



Il Complesso monumentale dello Spasimo
Lettura e analisi attraverso il rilievo

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

Dipartimento di Rappresentazione
Dottorato di Ricerca in
Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente
ciclo XVIII

Francesco Di Paola

Il Complesso monumentale dello Spasimo
Lettura e analisi attraverso il rilievo

Il Coordinatore
Prof. ssa Arch. Lucia Bonanno

Il Tutor
Prof. Ing. Michele Inzerillo

Il Dottorando
Ing. Francesco Di Paola

Desidero ringraziare tutti coloro che, con la loro collaborazione e disponibilità, hanno contribuito alla realizzazione della presente ricerca.

Ringrazio i professori del Dipartimento di Rappresentazione per avermi guidato e consigliato nel mio percorso di crescita culturale.

In particolar modo ringrazio il Professore Ing. Michele Inzerillo, mio tutor di tesi e fondamentale riferimento, per la costante e puntuale presenza.

Per l'interesse mostrato e per i preziosi suggerimenti nel periodo di elaborazione della tesi, ringrazio particolarmente il Professore Ing. Giovanni Palazzo del Dipartimento di Progetto e Costruzione Edilizia, collaboratore con l'Assessorato Regionale dei Beni Culturali e Ambientali nella progettazione e direzione dei lavori di recupero e ripristino di complessi architettonici monumentali, tra i quali, anche, Santa Maria dello Spasimo a Palermo.

Ringrazio l'Ing. Laura Inzerillo per avermi seguito e incoraggiato caricandomi di entusiasmo, l'Arch. Salvatore D'Amelio, valido riferimento per ogni mio dubbio durante le campagne di rilevamento, l'Arch. Matteo Fabbri del D.I.A.P.Re.M. (Centro Dipartimentale per lo Sviluppo di Procedure Automatiche Integrate per il Restauro dei Monumenti) del Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Ferrara, per aver reso possibile la realizzazione in scala di un elemento architettonico della Chiesa di Santa Maria dello Spasimo.

Ringrazio il Professore Arch. Marcello Balzani, Direttore del D.I.A.P.Re.M. e Responsabile del Laboratorio di rilievo, modellazione e prototipazione 3D del D.I.A.P.Re.M., per avermi accolto e permesso di inserirmi nelle attività del laboratorio.

Ringrazio, inoltre, il Centro Regionale per l'Inventario, la Catalogazione e la Documentazione grafica, fotografica, aerofotografica, fotogrammetrica e audiovisiva dei beni culturali e ambientali, per aver fornito materiale dell'Archivio cartografico Mortillaro-Tumminello e immagini storiche dal Fondo Ente Palazzi e Ville degli archivi della Fototeca.

Ringrazio, infine, Maria Rita e Benedetto per il loro indispensabile contributo.



Il Complesso monumentale dello Spasimo
Lettura e analisi attraverso il rilievo

INDICE

Introduzione

Obiettivi prefissati, descrizione delle fasi di ricerca	pag.	9
--	------	---

I Parte Il Rilievo architettonico

1° Capitolo

1.1 Cenni di storia del rilievo architettonico. Metodologie e strumentazioni del passato.	pag.	14
--	------	----

1.2 Nuove strumentazioni digitali di rilevamento metrico

- tecniche innovative di acquisizione di dati e loro integrazione nell'ambito dei beni culturali e ambientali.	pag.	29
- Sistema digitale di acquisizione: il laser a scansione	pag.	31
- Sistema Glogale di Posizionamento	pag.	38
- Sistema fotogrammetrico digitale	pag.	43
- Sistema Georadar	pag.	49

2° Capitolo

2.1 La nuova cultura del rilievo dei Beni Culturali

- Considerazioni sulle peculiarità del rilievo "moderno"	pag.	64
- Definizione di un protocollo di intervento attuabile secondo le tecnologie contemporanee.	pag.	67
- Quali le attuali linee di ricerca nel campo	pag.	75

dell'acquisizione dati e restituzione grafica, limiti e potenzialità nel processo di rilievo.

Il Parte Il Complesso di Santa Maria dello Spasimo

3° Capitolo

3.1 Storia del complesso monumentale

- Le vicende storico-costruttive del convento dalla fondazione fino agli anni 1570. pag. 80
- La costruzione del baluardo e il sistema difensivo. pag. 85
- I magazzini comunali e il teatro allo Spasimo. pag. 89
- Da lazzaretto a ospedale. pag. 90

4° Capitolo

4.1 Le trasformazioni del contesto urbano attraverso la documentazione cartografica pag. 98

4.2 Il complesso abbaziale nell'iconografia storica pag. 104

5° Capitolo

5.1 Caratteri generali dell'Architettura palermitana del Cinquecento

- Repertorio delle chiese coeve, tipologie; anacronismi e sincretismi al clima stilistico del tempo. pag. 110

5.2 Analisi architettonica

- Descrizione architettonica dell'impianto ed evoluzione dell'organismo architettonico. pag. 115

6° Capitolo

6.1 Il rilievo critico del complesso monumentale

- Esperienze pregresse e stato del rilievo del pag. 142



monumento.

- Il quadro operativo: progetto di selezione delle aree di significato architettonico da rilevare, scelta dei sistemi di rilevamento da adottare e integrazione delle metodologie (fotogrammetrico, topografico, diretto, laser scanner). pag. 143

6.2 Acquisizione, elaborazione e restituzione dei dati e confronti tra le metodologie utilizzate

- Il rilevamento strumentale con stazione totale e GPS (reti topografiche di inquadramento e reti di appoggio per le scansioni laser). pag. 145
- Il rilevamento fotogrammetrico. pag. 150
- Il rilevamento strumentale con scanner laser. pag. 157
- Il rilevamento diretto. pag. 162

6.3 Analisi critica e rappresentazione dei dati

- Le tecniche di rappresentazione digitale utilizzate per la rappresentazione bidimensionale (piante, sezioni e prospetti) e tridimensionale (rendering, sequenze animate, modelli 3D). pag. 163
- Approfondimenti geometrici; analisi critica e verifica del profilo dell'arco ribassato nel pronao della chiesa. pag. 167
- Note sui metodi di lavorazione e di taglio della pietra. pag. 183
- **Rilievi tematici.**
 - Indagini georadar su alcune aree di studio del complesso architettonico. Acquisizione ed elaborazione dei dati. pag. 186
 - La restituzione tridimensionale solida. pag. 192

6.4 La informatizzazione dei dati di rilievo

- Creazione di un ipertesto, implementabile e modificabile nel tempo, finalizzato alla conoscenza, alla conservazione del monumento e ai successivi interventi di restauro. pag. 210

Conclusioni pag. 212

Bibliografia tematica e sitografia pag. 214

Allegati pag. 224

- 1) Documenti riguardanti il Complesso monumentale dello Spasimo, estratti da F. Meli, *Matteo Carnivulari e l'Architettura del Quattrocento e Cinquecento in Palermo*, Roma 1958.
- 2) A. Mongitore, *Le chiese distrutte di Palermo*, Ms. settecentesco conservato presso la Biblioteca Comunale di Palermo, ai segni Q.q E 11. Pagine riguardanti la chiesa del Complesso di S. Maria dello Spasimo.
- 3) Rilievi precedenti sul complesso architettonico.
- 4) Rappresentazioni bidimensionali (piante, prospetti/ sezione) del rilievo geometrico del complesso architettonico.

Elenco Tavole pag. 250



Introduzione

Oggetto di questa ricerca è lo studio del Complesso monumentale dello Spasimo a Palermo, attraverso un processo metodologico di rilievo. Il tema si costituisce come una valida occasione per sperimentare l'importanza e le potenzialità offerte dalle nuove tecniche di rilievo digitale integrato, inserito nel complesso ambito culturale finalizzato alla documentazione e alla conoscenza di un bene architettonico. La ricerca si articola in due parti.

La prima, teorica, affronta la tematica del rilievo architettonico, esaminando un essenziale excursus storico delle principali evoluzioni delle metodiche e delle strumentazioni di rilevamento, con l'obiettivo di descrivere quali peculiarità offre oggi la nuova cultura del rilievo inteso come sistema "aperto" di conoscenze.

Le discipline del rilevamento, nel corso dei secoli, hanno affinato le tecniche di misura adattandole alle situazioni e all'innovazione tecnologica: dalle metodologie più semplici, ma al tempo stesso efficaci, del rilievo diretto con strumenti elementari, a quelle derivate dalla geometria descrittiva e infine a quelle oggi consentite dalle tecnologie elettroniche e informatiche della moderna geomatica. Negli ultimi decenni il repentino sviluppo delle tecnologie geomatiche dedicate al settore dei beni culturali di interesse architettonico, artistico e archeologico, ha apportato nuove teorie e nuove aspettative che inducono a una rivisitazione dei processi metodologici. Nonostante le numerose edizioni scientifiche di analisi e di sperimentazioni su casi studio evidenzino nuovi interessanti risultati in ambito interdisciplinare, risulta ancora problematica la gestione del processo di rilievo in cui si opera con strumentazioni diverse, precisioni non omogenee, sistemi di riferimento differenti; appare, quindi, fondamentale una ri-scrittura dei protocolli delle metodologie derivate dal cambiamento tecnologico. Si pone maggiore attenzione all'interrelazione e all'integrazione dei principali metodi innovativi, alcuni dei quali ancora in via di sperimentazione, con l'ausilio di esempi

significativi di esperienze applicative maturate in questo settore.

Segue la seconda parte della ricerca ponendo le basi sulla formulazione di un protocollo operativo di intervento proposto, che miri ad analizzare, approfondire e indagare sugli aspetti morfo-metrici, materici, costruttivi e strutturali del complesso architettonico, con particolare riferimento alle relazioni spaziali intercorrenti con il limitrofo contesto urbano; sito ai confini sud-orientali del centro storico, addossato alle antiche mura della città, presenta problematiche logistiche molto diverse, che richiedono strumentazioni distinte con sistemi di riferimento differenti e metodologie integrate operanti a scale diverse.

Dopo un'indagine preliminare sul particolare periodo della storia dell'architettura siciliana del Quattrocento-Cinquecento e un esame degli anacronismi e sincretismi tipologico-stilistici della chiesa del complesso, rispetto ad alcune coeve, si procede con una attenta progettazione a priori delle fasi operative, adottando tecniche e procedure di calcolo che consentano il legame dei dati successivamente raccolti. Si individuano i campi di applicazione e conseguentemente si sceglie la strumentazione più idonea in termini di livello di tolleranza e grado di precisione, legata alle finalità di indagine (per ogni applicazione si mettono in evidenza i tempi in relazione alla superficie da rilevare e alle difficoltà logistiche).

L'ultima fase della ricerca è dedicata all'analisi geometrica del manufatto, alla restituzione ed al confronto dei dati metrici acquisiti, alla rappresentazione del manufatto, alla realizzazione di documentazione fotografica, alla stampa 3D in scala di un particolare elemento del complesso architettonico, e ad indagini di tipo bibliografico, archivistico, iconografico per la formulazione di un database per l'archiviazione di tutte le informazioni acquisite, finalizzato ai successivi interventi di restauro.

Si valutano i risultati ottenuti con l'obiettivo di verificare criticamente la strutturazione del processo metodologico di rilievo proposto e di avvalorare la necessità indispensabile di un archivio documentario e di un progetto del rilievo interrogabile, integrabile e



implementabile nel tempo.

Sembra opportuno citare le parole del Professore C. Cundari che bene sintetizzano il processo di analisi condotto: Presupposto di qualsiasi intervento di conservazione è la comprensione dell'organismo considerato nella sua globalità, nella sua complessiva articolazione; è la consapevolezza del suo essere il risultato di una stratificazione protrattasi nel tempo, di successivi interventi (realizzati molto spesso con differenti criteri e tecniche costruttive). Peraltro, in edifici fortemente storicizzati, ogni parte quasi sempre è legata – nelle sue *ragioni* strutturali, estetiche e funzionali – al tutto. Si tratta, in altre parole, di ricostruire, attraverso una complessa azione di indagine (mensoria, storica, archivistica, bibliografica, tecnica, tecnologica), i criteri, la *ratio* con la quale l'organismo si è venuto costituendo nel tempo.

Solo sulla base di una documentazione siffatta sarà possibile valutare accuratamente le esigenze di intervento e individuare eventuali indagini ancora necessarie a chiarire quanto più possibile la storia dell'edificio in oggetto¹.

¹C. Cundari, Il rilievo per la conservazione, in "Il Complesso di Monteoliveto a Napoli. Analisi, Rilievi, Documenti, Informatizzazione degli archivi", C. Cundari (a cura di), Gangemi Editore, Roma 1999. p. 19.

6° Capitolo

Una vista del modello numerico a superfici mesh ottenuto dall'elaborazione dei dati acquisiti con la tecnica laser scanning.

6. 1 Il rilievo critico del complesso monumentale.

Esperienze pregresse e stato del rilievo del monumento.

Ques'ultima parte della ricerca (facendo riferimento alla proposta di uno schema di valenza generale di protocollo di intervento per il rilievo finalizzato alla documentazione e catalogazione di un bene architettonico, si veda il Cap. 2°) descrive le fasi operative di acquisizione ed elaborazione dei dati del rilevamento condotto sull'organismo del Complesso monumentale dello Spasimo. La pianificazione della campagna di indagine si è rilevata particolarmente impegnativa e la programmazione e l'esecuzione delle operazioni di misurazione hanno richiesto tempi lunghi. Dopo aver sistematicamente raccolto materiale storico, bibliografico e iconografico (questa fase si è protratta durante tutto il processo di conoscenza del monumento) e materiale di riferimento di esperienze condotte nello stesso ambito di interesse, si è proceduto a progettare un piano di intervento di avanzamento dei lavori, costantemente documentato per mezzo di un diario settimanale. Dalle indagini svolte in merito allo stato di conoscenza del monumento, attraverso la consultazione di testi e tesi sull'argomento, si è ritenuto indispensabile costituire un archivio documentario consultabile con l'intento di integrare ed aggiornare in maniera unitaria gli studi precedentemente condotti, che documentavano le trasformazioni architettoniche e le vicende storiche del complesso.

Il reperimento della documentazione grafica dei rilievi pregressi, realizzati con strumenti e tecniche tradizionali, ha evidenziato l'assenza di uno studio critico esteso a tutto l'organismo. Alcuni tra i disegni raccolti, quelli settecenteschi dello studioso Antonio Mongitore¹ (vedi Allegato n. 2) e quelli del Prof. Francesco Saverio Brancato, si concentrano soltanto sull'impianto della chiesa. Inoltre le planimetrie e gli elaborati grafici consultati, finalizzati per lo più ad interventi di ampliamento e di trasformazione dei locali del ex convento, non documentano interamente la struttura del bastione e le

sue relazioni morfologico-spaziali con la chiesa. Nell'Allegato n. 3 si riportano alcuni rilievi planimetrici del 1883 e del 1889, editi in G. Carta, *Il sistema ospedaliero nel centro storico di Palermo* (1969), con la disposizione dei locali adibiti per il cambiamento di destinazione d'uso ad ospedale.

Alla base di queste considerazioni, particolarmente interessante si proponeva un approfondimento metrico rigoroso ed una rappresentazione grafica aggiornata e, in alcune parti del complesso, del tutto inedita, attraverso la sperimentazione di nuove strumentazioni e nuove metodiche di elaborazione, che potessero costituire una base per futuri interventi di restauro.

Il quadro operativo: progetto di selezione delle aree di significato architettonico da rilevare, scelta dei sistemi di rilevamento da adottare e integrazione delle metodologie di rilevamento (topografico, fotogrammetrico, diretto, laser scanner).

L'area rilevata, sita all'interno del Mandamento Tribunali del Centro storico di Palermo, ha un'estensione di 9 ha. e racchiude il complesso di Santa Maria dello Spasimo e parte del contesto urbano limitrofo. Per intraprendere uno studio critico delle relazioni spaziali del complesso architettonico, è stato fondamentale una valutazione preliminare della complessità dell'oggetto da rappresentare, della sua estensione spaziale, della sua articolazione nonché una verifica della visibilità e dell'accessibilità delle aree di interesse (fig. 6.1). In particolare, osservando la struttura della chiesa, le dimensioni e le relazioni spaziali nello sviluppo orizzontale e in quello verticale, hanno inciso notevolmente sulle modalità di esecuzione del rilevamento comportando un'integrazione delle tecniche utilizzate. L'applicazione della tecnica laser scanning nella zona absidale e del coro della chiesa ha permesso di misurare con precisione millimetrica e senza l'ausilio di impalcature la geometria della copertura voltata. Particolare attenzione è stata posta alla struttura del bastione e alla documentazione



Fig. 6.1 - Stralcio della Carta tecnica del Centro Storico di Palermo, scala 1:1000, Mandamento Tribunali, Complesso architettonico dello Spasimo Strumentazioni applicate alle diverse scale di intervento.

dello stato di degrado dei fronti esterni. In questo caso, le tecniche non convenzionali di rilevamento fotogrammetrico, mediante strumentazione con asta telescopica, hanno agevolmente superato diversi problemi logistici connessi a spazi ristretti e poco agibili (fig. 6.2).

In riferimento alla proposta del protocollo operativo, si focalizza l'attenzione al 4° livello, alla fase delle indagini sul campo. Di seguito si descrivono con l'ausilio di schemi, di schede tecniche tematiche, di database e di eidotipi, prodotti per l'archiviazione e la gestione organica delle informazioni, le procedure di acquisizione adottate (georeferenziazione, classificazione e segmentazione), elaborazione e interpretazione dei dati.

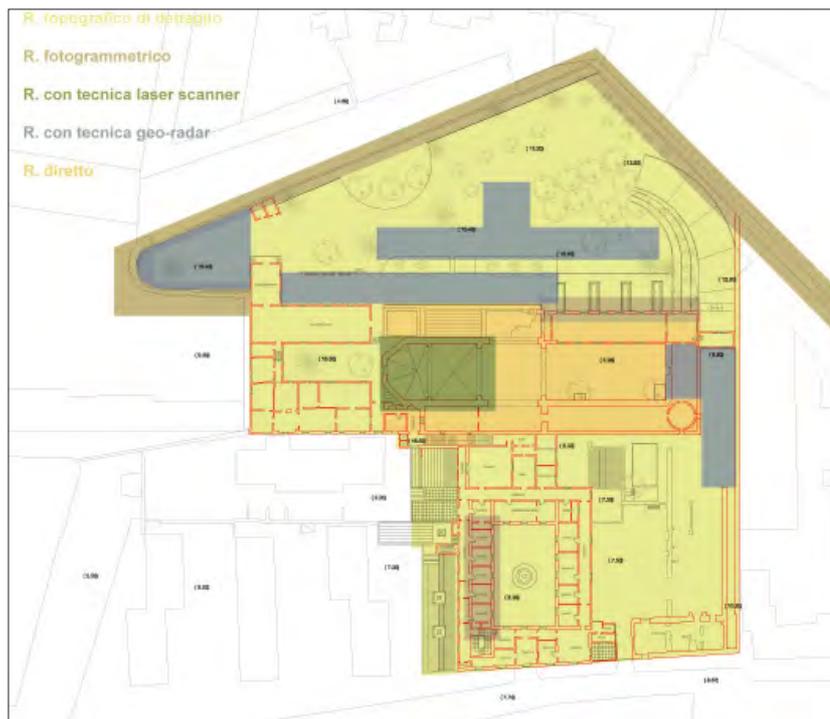


Fig. 6.2 - Complesso architettonico di Santa Maria dello Spasimo, planimetria di studio con l'indicazione delle aree di applicazione delle diverse metodologie di rilevamento applicate.

6.2 Acquisizione, elaborazione e restituzione dei dati e confronti tra le metodologie utilizzate.

Il rilevamento strumentale con stazione totale e GPS (reti topografiche di inquadramento, e reti di appoggio per le scansioni laser).

Una delle caratteristiche peculiari del rilievo digitale è la commistione di informazioni derivate da strumentazioni diverse, ognuna con sistemi di riferimento differenti e precisioni non omogenee. Per prima cosa, dunque, occorre progettare e realizzare una struttura di dati che dia la possibilità di uniformare, collegare, rendere ripetibile qualsiasi operazione di misurazione e minimizzare quanto più possibile i rischi di incongruenza. Si è determinato un inquadramento topografico di riferimento alla scala 1:500 attraverso la costituzione di una *rete di appoggio* plano-altimetrica, tracciata opportunamente all'interno della zona da rilevare; ai vertici della rete si sono agganciati

successivamente le misurazioni di dettaglio, con il metodo della *celerimensura*. La procedura adottata applicando la tecnica detta della *poligonazione* ha permesso di individuare 14 punti fissi, cioè di coordinate note, consecutivi (in modo che da ogni punto sia visibile il seguente e l'antecedente), costituenti i vertici di una spezzata chiusa della quale si sono misurati i lati e gli angoli (fig. 6.3).

La rete topografica è stata progettata scegliendo punti particolarmente affidabili e facilmente identificabili; al fine di limitare i rischi di perdita di dati o di acquisizioni errate o inutilizzabili, si sono individuati i nodi della poligonale corrispondenti a zone

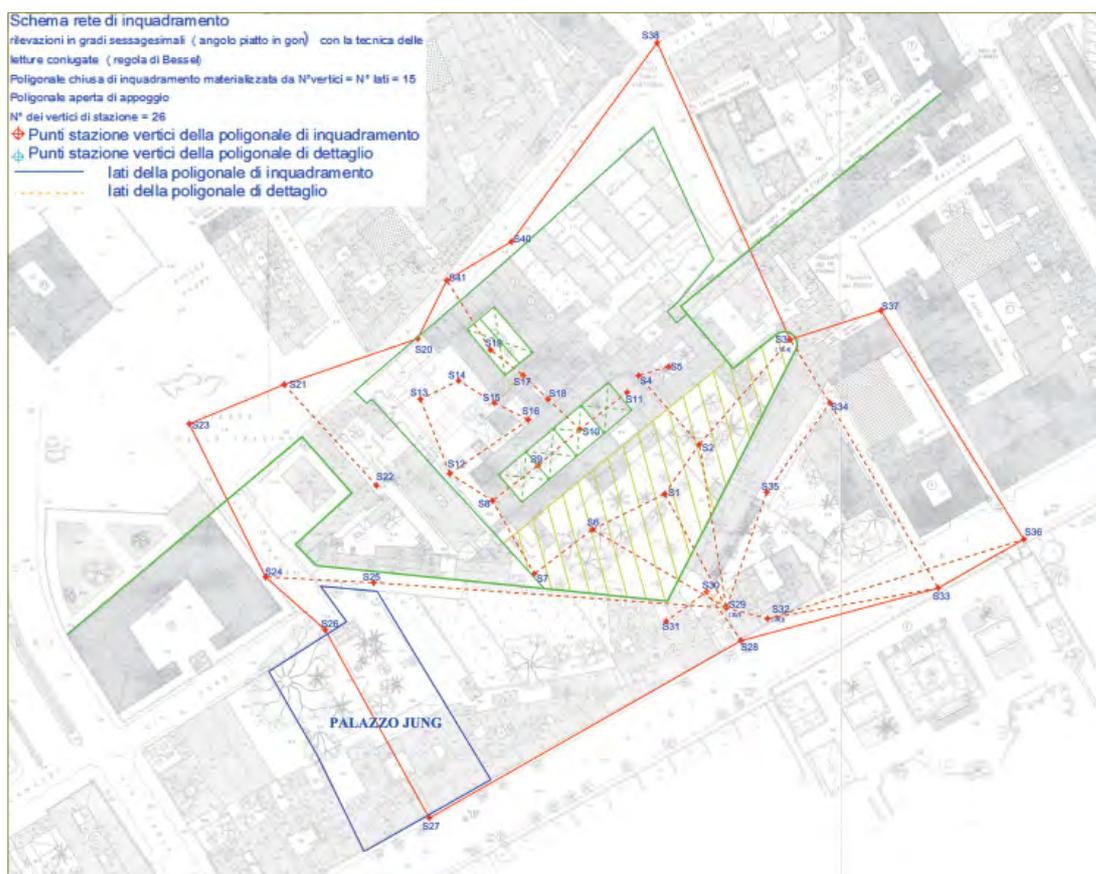


Fig. 6.3 - Stralcio della Carta tecnica del Centro Storico di Palermo, scala 1:500. Il progetto della rete di inquadramento.

morfologicamente più complesse e su di essi si sono effettuati più misurazioni di verifica. Per un maggiore controllo e per georeferenziare la rete locale al Sistema Cartografico Nazionale *Gauss-Boaga* si è integrata la tecnica GPS, posizionando l'antenna su due punti fissi della rete, scelti per garantire una buona ricezione del segnale. Il metodo di rilevamento GPS utilizzato è di tipo *relativo* con stazione permanente (*Master*) nei laboratori di topografia del Dipartimento di Rappresentazione di Palermo (fig. 6.4). Per materializzare i vertici della rete, i *capisaldi*, si sono adoperati grossi chiodi di acciaio, leggermente sporgenti dal suolo, con un segno inciso sulla testa per il corretto centramento del raggio laser dello strumento. Per la misura degli angoli azimutali si è utilizzata la tecnica delle letture coniugate (applicando la *regola di Bessel*)² (fig. 6.5).

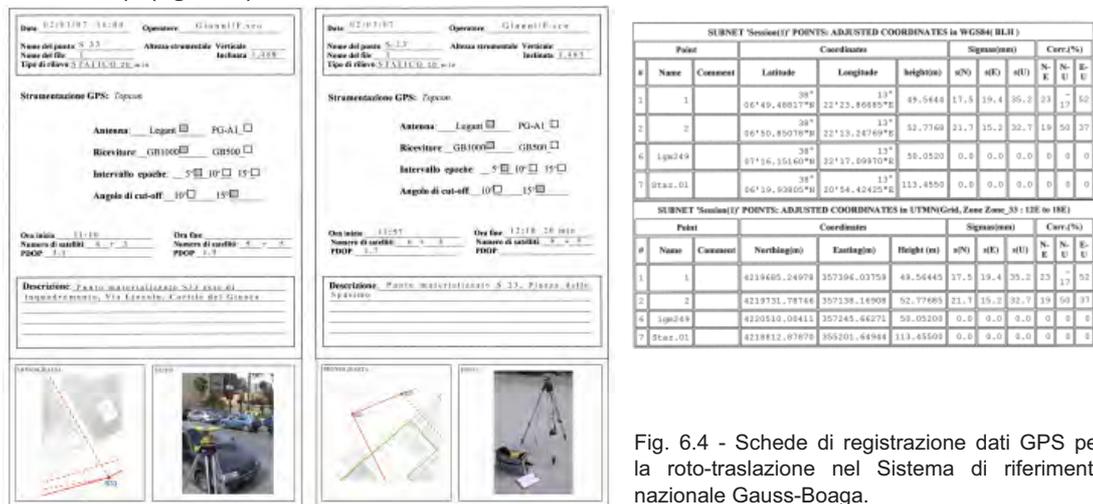


Fig. 6.4 - Schede di registrazione dati GPS per la roto-traslazione nel Sistema di riferimento nazionale Gauss-Boaga.

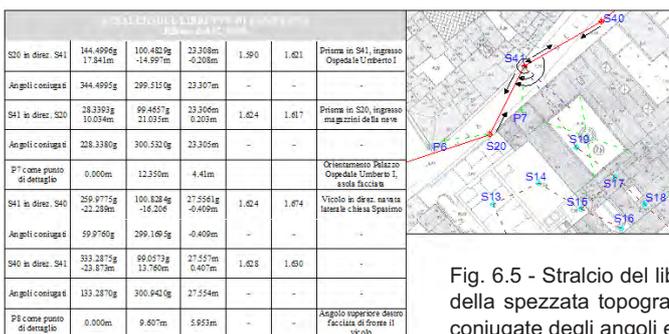


Fig. 6.5 - Stralcio del libretto di campagna e particolare di riferimento della spezzata topografica relative ai vertici S20, S40, S41. Letture coniugate degli angoli e delle distanze.

Con l'impiego dell'asta porta mira e prisma, posta verticalmente su ognuno dei vertici battuti, si sono ricavati gli elementi (distanza inclinata, distanza zenitale, altezza strumentale e altezza del prisma) necessari per calcolare successivamente le lunghezze dei lati ed i dislivelli fra il punto stazione ed i punti battuti. La stazione totale utilizzata, modello Leica TCR 307, ha un'approssimazione di lettura ai cerchi di 4^{cc}, precisione nella misura degli angoli pari 7" (2 mgon) e s.q.m. nella misura delle distanze pari a $\pm (2 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$.

In fase di elaborazione, si è proceduto al calcolo, alla verifica e alla compensazione della poligonale misurando, per ognuno dei punti individuati, gli angoli interni, la media delle lunghezze dei lati, la media delle differenze di quota fino alla determinazione dell'ellissi di errore (figg. 6.6 - 6.7 - 6.8).

I software utilizzati, *ReTop* e *Leica Windriver*, hanno consentito la compensazione plano-altimetrica con metodo rigoroso ai minimi quadrati della rete topografica³. Al termine del calcolo, gli errori di chiusura angolare, lineare e altimetrica erano pari rispettivamente a 2', 7 cm e -1 cm; si sono mantenuti al di sotto dei valori di tolleranza impostati.

RIEVEO PLANOALTIMETRICO DELLA POLIGONALE DEL COMPLESSO MONUMENTALE DELLO SPASIMO																
Stazione	Altezza str.	Vertice	Letture azimutali					Altezza prisma	Letture zenitale	Lunghezza lato		Differenze quote				
			C.S.	C.D.	Valore mediate	Direzione	Angolo interno V _i			D ₁	D ₂	Media D	D ₁ -D ₂ cos z	Δ=D ₁ +Δh	Media Δ	
S21	1,678	S20	328 8002	7590	328 7996	328 7996	184,9290	1,884	102,1344	46,725	46,659			-1,633	-1,638	
		S23	113 7286	7285	113 7286	113 7286	1,595	99,6745	39,228	39,227	-39,227	0,201	0,285	0,080		
S23	1,688	S21	103 6020	8025	103 6023	103 6023	105,5128	1,420	100,8950	39,231	39,227	-0,552	-0,266			
		S24	209 1150	1145	209 1148	209 1148	1,418	100,4198	51,427	51,425	51,425	-0,338	-0,171	0,003		
S24	1,805	S23	328 3052	3225	328 3344	328 3344	1,661	99,8372	51,425	51,425		0,132	0,076			
		S26	113 6439	8545	113 6432	113 6432	1,661	100,8162	23,168	23,166	-23,166	-0,297	-0,353	-0,078		
S26	1,569	S24	321 1989	1990	321 1988	321 1988	1,580	99,1517	23,187	23,165		0,309	0,298			
		S27	135 8195	8195	135 8195	135 8195	1,612	99,6780	75,941	75,941	75,940	0,146	0,103	0,024		
S27	1,822	S28	54 3270	3265	54 3268	54 3268	1,479	100,2000	75,939	75,938	-0,338	-0,096				
		S29	153 8660	8665	153 8683	153 8683	1,458	101,1425	125,701	125,681	125,677	-2,258	-2,090	0,000		
S28	1,816	S27	329 2356	2225	329 2362	329 2362	1,535	98,9940	125,689	125,673		2,008	2,089			
		S33	145 8022	8025	145 8024	145 8024	1,571	100,7389	71,737	71,732	-0,832	-0,785	-0,004			
S33	1,560	S29	300 3731	3725	300 3728	300 3728	1,876	99,3143	71,738	71,734	-71,733	0,773	0,777			
		S36	85 2104	2085	85 2085	85 2085	1,562	100,8886	32,282	32,279	-32,278	-0,441	-0,423	0,052		
S36	1,573	S33	329 3871	3875	329 3873	329 3873	1,852	99,1997	32,281	32,278		0,421	-1,161			
		S37	25 7646	7645	25 7648	25 7648	1,567	99,7485	98,523	98,522	98,523	0,381	0,387			
S37	1,436	S36	205 4730	4730	205 4730	205 4730	1,650	100,1180	98,523	98,523		-0,178	-0,380	-0,011		
		S3	374 1975	1975	374 1975	374 1975	1,763	82,6685	34,764	33,484	-33,484	8,348	8,021	7,004		
S3	1,773	S37	332 6475	6495	332 6485	332 6485	1,715	116,8410	34,692	33,465		-9,071	-8,613			
		S38	221 7985	7985	221 7985	221 7985	1,389	109,0955	110,273	109,773	109,774	-10,481	-10,116	-0,004		
S38	1,590	S3	284 9165	9195	284 9180	284 9180	1,614	84,1418	110,241	109,774		18,131	10,107			
		S40	362 1115	1110	362 1113	362 1113	1,722	98,5803	82,673	82,652		1,870	1,738			
S40	1,645	S38	76 5945	5955	76 5930	76 5930	1,505	101,4593	82,674	82,652	82,652	-1,695	-1,765	-0,000		
		S41	298 5820	5835	298 5828	298 5828	1,480	99,4298	27,560	27,559	-27,558	0,247	0,402	0,004		
S41	1,824	S40	259 8775	8760	259 8768	259 8768	1,674	100,8298	27,561	27,559		-0,359	-0,409			
		S20	28 3380	3380	28 3387	28 3387	1,817	89,4889	23,308	23,305	-23,306	0,185	0,202	-0,003		
S20	1,580	S41	144 4998	4995	144 4998	144 4998	1,821	100,4340	23,308	23,307		-0,177	-0,208			
		S1	388 3023	3000	388 3012	388 3012	1,650	97,7818	48,725	48,695	48,697	1,897	1,537	0,000		
							Σ _n	2399,6758					Σ _n	-0,845		

Fig. 6.6 - Tabella di calcolo dei parametri di compensazione della poligonale di inquadramento topografico.

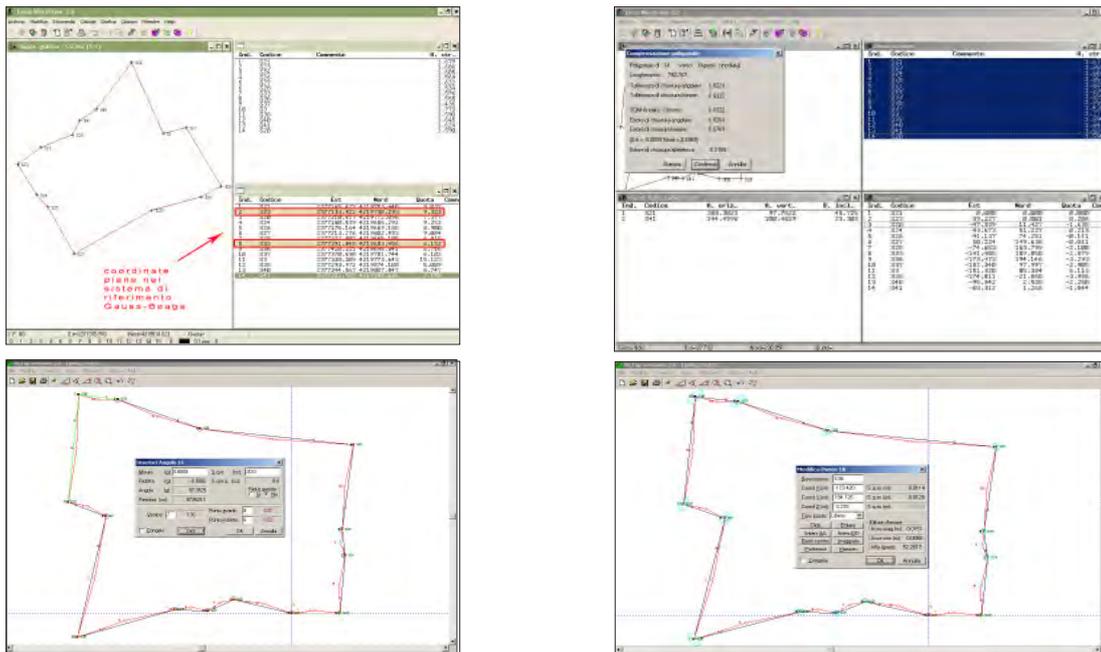


Fig. 6.7 - Quattro miniature dell'interfaccia del software Leica WinDriver utilizzato per la compensazione ai minimi quadrati della poligonale. In senso orario, in alto a sinistra, riduzione cartografica al sistema nazionale Gauss-Boaga (S23 e S33, punti di stazione GPS per la rototraslazione del sistema locale); a destra in alto e a sinistra in basso, tolleranze impostate ed errori di chiusura angolare ed lineare nel processo di compensazione della rete. In basso a destra, calcolo dell'ellissi di errore in ogni vertice.

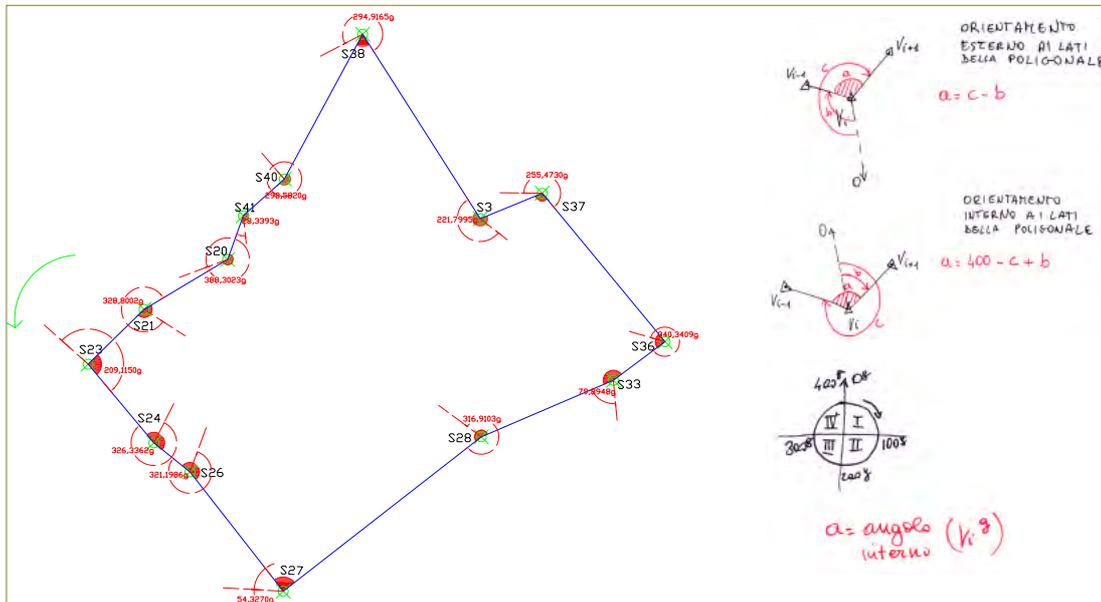


Fig. 6.8 - Schema della poligonale chiusa di inquadramento con il calcolo degli angoli interni di ciascun vertice.

Il rilevamento fotogrammetrico.

Le mura civiche, malgrado si presentino come porzioni architettoniche geometricamente dissonanti ed ancora perfettamente riconoscibili⁴, sono state interessate nel tempo da continue trasformazioni, accorpamenti e demolizioni che hanno occultato parzialmente l'antica struttura difensiva minandone l'identità storica e urbana.

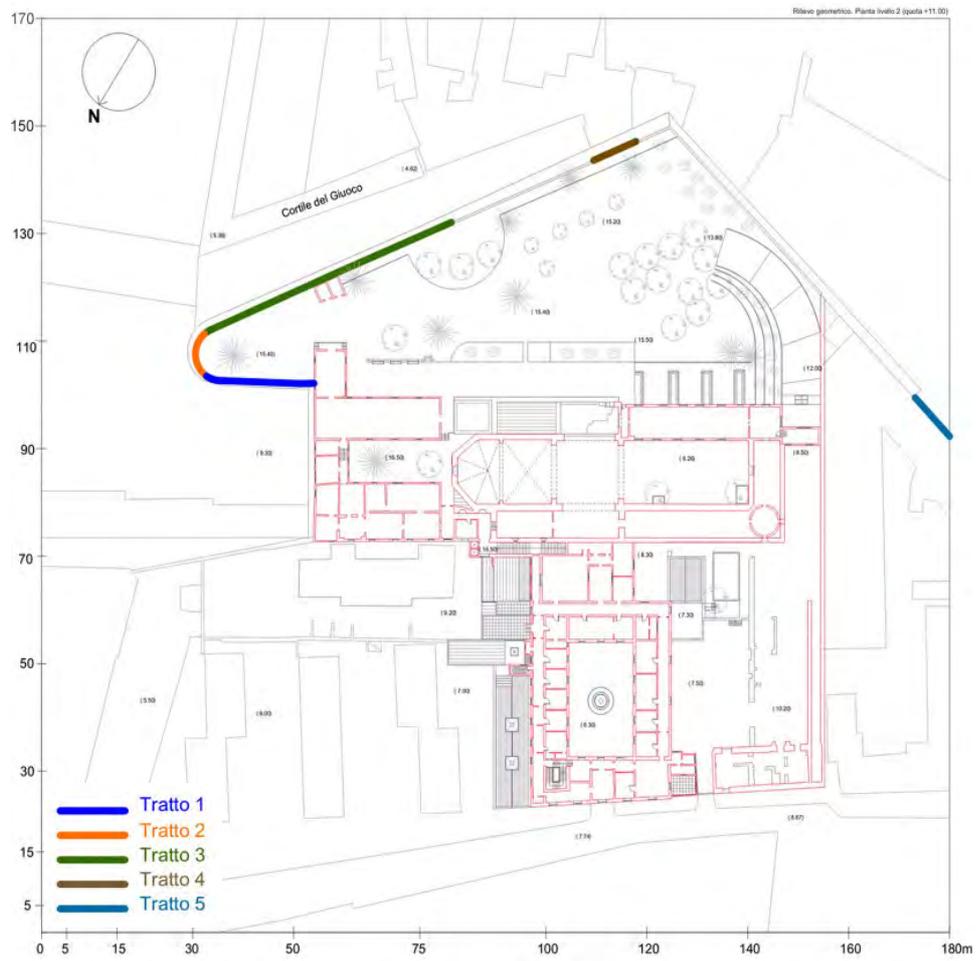
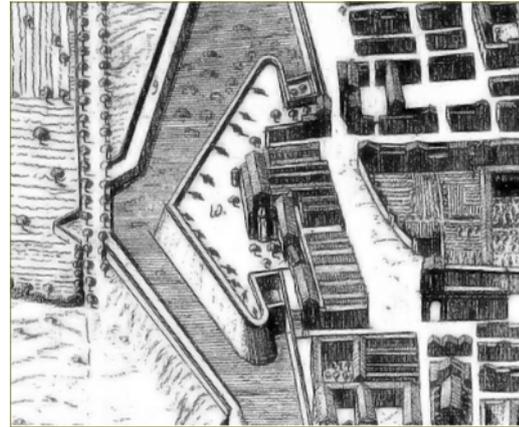
La lettura critica dei fronti ha richiesto un progetto preliminare di rilievo ed un'integrazione di metodologie atte a superare le notevoli difficoltà logistiche legate al complesso articolarsi degli spazi (presenza di superfetazioni pericolanti addossati alle mura, mancanza di profondità di campo, inaccessibilità degli spazi antistanti, altezze superiori ai 10 mt.) (fig. 6.9).

Per la realizzazione di elaborati grafici finalizzati alla descrizione della tessitura muraria, dal momento che i tratti di muro erano assimilabili a superfici piane, si è ricorso alla tecnica di fotogrammetria monoscopica che ha fornito una documentazione di immagini raster metriche per raddrizzamento di prese, integrata con metodi topografici di intersezione in avanti e irraggiamenti per il rilievo dei punti di appoggio utili alla realizzazione del fotomosaico (fig. 6.10).

Per la realizzazione dei fotopiani e per la loro fotomosaicatura si è utilizzato il sistema semi-automatico sviluppato dalla *SYS scar*⁵ che ha permesso di effettuare riprese aero-fotogrammetriche a bassa quota senza l'utilizzo di palloni aerostatici, elicotteri radiocomandati o aquiloni, abbattendo così i costi che queste tecniche notoriamente comportano.

Fig. 6.9 - In alto a sinistra, uno stralcio dell'unione dei Quadri 36-37-45-46 dell'ortofotocarta digitale del Centro Storico di Palermo del 2000. La linea di colore rosso racchiude l'area di studio, il tratto in giallo segna i resti delle mura cinquecentesche, mentre l'area delimitata dalla linea blu racchiude il complesso architettonico di Santa Maria dello Spasimo. In verde sono indicate le strade, i percorsi e gli accessi che conducono al monumento. Nell'immagine a destra, è raffigurato un particolare del complesso architettonico della Pianta del quartiere della Kalsa nel 1703, dal *Piano de la ciudad de Palermo del Lazzara*. Si distinguono chiaramente le parti che costituiscono il baluardo, i locali del convento e la chiesa.

Fig. 6.10 - In basso, rilievo geometrico della pianta del Complesso monumentale dello Spasimo a quota 11.00 mt. dal piano di campagna con in evidenza i cinque tratti di mura rilevati del bastione cinquecentesco.





Il sistema sviluppato è costituito da un'asta telescopica in fibra di vetro facilmente trasportabile con un'estensione da m 1,80 a circa m 18 sulla quale viene montato un alloggiamento capace di ospitare vari tipi di fotocamere, siano esse digitali o metriche. Il suddetto alloggiamento è costituito da un sistema basculante in grado di variare l'inclinazione della camera in modo da inclinarla in direzione ortogonale al piano a cui si approssima la superficie da rilevare. Le operazioni di scatto sono affidate ad un dispositivo interamente automatico azionato da un radiocomando collegato ad un trasmettitore di segnale a raggi infrarossi (*IrDa*) che interagisce con lo zoom ottico e lo scatto remoto della fotocamera digitale. La fotocamera digitale reflex utilizzata è una Nikon F50. Inoltre per risolvere le situazioni in cui l'operatore non riesce a controllare direttamente il punto di presa, come nel caso in esame, si è collegato un trasmettitore miniaturizzato del segnale video in uscita della macchina digitale ad un notebook con scheda per ingresso video al fine di osservare e registrare, in tempo reale, le aree oggetto della ripresa fotografica. Tutto il sistema di trasmissione è collegato allo zoccolo del flash della fotocamera e pesa circa 200 gr. incluse le batterie (fig. 6.11). Le operazioni di elaborazione dati e di foto-mosaicatura sono state effettuate con l'utilizzo di software dedicati quali *Leica WinDriver* per l'acquisizione dei punti battuti durante l'appoggio topografico, *Meridiana 411*, prodotto dalla *GEOPRO*, per la roto-traslazione dei

Fig. 6.11 - Alcune immagini della strumentazione e delle giornate di lavoro con l'utilizzo dell'asta estendibile.



Fig. 6.12 - La restituzione vettoriale del rilievo dimensionale del tratto n.1 e due foto di campioni di riferimento dei diversi apparecchi murari.

punti sul piano di riferimento e *Photometric 151*, programma di misurazione fotogrammetrica digitale prodotto anch'esso dalla *GEOPRO*, per la produzione di immagini raddrizzate in scala e per la restituzione grafica vettoriale (figg. 6.12 - 6.13 - 6.14).

L'orecchione Tratto 2



Fig. 6.13 - I tre fotogrammi raddrizzati del tratto di muro curvo dell'orecchione su Piazzetta del Pallone.

Riguardo al trattamento superficiale del paramento murario, il tratto di mura rilevato di lunghezza pari a circa 20 mt. ha uno spessore di 1 *canna siciliana*, circa due metri, i paramenti interno/esterno sono costituiti da conci squadrati di calcarenite con tipologia di muratura a sacco di aspetto isodomo. Il riempimento messo in luce in alcune sezioni particolarmente ammalorate è costituito da un calcestruzzo misto a pietrame informe con presenza di frammenti in laterizio in abbondante malta di calce⁶.

Da un punto di vista costruttivo, lo spessore del paramento di rivestimento risulta esiguo (se si considerano le dimensioni dei fianchi a scarpa di un'altezza pari a circa 3,6 *canne siciliane*

TRATTO 3



Fig. 6.14 - Alcuni elaborati del rilievo condotto sul prospetto S-E del bastione di Vicolo del Giuoco (tratto n. 3). Il raddrizzamento del fronte del bastione di Vicolo del Giuoco che si sviluppa per circa 55 mt. e la restituzione vettoriale del campione murario con evidenziazione delle aree con presenza di vegetazione, lacune e lesioni; in basso, un'immagine panoramica dell'area urbana del Quartiere Kalsa mostra al centro le mura del baluardo dello Spasimo e in fondo l'impianto architettonico della chiesa; in basso a destra, nello stralcio della carta tecnica 1:500 del Centro storico di Palermo sono segnalati i punti di presa che hanno permesso la realizzazione della mosaicatura degli 11 fotogrammi raddrizzati. Le immagini raster sono state raddrizzate con il software fotogrammetrico Photometric.

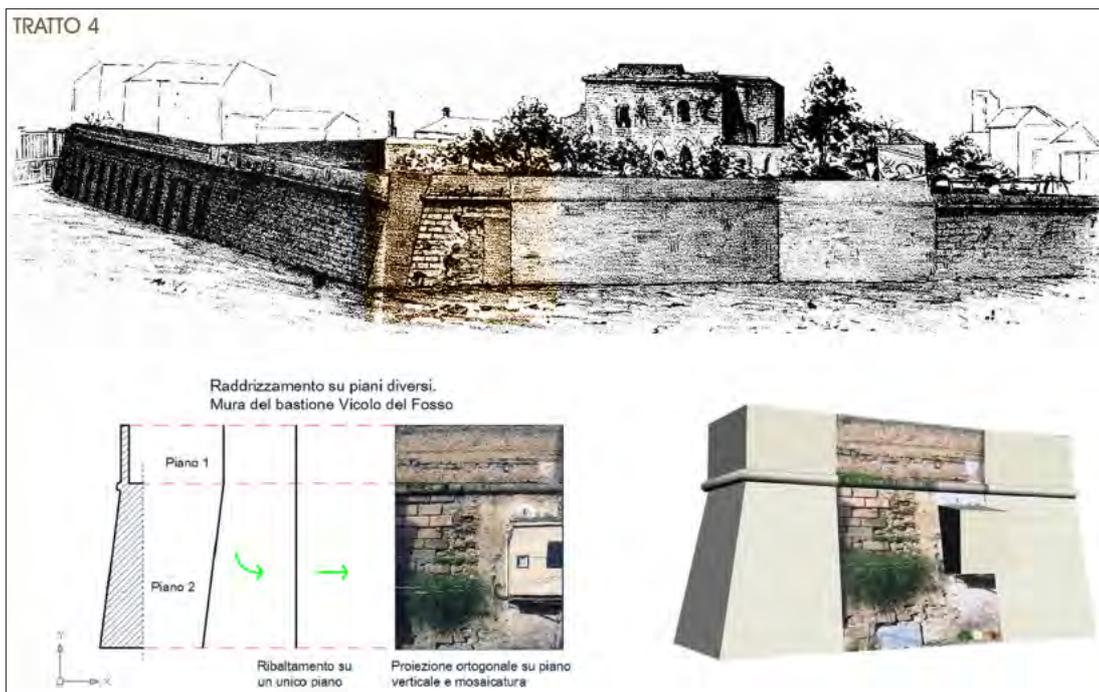


Fig. 6.15 - Approfondimenti geometrico-formali condotti sul campione di apparecchiatura muraria del fronte S-O del bastione in prossimità della *punta* prospiciente il Cortile del Fosso (tratto n.4). La parte risulta evidenziata in un disegno di Vincenzo Di Giovanni (1896) del baluardo, in *Ordini di la fortificazioni di quista felichi chita di palermo dato per lo magnifico Ingignero antonio ferramolino, Die XX° octobris X° Indictionis*, del 1536; schema con la sequenza delle operazioni effettuate per la mosaicatura finale del tratto di muro n. 4; a destra un'immagine del modello solido del bastione relativo sempre al tratto n.4 di Vicolo del Fosso, elaborato in ambiente CAD con la mappatura (*texture mapping*) delle prese raddrizzate con metodo analitico sulle superfici esterne.

di contenimento del terrapieno), poiché si usava inserire una struttura alveolata di contrafforti, collegati mediante volte a botte ribassate che sostenevano il camminamento al di sopra delle mura; questo elemento necessario a formare l'armatura interna del terrapieno è caratteristico delle fortificazioni cinquecentesche ed è oggi visibile sul lato ovest del bastione⁷.

Le operazioni di raddrizzamento hanno comportato un ulteriore approfondimento per il fronte S-O nel Cortile del Fosso (figg. 6.15 - 6.16), poiché mentre per il fronte S-E prospiciente il Cortile del Giuoco il piano di riferimento è unico, nel caso in esame risulta assimilabile a due piani. È stato quindi necessario scomporre il raddrizzamento in due porzioni (il muro a scarpa inclinato di 6° e il settore murario verticale corrispondente al

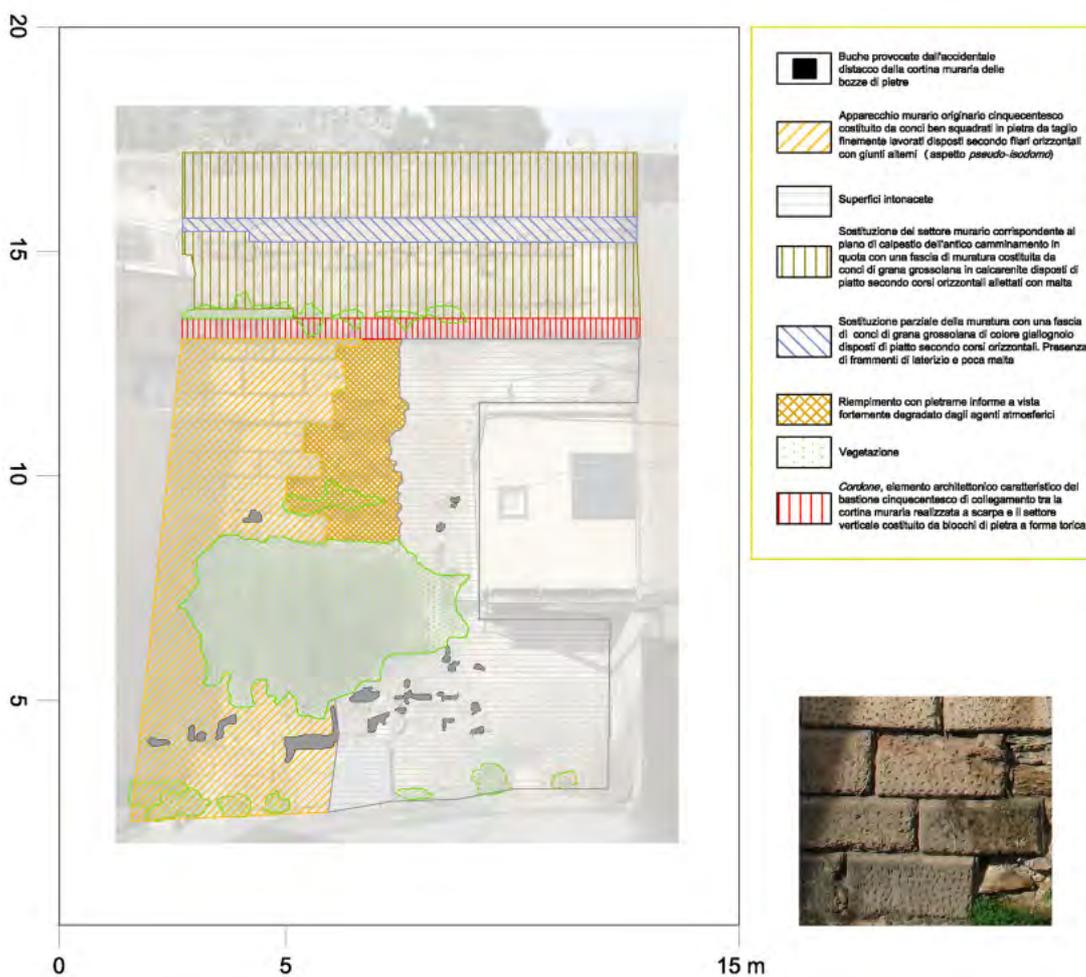


Fig. 6.16 - Carta tematica del prospetto con l'indicazione dello stato di fatto del paramento murario con la differenziazione dei materiali, delle aree ammalorate e della presenza di vegetazione. Sullo sfondo dell'elaborato di analisi dello stato delle condizioni di degrado, è riportata l'immagine raster ottenuta per mosaicatura di tre fotogrammi raddrizzati analiticamente.

A destra sotto la legenda a supporto della carta tematica, è allegata una foto della tessitura del paramento esterno costituito da conci ben squadrali disposti secondo corsi orizzontali che realizzano una muratura di aspetto pseudo-isodomo.

piano di calpestio dell'antico camminamento in quota) ruotando il sistema di riferimento parallelamente al piano inclinato. La rappresentazione finale presenta in proiezioni ortogonali l'immagine raddrizzata su un unico piano verticale⁸.

I fotopiani digitali realizzati hanno assunto una funzione di database metrico integrabile,

TRATTO 5



Fig. 6.17 - Confronto tra le prese fotografiche e la successiva mosaicatura dei tre fotogrammi, che ricoprono la superficie di un modulo del fronte su Via Dattero; la foto a sinistra è stata realizzata con la fotocamera digitale reflex Nikon D50 con punto di presa da terra; la scarsa profondità di campo dà un'immagine aberrata non idonea a successive elaborazioni. Per il fotopiano di destra, si è utilizzato il sistema semi-automatico sviluppato dalla SYS Scarl costituito da un'asta in fibra di vetro che ha permesso di effettuare riprese aero-fotogrammetriche ad una quota di 15 mt., permettendo così una corretta presa ortogonale del fronte da restituire graficamente.

fornendo materiale inedito agli studiosi e costituendo un fondamentale supporto di conoscenza e di interpretazione delle trasformazioni cronologiche e tipologiche (fig. 6. 17).

Il rilevamento strumentale con scanner laser

All'interno del quadro fin qui delineato, parallelamente alle attività di indagine topografica (necessarie per determinare la posizione dei punti utili all'orientamento assoluto del modello complessivo, così come all'orientamento di ogni singolo rilevamento di dettaglio) si è proceduto alla campagna di rilevamento con tecnica laser scanning.

Le scansioni tridimensionali sono state condotte nella navata centrale della chiesa, in particolare l'operazione di presa si è concentrata nella zona dell'abside e del coro. L'area rilevata, per la complessità spaziale e l'articolata copertura voltata, costituisce il sistema architettonico più interessante del monumento. La notevole altezza

delle volte costolonate (alte in chiave 21,4 mt. dall'attuale piano di calpestio), l'estensione planimetrica (220 mq.) e la ricchezza delle decorazioni della struttura geometrica hanno reso particolarmente l'integrazione della strumentazione laser scanner, che ha consentito a posteriori una attendibilità sensoriale della restituzione bidimensionale e tridimensionale, una verifica e un confronto degli elaborati dei rilievi precedenti.

Per la realizzazione del modello numerico si è fatto uso dello scanner Ilris 3D Optech della Codevintec⁹ (fig. 6.18), in occasione di un'applicazione dimostrativa al Complesso monumentale dello Spasimo nell'ambito del Convegno SIFET 2005, *Integrazione tra le tecniche innovative del rilievo del territorio e dei beni culturali*, tenutosi a Mondello (Palermo). Il rilievo è stato eseguito in tre giornate di lavoro; le caratteristiche dello strumento (accuratezza 7 mm. a 100 mt., angolo di campionatura 40° x 40°) hanno permesso di acquisire (ad una densità millimetrica con un passo della griglia quadrata di riferimento di 2 cm ad una distanza media di 15 mt.) dati sulle superfici della struttura absidale e del coro, con la realizzazione di tre stazioni laser e di sei scansioni. La scheda di supporto riporta i parametri specifici della strumentazione (fig. 6.19). Alcune porzioni di superficie delle pareti verticali perimetrali e della copertura dietro i due arconi costolonati, rimaste in ombra durante la fase di presa, sono state successivamente elaborate e ricostruite per via informatica. In seguito alla scelta dei punti stazione, si sono posizionati i targets retroriflettenti che hanno consentito un corretto posizionamento delle prese e la georeferenziazione con la rete di dettaglio (caposaldo di



Fig. 6.18 - Sequenza di alcune immagini durante le fasi di acquisizione con lo strumento laser scanner Ilris 3D della Codevintec.

riferimento S10, vedi figura 6.3) . Durante le operazioni di presa si sono riportate tutte le informazioni relative ad ogni scansione in un libretto di campagna, allegando ad esso una serie di eidotipi con l'indicazione della posizione dei targets, dello strumento laser e della stazione topografica di appoggio. Il rilievo ha permesso di acquisire una quantità di dati pari a circa 15 milioni di punti.

Raccolti i dati grezzi costituenti le singole scansioni a nuvole di punti, si è proceduto all'elaborazione automatica e semi-automatica di questi con l'obiettivo di ottenere un unico modello numerico tridimensionale, un prodotto metricamente corretto sul quale fare successive analisi.

Le fasi procedurali di pre-processamento, di allineamento e di registrazione e successivamente di modellazione (descritte nella figura 1.27 del Cap. 1.2 *Nuove strumentazioni digitali di rilevamento metrico. Tecniche innovative di acquisizione dati nell'ambito dei Beni culturali e ambientali*) sono state effettuate con il software *RapidForm 2004* della *Inus Technology*. Le singole scansioni sono state trattate, editate e "pulite", con algoritmi specifici, riducendone per ognuna il "rumore" con l'utilizzo di filtri. Senza il riconoscimento automatico dei targets, l'unione è stata resa possibile grazie all'individuazione di tre particolari omologhi (l'ICP è l'algoritmo utilizzato dal software per il metodo di calcolo). L'operazione di registrazione ha dato risultati

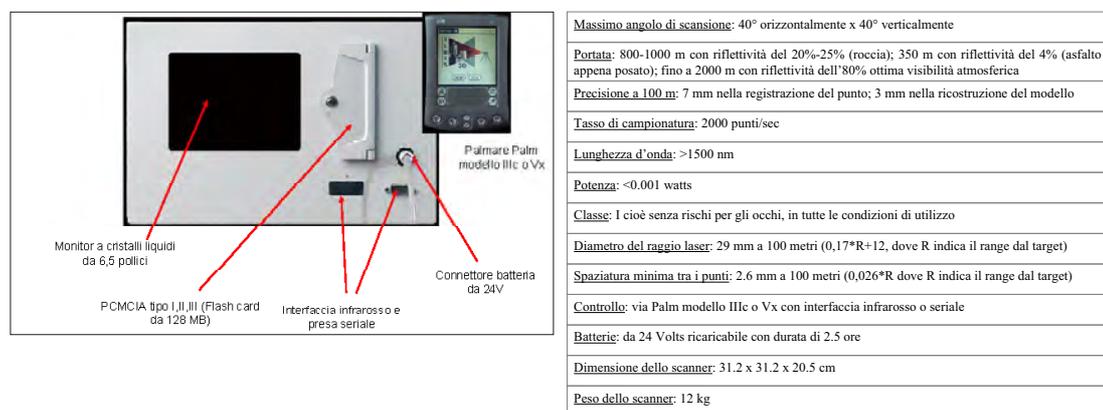


Fig. 6. 19 - A sinistra, il retro dello scanner Ilris 3D con indicati i principali dispositivi; a destra, scheda tecnica con le caratteristiche prestazionali dello strumento.

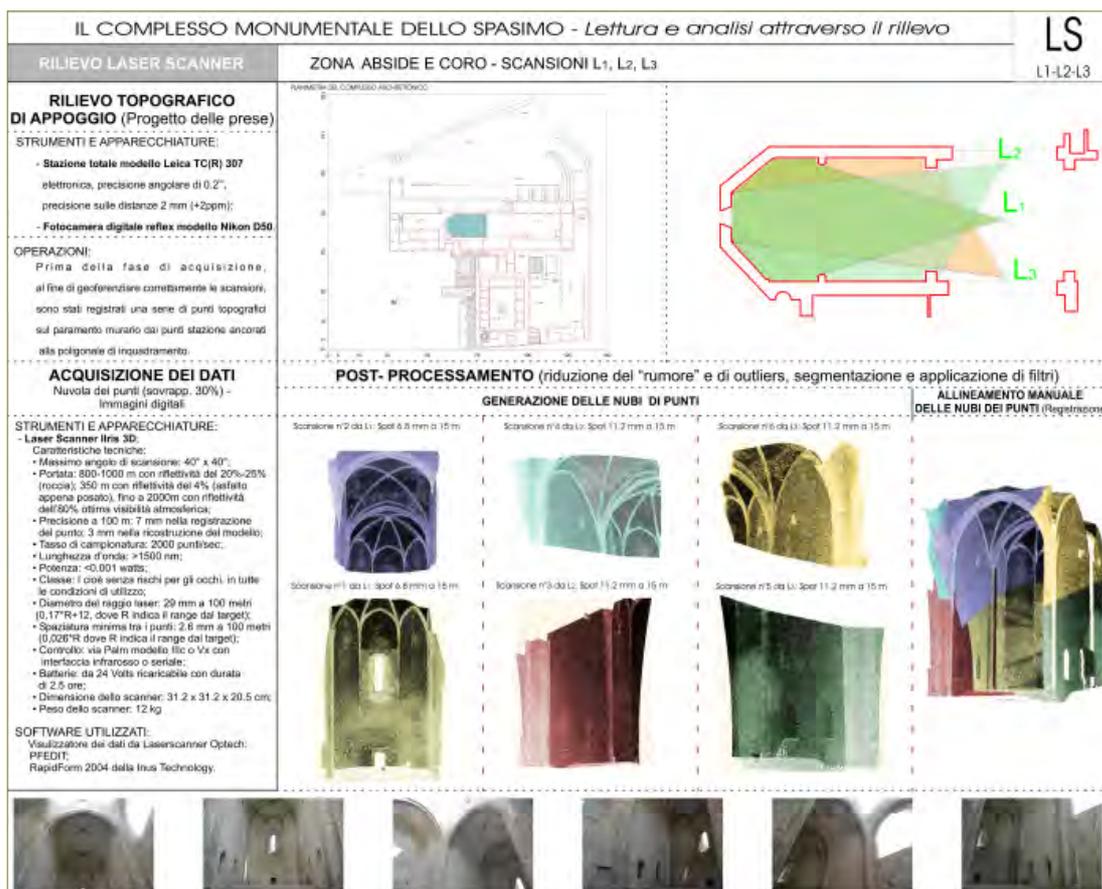


Fig. 6.20 - Scheda tecnica sinottica relativa alle fasi di appoggio topografico e di progetto delle prese, e successivamente all'acquisizione dei dati e a una prima analisi di processamento delle nuvole di punti.

soddisfacenti in termini di errore per tutte le scansioni, pari a 10-15 mm.

Per la gestione organica dei dati elaborati, si sono compilate schede tecniche tematiche contenenti ognuna informazioni su ogni stazione laser con le rispettive scansioni. In seguito alla fusione delle nuvole si è operata una classificazione degli oggetti partizionando l'intera mole dei punti acquisiti per la successiva fase di modellazione per triangolazione e di editing del modello di superficie¹⁰ (figg. 6.20 - 6.21). Ad ogni gruppo-partizione, al fine di consentire la creazione del modello unico tridimensionale, si è mantenuta la posizione relativa al sistema di riferimento adottato. Si è proceduto a eseguire in automatico la poligonazione per triangoli (TIN 3D) o *meshing* (fig. 6.22).



Fig. 6.21 - Scheda tecnica sinottica relativa alle fasi di elaborazione del modello tridimensionale numerico in superfici mesh a maglie triangolari.

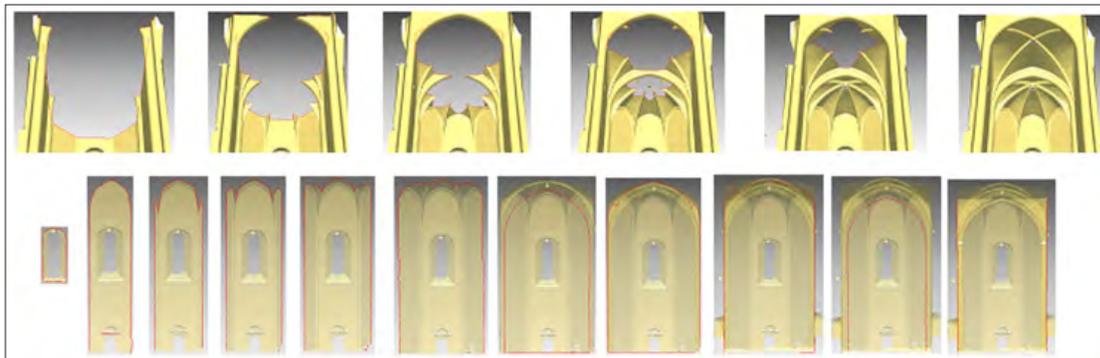


Fig. 6.22 - Sequenza di immagini riguardo alle operazioni di studio sul modello numerico a mesh triangolata; alcune sezioni orizzontali e verticali a quote e a distanze impostate. I profili sezione estratti dal modello, in colore rosso, sono stati successivamente esportati in software CAD per la realizzazione del modello matematico a superfici NURBS.

Successivamente si è intervenuti sulla mesh risultante, smussando la superficie ed editando le zone d'ombra con presenza di lacune.

6.3 Analisi critica e rappresentazione dei dati

Le tecniche di rappresentazione digitale utilizzate per la rappresentazione bidimensionale (piante, sezioni e prospetti) e tridimensionale (rendering, sequenze animate, modelli 3D).

Durante il processo di analisi, si sono costruite sezioni orizzontali e verticali (ogni 10 cm) individuando i piani principali ed estraendo i profili per la generazione in ambiente CAD delle piante alle diverse quote e dei prospetti-sezione (Allegato n.4). Si sono verificati la luce e la forma dei quattro pilastri poligonali a sostegno della copertura, le dimensioni dell'impianto poligonale della zona dell'abside, la verticalità delle pareti, la corda e la monta degli archi di imposta a profilo a sesto acuto e le deformazioni delle crociere rialzate.

Particolare attenzione è stata dedicata allo studio della copertura voltata; la determinazione di profili attraverso interpolazione di porzioni di punti di controllo del modello numerico ottenuto e la generazione di piani sezione radiali in chiave, passanti per le costolature delle vele, hanno permesso di sviluppare le superfici dei fusi e delle unghie¹¹. La costruzione del modello matematico ha verificato che la forma delle porzioni delle volte è a doppia curvatura e che gli archi diagonali sono policentrici (fig. 6.23 - 6.24).

Le rappresentazioni tradizionali e le restituzioni ottenute con metodi fotogrammetrici sono state integrate e confrontate con le informazioni metriche estratte dal modello di superficie 3D.

Nella fase operativa di *texture mapping*, si sono "plasmate" le fotografie digitali acquisite dallo strumento sul modello solido. Il software in automatico ha permesso il calcolo

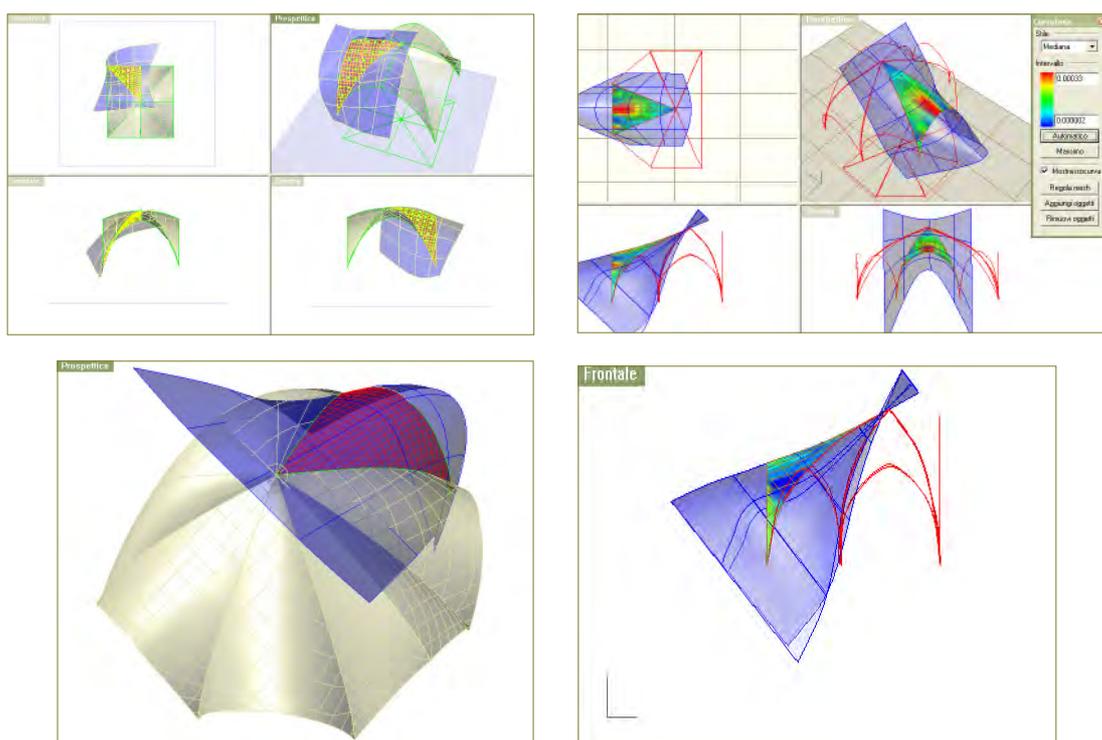


Fig. 6.23 - Alcune fasi della modellazione della copertura. Rappresentazione delle superfici a doppia curvatura che involuppano i fusi e le unghie delle volte.

dei parametri di orientamento e la successiva ortoproiezione sulla mesh triangolata.

Tale sperimentazione è stata finalizzata non solo all'archiviazione ma altresì alla consultazione diretta del modello tridimensionale reale numerico, denso di informazioni metriche, morfologiche e qualitative del manufatto rilevato per successivi monitoraggi in settori specifici.

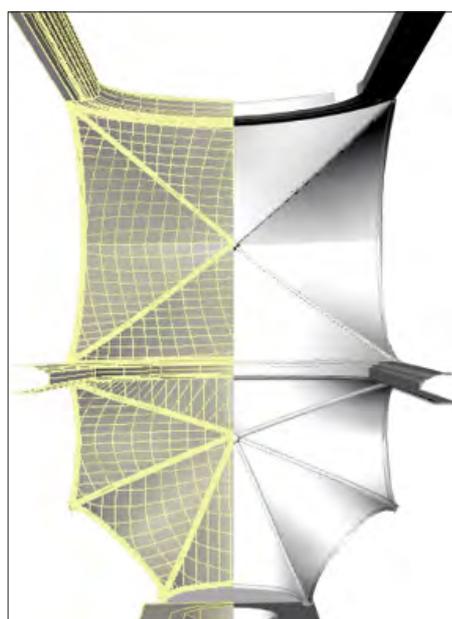


Fig. 6.24 - Vista dal basso del modello di copertura voltata della chiesa, in modalità di visualizzazione *ombreggiatura semitrasparente* (a sinistra) e *rendering* (a destra).

Per la progettazione del modello virtuale, l'attenzione si è concentrata su softwares modellatori che permettessero di generare forme per superfici dovute a due principali tipologie geometriche: le *mesh* e le *NURBS* (Non Uniform Rational B-Splines) (figg. 6.25 - 6.26 - 6.27 - 6.28). La base della modellazione *NURBS* è la curva, ogni curva viene descritta da una relazione matematica che presenta quattro parametri fondamentali: il grado, i punti di controllo, i nodi e la regola di stima. A questi parametri si aggiunge il "peso", caratteristico di ciascun nodo, cioè la capacità di avvicinare a se la curva. Variando uno qualsiasi di questi parametri, cambia la forma della curva. La geometria *NURBS* serve a descrivere forme nello spazio, essa è generata da un particolare algoritmo che

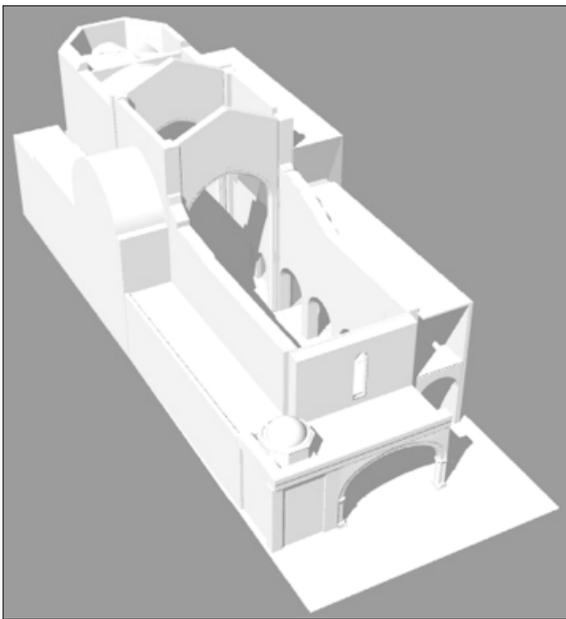


Fig. 6.26 - Modello di studio della chiesa come si presenta allo stato attuale.

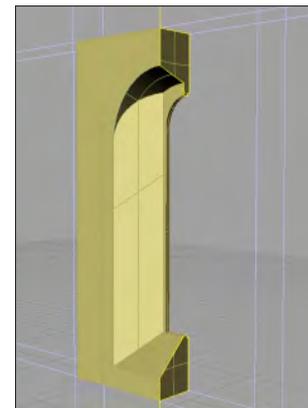
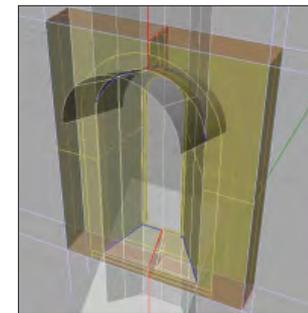
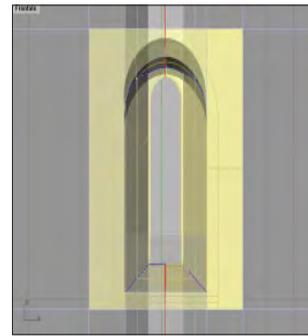


Fig. 6.25 - Fasi di modellazione della finestra strombata della parete frontale dell'abside.

rappresenta il più recente e avanzato grado evolutivo della modellazione informatica. Derivano dalle curve di *Bézier* razionali che a loro volta sono una generalizzazione delle curve *splines*, curve definite usando polinomi. Si è scelto di operare con questa ultima tipologia geometrica di superficie in ambiente *Rhinoceros 3D*, in virtù non solo della sua prerogativa di rapporto qualità-volume dei dati, maggiormente orientata alla modellazione progettuale e alla rappresentazione di architetture complesse, ma anche per il fatto che si presta alla creazione di forme che derivano da profili curvi e non spezzati come sarebbero risultati dall'impiego di *mesh*.

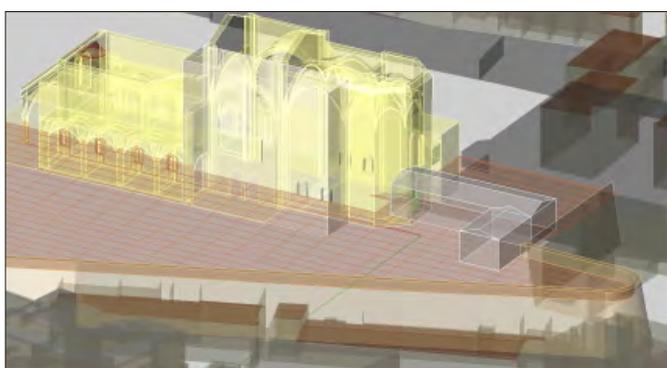
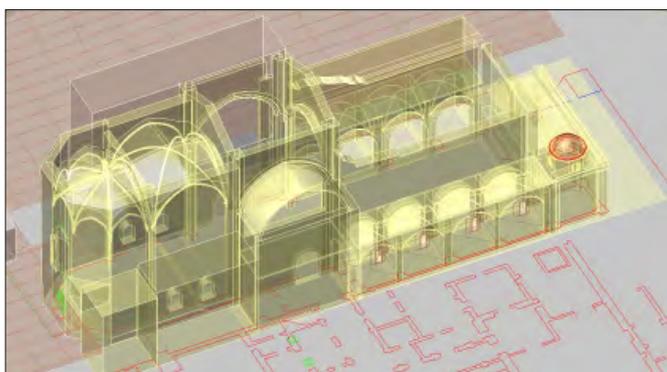


Fig. 6.27 - Viste del modello di studio della chiesa inserita nel contesto urbano, in modalità di visualizzazione *ombreggia semitrasparente*.

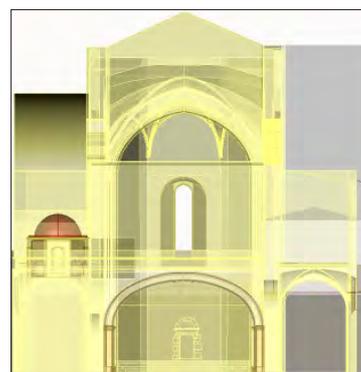


Fig. 6.28 - Prospetto principale della chiesa come si presenta allo stato attuale, in modalità di visualizzazione *ombreggia semitrasparente*.

Approfondimenti e confronti geometrici; analisi critica e verifica del profilo dell'arco ribassato nel pronao della chiesa.

Lo studio ha l'intento di indagare ed approfondire la particolare tipologia di arco ribassato presente nel pronao del complesso architettonico di Santa Maria dello Spasimo.

L'impiego di questa tipologia di arco è da attribuire a qualità esecutive e funzionali derivanti da una più semplice centinatura e da un minore sviluppo di altezza rispetto agli archi propriamente gotici dalla forma dell'intradosso acuta¹². Rispetto alle forme del gotico internazionale, quest'arco viene considerato come [...] un significativo superamento dell'antitesi bidimensionale del verticalismo mistico per una ricerca fondata su elementi strutturali di assoluta chiarezza e visibilità: ricerca volta a conquistare spazi sempre più controllabili metricamente, sempre più concreti e misurabili¹³. La curvatura ribassata, rispetto a quella a tutto sesto o ogivale, dà indubbiamente un maggiore sviluppo spaziale all'intera struttura, consentendo di aumentare la luce dell'arco limitandone la monta, ma l'elemento costruttivo risulta più spingente; è quindi necessario un maggiore rinfianco e piedritti più robusti per assicurare la stabilità in prossimità delle reni e agli appoggi.

Dopo una breve disanima di alcune significative testimonianze architettoniche di influenza catalana ed acquisiti i dati dalle operazioni di rilievo, l'approfondimento è finalizzato alla lettura geometrico-dimensionale dell'arco ribassato del pronao della chiesa e al confronto di questo con alcuni archi ribassati palermitani, cercando di analizzarne, attraverso metodi di tracciamento, le curve direttrici.

Questo elemento caratteristico, peculiare nella produzione architettonica civile e religiosa palermitana dal secolo XV fino a tutto il secolo XVI, è stato largamente impiegato in differenti soluzioni (portali di ingresso, portici di loggia, fornici, ecc.). L'origine del tipo di arco è ancora dubbia; alcuni studiosi gli assegnano l'appellativo



Fig. 6.29 - Spagna, Girona, esempi di archi ribassati (foto M. D'Alessandro).

catalano, perché dissonante dagli stilemi toscani più tipicamente rinascimentali (fig. 6.29). Altri ancora, invece, pur osservando precisi aspetti formali e dimensionali non rispondenti a matrici proprie iberiche, si discostano dall'ipotesi di influenze direttamente spagnole, o più precisamente gotico-catalane, attribuendo l'uso dell'arco ribassato alla corrente del regno degli *Angiò* di *Durazzo* in Napoli e all'influenza aragonese più tardi¹⁴. Si spiega l'appellativo *durazzesco* o *aragonese* legato, quindi, ad avvenimenti storico-politici e la propensione ad intendere l'arco ribassato come prodotto di una rielaborazione culturale locale, che fornisce una propria originale soluzione all'apparato decorativo del linguaggio architettonico di quel tempo¹⁵.

Nei palazzi signorili quattrocenteschi, quasi sempre, vi è la presenza di tre tipici archi ribassati, collocati precisamente: all'esterno nel portale riquadrato con cornice rettangolare a bastoni tangenti all'estradosso dell'arco; in posizione intermedia, nell'androne di accesso al cortile interno (*patio*), a larga ghiera e conci radiali, appoggiato su piedritti robusti a base poligonale, ed infine nelle arcate dei portici del cortile con ghiera sfaccettate ed imposta su esili colonne (fig. 6.30).

In ambiente palermitano la triplice presenza di arco si ritrova nei quattrocenteschi palazzi Abatellis (1490-91) e Ajutamicristo (1491-93)¹⁶ (fig. 6.31).

Molto frequente, anche se con varianti formali e dimensionali (arco più propriamente definito *depresso*, riquadrato da una cornice rettangolare e con imposta rialzata, rimarcata anch'essa da una cornice "a giogo" che segue il profilo dell'arco) nell'edilizia civile del centro storico di Napoli (alcuni esempi in figura 6.30), ma più in generale nel

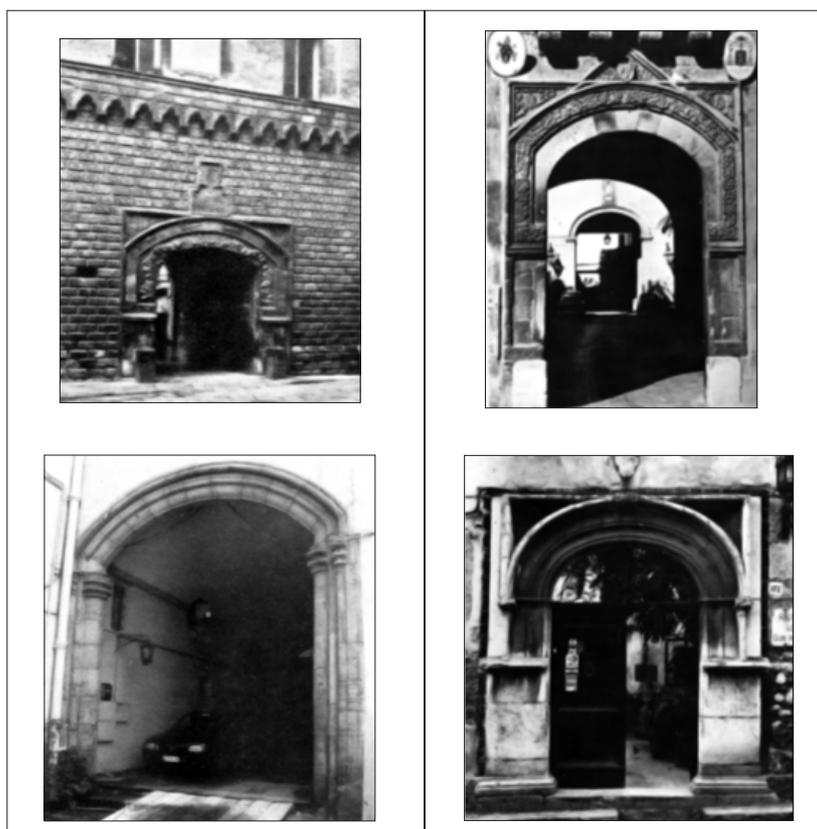


Fig. 6.30 - Nella colonna di sinistra, esempi di archi ribassati a Napoli, Palazzo Penna, Palazzo Brancaccio; in basso, il dipinto "San Girolamo" di Antonello da Messina tratto da M. R. Nobile, *Matteo Carnilivari Pere Compte 1506- 2006, due maestri nel gotico Mediterraneo*, Edizioni Caracol, Palermo 2006. Nella colonna di destra, Palermo, portale di ingresso del Palazzo Arcivescovile; Taormina, portale del Palazzo Gulotta; Palermo, portale del Palazzo Ajutamicristo (da G. Bellafore, *Architettura in Sicilia (1415-1535)*, Palermo 1984).

territorio del sud Italia (Campania, Abruzzo, Calabria)¹⁷.

Altre particolari ed originali soluzioni di impiego si ritrovano nell'architettura religiosa palermitana, in particolare nella composizione spaziale dei pronai di accesso alla chiesa come in Santa Maria dello Spasimo a Palermo o nella chiesa di Monteoliveto a Napoli (oggi Santa Anna dei Lombardi) (fig. 6.32) e nei portici, o *tocchi* (da *tāq*, *arcata* nella terminologia araba)¹⁸, delle chiese di Santa Maria della Catena e di Santa Maria La Nova a Palermo (fig. 6.33 - 6.34). Per quanto riguarda questi ultimi, che ricordano le logge mercantili spagnole, notiamo come la facciata sia sapientemente articolata



Fig. 6.31 - Palermo, Palazzo Ajutamicristo, fornice di ingresso, Palazzo Abatellis fornice di ingresso al cortile.

da una triplice partitura di fornici con archi ribassati a ghiera multiple. Lo studioso G. Spatrisano osservando i portici delle due chiese scrive che [...] l'analogia formale fra i due portici consiste nell'identico schema compositivo costituito da tre fornici, con archi policentrici ribassati (ad ansa di paniere) sul fronte, e da due archi della stessa forma nei fianchi, con due piloni angolari decorati da due nicchie su ogni faccia, di cui quella inferiore piana e la superiore cilindrica¹⁹.

È noto che il profilo generatore di un arco ribassato può essere ellittico oppure ovale o policentrico. Numerosi ed autorevoli contributi in letteratura hanno ampiamente documentato la natura di queste due curve che, nonostante abbiano proprietà geometriche e modalità di rappresentazione molto diverse tra loro, suscitano notevole

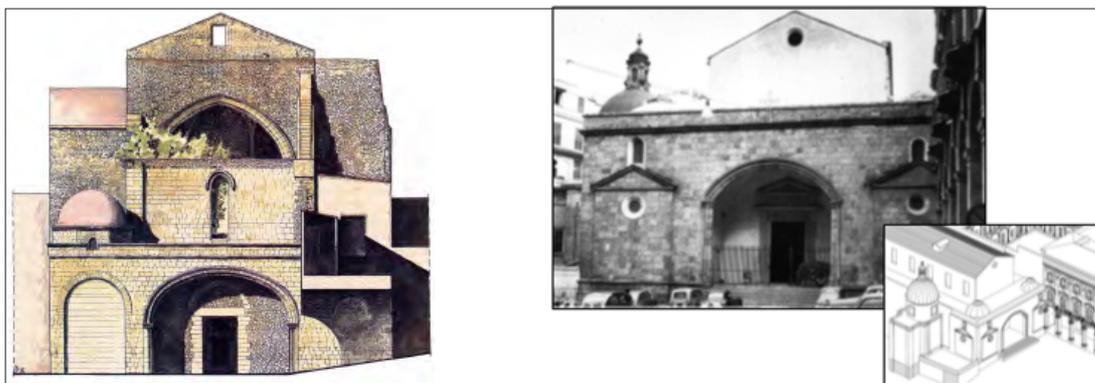


Fig. 6.32 - A sinistra, Palermo, prospetto principale della chiesa di Santa Maria dello Spasimo (da A. M. La Fisca, G. Palazzo, *Santa Maria dello Spasimo*, Palermo 1997.); a destra, Napoli. prospetto del Complesso di Monteoliveto.

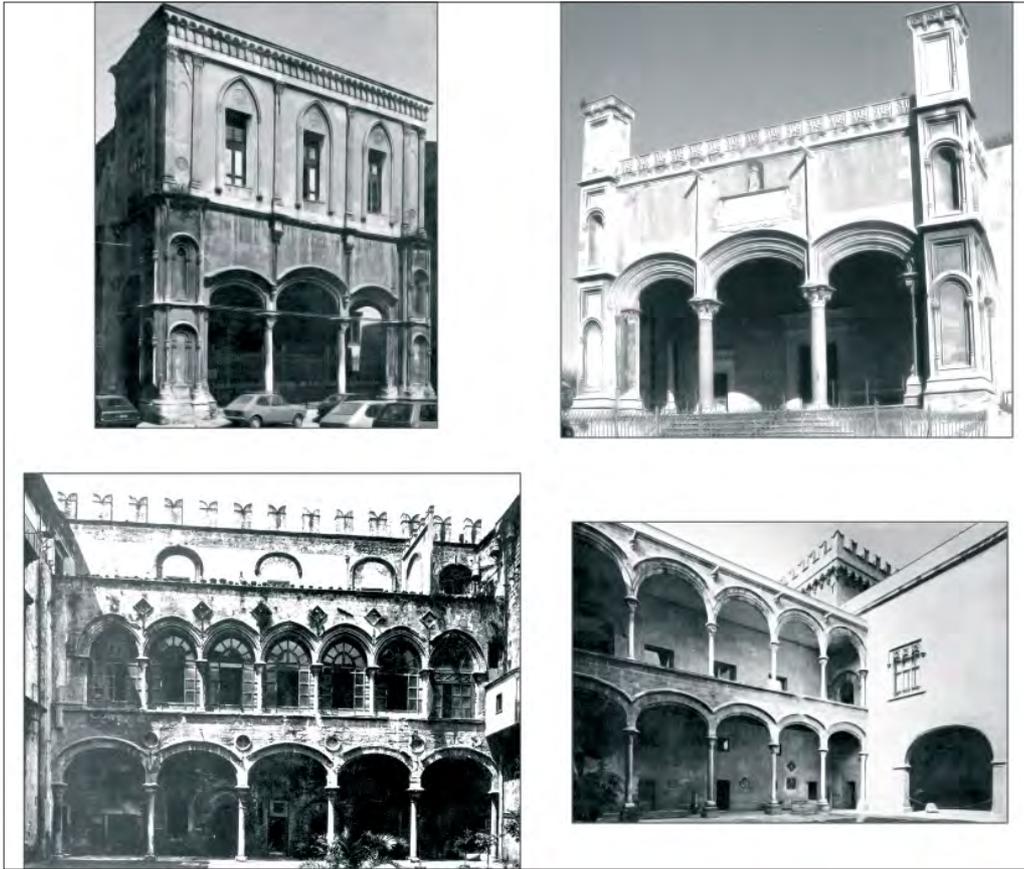


Fig. 6.33 - Palermo, confronto tra archi ribassati nei doppi loggiati in edifici palaziali e nei portici di edifici religiosi. In ordine anti-orario da sinistra in alto, S. Maria La Nova, Palermo, Palazzo Ajutamicristo, Palermo; Palazzo Abatellis, Palermo; S. Maria La Catena, Palermo (da G. Bellafiore, *Architettura in Sicilia (1415-1535)*, Palermo 1984).

interesse poiché, impostando precise condizioni, possono risultare, da un punto di vista percettivo-visivo, molto somiglianti²⁰.

La differenza tra le matrici policentrica ed ellittica di uguale dimensioni, è irrisoria, per cui è necessario incrociare vari strumenti di verifica per arrivare a risultati certi, tanto più che gli archetipi misurati non possono certo essere considerati geometricamente perfetti a causa di probabili difetti di fabbricazione e di deformazioni avvenute nel tempo. Risulta quindi assai complessa un'indagine a ritroso sulla natura geometrica della curva dell'elemento architettonico reale, al fine di determinare a posteriori dei



Fig. 6.34 - Palermo. Pianta in proiezione assonometrica di Palermo, autore ignoto, disegnata ad inchiostro colorato ad acquarello, 1686, tratta da C. Barbera Azzarello, *Iconografia storica della provincia di Palermo – Mappe e vedute dal Cinquecento all'Ottocento*, Palermo 1992. In evidenza i luoghi con presenza di archi ribassati presi in esame.

tracciati regolatori che si approssimino alla curva reale, anche perché è difficile determinare, correttamente e senza incertezza, la posizione degli assi e il piano di imposta in presenza di decorazioni in aggetto o cornici.

Dalle letture condotte sull'argomento, la documentazione inerente l'utilizzo in architettura della forma ovata, costituente la matrice generativa del progetto architettonico e urbano, e le ricostruzioni geometriche di studio sulla genesi formale della stessa, si concentrano su esempi mirabili di alcuni monumenti del periodo romano come anfiteatri, o piazze e piante di edifici religiosi e civili cinquecenteschi; ma, viceversa, pochi risultano i riferimenti ad esempi dell'architettura gotico mediterranea fortemente caratterizzati da questa curva nello sviluppo degli archi.

La difficoltà a riconoscere e a distinguere, a primo acchito, la matrice policentrica da quella ellittica per l'irrisorio discostamento in alcuni tratti, gli studi non esaustivi

e spesso contrastanti, il desiderio di risalire all'originaria idea di progetto, hanno costituito i presupposti per approfondire la tematica proposta.

Nella manualistica architettonica, si definisce ovale, o meglio semi-ovale (trattandosi della curva di una struttura ad arco), una linea policentrica, simmetrica rispetto ad un asse, composta di archi raccordati fra di loro, presentanti le tangenti nei punti estremi della corda perpendicolari ad essa e la tangente nel vertice parallela alla corda. Il numero dei centri è sempre dispari²¹. L'ingegnere J. B. Rondelet nel 1800²², nel suo trattato osserva che i costruttori impiegano d'ordinario per la curvatura delle volte acute o schiacciate un sistema d'archi di cerchio che differisce dall'ellissi, e da loro indicato col nome di ovale o a mezza botte: i falegnami, i tagliapietre, i fabbri ferrai ne fanno uso anch'essi pei propri lavori. Esistono numerose costruzioni geometriche elaborate e proposte in letteratura, legate ai dati noti e alle condizioni imposte in partenza (ad esempio nel caso di semiovali a quattro centri, lunghezze dei semiassi note e inclinazione imposta della retta contenente i centri, oppure si conoscono il semiasse maggiore e la posizione dei centri e si determina il semiasse minore e viceversa)²³ e diversi criteri che rispondono a specifiche richieste di carattere pratico-funzionale legate al cantiere, all'opera reale che si vuole realizzare e al suo comportamento statico di cui più avanti si parla. La consultazione dell'ampia trattatistica, dal Rinascimento fino alla fine dell'Ottocento, e gli studi di codifica dei testi antichi, consentono di conoscere le costruzioni che realizzano correttamente il tracciato della forma in questione²⁴. All'inizio del secolo scorso, precisamente nel 1905, il Professore D. Donghi, nel suo *Manuale dell'Architetto*, riprende gli studi, le ricerche e le trattazioni dei secoli scorsi sul tema, riassumendoli ed esponendoli in maniera pratica ed operativa. In riferimento al legame tra la particolare forma della direttrice dell'arco e il numero dei centri necessari a tracciarla (sempre dispari), ovvero al rapporto fra la monta e la corda dell'arco, lo studioso riporta utili consigli su come realizzare la curva in questione affinché questa non riesca "difettosa e poco conveniente", distinguendo archi "a tre centri" con rapporto fra 1/2 e 1/3, "a cinque centri" fra 1/3 e 1/4, "a sette centri" fra 1/4 e 1/5, "a nove centri" fra 1/5 e un 1/6, "ad

undici centri” fra 1/6 e 1/7 e “a tredici centri” fra 1/7 e 1/9.

In realtà, come sottolinea, per la prima volta, lo studioso tedesco G. A. Breyman per la prima volta sul finire del secolo XIX, il numero dei centri che si possono determinare, per avvicinarsi quanto più possibile all’ellisse, è illimitato poiché ogni arco della policentrica rappresenta una involupante, la cui involupata è il tratto di una poligonale e quindi si può trovare l’involupata che corrisponde a ciascuna involupante²⁵. Ma, a tal proposito, il Donghi ribadisce che [...] È naturale che quanto maggiore è il numero dei centri meglio raccordati riescono i vari archi della curva e maggiore la sua approssimazione colla curva ellittica: ma si comprende anche quanto più incomodo riesce il trattamento dell’arco, specialmente al vero, per costruirne la centina. Ond’è che in pratica difficilmente si va oltre ai 13 centri²⁶. Solitamente, nello studio della curva policentrica applicata in architettura, nella costruzione degli anfiteatri romani, delle piante di edifici rinascimentali o nella configurazione dell’intradosso rialzato delle volte o delle cupole, i semiovali che si incontrano sono generalmente a quattro, a cinque o a sette centri, non oltre, mentre, nella tecnica costruttiva dei ponti in muratura, sul finire del secolo XVIII, si arrivano ad impiegare fino ad 11 centri; l’intento in quest’ultimo caso, è di diminuire l’altezza dell’estradosso e il numero di pile di arcate del ponte aumentandone la luce e giovando in un minore appesantimento dell’intera struttura e un minore impiego di materiale²⁷. Si propone qui di seguito lo studio condotto sull’arco ribassato presente nel Complesso architettonico di Santa Maria dello Spasimo. In fondo alla navata centrale della chiesa, varcata la soglia del piccolo portale cinquecentesco del pronao, prima di accedere allo spazio antistante al cortile, si presenta imponente un fornice con arco ribassato caratterizzato da un profilo allungato, simmetrico, costituito da conci in pietra perfettamente squadrati, poggiante su robusti piedritti di forma poligonale (si veda figura 6.32).

Osservando la struttura dell’archivolto, risulta difficile stabilire la natura della direttrice, se si tratta di una conica ellisse, o piuttosto di una curva composta da più archi consecutivi, definita ovale. Nessun segno rivelatore, solo un leggero schiacciamento



in prossimità delle reni dell'arco.

Qualunque sia stata la volontà del progettista di realizzare l'una o l'altra curva, dal momento che non sussistevano difficoltà nel disegnare su carta, con riga e compasso, entrambi i profili (erano già note costruzioni e strumenti per ricavare semi-ellissi o semi-ovali conosciuti la monta e la corda dell'arco da realizzare²⁸), spostiamo quindi l'attenzione ad un aspetto pratico-applicativo connesso all'opera reale da realizzare. Nel caso che, per descrivere la direttrice di intradosso dell'arco, si fosse scelta una ellisse, si cerca di valutare quali difficoltà operative e quali laboriosi procedimenti dovevano superare le maestranze del tempo per il tracciamento del profilo in cantiere. È noto, che il *lapicida* sapesse perfettamente applicare i dispositivi per tracciare, nello spazio a disposizione in cantiere, un profilo ellittico ed ottenere conseguentemente, per ogni punto appartenente alla curva, la normale per la corretta disposizione dei letti dei conci²⁹. Si può pensare che, conosciuti i semi-assi della conica, si utilizzasse un ellissografo, strumento atto a tracciare a terra con un tratto continuo una ellisse; il più semplice detto "ellissografo dei giardinieri" (perché utilizzato comodamente per tracciare aiuole sul terreno) sfrutta proprio le proprietà del luogo geometrico dei punti di un piano, tale che la somma delle loro distanze da due particolari punti detti fuochi, sia costante). Precisamente, una volta fissate le estremità di un filo o di un'asta nei fuochi, si tendono facendoli ruotare in modo da disegnare la cosiddetta "curva dei giardinieri"³⁰, che non è altro che il profilo dell'ellisse. Ma, in accordo con le riflessioni formulate da Riccardo Migliari, è proprio questa ultima operazione che desta qualche perplessità, valutando le difficoltà notevoli nel descrivere un tratto continuo in un contesto di lavorazioni come quello di un cantiere. Lo studioso Navier, nelle sue *note* al procedimento sopra esposto (riportate nell'opera dell'ingegnere B.F. de Bélidor, nel 1813), esprime parere contrario all'esattezza del metodo del tracciamento dell'ellisse con l'ausilio di una *cordicella*, scrivendo: [...] La descrizione dell'ellisse indicata da Bélidor è più spiccia e comoda che esatta, avvegnachè le funicelle adoperate sieno sempre più o meno estendibili, e non possa darsi che la mano le tenda sempre egualmente: per la qual cosa la lunghezza del cordone

varia di continuo, e la matita descrive una curva, i diversi punti della quale non appartengono tutti ad una medesima ellissi³¹.

Altre notevoli difficoltà si riscontrerebbero nel realizzare l'apparecchio murario dell'arco ellittico, se si osserva che, variando il raggio di curvatura (massimo per l'arco infinitesimo nell'intorno dell'estremo del semi-asse minore ed invece minimo per l'arco infinitesimo nell'intorno dell'estremo del semi-asse maggiore), le facce dei profili di intradosso ed estradosso dei singoli cunei componenti l'elemento costruttivo sono tutte diverse. Inoltre, all'articolata ghiera che caratterizza l'archivolto appartengono tanti tratti di ellissi quanti sono le modanature delle cornici aggettanti, pertanto, non essendo soddisfatta la proprietà di concentricità tra dette curve confocali, probabilmente si sarebbe potuto procedere per approssimazione oppure si sarebbero potute tracciare ellissi concentriche con differenza dei semiassi costante³².

A questo punto della ricerca del tracciamento più attendibile, valutate le difficoltà costruttive che la forma ellittica comporta, legate alle proprie caratteristiche geometriche, è plausibile supporre che i "fabricatores"³³ abbiano ricorso a soluzioni più semplici e rapide beneficiando in termini economici e di tempo, realizzando profili policentrici (noti la monta e al corda dell'arco da realizzare), molto approssimanti al profilo ellittico di pari dimensioni. I vantaggi che derivano dall'impiego di un semi-ovale sono apprezzabili in tutto il processo di messa in opera della struttura dell'arco, dal tracciamento sul terreno, alla disposizione delle centine, alla sagomatura dei singoli conci, fino al successivo disarmo.

Il rilievo indiretto topografico degli archi del pronao della chiesa di Santa Maria dello Spasimo e degli androni di ingresso dei palazzi Abatellis e Ajutamicristo è stato effettuato con l'ausilio della stazione totale modello Leica TCR 307 munita di oculare spezzato. Nella fase di restituzione, si sono ricostruite le ghiera e le cornici modanate interpolando i punti acquisiti (figg. 6.35 - 6.36).

L'analisi geometrica condotta sui profili reali rilevati, prima ancora di verificare se



questi fossero stati realizzati utilizzando una delle costruzioni tradizionali, documentate nella trattatistica e nella manualistica architettonica, si è applicato il metodo del tracciamento delle corde parallele. È noto che, in una circonferenza di centro O e raggio r , l'asse di una corda AB passi per il centro, dimezzi l'arco AB e bisechi l'angolo al centro $A\hat{O}B$, mentre in un'ellisse i punti medi di due corde, parallele fra loro, sono allineati con il centro. La congiungente i punti medi di due corde parallele di direzione generica p incontra la congiungente i punti medi di due corde parallele di direzione generica s nel centro dell'ellisse; ciò consente di



Fig. 6. 36 - Modellazione degli archi ribassati della chiesa di Santa Maria dello Spasimo, del palazzo Abatellis e del palazzo Ajutamicristo.

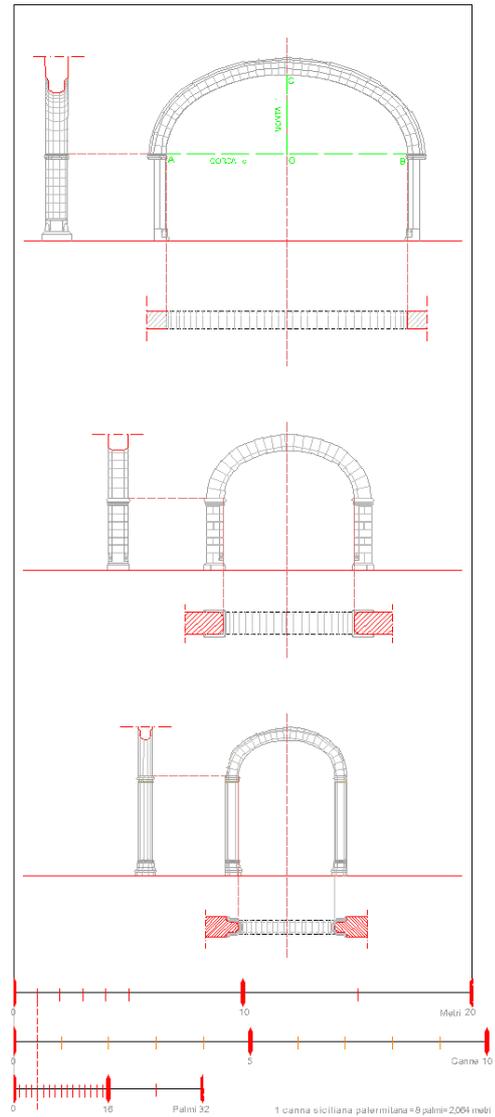


Fig. 6. 35 - Confronti morfo-metrici tra gli archi ribassati della chiesa di Santa Maria dello Spasimo, del palazzo Abatellis e del palazzo Ajutamicristo.

verificare se un dato arco appartiene ad un'ellisse. Sulla scorta dei risultati ottenuti, si sarebbe potuto scartare l'ipotesi dell'ellisse di tracciamento, dal momento che nessuna retta, congiungente i punti medi di corde parallele, si incontrava in un unico punto; ma, tenuto conto delle possibili deformazioni e delle imprecisioni del profilo reale, si è ritenuto indispensabile ricorrere ad altri strumenti grafici di verifica. L'applicazione del *Teorema di Pascal*⁶⁴ ha dato risultati anch'essi incerti, dal momento che i tre punti ricavati dalla costruzione geometrica non risultano allineati per uno scarto molto piccolo (fig. 6.37). Si è dunque proceduto, per ogni caso analizzato, al confronto tra la curva del profilo ellittico, costruito con semi asse minore e semi asse maggiore pari rispettivamente alla corda e alla monta dell'arco e la curva del profilo ovale costruito secondo i procedimenti descritti dal *Bosse*, da Huygens e imponendo

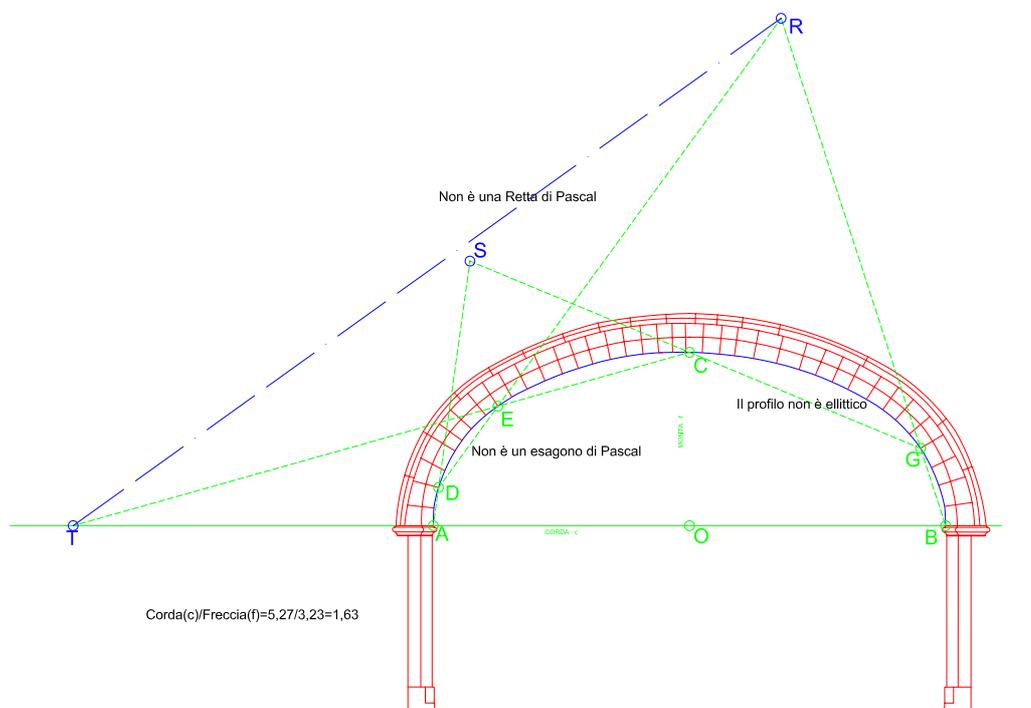


Fig. 6.37 - Applicazione del Teorema di Pascal per la verifica grafica della geometria del profilo dell'arco ribassato della chiesa di Santa Maria dello Spasimo.

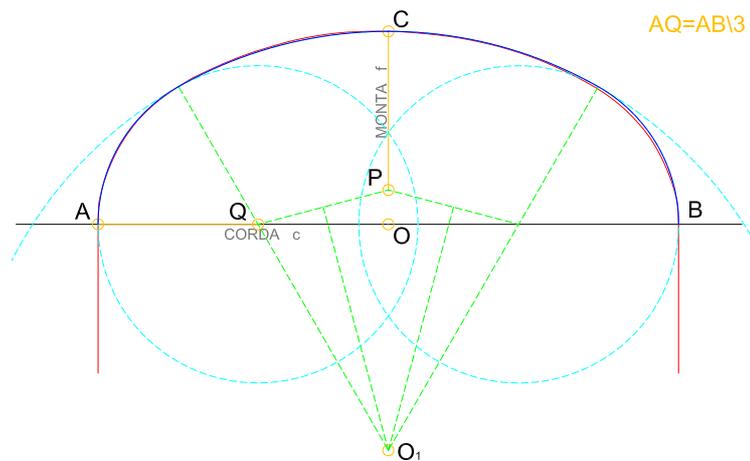


Fig. 6.38 - Costruzione a tre centri del profilo semi-ovale (in colore blu), di dimensioni uguali al profilo dell'arco rilevato della chiesa di Santa Maria dello Spasimo (monta pari a 3,23 mt. e corda pari a 5,27 mt.). Il profilo disegnato si accosta di molto a quello rilevato (in colore rosso); il maggiore discostamento si ha alle reni dell'arco, nel punto di raccordo dei due archi di circonferenza consecutivi.

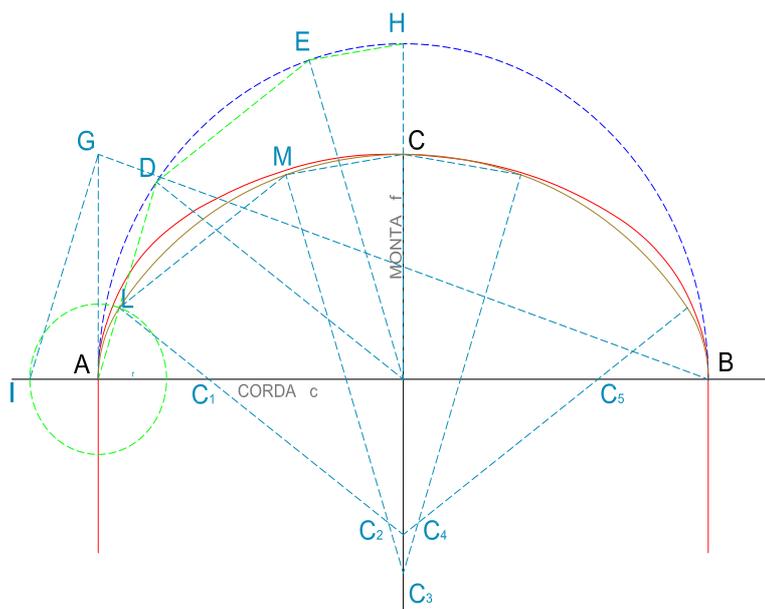


Fig. 6.39 - Costruzione della semi-ovale a cinque centri, nota la corda e la monta. Si evidenzia un maggiore discostamento alle reni dal profilo reale dell'arco rilevato della chiesa di Santa Maria dello Spasimo.

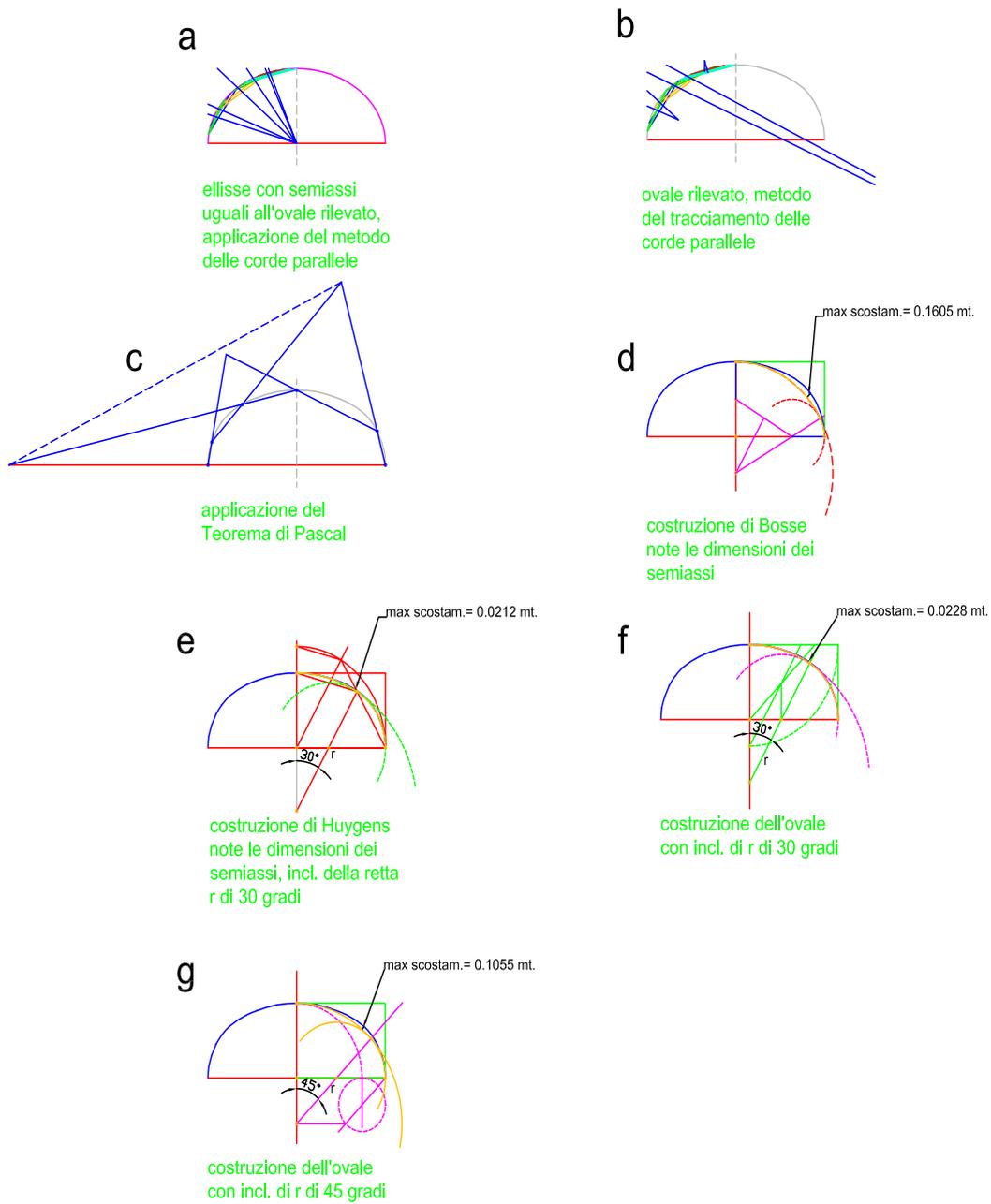


Fig. 6.40 - Fasi di studio applicate al profilo dell'arco rilevato del palazzo Abatellis

alla retta, congiungente i centri degli archi di circonferenza, una pendenza di 30° e 45° (figg. 6.38 - 6.39 - 6.40). Si è operato, anche, un confronto tra il luogo geometrico dei centri di curvatura della semi-ellisse (detta *curva di Lamè* o *asteroide*), con i centri di curvatura determinati sul profilo ovale rilevato; si nota che, quanto più l'ellisse si approssima alla ovale, tanto più i centri di curvatura di quest'ultimo si avvicinano alla curva di Lamè (figg. 6.41 - 6.42 - 6.43).

L'assenza di disegni originari e di taccuini manoscritti rende complessa l'indagine di rilievo e di analisi sulla natura geometrica delle curve reali e la vetustà delle opere e le inevitabili imperfezioni del costruito non permettono di stabilire inequivocabilmente quale potesse essere la forma geometrica di progetto. Osservando le diverse

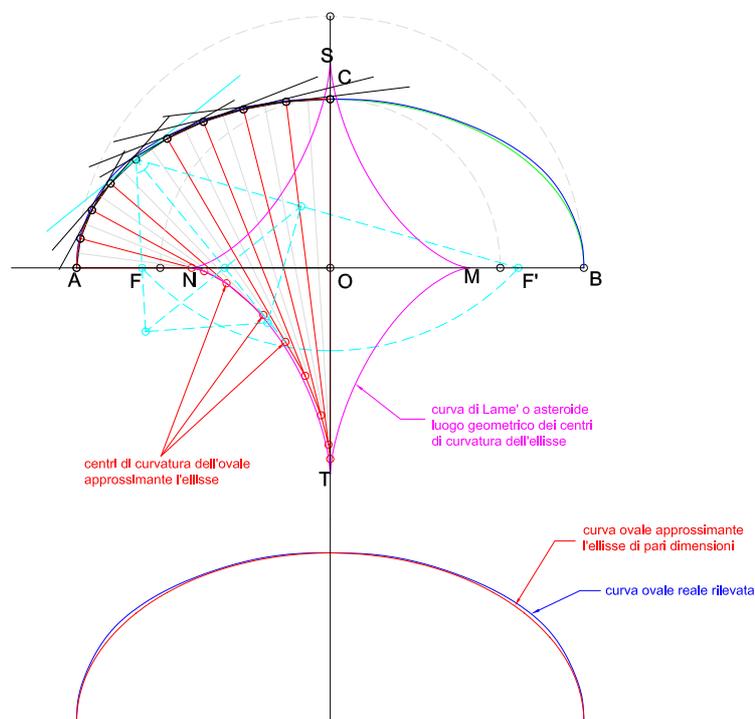


Fig. 6.41 - Determinazione del luogo geometrico dei centri di curvatura (*asteroide*) della semi-ellisse dalle stesse dimensioni del profilo reale dell'arco rilevato della chiesa di Santa Maria dello Spasimo.

costruzioni di semi-ovali disegnate sui profili acquisiti dai dati di rilievo, si nota che quando la curva reale risulta allungata (nel caso dell'arco del pronao della chiesa di Santa Maria dello Spasimo) la semi-ovale si discosta maggiormente dall'ellisse di pari dimensioni. Questo discostamento si registra alle reni dell'arco, ovvero in prossimità del cambiamento di centro degli archi di circonferenza, dove si verifica una brusca variazione di forma. Negli altri casi in cui il profilo dell'arco non ha una luce accentuata, il semi-ovale risultante approssima bene l'ellisse corrispondente non consentendo alcuna distinzione. Sulla base dei risultati grafici raggiunti e sulla scorta delle considerazioni pratico-operative di tracciamento del profilo in cantiere e di messa in opera della struttura dell'arco si può ipotizzare che, qualunque fosse la forma geometrica di progetto (profilo ellittico o policentrico), i "fabricatores" nella pratica costruttiva prediligessero la costruzione di ovali e non di ellissi.

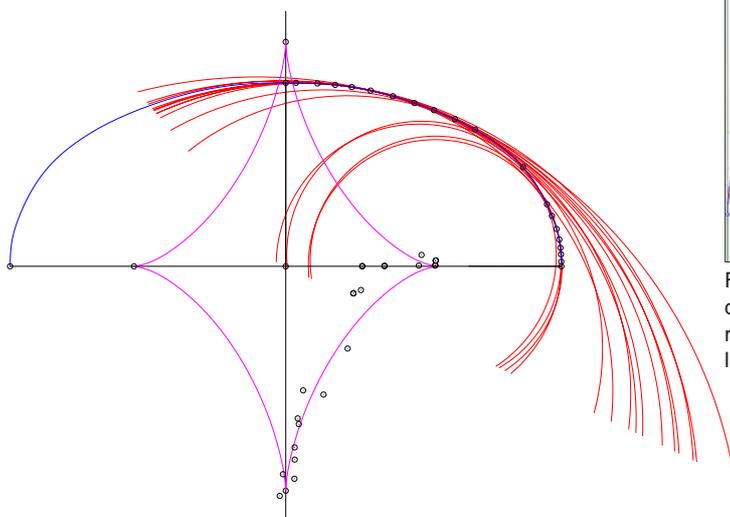


Fig. 6.42 - Deviazione dei punti per il calcolo dello scarto tra il profilo del quarto di ovale reale dell'arco rilevato della chiesa di Santa Maria dello Spasimo e dell'ellisse di pari dimensioni.

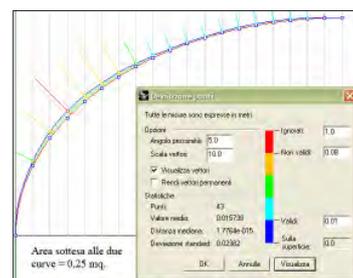


Fig. 6.43 - Determinazione dei centri di curvatura del profilo del semi-ovale rilevato interpolanti l'asteroide dell'ellisse di pari dimensioni.

Note sui metodi di lavorazione e di taglio della pietra.

Aspetto particolarmente interessante nell'approfondimento della genesi geometrica e costruttiva del profilo degli archi ribassati è sicuramente da attribuire ai metodi di lavorazione e di taglio della pietra, o più specificatamente alla stereotomia, arte che proprio a cavallo tra il Quattrocento e il Cinquecento trova la sua massima espressione nell'architettura siciliana³⁵. Le maestranze isolate dei lapicidi *fabricatores* erano in grado di sagomare e realizzare con precisione i conci di un arco rispettando perfettamente la geometria del profilo di insieme (fig. 6.44 - 6.45). Operazioni delicate e complesse di spaccatura, sbazzatura e squadratura del blocco informe di pietra dovevano assolvere ai requisiti formali e strutturali per garantire a disarmo condizioni di equilibrio dell'intera struttura. Sfortunatamente pervengono poche testimonianze legate all'organizzazione del cantiere, alla messa in opera dei singoli componenti, alla realizzazione delle centine e al loro disarmo; ma un utilissimo supporto, ancora oggi, ci viene dalla consultazione e dallo studio dei trattati sulla stereotomia.

Ad esempio nel 1802, lo studioso J. B. Rondelet, nel secondo e nel terzo libro del suo *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*, riporta una raccolta di tutte le procedure che devono seguire i *fabricatores* nel taglio delle pietre. In riferimento alla realizzazione di un concio, egli descrive

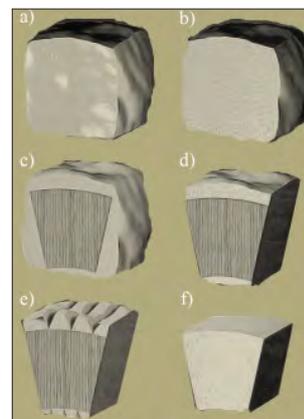


Fig. 6.44 - Fasi di lavorazione per la realizzazione di un concio di un arco: a) blocco di pietra informe; b) levigatura della faccia a vista; c) applicazione della sagoma di legno, opportunamente ricavata dal modello grafico, sulla faccia a vista; d) operazione di sbazzatura e levigatura delle superfici di apparecchio; e) realizzazione delle superfici di estradosso e intradosso, attraverso operazioni di incisione orizzontale; f) ultima fase di levigatura e rifinitura del concio. Immagine tratta da C. BIANCHINI, *Strumenti logici ed operativi per lo studio dei sistemi voltati in pietra: la codifica ottocentesca di Jean – Baptiste Rondelet*, p. 110, in "Il Disegno e la pietra", a cura di R. Migliari, Roma 2000. (Rielaborazione grafica).

minuziosamente le operazioni pratiche di taglio necessarie all'uopo. Dà indicazioni di come costruire i *panneaux*³⁶, e utilizzare in modo opportuno gli strumenti degli scalpellini, la *sauterelle* e la *biveau* (fig. 6.46) per controllare l'esattezza della forma da realizzare di ognuna delle unità componenti la membratura di un arco o di una volta³⁷ (figg. 6.47, 6.48 - 6.49).

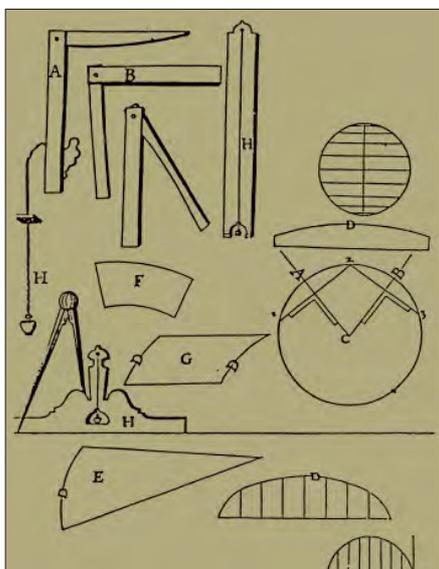


Fig. 6.46 - Illustrazione tratta dall'opera di P. de l'Orme, *Premier de l'architelivre III*, chap. IV, p.57. (Strumenti per lavorare la pietra, in particolare le lettere A e B, indicano la biveau e la sauterelle). Immagine tratta da C. Pascucci, *I primordi della Stereotomia nel trattato di Philibert de l'Orme*, p.168, in "Il Disegno e la pietra", a cura di R. Migliari, Roma 2000. (Rielaborazione grafica).

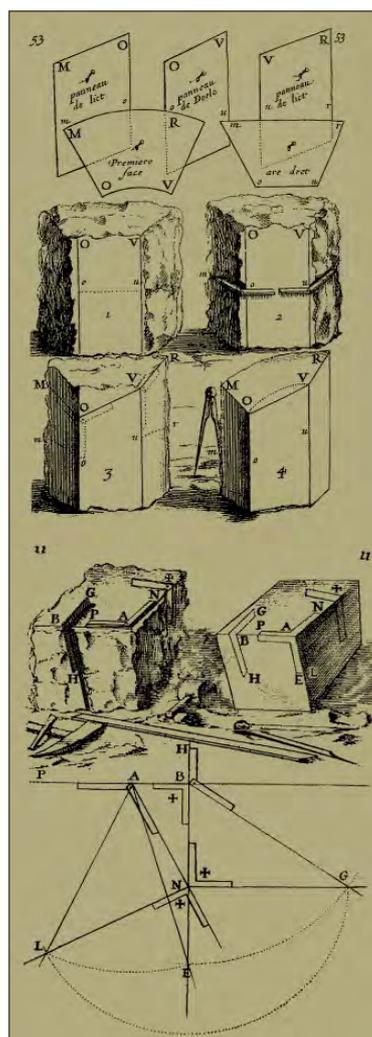


Fig. 6.45 - Tavola 53 (in alto) e Tavola 11 (in basso), dall'opera del francese Abraham Bosse, *Traité des pratique geometrale et perspective*. Sono rappresentati alcuni esempi di panneaux e indicazioni per reperire gli angoli corretti per il taglio con l'ausilio della squadra a braccia mobili (*biveau*). Immagine tratta da C. Trevisan, *Sulla stereotomia, il CAD e le varie trompe d'Anet*, p.31, in "Il Disegno e la pietra", a cura di R. Migliari, Roma 2000. (Rielaborazione grafica).

Fig. 6.47 - Costruzione geometrica, supposto il profilo ellittico, per la determinazione dei conci dell'arco della chiesa di Santa Maria dello Spasimo.

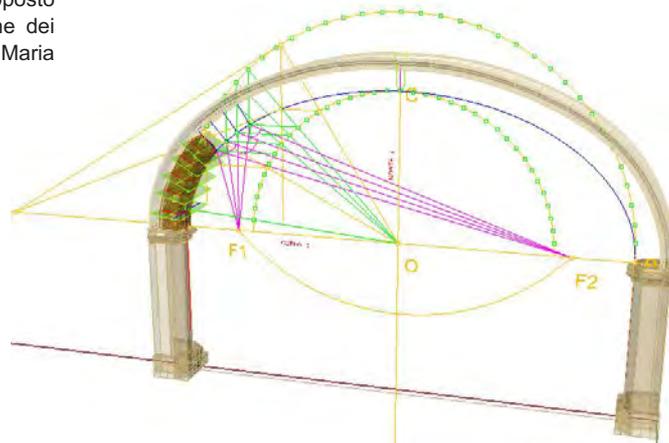


Fig. 6.48 - Costruzione geometrica per la suddivisione in 19 parti di un quarto di ovale con le stesse dimensioni del profilo reale rilevato.

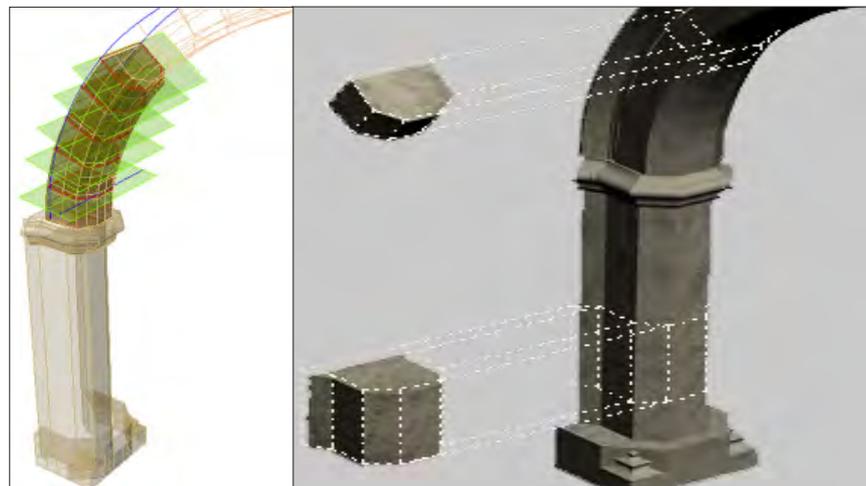
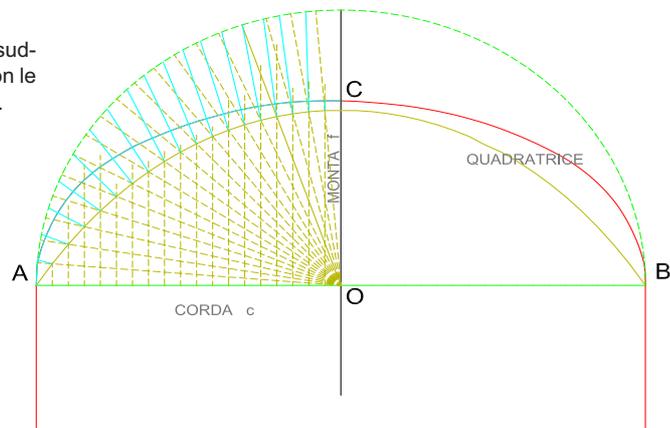


Fig. 6.49 - Particolare del modello dell'arco della chiesa di Santa Maria dello Spasimo; suddivisione in conci.

Rilievi tematici

Indagini georadar su alcune aree di studio del complesso architettonico. Acquisizione ed elaborazione dei dati.

Le indagini con scansioni radar sono state eseguite sulle aree limitrofe alla chiesa del complesso architettonico con l'obiettivo di rilevare eventuali presenze di oggetti sotto il piano di calpestio.

Lo studio preliminare al rilevamento radar, si è concentrato sul reperimento di cartografie e di carte degli ipogei del Centro storico di Palermo, Mandamento Tribunali, permettendo di evidenziare i dislivelli altimetrici tra il contesto urbano e l'area interessata dal complesso dello Spasimo e, in particolare, di conoscere lo stato dei sistemi ipogei (figg. 6.50 - 6.51). Sulla base delle informazioni desunte, si sono individuati due aree distinte e cinque profili: un'area sul piano del giardino del bastione, l'altra nel cortile degli *ex magazzini della neve* prospiciente l'ingresso principale della chiesa, tre profili addossati al lato orientale della chiesa e due sul piano del bastione in prossimità dell'*orecchione* (fig. 6.52).

Come precedentemente descritto nel Cap. 5°, nelle fortificazioni cinquecentesche il progetto della struttura del bastione, efficiente *macchina difensiva*, prevedeva la realizzazione di pozzi di aerazione, di vasche di raccolta e di sotterranei; schemi esemplificativi e disegni nella trattatistica ne danno testimonianza (si veda figura 5.35, Cap. 5°). Nello specifico del baluardo dello Spasimo, la prospezione radar condotta sul terrapieno nell'area di indagine n. 2 (fig. 6.53), effettuata lungo direttrici trasversali e longitudinali (per avere una copertura completa), ha evidenziato la presenza di anomalie elettromagnetiche significative che potrebbero riferirsi ai resti sepolti di una vasca di raccolta acque o a filari di conchi disposti a delimitare un ambiente. È auspicabile operare campagne di scavo per verificare e avvalorare i risultati ottenuti. Interessanti risultati sono stati ottenuti nella area n.1 (fig. 6.54). Come si può notare nell'immagine emergono in modo evidente anomalie corrispondenti alle zone colorate



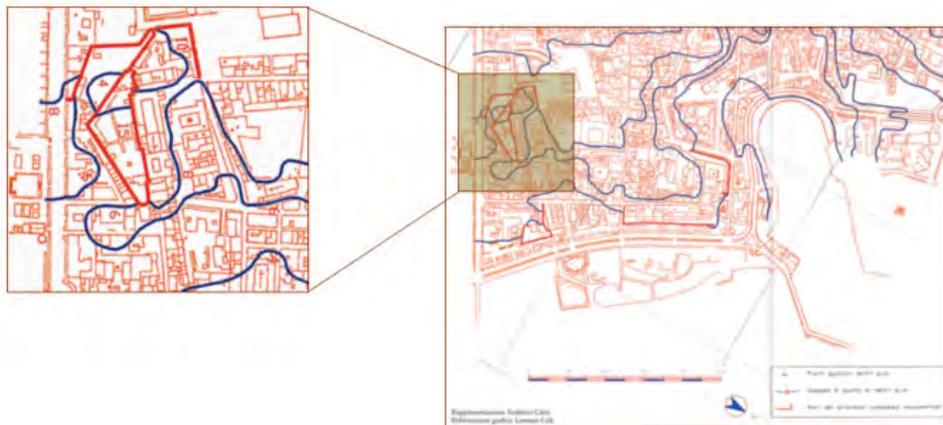


Fig. 6.50 - Cartografia del Mandamento Tribunali e particolare dell'area oggetto di studio con la rappresentazione delle curve isoipse (in colore blu), dei confini del complesso monumentale dello Spasimo (in colore rosso) e quote in metri s.l.m. (da GUELI Donatella, *Palermo sotterranea. Per il recupero, la salvaguardia, la conoscenza della città nascosta*, Regione Siciliana Assessorato dei Beni Culturali e ambientali e della Pubblica Istruzione, Palermo2002).

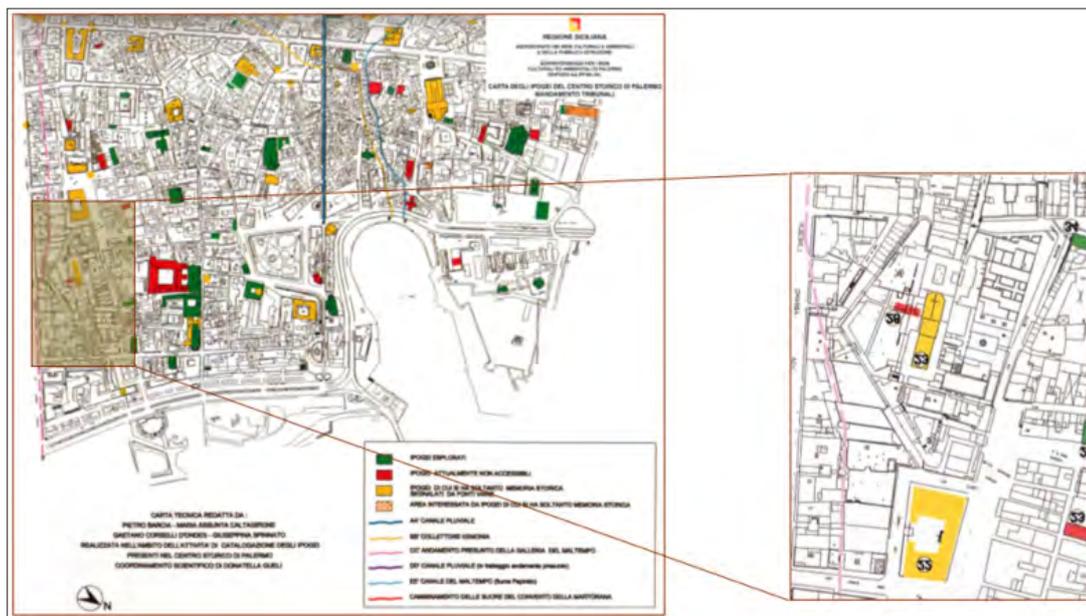


Fig. 6.51 - Carta degli ipogei del Centro Storico di Palermo, Mandamento Tribunali e particolare dell'area oggetto di studio. Focalizzando l'attenzione al complesso architettonico dello Spasimo, le campiture, in colore giallo, indicano ipogei di cui si ha soltanto memoria storica, segnalati da fonti varie, mentre in rosso sono indicati gli ipogei attualmente non accessibili. La curva tratteggiata limitrofa ai confini murari del bastione, in colore rosa, indica l'andamento presunto della galleria del maltempo (da GUELI Donatella, *Palermo sotterranea. Per il recupero, la salvaguardia, la conoscenza della città nascosta*, Regione Siciliana Assessorato dei Beni Culturali e ambientali e della Pubblica Istruzione, Palermo 2002).

di rosso, correlabili ad una struttura presente alla profondità compresa tra 2,80 e i 5,60 metri dal piano di campagna. Le ipotesi possono essere diverse: si potrebbe trattare di un setto murario che delimita il perimetro della cripta (la cui presenza è documentata dalla Carta degli ipogei del Centro Storico di Palermo), oppure potrebbe rivelare una diversa quota di calpestio dell'ingresso rispetto a quello della chiesa.

Complessivamente sono stati realizzati quarantacinque scansioni fra verticali e orizzontali; l'analisi condotta sui dati acquisiti è stata mirata alla ricerca di due tipologie di segnale: anomalie puntuali e anomalie continue (si veda Cap. 1°, Sistema Georadar)³⁸. Il rilevamento è stato realizzato con la strumentazione georadar della *GSSI – Geological Survey System Inc* – modello *SIR 3000* ed antenna con frequenza centrale di 100 MHz. Questo sistema è capace di generare, captare, amplificare, filtrare e archiviare i segnali visualizzando in tempo reale i dati acquisiti attraverso uno schermo a cristalli liquidi. Ciò consente una valutazione immediata dei dati, permettendo quindi la modifica dei parametri di acquisizione direttamente in situ, ottimizzando la qualità dell'acquisizione, evitando ulteriori ripetizioni delle misure e riducendo i tempi necessari per le operazioni di indagine.

In funzione della risoluzione e della massima profondità di indagine desiderata, le indagini sono state eseguite utilizzando un'antenna caratterizzata da una frequenza caratteristica di 100 MHz, ottenendo una profondità di indagine di circa 7 metri. Tuttavia, a causa della forte attenuazione nell'area indagata, il segnale utile è stato letto correttamente fino ad una profondità di circa 3 metri.

La documentazione prodotta dalla campagna fotogrammetrica sul fianco orientale del bastione vicino le Mura di Santa Teresa ha permesso di rilevare la presenza di un accesso con arco, ma le scansioni M_1 e M_2 condotte sul terrapieno non hanno mostrato la presenza di anomalie associabili a percorsi sotterranei, per la suddetta limitata profondità di penetrazione del segnale elettromagnetico. I profili sono stati eseguiti applicando una tecnica di campionamento denominata *RSAD (Radar Surface*



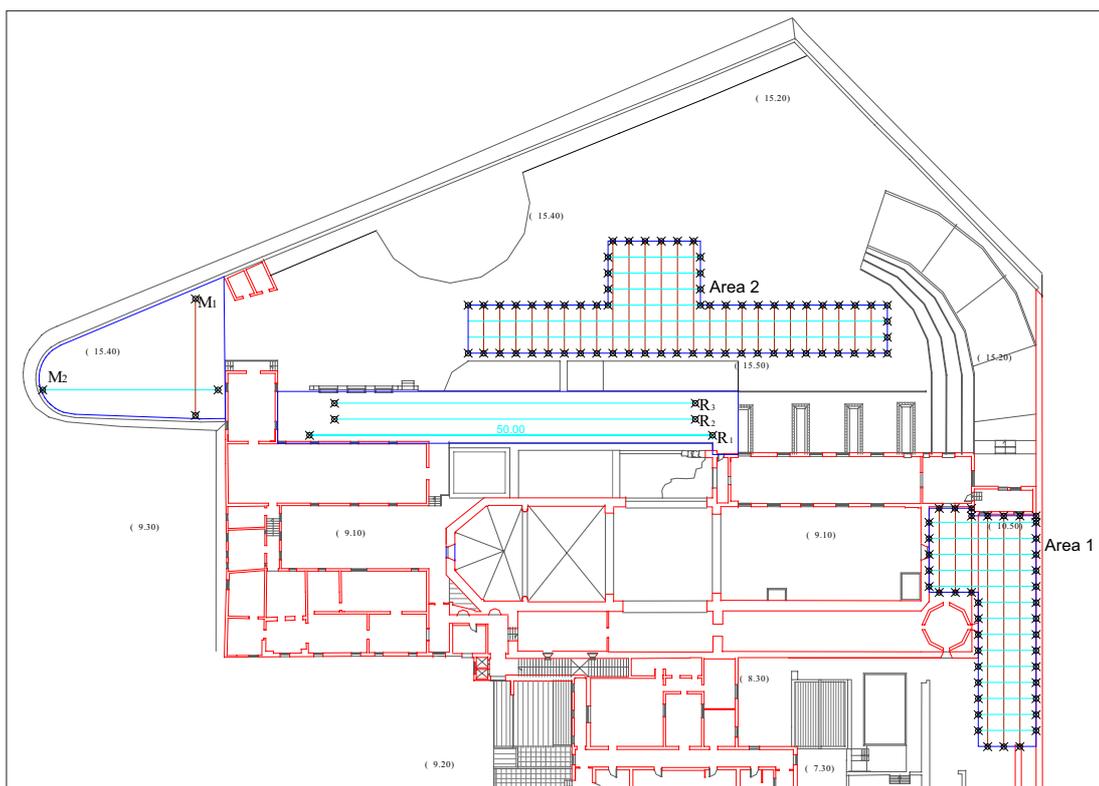


Fig. 6.52 - Schema con le indicazioni delle aree di indagine e dei profili verticali ed orizzontali acquisiti.

Arrive Detection), configurando l'antenna in modalità *monostatica*. Questa tecnica di acquisizione prevede che il campionamento dei dati sia effettuato facendo scorrere l'antenna sulla superficie del mezzo da indagare³⁹.

Per ricavare il valore di profondità dei riflettori e delle anomalie elettromagnetiche presenti nel sottosuolo, dai tempi di andata e ritorno delle onde riflesse si è stimato il valore della costante dielettrica media (ϵ_r) con un valore pari a 15, utilizzando un *Range* di 180 ns. (nanosecondi).

Ogni profilo georadar è stato elaborato utilizzando il *background removal*, un filtro orizzontale che effettua sull'intero profilo una sottrazione di una traccia media calcolata in un intervallo spazio/tempo scelto nella sezione. Con questa operazione si possono eliminare rumori costanti nella dimensione dello spazio, rendendo quindi

visibili segnali che prima erano *coperti* dai disturbi eliminati. In fase di elaborazione è stato nuovamente applicato un filtro in frequenza passa-banda di tipo *Butterworth*, che ha permesso di *ripulire* ulteriormente il segnale dalle frequenze indesiderate (*noise elettromagnetico*). Le varie sezioni radar acquisite parallelamente l'una all'altra e/o perpendicolarmente tra loro, ad una distanza di 2 mt. ciascuna, hanno consentito di calcolare, per ogni elemento della superficie indagata, un valor medio del segnale proveniente da eventuali superfici riflettenti sepolte. Ciò può essere fatto per intervalli di profondità di indagine pre-determinati. Adoperando uno stesso intervallo di profondità su tutti i profili acquisiti sulla stessa superficie si è ottenuta una mappa che rappresenta la presenza di superfici riflettenti dentro una *fetta* di terreno, compresa nell'intervallo scelto. Queste *fette* (chiamate *depthslices*) sono state predisposte per intervalli di profondità di 70 cm ciascuno, dalla superficie indagata. Le *depthslices* sono state costruite utilizzando tutti i profili paralleli lungo una direzione, tutti quelli paralleli lungo la direzione ortogonale, integrando tra loro tutti i dati acquisiti nelle due direzioni (fig. 6.55).

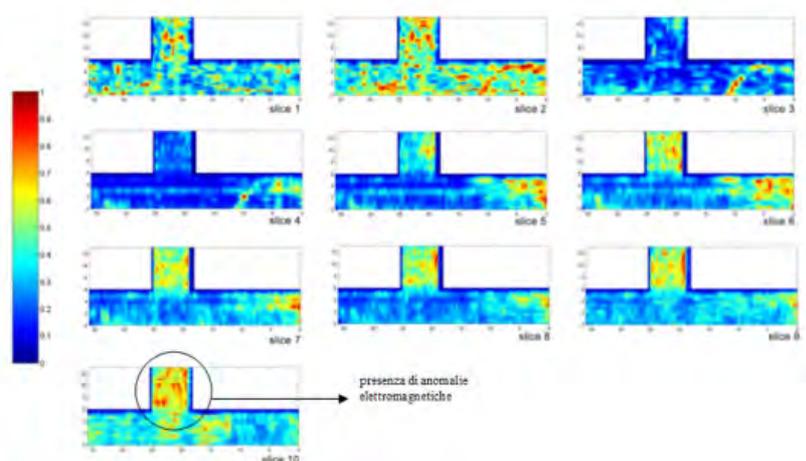


Fig. 6.53 - Acquisizione ed elaborazione dei dati relativi all'area n. 2, indicata in planimetria. Adoperando un intervallo di profondità di 70 cm. su tutti i profili acquisiti sulla stessa superficie si è ottenuta una mappa che rappresenta la presenza di superfici riflettenti dentro una fetta di terreno, compresa nell'intervallo scelto. Le *depthslices* sono state costruite utilizzando tutti i profili paralleli lungo una direzione, tutti quelli paralleli lungo la direzione ortogonale, ovvero integrando tra loro tutti i dati acquisiti nelle due direzioni. A sinistra è rappresentata la scala delle ampiezze normalizzata.

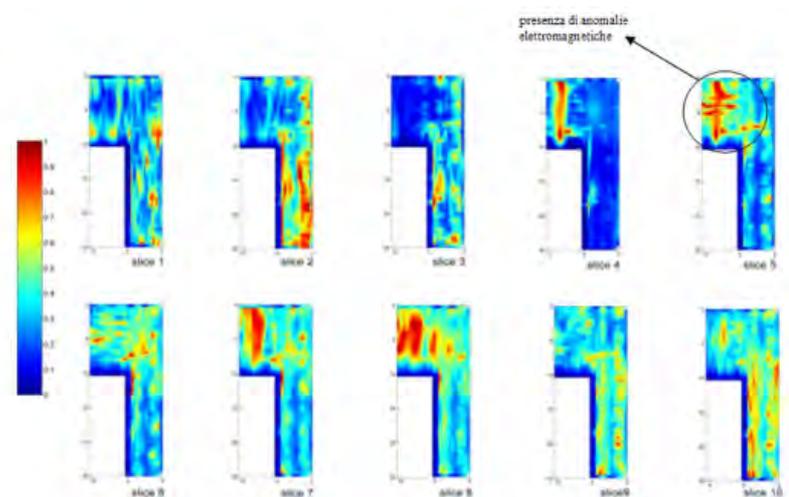


Fig. 6.54 - Acquisizione ed elaborazione dei dati relativi all'area n. 1, indicata in planimetria. Stesse considerazioni della fig. 6.53.

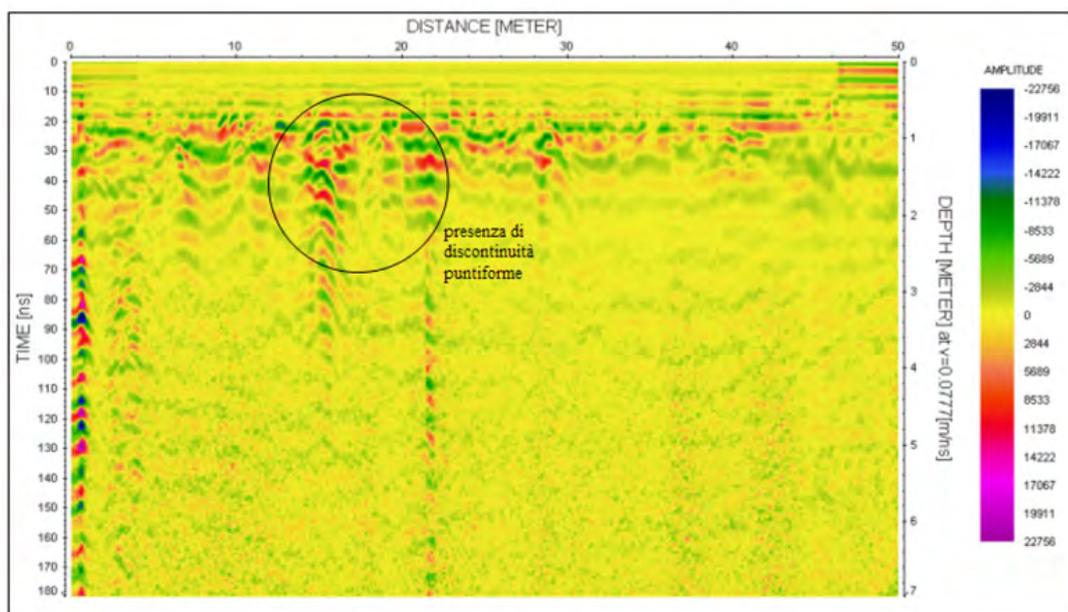


Fig. 6.55 - Radargramma del profilo R1, indicato in planimetria; visualizzazione in modalità line scan a colori in cui ad ogni ampiezza del segnale viene attribuito un colore, in funzione della sua entità.

La restituzione tridimensionale solida

Il percorso di conoscenza proposto mira all'approfondimento di un elemento architettonico caratterizzato da una struttura geometrica a monofora, semplice nella sua articolazione spaziale e finemente arricchita da decori quadrilobati pensili traforati a spigoli smussati. Espressione linguistica dell'Architettura siciliana del XV-XVI secolo che richiama stilemi di derivazione tardo-gotica catalana⁴⁰. I recenti restauri, finalizzati al ripristino e alla fruizione dei locali del Complesso monumentale di Santa Maria dello Spasimo a Palermo, hanno permesso di portare alla luce alcune aperture (e tra queste la monofora, oggetto di studio) sul fronte occidentale dell'impianto della chiesa, fino ad allora tompagnate nelle compagini murarie a causa delle opere di trasformazione e di ampliamento ottocentesche (figg. 6.56 - 6.57).

L'esperienza si costituisce come una valida occasione per sperimentare le potenzialità



Fig. 6.56 - A sinistra, rappresentazione ad acquarello della monofora sullo scalone di accesso al piano del bastione del complesso monumentale di Santa Maria dello Spasimo (da A. Maria La Fisca, G. Palazzo, *Santa Maria dello Spasimo*, Palermo 1996, p. 45).



Fig. 6.57 - A destra, alcune immagini della monofora allo stato attuale rinvenuta durante i lavori di restauro del 1995.

offerte dalle nuove tecniche di rappresentazione e di restituzione tridimensionale solida, applicate alla comunicazione e documentazione del patrimonio storico-artistico e ambientale. Esse offrono oggi nuovi scenari di ricerca nell'ambito metodologico e procedurale.

La tecnologia della *prototipazione (rapidprototyping)* resta ancora un processo ampiamente impiegato nel campo industriale del *reverse engineering*, del design e della progettazione meccanica, ma offre molti spunti di ricerca nell'ambito della valorizzazione dei beni culturali. Nuove soluzioni operative, ancora in via di sperimentazione, ed efficaci indicazioni nella progettazione di un'azione di restauro, si sviluppano grazie, infatti, all'integrazione di metodologie applicate in ambito industriale con quelle proprie del mondo dei beni culturali⁴¹.

La procedura è quella di applicare sul modello numerico digitale tridimensionale, risultato del processo di acquisizione, caratteristiche dei sistemi di modellazione CAD/CAM a superfici *free-form*; partendo dalla creazione di entità geometriche sulla struttura dei dati acquisiti, si articolano, si ricostruiscono o si modificano parti dell'organismo architettonico, con l'obiettivo di proporre interpretazioni di tipo storico-morfologico sulla sua esatta composizione o di visualizzare il progetto di conservazione che andrà realizzato su di esso⁴².

Con il termine *Rapid Prototyping* si intende un insieme di processi che realizzano modelli e componenti per addizione di materiale (*layer by layer*) a partire da un modello matematico tridimensionale. Diversamente da tutte le macchine tradizionali, che funzionano per sottrazione successiva di materiale da un blocco, nel quale è contenuta la forma che si vuole ricavare, i sistemi di *RP* fabbricano strati successivi di materiali costituiti di volta in volta da liquidi, polveri, fili o laminati. Strato dopo strato, queste macchine ricostruiscono l'oggetto che rappresenta il modello matematico di partenza. Per questa ragione tale tecnologia produttiva è anche nota come *Layer Manufacturing*.

L'acquisizione dei dati morfo-metrici è stata effettuata seguendo metodologie di rilievo diretto manuale e indiretto strumentale. L'integrazione di queste ha permesso di costruire un modello numerico discreto 3D con una struttura in *fil di ferro*, base per le successive elaborazioni.

La complessità di elaborazione riscontrata, in particolare, nella realizzazione del "decoro" dell'arco ha comportato una attenta verifica della generazione delle superfici (fig. 6.57). Una buona parte del lavoro di modellazione è stata dedicata alla *editazione* delle superfici NURBS, operazioni queste importanti per le successive fasi di gestione del modello che evitano la eventuale presenza di gap o sovrapposizioni che vadano a inficiare il risultato del lavoro di modellazione solida con la stampa 3D. Sono stati, all'uopo, compiuti diversi controlli sulla congiunzione, combinazione e fusione delle superfici e delle polisuperfici e sono state eseguite analisi delle *normali* di direzione e ricostruzione di *bordi* di superfici vicine (fig. 6.58).

Ultimato il modello matematico digitale in ambiente *CAD* è stato necessario elaborarlo in un formato compatibile con il software di gestione della macchina *RP* per la produzione in scala 1:10 del prototipo (fig. 6.59).

Lo standard grafico attualmente accettato da tutti i costruttori è l'*STL* (acronimo di *Standard Triangulation Language To Layer*), introdotto dalla Società *3D Systems*⁴³. Tale formato prevede la *tassellizzazione* delle superfici interne ed esterne del pezzo attraverso elementi triangolari.

Gli oggetti *NURBS* realizzati vengono convertiti in *Mesh* poligonali; tutte le superfici che involuppano l'oggetto vengono approssimate in triangoli di dimensioni diverse (dipendenti dalla risoluzione richiesta) in modo da seguire il profilo del modello. Per limitare e contenere l'inevitabile errore generato dall'approssimazione di superfici curve in facce triangolari, valutato misurando la distanza tra il baricentro del triangolo e la superficie originaria, si è infittito il numero dei triangoli in presenza di una superficie curva del modello per raggiungere l'approssimazione richiesta. Nel



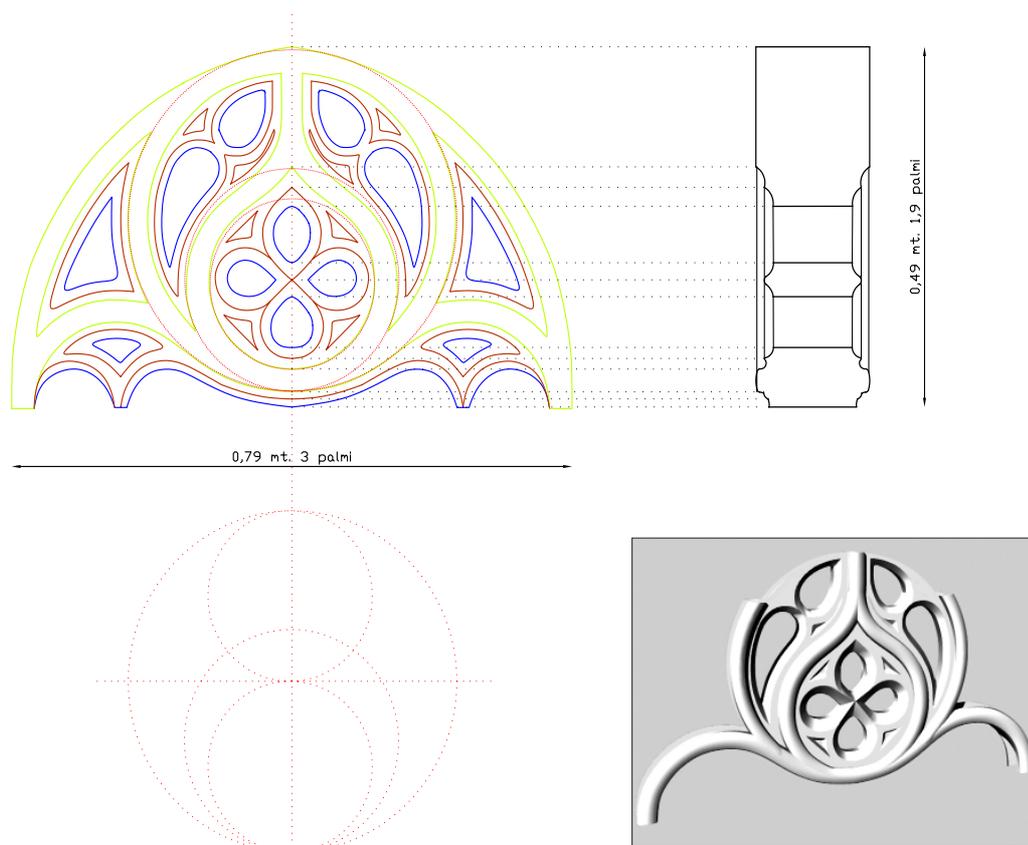


Fig. 6.57 - Pianta e sezione del particolare del decoro quadrilobato della monofora e schema dei tracciati circolari. A destra il modello in fase di realizzazione.

software impiegato per la realizzazione dell'elemento architettonico, *Rhinoceros 3D*, è stato possibile gestire la *poligonalizzazione* dell'oggetto, interagendo con alcuni parametri essenziali (angolo massimo, rapporto di aspetto massimo, lunghezza del bordo minima, massima distanza bordo/superficie) alla scelta sui poligoni della *Mesh* risultante.

Numerosi tentativi non hanno dato esito positivo nell'esportazione del file nel formato STL nel software di gestione *Magics X*, in quanto non si presentava di qualità idonea per le successive fasi, comportando ulteriori laboriose operazioni di ri-modellazione (fig. 6.60); quindi si è proceduto alla ricerca di un formato che consentisse un'ideale esportazione.

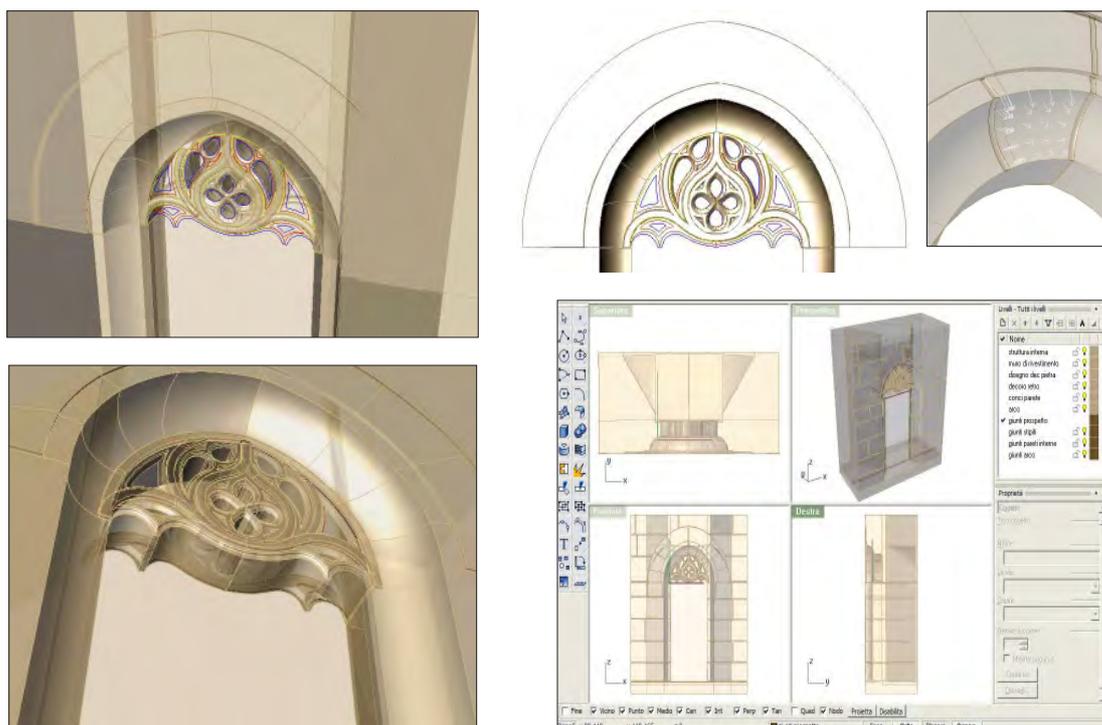


Fig. 6.58 - Alcune fasi del processo di costruzione, modellazione ed editazione delle superfici *NURBS* e controlli sulla congiunzione, combinazione e fusione delle superfici e delle polisuperfici; in alto a destra, analisi delle *normali* di direzione e ricostruzione di *bordi* di superfici vicine.

Una esportazione in formato *dxg* ha evidenziato le stesse problematiche dell'*STL*, legate alle normali delle facce, che non erano assolutamente uniformi, e alle superfici di congiunzione delle varie geometrie, che non si toccavano lasciando numerosi elementi disgiunti.

Le problematiche riscontrate hanno indotto a valutare differenti soluzioni. Si è quindi scelto di operare su un singolo elemento per volta, riproponendo l'esportazione in *STL*, direttamente dal software originario di modellazione (fig. 6.61); il modello originale è stato scomposto in 17 gruppi di elementi, elaborati singolarmente e poi raggruppati in procedimenti successivi fino alla realizzazione di due macro-elementi componenti la monofora, l'elemento "murario" e il "decoro".

In questo modo è stato possibile intervenire correggendo le normali delle singole



Fig. 6.59 - il modello matematico digitale ultimato in ambiente CAD, pronto per la conversione delle superfici in *mesh*. Operazione, quest'ultima, necessaria per l'esportazione in formato *stl*, compatibile con il software di gestione della macchina RP per la produzione in scala 1:10 del prototipo.

superfici (evidenziate in verde in figura) e il procedimento si è ripetuto per ogni singolo componente l'elemento "murario", realizzando anche, attraverso una serie di step successivi un processo di *stitching*, ovvero di deformazione fino al contatto delle superfici non contigue; messe, in automatico, in evidenza dal software attraverso una marcatura a linee gialle.

Considerazioni differenti per l'elemento "decoro", che anche in fase di pre-prototipazione ha dato diverse difficoltà di gestione delle superfici, obbligando a determinare soluzioni alternative. Considerata solo la superficie frontale del pezzo e separati tutti i componenti della struttura originaria, questi sono stati estrusi, (con il

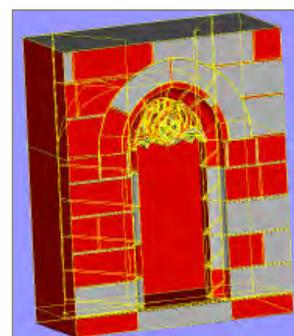


Fig. 6.60 - Analisi di controllo nel software Magics X. In colore rosso le superfici con normale invertita.

software Rapid Form 2004), ortogonalmente per una distanza pari allo spessore originale del “decoro” (fig. 6.62). Dopo aver completato l’operazione di *merge*, in modo da rendere solidale tutta la struttura, il modello è risultato pronto per la stampa.

Il file STL viene elaborato dalla macchina per le successive fasi di orientamento del pezzo, generazione dei supporti e *slicing*. La prima fase consente di selezionare la direzione di *crescita* ottimale del prodotto, che influenza notevolmente precisione dimensionale, finitura superficiale e tempi e costi di produzione. La seconda prevede, invece, un sezionamento mediante una serie di piani ortogonali alla direzione di *crescita*, per ottenere le coordinate del contorno di ciascuna sezione. Lo *slicing* è un’operazione critica, perché condiziona in modo determinante la precisione del prototipo. Può essere *uniforme*, dando origine a strati di spessore costante, oppure *adattativo* ed in tal caso lo spessore verrà scelto in funzione della curvatura superficiale, per limitare al massimo l’aspetto a gradini della superficie esterna (effetto *staircase*).

Nel caso in esame, si è deciso che lo spessore degli *strati* (*layer*, che vengono costruiti in

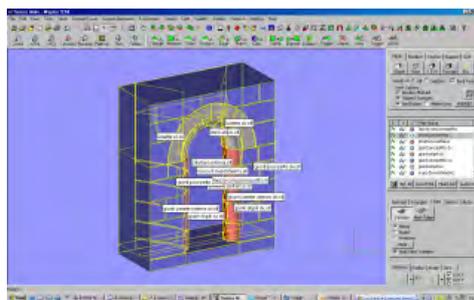
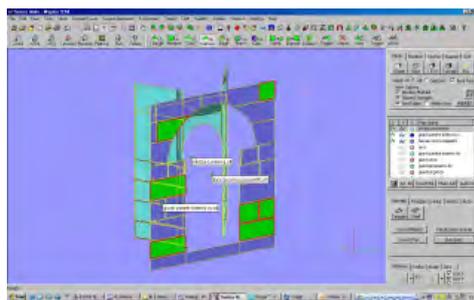
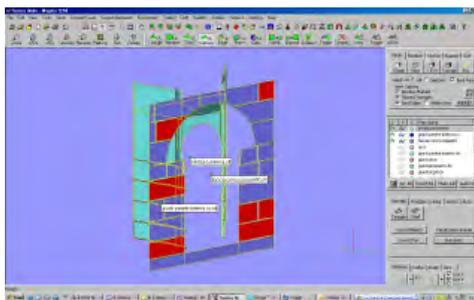
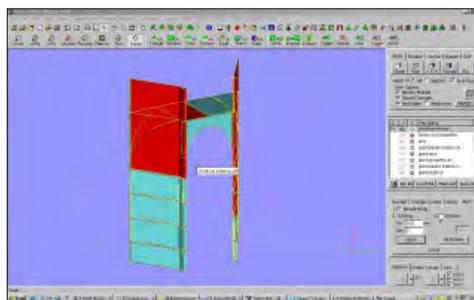


Fig. 6.61 - Alcune miniature di interfaccia del programma Magics X, durante el operazioni di gestione del file stl durante

successione dalla macchina *RP*) fosse di 0,1 mm. e lo spessore del modello di 5 mm. nella direzione interna per non modificare la morfologia del modello stesso.

Sul retro del prototipo sono stati realizzati otto fori per facilitare lo svuotamento della polvere di gesso dall'interno e, al fine di consentire una risoluzione migliore di stampa, si è predisposto il modello in verticale; questo ha comportato il suo posizionamento nella macchina in due pezzi, dal momento che l'altezza complessiva non rispettava gli standard consentiti (fig. 6.63).

La monofora è stata realizzata nei laboratori del *DIAPReM* (*Centro Dipartimentale per lo Sviluppo di Procedure Automatiche Integrate per il Restauro dei Monumenti*)⁴⁴. La stampa è durata sedici ore, e dopo circa otto ore il modello è stato estratto dalla stampante; sono stati consumati 400 ml. di collante e 500 cm³ di polvere di gesso. La metodologia di prototipazione rapida utilizzata è definita a *Stampa 3D a polvere di gesso*. La tecnologia utilizza polvere di gesso e colle viniliche; la superficie del modello, che si presenta con un ottimo dettaglio, può essere trattata con le tecniche

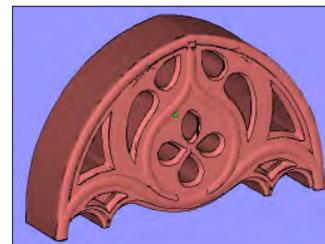
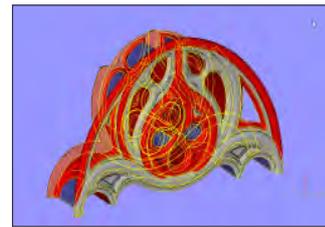


Fig. 6.62 - Realizzazione dello spessore del "decoro" con il software Rapid Form 2004.

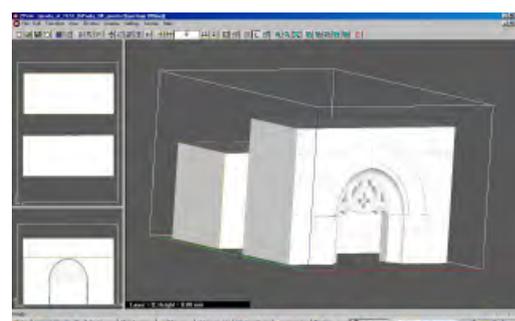
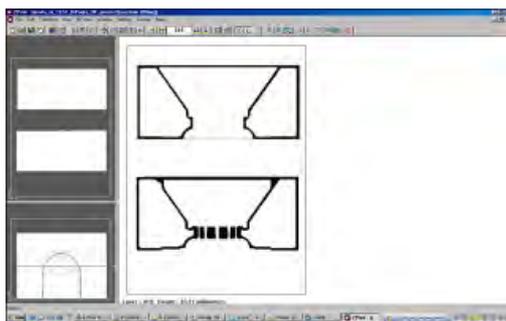
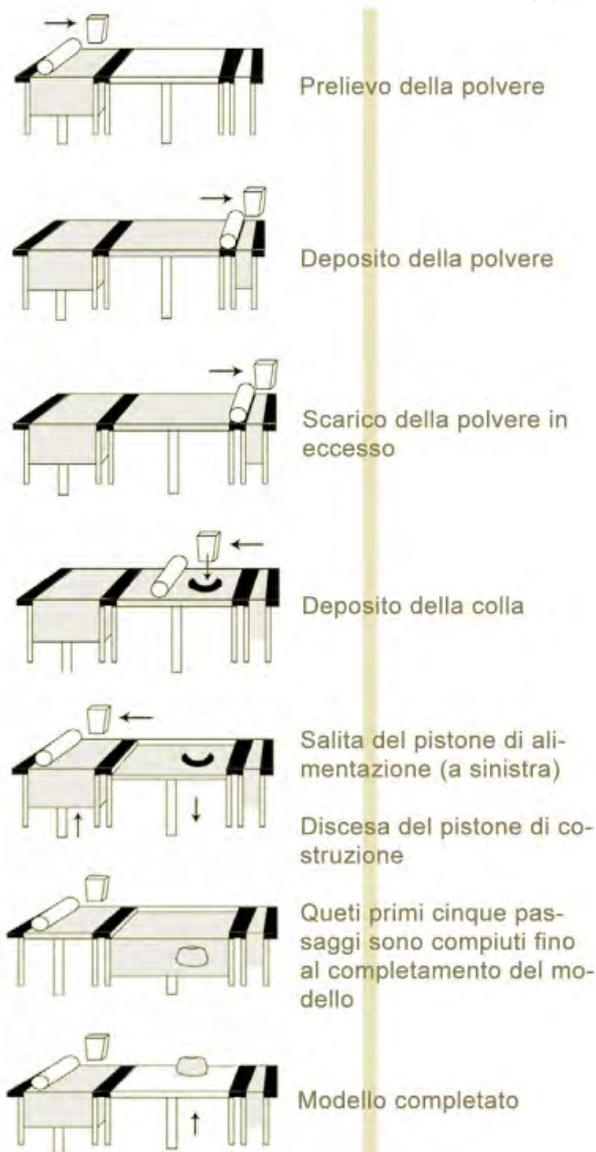


Fig. 6.63 - Predisposizione nella macchina delle due parti componenti il modello per la stampa.

utilizzate per il restauro dei materiali lapidei al fine di ottenere effetti estremamente realistici⁴⁵. Il centro di ricerca *D.I.A.P.Re.M.* ha scelto, tra i primi in Italia, di adottare e sperimentare questa tecnologia applicata ai beni culturali⁴⁶.

Il sistema di funzionamento della stampa 3D



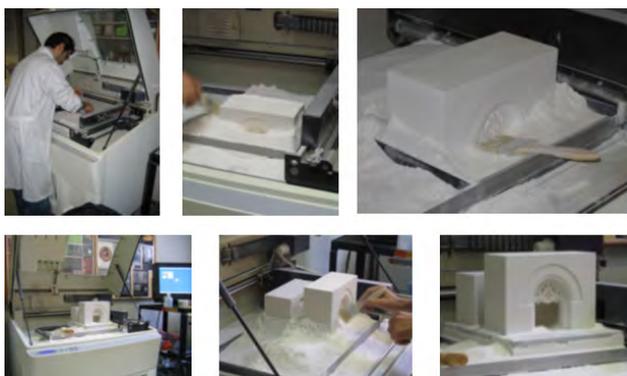
Si riasumono le fasi del sistema di funzionamento.

Inizialmente la stampante 3D stende uno strato sottile di polvere, successivamente viene spruzzato dalle testine di stampa uno strato di collante a base di acqua solamente nelle zone che devono essere create.

Terminate queste due fasi, il pistone si abbassa facendo spazio allo strato successivo ed il processo è ripetuto sino al completamento del modello.

Terminato il modello, questo è sostenuto dalla polvere sciolta non impiegata nella fase di stampa. Si rimuove il prototipo dal cestello di lavoro elevando il pistone; la polvere in eccesso verrà asportata e riutilizzata come nuovo materiale di stampa. La stampante, in basso, utilizza il sistema Spectrum Z510; le caratteristiche del sistema permettono di stampare, in modo monocromatico con cartucce a getto di inchiostro nero, ad una velocità di sei strati al minuto. Il volume realizzabile è di 254X356X203 mm.





Estrazione del modello:

Il sistema di stampa zcorp è un sistema a livelli successivi che, terminato il processo, lascia il modello immerso in un bagno di polvere di gesso non incollata. Alzando lentamente il piano di costruzione del modello, l'operatore con un pennello e un cartoncino elimina il gesso in eccesso facendolo ricadere a destra e sinistra del piano nel pistone del materiale e nella vasca di raccolta; questo materiale verrà poi recuperato e riutilizzato per le stampe successive. Rimossa la maggior quantità di gesso possibile il piano della stampante viene rimosso e portato nel soffiatore per rimuovere tutta la polvere attaccata alla superficie.



Pulitura della polvere in eccesso:

Il modello, posto ancora sul piano della stampante, viene inserito nella camera del soffiatore dove con un areografo a pressione controllata, in un ambiente semi-sigillato, l'operatore spruzza aria sul modello sollevando tutte le particelle di polvere di gesso rimaste attaccate al modello; la polvere è raccolta da un aspiratore. Con questo sistema si eliminano le particelle di gesso senza apportare pressioni al modello che potrebbe rompersi se spostato, ancora pieno di materiale.



Resinatura dell'interno:

A questo punto il modello, data la sua particolare conformazione, ha richiesto la stesura della resina epossidica bicomponente all'interno della lunetta. Il modello viene lasciato riposare in modo che inizi la polimerizzazione della resina.



Assemblaggio:

La sezione delle due parti viene leggermente levigata per farla aderire perfettamente, poi viene steso con una spatola un velo di colla vinilica che farà aderire le sezioni fino alla fase di resinatura.



Stuccatura:

Utilizzando della polvere di gesso, prelevata direttamente dal prototipatore ed impastata con un'opportuna quantità d'acqua, si va a stuccare la fuga tra i due pezzi del modello. Una volta essiccato il materiale, verrà levigato (questa zona non assorbirà la resina come il resto del modello e rimarrà leggermente più chiara alla vista), per eliminare questa piccola imperfezione, se necessario si dovrà ricorrere ad uno strato di vernice acrilica bianca opaca.

Resinatura:

Uniformemente, su tutto il modello viene stesa, con l'ausilio di un pennello, uno strato di resina epossidica, in modo da penetrare per un paio di millimetri nel gesso; terminato il processo di polimerizzazione la resina renderà resistente il modello a urti moderati e all'umidità e soprattutto renderà totalmente solidali le due parti che lo compongono.

Il modello finito



Note

¹ A. Mongitore, *Le chiese distrutte di Palermo*, Ms. settecentesco conservato presso la Biblioteca Comunale di Palermo, ai segni Q.q E 11.

² Le letture coniugate eliminano completamente gli errori di perpendicolarità tra asse di rotazione del cannocchiale e asse di collimazione, gli errori di orizzontalità dell'asse di rotazione del cannocchiale, l'errore di eccentricità dell'asse di collimazione. Queste si eseguono anche per gli angoli zenitali con letture in dritto e capovolto, cioè facendo ruotare il cannocchiale dello strumento su se stesso. Illustrando brevemente la procedura operativa iterata per ogni vertice, si mette in stazione lo strumento in punto fisso della rete, si collima il punto successivo, si registra il valore della lettura sul cerchio orizzontale (angolo azimutale), si capovolge il cannocchiale e si ruota l'alidada in senso orario, si collima nuovamente il punto registrando il valore della seconda lettura sul cerchio orizzontale e si mediano i valori delle due letture. Si veda M. Medri, *Manuale di rilievo archeologico*, Genova 2003, p.252-253.

³ Il metodo ai minimi quadrati può applicarsi in tutti quei casi in cui il numero di equazioni che reggono un problema siano maggiori o uguali al numero delle incognite da determinare.

⁴ Il perimetro originario tra gli alvei dei due fiumi Papireto a nord e il Maltempo a sud, racchiudeva il nucleo punico-romano, denominato dagli arabi (dopo la conquista nell'830) "al-qasr" cioè il castello, termine che permane oggi nella dizione di Cassaro; nel 937 sorse verso il mare un altro perimetro per fortificare la cittadella araba detta al-halisah, cioè l'Eletta nell'odierno rione della Kalsa. Dopo la conquista normanna del 1071 il tracciato difensivo racchiudeva i due precedenti rimanendo pressoché inalterato fino alla metà del '500 quando subentrò l'imminente esigenza di un progetto di potenziamento con la costruzione della cinta bastionata sotto il dominio spagnolo. Si veda M. Giuffrè, *Castelli e luoghi forti di Sicilia XII-XVII secolo*, 1980 Palermo; si veda anche C. De Seta, L. Di Mauro, *Palermo*, Roma 2002.

⁵ Società che si occupa di sviluppare tecnologie volte a migliorare l'ormai affermato impiego della fotogrammetria monoscopica in tutte quelle attività che riguardano i beni culturali, come il rilievo archeologico e il restauro architettonico.

⁶ G. Fatta, C. Vinci, *Le mura di Palermo: da sistema difensivo a tracce di storia*, p. 469, in "Luci fra le rocce-Colloqui internazionali Castelli e città fortificate. Storia, recupero, valorizzazione", Vol.I, Atti del Convegno Salerno, a cura di Ribera F., 29-30 aprile 2004, Alinea editrice, Firenze 2005;

⁷ Si veda Cap. 5°; descrizione della relazione di progetto dell'Ing. A. Ferramolino, riportata nel ms. di V. Di Giovanni, *Ordini di la fortificazioni di quista felici chita di palermo dato per lo magnifico Inginero antonio ferramolino. Die XX° octobris X° Indictionis 1536*.

⁸ G. Bezoari, C. Monti, A. Selvini, *Misura e rappresentazione*, in particolare pp. 233-237, 2001Milano.

⁹ Lo strumento si basa sulla tecnologia "tempo di volo" ovvero un diodo laser emette il raggio ad impulsi all'oggetto che una volta riflesso sulla superficie ritorna al ricevitore (si veda Cap. 1°, *Le nuove strumentazioni digitali di rilevamento*). La distanza che intercorre tra la superficie e lo strumento è calcolata registrando il tempo di andata e ritorno che impiega la luce. Lo strumento ha un'area di scansione 40°X40° ed una portata di 800-1000 mt. con riflettività del 20%-25%, con una precisione di 3-7 mm in funzione della distanza di acquisizione e della risoluzione angolare adottata. La scansione viene guidata da specchietti ruotanti che dirigono il raggio laser che scorre sull'oggetto con un passo di maglia

pre-impostato. La geometria 3D della superficie istantaneamente visibile sul video si presenta come una nube di punti nello spazio. La velocità è di 22.000 punti al sec. e all'interno è incorporata una camera digitale non calibrata per acquisizione di immagini a colori di risoluzione 768x576 dpi. Lo strumento ha dimensioni di 31.2x31.2x20.5 cm. e un peso di 12 Kg.

¹⁰ M. Roggero, D. Visintini, *Segmentazione di dati laser ed analisi orientata agli oggetti*, CISM, Corso "La tecnica del laser scanning terrestre", Udine, 24-26 novembre 2004.

¹¹ Sono stati eseguiti vari tentativi di ricostruzione delle superfici di interpolazione da curve di bordo (*loft lineare, sweep a uno e a due binari, rete di curve, patch*), ma, data la presenza di superfici a doppia curvatura, si è preferito la costruzione tramite reti di curve e patch.

¹² Tale arco può riconoscersi come "[...] il risultato di un incontro tra l'estrema tradizione gotica della corte aragonese e quella toscana, specialmente senese". R. Pane, *Architettura del Rinascimento in Napoli*, Napoli 1947, p.102.

¹³ A. Venditti, *Presenze catalane nell'architettura aragonese...*, op. cit. , p. 145-164.

¹⁴ Il passaggio tra le due dominazioni è segnato dalla rivolta del Vespro del 1282.

¹⁵ A. Venditti, *Presenze catalane nell'architettura aragonese (1442-1501) a Napoli e in Campania*, in "Verso un repertorio dell'Architettura catalana - Architettura catalana in Campania - Province di Benevento, Caserta, Napoli", a cura di C. Cundari, Roma 2005, p. 14; si veda anche G. Spatrisano, *Architettura del Cinquecento in Palermo*, Palermo 1961, p.25.

¹⁶ [...] È con l'archeggiatura dei portici di Palazzo Abatellis e Ajutamicristo che il Carnilivari immette nel linguaggio architettonico palermitano l'arco policentrico, la cui espressione dinamica è accentuata proprio dal ripiegamento sulla verticale del guscio o della sfaccettatura della ghiera [...], G. Spatrisano, *Architettura del Cinquecento in Palermo*, Palermo 1961, p.31.

¹⁷ A. Venditti, *Presenze e influenze catalane...*, op. cit., p. 14; si veda anche G. Spatrisano, *Architettura del Cinquecento in Palermo*, Palermo 1961, p.25.

¹⁸ [...] Sono logge che nulla hanno a che vedere con i narteci delle antiche basiliche cristiane e che non hanno alcuna specifica funzione sacra. Sono spazi aperti alla vita usuale, spesso in continuità con altri spazi destinati a fiere, mercati ecc. Danno riparo ed offrono luogo di sosta [...] e mediano un rapporto continuo tra la città e la chiesa non più vista come esclusivo ed ascetico luogo di culto ma come casa comune di una collettività di spirito laico che non separa la religione dalla quotidianità. G. BELLAFFIORE, *Architettura in Sicilia (1415-1535)*, 1984, Palermo, p. 66.

¹⁹ G. Spatrisano, *Architettura del Cinquecento in Palermo*, Palermo 1961, p.88.

²⁰ L'accostamento della figura ovale con l'ellisse ha suscitato l'interesse di studiosi che, attraverso studi a confronto, ne hanno estrinsecato proprietà ed analogie. Si citano brevemente i contributi che hanno apportato inedite considerazioni al tema. Nel 1995, Felice Ragazzo, in seguito alla necessità di risolvere praticamente problemi di tracciatura di forme ovoidali per costruire oggetti in legno, non potendo a tale scopo impiegare l'ellisse, pubblica un articolo in *Geometrie delle figure ovoidali*, "Disegnare Idee e Immagini", anno VI, n. 11, pp.17-24, dove propone una nuova costruzione grafica basata sul *III Lemma di Archimede*, dagli *Elementi* di Euclide, che consente di tracciare ovali noti gli assi e il raggio di uno degli archi di circonferenza. Determina, inoltre, il luogo di tutti i punti di raccordo di tutte le possibili coppie di archi raccordati inscritte in un rettangolo.



Il Prof. Riccardo Migliari, sempre nel 1995, in *Ellissi e ovali. Epilogo di un conflitto*, "Palladio", n. 16, pp. 93-102, dal confronto grafico operato per sovrapposizione fra i profili policentrici a quattro centri e l'ellisse di pari dimensioni, cioè avente gli stessi assi dell'ovale a confronto, dimostra, documentando con tabelle riassuntive, che gli scarti risultano irrilevanti e minimi e si localizzano in corrispondenza del raccordo degli archi policentrici che generano l'ovale. Afferma a tal proposito che la differenza formale tra detti profili si focalizza proprio nella variazione di curvatura che si genera nell'ovale localizzandosi nella giunzione degli archi, mentre, è noto, che l'ellisse varia lungo il tracciato con graduale continuità. Interessanti inoltre, per le metodologie di rilievo ed analisi applicate, i contributi riportati dallo stesso Prof. Riccardo Migliari a proposito dell'esperienza di ricerca sul Colosseo, in *Principi teorici e prime acquisizioni nel rilievo del Colosseo*, "Disegnare Idee e Immagini", anno X, n. 18-19, pp.33-49 e quelli di Camillo Trevisan, *Sullo schema geometrico costruttivo degli anfiteatri romani: gli esempi del Colosseo e dell'Arena di Verona*, "Disegnare Idee e Immagini", anno X, n. 18-19, pp.117-131, nel quale propone l'utilizzo di un software per l'interpolazione di ellissi e ovali a quattro e otto centri.

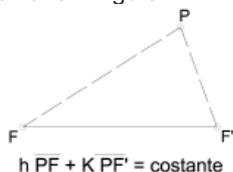
Molto approfondito e completo l'apporto della studiosa Ornella Zerlenga in *La forma ovata in architettura, rappresentazione geometrica*, Napoli, 1997, che analizzando le fonti storiche di trattati e manuali di architettura italiani ed europei dedicati alla descrizione del tema, individua tre principali differenti definizioni teorico-geometriche (*col filo, col compasso e portato dalla ragione*) e tre conseguenti modalità di tracciamento della curva dal profilo ovato, sempre in stretta relazione con il luogo geometrico ellisse. Ancora interessante risultano le ricadute e le considerazioni sull'applicazione della forma ovata in architettura.

Un altro riferimento autorevole si ha con gli studi grafici di verifica del Prof. Pagnano applicate ai disegni di progetto nel trattato dell'architetto Rosario Gagliardi, in particolare lo Studio D e le costruzioni di analisi delle forma ovale, in *Modulo e proporzione nei disegni di progetto di Rosario Gagliardi*, "Disegnare Idee e Immagini", anno IV, n. 6, pp.51-60.

Tra i più recenti approfondimenti sull'argomento si annoverano le ricerche delle relazioni tra gli schemi generativi e la forma architettonica condotte dallo studioso Edoardo Dotto che contribuisce a determinare interessanti connessioni tra le forme geometriche degli ovali armonici e le proporzioni definite dalla musica, *Il Disegno degli ovali armonici*, Catania 2002.

²¹ D. Donghi, *Manuale dell'architetto*, Torino, 1925, vol. I, parte I, p. 457. Il metodo di tracciamento che si adopera per la costruzione del cerchio, richiede un impegno maggiore nel determinare i raggi di curvatura e i rispettivi centri, che sono in numero pari alle porzioni di archi che descrivono la curva. In particolare i punti di contatto devono soddisfare la proprietà di continuità della circonferenza ammettendo uguale tangente nei punti di raccordo fra archi successivi; l'altra condizione da rispettare è che i centri dei due archi contigui devono essere fra loro allineati. Infine, nel rispetto della simmetria ortogonale, i centri in un semiovale non possono essere mai inferiori a tre (a quattro se si considera la forma intera dell'ovale).

In analisi matematica, la forma ovata è nota dai tempi antichi, (si veda F. Ragazzo, *Geometria delle figure ovali*, in "Disegnare Idee e Immagini", anno VI, n. 11, pp.17-23, che richiama il III Lemma di Archimede dagli Elementi di Euclide per la costruzione dell'ovale in particolari condizioni iniziali). Le più note costruzioni si rifanno a Cassini e a Cartesio; in particolare quest'ultimo la definisce come il luogo geometrico dei punti del piano le cui distanze da due punti fissi, detti fuochi, moltiplicate rispettivamente per due numeri dati h e k , danno una somma costante. Scelto un punto qualsiasi della curva, ad esempio P , e chiamati F ed F' i fuochi, si ha la relazione in figura.



Se, in particolare, $h = k$, la curva diventa un'ellisse.

Definizione tratta dal *Dizionario dei termini matematici* di A. Piccato, Bibl. Universale Rizzoli, p. 319.

²² Professore di *Costruzione* presso l'Ecole Polytechnique, pubblica a Parigi nel 1802 il *Traité theorique et pratique de l'Art de Bâtir*.

²³ Ad esempio nel caso di semiovali a quattro centri, lunghezze dei semiassi note e inclinazione imposta della retta contenente i centri, oppure, conosciuti il semiasse maggiore e la posizione dei centri si determina il semiasse minore e viceversa. Si veda E. Dotto, *Note sulla costruzione degli ovali a quattro centri. Vecchie e nuove costruzioni dell'ovale*, in "Disegnare Idee e Immagini", anno XII, n. 23, pp.7-13.

²⁴ Fin dalla fine del Quattrocento e la prima metà del Cinquecento si ritrovano fonti iconografiche, rilievi e studi di progetto legate alla figura ovata e alle sue applicazioni sugli antichi anfiteatri romani, o più tardi progetti sperimentali di matrici generative di spazi urbani. Ad esempio il Michelangelo, il primo che utilizza tale forma nel Rinascimento, adotta la configurazione ovale nella piazza del Campidoglio, o ancora si ritrova in spazi architettonici come l'ovale della cupola vaticana di Antonio da Sangallo. In riferimento alle opere scritte sull'argomento, la prima importante trattazione, edita nel 1545, sulla formulazione delle costruzioni dell'ovale a quattro centri è di Sebastiano Serlio nel suo *Libro Primo del Trattato di Architettura*. Nelle note introduttive l'autore scrive: "In diversi modi si possono fare delle forme ovali, ma di quattro modi ne darò la regola"; fino ad oggi sono considerati i modi canonici di costruire le figure ovali.

I trattati seicenteschi e settecenteschi si rifanno ai codici e ai criteri di tracciamento enunciati dal Serlio, ma nel 1655 viene pubblicata, per la prima volta, una costruzione che consente di fissare liberamente le misure degli assi e di determinare conseguentemente i tre centri dei rispettivi archi di cerchio appartenenti al semiovale; rispettando sempre le proprietà di continuità della curvatura e della collinearità dei centri.

Nell'Ottocento, l'interesse alla forma ovata si intensifica per l'evoluzione della tecnica costruttiva dei ponti in muratura dai tradizionali archi a tutto sesto a quelli circolari ribassati generati da profili policentrici (9, 11 centri), che consentivano un minor numero di arcate e una maggiore luce. Significative le considerazioni del francese J. B. Rondelet che, a proposito delle modalità di costruzione di curva piana dal profilo circolare ribassato (ad imitazione dell'ellisse pur non soddisfacendone le proprietà), si rifà alle note corrispondenze proiettive tra l'ellisse e la circonferenza omologa sfruttando i poligoni corrispondenti. I vertici di detti poligoni rappresentano punti dell'ellisse e coincidono con i punti di contatto degli archi di circonferenza di cui è composta la curva policentrica. Per un'analisi esaustiva si veda O. Zerlenga in *La forma ovata in architettura, rappresentazione geometrica*, Napoli, 1997.

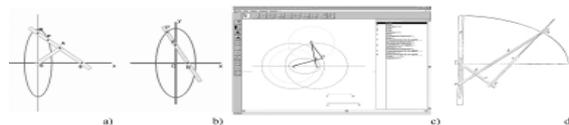
²⁵ G. A. Breymann, *Trattato generale di costruzioni civili, con cenni speciali intorno alle costruzioni grandiose, rifatta da H. Lang e A. Scholtz, traduzione italiana sull'ultima tedesca degli Ingegneri C. Valentini e Lo Gatto, con note di A. Cantalupi, L. Mazzocchi, Boubée, R. Ferrini, Milano, Vallardi, 1885*, I, pp. 122. Tratto da O. Zerlenga in *La forma ovata in architettura, rappresentazione geometrica*, Napoli, 1997, p. 203.

²⁶ D. Donghi, *Manuale dell'Architetto*, Torino, Unione Tipografico Editrice Torinese, 1925 (ristampa stereotipa), 2 voll., p. 461, tratto da O. Zerlenga in *La forma ovata in architettura, rappresentazione geometrica*, Napoli, 1997, pp. 224-225.

²⁷ Ne è un esempio il Ponte di Neully progettato dal francese J. R. Perronet negli anni 1770.



²⁸ Alcuni esempi di curvigrافي in cui la punta scrivente è guidata da un sistema di fili tesi o aste rigide che scorrono attorno a perni mobili o fissi, sono raffigurati in figura: a) *ellissografo di Van Schooten*; b) *ellissografo di proco*; c) *ellissografo ad antiparallelogramma* (in una realizzazione con il software Cabri Géomètre) noti i fuochi dell'ellissi e un antiparallelogramma opportunatamente costruito; d) *ellissografo di D. Eicheberg*, dispositivo per tracciare un profilo ellittico proposto dal tedesco G. A. Breymann, pubblicato nel *Trattato generale di Costruzioni Civili – Costruzioni in pietra e Strutture murali*, Milano 1885, III, § 4, tratto da R. Migliari, *Ellissi e ovali. Epilogo di un conflitto*, in "Palladio", n. 16, 1995, p. 94.



²⁹ Le normali delle tangenti alla curva ellittica risultano le bisettrici dell'angolo sotteso dai fuochi. La curvatura varia con continuità ed è massima all'estremo dell'asse maggiore e minima all'estremo dell'asse minore.

³⁰ Questa elementare costruzione fu indicata dal matematico e architetto bizantino Antemio, vissuto nel VI secolo d.C., ritrovata nel IX secolo d.C. dagli arabi e in un'epoca più recente rivisitata da Guido Ubaldo Del Monte (1545-1607).

³¹ B. F. de Bèlidor, *La scienza degli ingegneri nella direzione delle opere di fortificazione e d'architettura civile di Belidor con note del signor Navier*, (a cura di L. Masieri), Mantova, Negretti, 1832, Note del signor Navier, p. 11, nota 17, tratto da O. Zerlenga in *La forma ovata in architettura, rappresentazione geometrica*, Napoli, 1997, p. 61.

³² A. Michetti, *Possibili costruzioni delle ellissi del Colosseo*, in "Disegnare Idee e Immagini", anno X, n. 18-19, p. 97.

³³ Nella gerarchia di cantiere, il *fabricator* era l'operaio in grado di leggere i disegni forniti dal *magister* che, a sua volta, possedeva conoscenze geometriche e di calcolo grafico oltre ad una preparazione su tutte le operazioni complesse in cantiere. Si veda, R. NOBILE (a cura di), *Matteo Carnilivari - Pere Compte, 1506-2006, due maestri del gotico nel Mediterraneo*, Palermo 2006.

³⁴ "Se un esagono è inscritto in un'ellisse, i lati opposti del poligono si intersecano a due a due in tre punti allineati lungo una retta, detta retta di Pascal", in M. Docci, R. Migliari, *Scienza della rappresentazione-Fondamenti e applicazioni della geometria descrittiva*, Roma 1992, p.461.

³⁵ Nell'arco di tempo che va dal XVI secolo al XVIII secolo, numerosi risultano i contributi di trattatisti francesi e italiani che hanno trasformato la pratica di cantiere, tramandata per anni oralmente, in scienza applicata. Fra questi sicuramente Philibert de l'Orme con il suo *Premier tome de l'Architecture*, Parigi, 1567, Guarino Guarini, architetto e matematico modenese che nel 1671 scrive *Euclides adauctus et methodicus mathematicaque universalis* e *Architettura civile* nel 1737, in cui chiarisce i fondamenti scientifici della rappresentazione in doppia proiezione ortogonale, che si rinnoverà in contenuti e metodi con il fondamentale contributo *Géométrie descriptive* di Gaspard Monge nel 1794. Uno dei più autorevoli dal punto di vista scientifico è François Frézier, autore de *La théorie et la pratique de la coupe des pierres e des bois, pour la construction des voûtes et autres parties des bâtiments civils et militaires, ou Traité de stéréotomie à l'usage de l'Architecture* nel 1737. Nell'Ottocento un altro grande studioso del Medioevo Viollet-Le-Duc con il suo *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI au XVI siècle*. Ma il più importante e completo trattato sulla stereotomia che chiarisce alcuni metodi servendosi

della Scienza della Rappresentazione è il *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir* di Jean-Baptiste Rondelet nel 1802.

³⁶ Sagome di legno leggero o cartone che fungono da guida nel tracciamento delle pietre grezze. I *panneaux* possono essere di *tête* (di testa), se appartengono a sezioni piane verticali, di *douelle* (di profilo), se riferite a superfici di intradosso o estradosso, ed infine di *joint* (di apparecchio), ottenuti sezionando in vari punti, con piani radiali ortogonali, la curva profilo dell'arco, o più in generale della volta. Si veda C. Bianchini, *Strumenti logici ed operativi per lo studio dei sistemi voltati in pietra: la codifica ottocentesca di Jean – Baptiste Rondelet*, p. 93-115, in "Il Disegno e la pietra", a cura di R. Migliari, Roma 2000.

³⁷ Sono i due strumenti fondamentali composti da due aste, metalliche o di legno, tra loro imperniate ad una estremità; utili a tracciare angoli sulle superfici di pietra da tagliare. In più la *biveau* ha la particolarità di poter sagomare una delle due aste secondo la curva, profilo dell'arco o della volta.

³⁸ In un'indagine georadar, per anomalia si intende la presenza di una riflessione del segnale dovuta al contrasto dielettrico fra materiali adiacenti attraversati. In ogni corpo omogeneo, percorso da un impulso elettromagnetico, si genera una particolare riflessione legata alla natura del materiale e alla differenza di velocità fra i mezzi attraversati. Si veda R. Corazzi, *Il rilievo. Indagini in profondità sul modello reale con strumentazioni avanzate: il georadar*, in M. Docci, T. Fiorucci (a cura di), "Metodologie innovative integrate per il rilevamento dell'Architettura e dell'Ambiente", Ricerca COFIN 2002, Gangemi Editore, Roma 2005, pp.251-253.

³⁹ Allo scopo di ottimizzare il segnale sono stati utilizzati, in fase di acquisizione, un filtro in frequenza passa-banda di tipo *Butterworth*, uno *Stacking* orizzontale, ed un'ottimizzazione del *Range Gain*, che serve per definire la legge di variazione del *guadagno* in funzione del tempo, per cercare di compensare l'attenuazione del segnale proveniente da riflessioni più profonde.

⁴⁰ L. Inzerillo, *L'influenza del gotico mediterraneo nell'Architettura dei Florio. Revival architettonici e itinerari culturali*, Palermo 2006.

⁴¹ La Prototipazione Rapida (RP) è una tecnologia che rende possibile la produzione, in poche ore e senza l'ausilio di utensili, di oggetti di geometria comunque complessa, direttamente dal modello matematico dell'oggetto realizzato su un sistema CAD tridimensionale.

⁴² M. Gaiani, *Traduzioni dal reale al virtuale in architettura*, in R. Migliari (a cura di), "Frontiere del Rilievo". Dalla matita alle scansioni 3D, Roma 2001, pp. 11-57. Si veda anche S. Petronilli, *Applicazioni trasversali di Reverse Engineering nei Beni Culturali*, Unità di Agenzia per lo Sviluppo Sostenibile, ENEA, Bologna.

⁴³ La triangolarizzazione dovrebbe essere sempre effettuata all'interno dell'ambiente CAD; quando questo non è possibile (per la mancanza nel sistema del modulo di salvataggio in formato *STL*) è necessario utilizzare dei formati di interscambio (quali *IGES*, *VDA* o altri) e convertire il file in *STL* con dei CAD o dei convertitori software creati appositamente per questo scopo.

⁴⁴ L'esperienza, che ha permesso di approfondire la tecnologia di RapidPrototyping nel campo dei Beni Culturali è maturata durante un periodo di stage, trascorso dallo scrivente, presso il "Laboratorio di rilievo, modellazione e prototipazione tridimensionale per ambiente, architettura e beni artistici" del *D.I.A.P.Re. M*, dell'Università degli Studi di Ferrara. Lo stage, come strutturato, ha permesso allo scrivente di inserirsi nelle attività del laboratorio partecipando a campagne di rilievo tuttora in corso ed acquisendo procedure



e metodiche sperimentali di rilievo tramite 3D scanners finalizzate al controllo dei dati dimensionali ed alla realizzazione di modelli digitali 3D di situazioni architettoniche articolate e complesse.

⁴⁵ Le metodologie più usate nel campo dei beni culturali sono quelle che sfruttano materie prime di origine naturale: La fresatura e la stampa tridimensionale a polvere di gesso. I modelli così ottenuti possono infatti essere trattati e resi molto simili all'originale anche se realizzati in scala ridotta, questa possibilità risulta molto utile nel campo dell'allestimento museale e nella valorizzazione delle opere d'arte. Si veda M. Balzani, M. Fabbri, F. Maietti, *Tecniche di prototipazione e tonalizzazione di copie in scala: metodologie di prototipazione e studi sulla caratterizzazione superficiale dei modelli, Rilievo 3D e studi per la riproduzione dei bassorilievi provenienti dal Museo dell'Ermitage e che ornano i Camerini di Alabastro del Castello Estense di Ferrara* – Catalogo del Salone del Restauro 2006, Marzo-Aprile 2006.

⁴⁶ Il progetto della Stampa 3D a polvere di gesso nasce da un brevetto del *M.I.T.* di Boston, acquisito dalla Z corporation, che prevede l'utilizzo di una o più cartucce di stampanti commerciali che anziché spruzzare inchiostro monocromatico o a colori, spruzzano un liquido a base di colla su uno strato di materiale quale l'amido, il gesso e recentemente anche la polvere ceramica. Strato dopo strato sulla tavola viene consolidato un modello tridimensionale. È attualmente considerata la macchina più veloce nel mondo del RP, utilizza materiali atossici (amido, gesso o polvere ceramica), la polvere in cui il modello viene costruito fa da supporto al modello stesso. La stampante, impiegata per la realizzazione del modello, utilizza il sistema Spectrum Z510. Si veda M. Balzani, M. Fabbri (a cura di), *Dossier. La città nuova, Italia- y-2026. Invito a VEMA attraverso la creazione del grande plastico*, in "Paesaggio urbano", Anno XV, settembre-ottobre 2006.

6.4 La informatizzazione dei dati di rilievo.

Creazione di un ipertesto, implementabile e modificabile nel tempo, finalizzato alla conoscenza, alla conservazione del monumento e ai successivi interventi di restauro.

L'ipertesto è stato strutturato con l'obiettivo di poter comunicare in un'unica veste grafica i risultati delle fasi di analisi e di rilievo corredate dai grafici, dai dati in forma numerica, dai disegni e dai filmati della campagna di rilevamento, e di poter esaminare gli archivi contenenti informazioni storiche, iconografiche, cartografiche, fotografiche e bibliografiche; informazioni utili ad utenti che vorranno trarre maggiore conoscenza dell'opera e prevedere modalità di intervento di restauro e di fruizione. I criteri di consultazione organizzati attraverso la creazione di collegamenti esterni ipertestuali sono di due tipi (figg. 6.64 - 6.65). Il primo, seguendo l'articolazione in capitoli della ricerca, mira alla comprensione del complesso architettonico nei suoi aspetti principali, raccogliendo e presentando in modo sistematico l'evoluzione delle



Fig. 6.64 - Prima schermata dell'ipertesto; i due percorsi di consultazione.

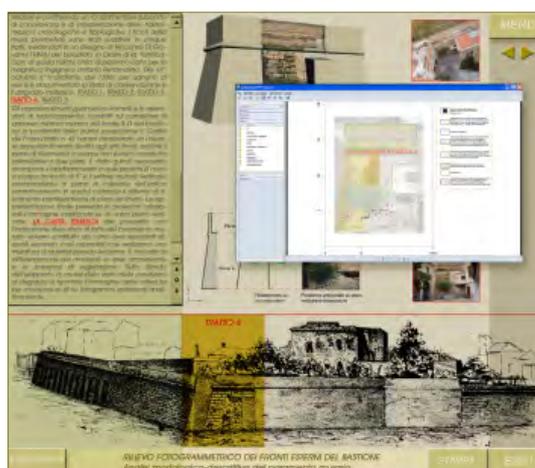


Fig. 6.65 - Schermata dell'ipertesto all'interno di un percorso di lettura tematica del complesso, relativa al rilievo fotogrammetrico dei fronti esterni del bastione; visualizzazione in rilievo di un oggetto richiamato da una parola attiva.

fabbriche, le fasi storiche, le trasformazioni dell'area urbana limitrofa rappresentate nelle mappe cartografiche, il processo di rilievo e le successive fasi di approfondimento tematico condotte. Il secondo criterio, attraverso l'interrogazione dei blocchi costituenti l'organigramma proposto nel Capitolo 2°, segue un altro percorso di navigazione permettendo così di illustrare l'iter di indagine e l'approccio metodologico perseguiti. I modelli tridimensionali creati sono stati rappresentati in realtà virtuale con il linguaggio VRML (*Virtual Reality Modeling Language*) esplorabili interattivamente (fig. 6.66).

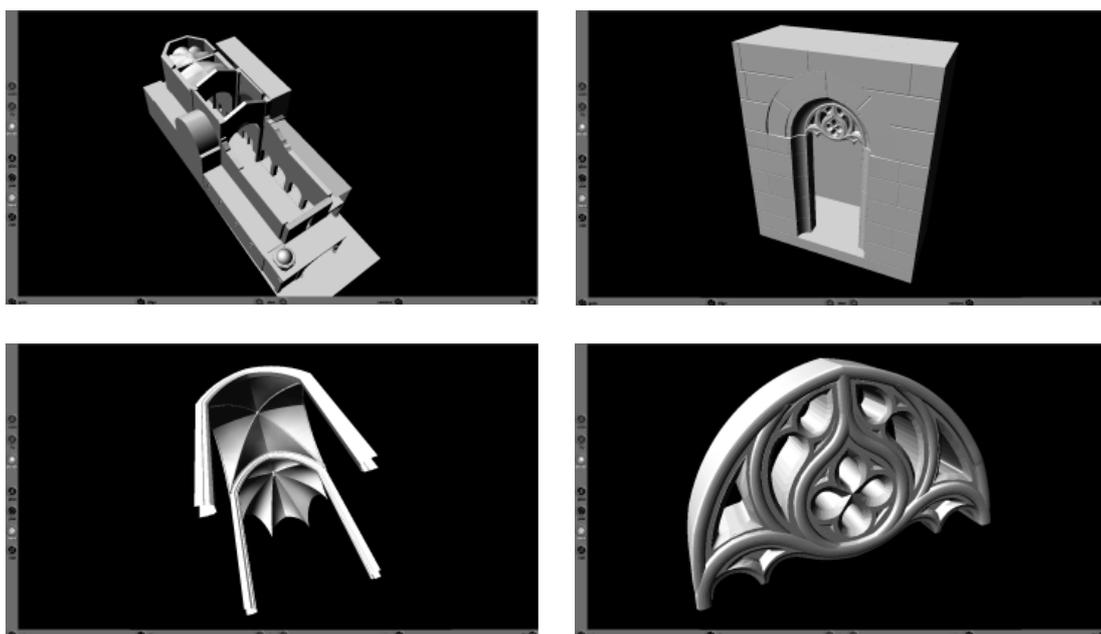


Fig. 6.66 - Alcune visualizzazioni tridimensionali, nel sistema di navigazione Cortona, dei modelli di studio 3D VRML del complesso architettonico.

Conclusioni

La ricerca ha sviluppato un processo di rilievo applicato al Complesso architettonico di Santa Maria dello Spasimo finalizzato a un approfondimento di conoscenza del bene architettonico. Essa è stata articolata in ipotesi e verifiche di impostazioni scientifiche e di scelte operative funzionali alle finalità; sono stati applicati sistemi di rilevamento *range camera* e di misurazione senza contatto e non invasivi, e sono state elaborate procedure di restituzione attraverso la modellazione tridimensionale digitale, di post-elaborazione dei dati per la formazione di un sistema informativo. Attraverso questa esperienza si è cercato di valutare l'efficacia, la validità e i limiti dell'approccio metodologico strutturato, di valenza generale e replicabile in altri casi studio. Analizzando l'organigramma di protocollo operativo proposto, il blocco costituito dalla generazione di una banca dati 3D (cerniera di collegamento tra la fase di acquisizione e la fase di elaborazione dati) e quello relativo all'informatizzazione del rilievo potrebbero costituirsi come elementi distintivi dell'intera struttura. Questi due nodi fondamentali caratterizzano il rilievo digitale integrato e differenziano l'approccio operativo moderno da quello tradizionale; la raccolta sistematica in archivio di dati "grezzi" eterogenei, prodotti dalle diverse indagini sul campo, permette in qualsiasi momento la verifica e l'analisi dei risultati, la ripetibilità delle operazioni e un'eventuale implementazione e integrazione di informazioni.

Sarebbe auspicabile l'utilizzo di software dedicati per il trattamento delle nuvole dei punti con funzioni applicative e con strumenti automatici di interrogazione, di gestione e di informatizzazione dei dati, rendere più efficace la visualizzazione e la fruizione del rilievo ad alta densità informativa con la possibilità di generare schede tematiche collegate specificatamente a singole parti della nuvola, all'interno dello stesso ambiente di lavoro.

Per quanto attiene i possibili sviluppi nel prosieguo del processo di conoscenza del



Complesso di Santa Maria dello Spasimo, i fotopiani digitali dei paramenti murari dei fronti esterni del bastione, costituenti un utile database metrico, potranno essere di supporto ad ulteriori indagini conoscitive sullo stato conservativo e sul degrado materico, finalizzati a interventi mirati di recupero, sistemazione e riqualificazione degli spazi addossati e limitrofi alle mura. L'acquisizione con precisioni millimetriche del modello digitale numerico della superficie della zona del titolo e dell'antititolo della chiesa ha consentito di conoscere la corretta morfologia della struttura, lo stato fessurativo e le caratterizzazioni cromatiche e materiche, nonché di operare verifiche di controllo sulla planarità delle pareti e valutazioni geometriche sulla curvatura delle superfici voltate della copertura. I dati metrici raccolti e le analisi grafiche elaborate potranno costituire un punto di partenza per successivi approfondimenti in altri settori disciplinari specifici; ad esempio nell'ambito del restauro, sulla base dei dati registrati dal processo di elaborazione del rilevamento con tecnica laser scanning, si potranno condurre sugli elementi architettonici analisi strutturali ad elementi finiti per il monitoraggio dello stato deformativo. I risultati ottenuti con le indagini in profondità con strumentazioni georadar nell'area del terrapieno del bastione hanno evidenziato interessanti presenze di resti di apparecchiatura muraria, ancora non bene identificate; sarebbero opportune ulteriori prospezioni geofisiche e l'avvio di campagne mirate di scavo archeologico. Una tematica di rilevante interesse che andrebbe ulteriormente sviluppata, in collaborazione con l'Ufficio Centro Storico del Comune, consisterebbe in un rilievo topografico di dettaglio collegato alla rete di inquadramento generale che miri ad una ricognizione aggiornata di tutti i beni lapidei depositati, ovunque nel complesso dello Spasimo, dal Comune e dalla Soprintendenza alle Belle Arti per i danni dei bombardamenti del 1943¹.

¹ Un'operazione di schedatura, catalogazione, inventariazione e di ricerca storica è stata già avviata nel 2003, (cfr. Capitolo 3°, Il Complesso dello Spasimo – Da lazzaretto ad ospedale), si veda, P. Palazzotto, *Un Museo di Palermo en plen air – Frammenti di storia allo Spasimo di Palermo*, in "Per salvare Palermo", N.11, gennaio/aprile 2005, pp. 34-37.

Bibliografia ragionata

Testi

- L. Inzerillo, *L'influenza del gotico mediterraneo nell'architettura dei Florio-Revival architettonici e itinerari culturali*, Edizioni Caracol, Palermo 2006.
- M. R. Nobile, *Matteo Carnilivari Pere Compte 1506- 2006, due maestri nel gotico Mediterraneo*, Edizioni Caracol, Palermo 2006.
- M. Giuffrè, *Palermo nel Quattrocento*, articolo in R. Nobile (a cura di), *Matteo Carnilivari-Pere Compte, 1506-2006, due maestri del gotico nel Mediterraneo*, Edizioni Caracol, Palermo 2006.
- M. Vesco, *Committenti e capomastri a Palermo nel primo Cinquecento: note sulla famiglia De Andrea e sull'attività di Antonio Belguardo*, articolo in "LEXICON – Storie e architettura in Sicilia", n. 2, Edizioni Caracol, Palermo 2006.
- M. Balzani, M. Fabbri, F. Maietti, *Sculture tecnologice*, in " Prototipazione rapida – idee e realtà, "Stampi e Design", Tecniche Nuove editore, Giugno 2006, pp. 64-69.
- M. Balzani, M. Fabbri, *Un lapsus tra lapide e gesso*, i plastici/sculture delle architetture di Dacid Chipperfield sviluppati con stampe 3D dal DIAPReM di Ferrara e dalla CMF Marelli di Cinisello Balsamo, in "Architetti – Idee cultura e progetto", n° 1/2 Gennaio-Febrero 2006, Maggioli Editore Rimini.
- M. Balzani, M. Fabbri, F. Maietti, *Tecniche di prototipazione e tonalizzazione di copie in scala: metodologie di prototipazione e studi sulla caratterizzazione superficiale dei modelli*, Rilievo 3D e studi per la riproduzione dei bassorilievi provenienti dal Museo dell'Ermitage e che ornavano i *Camerini di Alabastro* del Castello Estense di Ferrara – Catalogo del Salone del Restauro 2006, Marzo-Aprile 2006.
- F. Crossilla, S. Dequal, *Laser scanning terrestre*, CISM, Udine 2006.
- S. Brusaporci, *Il disegno dell'apparecchio aquilano nell'architettura religiosa dal XII al XIV secolo*, articolo in R. M. Strollo (a cura di), "Disegno e conoscenza-contributi per la storia e l'architettura", Roma 2006.
- M. Balzani, Il rilievo morfometrico tridimensionale delle architettura albertiane, nel Catalogo della mostra "Leon Battista Alberti e l'architettura, Silavana Editoriale, Mantova 2006.
- P. F. Palazzotto, *Un Museo di Palermo en plein air, frammenti di storia allo Spasimo di Palermo*, articolo in "Salvare Palermo", n°11, gennaio/aprile 2005.
- G. Fatta, C. Vinci, *Le mura di Palermo: da sistema difensivo a tracce di storia*, articolo in Ribera F. (a cura di), *Luci fra le rocce-Colloqui internazionali Castelli e città fortificate. Storia, recupero, valorizzazione*, Vol.I, Atti del Convegno, Salerno 29-30 aprile 2004, Alinea Editrice, Firenze 2005.
- S. Dequal, *Laser scanner a confronto*, in Bollettino SIFET, n. 3, Firenze 2005.
- R. Barzaghi, A. Cina, A.M. Manzano, *Il rilevamento geodetico tridimensionale integrato*, articolo in "Atti della 9° Conferenza Nazionale ASITA", Catania 2005.
- M. Docci, T. Fiorucci (a cura di), *Metodologie innovative integrate per il rilevamento dell'Architettura e dell'Ambiente*, Ricerca COFIN 2002, Gangemi Editore, Roma 2005.
- A. Venditti, *Presenze catalane nell'architettura aragonese (1442-1501) a Napoli e in Campania*, articolo in C. Cundari (a cura di), *Verso un repertorio dell'Architettura catalana - Architettura catalana in Campania - Province di Benevento, Caserta, Napoli*, Roma 2005.

- M. Balzani, N. Santopuoli, M. Fabbri, *Procedure avanzate per la valorizzazione dei Graffiti Pompeiani: dal rilevamento automatico alla creazione di una banca dati digitale per la conservazione e l'interpretazione*, articolo in "Restauro 2004, Salone dell'arte del Restauro e della Conservazione dei Beni Culturali e Ambientali", Ferrara, 25-28 marzo 2004, Grafiche Zanini, Bologna.
- M. Balzani, N. Santopuoli, *Rilievo, modellazione tridimensionale e prototipazione 3D dell'Arco di Traiano a Benevento. Un percorso metodologico per una banca dati tridimensionale*, articolo in "Restauro 2004, Salone dell'arte del Restauro e della Conservazione dei Beni Culturali e Ambientali", Ferrara, 25-28 marzo 2004, Grafiche Zanini, Bologna.
- R. Migliari, *Per una teoria del Rilievo architettonico*, articolo in "Disegno come Modello – Riflessioni sul disegno nell'era informatica", Collana "Nuovi quaderni di Applicazioni della Geometria descrittiva", Edizioni Kappa, Roma 2004.
- G. Vacca, *I sistemi integrati GPS-GIS per l'acquisizione di dati spaziali*, articolo in "Atti dell'8° Conferenza Nazionale ASITA", Roma 2004.
- L. Bornaz, *Principi di funzionamento e tecniche di acquisizione*, dispensa del Corso CISM (Centro Internazionale di Scienze Meccaniche "La tecnica del Laser Scanning Terrestre: teoria e applicazioni", coordinato dal Prof. F. Crossilla, Università di Udine e dal Prof. S. Dequal, Politecnico di Torino, Udine 24-26 novembre 2004).
- M. Rossi, P. Salonia, *Comunicazione multimediale per i beni culturali*, Ed. Addison-Wesley, Milano 2003.
- F. Rinaudo, *La tecnica laser scanning: applicazioni architettoniche e urbanistiche*, articolo in F. Crossilla e R. Galletto (a cura di), "La tecnica laser scanning- Teoria ed applicazioni", Udine 2003.
- F. Crossilla, R. Galletto, *La tecnica del laser scanning teoria ed applicazioni*, CISM, Udine 2003.
- E. Mira, *Una arquitectura gótica mediterránea. Estilos maneros e ideologías*, articolo in E. Mira (a cura di), "Una arquitectura gótica mediterránea", I vol., A. Saragozá Catalán, Valencia 2003.
- M. Balzani, A. Alberti, M. Betocchi, M. Fabbri, N. Santopuoli, *Diagnosi di un eclettico castello*, articolo in "Paesaggio Urbano", Rimini, Maggioli Editore, n. 4/2003.
- M. Balzani, A. Pellegrinelli, N. Perfetti, P. Russo, S. Tralli, F. Uccelli, *Laser scanner nel rilievo dei vicini: applicazioni verifiche e test di precisione*, articolo in "Bollettino della SIFET (Società italiana di Fotogrammetria e Topografia)", 2002.
- AA.VV., *Tecnologie per i Beni Culturali, prototipi dimostrativi e cantieri pilota*, Ed. Tipografia La Marina Cadenzano, Firenze 2002.
- C. De Seta, L. Di Mauro, *Palermo*, Edizioni Laterza, Bari 2002.
- D. Guedj, *Teorema del pappagallo*, Longanesi & C. Editori, Milano 2002.
- E. Dotto, *Il disegno degli ovali armonici*, Le Nove Muse Editrice, Catania 2002.
- M. Balzani, F. Uccelli, *Informatica 3D in un museo digitale in rete. Per gli istituti culturali l'opportunità di archiviare forme metriche tridimensionali per la documentazione e la ricerca*, articolo in "Paesaggio Urbano", n. 4/2002.
- D. Gueli, *Palermo sotterranea - Per il recupero, la salvaguardia, la conoscenza della città nascosta*, Regione Siciliana Assessorato dei Beni Culturali e ambientali e della Pubblica Istruzione, Ed. Industria grafica T. Sarcuto, Palermo 2002.
- G. Magrassi, *Rappresentazione tridimensionale e sistemi GIS: i problemi metodologici di*

modellazione 3D sul contesto costruito, articolo in “DDD”, Rivista di disegno e design digitale, “Nuove tecnologie multimedia e standard grafici per la rappresentazione del territorio”, n. 4, Anno I, 2002.

- G. Bitelli, *Moderne tecniche e strumentazioni per il rilievo dei Beni Culturali*, articolo in “Atti della 6° Conferenza ASITA”, Perugia 2002.

- M. Balzani, *Rilievo tridimensionale con laser scanners 3D. Sperimentazioni per l'architettura e i beni artistici*, articolo in R. Migliari (a cura di), *Frontiere del Rilievo – Dalla matita alla scansione 3D*, Strumenti del Dottorato di Ricerca in Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente, Università di Roma “La Sapienza”, Dipartimento Rappresentazione e Rilievo, vol. 5/2001, Gangemi Editore, Roma.

- D. Mediatì, *Geometrie dello Spirito-Colore, luce e forma nelle chiese basiliane della Calabria*, Tesi di Dottorato in Rilievo e Rappresentazione dell'Architettura e dell'Ambiente (XIV Ciclo), Napoli 2001.

- G. Bezoari, C. Monti, A. Selvini, *Misura e rappresentazione*, Casa Editrice Ambrosiana, Milano 2001.

- G. Bezoari, A. Selvini, *Strumenti topografici*, Liguori Editore, Napoli 2001.

- M. Balzani, *Modellazione tridimensionale per l'architettura e i beni artistici con relative schede*, articolo in “Informatica per il progetto. Rilievo e modellazione tridimensionale per l'architettura”, Dossier, n. 4/2000, Maggioli, Rimini.

- E. Ippoliti, *Rilevare*, Edizioni Kappa, Roma 2000.

- M. Docci, *La forma del Colosseo: dieci anni di ricerche. Il dialogo con i gramatici romani*, in “Disegnare idee e immagini”, Anno X, nn. 18-19, Roma 1999.

- C. Cundari, *Il Complesso di Monteoliveto a Napoli - Analisi, Rilievi, Documenti - Informatizzazione degli archivi*, Gangemi Editore, Roma 1999.

- A. Chirco, *Palermo la città ritrovata: venti itinerari entro le mura*, Dario Flaccovio Editore, Palermo 1999.

- D. Stroffolino, *La città misurata. Tecniche e strumenti di rilevamento nei trattati a stampa del Cinquecento*, Salerno Editrice, Roma 1999.

- A. Gatto, L. Iuliano, *Prototipazione rapida – La tecnologia per la competizione globale*, Collana Tecnologica, Tecniche Nuove, Milano 1998.

- F. Giovanetti, *Manuale del Recupero del Centro storico di Palermo*, Palermo 1997.

- A. Sgroso, *Architettura Catalana – Realtà e immagine*, Ed. Litografia Nicola Libero, Napoli 1997.

- L. Marino, *Il Rilievo per il restauro. Ricognizioni-Misurazioni-Accertamenti-Restituzioni-Elaborazioni*, Ed. Hoepli, Milano 1997.

- A. M. La Fisca, G. Palazzo, *Santa Maria dello Spasimo*, Edizioni Guida, Palermo 1997.

- O. Zerlenga, in *La forma ovata in architettura, rappresentazione geometrica*, Edizioni CUEN, Napoli 1997.

- G. Palazzo, *Tornano alla luce gli archi dello Spasimo*, articolo in “Kalòs”, n°2, marzo/aprile 1997.

- G. Palazzo, *Tornano alla luce gli archi dello Spasimo*, articolo in “Kalòs”, n°2, marzo/aprile 1996.

- O. Zerlenga, *Il tracciamento delle “forme ovali” nella trattatistica del XVI secolo. La pratica del “filo” e del “compasso”*, articolo in “Dimensioni del Disegno”, Officina Edizioni, Anno X, nn. 27-28, Maggio- Dicembre 1996.



- V. Di Giovanni, *La topografia antica di Palermo dal secolo X al XV*, Vol. II con Appendice, Ed. Tipografia e Legatoria del Boccone del Povero, Palermo 1889-90, ristampa anastatica 1995.
- R. Migliari, *Ellissi ed ovali. Epilogo di un conflitto*, articolo in "Palladio", n.16, Roma 1995.
- M. Docci, D. Maestri, *Manuale di rilevamento architettonico e urbano*, Edizioni Laterza, Bari 1994.
- R. La Duca, *Repertorio bibliografico degli edifici pubblici e privati di Palermo, Parte prima. Gli edifici entro le mura*, Dario Flaccovio Editore, Palermo 1994.
- M. Docci, D. Maestri, *Storia del rilevamento architettonico e urbano*, Edizioni Laterza, Bari 1993.
- G. Pagnano, *Modulo e proporzione nei disegni di progetto di Rosario Gagliardi*, articolo in "Disegnare Idee e Immagini", anno IV, n. 6.
- A. Michetti, *Possibili costruzioni delle ellissi del Colosseo*, articolo in "Disegnare Idee e Immagini", anno X, n. 18-19.
- F. Ragazzo, *Geometrie delle figure ovoidali*, articolo in "Disegnare Idee e Immagini", anno VI, n. 11.
- S. Di Matteo, *Iconografia storica della provincia di Palermo. Mappe e vedute dal Cinquecento all'Ottocento*, Provincia Regionale di Palermo. Assessorato ai Beni e alle Attività Culturali, Palermo 1992.
- M. Docci, R. Migliari, *Scienza della rappresentazione. Fondamenti e applicazioni della geometria descrittiva*, Edizioni La Nuova Italia Scientifica, Roma 1992.
- R. Martinelli, G. Carmini, *Percorsi lucchesi – Immagini e storia. Le mura rinascimentali*, Maria Pacini Fazzi Editore, Lucca 1991.
- G. Palazzo, *Guarisce lo Spasimo dopo secoli di degrado ritorna alla città il monumento invisibile*, articolo in "Kalòs", n°1, gennaio/febbraio 1990.
- E. Tocco, *Guida alla Sicilia che scompare. La distruzione del patrimonio monumentale dell'isola e le sue cause: l'incuria e la speculazione*, Sugar Editore, Palermo 1988.
- G. Serafini, *Strutture voltate*, Centro stampa Litograf 5, Reggio Emilia 1988.
- A. Piccato, *Dizionario dei termini matematici – I concetti, i simboli, i metodi, le teorie, le applicazioni, l'evoluzione storica, i grandi matematici*, Rizzoli Editore, Milano 1987.
- G. Cotroneo, F.S. Brancato, *La chiesa di S. Maria dello Spasimo*, Istituto Storico Siciliano, ILA Palma edizioni, Palermo 1986.
- Atti del Seminario di studio sul Complesso Monastico-Militare di Santa Maria dello Spasimo, 12-14 dicembre, Palermo 1986), Istituto Storico Siciliano 1987.
- G. Bellafiore, *Architettura in Sicilia (1415-1535)*, Ed. Tipolitografia G. Greco, Palermo 1984.
- F. Rotolo, *Matteo Carnilivari-Revisione e Documenti*, Istituto Storico Siciliano, Palermo 1985.
- G. Sorce, *La scoperta dello Spasimo di Sicilia: La tavola originale di Raffaello S. Maria dello Spasimo*, 1985.
- S. Boscarino, *Architettura e urbanistica dal Cinquecento al Settecento*, in "Storia della Sicilia", vol. V, Napoli 1981.
- M. Giuffrè, *Castelli e luoghi forti di Sicilia XII-XVII secolo*, Palermo 1980.
- M. Giuffrè, *Palermo "città murata" dal XVI al XIX secolo*, in Quaderno n.8 dell'Istituto Dipartimentale di Architettura e Urbanistica, Università di Catania, Vito Cavalletto Editore, Catania 1976.
- C. Filangieri, *Centri storici messaggi organici di cultura*, in AA.VV., "Palermo ieri, oggi domani

- e dopodomani”, Palermo 1975.
- R. La Duca, *Cartografia generale della città di Palermo e antiche carte della Sicilia*, vol.1, Napoli-Palermo 1975.
 - G. Carta, *Il sistema ospedaliero nel centro storico di Palermo*, Palermo 1969.
 - V. G. Colaiani, *Le Volte leccesi*, in Quaderni dell'Istituto di Architettura ed Urbanistica Facoltà di Ingegneria-Università di Bari, Edizioni Dedalo Libri, Bari 1967.
 - G. Spatrisano, *Architettura del Cinquecento a Palermo*, Flaccovio Editore, Palermo 1961.
 - R. Filosto, M. Inzerillo, *Contributo dell'omologia nella rappresentazione grafica*, in Collana di Studi dell'Istituto di Disegno della Facoltà di Ingegneria di Palermo, Ed. Palma, Palermo 1964.
 - F. Meli, *Matteo Carnilivari e l'Architettura del Quattro e Cinquecento in Palermo*, Fratelli Palombi Editori, Roma 1958.
 - AA.VV., *Ars Hispanie – Historia Universal Del Arte Hispanico*, vol. VII, Madrid 1952, p. 176.
 - E. Calandra, *Breve storia dell'Architettura in Sicilia*, Ed. Laterza, Bari 1938.
 - G. Di Stefano, *L'Architettura gotico-sveva in Sicilia*, Palermo 1935.
 - G. Agnello, *L'Architettura gotico-sveva in Sicilia*, Roma 1935.
 - F. Meli, *Palermo guida ai monumenti più importanti*, Ed. Librarie Siciliane, Palermo 1928.
 - D. Donghi, *Manuale dell'architetto*, vol. I parte I, Torino 1925.
 - V. Galeotti, *Notizie storiche del quadro dello Spasimo*, Catania, 1856, in G. Leanti, “Nel centenario di Raffaello”, “Panormus”, nn. 3-4, Palermo 1920.
 - V. Di Giovanni, *Le fortificazioni di Palermo nel sec. XVI giusta l'ordini dell'ing. A. Ferramolino*, in “Documenti per servire alla storia di Sicilia”, serie IV, IV, Palermo 1896.
 - S. Morso, *Descrizione di Palermo antico*, Edizioni Dafni, Catania 1872.
 - F. Paruta, N. Palmerino, *Diari della Città di Palermo dal secolo XVI al XIX pubblicati sui manoscritti della Biblioteca Comunale*, in “Biblioteca storica e letteraria di Sicilia”, serie I, vol. I, Palermo 1869.
 - G. Di Marzo, *Antonello Gagini e la sua scuola: scultura e architettura in Sicilia nel sedicesimo secolo*, Ristampe Siciliane Anastatiche, Palermo 1864.
 - R. La Duca, *La città perduta*, Libro I e III.
 - R. A. Genovese, *Tecniche per il restauro, Nota sul rilevamento fotogrammetrico*, Edizioni Scientifiche Italiane.
 - R. Migliari, *Principi teorici e prime acquisizioni nel rilievo del Colosseo*, articolo in “Disegnare Idee e Immagini”, Anno X, nn. 18/19.
 - C. Trevisan, *Sullo schema geometrico costruttivo degli anfiteatri romani: gli esempi del colosseo e dell'Arena di Verona*, articolo in “Disegnare Idee e Immagini”, Anno X, nn. 18-19, Roma.
 - Archivio Storico di Palermo, Fondo S. Maria dello Spasimo, vol. 67, cartella n.9.
 - A. Mongitore, *Storia sacra di tutte le chiese, conventi, monasteri, ospedali ed altri luoghi pii della città di Palermo. Le chiese distrutte*, manoscritto settecentesco conservato presso la Biblioteca Comunale di Palermo, ai segni Q q E 11.
 - Arch. Storico di Palermo “*Documenti relativi all'assegno di 4000 ducati concesso da Re Filippo IV al Monastero di S. Spirito in Palermo, in cambio del celebre quadro dello Spasimo di Raffaello*”, vol. 68, f. 113.

Tesi consultate sull'argomento

- V. Consolo, *Lo Spasimo di Palermo*, 2000, Dpt.Sc.Filolog.-Linguistiche.
- R. Ardizzone, *Lo Spasimo e la simbologia esoterica*, 1998, Bibl.Centr.-Architettura.
- P. F. Mineo, *Il ruolo del complesso dello Spasimo nella configurazione del quartiere Kalsa della città di Palermo*, 1997, Bibl.Centr.-Architettura.
- G. Lo Iacono, *Lo spasimo ritrovato*, 1996, Bibl.Centr.-Architettura.
- W. Carzan, *Risalire il Bastione dello Spasimo*, 1995, Bibl.Centr.-Architettura.
- M. A. Spadaro, *Raffaello e lo Spasimo di Sicilia*, 1991, Bibl.Centr.-Lettere-e-Filos.
- I. Alessi, *Via dello Spasimo. Un progetto introverso*, 1989, Bibl.Centr.-Architettura.
- F. De Roberto, *Spasimo*, 1989, Dpt.Sc.Filolog.-Linguistiche.
- A. Grilletto, *Verifica della progettualità del Piano Programma del Centro Storico di Palermo - Progetto di riuso*, 1989, Bibl.Centr.-Architettura.
- A. Bonetti, *Il bastione dello Spasimo: Caratteristiche tecnologico-costruttive*, 1987, Bibl. Centr.-Architettura.
- R. Zuccaro, *Raffaello e Serpotta - Stili e geometria nella pittura siciliana dal "Trionfo della Morte" allo "Spasimo"*, 1985, Bibl.Centr.-Architettura.
- G. Bertolini, *Una struttura geriatrica in Via dello Spasimo*, 1982, Bibl.Centr.-Architettura.
- M. S. Gentile, *Quattro isolati allo Spasimo*, 1982, Bibl.Centr.-Architettura.
- M. Alexandridis, *Lo Spasimo di Palermo - Indagine sulle caratteristiche tecnologico-costruttive del monumento*, 1980, Bibl.Centr.-Architettura.
- M.P. D'Alberti, *Vertenza centro storico - Proposta di intervento : "Il recupero dello Spasimo"*, 1980, Bibl.Centr.-Architettura.
- F. Chiodo, *Analisi morfologica e normativa architettonica nel centro storico di Palermo : Il Bastione dello Spasimo*, 1978, Bibl.Centr.-Architettura.
- C. Di Stefano, *Progetto architettonico al Bastione dello Spasimo nel centro antico di Palermo*, 1978, Bibl.Centr.-Architettura.

Sitografia ragionata

La raccolta di links è una proposta di riferimento da cui partire per una ricerca di approfondimento nel WEB; gli argomenti trattati sono suddivisi per sezioni riguardanti i principi tecnici dei metodi di rilevamento, i dispositivi, i produttori di strumenti e di software, i centri di ricerca ed infine alcuni esempi significativi di applicazioni applicate ai beni culturali.

Laser scanner terrestri

("key-words": *products, hardware, software, tutorial, case study, lidar, application, reverse engineering, 3D*)

Hardware

Riegl

<http://www.riegl.com>

Arius3D

<http://www.arius3d.com>

Faro

<http://www.faro.com>

iQvolution

<http://www.iqsun.com>

Cyberware

<http://www.cyberware.com>

Cyra

<http://www.cyra.com>

Leica Geosystem

<http://hds.leica-geosystems.com>

Cyberware

<http://www.cyberware.com>

Salmoiraghistrumenti

<http://www.salmoiraghistrumenti.it>

Mueller

<http://www.muller.ch>

Konicaminolta

<http://www.konicaminolta-3d.com>

Trimble

<http://www.trimble.com>

Acuityresearch

<http://www.acuityresearch.com>

3D Scanners

<http://www.3dscanners.com>

Metricvision

<http://www.metricvision.com>

Nextec

<http://www.nextec-wiz.com>

Optimet

<http://www.optimet.com>

Perceptron

<http://www.perceptron.com>

Datapixel

<http://www.datapixel.com>

Digibotics

<http://www.digibotics.com>

Callidus

<http://www.callidus.de>

Kreon Technologies

<http://www.kreon3d.com>

Laser Design, Inc.

<http://www.laserdesign.com>

Polhemus

<http://www.polhemus.com>

Shapegrabber

<http://www.shapegrabber.com>

Surphaser

<http://www.surphaser.com>

Wolf & Beck:

<http://www.wolfbeck.com>

Software

Pre-trattamento, Analisi, Post-Processamento, Reverse- Engineering

Tra i siti dedicati alla gestione e trattamento con software reverse-engineering si segnala <http://perso.club-internet.fr/dpo/numerisation3d>, una raccolta di articoli e recensioni di centri accademici ed industriali che lavorano nel campo del 3D surface scanning:

InnovMetric Software – Polyworks

www.innovmetric.com/

BENTLEY – MicroStation

<http://www.bentley.com/en-US/Products/MicroStation/>
INUS Technology - Rapidform
<http://www.rapidform.com/>
Paraforms
<http://www.paraform.com/paraform.html>
Imageware Surfacar
<http://www.mayamatrix.com/surfacar>
TECHNODIGIT -3D Reshaper
http://www.technodigit.com/fr1/Fr_technodigit.htm
3Space- FastSCAN
<http://www.polhemus.com/>
Alias – SurfaceStudio
http://www.alias.com/glb/eng/products-services/product_details.jsp?productId=1800008
Delcam-CopyCAD
<http://www.delcam.com/>
Raindrop Geomagic-Geomagic
www.geomagic.com/
Creative Dezin Concepts - Solid Works
<http://www.solidworks.com/index.html>
Leica geosystem - Cyclone
<http://hds.leica-geosystems.com/products/cyclone41.html>
IMTEC - Spatial Analyzer
<http://www.imtecgroupp.com/SpatialAnalyzer.%20SA.htm>
FarField
<http://www.farfieldtechnology.com/>
UGS - Imageware
<http://www.ugs.com/index.shtml>
Il sito ha una sezione interamente dedicata alla digitalizzazione 3D e Reverse Engineering
<http://www.wohlersassociates.com/>
Concetti generali sulla tematica del reverse-engineering
<http://home.att.net/~castleisland/scnc.htm>
Cenni teorici sul reverse-engineering.
http://www.pilot3d.com/rev_engr.htm
Considerazioni sulla creazione di superfici da nuvole di punti

http://www.photogrammetry.ethz.ch/general/persons/fabio/tarasp_modeling.pdf

Caratteristiche e principi di funzionamento dei sensori laser

Tra i più rappresentativi, www.3Dlinks.com, con una ricca sezione dedicata all'hardware degli scanner (http://www.3dlinks.com/hardware_scanners.cfm) e <http://www.Lidar.com>, un sito interamente dedicato alle caratteristiche e principi di funzionamento del sensore aviotrasportato Lidar:

Raccolta di articoli e recensioni di centri accademici ed industriali che lavorano nel campo del 3D surface scanning

<http://perso.club-internet.fr/dpo/numerisation3d/>

3Dlinks.com è una sezione dedicata all'hardware degli scanners

http://www.3dlinks.com/hardware_scanners.cfm

Guida ai prodotti di Computer Grafica mondiale che include una lista di strumenti nella sezione hardware

<http://cgw.pennnet.com/ProductGuide/>

Possibili applicazioni della tecnica laser scannig

http://www.isite3d.com/case_studies.html

Sito interamente dedicato al sensore aviotrasportato LIDAR

<http://www.lidar.com>

Tutorial della Nasa sull'uso del LIDAR

http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/sparcle/sparcle_tutorial.html

Introduzione alla tecnologia LIDAR

<http://pcl.physics.uwo.ca/pclhtml/introlidar/introlidarf.html>

Elaborazione e Modellazione 3D

Softimage XSI

<http://www.softimage.com/home/>

Easymodel

<http://www.jthesing.com/easymodel/>

[easymain.htm](#)

Amira

<http://www.amiravis.com/>

Cinema 4D

<http://www.maxon.net/>

3D Shockwave

<http://www.macromedia.com/>

3D Studio Max

<http://www.autodesk.com>

Animation Master

<http://www.hash.com/>

Rhinoceros

<http://www.rhino3d.com/>

Maya

<http://www.alias.com>

Corel Dream 3D

<http://www.corel.com/>

AC3D

<http://www.ac3d.org/>

Lightwave

<http://www.lightwave.com/>

Model Magic 3D

<http://www.imagewaredev.com/>

Vue infinite

<http://www.e-onsoftware.com/>

Bryce

<http://bryce.daz3d.com>

RenderMan

<https://renderman.pixar.com/>

World Builder

<http://www.digi-element.com/>

Casi studio

Nel panorama italiano della ricerca scientifica sul rilievo applicato ai beni culturali, un ruolo di primo piano nella sperimentazione della tecnica laser scanning e sue applicazioni è ricoperto dal Virtual Heritage LAB (ITABC-CNR; <http://www.itabc.cnr.it>). Nel sito si trovano alcuni esempi di applicazioni in cui sono evidenziati i vantaggi e le problematiche connesse all'uso dello strumento. Nello stesso sito sono consultabili le relazioni sui progetti realizzati. Da segnalare il rilievo architettonico del foro di Pompei con tecnologia laser

scanner 3D; al progetto ha coinvolto la Soprintendenza archeologica di Pompei, il Dipartimento e la Facoltà di Architettura di Ferrara, il centro *D.I.A.P.R.E.M* di Ferrara.

Il *LIAAM*, laboratorio di informatica applicata all'archeologia dell'Università di Siena ha avviato una sperimentazione di questa tecnologia sia per la documentazione di reperti archeologici, sia per edifici e superfici di scavo: in rete è possibile trovare informazioni a riguardo, all'interno del portale di archeologia medievale dell'Università di Siena. (<http://archeologiamedievale.unisi.it>)

In ambito internazionale un ruolo significativo è svolto dal sito della *Computer Applications And Quantitative Methods in Archaeology* dove è possibile trovare una ampia gamma di esperienze applicate a diversi contesti; *LIDAR*, laser scanner per oggetti e monumenti (<http://www.arch.soton.ac.uk/>).

All'interno del sito dell'*International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* è possibile visionare gli atti dell'"ISPRS Workshop Laser scanning 2005": sono affrontate varie problematiche specifiche connesse con l'applicazione di queste tecniche.

In alcuni Centri di ricerca ed Università è possibile scaricare relazioni in formato *PDF* su progetti conclusi, su casi specifici connessi con l'uso di questa tecnologia e con la sua integrazione con altre metodologie.

IUAV

Ferrara DIAPREM

Home page del Laboratorio di tecnologie applicate ai beni culturali del CNR

<http://www.itabc.cnr.it>

Portale di Archeologia medievale dell'Università di Siena

<http://archeologiamedievale.unisi.it>

Rilievo architettonico del foro di Pompei con tecnologia laser scanner 3D

<http://www.pompeisites.org/> ; http://www.rsarch.cn/chinese/article/22-Balzani_Santopuoli.pdf

Home page del LIAAM, Laboratorio di informatica applicata all'archeologia dell'Università di Siena

<http://192.167.112.135/NewPages/LABORATORIO/index.html>

English Heritage – LIDAR

<http://www.english-heritage.org.uk/server/show/nav.8880>

International Society for Photogrammetry and Remote Sensing

<http://www.isprs.org/>

Applicazioni Laser Scanner negli scavi Archeologici

<http://cipa.icomos.org/fileadmin/papers/Torino2005/226.pdf>

Integrazione delle scansioni laser ad alta risoluzione con tecniche fotogrammetriche per la documentazione delle piramidi a Giza.

<http://cipa.icomos.org/fileadmin/papers/Torino2005/470.pdf>

Home page dell'*Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung*, Austria.

<http://www.ipf.tuwien.ac.at/research/research.html>

Virtual Reality Applications Center, Iowa State University: laser scanner e realtà virtuale.

<http://www.ctre.iastate.edu/pubs/vrls.pdf>

Università di Ferrara: "3D, archeologia e paleoantropologia".

http://web.unife.it/progetti/preistoria/3d/img/3d_isersia.htm

University of New South Wales: "scansioni laser terrestri".

<http://www.gmat.unsw.edu.au/currentstudents/ug/projects/waud/waud.htm>

Sistema georadar

<http://www.gen-eng.florence.it/geosurvey/>

(relativamente alle prospezioni geofisiche)