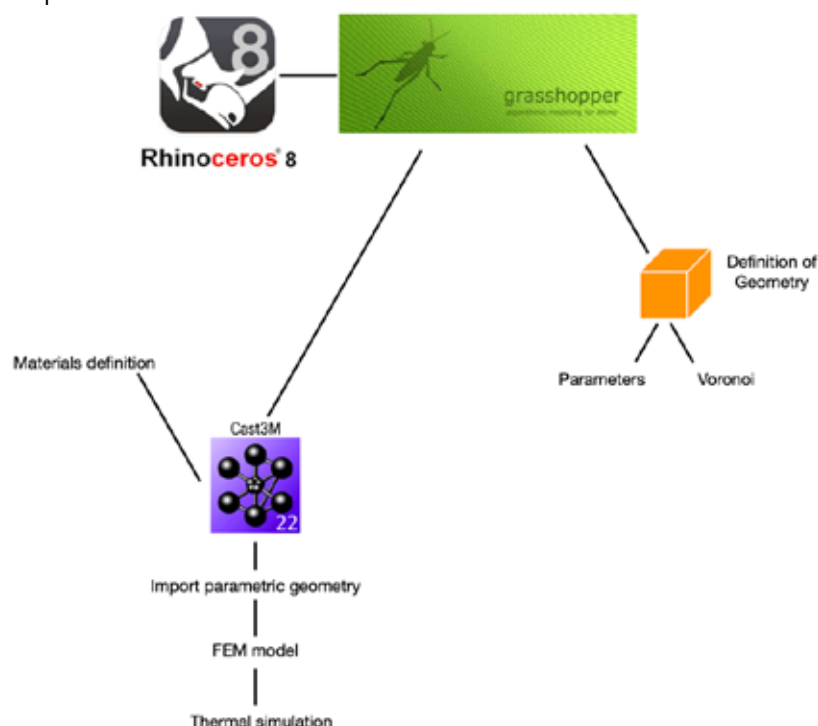


Fig. 5.7 Modellazione parametrica Grasshopper.

Materiale	$\rho_{b,dry}$	C_p	λ
	[kg m ⁻³]		[Wm ⁻¹ K ⁻¹]
Quarzarenite (laboratorio)	2.494,98	1.000	4,456
Malta di calce o di calce e cemento [UNI 10351]	1.800	1.000	0,9

Tab. 5.3 Materiali impiegati nel modello Cast3m.

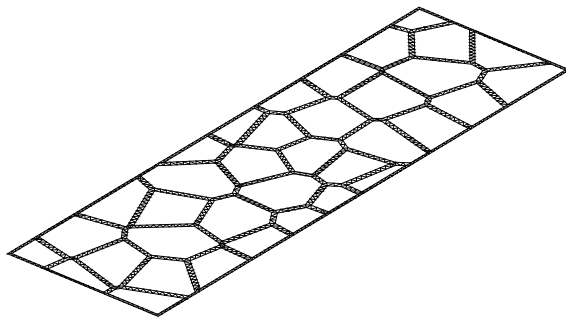


Fig. 5.8 Mesh degli elementi lapidei in Cast3m.

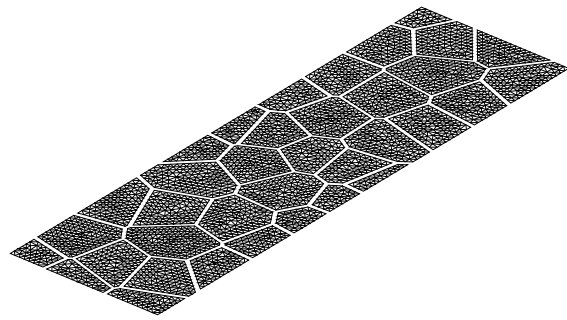


Fig. 5.9 Mesh della malta in Cast3m.

Infatti, si è definito un processo informato che ha permesso di leggere le diverse geometrie precedentemente create su *Grasshopper* e di creare i *mesh* in maniera automatica su *Cast3m* (Nougayrede 2023).

Successivamente si è svolta l'analisi termica utilizzando un codice di calcolo *Cast3m* definito dalla co-tutor Prof. Zarcone e implementato durante il periodo di ricerca all'estero (Zarcone and Brocato 2019).

Cast3m è un codice di calcolo agli elementi finiti multidimensionale che permette l'interazione fra più domini fisici, come ad esempio il termico e il meccanico, e consente di effettuare analisi estremamente accurate. *Cast3m* è un applicativo open source che impiega il linguaggio di programmazione "Gibiane" per la scrittura del codice e non ha un'interfaccia grafica. Nella prima fase sono state definite le variabili e i dati di input (Tab.5.3), quali le proprietà termofisiche dei materiali (λ, ρ, c_p) ricavate in laboratorio, come descritto nel cap. 4.

Successivamente è stata importata la geometria definita in *Grasshopper* definendo i confini geometrici del muro al fine di impostare le condizioni al contorno attraverso l'individuazione delle linee L1, L2, L3, L4.

Nella seconda fase si è proceduto alla definizione dei due *mesh* di calcolo che rappresentano: il primo gli elementi lapidei (Fig. 5.8) e il secondo la malta interposta tra gli elementi (Fig. 5.9). Il mesh è stato impostato con una densità pari a 0,02; più è fitto il *mesh*, maggiore è la precisione di calcolo; dunque, i tempi di calcolo aumentano.

Definita la geometria si è passati alla fase successiva di calcolo termico.

Il modello matematico considerato impiega un generico problema di trasmissione del calore, con un dominio governato dalle equazioni del calore e dalla legge di *Fourier* (Eq. 5.8):

$$\begin{cases} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(q) = f \\ q = -\lambda \text{grad}(T) \end{cases} \quad (5.8)$$

T è la temperatura

Q è il flusso di calore

t è il tempo

f è la capacità termica generato da una fonte di calore

ρ , è la densità

c_p è il calore specifico

λ è la conducibilità termica

$$q = h(T_{air} - T_{wall}) \quad (5.9)$$

T_{air} è la temperatura dell'aria

T_{wall} è la temperatura di parete

q è il flusso termico convettivo

h è il coefficiente di scambio termico convettivo

La discretizzazione spaziale delle equazioni differenziali di governo su un mesh di elementi finiti può essere ricondotta a un sistema di equazioni algebriche così definito:

$$\underline{\underline{C}} + \dot{T} + \left(\underline{\underline{K}} + \underline{\underline{H}} \right) \underline{T} = \underline{Q} + \underline{Q_C} \quad (5.10)$$

$\dot{T}$ è la temperatura ai nodi

$\underline{T}$ è la derivata temporale della temperatura ai nodi

$\underline{Q}$ è il flusso termico integrato ai nodi

$\underline{\underline{C}}$ è la matrice di capacità termica

$\underline{\underline{K}}$ è la matrice di conducibilità

$\underline{\underline{H}}$ è la matrice dei coefficienti convettivi

$\underline{Q_C}$ è il termine che rappresenta hT_{air}

In condizioni di stato stazionario l'algoritmo utilizzato risolve l'equazione di *Fourier* mediante il metodo agli elementi finiti. Sono state impostate le seguenti condizioni al contorno:

- temperatura interna pari a 293 K;
- temperature esterna pari a 313 K;
- coefficiente di scambio termico convettivo per la parete esterna pari a $25 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (secondo la norma UNI EN ISO 6946:2018);
- coefficiente di scambio termico convettivo per la parete interna pari a $7,7 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ (secondo la norma UNI EN ISO 6946:2018);
- condizioni di adiabaticità per le superfici inferiore e superiore del muro.

Nella simulazione in regime dinamico, il valore di temperatura dell'aria interna è stato impostato ad un valore costante e pari a 20°C , supponendo un impianto di climatizzazione ideale, capace di mantenere in ogni istante le condizioni imposte.

L'obiettivo della simulazione è la valutazione della risposta della muratura ad una sollecitazione che presenta una marcata variazione dinamica; per questo motivo, i parametri ambientali esterni sono caratterizzati da variazioni di 20 K nell'arco di una giornata. Per tenere conto di queste oscillazioni, è stata impostata una funzione sinusoidale che caratterizza l'andamento temporale della temperatura esterna. Infine, sono stati mantenuti gli stessi coefficienti di scambio termico convettivo adottati per la simulazione in regime stazionario.

La simulazione dinamica è stata impostata per 4 giorni, pari a 96 ore.

I risultati del primo calcolo sono visibili nelle mappe termiche della sezione costruttiva (Fig. 5.10), mentre in (Fig. 5.11) si possono leggere i flussi di calore all'istante t .

Il profilo di temperatura (Fig. 5.12) di parete interna mostra uno sfasamento temporale medio di circa 2,5 ore, dovuto all'inerzia termica della muratura.

La temperatura di parete interna mostra un andamento monotono crescente, pervenendo ad un plateau finale, prossimo alla temperatura dell'aria interna. L'andamento crescente è il risultato di un bilancio energetico netto negativo (secondo la convenzione adottata), entrante dall'esterno verso l'interno.

Come previsto, la temperatura di parete interna non manifesta un andamento oscillatorio, ciò è dovuto all'effetto della diffusività termica della parete che smorza e attenua l'onda termica che si può registrare invece sulla parete esterna.

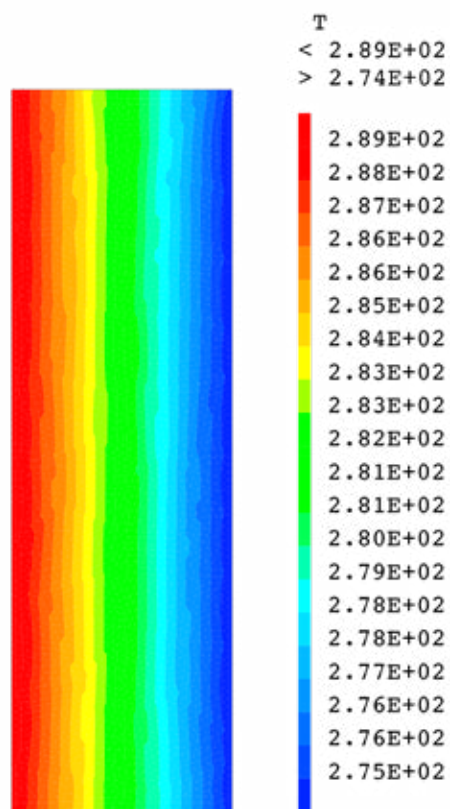


Fig. 5. 10 Mappa di temperature.

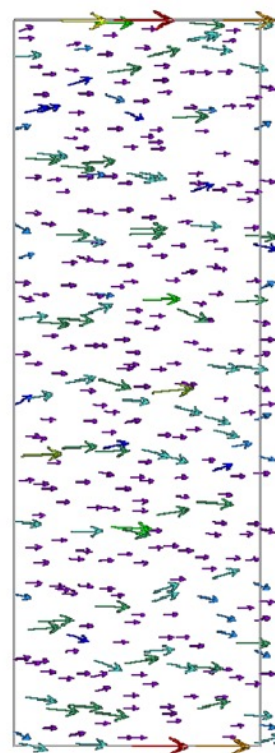


Fig. 5. 11 Mappa flusso termico.

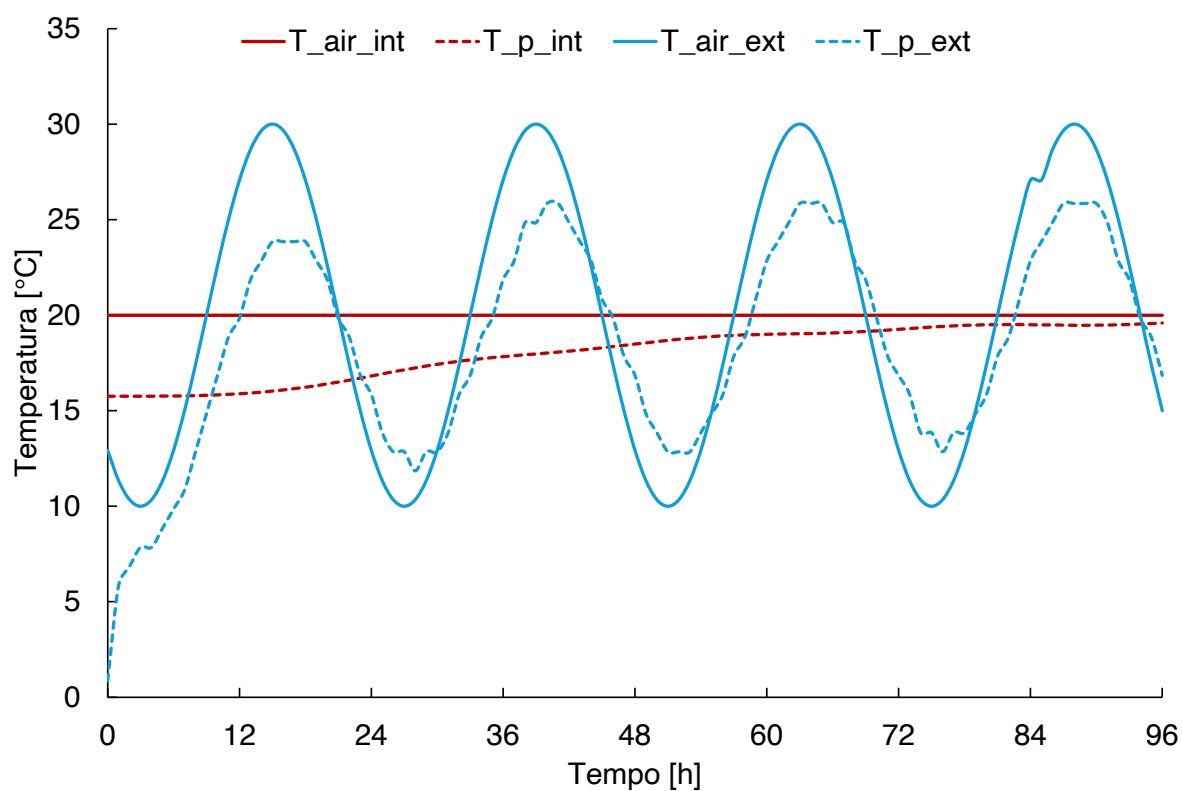


Fig. 5. 12 Profilo di temperatura di parete interna.

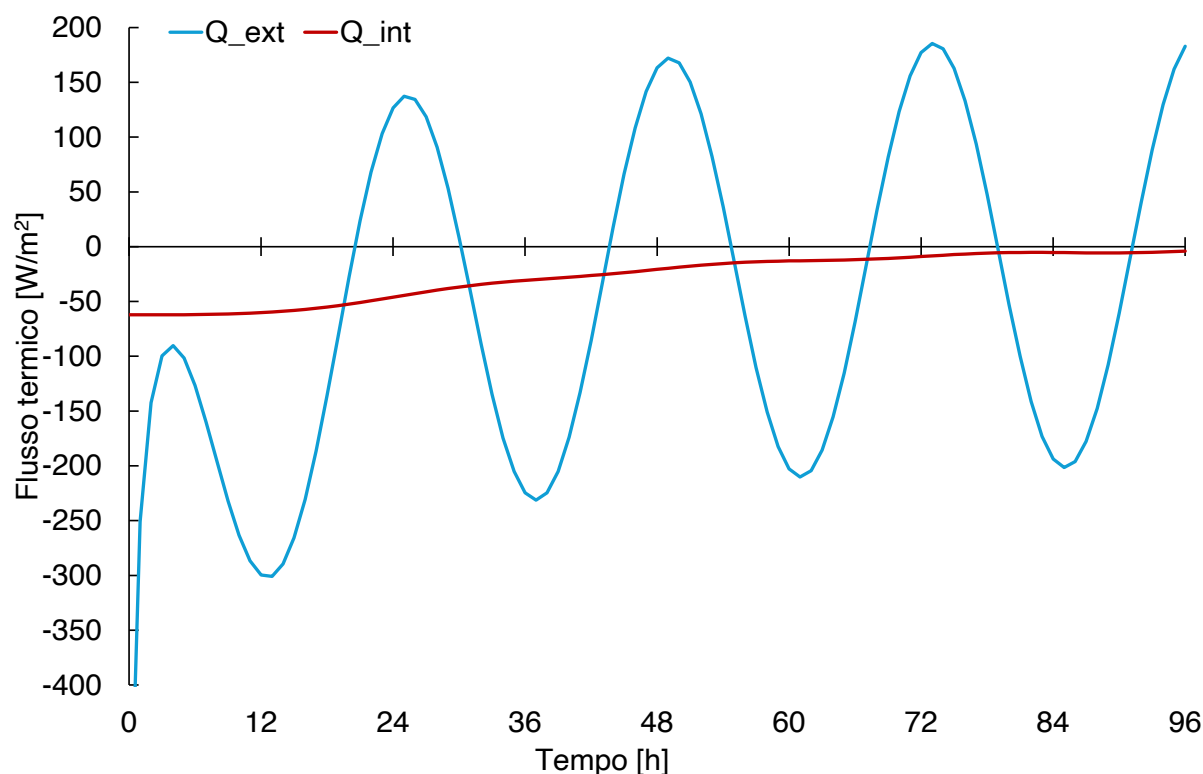


Fig. 5. 13 Andamento temporale del flusso termico.

In Fig. 5.13 è riportato l'andamento temporale del flusso termico per la parete esterna e per la parete interna. Il flusso di parete interna presenta lo stesso andamento asintotico precedentemente riscontrato per la temperatura di parete interna, in coerenza con esso. L'andamento del flusso di parete esterna mantiene la stessa ampiezza di oscillazione, mentre i valori assoluti di temperatura tendono a crescere in maniera monotona. Questo comportamento è facilmente osservabile sui picchi che presentano un valore assoluto crescente per ogni giorno di simulazione. Considerato che la temperatura di parete esterna rimane invariata, questo comportamento è da attribuirsi all'effetto dinamico di crescita della temperatura interna.

5.3 GENERAZIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO FEM DI MURATURA CAOTICA

Il modello digitale ottenuto su *Cast3m* ha permesso di ottenere dei dati preliminari del comportamento termofisico della muratura caotica. In particolare, ha evidenziato le disomogeneità nella distribuzione termica dovute alle successioni irregolari di conci di pietra e malta. Questa irregolarità rappresenta una variabile dirimente per l'analisi delle prestazioni energetiche delle murature, sebbene le tipologie murare indagate seguano dei pattern ben identificati.

La geometria 2D è stata modellata parametricamente utilizzando il software *Rhinoceros* 8 e *Grasshopper* che utilizza il linguaggio di programmazione visiva. La geometria è stata modificata opportunamente per riprodurre uno dei casi indagati nella campagna sperimentale descritta nel cap. 5, nello specifico una muratura di tipo SM3 di Petralia Sottana. La geometria è stata esportata da *Rhinoceros* e successivamente importata su *Comsol Multiphysics* per costruire un modello FEM da calibrare mediante i dati sperimentali.

Materiale	$\rho_{b,dry}$	C_p	λ
	[kg m ⁻³]		[Wm ⁻¹ K ⁻¹]
Quarzarenite (laboratorio)	2.494,98	1.000	4,456
Malta di calce o di calce e cemento [UNI 10351]	1.800	1.000	0,9

Tab. 5.4 Materiali impiegati nel modello Comsol.

In seguito alla definizione della geometria è stato riprodotto il modello fisico-matematico, scegliendo il pacchetto di scambio termico nei solidi in regime stazionario e dinamico. I parametri termofisici impostati sono riportati in Tab. 5.4.

La metodologia di validazione del modello ha previsto due fasi. Inizialmente, dall'osservazione dei dati sperimentali è stato individuato un set di dati in cui il trend dinamico del flusso termico ha oscillato in maniera costante sullo stesso valore, presumendo dunque la semi-stazionarietà del fenomeno.

Da questo intervallo selezionato sono stati scelti due valori di temperatura di parete, uno per la superficie esterna e uno per la superficie interna. Quindi è stata eseguita la risoluzione del problema stazionario impostando delle condizioni al contorno di Dirichlet (ovvero impostando le temperature di parete).

La simulazione ha permesso di ottenere la distribuzione di temperatura all'interno del dominio in condizioni stazionarie. Nella seconda fase, questo set di equazioni è stato utilizzato per imporre le condizioni iniziali per la risoluzione del problema dinamico. L'imposizione di una distribuzione termica fisicamente coerente, infatti, permette un migliore condizionamento matematico del problema. In questo caso sono state imposte delle condizioni al contorno di tipo misto *Dirichlet-Neumann*, impostando due serie storiche rilevate sperimentalmente: la temperatura di parete per la superficie esterna e il flusso termico per la superficie interna.

Il trend dinamico di temperatura di parete interna ottenuto dalla simulazione è stato confrontato con l'analogo sperimentale. I parametri termofisici e i valori di flusso termico sperimentale dato in input al modello sono stati oggetto di calibrazione al fine di ottenere una corrispondenza fra i dati sperimentali e i dati ottenuti dal modello FEM virtuale.

Sono state selezionate due sequenze di 72 ore ciascuna in cui è stata verificata la validazione del modello. In Fig. 5.14 è riportato il confronto fra dati sperimentali e risultati di simulazione per la prima sequenza temporale considerata, il parametro di confronto è la temperatura di parete sulla superficie interna. Il risultato ottenuto dalla calibrazione del modello ha permesso di ottenere una corrispondenza molto precisa fra i due profili dinamici; infatti, lo scarto assoluto è contenuto tra 0 e 0.3 K, inoltre il modello riproduce fedelmente anche l'andamento dinamico misurato, dimostrando dunque anche la corrispondenza delle caratteristiche inerziali della muratura.

Analogamente al caso precedente, in Fig. 5.15 è riportato il confronto per il secondo intervallo temporale selezionato.

Anche in questo caso è possibile osservare un ottimo risultato in termini di corrispondenza fra dati sperimentali e risultati di simulazione, con uno scarto assoluto inferiore a 0.35 K. In questo caso, la tendenza iniziale (dall'ora 178 all'ora 202) che presenta un lieve scostamento fra i due trend assume un profilo più corretto nell'intervallo di tempo successivo.

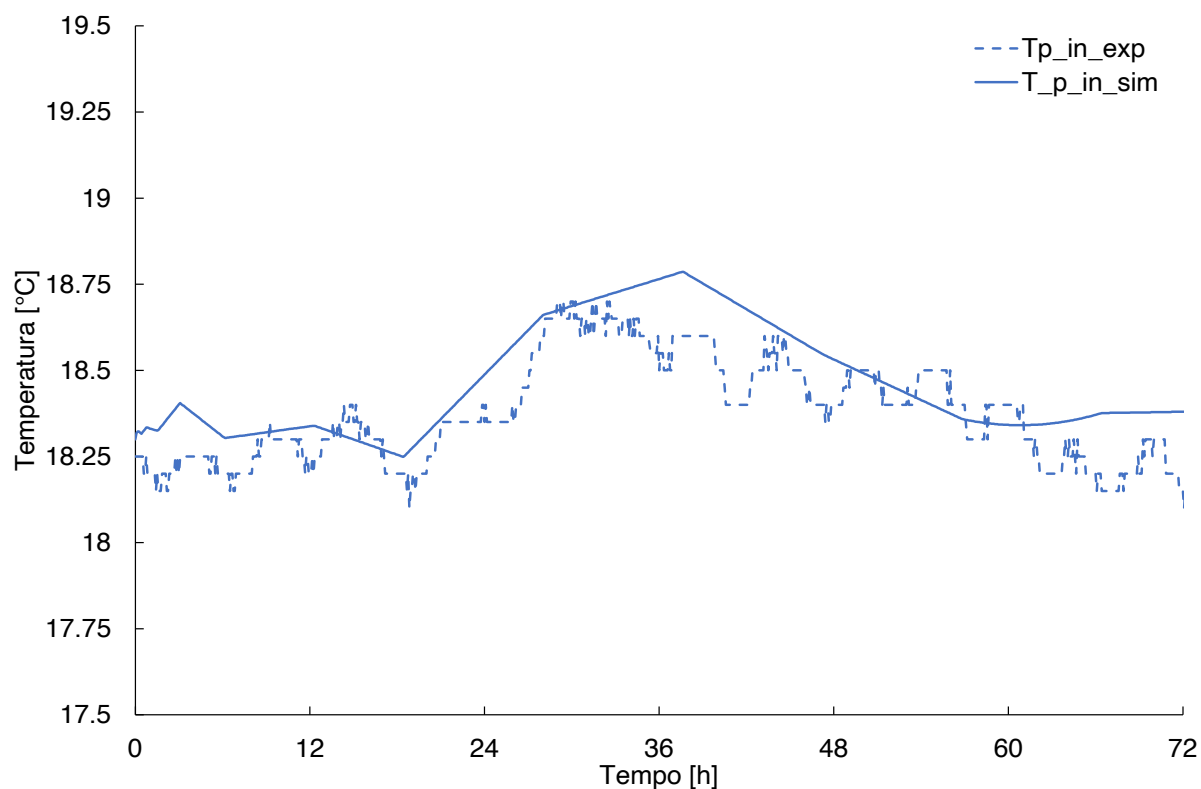


Fig. 5. 14 Validazione del modello FEM - confronto fra dati sperimentali e risultati della simulazione per la temperatura di parete interna nel primo intervallo temporale selezionato.

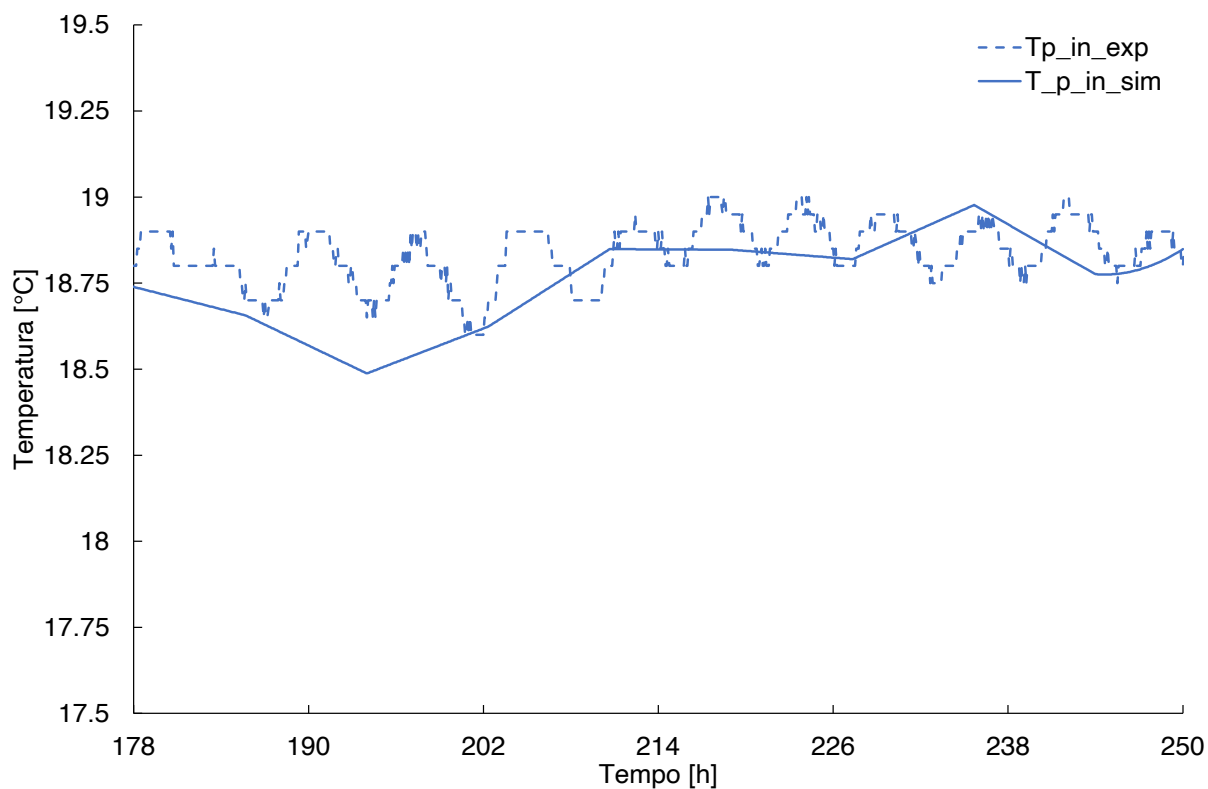


Fig. 5. 15 Validazione del modello FEM - confronto fra dati sperimentali e risultati della simulazione per la temperatura di parete interna nel primo intervallo temporale selezionato.

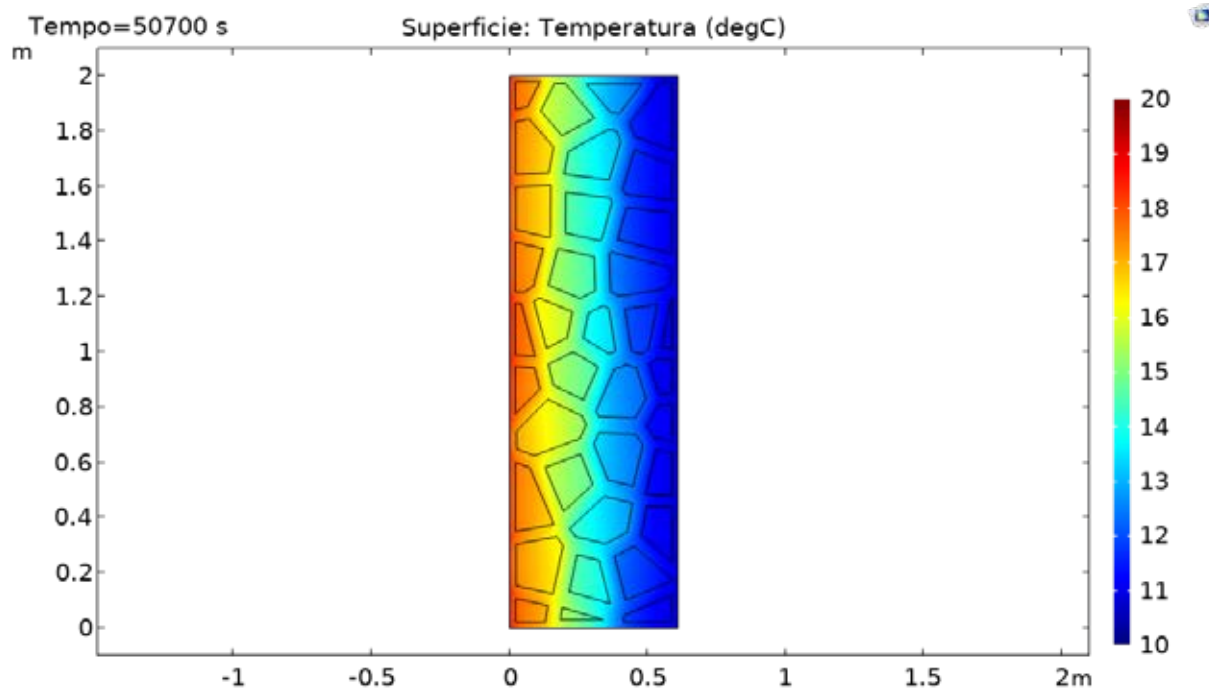


Fig. 5. 16 Mappa termica a t=50700.

I risultati ottenuti confermano la validazione del modello che è pronto per essere impiegato per effettuare simulazioni con condizioni al contorno differenti rispetto a quelli sperimentali, aprendo dunque il campo a una valutazione più completa e globale delle prestazioni termofisiche della muratura selezionata.

Dai risultati della simulazione è stata estratta la distribuzione termica nel dominio per due istanti di tempo definiti appartenenti ai due intervalli temporali considerati. In particolare, la Fig. 5.16 è riferita all'ora 14 e la Fig. 5.17 all'ora 211. In entrambe è possibile notare gli effetti di disomogeneità di distribuzione termica dati dalla geometria del dominio e dalle differenze termofisiche dei materiali costituenti la muratura.

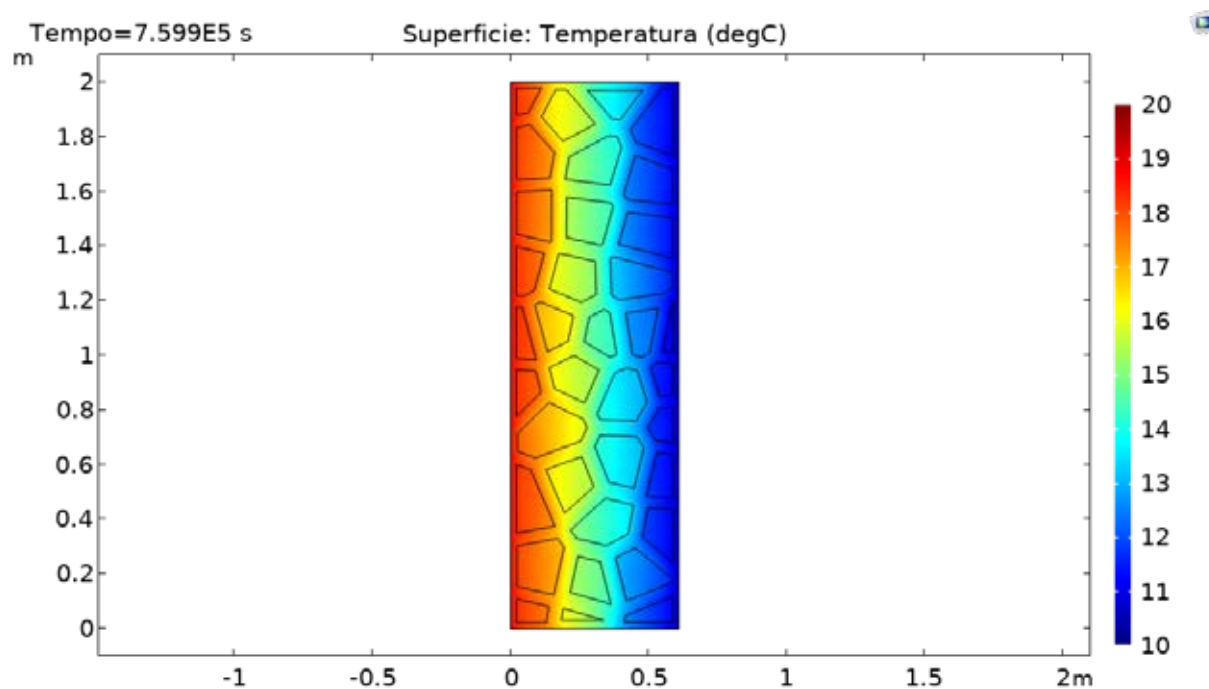


Fig. 5. 17 Mappa termica a t=759900.

La pietra, infatti, presenta valori di conducibilità più alti della malta, causando la distorsione del campo di temperatura e delle linee di flusso. Nel primo caso, inoltre, le temperature medie nel dominio sono inferiori rispetto al secondo caso, ma in entrambi è possibile notare il fenomeno di distorsione precedentemente descritto.

Per gli stessi istanti di tempo selezionati è stato estratto il profilo di temperatura sulla sezione ricavata tagliando il dominio a $y=1.1$ m.

I profili di temperatura per la sezione considerata, riportati in Fig. 5.18, permettono di valutare con precisione la disomogeneità della distribuzione di temperatura dovuta alle successioni di materiale diverso. L'andamento "a gradini" riscontrabile in entrambi gli istanti di tempo considerata è ascrivibile alla conformazione stratigrafica. In particolare, i segmenti più inclinati rappresentano il materiale con conducibilità maggiore (pietra), mentre i segmenti meno inclinati rappresentano il materiale meno conduttivo (malta).

5.4 CONSIDERAZIONI

In questo capitolo sono stati riportati dei modelli digitali di murature storiche per valutarne le prestazioni energetiche. In assenza di validazione sperimentale i modelli digitali si limitano a fornire dati di tipo qualitativi.

Un modello FEM ben calibrato è infatti in grado di fornire informazioni attendibili sulle prestazioni termiche delle murature, che possono essere utilizzate per progettare interventi di miglioramento energetico, di recupero e conservazione. La calibrazione permette di ottenere una buona corrispondenza tra il modello digitale e la muratura reale, in modo tale che i risultati derivanti dalle simulazioni termiche siano validati e verificabili, anche in assenza di misurazioni in situ dirette.

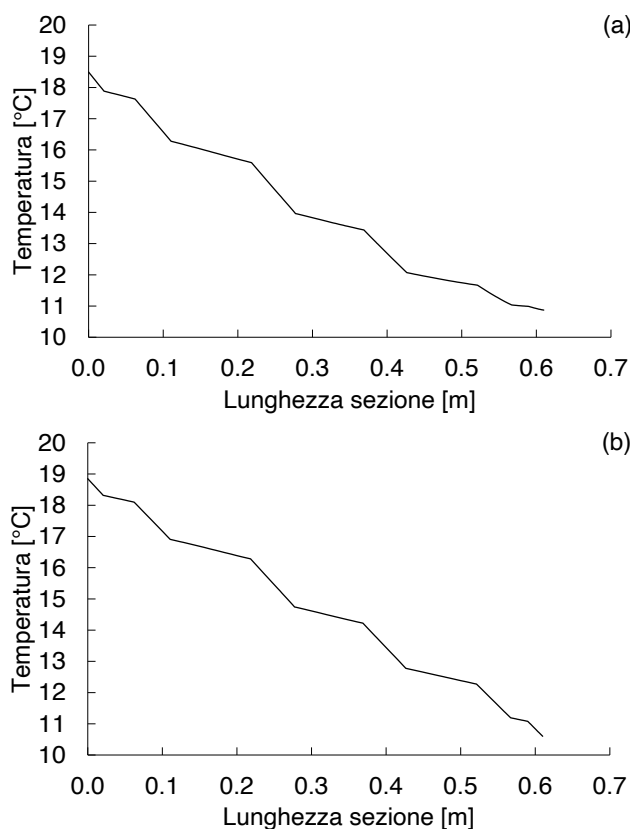


Fig. 5. 18 Profili di temperatura per gli istanti di tempo considerati. a) $t=14$ - b) $t=211$.

L'uso di modelli FEM calibrati rappresenta un passo avanti significativo nella valutazione delle proprietà termiche delle murature storiche, in quanto consente di superare alcune delle difficoltà pratiche e operative legate all'applicazione di sensori termici in situ. Le problematiche riscontrate nell'applicazione dei sensori sul campo sono infatti notevolmente complesse, a causa della necessità di posizionare correttamente i dispositivi di misura e di gestire variabili ambientali difficilmente controllabili. In questo contesto, i modelli numerici possono fornire un'alternativa efficace, in grado di stimare le proprietà termiche delle murature anche in assenza di prove dirette, riducendo i tempi e i costi di intervento.

Un altro aspetto da considerare riguarda le semplificazioni geometriche necessarie per la creazione dei modelli FEM. Poiché la geometria reale delle murature storiche può essere particolarmente complessa, la creazione di modelli digitali implica inevitabilmente una semplificazione della forma e delle caratteristiche strutturali. Sebbene tale semplificazione possa portare a una parziale approssimazione della geometria della muratura e, di conseguenza, delle sue proprietà termiche, è importante sottolineare che, nel complesso, l'accuratezza dei modelli FEM calibrati non viene compromessa. Le simulazioni termiche ottenute tramite questi modelli si sono rivelate sufficientemente affidabili per fornire stime dettagliate delle prestazioni energetiche delle murature.

Un potenziale sviluppo futuro dell'analisi dei tipi murari potrebbe consistere nell'integrazione di questi ultimi all'interno di un sistema di modellazione *Building Information Modeling* (BIM), che consentirebbe una gestione ancora più efficiente delle informazioni relative alle murature storiche. La creazione di pacchetti BIM permetterebbe di variare facilmente non solo la configurazione geometrica e la forma degli elementi, ma anche i materiali utilizzati e le proprietà termiche ad essi associate, supportando una progettazione dinamica e adattiva. Inoltre, i modelli FEM creati potrebbero essere ampliati e potenziati al fine di essere impiegati anche per la verifica delle sollecitazioni meccaniche che interessano le murature storiche, offrendo così uno strumento completo per la valutazione sia delle prestazioni termiche che di quelle meccaniche. In tal modo, le simulazioni strutturali potrebbero essere utilizzate per indagare il comportamento delle murature sotto carichi statici e dinamici, fornendo informazioni utili per la progettazione di interventi di consolidamento che non solo rispondano alle esigenze energetiche, ma che siano anche in grado di garantire la sicurezza e la stabilità delle strutture nel tempo.

In sintesi, le attività di caratterizzazione sperimentale e modellazione numerica descritte in questo capitolo forniscono uno strumento di indagine utile sia alla comprensione delle prestazioni termiche delle murature storiche sia alla progettazione di interventi di recupero compatibili.

Bibliografia

Akkurt GG, Aste N, Borderon J, et al (2020) Dynamic thermal and hygrometric simulation of historical buildings: Critical factors and possible solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 118:109509. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.109509>

Binda L, Cantini L, Fernandes FM, Tedeschi C (2004) Diagnostic investigation on the historical masonry structures of a castle by the complementary use of non destructive techniques

Bottino-Leone D, Larcher M, Troi A, Grunewald J (2021) Hygrothermal characterization of a fictitious homogenized porous material to describe multiphase heat and moisture transport in massive historic walls. *Constr Build Mater* 266:121497. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.121497>

Gutland M, Bucking S, Santana Quintero M (2022) Hygrothermal modelling of historic rubble masonry walls: Accounting for geometric and compositional variability. *Journal of Building Engineering* 48:. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103929>

Huerto-Cardenas HE, Leonforte F, Aste N, et al (2020) Validation of dynamic hygrothermal simulation models for historical buildings: State of the art, research challenges and recommendations. *Build Environ* 180

Incropera FP, DeWitt DP (2007) Fundamentals of heat and mass transfer - Google Böcker. 997

Mumm M (2004) Voronoi Diagrams. *The Mathematics Enthusiast* 1:44–55. <https://doi.org/10.54870/1551-3440.1009>

Nagy B, Stocker G (2019) Numerical analysis of thermal and moisture bridges in insulation filled masonry walls and corner joints. *Periodica Polytechnica Civil Engineering* 63:446–455. <https://doi.org/10.3311/PPci.13593>

Nardi I, Lucchi E, de Rubeis T, Ambrosini D (2018) Quantification of heat energy losses through the building envelope: A state-of-the-art analysis with critical and comprehensive review on infrared thermography. *Build Environ* 146:190–205. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.09.050>

Negri S, Aiello MA (2021) High-resolution GPR survey for masonry wall diagnostics. *Journal of Building Engineering* 33:101817. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101817>

Nougayrede P (2023) Analyse et conception des structures clavées : approches théoriques et investigations numériques. Paris Est

Pomada M, Adamus J, Boruszewski A (2022) Numerical and Experimental Analysis of Heat Flow at Window-to-Wall Interface. *Energies (Basel)* 15:. <https://doi.org/10.3390/en15103837>

Posani M, Veiga R, de Freitas VP (2023) Thermal renders for traditional and historic masonry walls: Comparative study and recommendations for hygric compatibility. *Build Environ* 228:. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109737>

Schoplocher DP, Ettengruber S, Steffens O (2023) Improvements for building-performance simulations by a comparative finite-element method analysis. *Energy Build* 278:112563. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2022.112563>

Sousa LC, Sousa H, Castro CF, et al (2014) A new lightweight masonry block: Thermal and mechanical performance. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 14:160–169. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.08.003>

UNI 10351:2021 Materiali da costruzione - Proprietà termoigrometriche - Procedura per la scelta dei valori di progetto. <https://store.uni.com/uni-10351-2021>. Accessed 9 Aug 2024

UNI EN 1745:2020 Muratura e prodotti per muratura - Metodi per determinare le proprietà termiche. <https://store.uni.com/uni-en-1745-2020>. Accessed 5 Feb 2023

UNI EN ISO 6946:2018 Componenti ed elementi per edilizia - Resistenza termica e trasmittanza termica - Metodi di calcolo. <https://store.uni.com/uni-en-iso-6946-2018>

UNI ISO 9869-1:2015 Isolamento termico - Elementi per l'edilizia - Misurazione in situ della resistenza termica e della trasmittanza termica - Parte 1: Metodo del termoflussimetro. <https://store.uni.com/uni-iso-9869-1-2015>. Accessed 9

Aug 2024

UNI/TR 11552:2014 Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici - Parametri termofisici. <https://store.uni.com/uni-tr-11552-2014>. Accessed 15 Mar 2023

Zarcone R, Brocato M (2019) Dynamic Characterization of Thermal Bridges in Historic Balconies in Palermo. In: Proceedings of BSA 2019, the Fourth IBPSA-Italy conference on "Building Simulation Applications"

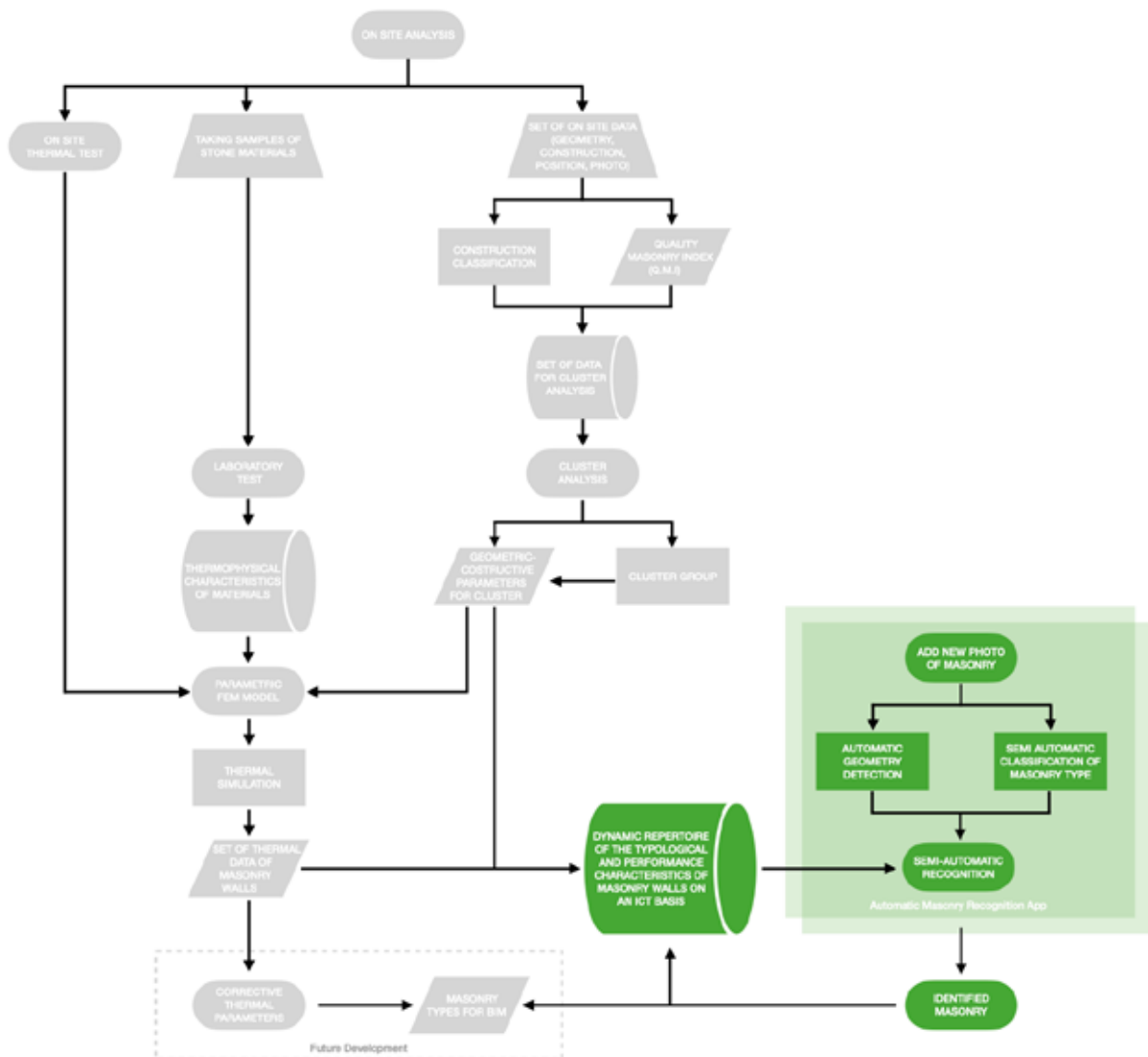
COMSOL - Software for Multiphysics Simulation. <https://www.comsol.com/>. Accessed 5 Feb 2023a

Buildings – Analysis - IEA. <https://www.iea.org/reports/buildings>. Accessed 5 Feb 2023b

CAPITOLO 6

RICONOSCIMENTO SEMI-AUTOMATICO DI TIPI MURARI

Semi-Automatic recognition of masonry wall types



Abstract

Chapter 6 focuses on the semi-automatic recognition of masonry types, highlighting the intersection of digital technology and cultural heritage preservation. The chapter begins by emphasizing the significant potential of digital transition for Europe, suggesting that the development of new technologies can foster a more inclusive, open, and democratic society. This transition is not only aimed at promoting a dynamic and sustainable economy but also at addressing pressing issues such as climate change.

The chapter outlines the objectives of the research, which includes the development of a method to verify the mechanical properties of various masonry configurations using real images. It discusses the importance of image segmentation techniques, particularly the Segment Every Grain (SEGM) model, which enhances the geometric representation of masonry structures. This improvement facilitates the identification of mortar joints and blocks, thereby aiding in the analysis and conservation of these historical structures.

A key focus of the chapter is the establishment of an automatic recognition system for masonry types.

The chapter details the initial phase of developing a semi-automatic recognition system, which involves image segmentation methods. This process is crucial for identifying regions of interest (ROI) within digital images, allowing for a more accurate analysis of masonry types. Several strategies for recognizing historical masonry are discussed, aiming to identify solutions that enhance performance without compromising the identity and cultural significance of the structures.

In addition to technical advancements, the chapter also addresses the broader implications of these developments for cultural heritage. It highlights the need for compatible intervention strategies that respect the historical context while improving structural performance. The integration of digital tools in the analysis and conservation of masonry not only preserves the physical integrity of these structures but also ensures that their cultural narratives are maintained for future generations.

Overall, this chapter presents a comprehensive overview of the methodologies and technologies involved in the semi-automatic recognition of masonry types, underscoring the importance of digital innovation in the field of architectural heritage preservation.

Furthermore, Chapter 6 defines the object of the Italian and international patent request.

La transizione digitale rappresenta un enorme potenziale di crescita. Lo sviluppo di nuove tecnologie, infatti, dovrebbe contribuire a promuovere una società più inclusiva, aperta e democratica, consentendo lo sviluppo di un'economia dinamica e sostenibile, contribuendo anche a combattere i cambiamenti climatici, purtroppo già in atto. Transizione digitale e transizione verde sono al centro delle politiche europee contemporanee. Il patrimonio culturale – rappresentativo della storia, della cultura e dell'eredità di una determinata comunità/civiltà – è minacciato, oggi più che mai, da fattori come i cambiamenti climatici, l'inquinamento, le guerre, che ne determinano il rapido degrado, l'insorgere di gravi dissesti quando non addirittura la sua stessa irreversibile scomparsa.

La digitalizzazione del patrimonio culturale è un processo fondamentale per tramandare alle generazioni future i beni materiali e immateriali, garantendo così la loro conservazione al di là dei possibili eventi climatici -anche catastrofici-, delle guerre, dell'incuria -che spesso conduce alla perdita definitiva delle tracce più significative del passato- o, semplicemente, dell'oblio della memoria.

Attraverso il processo di digitalizzazione che prevede la riproduzione dei beni in formato digitale è possibile assicurarne la documentazione, conservarne la memoria, condividerli, renderli accessibili a tutti attraverso appositi dispositivi *hardware* e *software*. L'aspetto dell'accessibilità e della condivisione del patrimonio culturale, fatto di beni materiali ed immateriali, è uno dei principali vantaggi offerto dalla digitalizzazione, che consente di rendere facilmente accessibile (se vogliamo riferirci in particolare al patrimonio architettonico) luoghi impervi o impraticabili a causa di dislivelli e/o salti di quota difficilmente superabili con la semplice installazione di rampe idonee al superamento delle cosiddette "barriere architettoniche".

Per il patrimonio architettonico, la digitalizzazione può prevedere la creazione di modelli digitali (tramite l'acquisizione di nuvole di punti, di immagini fotografiche, nonché la creazione di modelli 3D) o di prodotti di realtà virtuale capaci di creare esperienze interattive e immersive. Da un punto di vista prettamente scientifico, la digitalizzazione del patrimonio architettonico rappresenta, quindi, una grande opportunità di conoscenza approfondita, di divulgazione della stessa e di innovazione finalizzate alla conservazione e valorizzazione delle murature e più in generale dei beni architettonici che rappresentano la traccia più tangibile della storia di una comunità.

La conoscenza dei manufatti architettonici, dei materiali e delle tecniche costruttive che li connotano, necessita di competenze specifiche proprie delle figure tecniche degli ingegneri e degli architetti, ed è sempre frutto dell'analisi visiva diretta del manufatto, del rilievo materico costruttivo e dall'analisi della letteratura scientifica.

Il continuo sviluppo delle tecnologie informatiche permette di innovare la conoscenza (e la fruizione) dell'architettura attraverso un "approccio digitale" che può consentire anche la divulgazione di informazioni (scientifiche) correlate agli organismi edilizi, agli elementi tecnici, alle tecniche costruttive, alle maestranze del luogo che hanno adottato soluzioni originali per la loro realizzazione, valorizzandone le specificità culturali.

In quest'ambito di ricerca, la tesi propone un sistema di riconoscimento semi-automatico delle murature basato sull'elaborazione digitale di immagini fotografiche di murature. Il processo di elaborazione digitale delle immagini rappresenta un tassello nello sviluppo del repertorio dinamico delle caratteristiche tipologiche e prestazionali delle murature storiche su base ICT.

In particolar modo la ricerca utilizza le immagini delle murature per riconoscere il tipo murario e ricavare informazioni relative alla muratura, alle tecniche costruttive associate, ai materiali lapidei della costruzione storica, utili per la conoscenza, la conservazione ed (eventualmente) anche il restauro. Il sistema è pensato, infatti, per supportare i tecnici del

settore (architetti/ingegneri) durante la fase conoscitiva dell'edificio e successivamente, nella fase progettuale, per l'individuazione degli interventi di recupero compatibili, in modo da garantire l'adozione di soluzioni tecnologiche e materiali adatti alla muratura analizzata e rispettosi del valore culturale del manufatto.

Analizzando lo schema generale (riportato all'inizio del capitolo), lo sviluppo del repertorio è rappresentato con il colore verde e si pone a conclusione di tutto il processo di ricerca. Il repertorio, infatti, contiene al suo interno i risultati e i dati elaborati durante le fasi precedenti di ricerca.

Il repertorio è stato sviluppato secondo uno schema di tipo dinamico; questo consente l'acquisizione di dati esterni, non appartenenti al repertorio, relativi alle murature (come immagini fotografiche, posizione GPS, informazioni sui materiali e sulle proprietà termofisiche se note, ecc.) e forniti dagli utenti tramite un'applicazione fruibile da dispositivi informatici.

Il processo semi-automatico di riconoscimento e classificazione in tipi murari è funzionale allo sviluppo dell'applicazione del repertorio, infatti, se durante la fase iniziale di riconoscimento della nuova muratura si ottiene una buona corrispondenza tra i dati presenti all'interno del repertorio e la nuova immagine di muratura, il sistema restituirà informazioni e dati maggiormente corrispondenti alla muratura stessa.

Si specifica che nel presente lavoro di ricerca lo sviluppo dell'applicazione in grado di implementare in modo automatico il repertorio stesso è stato condotto fino alla progettazione della struttura logica dell'applicazione, delineando i presupposti per l'implementazione della stessa utili per gli sviluppi futuri.

6.1 STATO DELL'ARTE

L'evoluzione delle tecnologie informatiche in tempi recenti ha subito un incremento notevole, risulta però poco indagata l'applicazione dell'intelligenza artificiale, del graphic matching e del machine learning nell'ambito dell'architettura. Queste tecniche, invece, sono molto sviluppate in ambito medico per il riconoscimento semi-automatico di patologie da particolari esami diagnostici, come TAC (tomografia assiale computerizzata) o RM (Risonanza Magnetica) (Swain et al. 2024), e risultano ancora non del tutto indagate/applicate ai settori dell'Architettura e dell'Ingegneria Civile.

Nell'ambito della valorizzazione del patrimonio culturale, alcuni studiosi hanno sviluppato dei sistemi per il riconoscimento e la classificazione degli autori di opere d'arte (Ciavarella 2021). Impiegando un algoritmo di graphic matching basato sul concetto di shape contour recognition che non necessita di attività preliminari di addestramento, gli autori sono riusciti ad individuare e selezionare delle regioni grafiche nelle immagini aprendo all'opportunità di riconoscere, attraverso l'analisi di "falsi positivi", la fattura di manoscritti antichi ipotizzando nuove attribuzioni ad amanuensi e/o centri religiosi o universitari dove tale arte veniva praticata (Barbuti et al. 2018).

Nel settore delle costruzioni gli autori Oses et al. (2014) presentano un contributo che si concentra sullo sviluppo di protocolli per la valutazione del patrimonio costruito nella regione basca, con l'obiettivo di standardizzare e rendere oggettivo il processo di recupero degli edifici storici. La metodologia proposta include un framework per la delineazione automatica delle murature in pietra, che si basa sull'analisi di immagini digitali. Questo processo prevede l'estrazione di segmenti di linea dalle immagini, da cui si ricava una classificazione statistica e automatica delle murature. I risultati ottenuti mostrano che il framework è efficace nel delineare e classificare le caratteristiche geometriche delle

murature, contribuendo a un'analisi più rapida del patrimonio architettonico storico.

Anche gli autori Valero et al. (2018) lavorano sulla segmentazione delle immagini e presentano un algoritmo innovativo di segmentazione automatica di murature in pietra con malta e per le costruzioni a secco. L'obiettivo principale del lavoro di ricerca è quello di migliorare l'efficienza e l'accuratezza delle operazioni di rilievo e manutenzione degli edifici storici, che sono spesso soggette a condizioni ambientali avverse. La metodologia si basa sull'analisi dei dati acquisiti tramite scansione laser terrestre (TLS) e utilizza la Trasformata Wavelet Continua (CWT) per segmentare gli elementi murari. I risultati dimostrano che l'algoritmo consente di ottenere informazioni complete e affidabili. Questo approccio rappresenta un passo significativo verso pratiche di rilievo più oggettive.

Ulteriori studi relativi al settore edile sono stati finalizzati al riconoscimento di lesioni e dissesti in edifici con strutture portanti intelaiate in calcestruzzo armato, attraverso l'analisi di fotografie digitali e impiegando la segmentazione dell'immagine (Bhattacharya et al. 2022). In ambito civile le reti neurali sono utilizzate per la classificazione dei difetti strutturali nelle gallerie (Marasco et al. 2022).

Il contributo di Abu-Haifa and Lee (2023) presenta un innovativo framework di modellazione 3D basato su immagini per valutare la vulnerabilità delle strutture in muratura monostato. La metodologia utilizzata dagli autori si basa sul concetto di "geometria descrittiva inversa", che utilizza immagini 2D delle pareti per costruire modelli 3D digitali delle strutture in muratura partendo da immagini fotografiche. Questo approccio integra analisi delle immagini, modellazione numerica e simulazioni, consentendo una valutazione sistematica della vulnerabilità, contribuendo così alla gestione del rischio sismico e alla conservazione del patrimonio architettonico.

L'evoluzione tecnologica migliora repentinamente, di recente Hermans et al. (2024) hanno utilizzato tecniche avanzate di segmentazione delle immagini per analizzare le strutture murarie irregolari per la comprensione del loro comportamento meccanico. L'obiettivo era quello di sviluppare un metodo per verificare le proprietà meccaniche di diverse configurazioni murarie a partire da immagini reali; il contributo evidenzia come la segmentazione delle immagini, attraverso strumenti come il modello *Segment Every Grain* (SEGM), migliori la qualità della rappresentazione geometrica, consentendo una migliore identificazione dei giunti di malta e dei blocchi, facilitando così l'analisi e la conservazione di queste strutture.

6.2 PROCESSI DI SEGMENTAZIONE DELLE IMMAGINI

Il tema sviluppato in questo capitolo dà risposta ad alcuni quesiti di ricerca definiti all'inizio della ricerca, in particolare:

- È possibile sviluppare un sistema di riconoscimento automatico delle murature in grado di associare ad un'immagine (in particolare dei paramenti) un "tipo" murario?
- È possibile attraverso l'elaborazione delle immagini determinare automaticamente i dati geometrico-dimensionali associati agli elementi costituenti la muratura e il tipo di apparecchiatura muraria?
- Rispetto ai repertori "tradizionali", è possibile rendere fruibili le informazioni (dati forniti da norme tecniche, lavori scientifici, risultati di prove di laboratorio e in situ, simulazioni FEM, abachi, ecc) inerenti alle murature attraverso un repertorio dinamico e "accrescitivo"?

Per rispondere al primo quesito è stato necessario approfondire e sviluppare aspetti informatici legati all'elaborazione digitale delle immagini. La segmentazione delle immagini è la metodologia che meglio si adatta agli scopi della ricerca proposta.

Si parla di segmentazione dell'immagine come dell'individuazione in una certa immagine dei contorni chiusi, delle linee e più in generale delle discontinuità, allo scopo di partizionare l'immagine in regioni omogenee, ognuna delle quali corrisponderà ad un oggetto reale.

I metodi di segmentazione delle immagini si possono dividere in due categorie: metodi di analisi globale (cercano di riconoscere in un solo passo tutti i contorni presenti in un'immagine); metodi di analisi locale (consentono l'individuazione di un contorno per volta). La segmentazione può essere ulteriormente classificata in base al tipo: tradizionale, semantica, panottica, ecc. Inoltre, ciascun tipo di segmentazione si basa su operatori e algoritmi di classificazione differenti; questi influenzano direttamente i risultati, è dunque importante scegliere l'algoritmo più appropriato per ottenere il risultato desiderato. Generalmente i sistemi di segmentazione basati su tecniche di deep learning richiedono una moltitudine di dati per addestrare il sistema ma sono in grado di fornire analisi più precise. Invece, i tipi tradizionali di segmentazione sono meno impegnativi dal punto di vista computazionale e possono risolvere i problemi in maniera più efficiente. Le comuni tecniche di segmentazione delle immagini tradizionali includono: soglia, istogrammi, riconoscimento dei contorni, spartiacque, sulle regioni e sui cluster.

Una delle problematiche maggiormente riscontrate nell'uso della segmentazione tradizionale delle immagini è legata alla difficoltà di individuare correttamente gli elementi lapidei rispetto ai giunti di malta; questa difficoltà è correlata al fatto che non vi è una marcata differenza in termini di colore, luminosità dei pixel, tra la malta e la pietra. Inoltre, volendo definire una metodologia semi-automatica, la segmentazione di tipo tradizionale necessita di aggiustamenti manuali per l'individuazione delle regioni omogenee dettagliati caso per caso.

Un altro metodo per la classificazione delle murature è il *graphic matching*. La funzione di *graphic matching* utilizza le ROI (*region of interest*) in immagini tra loro simili in base alla forma, e non ha bisogno di una segmentazione preliminare delle immagini.

L'estrazione della ROI da utilizzare come chiave di ricerca avviene selezionando tutti quei *pixel* il cui contrasto rispetto ai *pixel* vicini supera una determinata soglia: tipicamente, i *pixel* che appartengono al contorno dell'oggetto. Quindi, definita una ROI come modello, il processo di matching trova nelle immagini di destinazione le sue occorrenze, se esistenti.

È possibile ricercare contemporaneamente n modelli all'interno di n immagini e di parallelizzare tutte le elaborazioni per uno o più modelli, con l'obiettivo di ottimizzare i tempi di ricerca. Una problematica legata a sistemi di *graphic matching* deriva dalla necessità di avere un database con una quantità notevole di immagini.

Infine, l'ultimo sistema di cui si tratta in questo capitolo è l'intelligenza artificiale (AI). Sistemi di AI si sviluppano a partire dall'addestramento di modelli di segmentazione che utilizzano una moltitudine di immagini, oltre undici milioni per il sistema sviluppato da Meta (Ravi et al. 2024). In particolare, il sistema di Meta, accessibile online nella versione demo, consente di analizzare qualsiasi tipo di immagine e/o video, fornendo risultati ottimali per qualsiasi tipo di immagine.

Per rispondere al secondo quesito, riportato precedentemente, è stato necessario sviluppare come prima fase la segmentazione delle immagini, poiché le immagini segmentate rappresentano il dato di input per l'estrazione dei dati geometrici qualitativi relativi alle immagini. Questa fase del processo può essere effettuata tramite l'utilizzo di applicativi per piattaforme di calcolo, come Matlab, Python, ecc., o utilizzando immagini segmentate di tipo vettoriale.

Infine, l'ultimo quesito trova risposta nell'elaborazione di un'applicazione (app) per lo sviluppo del repertorio dinamico delle caratteristiche tipologiche e prestazionali delle murature su base ICT.

6.3 METODOLOGIA APPLICATA

La metodologia sviluppata ha l'obiettivo di sviluppare un sistema semi-automatico per il riconoscimento dei tipi murari a partire da immagini di murature a faccia vista. Il primo passo in questa direzione è rappresentato dalla segmentazione delle immagini digitali. Il passo successivo è l'estrazione dei parametri geometrici partendo dall'immagine segmentata. Infine, una volta ottenuta la geometria è possibile associarla ai tipi murari precedentemente classificati.

6.3.1 Segmentazione di immagini di paramenti murari a faccia vista

La prima fase di elaborazione per lo sviluppo di un sistema di riconoscimento semi-automatico dell'immagini riguarda i metodi di segmentazione trattati precedentemente.

Prima di entrare nel metodo della segmentazione è importante definire che cosa si intende per immagine digitale. Essa è la rappresentazione numerica di un'immagine bidimensionale. La rappresentazione può essere di tipo vettoriale oppure *raster* (altrimenti detta *bitmap*); nel primo caso sono descritti gli elementi primitivi, quali linee o poligoni, che compongono l'immagine; nel secondo l'immagine è costituita da una matrice di punti, detti pixel, la cui colorazione è definita (codificata) tramite uno o più valori numerici (bit). Il programma di calcolo utilizzato per tale implementazione è *Matlab*, che utilizza immagini in formato bitmap. A ciascuna immagine viene associata una matrice numerica composta dai pixel associati; questa matrice a sua volta può essere suddivisa in tre matrici, *Red*, *Green* and *Blue* (R, G, B), che sono composte dai valori di intensità luminosa che possono variare da 0 a 255.

Partendo da queste semplici considerazioni si comprende come le trasformazioni applicabili all'immagine iniziale si basino sui valori di luminosità di ogni pixel che compone l'immagine. Alcune trasformazioni (*Preprocess*), come quella in scala di grigi, risultano necessarie per la segmentazione tradizionale dell'immagine. La segmentazione impiegata prevede l'utilizzo di un'immagine binaria, cioè un'immagine che può essere composta da un solo valore di *pixel* scelto tra 0 o 1, che corrispondono ai colori bianco e nero. In Fig. 6. 2 si riporta un esempio di matrice associata ad un'immagine binaria.



Fig. 6. 1 Schema digital process image.

BW

1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	1	1	0	1	1	0	1
1	0	1	1	0	1	1	0	1
1	0	0	0	0	0	0	0	1
1	0	1	1	0	1	1	0	1
1	0	1	1	0	1	1	0	1
1	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fig. 6. 2 Matrice associata ad un'immagine binaria.

Una volta ottenuta un'immagine binaria (Fig. 6. 3 - Fig. 6. 4) si procede con la segmentazione della stessa. La segmentazione effettua un partizionamento dell'immagine identificandone le regioni o gli oggetti costituenti, sulla base di criteri specifici per ogni applicazione.

La segmentazione delle immagini si basa su operatori di segmentazione che sono in grado di elaborare le immagini impiegando matrici (o maschere) di convoluzione, cioè piccole matrici necessarie per applicare i filtri alle immagini. Gli operatori di segmentazione testati nella prima fase di ricerca sono: operatore di *Roberts*, operatore di *Prewitt* e operatore di *Sobel*. Questi operatori lavorano su immagini binarie e le differenze tra questi risiedono nella dimensione delle maschere di convoluzione, nei pesi dati a ciascuna derivata all'interno della maschera e nel numero di derivate utilizzate. L'operatore di *Roberts* di dimensione 2x2 è particolarmente adatto per le immagini pulite che non presentano rumore o disturbo. Invece l'operatore di *Prewitt*, 3x3, è il più semplice tra gli operatori mostrati, ma fornisce risultati migliori rispetto a quelli ottenuti con l'operatore di *Roberts*. Infine, l'operatore di *Sobel*, anch'esso 3x3, tiene conto della distanza dei pixel dal centro in modo approssimativo. Questi operatori però non sono risultati adeguati alle immagini di murature che presentano un elevato rumore e disturbo, derivante dalle superfici poco uniformi dei materiali lapidei naturali (Fig. 6. 5 - Fig. 6. 6 - Fig. 6. 7).



Fig. 6. 3 Foto di una muratura di tipo SM1.



Fig. 6. 4 Foto della muratura SM1 trasformata in immagine binaria attraverso la sostituzione dei valori dei pixel in bianco e nero.

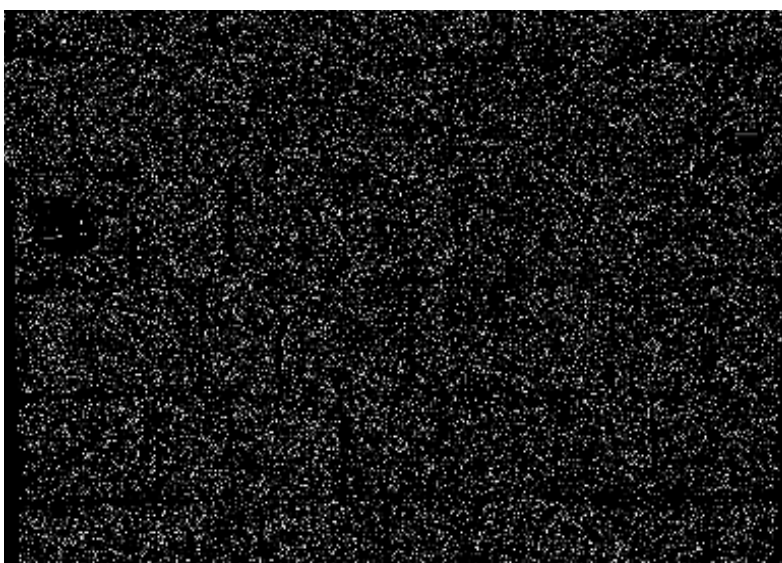


Fig. 6. 5 Trasformazione dell'immagine binaria attraverso la segmentazione con operatore di Roberts.

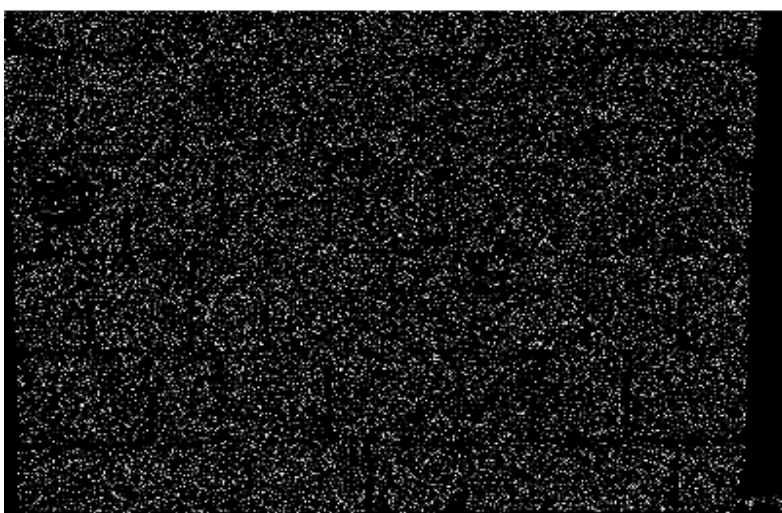


Fig. 6. 6 Trasformazione dell'immagine binaria attraverso la segmentazione con operatore di Prewitt.



Fig. 6. 7 Trasformazione dell'immagine binaria attraverso la segmentazione con operatore di Sobel.

La segmentazione dei paramenti murari non è un'operazione semplice; la presenza di superfici irregolari e la consistenza materica determina rumore e disturbo. I metodi sopraesposti non hanno consentito di ottenere risultati ottimali ai fini della ricerca.

Successivamente si è passati all'utilizzo di applicativi presenti in *Matlab* specifici per l'elaborazione delle immagini, tra questi è stato utilizzato "*Image Segmenter*".

L'utilizzo di questa applicazione ha permesso di ricavare una segmentazione migliore delle precedenti (Fig. 6. 8 - Fig. 6. 9) ma che presenta sempre un minimo di rumore e di elementi di disturbo.

Il recente sviluppo dell'intelligenza artificiale (IA) consente di ottenere una segmentazione estremamente precisa delle immagini. Il sistema utilizzato in versione demo è stato sviluppato da Meta AI, ed è accessibile gratuitamente online. La versione demo consente il caricamento di immagini e/o video per ottenere la segmentazione. La modalità di selezione degli elementi può essere scelta tra: "*Hover & Click*", selezionando gli elementi uno ad uno; "*Box*", disegnando un rettangolo intorno l'oggetto; "*Everything*", evidenziando tutti gli elementi trovati nell'immagine. Tra le modalità esposte la più performante per gli scopi della ricerca è la selezione "*Everything*" (Fig. 6. 10 - Fig. 6. 11- Fig. 6. 12 - Fig. 6. 13).

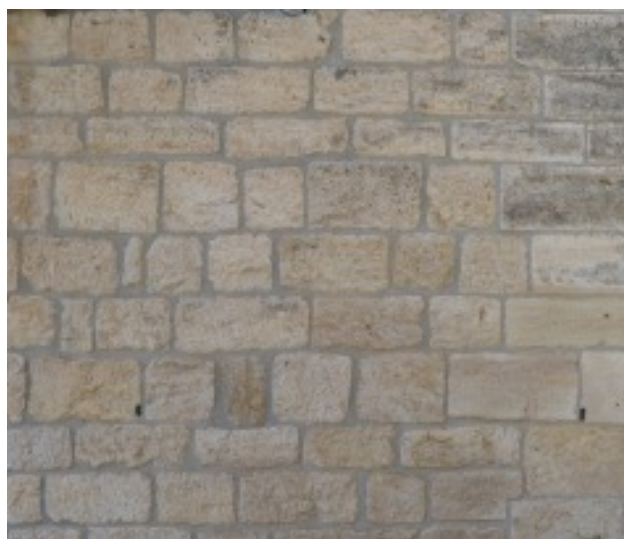


Fig. 6. 8 Foto di una muratura di tipo SM1.



Fig. 6. 9 Immagine segmentata con "*Image Segmenter*" corrispondente alla muratura SM1.



Fig. 6. 10 Elaborazione dell'immagine della muratura di tipo SM3 con Meta AI Segmentation.



Fig. 6. 11 Immagine segmentata della muratura di tipo SM3 con Meta AI Segmentation.



Fig. 6. 12 Elaborazione dell'immagine della muratura di tipo SM1 con Meta AI Segmentation.



Fig. 6. 13 Immagine segmentata della muratura di tipo SM1 con Meta AI Segmentation.

6.3.2 Restituzione semi-automatica di parametri geometrici di tipi murari

L'obiettivo della segmentazione delle immagini è quella di individuare le regioni omogenee (conci) per la restituzione di parametri geometrici. Questo processo è stato effettuato in due modalità: la prima trasformando l'immagine acquisita da Meta AI in immagine vettoriale, e l'altra tramite applicativi *Matlab*.

Nel primo metodo l'immagine acquisita da Meta AI viene trasformata in immagine vettoriale utilizzando software di grafica come *Photoshop* e *Illustrator* di Adobe (Fig. 6. 14). L'immagine vettoriale restituisce l'esatta geometria del paramento murario presente nell'immagine iniziale e può essere aperta con programmi CAD (Fig. 6. 15); ciò consente di interagire direttamente con la restituzione grafica della muratura con la possibilità di estrarre tutte le informazioni utili come: la larghezza e l'altezza dei conci, l'area del concio, lo spessore dei giunti di malta, l'orizzontamento dei ripianamenti.

Il raggiungimento di questo obiettivo intermedio della ricerca è estremamente importante per le ricadute successive della ricerca, nello specifico per lo sviluppo del sistema di riconoscimento.

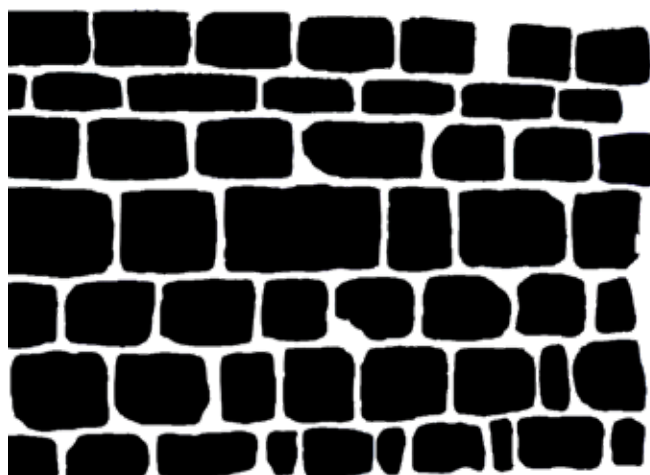


Fig. 6. 14 Immagine raster trasformata in vettoriale della muratura di tipo SM1.

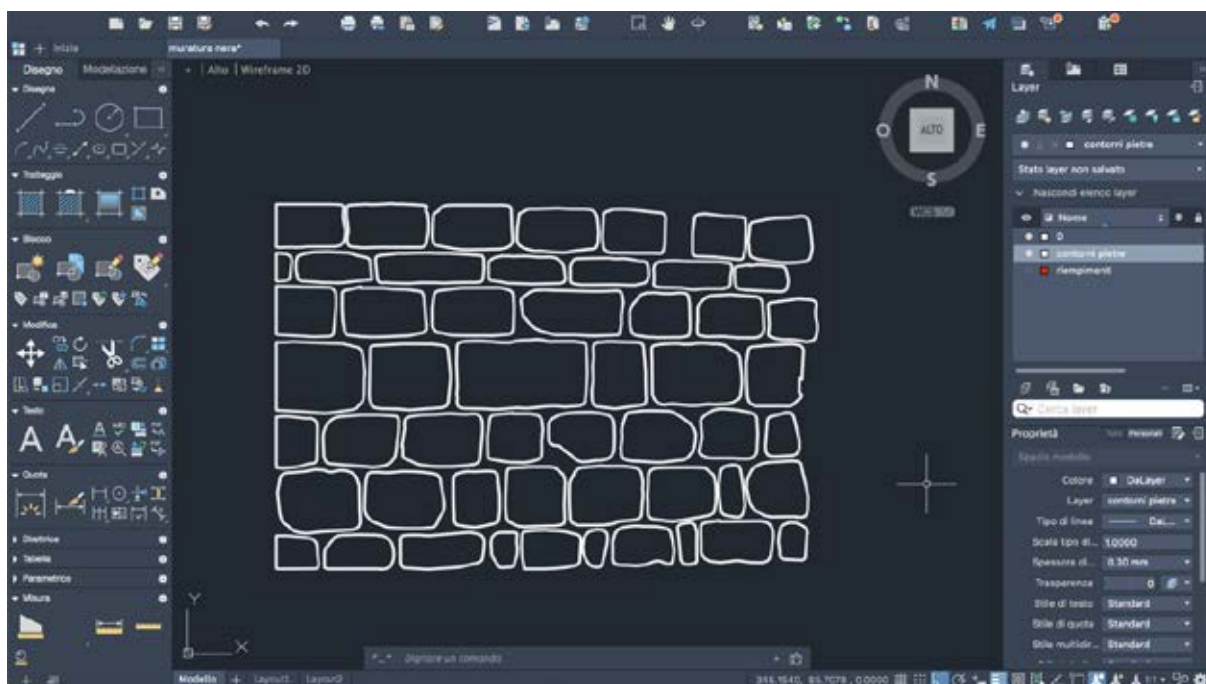


Fig. 6.15 Immagine vettoriale importata su CAD della muratura di tipo SM1.

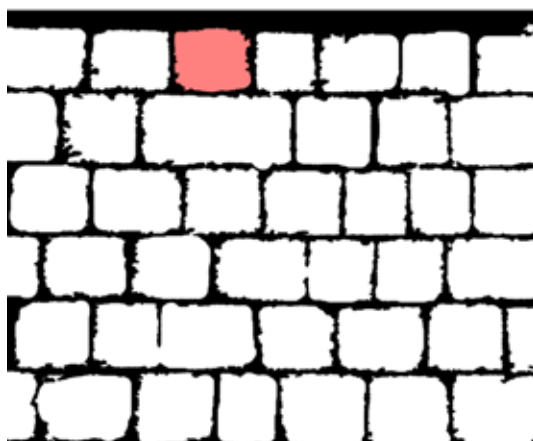


Fig. 6. 16 Immagine segmentata di muratura in conci regolari con Matlab.

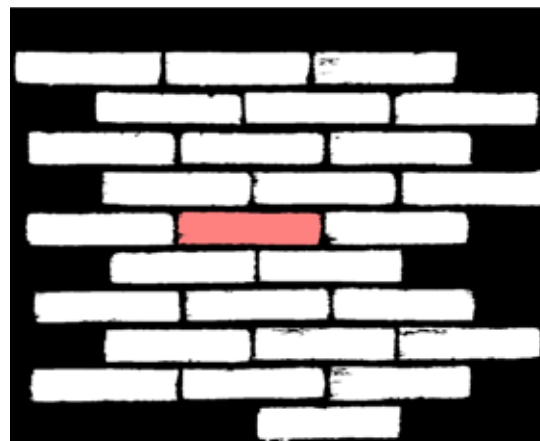


Fig. 6. 17 Immagine segmentata di muratura in mattoni regolari con Matlab.

Region Properties										
Area	#	Circularity	Eccentricity	EquivDiameter	EulerNumber	MajorAxisLength	MinorAxisLength	Orientation	Perimeter	
195691		0.3835	0.9790	499.1608	1	1.1317e+03	239.5045	0.6459	2.5293e+03	
197369		0.5859	0.9897	501.3217	1	1.1597e+03	226.9668	-0.9592	2.5321e+03	
201804		0.3120	0.9776	506.8973	1	1.1303e+03	238.0186	0.7113	2.8480e+03	
201939		0.1811	0.9756	507.0668	1	1.1128e+03	244.4341	0.5454	3.7404e+03	
203752		0.1586	0.9755	509.3379	1	1.1158e+03	245.5910	1.0016	4.0148e+03	
203864		0.3906	0.9783	509.5154	1	1.1448e+03	236.9902	-0.2276	2.5580e+03	
204134		0.2998	0.9753	509.8151	1	1.1079e+03	244.5863	-0.6209	2.9221e+03	
205234		0.1534	0.9750	511.1869	1	1.1232e+03	245.2603	0.2210	4.0973e+03	
209060		0.3898	0.9768	512.2145	1	1.1335e+03	242.7582	-0.1390	2.5744e+03	
209491		0.1745	0.9750	512.7499	1	1.1200e+03	248.9557	0.2012	3.8532e+03	
207313		0.3700	0.9769	513.7695	1	1.1399e+03	242.7355	-0.2567	2.6503e+03	
207373		0.2844	0.9776	513.8439	1	1.1454e+03	241.1592	0.2667	3.0241e+03	
203468		0.3541	0.9759	515.1987	1	1.1276e+03	246.0403	-0.5408	2.7109e+03	
208951		0.3429	0.9751	515.7952	1	1.1188e+03	248.0514	-0.0062	2.7641e+03	
210339		0.3389	0.9749	517.5055	1	1.1177e+03	248.8810	-0.1209	2.7897e+03	
211644		0.3386	0.9755	518.1084	1	1.1348e+03	249.7041	1.0819	2.7995e+03	
211955		0.3556	0.9746	519.4896	1	1.1199e+03	250.7402	-0.0138	2.7336e+03	
212477		0.3603	0.9762	520.1289	1	1.1407e+03	247.3049	0.7547	2.7191e+03	
214814		0.3372	0.9737	522.9815	1	1.1209e+03	255.6108	-0.0967	2.8205e+03	
215726		0.3554	0.9764	525.3038	1	1.1561e+03	249.4374	0.2884	2.7651e+03	
217088		0.3281	0.9745	525.7424	1	1.1378e+03	255.1390	-0.1349	2.8802e+03	
218354		0.3994	0.9760	527.2731	1	1.1551e+03	251.6099	-0.4052	2.6179e+03	

Fig. 6. 18 Matrice con dati di tipo geometrico estratti su Matlab dall'immagine segmentata di muratura di tipo SM1.

L'estrazione delle regioni connesse svolta su *Matlab* (es. Fig. 6. 16 - Fig. 6. 17) permette di riconoscere tutte le regioni individuate dalla segmentazione, e di estrarre automaticamente le informazioni desiderate come: l'area della regione (concio), le dimensioni massima e minima del singolo elemento (concio), il perimetro, il baricentro etc. Tutte queste informazioni sono raccolte in un foglio di calcolo (Fig. 6. 18) con il quale è possibile filtrare i dati ed esportarli.

6.4 SVILUPPO REPERTORIO DINAMICO E ACCRESCITIVO DELLE MURATURE SU BASE ICT

La ricerca questo capitolo tratta il sistema di riconoscimento semi-automatico di tipi murari ed è oggetto della domanda di brevetto N. 102023000023781 depositata in Italia il 10 novembre 2023, a nome dell'Università degli Studi di Palermo con il titolo "Metodo di ricerca semi-automatico di immagini di opere murarie", estesa a deposito internazionale in data 7 novembre 2024 con il n° PCT/IB2024/061030.

Il repertorio dinamico delle caratteristiche tipologiche e prestazionali delle murature storiche rappresenta il fulcro centrale che ha mosso l'intera ricerca. La ricerca ha permesso di sviluppare la struttura dell'intero repertorio, mettendo a sistema le diverse tematiche trattate nei capitoli precedenti. L'obiettivo principale del repertorio è quello di fornire uno

strumento utile ai tecnici del settore che intendono approfondire la conoscenza delle murature storiche per individuare soluzioni e strategie di intervento compatibili con le stesse, al fine di garantire il miglioramento delle prestazioni senza rinunciare all'identità e alla cultura dei luoghi.

Lo sviluppo del repertorio inizia con la fase di riconoscimento della muratura a partire dall'immagine fotografica questo processo si basa sull'individuazione di una *Region of Interest* (ROI) all'interno dell'immagine digitale. La ROI viene utilizzata per eseguire la ricerca di porzioni di immagine simili in una o più immagini target. Per lo sviluppo di questo sistema si è popolato un dataset con le immagini di murature di ogni tipo murario (SM1, SM2, SM3); per ciascuna immagine è associata una Scheda Tecnica Informativa (STI) contenente le informazioni riportate in (Fig. 6. 19), che verrà implementata graficamente nel corso dello sviluppo dell'app.

Il *dataset* iniziale fornito dal sistema è popolato da immagini fotografiche digitali raffiguranti diversi tipi murari; a ciascuna immagine inserita nel dataset iniziale è collegata una tabella contenente informazioni dettagliate circa la tipologia muraria, il tipo di materiale lapideo, le dimensioni medie dei conci, lo sfalsamento dei giunti, la presenza di malta, la presenza di elementi diatonici, la restituzione grafica del tipo murario, l'indice di qualità muraria, le proprietà meccaniche (resistenza a compressione) e proprietà termofisiche dei materiali (conducibilità termica, trasmittanza) e della stratigrafia muraria per i casi in cui è stato possibile effettuare prove di conduttanza termica in situ.

Le immagini possono essere in uno dei formati digitali più comuni, come TIFF, JPEG, BMP, PGN etc; il dataset rappresenta una condizione necessaria per il confronto tra il modello ricercato nella nuova immagine digitale caricata nel sistema dall'utente finale e le ROI definite precedentemente dagli sviluppatori del sistema nelle immagini di riferimento presenti nel dataset. L'ottimizzazione del processo parte dalla definizione di una buona ROI; se la ricerca non produce risultati, la ROI può essere modificata in termini dimensionali per consentire al sistema di tener conto di ulteriori parametri di ricerca utili all'ottenimento dei risultati.

L'estrazione delle immagini del dataset, effettuata dal sistema secondo lo shape model, avviene selezionando tutti quei pixel che solitamente appartengono al contorno



Fig. 6. 19 Esempio di Scheda Tecnica Informativa.

dell'oggetto; i contorni vengono riconosciuti attraverso una differenza in termini di contrasto tra i pixel limitrofi. Per garantire la restituzione di un modello valido, la funzione di *graphic matching* si deve basare sulla scelta corretta dei parametri di contrasto tra i *pixel*; infatti, il modello deve includere tutti i pixel che consentono l'identificazione dell'oggetto e la differenziazione della forma rispetto ad altri oggetti ed allo sfondo. Nel caso specifico l'oggetto da identificare può essere rappresentato da un concio lapideo che viene rilevato rispetto allo sfondo, formato dalla malta tra i giunti, attraverso una differenza di contrasto tra i *pixel*. Per la configurazione del modello di *graphic matching* si utilizzano parametri di base e parametri avanzati; i parametri di base consentono di misurare la somiglianza tra il modello e le porzioni di immagine che sono nel *dataset* (punteggio minimo, numero massimo di elementi trovati per immagini). I parametri avanzati (completezza, sub-pixel, deformazione) consentono, invece, di determinare dei valori tra l'efficacia dei risultati della ricerca e l'efficienza in termini di tempi di ricerca stessa. Generalmente una ricerca più accurata richiederà tempi maggiori per effettuare il processo di *graphic matching* e viceversa una ricerca più rapida nei tempi darà risultati meno accurati.

Per il funzionamento del sistema (Fig. 6. 20) si sta sviluppando un'interfaccia user-friendly che possa essere intuitiva per l'utente e che consenta anche la personalizzazione dei contenuti della ricerca che l'utente vuole effettuare. Le funzioni previste all'interno del sistema richiedono una connessione internet per consentire l'accesso in tempo reale alle collezioni digitali (*dataset*). Sarà possibile esplorare le immagini per selezionare in maniera opportuna i segmenti di immagine da utilizzare come chiave di ricerca. Una volta definita la ROI nell'immagine scattata dall'utente attraverso l'applicazione, il sistema provvederà ad analizzare l'immagine attraverso il confronto con le ROI del dataset e, a ricerca completata, saranno restituite all'utente le immagini e le informazioni ad essa associate che vengono prese in considerazione dall'algoritmo.

Al primo utilizzo del sistema l'utente dovrà autenticarsi registrandosi alla piattaforma fornendo informazioni di tipo personale (nome, cognome, età, professione, recapiti, indirizzo e-mail, altro) le informazioni fornite saranno tutelate secondo le norme di riferimento sulla privacy e sulla gestione dei dati. L'autenticazione sul sistema consente di recuperare informazioni utili per la profilazione del tipo di utenti che utilizzano il sistema, inoltre consentirà lo scambio di informazioni dirette con l'utente per il miglioramento dei contenuti.

L'interfaccia prevede di selezionare due modalità di profilo utente ("utente standard", "utente esperto"). Il profilo "utente standard" consente di ottenere informazioni semplificate della muratura, come l'epoca di costruzione, la collocazione geografica, i materiali impiegati e contenuti aggiuntivi quali modelli 3D e immagini storiche adatte ad una fruizione divulgativa/turistica. Il profilo "utente esperto" è pensato per i professionisti del settore (edilizio) che sono interessati ad ottenere informazioni dettagliate sulla costruzione, come le tecniche costruttive impiegate per la realizzazione della muratura, i materiali impiegati e le relative proprietà termo-fisiche, le prestazioni termoigrometriche e meccaniche della stratigrafia della parete, l'indice di qualità muraria (I.Q.M.).

Per questa tipologia di utenti esperti, sarà possibile utilizzare funzionalità aggiuntive relative agli interventi di recupero delle murature, infatti l'utente visualizzerà sotto forma di suggerimenti le tecniche di recupero e l'utilizzo di materiali compatibili con la muratura stessa. Inoltre, questa tipologia di utente potrà contribuire a sviluppare e incrementare il sistema stesso, caricando contenuti extra o informazioni tecniche, qualora questi risultassero carenti o mancanti.

Nel caso in cui la muratura fotografata non venisse riconosciuta dal sistema, perché non presente nel dataset, l'utente esperto potrà provvedere ad un nuovo inserimento

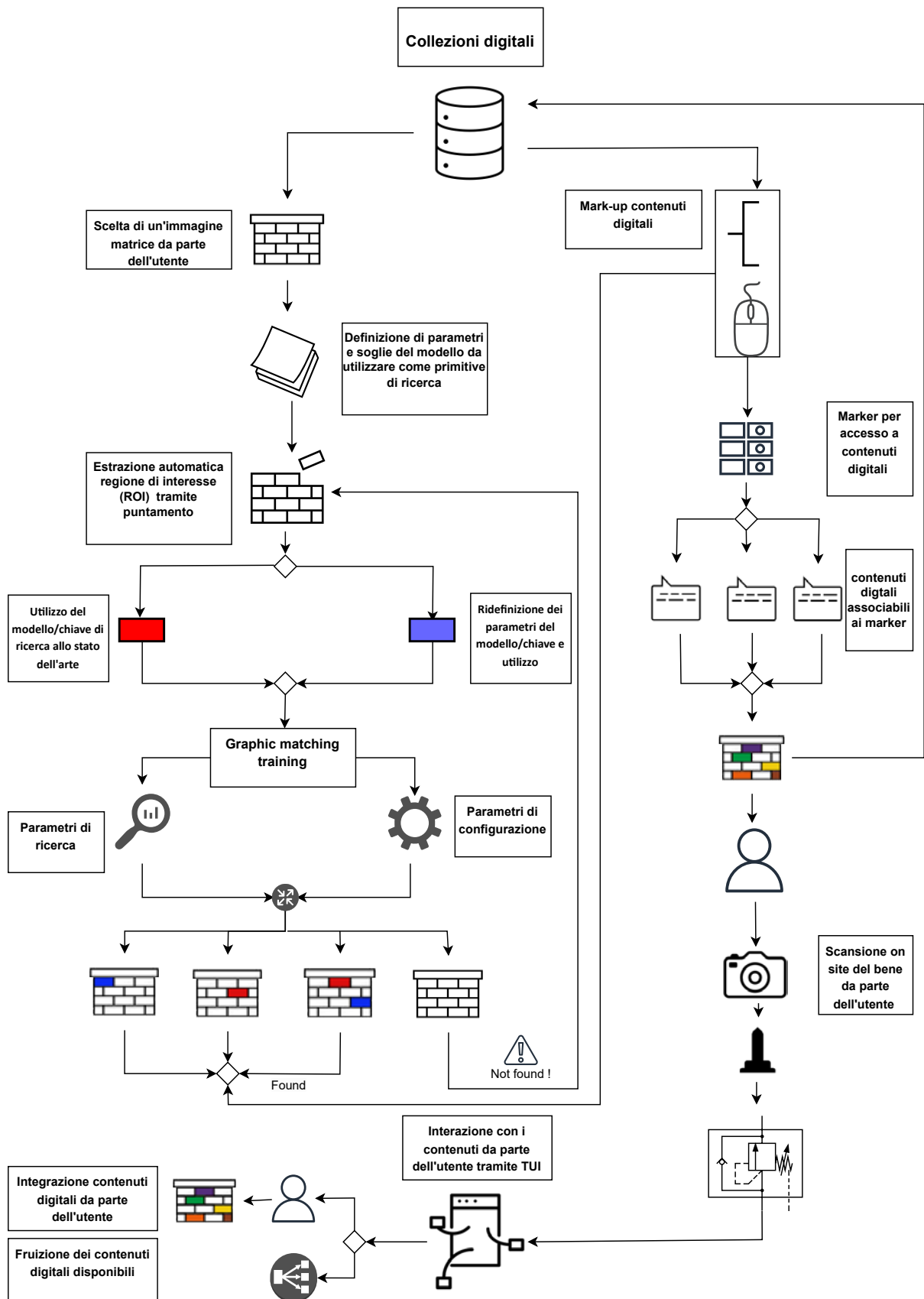


Fig. 6. 20 Schema del sistema di riconoscimento semi-automatico.

di muratura sul dataset, fornendo in primis l'immagine e successivamente tutte le informazioni relative in suo possesso.

Tutte le informazioni caricate sul sistema dagli utenti saranno verificate e validate per restituire informazioni scientificamente corrette agli altri utenti che utilizzeranno il sistema stesso e ne faranno richiesta attraverso le loro specifiche ricerche.

Una delle funzioni fondamentali per lo sviluppo incrementale del sistema è la funzione di caricamento da parte dell'utente; questa funzione consente di strutturare un sistema di tipo dinamico e accrescitivo del repertorio murario ampliando, di fatto, il dataset con molti contenuti; maggiore è la quantità di dati nel sistema e migliore sarà l'interazione da parte degli utenti con il sistema. Dunque, la funzione di caricamento dei contenuti offre la possibilità all'utente di migliorare il sistema e rende la fruizione interattiva e inclusiva a tutti gli utenti classificati come utenti esperti.

L'interazione tra utente e sistema avviene attraverso le immagini digitali delle murature contenute nel dataset. L'utente che vuole ottenere informazioni relative ad una particolare muratura dovrà seguire il processo di autenticazione descritto in precedenza, potrà ottenere i risultati a seguito dell'interrogazione dell'algoritmo mediante scansione della muratura ed eventualmente potrà integrare nuovi contenuti digitali, contribuendo all'arricchimento del repertorio dinamico.

A ricerca completata saranno restituiti i risultati dell'analisi sotto forma di contenuti grafici (immagini simili alla muratura scansionata), contenuti tecnici (tipo murario, materiale lapideo, le proprietà termiche e meccaniche), contenuti digitali integrate come espansioni digitali ed eventuali suggerimenti per l'utente, come già descritto in precedenza.

6.5 CONSIDERAZIONI

L'applicazione per il riconoscimento semi-automatico delle murature fornisce uno strumento tecnico ai professionisti del settore delle costruzioni che può essere utilizzato per la progettazione di interventi di recupero compatibili con la muratura oggetto di analisi. Il sistema consente l'approfondimento delle prestazioni (meccaniche, termofisiche) delle murature e delle relative caratteristiche tipologico-costruttive, oltre che la possibilità di fruire dei contenuti presenti all'interno del repertorio. La fruizione dell'applicazione offre diversi vantaggi per la conservazione e la valorizzazione del patrimonio architettonico: fornisce informazioni sulle proprietà meccaniche e termofisiche delle murature oggetto di analisi; suggerisce interventi di recupero compatibili secondo aspetti materico-costruttivi, tecnologici e strutturali; mappa lo stato conservativo delle murature e restituisce le informazioni acquisite in diversi momenti temporali se sono presenti fotogrammi all'interno del dataset. Tale funzione rappresenta un'ulteriore potenzialità del sistema poiché può mostrare le murature degli edifici in differenti periodi storici, ad esempio prima e dopo un intervento di recupero/restauro o eventi calamitosi.

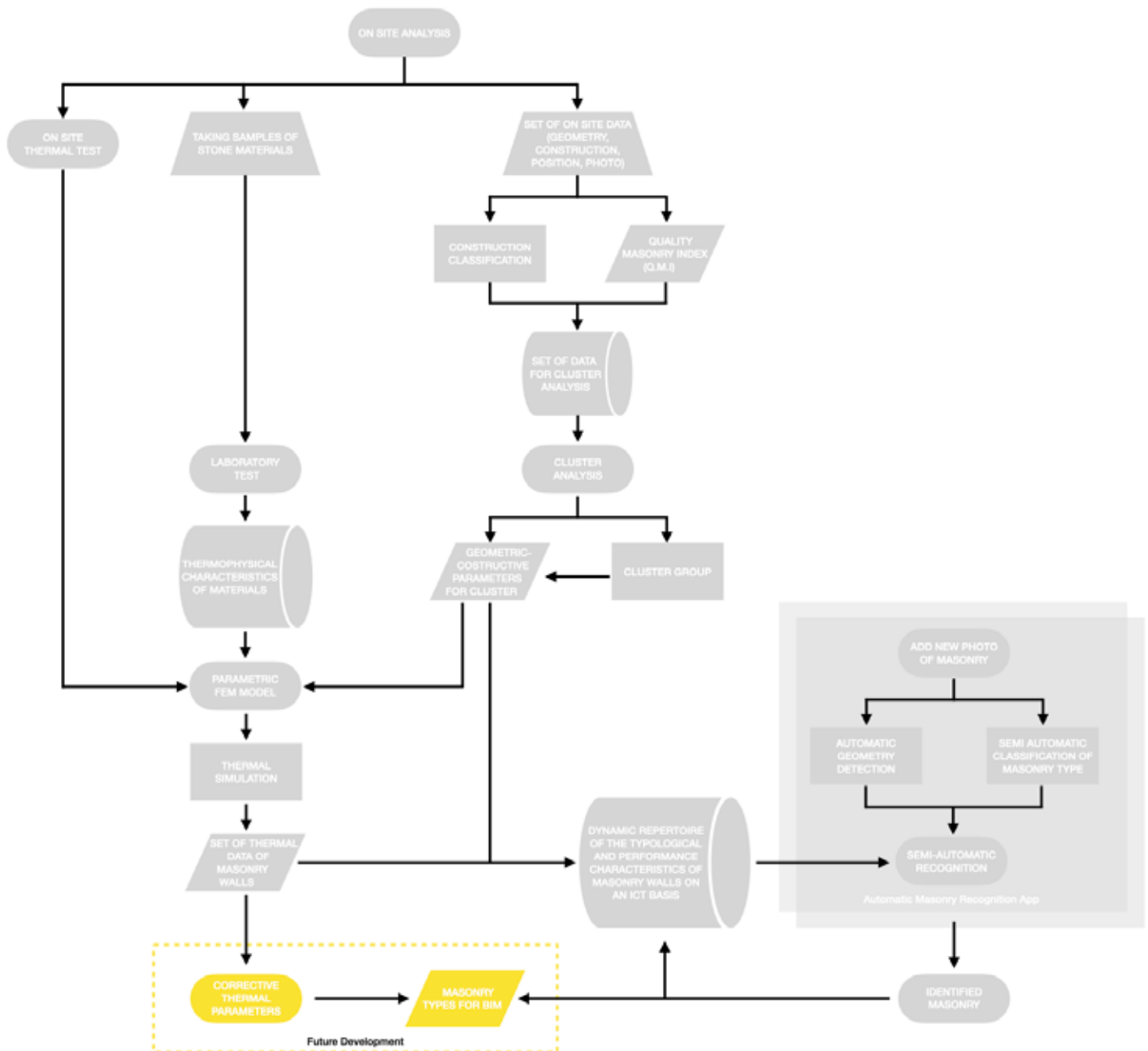
Bibliografia

- Abu-Haifa M, Lee SJ (2023) Image-based 3D modeling-to-simulation of single-wythe masonry structure via reverse descriptive geometry. *Journal of Building Engineering* 76:107125. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.107125>
- Barbuti N, Ferilli E S, Caldarola T (2018) Un innovativo Graphic Matching System per la ricerca in database di manoscritti antichi. *Umanistica Digitale* 2018:45–66. <https://doi.org/10.6092/issn.2532-8816/8144>
- Bhattacharya G, Puhan NB, Mandal B (2022) Stand-Alone Composite Attention Network for Concrete Structural Defect Classification. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence* 3:265–274. <https://doi.org/10.1109/TAI.2021.3114385>
- Ciavarella MR (2021) Computer vision for the analysis of paintings. *Capitale Culturale* 24:327–340. <https://doi.org/10.13138/2039-2362/2657>
- Hermans YFL, Grillanda N, Ehab Moustafa Kamel K, et al (2024) Efficient image-based homogenized limit analysis for irregular masonry with lumped mortar joints representation. *Eng Struct* 318:. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118688>
- Marasco G, Aiello S, Rosso M, et al (2022) Reti neurali convoluzionali per la classificazione di difetti in galleria
- Oses N, Dornaika F, Moujahid A (2014) Image-based delineation and classification of built heritage masonry. *Remote Sens (Basel)* 6:1863–1889. <https://doi.org/10.3390/rs6031863>
- Ravi N, Gabeur V, Hu Y-T, et al (2024) SAM 2: Segment Anything in Images and Videos
- Swain AK, Swetapadma A, Rout JK, Balabantaray BK (2024) Classification of non-small cell lung cancer types using sparse deep neural network features. *Biomed Signal Process Control* 87:105485. <https://doi.org/10.1016/J.BSPC.2023.105485>
- Valero E, Bosché F, Forster A (2018) Automatic segmentation of 3D point clouds of rubble masonry walls, and its application to building surveying, repair and maintenance. *Autom Constr* 96:29–39. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2018.08.018>

CAPITOLO 7

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Conclusions and future developments



7.1 CONCLUSIONS

The research conducted as part of this doctoral thesis focused on the analysis of the thermal performance of historic masonry and methods for their accurate modeling. Indeed, a proper understanding of the thermal performance of masonry and, consequently, the energy performance of buildings is necessary to guide rehabilitation and performance enhancement interventions, according to compatibility standards, for historic buildings that align with preservation needs.

These buildings are often vulnerable and fall short of contemporary requirements in terms of comfort, energy efficiency, structural safety, and environmental sustainability. As confirmed by scientific literature and regulations, exemptions from the minimum energy efficiency requirements for existing building stock should serve as an impetus to develop compatible improvement solutions, thereby bringing historic buildings closer to current living standards and promoting their preservation through respectful use.

This research area is particularly relevant in Italy and, more broadly, in Europe, where historic architecture constitutes a significant portion of the building stock. Specifically, the present study developed a dynamic ICT-based repository of the recurring constructional and performance characteristics of historic masonry. The structure of this repository was developed using Sicilian historic architecture as a case study, but through constructional and typological analysis tools, it can be extended to other contexts.

The dynamic structure of the repository is an open framework that allows the acquisition of new data, improving the existing information. Thus, the repository is seen as a tool not only for understanding masonry but also, more generally, for enhancing the historic building stock.

This research led to the proposal of a dynamic repository of the typological and performance characteristics of historic masonry utilizing ICT technologies. These computational tools enabled, among other things: the development of digital twins of masonry for assessing thermo-hygrometric properties; the creation of datasets for cluster analysis; the management of the dynamic repository data; and the automation of image recognition processes for masonry identification.

The methodology for developing the repository is based on an interdisciplinary approach to understanding historic masonry, combining classical typological analysis tools with advanced modeling techniques to create an innovative method that integrates rapid assessments, laboratory tests, in-situ measurements, and energy and mechanical simulations.

The intermediate results of this research highlighted the need to prioritize the modeling and simulation of masonry to overcome the numerous challenges associated with determining the energy performance of masonry in the field, compared to the initial hypotheses of the study.

In the first phase of the research, efforts were focused on deepening the understanding of masonry, aiming to classify and characterize (mechanically and thermally) the historic masonry present in different local contexts in Sicily. The classification of masonry types was carried out both through traditional typological analysis methods and through a statistical approach based on cluster analysis. The former allowed for overcoming descriptions primarily based on the shape of stone elements (cut, rough-hewn, or unformed stones) by considering the constructional aspects influencing the thermal and

mechanical performance of the masonry. The statistical approach allowed the variability of constructional characteristics to be reduced to a limited number of parametric elements.

Indeed, the use of statistical methodologies for classifying masonry types proved to be a methodologically effective and versatile tool, validating the classification method presented in Chapter 2 and making it applicable in other historic centers. This approach allowed the classification criteria to be made objective, overcoming the subjectivity often inherent in traditional visual analysis, and developing a scientific basis for comparing different masonry types.

Furthermore, the statistical approach offered several advantages, including the ability to systematically and repeatably analyze the qualitative and quantitative parameters of masonry across different territorial contexts. However, some challenges associated with the adoption of a statistical approach cannot be overlooked. One of the main difficulties lies in the need for a large and detailed dataset regarding the analyzed masonry. The validity and reliability of the results are closely tied to the quantity and quality of the data collected.

This requirement, however, should not be seen merely as an obstacle but also as an opportunity. The need to collect a wide range of data on masonry not only contributes to the validity of the analyses but also presents an opportunity to expand the repository with additional data on historic masonry.

To fully understand the constructional characteristics that characterize masonry types, and to ensure the repository is truly usable for modeling purposes, it is essential to have in-depth knowledge of the stone materials used in traditional construction, which is the focus of the conducted tests.

It is important to emphasize the significance of the investigations carried out to characterize the thermophysical properties of natural stone materials and masonry.

The research conducted in the sicilian context was valuable in expanding the repository with experimental data on some of the principal stone materials used in historic masonry. Although further laboratory and field tests are necessary to statistically validate the results, the data obtained allow for an initial thermophysical characterization of the masonry and natural stones analyzed.

In particular, experimental tests conducted in laboratories in Italy and France (at the École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais within the GSA laboratory and at the CPDM laboratories of Université Gustave Eiffel) enabled the characterization of thermophysical properties for a selection of natural stone materials, including biocalcarene, soft and compact limestone conglomerates, sulfurous limestone, marlstone, quartz-sandstone, selenitic gypsum, arkosic sandstone, and travertine. Laboratory tests assessed key thermophysical properties such as apparent density and thermal conductivity.

In addition to laboratory measurements, five in-situ thermal conductivity tests were conducted on historic masonry distinguished by masonry type and stone material (quartz-sandstone, limestone, and sulfurous limestone). These tests were carried out in four local contexts: Bompietro, Petralia Sottana, Geraci Siculo, and Mistretta. The operational challenges faced during these field tests (particularly in selecting measurement points, test duration, and managing environmental variables) confirmed the importance of measurement tools but also yielded reliable results for model calibration.

The data collected from laboratory and field tests were used to calibrate Finite Element Method (FEM) parametric models of historic masonry.

Achieving experimentally calibrated models allowed for the quantitative investigation of the thermophysical properties of masonry, not only qualitatively. This also enabled the analysis of multiple masonry types, varying the geometric and constructional parameters of the models.

Model calibration ensures a good match between the observed performance in the digital model and the actual performance of the masonry, obtaining reliable results of thermal simulations even in the absence of direct in-situ measurements. Thus, a well-calibrated FEM model provides reliable information on the thermal performance of masonry, offering a viable alternative to field measurements and enabling the estimation of thermal properties even without direct tests. This reduces project time and costs without sacrificing the accuracy necessary for energy-efficient interventions compatible with conservation requirements.

Another critical aspect is related to the geometric simplifications necessary for creating FEM models. Given the complexity of the actual geometry of historic masonry, the development of digital models inevitably requires simplifying the shape and structural characteristics. Despite the inevitable geometric simplification, model calibration showed that thermal performance simulations remain reliable for accurately estimating the energy performance of masonry.

Therefore, the experimental characterization and numerical modeling activities carried out in this research are expected to contribute significantly to the understanding of the thermal performance of historic masonry, providing valuable data and methodological tools for an accurate analysis of historic building envelopes that take into account the construction complexity of each individual building.

Finally, the approach to the digitalization of architectural heritage proposed in this work represents an opportunity for in-depth knowledge, dissemination, and innovation aimed at the conservation and enhancement of masonry and, more generally, architectural heritage that serves as the most tangible trace of a community's history and technical culture.

The continuous development of information technologies has enabled innovation in the knowledge (and accessibility) of architecture through a “digital approach,” which also facilitates the dissemination of scientific information related to building structures, technical elements, construction techniques, and local craftsmanship, highlighting cultural specificities.

In particular, this research employed ICT techniques as a complement to the analysis of historic masonry performance, proposing a semi-automatic identification system capable of examining digital photographic images to classify masonry types, extracting geometrical-constructional information, and determining the thermal and mechanical properties of the masonry. The identification system is designed to assist professionals in the rehabilitation and preservation of heritage buildings during the initial building assessment and design phases, helping to identify appropriate rehabilitation interventions and ensuring the use of technologies and materials compatible with the analyzed masonry and the cultural value of the structure.

In conclusion, the recognition system also supports the dynamic nature of the repository proposed in this thesis because it, in the future, will facilitate the analysis of an increasing number of cases, thereby gradually structuring the results.

7.2 FUTURE DEVELOPMENTS

A potential development for the recognition system to extend the repository may involve: multimedia content (such as images or masonry models), location-specific information, characteristics and properties of stone materials, BIM families related to masonry types, proposals for technological solutions for restoration interventions, and catalogs of compatible materials to be used for masonry restoration, to be made available to the entire technical-scientific community working in the construction sector.

Building on the research conducted, it is possible to extend the FEM model analysis to assess the mechanical stresses affecting historic masonry, thereby offering a tool for the integrated evaluation of both energy and mechanical performance.

Indeed, the model, which accurately describes masonry both thermally and mechanically, would serve as a common basis for the simultaneous design of structural and energy efficiency interventions. From this perspective, the use of BIM objects would allow the integration of the developed models into Building Information Modeling systems. The development of BIM packages for traditional masonry would enable easy modification of not only the geometric configuration and the shape of the elements but also the materials used and their associated thermophysical properties, supporting dynamic and adaptive design.

An additional research development is the transition to a fully automated system for masonry recognition and classification. This system, still based on advanced ICT technologies, would be based on the dynamic repository of typological and performance characteristics of historic masonry developed in this research. Specifically, machine learning algorithms and data analysis techniques implementation would enable the automatic classification of masonry types, providing precise information on their thermophysical and structural properties.

Finally, the parametric modeling conducted in this study, based on statistical analyses of data collected from case studies, is suitable for investigating possible correlations between the geometric-constructional characteristics of masonry and their thermophysical properties. These correlations could lead to corrective factors for calculating the thermal performance of walls, particularly regarding thermal conductivity, to improve result reliability.

7.1 CONCLUSIONI

La ricerca condotta nell'ambito della tesi di dottorato si è concentrata sull'analisi delle prestazioni termiche delle murature storiche e sui metodi per la loro modellazione accurata. Infatti, un'appropriata conoscenza delle prestazioni termiche delle murature e quindi di quelle energetiche dell'edificio è necessaria per indirizzare gli interventi di recupero e miglioramento prestazionale, secondo criteri di compatibilità, degli edifici storici coerenti con le esigenze della conservazione.

Questi ultimi risultano spesso vulnerabili e lontani dalle esigenze contemporanee in termini di comfort abitativo, efficienza energetica, sicurezza strutturale e sostenibilità ambientale.

Come ormai confermato dalla letteratura scientifica e dalle norme, la deroga dei requisiti minimi di efficienza energetica del patrimonio edilizio esistente deve tradursi in uno stimolo a sviluppare soluzioni di miglioramento compatibile, in modo da avvicinare l'edificio storico all'esigenze dell'abitare e favorirne così, attraverso un uso rispettoso, la conservazione.

Questo ambito di ricerca acquisisce particolare rilevanza in Italia e, a più ampia scala, in Europa, dove l'architettura storica costituisce una quota significativa del patrimonio edilizio.

In particolare, nella presente ricerca si è elaborato un repertorio dinamico su base ICT delle caratteristiche costruttive e prestazionali ricorrenti delle murature storiche. La struttura del repertorio è stata sviluppata adoperando come caso di studio l'architettura storica siciliana, ma attraverso gli strumenti propri dell'analisi costruttiva e tipologica può essere estesa ad altri contesti. Inoltre, la struttura dinamica del repertorio è una struttura aperta che attraverso l'acquisizione di nuovi dati consente di migliorare quelli già presenti. In questo modo il repertorio è inteso come uno strumento non solo per la conoscenza delle murature ma più in generale per il miglioramento del patrimonio edilizio storico.

La ricerca è giunta alla proposta di un repertorio dinamico delle caratteristiche tipologiche e prestazionali delle murature storiche sfruttando le tecnologie ICT. Gli strumenti informatici hanno consentito tra l'altro: lo sviluppo di *digital twin* di murature utili alla valutazione delle proprietà termoigrometriche; la creazione di dataset per la cluster analysis; la gestione dei dati del repertorio dinamico; l'automazione di processi di riconoscimento delle immagini di murature.

Il metodo che ha portato all'elaborazione del repertorio si basa su un approccio interdisciplinare alla conoscenza delle murature storiche e ha combinato strumenti classici dell'analisi tipologica con quelli avanzati della modellazione per elaborare un metodo innovativo che integra analisi speditive, prove di laboratorio, misure in opera, modelli e simulazioni energetiche e meccaniche.

I risultati intermedi di questa ricerca hanno messo in evidenza, rispetto alle ipotesi iniziali da cui lo studio è partito, la necessità di dare ampio spazio alla modellazione e simulazione delle murature per sopperire ai molti ostacoli connessi alla determinazione in opera delle prestazioni energetiche murature.

Durante la prima fase di ricerca, l'attività si è concentrata sull'approfondimento della conoscenza delle murature, con l'obiettivo di classificare e caratterizzare (meccanicamente e termicamente) le murature storiche presenti in diversi contesti locali in Sicilia.

La classificazione per tipi delle murature è stata svolta sia con i criteri classici dell'analisi tipologica sia con un approccio statistico basato sulla *cluster analysis*; i primi, hanno consentito di superare una descrizione basata essenzialmente sulla forma degli elementi lapidei (conci intagliati, sbozzati, pietrame informe) per tener conto degli aspetti costruttivi influenti sulle prestazioni termiche e meccaniche delle murature; l'approccio statistico ha consentito di ricondurre la variabilità dei caratteri costruttivi ad un numero limitato di elementi parametrici.

Infatti, l'utilizzo di metodologie statistiche applicate per la classificazione di tipi murari si è rivelato uno strumento metodologicamente efficace e versatile, che ha consentito di validare il metodo di classificazione esposto nel capitolo 2, rendendolo applicabile in altri centri storici. Tale approccio ha permesso di rendere oggettivi i criteri di classificazione delle murature, superando la soggettività che spesso caratterizza l'analisi visiva tradizionale, e sviluppando una base scientifica per la comparazione tra i diversi tipi murari.

Inoltre, l'approccio statistico utilizzato offre diversi vantaggi, tra cui la possibilità di analizzare in modo

sistematico e ripetibile i parametri quali-quantitativi delle murature in differenti contesti territoriali.

Tuttavia, alcune criticità riscontrate nell'adozione di un approccio statistico non possono essere trascurate. Una delle principali difficoltà risiede nella necessità di disporre di un dataset ampio e dettagliato relativo alle murature analizzate. La validità e l'affidabilità dei risultati dipendono strettamente dalla quantità e qualità dei dati raccolti.

Questa esigenza, tuttavia, non deve essere letta esclusivamente come un ostacolo, ma anche come un'opportunità. Difatti, la necessità di raccogliere una vasta gamma di dati sulle murature contribuisce non solo alla validità delle analisi, ma determina un'occasione per ampliare il repertorio con ulteriori dati relativi alle murature storiche.

Ovviamente, per comprendere appieno le caratteristiche costruttive che contraddistinguono i tipi murari e perché il repertorio possa essere realmente impiegabile per le finalità di modellazione appare necessaria la conoscenza approfondita dei materiali lapidei utilizzati nella costruzione tradizionale, a ciò sono legate le prove svolte.

Appare a questo punto opportuno sottolineare l'importanza che hanno avuto le indagini svolte per la caratterizzazione termofisica dei materiali lapidei naturali e delle murature.

La ricerca sviluppata nel contesto siciliano è stata utile per ampliare il repertorio con dati sperimentali inerenti alcuni tra i principali materiali lapidei impiegati come materiale da costruzione per le murature storiche. Nonostante resti necessario svolgere un numero maggiore di prove, sia di laboratorio che in opera, al fine di verificare statisticamente i risultati, i dati ottenuti permettono una prima caratterizzazione termofisica delle murature e dei materiali lapidei naturali indagati.

In particolare, le indagini condotte mediante prove sperimentali di laboratorio, realizzate in Italia e in Francia (presso l'*École Nationale Supérieure d'Architecture Paris-Malaquais* all'interno del laboratorio GSA e nei laboratori CPDM dell'*Université Gustave Eiffel*), che hanno consentito di caratterizzare le proprietà termo-fisiche di una selezione di materiali lapidei naturali come: biocalcarenite, conglomerati calcarei teneri e compatti, calcare solfifero, marna arenitica, quarzarenite, gesso selenitico, arenaria arcossica e travertino. Le prove in laboratorio hanno permesso la valutazione delle principali proprietà termo-fisiche, quali densità apparente e conducibilità termica.

Oltre alle misure di laboratorio, sono state svolte cinque prove in opera di conduttanza termica su murature storiche distinte per tipo murario e per materiale lapideo (quarzarenite, calcarenite e calcare solfifero). Queste prove hanno riguardato quattro ambiti locali: Bompietro, Petralia Sottana, Geraci Siculo e Mistretta. Le difficoltà operative incontrate in queste misure in opera (in particolare nell'individuazione dei punti di indagine, nella durata della misura e nella gestione delle variabili ambientali) hanno confermato l'importanza dello strumento di misurazione, ma allo stesso tempo hanno permesso di ottenere risultati attendibili per la calibrazione dei modelli.

In particolare, i dati raccolti tramite le prove di laboratorio e le prove in situ sono stati utilizzati per la calibrazione dei modelli parametrici agli elementi finiti (FEM Finite Element Method) di murature storiche.

Aver ottenuto modelli validi sperimentalmente (calibrati) ha permesso di indagare le proprietà termofisiche delle murature in termini quantitativi e non esclusivamente qualitativi, e ha consentito di farlo per molteplici murature al variare dei parametri geometrici e costruttivi dei modelli stessi.

La calibrazione permette di ottenere una buona corrispondenza tra le prestazioni osservate nel modello digitale e quelle della muratura reale, in modo tale che i risultati derivanti dalle simulazioni termiche siano validati e verificabili, anche in assenza di misurazioni in situ dirette.

Così, un modello FEM ben calibrato è in grado di fornire informazioni attendibili sulle prestazioni termiche delle murature, in altri termini i modelli numerici forniscono un'alternativa efficace alle misure in opera e consentono di stimare le proprietà termiche delle murature anche in assenza di prove dirette, riducendo i tempi e i costi del progetto di miglioramento energetico senza rinunciare all'accuratezza necessaria per un intervento compatibile con le esigenze della conservazione.

Un altro aspetto critico che deve essere considerato riguarda le semplificazioni geometriche necessarie per la creazione dei modelli FEM. Poiché la geometria reale delle murature storiche può essere particolarmente complessa, l'elaborazione di modelli digitali implica inevitabilmente una semplificazione della forma e delle caratteristiche strutturali.

La calibrazione dei modelli ha dimostrato che la stima delle prestazioni termiche

Nonostante l'inevitabile semplificazione geometrica dei modelli, la calibrazione di questi ha permesso di verificare che la simulazione delle prestazioni termiche fosse affidabile per stimare in modo preciso le prestazioni energetiche delle murature.

Pertanto, si ritiene che le attività di caratterizzazione sperimentale e modellizzazione numerica svolte nella presente ricerca possano contribuire significativamente alla comprensione delle prestazioni termiche delle murature storiche, e forniscano dati e strumenti metodologici utili per un'analisi accurata dell'involucro edilizio storico che tenga conto della complessità costruttiva che caratterizza il singolo edificio storico.

Infine, l'approccio alla digitalizzazione del patrimonio architettonico proposto nel presente lavoro rappresenta un'opportunità di conoscenza approfondita, di divulgazione e di innovazione finalizzata alla conservazione e valorizzazione delle murature e più in generale dei beni architettonici che rappresentano la traccia più tangibile della storia di una comunità e della sua cultura tecnica.

Il continuo sviluppo delle tecnologie informatiche ha permesso di innovare la conoscenza (e la fruizione) dell'architettura attraverso un "approccio digitale" che consente anche la divulgazione di informazioni (scientifiche) correlate agli organismi edilizi, agli elementi tecnici, alle tecniche costruttive, alle maestranze del luogo che hanno adottato soluzioni originali per la loro realizzazione, valorizzandone le specificità culturali.

In particolar modo, questa ricerca ha impiegato tecniche ICT come complemento all'analisi delle prestazioni delle murature storiche, proponendo un sistema di riconoscimento semi-automatico capace di esaminare immagini fotografiche digitali per classificarne il tipo murario, ricavarne informazioni geometrico-costruttive e determinare le prestazioni termiche e meccaniche della muratura. Il sistema di riconoscimento è volto a supportare i professionisti del recupero e della conservazione del patrimonio storico durante la fase conoscitiva dell'edificio e nella fase progettuale, per individuare interventi di recupero appropriati, garantendo l'adozione di soluzioni tecnologiche e materiali compatibili con la muratura analizzata e con il valore culturale del manufatto.

In conclusione, il sistema di riconoscimento favorisce anche il carattere dinamico del repertorio proposto in questa tesi perché, in prospettiva, facilita l'analisi di un numero sempre maggiore di casi e di conseguenza la progressiva strutturazione dei risultati.

7.2 SVILUPPI FUTURI

Un potenziale sviluppo del sistema di riconoscimento per l'estensione del repertorio può consistere in: contenuti multimediali (come immagini o modelli di murature), informazioni specifiche sul luogo, caratteristiche e proprietà dei materiali lapidei, famiglie di oggetti BIM relativi ai tipi murari, proposte di soluzioni tecnologiche per interventi di recupero, cataloghi con materiali compatibili da utilizzare per il recupero delle murature, da rendere disponibili all'intera comunità tecnico-scientifica che opera nel settore delle costruzioni.

Partendo dal lavoro di ricerca svolto è possibile estendere l'analisi dei modelli FEM alla verifica delle sollecitazioni meccaniche che interessano le murature storiche, offrendo così uno strumento per la valutazione integrata sia delle prestazioni energetiche che di quelle meccaniche.

Infatti, il modello descrivendo accuratamente la muratura sia dal punto di vista termoisolante sia da quello meccanico costituirebbe la base comune per la contestuale progettazione esecutiva degli interventi strutturali e di efficienza energetica.

Da questo punto di vista, il ricorso ad oggetti BIM consentirebbe di integrare i modelli sviluppati all'interno di sistemi di *Building Information Modeling*. Lo sviluppo di pacchetti BIM di murature tradizionali permetterebbe di variare facilmente non solo la configurazione geometrica e la forma degli elementi, ma anche i materiali utilizzati e le proprietà termoigrometriche ad essi associate, supportando una progettazione dinamica e adattiva.

Un ulteriore sviluppo della ricerca è il passaggio ad un sistema completamente automatizzato per il riconoscimento e la classificazione delle murature. Tale sistema, sempre basato sull'impiego di tecnologie ICT avanzate sarebbe alimentato dal repertorio dinamico delle caratteristiche tipologiche e prestazionali delle murature storiche sviluppato nell'ambito della presente ricerca.

In particolare, l'implementazione di algoritmi di machine learning e tecniche di analisi dei dati consentirebbe di sfruttare le informazioni contenute nel repertorio per effettuare una classificazione automatica delle murature. In questo modo, il sistema potrebbe riconoscere con un elevato grado di precisione il tipo murario e fornire indicazioni sulle sue proprietà termofisiche e strutturali.

Infine, la modellazione parametrica svolta in questo studio sulla base di analisi statistiche dei dati raccolti attraverso i casi di studio è idonea ad indagare possibili correlazioni tra le caratteristiche geometrico-costruttive delle murature e le loro proprietà termofisiche. Tali correlazioni potrebbero tradursi in fattori correttivi del calcolo delle prestazioni termiche delle pareti, in particolare per quanto riguarda la conduttanza termica, al fine di migliorare l'attendibilità del risultato.

Development of a dynamic
repertoire of the typological and
performance characteristics of
historic walls on an ICT basis



PhD candidate
Eng. Erica La Placa