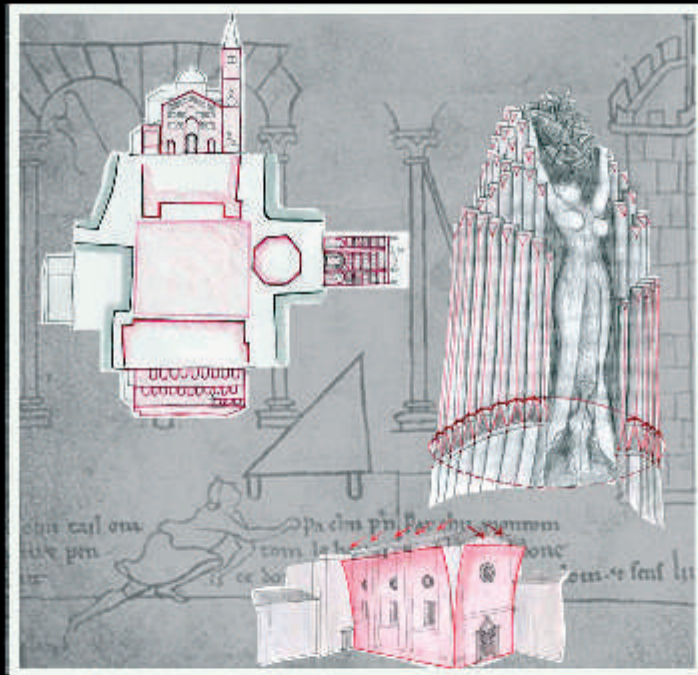




Cecilia Tedeschi

TRA STAZIONE TOTALE E LASER SCANNER
ambiti e soglie di applicazione degli strumenti a raggio laser
nel rilievo indiretto dell'architettura



Tutor: Arch. Chiara Vernizzi
Co-Tutor: Prof. Michela Rossi
Coordinatore del Dottorato: Prof. Ing. Paolo Mignosa

Università degli Studi di Parma
Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile
Curriculum: "Disegno e rilievo del patrimonio edilizio"
XVIII Ciclo

Cecilia Tedeschi

**TRA STAZIONE TOTALE E LASER SCANNER
ambiti e soglie di applicazione degli strumenti a raggio laser
nel rilievo indiretto dell'architettura storica**

**Tutor: Arch. Chiara Vernizzi
Co-Tutor: Prof. Michela Rossi**

**Tesi per il conseguimento del titolo di
Dottore di Ricerca
XVIII Ciclo
A.a 2003-2005**

**Università degli Studi di Parma
Dottorato di Ricerca in Ingegneria Civile
“Disegno e rilievo del patrimonio edilizio”**

PREMESSA – Superfici continue e modelli discreti	pag. 1
---	--------

PARTE I - Tradizione e innovazione nel rilievo dell'architettura

Capitolo 1 - La cultura e la tecnica	pag. 7
---	--------

Capitolo 2 - Gli strumenti e le tecniche: note storiche	pag. 13
2.1- Antichità	pag. 14
2.2- Età di mezzo	pag. 17
2.3- Età moderna (rinascenza, barocco, neoclassicismo)	pag. 19
2.4- Età contemporanea (Ottocento, XX secolo)	pag. 23

Capitolo 3 – Il rilievo indiretto: evoluzione e prospettive	pag. 27
3.1- Distanziometro e squadra laser: il metro e il filo a piombo	pag. 27
3.2- Stazione totale: l'evoluzione tecnica	pag. 28
3.3- Laser scanner: l'innovazione culturale	pag. 30

PARTE II - Esperienze di rilievo a confronto: superfici costruite e modelli progettuali nell'architettura

Capitolo 1 - Forma e deformazione: le volte della chiesa dell'abbazia di Monteoliveto	pag. 39
--	---------

1.1- Finalità del rilievo e caratteristiche dell'architettura: il vano unitario	pag. 39
1.2- Misurazione: metodologie e problematiche	pag. 43
1.3- Restituzione grafica: metodologie e problematiche	pag. 48
1.4- Rilievo	pag. 51
1.4.1- Lettura del rilievo	
1.4.2- Lo studio delle deformazioni architettoniche a partire dalle conoscenze geometriche-costruttive-metrologiche	
1.4.3- Compatibilità e congruità degli strumenti	

Capitolo 2 - Spazio fisico e spazio teorico: la geometria delle piazze medievali a Parma	pag. 61
---	---------

2.1- Finalità del rilievo e caratteristiche dell'architettura: lo spazio urbano	pag. 61
2.1.1- Piazza Garibaldi: note storico-architettoniche	
2.1.2- Piazza del Duomo: note storico-architettoniche	
2.2- La ricerca della matrici progettuali: gli elementi della conoscenza	pag. 68
2.3- Misurazione: metodologie e problematiche	pag. 70
2.4- Restituzione grafica: metodologie e problematiche	pag. 72
2.5- Rilievo	pag. 73
2.5.1- Lettura del rilievo	
2.5.2- Compatibilità e congruità degli strumenti	
2.5.3- Le deformazioni del muro del Vescovado	

Capitolo 3 - Macro e microarchitettura: le superfici plastiche nel cimitero della Villetta

	pag. 83
3.1- Finalità del rilievo e caratteristiche dell'architettura: il complesso a scala urbana	pag. 83
3.2- Misurazione: metodologie e problematiche	pag. 88
3.3- Restituzione grafica: metodologia e problematiche	pag. 90
3.4- Rilievo	pag. 93
3.4.1- Compatibilità e congruità degli strumenti	
3.4.2- Il famedio di Cleofonte Campanini e il rilievo strumentale a raggio laser in modalità di scansione automatizzata	

CONCLUSIONI - Metodi di rilievo a confronto pag.107**APPENDICI**

A - Strumenti e metodi di misura per il rilievo indiretto	pag. 115
B - Superfici curve in architettura: i sistemi voltati	pag. 125
C - Rapporti geometrici e canoni numerici	pag. 139

BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO pag. 145

PREMESSA

Superfici continue e modelli discreti

L'affermazione dell'uso del computer per lo studio dell'architettura, in tutte le sue discipline, ha trovato uno degli aspetti di maggior interesse nella possibilità di studiare facilmente le forme e le strutture del costruito, attraverso simulazioni tridimensionali.

Le possibilità offerte in questo senso implicano la necessità di una riflessione sui modelli architettonici proposti dal rilievo e sulla difformità tra questi e la realtà, rivelando nuove problematiche nell'approccio operativo in fase di rilevamento.

Per secoli il rilievo ha perseguito la realizzazione di sezioni piane, legate tra loro in modo da rappresentare in sintesi i volumi dell'architettura. La possibilità di elaborare modelli tridimensionali per la restituzione e lo studio dei risultati del rilievo ha evidenziato i limiti del rilevamento tradizionale (eseguito prevalentemente per sezioni piane), richiedendo l'individuazione spaziale di un numero più consistente di punti.

L'incremento del numero delle sezioni o dei punti preventivamente individuati, tuttavia, non offre una soluzione adeguata se non nel caso specifico delle superfici piane, per le quali è sufficiente individuare la posizione di pochi elementi riconoscibili. Diverso il problema del rilievo delle superfici curve, rispetto alle quali il rilievo tradizionale si dimostra molto schematico, appoggiandosi all'individuazione di elementi geometrici riconoscibili.

Su queste considerazioni trova fondamento lo sviluppo di nuovi strumenti/tecniche di rilievo, che operando nelle tre dimensioni sono in grado di restituire "direttamente" modelli tridimensionali della realtà misurata.

Lo sviluppo degli strumenti di misura a onde elettromagnetiche, a raggio laser in particolare, consente di disporre di strumenti estremamente pratici sia in risposta alle esigenze dei metodi operativi consolidati del rilievo discreto, sia relativamente al rilievo continuo, effettuato in scansione automatica.

Questo implica una riflessione sull'attualità e l'efficacia del rilievo per superfici piane (discreto) e l'utilizzo di strumenti indiretti a raggio laser, quali distanziometro e stazione totale, in relazione al nuovo modo di concepire il rilievo dell'architettura introdotto dall'utilizzo del laser scanner.

La presente tesi di dottorato intende verificare le possibili applicazioni degli attuali strumenti del rilievo indiretto in risposta alle esigenze del rilievo.

Tale verifica è stata condotta sul confronto di alcune esperienze esemplificative di casi "estremi" e per questo ritenute significative.

Le occasioni per verificare in modo pratico l'applicabilità e l'efficacia di tali strumentazioni sono state diverse: nell'ambito di convenzioni esterne, nella collaborazione alla didattica e nel coordinamento dei gruppi di rilievo degli studenti. Queste esperienze hanno consentito di stabilire gli ambiti di utilizzo ottimale delle diverse metodologie e dei principali strumenti, in particolare della stazione totale e del laser scanner, all'apparenza alternativi e quasi antitetici.

La parziale sovrapposibilità degli ambiti metodologici degli strumenti, riscontrata in occasione di queste esperienze, hanno sottolineato l'opportunità di integrare strumenti e metodi diversi e dunque l'importanza del rilievo integrato.

I rilievi del convento di San Paolo e del Palazzo Vescovile di Parma, in particolare: la complessità delle superfici voltate della "camera di San Paolo" e le deformazioni delle pareti esterne del Vescovado hanno, infatti, evidenziato le difficoltà del metodo diretto nel rilievo di superfici curve (volte e spancamenti) e la necessità di utilizzare altre strumentazioni, quali la stazione totale o il laser scanner.

In questo senso si è ritenuto di focalizzare l'interesse soprattutto sui problemi legati al rilievo delle superfici curve, che nell'architettura possono essere ricondotte a tre casi esemplificativi:

- superfici curve strutturali, le volte,
- deformazioni di superfici piane, spancamenti delle murature,
- le superfici scultoree, il modellato di dettaglio,

Le esperienze confrontate in questo studio descrivono architetture appartenenti a scale dimensionali diverse e con caratteristiche formali complesse; rilievi per finalità diverse, eseguiti nell'ambito di convenzioni con strutture esterne, che hanno evidenziato problematiche specifiche, risolte attraverso l'integrazione tecnica e strumentale. In questo senso, le esperienze svolte nel corso del triennio di dottorato ritenute più significative, sono state:

- Il rilievo delle volte della chiesa dell'abbazia di Monteoliveto¹, eseguito per il dimensionamento e la verifica dei movimenti strutturali dell'architettura.

- Il rilievo di piazza Garibaldi e piazza del Duomo in Parma², eseguito per la verifica delle posizioni relative delle architetture, per lo studio metrologico e geometrico delle matrici progettuali. In questa occasione, l'"*entasi del muro*" osservata in numerosi edifici di epoca medievale del centro cittadino ha indotto ad eseguire un'ulteriore indagine, in corrispondenza dello spigolo sud-est del Vescovado, al fine di comprendere la geometria (le ragioni) della strombatura curva di queste pareti.

-I rilievi eseguiti per la catalogazione e la schedatura del cimitero monumentale di Parma³. L'evidente difficoltà riscontrata nel rilevamento delle superfici plastiche (scultoree) delle microarchitetture presenti all'interno del complesso cimiteriale, ha suggerito, inoltre, la realizzazione del rilievo continuo del famedio di Cleofonte Campanini, al fine di verificare le potenzialità di questa metodologia.

Ad eccezione del laser scanner, i rilievi strumentali sono stati condotti utilizzando gli strumenti a disposizione, di proprietà del Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura dell'Università degli Studi di Parma⁴.

Le esperienze di rilievo sono state descritte riportando l'impostazione metodologica adottata in fase operativa: rilevamento, restituzione, lettura; sulla base del confronto di questi parametri sono state poi tratte le osservazioni conclusive sull'uso e sull'efficacia degli strumenti verificati.

Note

¹ “Rilievi, prove in situ, analisi strutturale e collaborazione nella redazione del progetto di consolidamento delle strutture di copertura della Chiesa dell'abbazia di Monte Oliveto Maggiore (SI)”

Convenzione tra il Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura e la Soprintendenza ai Beni Architettonici della Provincia di Siena (2003).

² Commissionato dalla Prof. Marina Areli, docente di storia dell'architettura medievale della Georgetown University di Washington DC. (2005).

³ “Rilievo per la catalogazione e schedatura delle parti monumentali della Villetta”, Convenzione tra il Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura e l'Amministrazione Comunale di Parma (2005).

⁴ - Stazione totale TRIMBLE tipo TRM 5605 DR 200+.

-livello ottico TECNIX tipo AB 20

-squadro ottico autolivellante TECNIX Pentalevel

-misuratori laser tipo Disto Classic leika

-fotocamera digitale OLIMPUS C -2000 z

PARTE I

TRADIZIONE E INNOVAZIONE NEL RILIEVO DELL'ARCHITETTURA

Capitolo 1

La cultura e la tecnica

*“la tecnica non è semplicemente l'insieme delle macchine ed è comunque relazionata ad un pensiero, ad un sapere scientifico”...
‘Disumana’, la tecnica, non è”
(Emanuele Severino)*

Le riflessioni di Emanuele Severino, in occasione di una conferenza tenuta il 18 marzo 2004 presso la Facoltà di Architettura dell'Università degli Studi di Parma, sottolineano l'importanza del pensiero, della “cultura”, che sottende qualsiasi operazione tecnica¹. “Ci sono competenze scientifiche intorno a campi specifici di oggetti; esistono interessi specifici per problemi specifici, quali i problemi di cui si occupano le scienze e le tecniche dell'ingegneria, dell'architettura”. Queste parole esemplificano la correlazione che esiste, nella civiltà contemporanea, tra scienza, cultura e tecnologia e dimostra come l'esperienza, anche nell'ambito del rilievo dell'architettura, e il sapere del rilevamento, non possano essere completamente sostituiti da strumenti e tecnologie per quanto utili e sofisticati essi siano.

Il rilievo dell'architettura presuppone l'attuazione di operazioni basate su metodologie e strumenti differenti, scelti in funzione delle dimensioni del manufatto, delle sue caratteristiche formali e della finalità per cui il rilievo viene eseguito.

La scala dell'architettura, infatti, comprende oggetti di dimensioni diverse: dalla macroarchitettura degli spazi urbani, concepiti come unitari (piazze), e dei grandi complessi, sino alle microarchitetture di manufatti più piccoli (edicole, fontane) e di elementi architettonici finiti (portali, altari).

Il rilevatore, in architettura, ha la possibilità di avvalersi di due metodologie di misurazione: il metodo diretto, con l'utilizzo di semplici strumenti di misurazione lineare², che presuppongono la raggiungibilità del punto, e quello indiretto, supportato dall'uso di strumenti più sofisticati, come quelli usati anche dai topografi, capaci di leggere angoli e misurare distanze³ di punti non raggiungibili dall'operatore.

Ogni metodologia presenta peculiarità e ambiti di applicabilità specifici, tali da non consentire l'impiego indifferenziato in qualsiasi operazioni di rilevamento⁴.

Il rilievo diretto è quello più comunemente utilizzato dagli architetti e per gli interni dell'architettura, mentre quello indiretto, prevalentemente utilizzato in collaborazione

con i topografi, si limita al rilevamento di poligonali di riferimento, di andamenti planimetrici di grande estensione o di elementi inaccessibili.

Il ricorso a strumenti e tecniche di misurazione indiretta nel rilievo dell'architettura assume oggi un'importanza rilevante, conseguentemente allo sviluppo di strumenti sempre più affini alle necessità dell'architetto, che funzionando per irraggiamento permettono di riferire la posizione dei punti nello spazio direttamente al rilevatore.

In questo senso, il rilievo dell'architettura ha oggi la possibilità di avvalersi di strumenti per la misurazione indiretta a raggio laser basati sul principio della riflettanza dei materiali (stazione totale, laser scanner, distanziometro e squadra laser), in grado di agevolare l'esecuzione anche da parte di operatori non specializzati in topografia, come gli architetti rilevatori.

A questo proposito, gli elementi irraggiungibili, che sono sempre presenti in un'architettura, mentre con il rilievo diretto possono essere determinati in modo approssimativo rispetto ad altri elementi noti, con gli strumenti laser possono essere individuati precisamente, rendendo più "diretto" il rapporto tra architettura e rilevatore, anche in quello che normalmente viene definito "rilievo indiretto"

Infatti, mentre con il rilievo per intersezione in avanti dei primi teodoliti la posizione del punto veniva ricostruita da due misurazioni angolari, con gli strumenti a riflessione il punto può essere individuato con un'unica misurazione, con un'operazione nella quale l'occhio del rilevatore tende a sostituire la mano dell'operatore che opera con il tradizionale metodo diretto.

Nel rilevamento dell'architettura (a qualunque scala), le maggiori difficoltà hanno attinenza con la misurazione di punti inaccessibili e, in particolare, delle superfici curve. La difficoltà di accedere direttamente a tutti i punti che servono alla restituzione del modello rilevato (non solo per le dimensioni degli oggetti) e la complessità geometrica di molti oggetti, anche piccoli, richiedono, infatti, l'utilizzo di strumenti specifici con tecniche di rilevamento di tipo indiretto. In particolare, il rilievo di architetture di grandi dimensioni o di elementi posti ad altezze elevate necessitano di strumenti mediante i quali non si opera a diretto contatto dell'oggetto da rilevare, ma la cui lettura delle distanze e degli angoli avviene tramite il supporto di relazioni geometriche e matematiche: strumenti basati sulla riflessione di onde elettromagnetiche, quali distanziometro laser, stazione totale e laser scanner, per i quali è sufficiente la raggiungibilità visiva del punto da misurare. La stessa esigenza si evidenzia nel rilievo di superfici non piane in architetture particolarmente complesse dal punto di vista geometrico e di oggetti dotati di apparati decorativi caratterizzati da forme plastiche e superfici irregolari, quali quelli di natura scultorea. Quest'ultimi, infatti, presentano evidenti problemi sia in fase di acquisizione, per la difficoltà di individuare punti notevoli misurabili, sia in fase di rappresentazione. In architettura, dunque, difficilmente il rilievo può essere solo diretto o solo indiretto e sempre più spesso si rivela indispensabile l'integrazione tra i due metodi: quello che oggi si usa definire rilievo integrato. Sia il metodo diretto che quello indiretto sono stati utilizzati, fin dall'antichità, per la misurazione dei terreni, per il tracciamento degli edifici e per la verifica della corrispondenza progetto-costruzione, sulla base dei principi geometrici della trigonometria⁵. Nell'ambito del rilievo dell'architettura, tuttavia, il ricorso a metodologie strumentali è stato però limitato dalla necessità di operare per "intersezione

in avanti”, sistema preciso ed efficace per determinare la posizione di pochi punti di appoggio, ma poco pratico per eseguire rilievi completi di architetture complesse.

Le ricerche condotte nel triennio del dottorato nell’ambito del rilievo hanno inoltre evidenziato la relazione che intercorre tra agrimensura⁶, rilievo territoriale, urbano, architettonico e la costruzione stessa dell’architettura.

Rilievo e costruzione hanno, infatti, solitamente e come premessa un’operazione di tipo topografico eseguita con gli stessi strumenti per la misurazione indiretta: nella costruzione di un’architettura, nel tracciamento del perimetro dell’edificio, e nel rilievo. Nella pratica corrente, il rilievo dell’architettura ha dunque adottato gli strumenti utilizzati abitualmente dal topografo e dal costruttore, oggi come nell’antichità.

Significativo è, a questo proposito, il progetto di rilievo urbano di Roma suggerito da Leon Battista Alberti nel XV sec. mediante intersezione in avanti, procedimento tipico della topografia e trattato in maniera più approfondita nel capitolo successivo.

Esiste, tuttavia, una rilevante differenza culturale tra il topografo e l’architetto, che si manifesta in una diversa modalità di approccio al rilievo: come il topografo esige la massima precisione possibile sulla misura, l’architetto concentra il suo interesse prevalentemente nella individuazione di elementi discreti su cui prelevare le misure stesse.

Per l’architetto, infatti, ogni punto non è un’astrazione matematica, ma un elemento concreto con un suo valore specifico, che è legato all’architettura e alla materia di cui è costituita. Per questo motivo, nel rilievo di architettura, si preferisce parlare di correttezza di misura, anziché di precisione. La qualità della misurazione dipenderà, dunque, dal materiale costruttivo (superficie intonacata o al grezzo), dall’eventuale suo deterioramento, ma soprattutto dalla scelta appropriata dei punti da misurare, ovvero dalla discretizzazione del progetto di rilievo.

Per questo, il rilievo architettonico richiede la presenza di un operatore con una buona conoscenza dell’architettura, in grado di comprendere le caratteristiche e gli elementi più significativi da selezionare già in sede di progetto di rilevamento.

L’esecuzione del rilievo strumentale direttamente da parte dell’architetto comporta, inoltre, una agevolazione nelle operazioni di restituzione grafica: la conoscenza delle caratteristiche dei punti rilevati e la consapevolezza del loro effettivo “valore”, che solo il rilevatore può avere, rende, infatti, la restituzione più immediata rispetto all’elaborazione di dati acquisiti da altri.

La scelta dei punti significativi è fondamentale, sia nel procedimento diretto sia in quello indiretto. Nel rilievo indiretto, infatti, anche il distanziometro e la stazione totale eseguono la misurazione di punti definiti e selezionati preventivamente dal rilevatore.

Lo sviluppo delle recenti tecnologie tuttavia sta notevolmente influenzando i procedimenti di misurazione del rilievo, sia diretto sia indiretto dell’architettura.

In questo senso, il pratico distanziometro laser ha sostituito il tradizionale metro e filo a piombo, anche nella misurazione di punti accessibili, e l’introduzione del laser scanner ha radicalmente modificato gli stessi procedimenti operativi.

Nonostante le strette analogie in termini di funzionamento con la stazione totale (strumenti a raggio laser), infatti, il laser scanner implica una misurazione automatizzata

a intervalli angolari preimpostati che annulla la discretizzazione e la possibilità di rilevare i punti significativi definiti dal rilevatore.

La misurazione automatizzata del laser scanner, quindi, comporta un approccio operativo sostanzialmente diverso rispetto alla concezione tradizionale del rilievo di architettura, da sempre impostato sulla misurazione e restituzione di sezioni piane definite, e utilizzato sia nel rilievo diretto sia in quello indiretto mediante stazione totale.

Il laser scanner tuttavia, per le sue modalità operative e per l'altissima densità di informazioni acquisite, sembra rivelarsi particolarmente utile nel rilevamento delle superfici curve.

La possibilità di trasferire i dati acquisiti dalla stazione totale e dal laser scanner direttamente nei supporti informatici tridimensionali e in formato vettoriale, trova un riscontro ottimale nella restituzione grafica digitale, nella quale ai disegni bidimensionali si sostituiscono sempre più modelli tridimensionali e *data base* di tipo grafico. Per questo, si rivela fondamentale l'individuazione di forme di restituzione e di rappresentazione grafica adeguate alla lettura dei manufatti nelle diverse scale di rappresentazione (riduzione), indipendentemente dalla possibilità di modificare la dimensione di stampa.

Nello specifico, la scala di rappresentazione deve essere individuata in modo tale da rappresentare e leggere agevolmente tutte le informazioni ritenute opportune in base alla finalità del rilievo ed in funzione delle caratteristiche formali del manufatto.

Nella restituzione grafica di un rilievo, infatti, risulta necessario mantenere un giusto rapporto tra presenza e visibilità di dettagli: un'eccessiva ricchezza di particolari renderebbe l'insieme poco comprensibile, e al contrario un'eccessiva schematizzazione toglierebbe carattere alla figurazione.

In questo senso, si rivela indispensabile da parte dell'architetto rilevatore la comprensione dei principi di funzionamento, delle potenzialità e degli ambiti ottimali di applicazione dei principali strumenti indiretti a raggio laser (stazione totale e laser scanner) in fase di misurazione, ma anche delle forme più efficaci di rappresentazione in fase di restituzione.

L'utilizzo degli strumenti indiretti nel rilievo di architettura, sia per l'individuazione di poligoni d'appoggio sia per la misurazione dei punti significativi, non ha come conseguenza, in ogni caso, né il superamento dei metodi del rilievo tradizionale diretto né la sostituzione del ruolo del topografo, le cui competenze rimangono inalterate e ben definite, rivolgendosi al rilievo in ambito urbano e territoriale, nei quali la georeferenziazione si rivela operazione imprescindibile.

Note

¹ Cfr. Severino Emanuele, *Scuola e tecnica*, Monte Università Parma Editore, 2005, pag.47.

² Il metro o doppio metro a stecche ripiegabili, il doppio metro a nastro di acciaio arrotolabile in custodia, il triplometro (2 elementi da ml 1,50), il decametro o doppio decametro a nastro con scatola raccogliitrice (tavella), ma anche il filo a piombo (per verificare le altezze), il livello a bolla (per controllare le orizzontali), il calibro per cornici, la squadra da muratore, la bussola e lo squadro a traguardo e paline (per verificare gli allineamenti).

³ tacheometro, teodolite, distanziometro, livelli, squadro laser

⁴ Cfr. Docci Mario-Maestri Diego, *Il rilevamento architettonico, storia, metodi e disegno*, Laterza, 1989

⁵ Il termine trigonometria significa letteralmente “misura di trigoni”, cioè di triangoli. Dalla trigonometria trova fondamento la misurazione per trilaterazione e per intersezione in avanti.

⁶ Per agrimensura si intende l’arte di misurare e suddividere i territori.

Capitolo 2

Gli strumenti e le tecniche: note storiche

Gli strumenti e le tecniche per la misurazione del territorio e dell'architettura hanno avuto origine e sviluppo da un'attenta osservazione dei fenomeni naturali e sono stati ispirati, fin dall'inizio, da un implicito concetto di confronto fra grandezze omogenee comparabili¹.

La necessità di delimitare i confini territoriali ha indotto all'introduzione del concetto di lunghezza quale traduzione in quantità di una qualità, ma anche del concetto di verticalità (materializzato con il filo a piombo) dedotto dal fenomeno della caduta dei gravi e di orizzontalità dal livello in quiete dell'acqua.

Dalle ombre disegnate sul terreno sono stati poi ricavati i primi concetti di proporzionalità, dai quali hanno avuto origine le metodologie di misurazione indiretta per la topografia, basate sul principio dei triangoli simili.

La prassi operativa di misurazione topografica attuale, indipendentemente dal progresso scientifico e tecnologico intervenuto, si basa ancora oggi su queste semplici considerazioni. Con l'accrescersi delle conoscenze scientifiche e tecnologiche, infatti, la precisione degli strumenti è aumentata, ma i principi elementari teorici che regolano il controllo geometrico e su cui si basa il loro funzionamento sono rimasti sostanzialmente gli stessi. Ciò trova conferma principalmente nella presenza, all'interno dei più moderni e sofisticati strumenti topografici, degli strumenti accessori "elementari" dell'antichità (filo a piombo, livella torica, squadra, ecc) anche se incorporati unicamente come accessori di verifica.

La precisione degli attuali strumenti di misurazione, tuttavia, non deve indurre a ritenere di modesta qualità quelli più antichi; l'uso attento degli strumenti dell'antichità, infatti,



fig.1 Strumenti del controllo geometrico della costruzione: archipendolo, squadra, compasso.

L'archipendolo era costituito da una squadra di legno a forma di triangolo isoscele con fissato, nel vertice, un filo a piombo. Questo consentiva di verificare l'orizzontalità dei piani nel momento in cui il filo risultava bisecante. La squadra e il compasso consentivano la misura degli angoli e la verifica dell'ortogonalità, mentre la corda annodata consentiva di definire il triangolo magico 3-4-5.

permetteva un controllo sufficiente alla necessità della costruzione e proporzionato alle esigenze per il quale erano utilizzati: verifica dimensionale del territorio, realizzazione di un impianto urbano o architettonico.

Gli strumenti del rilevamento topografico sono stati utilizzati fin dalle origini anche in architettura sia nel rilievo del costruito sia nelle operazioni di controllo in fase esecutiva e progettuale con il tracciamento perimetrale dell'edificio, urbano o architettonico, nel quale la misurazione indiretta risultava necessaria. Approfondire la conoscenza degli strumenti e delle tecniche di misurazione utilizzati nel passato consente, dunque, di comprendere a fondo il funzionamento di quelli più moderni e di assicurare, in un'operazione di rilevamento, una lettura maggiormente attendibile delle misure "progettuali", essendo le stesse correlate agli strumenti di tracciamento/misurazione dell'epoca in cui l'opera è stata realizzata.

2.1 Antichità

Il rilevamento fece la sua apparizione, quando l'uomo si pose il problema di delimitare le singole proprietà e di rappresentare la morfologia del terreno (topografia), in dimensioni ridotte, su di una superficie piana, per soddisfare esigenze a carattere militare, fiscale, ma anche progettuale.

L'agrimensura, intesa come arte di misurare e dividere i terreni, si suppone sia nata in Egitto, paese in cui l'intera economia era subordinata alle piene del Nilo, che periodicamente rendevano incerti i confini di proprietà dei terreni soggetti a tassazione.

Per tale motivo, periodicamente, si imponeva la ripartizione dei terreni coltivabili da parte dei geometri dell'impero.

Lo strumentario del quale si servivano gli Egiziani, ampiamente documentato dai ritrovamenti in alcune tombe del 1100 ac, era costituito da filo a piombo, archipendolo, squadra, compasso, corda annodata e groma (figg.1-2).

Quest'ultima, in particolare, consentiva di determinare allineamenti ortogonali e

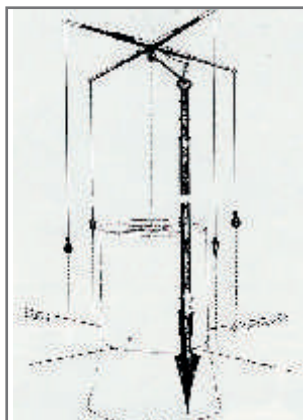


fig.2 groma

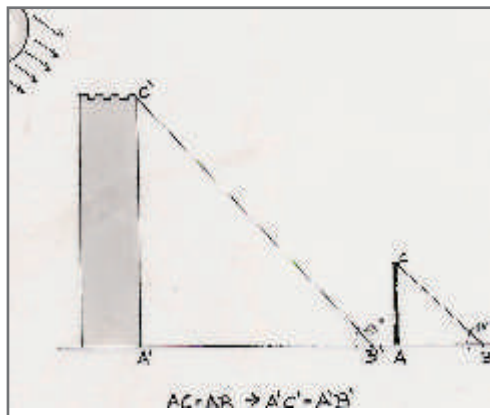


fig.3 Taletta: metodo della verga

quindi la misurazione per coordinate cartesiane attraverso il traguardo delle due barre incrociate di cui era costituita (appendice A).

All'attività degli urbanisti Greci, nonostante le scarse testimonianze scritte², viene attribuito il più significativo contributo all'evoluzione degli strumenti e delle tecniche di misurazione, alcuni dei quali utilizzati anche in astronomia e nella navigazione³. Questo grazie l'introduzione dei principi geometrici e matematici che si trovano alla base dei procedimenti topografici indiretti: principi, fondati sulla geometria piana, e individuati nei teoremi dei matematici Talete (VII sec ac), Pitagora (VI sec ac), Ipparco (IIsec ac) ecc..

Sul teorema dei triangoli rettangoli e su quello dei triangoli simili trova fondamento l'utilizzo di strumenti quali la verga (o gnomone), il bastone di Giacobbe e il quadrato geometrico, mentre dall'introduzione della trigonometria ha origine l'utilizzo della diottra da cui deriva, in tempi successivi, il moderno teodolite⁴.

Talete di Mileto, nato intorno al 625 ac, ebbe un ruolo fondamentale nella cultura matematica dell'epoca. A lui viene attribuito il metodo della verga (fig.3) (orologio solare già noto ai babilonesi), basato sull'osservazione delle ombre e sul rapporto proporzionale dei triangoli simili e per la determinazione dell'altezza degli edifici.

La storia riferisce che Talete riuscì a stabilire l'altezza della piramide di Cheope fissando verticalmente un bastone nella sabbia; una volta accertata l'ombra della verga della stessa lunghezza del bastone, Talete, fu in grado di misurare l'ombra proiettata della piramide e dunque la sua altezza⁵.

Talete riuscì, inoltre, a generalizzare il problema determinando l'altezza della piramide indipendentemente dall'inclinazione dei raggi solari e a determinare la distanza di una nave dalla costa stando sulla sommità di una torre (appendice A).

La diottra, derivata dalla groma, costituisce uno degli strumenti di misurazione più importanti dell'antichità: attribuita dalla tradizione ad Ipparco di Nicea (II sec ac) e descritta sia da Erone d'Alessandria (in la *Diottra*, I sec dc) sia da Pappo d'Alessandria (nel *Commento al quinto libro dell'Almagesto*, IV sec dc).

La diottra (fig.4) descritta da Pappo d'Alessandria, per la misurazione dei diametri apparenti del sole e della luna, era costituita da una guida scanalata lunga quattro cubiti (circa 2 metri) con due pinnule rettangolari montate all'estremità di cui una scorrevole e una con un piccolo foro d'osservazione. Puntato lo strumento verso il sole, si spostava avanti e indietro la pinnula mobile finché il disco risultava completamente coperto: il rapporto fra il diametro della pinnula mobile e la sua distanza dalla pinnula fissa

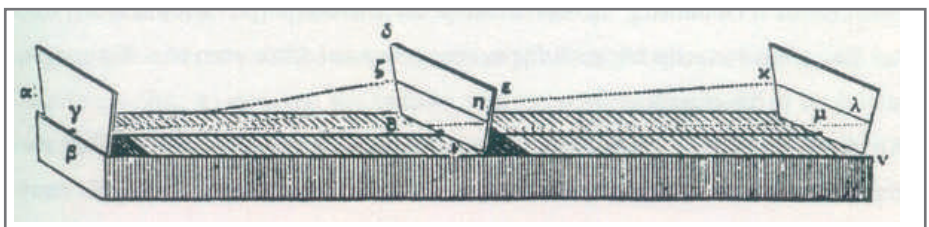


fig.4 diottra descritta da Erone di Alessandria (I sec dc)

permetteva di calcolare l'angolo sotteso dal corpo celeste.

Erone di Alessandria riferisce invece uno strumento più complesso, di forma circolare (fig.5), adatto per le misurazioni sia astronomiche che terrestri: simile al teodolite, viene descritto con un'alidada a rotazione orizzontale per determinare sia allineamenti rettilinei sia misurazioni angolari.

La misurazione angolare ottenuta con la dioptra consentiva in un secondo momento, mediante i principi trigonometrici, la misurazione indiretta per intersezione in avanti (appendice A). Dalla dioptra si svilupparono altri strumenti per la misurazione degli angoli quali l'astrolabio, il quadrante, il visorio e infine i teodoliti.

Il rilevamento assunse una notevole importanza anche tra i Romani presso i quali si costituì un corpo di funzionari pubblici addetti alla pianificazione territoriale degli insediamenti, ovvero alla centuriazione. Gli agrimensori si dividevano in due categorie: la prima costituita dai teorici, da coloro che si occupavano del lato scientifico della materia, la seconda invece dagli esecutivi, chiamati prima mensores e poi gromatici per la strumentazione utilizzata nella centuriazione.

La strumentazione dei mensores romani comprendeva diversi apparecchi accessori per le operazioni di tracciamento e misurazione del terreno: la dioptra, la groma (già note ai Greci), il chorobates, la lychnia e l'odometro una ruota graduata che consentiva di misurare le distanze attraverso il numero dei giri effettuati in una percorrenza.

La lychnia (fig.6), equiparabile ad una dioptra con traguardi graduati, consentiva di determinare altezze di torri e allineamenti mediante la similitudine di triangoli rettangoli; mentre il chorobates (fig.7) simile ad una livella di precisione, permetteva di verificare l'orizzontalità di oggetti o altri strumenti.

Nell'VIII libro, Vitruvio⁶ descrive il chorobates come un regolo di legno lungo 20 piedi, con un canaletto lungo 5 piedi nella parte superiore. La perfetta orizzontalità del regolo, e quindi del piano da esso individuato, si controllava riempiendo il canaletto di acqua

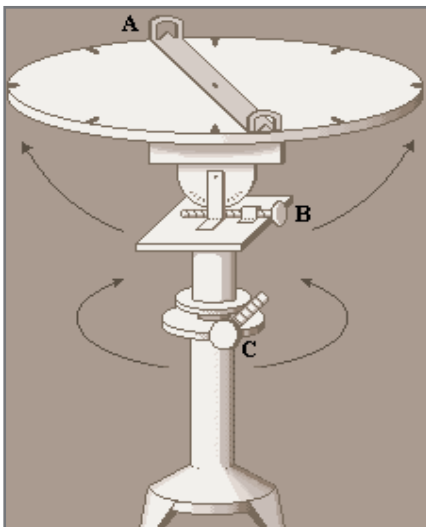


fig.5 dioptra descritta da Pappo di Alessandria (IV sec ac)

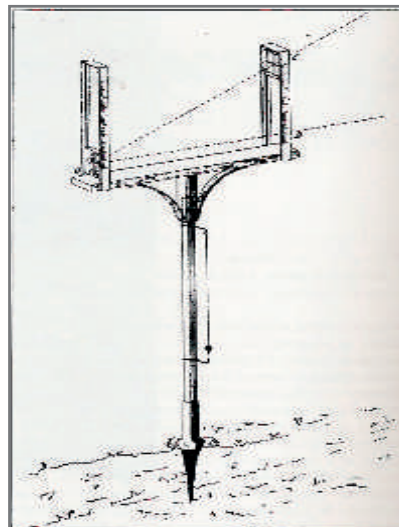


fig.6 lychnia

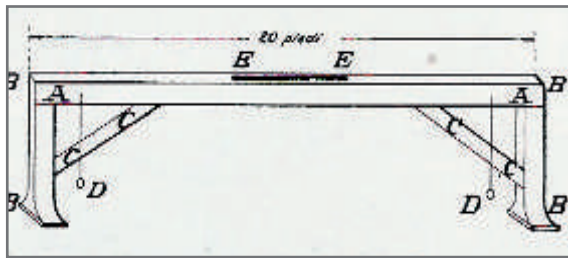


fig.7 chorobates

e disponendo lo strumento in modo tale che i bordi della vaschetta risultassero tutti egualmente sfiorati.

La Forma Urbis, la pianta marmorea di Roma costituisce una prova dell'applicazione di questa strumentazione nella disciplina del rilievo urbano (fig.8).

La pianta, scolpita nel III sec dc e ritrovata nel 1562, è il risultato di un rilievo topografico di buona precisione eseguito, con ogni probabilità, mediante triangolazione con groma, diottra (per la misurazione degli angoli), catene (per i lati) e chorobates⁷.

Reperti archeologici d'età romana riferiscono, inoltre, della groma e del chorobates quali strumenti necessari per il tracciamento di un impianto urbano o architettonico e dunque per l'operazione inversa al rilievo topografico: la centuriazione, testimonianza più significativa delle capacità agrimensorie dei romani.

2.2 Età di mezzo

Con la fine dell'espansione dell'Impero Romano e della colonizzazione delle terre occupate, i compiti degli agrimensori persero importanza limitandosi alla definizione di confini, alla misurazione d'appezzamenti di terreno e alla ripartizione dei territori sconvolti da piene e inondazioni.

L'agrimensura rimase così in silenzio sino al decimo secolo, ovvero sino a quando l'espansione del mondo islamico e il recupero dell'antichità greca, contribuirono alla diffusione dello strumento simbolo del sapere scientifico medievale: l'astrolabio.

Secondo le fonti letterarie, l'astrolabio, attribuito ad Ipparco di Nicea (II sec ac)⁸, era infatti già noto sia ad Apollonio che ad Archimede (220 a.C.); gli astronomi arabi non fecero altro che perfezionarlo, utilizzandolo per la misurazione sia in ambito astronomico sia in ambito terrestre.

L'astrolabio, costituito da molteplici dischi (con tracciati di riferimento terrestri, cerchio dell'orizzonte, linee di direzione dette azimut ecc) e da quattro quadranti graduati (ciascuno da 0° a 90°) (fig.9), permetteva, per mezzo di un'alidada⁹ di compiere le misure angolari orizzontali e verticali dalle quali ricavare le altezze degli astri, in ambito astronomico, o l'altezza di edifici o luoghi inaccessibili in ambito terrestre (appendice A).

Dall'astrolabio derivano il sestante, utilizzato prevalentemente nella navigazione, e il quadrante: diversi nella forma, ma analoghi nel funzionamento.

Il quadrante aveva la forma di un quarto di cerchio graduato di 90°, con un filo a piombo legato nel vertice (fig.10). Lungo la circonferenza erano collocati archi

concentrici contenenti la scala dei gradi, nella parte centrale erano tracciate le linee delle ore e il quadrato delle ombre, mentre lungo i lati dritti erano posizionati i traguardi per le misurazioni. Questo consentiva una corretta lettura dell'inclinazione della veduta dalla quale, attraverso i rapporti di similitudine tra triangoli, era possibile ricavare la misurazione indiretta delle distanze.

Questi strumenti (astrolabio, quadrante, ecc.), potevano risultare molto utili sia nella costruzione di un'architettura, per verificare l'impostazione rispetto a direzioni prestabilite sia nella misurazione di oggetti esistenti, per controllare l'allineamento delle parti strutturali¹⁰.

Quest'ultimo aspetto appare particolarmente significativo nelle numerose testimonianze di crolli e lesioni che interessarono i grandi edifici gotici, dovuti a carichi elevati o ad alterazioni dell'appiombamento degli elementi strutturali.

Se l'andamento di un muro era facilmente controllabile con un filo a piombo, quello di guglie e pinnacoli richiedeva necessariamente l'utilizzo di strumenti per la misurazione indiretta: per l'altezza a cui arrivavano e per l'arretramento che di norma si evidenziava rispetto ai fronti principali.

In questo senso gli architetti rilevatori venivano richiesti, in qualità di esperti, per attività di consulenza. Testimonianze di queste procedure, oltreché dei metodi di rilevamento di epoca medievale, si rintracciano nel *Taccuino*¹¹ di Villard de Honnecourt del XIII sec. all'interno del quale rinveniamo rilievi di absidi con volte, rilievi di dettagli, nozioni di geometria e trigonometria pratica, ma anche suggerimenti per il rilievo indiretto dell'architettura e del territorio.

Nella tavola 40 (fol.20 V), ad esempio, viene illustrato il procedimento per calcolare l'altezza di una torre mediante il già noto metodo dei triangoli rettangoli simili (fig.11), mentre nella tavola 41 (fol.21) il metodo (della pera) per individuare la proiezione a terra di un qualsiasi punto visibile, ma inaccessibile (fig.12).



fig.8 Forma urbis,
pianta marmorea di Roma
(III sec dc)

2.3 Età moderna (rinascenza, barocco, neoclassicismo)

Gli strumenti ideati in età moderna ricorrono ancora una volta a soluzioni matematiche già note quali: i rapporti di similitudine (triangoli simili) e la trigonometria.

Sulla base dei principi trigonometrici, Leon Battista Alberti propose il procedimento dell'intersezione in avanti (descritto in *Ludi Matematici* nel 1440) in applicazione al rilevamento della città di Roma (descritto in *Descriptio Urbis*)¹².

Il procedimento dell'Alberti prevedeva l'utilizzo di un cerchio graduato dotato di bussola che consentiva di utilizzare come riferimento fisso il nord e di determinare la posizione di un oggetto attraverso l'intersezione di misure angolari ottenute da due stazioni diverse.

Tale procedimento costituisce il primo esempio, pervenuto, d'utilizzo di intersezione in avanti per il rilevamento urbano (appendice A).

Il metodo considerava il rilevamento di tutti i punti visibili a partire da una base nota e misurata avente gli estremi posti sulla sommità di due torri.

Il rilievo, limitato ai soli punti alti e visibili, si proponeva dunque come un rilievo di riferimento parziale, d'appoggio ad un successivo rilievo di dettaglio, delineando in tal modo il concetto di rilievo integrato.

La ricostruzione della mappa eseguita da Luigi Vagnetti, sulla base dei dati riportati nella *Descriptio Urbis*, sottolinea la validità del metodo dell'Alberti, nonostante un'impresione angolare (tra i 5-12°) rispetto alla cartografia attuale derivata con ogni probabilità dal riconoscimento dei quattro punti cardinali.

Strumento simile al quadrante (derivato dall'astrolabio) era il quadrato geometrico (fig.13), realizzato da Giorgio di Peurbach intorno al 1450, per la misurazione di distanze e altezze inaccessibili mediante il principio dei triangoli proporzionali.

Il quadrato geometrico era costituito da due lati suddivisi in sessanta parti ognuno e da una linda (o alidada) incernierata all'estremità del vertice non graduato.

Il procedimento di misurazione per intersezione in avanti venne sviluppato in seguito da Leonardo da Vinci (1452-1519)¹³.

Nel *Codice Atlantico* (foglio 662 v), Leonardo, illustra il metodo con il quale, nel 1502, realizzò la Pianta di Imola: l'edificato e il reticolo poligonale di riferimento (con i nodi

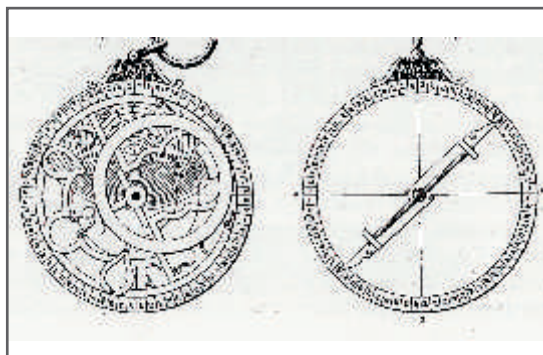


fig. 9 astrolabio

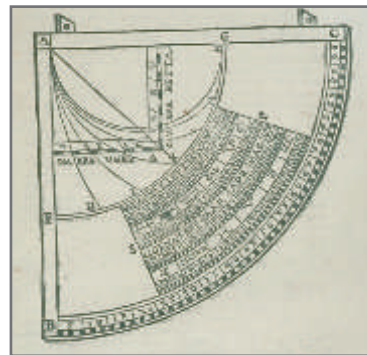


fig.10 quadrante

TRA STAZIONE TOTALE E LASER SCANNER

ambiti e soglie di applicazione degli strumenti a raggio laser nel rilievo indiretto dell'architettura storica

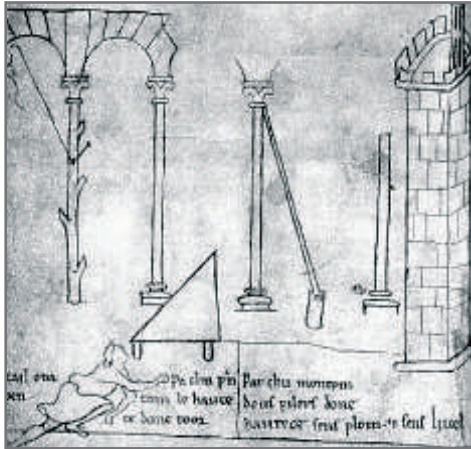


fig.11 Villard de Honnecourt: metodo per calcolare l'altezza di una torre mediante similitudine tra triangoli rettangoli

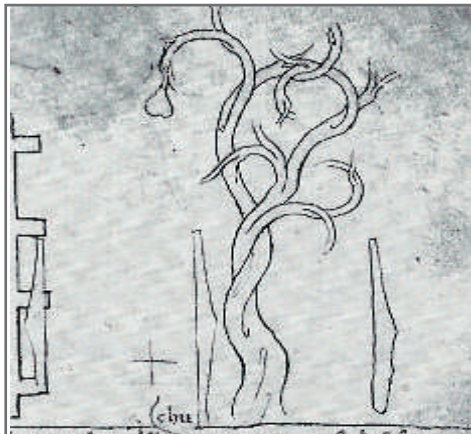


fig.12 Villard de Honnecourt: metodo per individuare la posizione a terra di un punto inaccessibile

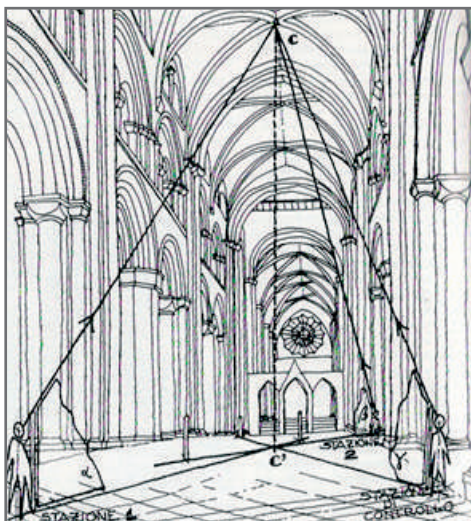
“si metta dunque un uovo sotto una pera , in modo che la pera cada sull'uovo”

Il disegno raffigura un albero da cui pende una pera, una croce (a terra, al posto dell'uovo) che probabilmente indica il punto dell'eventuale impatto della pera e tre mire.

La pera rappresenta il punto elevato inaccessibile di cui si vuole determinare la proiezione a terra (croce).

Il procedimento prevede il traguardo del punto inaccessibile (es. cervello di una volta) per mezzo della mira tenuta in posizione verticale.

La retta materializzata dallo strumento definisce un piano verticale: ripetendo l'operazione da un'altra stazione, la coppia dei piani individuerà una retta verticale passante per il punto inaccessibile nonché la proiezione a terra.



nell'intersezione degli assi stradali), venne eseguito per intersezione in avanti mediante la misurazione della diottra con bussola per gli angoli e dell'odometro per le distanze. Nei suoi scritti, Leonardo cita inoltre la squadra zoppa (fig.14), o squadra mobile, ideata da Ottavio Fabbri nel XVI sec. per la misura degli angoli acuti e ottusi e costituita da due regoli imperniati a modi compasso (appendice A).

Nel XVI sec Cosimo Bartoli (1503-72) scrisse *Del modo di misurare le distantie*, un'opera fondamentale per la comprensione degli strumenti e delle tecniche di rilevamento impiegate all'epoca.

Il trattato, suddiviso in sei libri, comprendeva anche la descrizione di vari strumenti per la misurazione indiretta delle distanze tra i quali il quadrante ed il baculo.

Il Baculo, Bacolo o balestriglia (fig.15) era costituito da una lunga asta graduata, un bastone lungo 6-8 spanne (ca. 135 cm) e da un'asticella trasversale detta martello, un traguardo regolabile della lunghezza di 1 spanna scorrevole lungo il bastone (appendice A). Il baculo, come altri strumenti di misurazione indiretta e come riscontrato in alcuni recenti studi, era utilizzato sia nelle operazioni di rilevamento sia nella costruzione di elementi urbani e architettonici¹⁴.

Il polimetrum (visorio) tuttavia fu il primo strumento in grado di misurare contemporaneamente sia angoli orizzontali che verticali (fig.16).

Costruito nel 1512 da Martin Waldsemuller, rappresenta il prototipo del moderno teodolite: una tavoletta quadrata contenente un cerchio goniometrico diviso in 360° (quattro settori di 90°) con inscritto il quadrato delle ombre.

Al centro del polimetrum ruotava la diottra: un'asticella verticale alla sommità della quale era imperniato un mezzo disco munito di scala dei gradi, quadrato delle ombre e traguardi, simile alla parte inferiore del dorso dell'astrolabio.

La rotazione della diottra individuava, sul cerchio orizzontale, gli angoli di posizione (azimutali) mentre i traguardi del mezzo disco verticale consentivano di misurare gli angoli zenitali e dunque calcolare le distanze dei luoghi da una sola stazione.

Ampio interesse per l'agrimensura fu suscitato, verso la metà del 1500, dalla disposizione di Carlo V che prevedeva la realizzazione del nuovo estimo censuario basato sul rilevamento catastale dei terreni. La disposizione investì enormemente sia

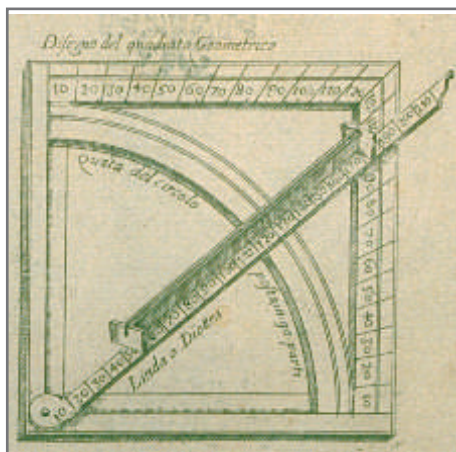


fig.13 quadrato geometrico

l'interesse dello stato e dei singoli proprietari sia l'interesse dei tecnici agrimensori per le problematiche di carattere scientifico e tecnico dal quale emerse con chiarezza che nel rilevamento dovevano essere impiegati strumenti maneggevoli e accuratamente costruiti.

Nascevano così strumenti sofisticati come il Teodolite e la Tavoletta pretoriana.

Il Teodolite (figg.17-18), la cui figura fu pubblicata per la prima volta da Thomas Digges (1571) e poi ripresa da Gallucci nel 1598, costituiva una variante del polimetro di cui replicava sostanzialmente la struttura ed incorporava, in aggiunta, una bussola per l'orientamento territoriale.

Il teodolite, il cui schema costruttivo è rimasto ad oggi immutato, rappresentò un effettivo progresso per l'epoca; esso infatti, una volta collimato il punto permetteva di leggere i valori degli angoli sia in altezza sia in direzione, con gran vantaggio per la precisione e la rapidità del lavoro.

La Tavoletta pretoriana, (fig.19) inventata da Preatorius (1537-1616) intorno al 1590, era costituita da una tavoletta quadrata di legno unita solidamente ad un'alidada mobile munita di bussola, riga e traguardi.

La caratteristica essenziale di un rilevamento effettuato per mezzo della tavoletta consisteva nel fatto che le direzioni dei vari punti visibili dal luogo di stazione erano tracciate direttamente sul foglio di carta fissato alla tavoletta, così come erano tragguardate.

Disegnare una mappa con la tavoletta pretoriana era molto semplice e non richiedeva cognizioni matematiche, tanto che consentì anche ai rilevatori inesperti di compiere importanti lavori topografici.

A partire dal 1600 lo sviluppo delle scienze favorì quelle nuove scoperte che in seguito permisero agli strumenti topografici di compiere il primo vero salto tecnologico, nella combinazione con il cannocchiale.

Nel 1610 Galileo a Venezia costruì il suo celebre cannocchiale, forse stimolato da informazioni secondo le quali a Middleburg l'ottico olandese Lippershey aveva fabbricato un cannocchiale che avvicinava e ingrandiva gli oggetti; il suo cannocchiale tuttavia non venne utilizzato negli strumenti topografici in quanto non consentiva l'uso del reticolo.

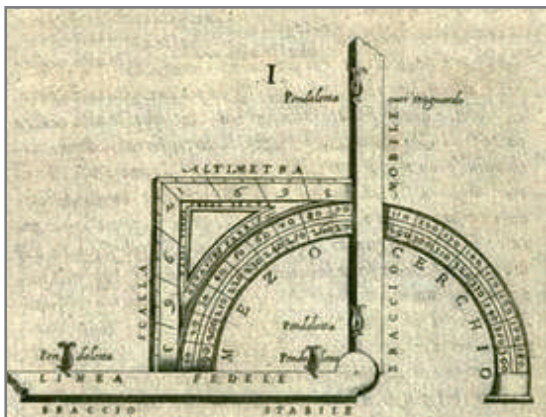


fig.14 squadra zoppa

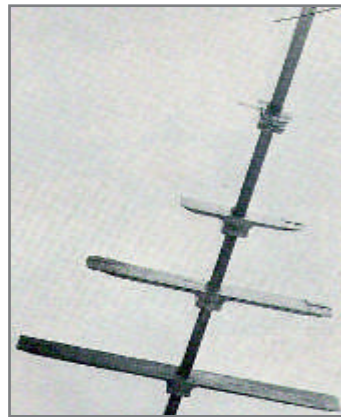


fig.15 baculo o balestriglia

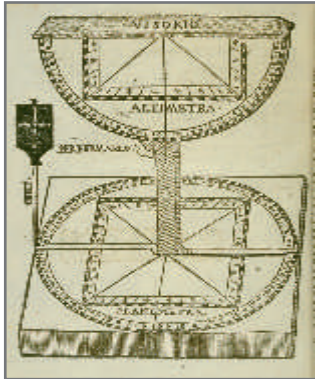


fig. 16 polimetrum di Martin Waldsemuller (XVI sec)

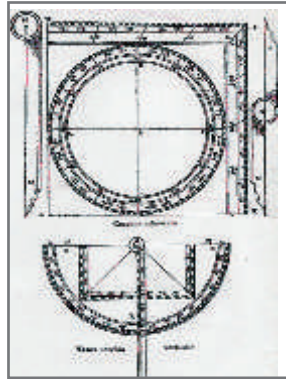


fig. 17 teodolite di Thomas Digges (XVI sec)



fig. 18 teodolite di Gallucci (XVI sec)

Nel 1666 Thevenot inventò la livella torica che permetteva di realizzare in modo comodo e accurato l'orizzontalità di rette e piani, ma nonostante queste fondamentali scoperte si dovette attendere il 1787 perché l'ottico inglese Ramsden (1735-1800) ci fornisse del primo teodolite moderno.

2.4 Età contemporanea (ottocento, secolo XX)

Il tacheometro moderno¹⁵ (ottico-meccanico) (fig.20) è uno strumento topografico che serve a misurare angoli di direzione e angoli zenitali.

La misurazione con il teodolite si effettua ponendo, in corrispondenza del punto da misurare, un'asta graduata detta stadia. La lettura della distanza, fondata sul principio dell'angolo parallattico, avviene determinando per via analitica-trigonometrica il triangolo di cui si conoscono un lato (misurato sulla stadia) e l'angolo opposto (angolo misurato dalla stazione collimando la stadia) (Appendice A).

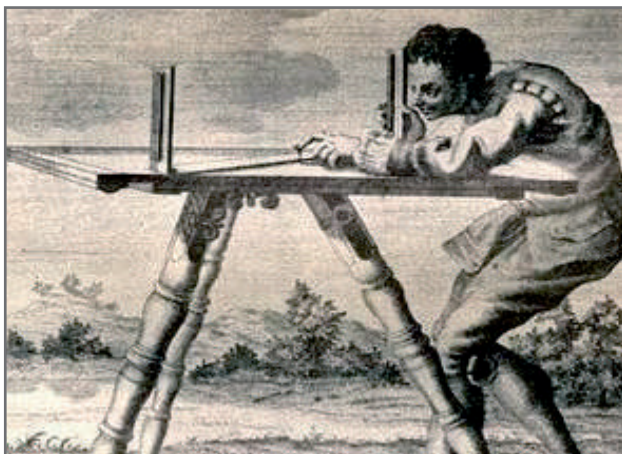
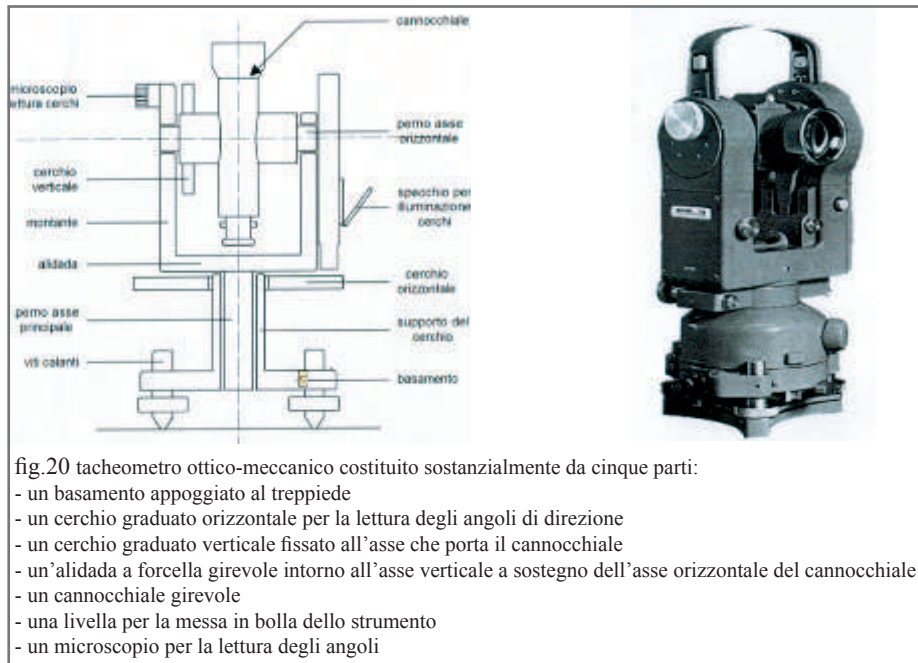


fig. 19 tavoletta pretoriana (XVI sec)

TRA STAZIONE TOTALE E LASER SCANNER

ambiti e soglie di applicazione degli strumenti a raggio laser nel rilievo indiretto dell'architettura storica



Nel rilievo topografico e architettonico attuale vengono sempre più frequentemente maggiormente impiegati teodoliti di tipo elettronico grazie ai quali la lettura degli angoli non avviene più per via ottica, attraverso microscopi che leggono la graduazione dei cerchi, ma rielaborata da un processore elettronico (fig.21).

Tra questi, particolare interesse per l'architetto riveste la stazione totale, un teodolite elettronico detto "strumento integrato" in quanto provvisto di un distanziometro con sorgente luminosa a raggio elettromagnetico¹⁶ in grado di consentire la lettura diretta della distanza e il trasferimento diretto dei dati alla memoria di un computer interfacciabile con i principali programmi di disegno vettoriale.

Note

¹ Cfr. Fondelli Mario, *Manuale di topografia*, editori Laterza, Roma 1990, pagg.1-3

² Negli scritti di Erone viene riportato lo schema ipotetico per il tracciamento della galleria (per l'acquedotto) di Samo, realizzato sfruttando il metodo dei triangoli simili.

³ Cfr. Candito Cristina, *Occhio, misura e rilievo*, Arti grafiche Lux, Genova, 2001, pag.92

⁴ Cfr. Candito Cristina, op.cit. in nota n°3, pag.94

⁵ Il triangolo avente per lati il bastone e la sua ombra è rettangolo e avendo due lati uguali ha anche due angoli uguali (45°) quindi isoscele.

⁶ Cfr. Bossalino Franca (a cura di), Marco Vitruvio Pollione. De Architectura, Edizioni Kappa, Roma 1990, pag.229

⁷ Cfr. Adam Jean Pierre, *L'arte di costruire presso i romani*, Longanesi, Milano 1984, pag 15

⁸ Cfr. Candito Cristina, op.cit. in nota n°3, pag.97

⁹ Alidada è un termine di origine araba che significa propriamente regolo dell'astrolabio. E' dotato di traguardi e di indici, serve per individuare la direzione di una visuale. È collegato con un cerchio graduato rispetto al quale è girevole in un piano parallelo. Nei moderni goniometri topografici (teodoliti, tacheometri, ecc.), l'alidada è la parte dello strumento che può ruotare intorno a un asse verticale. Solitamente è dotata di livelle, microscopi e noni che consentono la lettura su cerchi graduati, oltre a supporti per il cannocchiale o il collimatore. Nei goniografi l'alidada è sinonimo di diottra.

¹⁰ Cfr. Bianchini Carlo, *Tecniche medievali di rilevamento*, in Disegnare n°9/10, Gangemi, Roma 1994-95.

¹¹ Nel Taccuino sono raccolti, in 33 fogli, appunti relativi a nozioni di carpenteria, meccanica, tecniche costruttive edilizie, e di disegno architettonico con schizzi e rappresentazioni figurate dell'uomo, degli animali, delle piante nel

tentativo di racchiudere entro schemi geometrici la figura umana e di alcuni animali e fornire così utili suggerimenti ai tagliatori di pietre. Nel taccuino troviamo inoltre la descrizione del metodo per rapportare reciprocamente le dimensioni di un chiostro affinché la sua superficie totale sia il doppio di quella scoperta centrale; un sistema già noto ai greci e a Vitruvio consistente nell'applicazione della relazione corrente tra diagonale e lato del quadrato e applicato dagli architetti gotici in molti edifici.

¹² Cfr. Vagnetti Luigi, *L'architetto nella storia d'occidente*, edizioni CEDAM, Padova 1980, pag. 222

¹³ Cfr. Docci Mario-Maestri Diego, *Storia del rilevamento architettonico e urbano*, editori laterza, Roma-Bari 1993.

¹⁴ Un recente studio sulle mura trecentesche di Firenze ha infatti ammesso l'utilizzo del baculo per la costruzione degli angoli nel tracciamento dell'ultima cerchia del sistema difensivo, dopo un rigoroso progetto geometrico predisposto a tavolino. Cfr. Bartoli Maria Teresa, *Quadrante geometrico e bastone di Giacobbe: un'ipotesi indiziaria per le mura trecentesche*, in Disegnare n°22, Gangemi, 2001

¹⁵ Il teodolite e il tacheometro sono strumenti che servono per misurare gli angoli. Il primo differisce dal secondo solo per alcuni particolari e soprattutto per una maggiore precisione di misurazione. Il tacheometro viene utilizzato per la misurazione delle distanze definendo per via analitica l'altezza di un triangolo di cui si conoscono un lato e il lato opposto.

¹⁶ Le onde elettromagnetiche sono classificabili in base alla lunghezza d'onda (nm), frequenza (Hz), intensità.

Nello spettro elettromagnetico rientrano i raggi infrarossi, invisibili all'occhio umano.

La luce visibile ha lunghezza d'onda inferiore all'infrarosso e compresa tra 400 e 750 nm.

Il termine laser (light amplification by stimulated emission of radiation) indica uno strumento in grado di produrre onde elettromagnetiche sia nel campo del visibile che in quello dell'infrarosso.

Capitolo 3

Il rilievo indiretto: evoluzione e prospettive

3.1 Distanziometro e squadra laser: il metro e il filo a piombo

Il raggio elettromagnetico viene utilizzato nella maggior parte degli strumenti attuali per il rilevamento indiretto, sia con l'emissione di infrarossi sia di onde laser.

Il distanziometro laser (fig.1), tra questi, risulta particolarmente indicato per la misurazione indiretta delle distanze in quanto non richiedendo la presenza di un assistente, come invece accade nell'uso della tavella metrica per la messa in tensione del nastro, consente di gestire autonomamente il rilevamento, o comunque di ridurre il numero degli addetti e il tempo di lavoro.

Tra i vantaggi di questo strumento, oltre alla rapidità di esecuzione e alla riduzione di mano d'opera necessaria nelle operazioni di misurazione, si registra l'eliminazione assoluta dell'errore della catenaria conseguente la misurazione con nastro metrico.

Tali agevolazioni hanno condotto ad un utilizzo sempre più circoscritto del tradizionale metro ligneo, rendendo indiretto anche il rilevamento di elementi accessibili, misurati da sempre con metodiche dirette, e al conseguente allentamento del rapporto tra



fig.1 distanziometro laser LEICA
Portata da 0,2 a 200 m
Precisione ± 3 mm a 200 m



fig.2 squadra laser Pentalevel TECNIX
Portata 30 m
Precisione 0-0,4 mm/m

operatore-oggetto.

Un altro importante strumento utilizzato nella misurazione indiretta, anche se con funzione accessoria, è lo squadra a raggio laser (fig.2). L'impiego di questo accessorio risulta abbastanza intuitivo se considerato come la versione attuale dei precedenti squadri ottici (groma): i raggi laser visibili ed uscenti dal dispositivo (3-5) consentono, infatti, di determinare allineamenti e squadri, oltretutto verificare l'orizzontalità dei piani e la verticalità delle facciate.

3.2 Stazione totale: l'evoluzione tecnica

Il teodolite digitale (1970) (o stazione totale) ha la stessa struttura dei tradizionali teodoliti (base con cerchi orizzontali, livelle, alidada, viti calanti) integrata da un distanziometro a raggio elettromagnetico per l'invio e la ricezione del segnale di misura delle distanze e da un microprocessore interno che misura, elabora e memorizza i dati acquisiti (fig.3).

Le letture (distanza inclinata e ridotta, angoli verticali e orizzontali, ecc) vengono rappresentate numericamente sul quadrante a cristalli liquidi posto sullo strumento; se la stazione è dotata anche di un computer, possono essere fornite direttamente in campagna tutte quelle ulteriori informazioni atte alla rappresentazione plano-altimetrica del terreno (coordinate cartesiane riferite alla stazione).

Questo strumento rappresenta l'estrema evoluzione degli strumenti topografici del passato. Le versioni più recenti, capaci di rilevare anche distanze per riflessione, hanno favorito l'utilizzo della stazione totale soprattutto nell'ambito del rilievo di architettura.

Il rilevamento con stazione totale, come ogni altro tipo di rilievo, deve prevedere innanzitutto un progetto di rilievo e dunque un sopralluogo preliminare al fine di definire: i punti significativi da rilevare, il metodo di misurazione più idoneo, gli eventuali piani di sezione (orizzontali e verticali), nonché il metodo di rappresentazione più adeguato.

I punti caratteristici sono quelli che, oltre a rappresentare se stessi, determinano la posizione di un insieme di altri punti e che, di fatto, costituiscono un campione rappresentativo dell'oggetto da misurare.

La selezione dei punti significativi che si impone anche in un rilievo topografico necessita della formulazione di un'ipotesi di regolarità delle forme e pone il rilevatore davanti a scelte strategiche, tali per cui anche nel rilevamento strumentale è possibile parlare di "soggettività del rilievo".

L'architettura ha una sua geometria e una sua incertezza¹; un muro non è mai una superficie piana perfetta e, per tale motivo, deve essere regolarizzato e discretizzato, sia in fase di misurazione, in funzione della finalità per cui il rilievo viene eseguito, sia in fase di restituzione grafica, in funzione della scala di rappresentazione adottata.

La scala di rappresentazione, infatti, regolarizza geometricamente gli elementi di una qualsiasi architettura: uno spigolo deteriorato risulta perfettamente definito in scala 1:10, ma non in scala 1:200.

Sulla base dei punti significativi individuati, viene successivamente determinato il metodo di misurazione (per irraggiamento o da poligonale)² più adeguato e la posizione

della stazione centrale o dei vertici della eventuale rete d'inquadramento.

La rete d'inquadramento deve essere definita in modo tale da offrire una scelta di vertici sufficiente per la collimazione e misurazione di tutti i punti richiesti dal rilievo. Definito lo schema della rete si procede sul terreno alla materializzazione dei vertici con picchetti, chiodi, incisioni e alla realizzazione degli appositi schizzi (eidotipi) che dovranno riportare tutti quegli elementi e quelle indicazioni indispensabili al rilievo: i vertici della rete della poligonale (identificati con delle lettere) e la numerazione dei punti rilevati.

Posizionata la stazione si esegue la lettura dei vertici della poligonale e quindi di ogni punto caratteristico dell'oggetto da rilevare.

Acquisiti i dati rilevati, lo stesso software di scansione consente di trasformare le informazioni di ogni singolo punto in coordinate polari o cartesiane con origine nel centro dello strumento; informazioni che poi possono essere esportate in formato vettoriale DWG e visionate in un sistema CAD.

L'impiego di strumenti indiretti elettronici consente di effettuare operazioni di rilevamento in tempi brevissimi e soprattutto con la massima precisione, eliminando quasi totalmente gli errori grossolani che derivano da una lettura imprecisa, dall'inversione dei numeri nella trascrizione di una misura, da complicati calcoli trigonometrici, ma soprattutto dalla successiva integrazione di misure ricavate da posizioni diverse. Nel rilievo strumentale con stazione totale, infatti, i punti possono essere misurati da una sola stazione, senza dove ricorrere al tradizionale metodo per

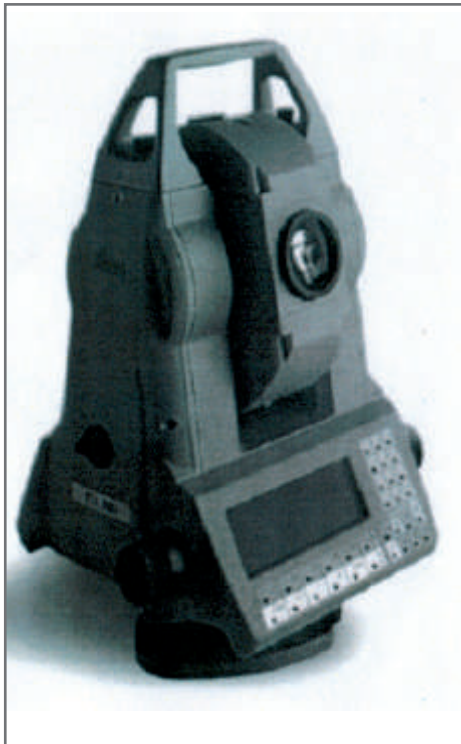


fig.3 stazione totale

La stazione totale impiega onde elettromagnetiche (della banda dell'infrarosso) con due sistemi:

- distanziometro a differenza di fase con prisma riflettente

- distanziometro ad impulsi su pareti

Il sistema con prisma utilizza un principio di misurazione basato sull'emissione di un fascio di raggi infrarossi da parte di un trasmettitore-ricevitore allineato con il cannocchiale e su un sistema di prismi a riflessione di ricezione; i raggi, colpendo un prisma a specchi posto sul punto da rilevare, in luogo della stadia, ritornano nel ricevitore e forniscono, misurando la lunghezza d'onda e il tempo intercorso tra l'invio ed il ritorno del raggio emesso, la distanza obliqua fra lo strumento ed il punto battuto.

Con la stazione totale esiste, inoltre, la possibilità di rilevare punti visibili anche inaccessibili e quindi senza la necessità di disporre di un prisma sul punto da rilevare; tale prestazione si ottiene in quanto la rilevazione non è più del tipo ottico attraverso il sistema di prismi, ma con una lettura al laser in cui il puntamento ad impulsi utilizza il principio della riflettanza dei materiali e consente di misurare, attraverso la lunghezza d'onda del raggio monocromatico, la distanza tra lo strumento ed il punto collimato.

 TRA STAZIONE TOTALE E LASER SCANNER

ambiti e soglie di applicazione degli strumenti a raggio laser nel rilievo indiretto dell'architettura storica

fig.4 Stazione totale TRIMBLE 5605 DR 200+: scheda tecnica

- precisione angolare 5"/1.5mgon
- precisione distanze 2mm+2ppm (misura standard)
- precisione distanze 3mm+3ppm (misura DR)
- distanza minima 2 m
- portata con 1 prisma 1200m
- portata DR 200-600 m (grigio-bianco)
- tempo mis. standard 3.5sec
- sorgente luce diodo infrarosso GaAs; (DR diodo laser 850 nm)
- puntamento servocomandato a 4 velocità



intersezione in avanti.

La misurazione con stazione totale tuttavia comporta errori sistematici e accidentali, ovvero imprecisioni che derivano dall'imperfezione della nostra vista, da quella degli strumenti e dal loro utilizzo.

Un'imprecisione nel posizionamento di un teodolite su un vertice di stazione o nella collimazione di un segnale determina, infatti, un errore angolare inversamente proporzionale alla distanza del punto misurato; in questo modo, più le osservazioni sono effettuate a breve distanza, più questi errori diventano significativi³.

Nelle poligonali, queste imprecisioni possono essere agevolmente limitate mediante il centramento forzato (appendice A) e il posizionamento nei punti di stazione di segnali fissi costituiti da treppiedi, prismi e basette.

La stazione totale si rivela particolarmente utile nel rilevamento di oggetti di grandi dimensioni (piazze, chiese), ma anche di edifici monumentali riccamente decorati, attraverso la realizzazione di una preliminare rete geometrica d'inquadramento alla quale appoggiare i rilievi di dettaglio.

I rilievi eseguiti e riportati nella presente tesi sono stati eseguiti con la stazione totale TRIMBLE 5605 DR200+, strumento di proprietà del Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura dell'Università degli Studi di Parma e di cui si riporta l'allegata scheda tecnica (fig.4).

3.3 Laser scanner: l'innovazione culturale

Il laser scanner (fig.5), tra i più rapidi e innovativi sistemi per il rilievo dell'architettura e delle sue superfici, sembra rappresentare l'ultima frontiera degli strumenti per il rilevamento.

La tecnologia del laser scanner, operando in modo quasi completamente automatico, consente di acquisire digitalmente oggetti tridimensionali di varie dimensioni sotto forma di nuvole di punti: ogni punto colpito dal raggio laser viene riportato attraverso coordinate riferite alla posizione dello strumento.

Il rilevamento con il laser scanner, basato sulla scansione "continua" delle superfici, ha per conseguenza fasi operative alquanto diverse rispetto a quelle con la stazione totale o con gli altri strumenti "tradizionali". L'acquisizione automatizzata per passi discreti angolari, infatti, annulla la preventiva operazione di discretizzazione propria del rilevamento diretto o con stazione totale.

La misurazione con laser scanner avviene attraverso l'emissione di un fascio di luce polarizzata monocromatica, per mezzo di un sistema ottico-meccanico motorizzato che consente contemporaneamente un movimento in orizzontale ed uno in verticale e dunque il rilevamento per passi discreti.

Il tempo impiegato tra il momento dell'emissione del raggio laser ed il suo ritorno, calcolato dai sensori interni dello strumento, consente la misurazione della distanza tra strumento e oggetto e, unitamente alla lettura degli angoli azimutali e zenitali, la determinazione delle coordinate cartesiane del punto, con origine nel punto stazione.

Il prodotto è una nuvola di punti più o meno densa che ricostruisce la forma complessiva dell'oggetto attraverso la visualizzazione delle sue superfici.

Gli scanner laser 3D possono impiegare fondamentalmente due tipologie di misurazione: distanziometrica⁴ (basato sul tempo di volo, descritto sopra) per oggetti di grande dimensione e distanti da 2 a oltre 150 m. circa dallo strumento e dunque ideale per il rilevamento di palazzi, piazze ecc.; triangolazione ottica, per scansioni ad altissima risoluzione di oggetti di dimensioni ridotte posizionati da 0.6 a 50 m.

Gli scanner laser basati sul principio della triangolazione ottica⁵ sono costituiti da una base di lunghezza fissa: ad un estremo della base il trasmettitore invia un raggio laser che viene deviato grazie ad uno specchio rotante, mentre, all'altro estremo, una camera digitale registra l'immagine dell'impatto del raggio laser sull'oggetto.

Le coordinate del punto vengono determinate risolvendo il triangolo così formato e di cui si conoscono la base e i due angoli adiacenti: quello formato dal raggio emesso e quello formato dal raggio riflesso secondo lo schema di misura tipico di un'intersezione in avanti.

La risoluzione delle scansioni e, l'accuratezza nella determinazione delle coordinate, varia in base al tipo di strumentazione e alle finalità dell'impiego, dai valori sub-millimetrici (0,1 mm per distanze intorno ai 2 m., 6 mm fino a 50 m.) degli scanner che usano la triangolazione ottica, ai valori millimetrici o centimetrici degli scanner a tempo di volo.



fig.5 laser scanner 3d

Gli scanner ad altissima risoluzione (triangolazione ottica), avendo un campo visivo piuttosto limitato, possono acquisire l'oggetto da distanze ravvicinate e per piccole porzioni rivelandosi maggiormente adatti al rilevamento di oggetti di piccole dimensioni, ma rilevare oggetti molto grandi con questi strumenti richiederebbe tempi molto lunghi e una quantità di dati difficili da gestire.

La densità della nuvola di punti, ognuno dei quali definito da coordinate x y e z rispetto allo scanner, il dettaglio della rappresentazione e dunque la descrizione geometrica digitale dell'oggetto risulterà maggiormente realistica quanto più intensa è la risoluzione impostata per l'acquisizione di dati.

Il rilevamento con laser scanner tridimensionale richiede, in ogni caso, e come sempre, un progetto preliminare delle fasi di rilievo e dunque un sopralluogo al fine di verificare le caratteristiche geometriche-dimensionali del manufatto e l'accessibilità dei luoghi. Sulla base di questi parametri viene definita la strumentazione da usare, le impostazioni di scansione, ma soprattutto il posizionamento e il numero delle stazioni.

Nella scelta dell'impostazione di scansione, è abbastanza intuitivo che il parametro primo da considerare è l'inquadramento del campo di scansione, che deve essere relazionato alla distanza tra lo strumento rilevatore e l'oggetto da rilevare, all'angolo di scansione, alla velocità di scansione, nonché alle caratteristiche morfologiche della superficie da scansionare.

Una superficie abbastanza uniforme, infatti, può essere scansionata con un numero di punti inferiore rispetto ad una molto corrugata.

Tutte queste condizioni correlate tra loro determinano l'infittimento o il diradamento dei punti della nuvola ed il ricorso eventuale a files molto "pesanti".

Con una sola scansione tuttavia non è sempre possibile rilevare tutti i punti necessari alla ricostruzione della morfologia dell'oggetto. La misurazione con raggio laser, infatti, non raggiungendo punti che sporti, aggetti o altro possono nascondere, richiede la realizzazione di scansioni integrative in modo tale da coprire le zone mancanti a completamento del rilievo.

Le scansioni necessarie per ottenere una copertura totale in fase di acquisizione devono poi essere unificate per formare un'unica nuvola di punti. Per poter allineare e ricomporre in una rappresentazione globale le nuvole di punti parziali ottenute da ciascuna scansione è necessario che queste abbiano delle zone comuni di sovrapposizione (almeno un 30% circa) comprendenti punti facilmente riconoscibili dell'oggetto.

In fase di allineamento (o registrazione) delle nuvole parziali è dunque necessario indicare al software quali sono i punti comuni di aggancio su cui allineare correttamente le varie scansioni. Per lavorare con maggiore precisione si possono utilizzare delle "mire" o "target" di varie forme e dimensioni (sferiche, a disco piatto, ecc) che, di norma, sono fornite con lo scanner e che il raggio laser riesce a individuare automaticamente per il coefficiente di riflettanza diverso rispetto a tutti gli altri punti.

L'unificazione fra le scansioni avviene dunque facendo coincidere la posizione spaziale delle marche in due scansioni successive; la prima e la seconda scansione si fondono in un'unica avente lo stesso sistema di riferimento.

L'acquisizione dei dati rilevati tramite l'impiego del laser scanner, prevede, come nel caso della stazione totale, la trasformazione delle informazioni dei singoli punti in coordinate riferite al centro dello strumento e la successiva esportazione, in un sistema CAD, della nuvola di punti in formato vettoriale DWG.

L'eccedenza dei punti rilevati e contenuti nelle zone comuni di sovrapposizione delle scansioni rende tuttavia i files piuttosto pesanti e dunque difficilmente gestibili.

A questo proposito, esistono in commercio software specifici per la gestione delle nuvole di punti, grazie ai quali, mediante specifici algoritmi (di smoothing), è possibile operare il filtraggio dei dati, ottimizzando così l'utilizzo dei files restituiti dalle dimensioni più contenute. Il funzionamento di questi programmi richiede tuttavia elaboratori molto potenti e un ambito operativo tecnico altamente specialistico.

L'insieme dei dati, ottenuti da una scansione laser, descrive una superficie reale attraverso una moltitudine di punti il cui inviluppo ricostruisce un modello digitale, tanto più aderente alla realtà quanto più alta è la densità dei punti rilevati e quindi quanto più è piccolo il prodotto distanza-angolo (dell'ordine dei milligon)⁶, a cui è direttamente collegato il passo di scansione.

fig.6 LMS "CALLIDUS" VERS.1.1: SCHEDA TECNICA

Range: max 150 m
 Velocità di acquisizione: 28000 Hz
 Lunghezza lente: 905 mm
 Dimensioni: 460 x 300 mm
 Peso: 13 Kg
 Accuratezza distanza: ± 5 mm
 Accuratezza punto a 50 m: 14 mm
 Lunghezza d'onda: Infrarosso vicino
 Classe: I
 Bussola interna: si
 Individuazione del prisma: si
 Camera digitale: si

Angolo di scansione verticale da $+90^\circ$ a -60°
 Passo di scansione verticale: $0,25^\circ$ $0,5^\circ$ 1°
 Velocità di scansione: 77 scans/second
 Errore angolare (a qualsiasi distanza): $0,03^\circ$ (3 mgon)
 Meccanismo verticale: a specchi rotanti

Angolo di scansione orizzontale: 360°
 Passo di scansione orizzontale: $0,0625^\circ$ $0,125^\circ$ $0,25^\circ$ $0,5^\circ$ 1°
 Errore angolare (a qualsiasi distanza): $0,017^\circ$
 Stazione totale TRIMBLE 5605 DR 200+: scheda tecnica

- precisione angolare $5''/1.5\text{mgon}$
- precisione distanze $2\text{mm}+2\text{ppm}$ (misura standard)
- precisione distanze $3\text{mm}+3\text{ppm}$ (misura DR)
- distanza minima 2 m
- portata con 1 prisma 1200m
- portata DR 200-600 m (grigio-bianco)
- tempo mis. standard 3.5sec
- sorgente luce diodo infrarosso GaAs; (DR diodo laser 850 nm)
- puntamento servocomandato a 4 velocità



L'operazione successiva al filtraggio dei punti concerne la costruzione della mesh e dunque la creazione, tra punti limitrofi (rilevati), di un intorno di superficie, di una rete di piccoli elementi piani discreti il cui inviluppo riesce a creare un modello molto aderente alla superficie continua dell'oggetto.

In questo senso, esistono programmi in grado di generare in automatico la meshatura nonché la chiusura degli eventuali "buchi", ovvero di quelle parti di oggetto che in fase di misurazione e per la loro posizione, non è possibile acquisire.

La visualizzazione da differenti punti di vista, in ambiente Cad (o similare), del modello 3d così ottenuto, consente di avere un'idea della forma dell'oggetto notevolmente realistica e di individuare piani di riferimento dai quali ottenere tutti i profili dell'oggetto possibili.

Le rappresentazioni mongiane risultano in questo contesto un sottoprodotto del modello tridimensionale: dalla nuvola di punti è possibile ricavare profili, spaccati, che consentono di definire l'aspetto morfologico, tipologico, materico e colorimetrico.

L'ultima fase consiste nell'applicazione delle textures al modello 3D, ovvero la mappatura, che può essere eseguita facendo corrispondere ad ogni triangolo della mesh la corrispondente frazione d'immagine fotografica prelevata in fase di scansione al fine di documentare lo stato di degrado dell'oggetto.

La principale potenzialità dello strumento consiste:

- nell'elevato dettaglio dell'acquisizione digitale tridimensionale.
- nella riduzione dei tempi di scansione rispetto ai più tradizionali metodi di acquisizione e rilevamento.
- in una più significativa e preziosa informazione geometrica rispetto all'immagine fotografica in quanto riproduce con estrema accuratezza e in tre dimensioni la topologia dell'oggetto.
- in una sovrapposizione estremamente precisa fra geometria e mappatura fotografica, soprattutto nel caso in cui quest'ultima sia stata acquisita ad alta risoluzione e successivamente ortorettificata. In tal caso il valore cognitivo e rappresentativo del modello viene ulteriormente incrementato.
- nella riduzione dell'errore variabile dai 3 ai 20 millimetri per una maglia di rilevazione larga, di qualche millimetro per le scansioni più puntuali.

I rilievo del famedio di Cleofonte Campanini è stato eseguito con il laser scanner Callidus 1.1 di cui si riporta l'allegata scheda tecnica (fig.4).

Note

¹ Cfr. Bezoari Giorgio, Monti Carlo e Selvini Attilio, *Misura e rappresentazione*, casa editrice ambrosiana

² Il metodo per irraggiamento consiste nell'eseguire la misurazione a partire da una posizione centrale, quale ad esempio potrebbe essere il centro di una piazza o di un vano, e misurare in tal modo la distanza e l'angolo orizzontale di ogni punto rilevato. Il metodo della poligonazione consiste invece nella costruzione di una rete d'inquadrimento (poligonale) e dunque nel circondare l'oggetto e nel percorrerlo con una serie di segmenti che definiscono un poligono. A partire da questi segmenti e dai vertici del poligono verranno eseguite le misure di dettaglio dell'oggetto

³ Prendiamo ad esempio un angolo di un centesimo di grado: a 100 metri questo angolo sarà rappresentato da un segmento di 15,7 millimetri; a 10 metri da 1,57 millimetri; inversamente un segmento di 1,57 cm sarà visto a 100 m sotto un angolo di un centesimo di grado, ma a 10 m sotto un angolo di 10 centesimi di grado. Cfr. Saint Aubin Jean-Paul, *Il rilievo e la rappresentazione dell'architettura*, Moretti e Vitali, Bergamo, 1999

⁴ Callidus (portata 80 ml.); Riegl LMS (1000 ml.); MENSIGS 100 (100 ml.); Cyrax 2500 (50 ml.)

⁵ Polhemus Fastscan (0,8ml.); QTSculptor (1,0 ml.); Minolta VI (1,2 ml.)

⁶ Un gon è la quattrocentesima parte di un angolo giro

PARTE II

ESPERIENZE DI RILIEVO A CONFRONTO: SUPERFICI COSTRUITE E MODELLI PROGETTUALI NELL'ARCHITETTURA

Capitolo 1

Forma e deformazione: le volte della chiesa dell'abbazia di Monteoliveto

1.1 Finalità del rilievo e caratteristiche dell'architettura: il vano unitario

Il rilievo delle volte della chiesa dell'Abbazia di Monteoliveto ¹ eseguito al fine di permettere la verifica statica e il consolidamento strutturale della copertura, ha rappresentato un'occasione per verificare la necessità di integrare diverse metodologie di misurazione e l'efficacia di tale metodo di lavoro.

La chiesa dell'Abbazia di Monteoliveto (fig.1) è un edificio costruito nei primi decenni del XV secolo in forme tardogotiche: pianta a croce latina e a navata unica, impostata su tre campate rettangolari coperte da volte costolonate e con archi a sesto acuto (fig.2). In epoca barocca, le volte quattrocentesche sono state coperte dalla costruzione di una volta a botte lunettata (fig.3).

Questo ha determinato la costituzione di una doppia volta, un'intercapedine di altezza variabile (0,80-1,2 ml) (fig.4), tra la navata della chiesa e il sottotetto, delimitata dalle superfici curve dei due sistemi voltati e accessibile unicamente dal sottotetto tramite alcune aperture realizzate nelle calotte superiori all'epoca della costruzione.



fig.1 veduta esterna della chiesa



fig.2 sottotetto: volta del '400



fig.4 intercapedine tra le volte



fig.3 interno chiesa: volta barocca

Il recente crollo della copertura della biblioteca abbaziale, realizzata nello stesso periodo e con soluzioni progettuali-tecnologiche simili a quelle della chiesa, ha indotto la realizzazione di opportune verifiche statiche e strutturali.

La mancanza di rilievi adeguati sui quali eseguire le indagini di verifica strutturale hanno determinato la necessità di eseguire un rilievo finalizzato al dimensionamento dello spessore dei muri perimetrali e delle volte di copertura in corrispondenza della campata centrale.

Per l'indagine statica, gli strutturisti richiedevano informazioni geometriche precise, relative alla forma delle superfici voltate e agli archi di sostegno (spessori), da rielaborare successivamente per la verifica degli elementi finiti.

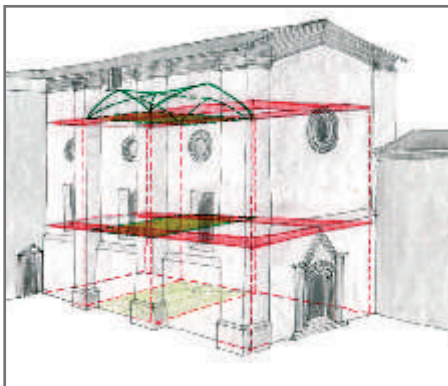


fig.5 finalità del rilievo: dimensionamento delle pareti esterne e geometria della campata centrale

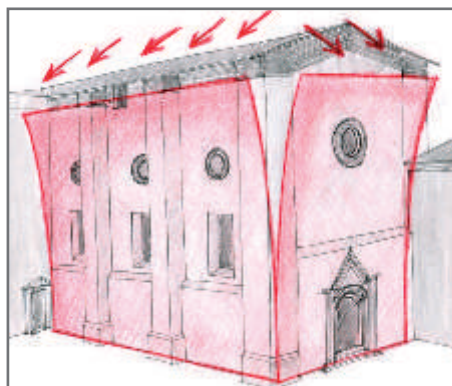


fig.6 integrazione del rilievo: verifica dei movimenti strutturali

La posizione elevata delle superfici voltate e la conseguente inaccessibilità dell'intradosso della volta barocca ha indotto all'impiego di strumenti a raggio laser per il rilievo indiretto dell'architettura (stazione totale, disto, ecc).

L'alta precisione di queste tecnologie, tuttavia, non elimina del tutto le imprecisioni in fase di rilevamento: la discontinuità delle superfici e il deterioramento degli spigoli inducono, infatti, ad accettare un'approssimazione (di pochissimi centimetri) superiore a quella degli strumenti dichiarata dai costruttori, ma comunque contenibili in un rilievo integrato.

Per questi motivi, l'integrazione di tecniche e strumenti differenti deve essere eseguita assicurando risultati di precisione tanto maggiori quanto minore è lo spessore delle strutture interessate.

I fuori piombo delle strutture verticali esterne, evidenziati nel sopralluogo preliminare, hanno suggerito di completare le misurazioni richieste inizialmente (dimensionamento delle pareti perimetrali e dello spessore delle volte in corrispondenza della campata centrale) con ulteriori verifiche, al fine di determinare i movimenti e le deformazioni subite dalle strutture nel tempo (figg.5-6).

L'approfondimento del rilievo ha permesso, dunque, di definire la geometria dell'architettura allo stato attuale e di ricostruire quella originaria, che, come sottolineato nel dipinto presente nel chiostro² (fig.7) e riscontrato in seguito dalle forme regolari evidenziate nel rilievo, era stata costruita con un chiaro rigore geometrico.

In questo senso, la conoscenza preliminare della geometria delle superfici curve voltate³ (appendice B), si è rivelata particolarmente utile nelle operazioni di rilevamento in quanto ha consentito di individuare in maniera più consapevole la tipologia della volta quattrocentesca e quindi, in un secondo momento, i "punti significativi" da rilevare (appartenenti alle generatrici delle superfici voltate).

Il raffronto tra la configurazione attuale misurata e la geometria originaria ipotizzata, ha così permesso di individuare le alterazioni formali e i movimenti subiti dalla struttura, sulla cui base gli strutturisti hanno impostato il successivo progetto di consolidamento.



fig.7 affresco del chiostro interno:
la costruzione dell'abbazia

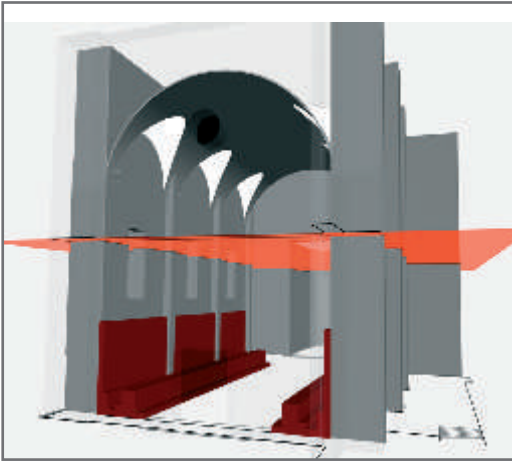


fig.8 interno chiesa: sezione orizzontale piana

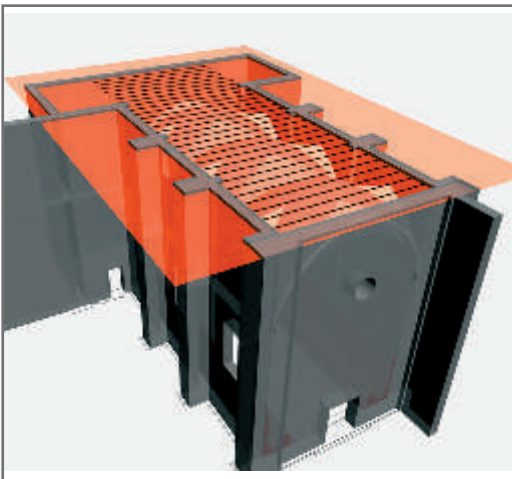


fig.9 sottotetto: sezione orizzontale piana

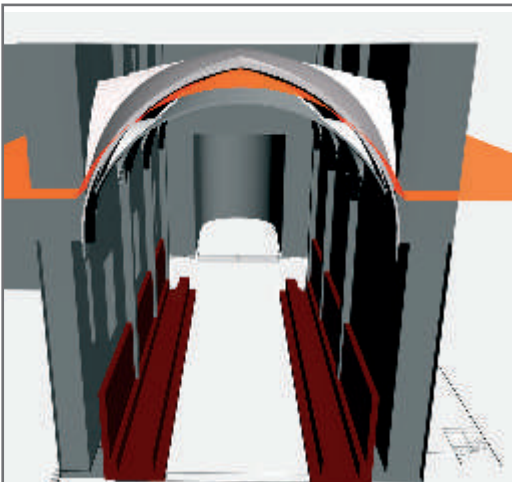


fig.10 intercapedine: sezione gobba

1.2 Misurazione: metodologie e problematiche

Sulla base di queste premesse, è stata programmata una campagna di rilievo volta all'individuazione e misurazione di tre sezioni orizzontali in corrispondenza di livelli significativi, di tre sezioni verticali in corrispondenza della campata centrale, oltre ad alcune misure utili a dimensionare la rotazione (spanciamento) dei muri perimetrali.

L'altezza della navata della chiesa, la difficoltà di raggiungere fisicamente l'intradosso della volta barocca per eseguire misurazioni con il metodo diretto, così come l'impossibilità di operare con strumenti topografici nell'intercapedine hanno indotto ad adottare una metodologia di lavoro integrata.

La finalità del rilievo e le caratteristiche geometriche dell'edificio hanno condizionato notevolmente le scelte sia nella fase preparatoria e progettuale del rilievo, sia nella fase operativa (all'atto della misurazione), quando si è dovuto fare una scelta ponderata di cosa rilevare.

La discretizzazione dei punti, condotta in modo tale da acquisire le informazioni sufficienti alla lettura del rilievo mediante la misurazione del minor numero di punti possibili, è stata dunque limitata alla definizione volumetrica-strutturale dell'organismo architettonico tralasciando elementi architettonici-scultorei quali modanature, capitelli ecc.

Nel caso specifico, lo strumento più idoneo al rilevamento si è rivelato fin da subito la stazione totale⁴, associata ad un rilievo manuale con gli strumenti laser (distanziometro e squadra).

Nonostante la presenza delle doppie superfici voltate per le quali un rilievo continuo con laser scanner sarebbe potuto sembrare più indicato, infatti, le condizioni di accessibilità delle volte hanno indotto a preferire una misurazione con strumenti leggeri, lavorando per sezioni piane e per "punti significativi" (di tradizionale concezione operativa), possibile soltanto con stazione totale o distanziometro laser.

Per motivi di accessibilità e di praticità operativa, la stazione totale è stata usata solo nel vano principale della chiesa.

L'utilizzo della stazione totale all'interno della chiesa si è reso necessario, oltre che per l'altezza della navata, per la presenza di un alto coro ligneo addossato alle pareti, che ostacolando la visione della parte inferiore dei muri, ha condotto a individuare la sezione orizzontale del piano terra al di sopra del coro e dunque ad un'altezza di circa 8,0 ml.(fig.8).

Nel sottotetto e nell'intercapedine, la difficoltà di accesso e l'impossibilità di posizionare (in modo utile) lo strumento topografico all'interno dei vani, ha indotto a preferire la realizzazione di un rilievo diretto, con strumenti e metodologie tradizionali (trilaterazioni) (fig.9). Se la curvatura delle superfici voltate e l'altezza ridotta dell'intercapedine, infatti, rendeva instabile e disagiata il posizionamento dello strumento, lo spessore ridotto della volta inferiore (in folio, di circa 7 cm) lo rendeva praticamente impossibile per evidenti problemi strutturali e di portata.

La curvatura delle superfici voltate e l'altezza ridotta dell'intercapedine ha inoltre indotto a individuare una sezione gobba, anziché piana, per la misurazione e restituzione grafica del vano. (fig.10)

TRA STAZIONE TOTALE E LASER SCANNER

ambiti e soglie di applicazione degli strumenti a raggio laser nel rilievo indiretto dell'architettura storica

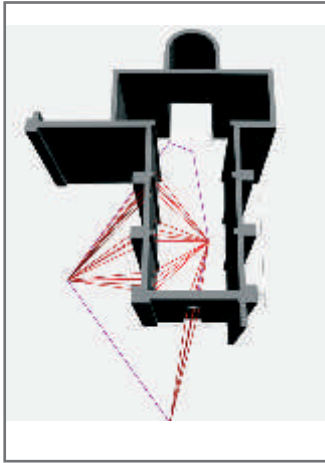


fig.11 poligonale chiusa di collegamento

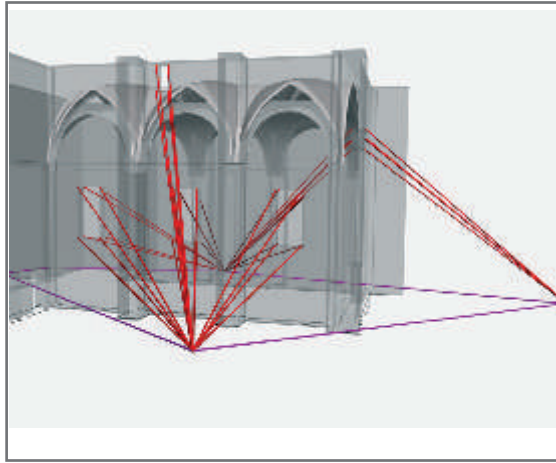


fig.12 misurazione di punti omologhi da stazioni esterne-interne

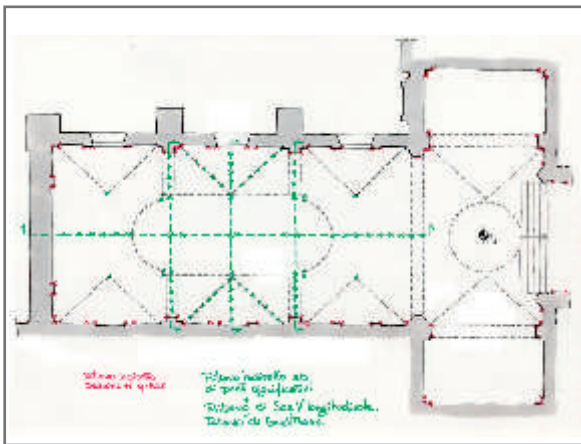


fig.13 interno chiesa: punti misurati

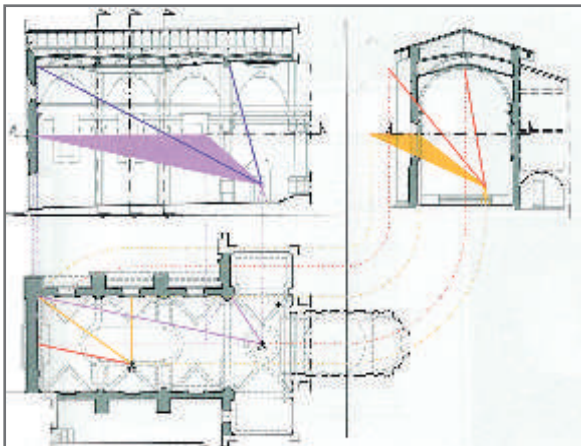


fig.14 inclinazione del cannocchiale nella misurazione dell'interno chiesa

La difficoltà maggiore riscontrata nelle operazioni di rilevamento, e nella preventiva fase di programmazione, ha riguardato il collegamento spaziale delle sezioni orizzontali e verticali a causa della mancanza di elementi di continuità.

Il collegamento del rilievo della navata della chiesa a quello della volta superiore, accessibile sia all'estradosso sia all'intradosso, risultava, infatti, molto indiretto per la mancanza di aperture nella volta inferiore da utilizzare quali riferimenti geometrici spaziali.

La difficoltà è stata risolta dall'esterno, con la realizzazione di una poligonale di riferimento chiusa di cinque stazioni, passante all'interno della chiesa attraverso la porta principale e quella del transetto (fig.11) e nel sottotetto attraverso una finestra.

La poligonale di riferimento ha dunque permesso di collegare le sezioni mediante la collimazione di punti noti, raggiungibili dalle stazioni sia interne sia esterne (fig.12): punti costituiti prevalentemente da vertici di aperture rispettivamente sulle pareti nord e ovest.

L'intercapedine, non essendo dotata di aperture lungo i fronti esterni, è stata rapportata al sottotetto, mediante misurazione diretta, attraverso alcuni fori esistenti nella calotta superiore.

Le metodologie di rilievo utilizzate per le sezioni orizzontali sono state altresì utilizzate per le sezioni verticali trasversali realizzate rispettivamente sui due arconi trasversali e in mezzeria della campata centrale nonché per la sezione longitudinale della chiesa.

La verifica delle deformate e dei movimenti strutturali dell'edificio quali, ad esempio, la traslazione delle piante principali e l'apertura verso l'esterno delle pareti nord e ovest, è stata invece eseguita attraverso la misurazione di un numero opportuno di punti, posti sulle pareti esterne, a definizione del profilo verticale dei contrafforti esterni, del profilo verticale delle sezioni trasversali predefinite, ma anche del profilo orizzontale del basamento e del limite di gronda.

All'interno della chiesa, la misurazione è stata realizzata principalmente mediante l'utilizzo della stazione totale.

Facendo stazione su uno dei nodi interni della rete poligonale, posto all'intersezione tra l'asse della navata e quello del transetto, è stata infatti rilevata una serie di punti utile a definire la sezione orizzontale (individuata sopra il coro ligneo), i livelli del pavimento, nonché la geometria della volta barocca.

La volta a botte lunettata, a copertura della navata, è stata rilevata mediante la collimazione di punti appartenenti ai piani di sezione verticale individuati, ma anche dei punti posti sugli archi di imposta, lungo le direttrici e in corrispondenza delle intersezioni tra le superfici (appendice B) (fig.13).

In questa fase, le problematiche principali hanno riguardato la presenza di elementi architettonici-decorativi aggettanti che ostacolavano la collimazione diretta di punti significativi (imposte) e la misurazione dei punti più alti.

La visualizzazione dei punti più alti, a causa dell'eccessiva inclinazione del cannocchiale strumentale (rapporto altezza-distanza), infatti, ha richiesto l'utilizzo di una lente (periscopica). L'utilizzo di quest'ultima e la perdita di riferimento spaziale derivato dalla visione speculare della lente, hanno reso tuttavia meno immediata l'operazione di collimazione (fig.14).

Le misurazioni strumentali dei punti significativi della volta barocca sono state in seguito verificate mediante un rilievo per coordinate eseguito con distanziometro e squadro laser, dopo aver “tracciato” a terra le proiezioni delle linee d’intersezione delle superfici curve. Tale metodologia è stata inoltre utilizzata per il rilievo delle superfici voltate nel sottotetto e nell’intercapedine, ammettendo dunque una misurazione con strumenti indiretti a raggio laser, in una metodica di concezione tradizionale.

Il rilievo discreto dei sistemi voltati, basato sull’individuazione di punti “fermi”, vale a dire di punti determinati e sempre rintracciabili quali ad esempio spigoli, intersezioni di piani ecc, richiede come operazione preliminare l’individuazione della tipologia di volta appartenente al caso specifico e, di conseguenza, delle generatrici e delle direttrici sulle quali attuare la discretizzazione e la misurazione di un sufficiente numero di punti.

L’individuazione della tipologia, tuttavia, non è sempre immediata. Nel caso di Monteoliveto, infatti, le volte, in un primo momento definite “a crociera”, per l’evidente presenza di costoloni ogivali e per la caratteristica apparecchiatura, dopo una osservazione più attenta hanno evidenziato considerevoli analogie geometriche e strutturali con quelle “a stella” (leccesi) (fig.15).

Le volte superiori, infatti, si presentavano come porzioni di calotte sferiche con unghie a sesto acuto, rialzate e raccordate alle calotte con filari di conci incurvati: in corrispondenza dei costoloni dunque non esisteva alcuna discontinuità di superficie come invece dovrebbe essere per le volte a crociera. La mancanza di linee di discontinuità ha reso quindi difficoltosa la scelta e l’individuazione dei punti significativi volti a determinare non solo la sezione longitudinale e trasversale ma anche la geometria della superficie.



fig.15 analogie con le volte a crociera e le volte a stella

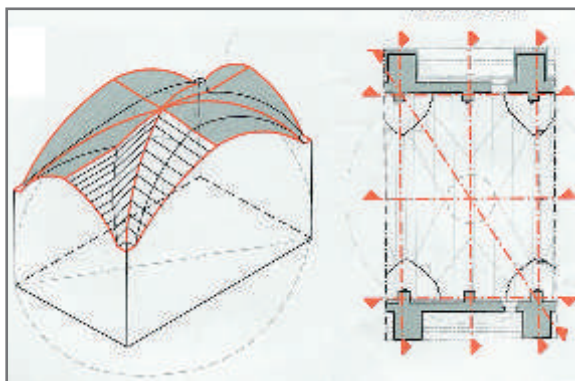


fig.16 campata tipo: sezioni verticali rilevate

L'osservazione della volta superiore della campata centrale, evidenziava inoltre uno schiacciamento asimmetrico della calotta superiore, causato con ogni probabilità da movimenti subiti dall'edificio.

Questa evidente deformazione ha indotto alla realizzazione di un rilievo dimensionale (per coordinate) più dettagliato, nel tentativo di ricostruire, attraverso il rilievo dello stato attuale, la forma originaria delle volte quattrocentesche.

Si è pertanto proceduto al rilievo di:

- sagome dei quattro archi di imposta (campata centrale);
- sezione trasversale nella mezzeria (campata centrale);
- sezione su un costolone ogivale (campata centrale);
- punti lungo le pareti perimetrali;
- sezione longitudinale (nella mezzeria del vano) dell'estradosso delle volte.

Il tutto è stato riferito ad un piano virtuale sghembo, individuato dalle catene metalliche esistenti poste trasversalmente ad un'altezza di circa 1 ml. rispetto all'estradosso della calotte superiori e ancorato nei cordoli perimetrali (fig.16).

A partire da questa superficie di riferimento si è proceduto inoltre al rilievo dell'orditura della struttura di copertura del tetto, realizzata con travetti di calcestruzzo prefabbricati e alla determinazione delle dimensioni generali del vano, poi verificate per trilaterazione.

L'intercapedine tra le superfici voltate è stata rilevata per coordinate (fig.17) servendosi del distanziometro e dello squadro laser.

Sono state così verificate le dimensioni generali del vano, la posizione e gli spessori delle strutture di irrigidimento della volta inferiore e i dislivelli esistenti tra i punti notevoli della geometria delle due volte.

Le sagome delle lunette comprese tra l'estradosso della volta inferiore e l'intradosso della volta superiore sono state determinate in seguito per coordinate, servendosi di un'asta rigida, resa orizzontale mediante l'ausilio di uno squadro autolivellante, appoggiata sui "cervelli" degli archi d'imposta della volta inferiore.



fig.17 intercapedine campata tipo: sezioni verticali rilevate per coordinate

Lo spessore delle due volte⁵ è stato misurato con rilievo diretto sui fori esistenti: dalle aperture che permettono l'ingresso nelle intercapedini per la volta superiore e dai piccoli fori esistenti nelle unghie delle lunette laterali della volta barocca. Questo ha permesso la verifica della posizione delle sezioni, individuata precedentemente mediante misurazione dalla poligonale topografica.

Le misure prese sulle sezioni sono state sufficienti per ricostruire con buona approssimazione la forma attuale della volta e il suo riferimento geometrico originale, nonché i movimenti subiti dalle strutture verticali.

Un'ulteriore verifica delle deformazioni subite dalle pareti perimetrali, sarebbe stata possibile mediante l'utilizzo della stazione totale in modalità di scansione e dunque mediante la misurazione di un reticolo di punti, appartenenti ad una superficie definita, individuati ad un passo preimpostato di circa 20 cm.

Tuttavia, i tempi lunghi che questo tipo di operazione avrebbe comportato (in occasione di altre esperienze è stata stimata, approssimativamente, la registrazione di 7-9 punti al minuto a distanze comprese tra i 10 e i 20 metri) hanno indotto a preferire un rilievo per sezioni piane.

1.3 Restituzione grafica: metodologie e problematiche

Nella prassi comune, i rilievi dei sistemi voltati vengono restituiti con rappresentazioni bidimensionali in pianta e alzato indicando in modo molto schematico il numero e il tipo di struttura voltata.

Il rilievo di volte di maggior pregio e interesse costruttivo, come nel caso specifico di Monteoliveto, richiede invece elaborazioni maggiormente dettagliate sia dei profili

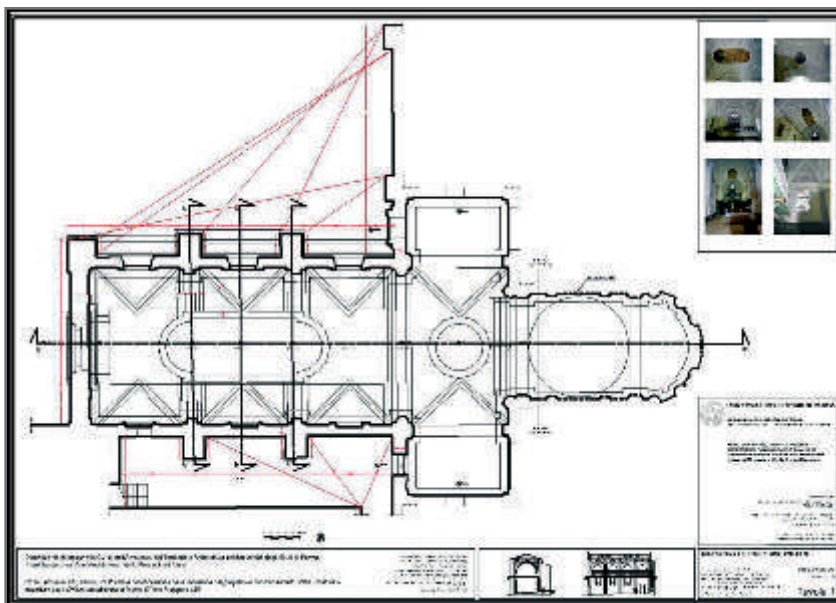


fig.18

d'imposta sia delle sezioni longitudinali, trasversali e diagonali.

La restituzione grafica del rilievo delle volte della chiesa dell'abbazia di Monteoliveto (fig. 18) ha condotto alla realizzazione dei seguenti elaborati:

a) elaborati alla scala architettonica (1/50) per la navata:

- pianta della chiesa sezionata a quota + 8,05 m.
- proiezione orizzontale della sezione curva dell'intercapedine
- pianta del sottotetto sezionata a quota + 17,25 m.
- sezione verticale longitudinale in mezzeria della chiesa
- sezione verticale trasversale sulla mezzeria della II campata
- sezione verticale trasversale sull'arco tra la I e la II campata
- sezione verticale trasversale sull'arco tra la II e la III campata

b) elaborati alla scala del dettaglio (1/25) per la campata:

- porzione superiore della sezione verticale trasversale sulla mezzeria della II campata
- porzione superiore della sezione verticale trasversale sull'arcone tra la I e la II campata
- porzione superiore della sezione verticale trasversale sull'arco tra la II e la III campata
- porzione superiore della sezione verticale longitudinale in mezzeria della II campata
- pianta dell'estradosso della volta superiore della II campata

Nella restituzione finale, l'esiguo spessore delle volte ha permesso di controllare la tolleranza delle misure rilevate con un margine d'incertezza medio inferiore ai 2 centimetri nella determinazione della posizione spaziale dei punti, anche non accessibili delle volte.

La restituzione bidimensionale del rilievo, per quanto definita, non è stata considerata soddisfacente nella rappresentazione della forma della volta doppia.

Le attuali tecnologie informatiche e multimediali consentono, infatti, di disporre di modelli informatici, simulazioni tridimensionali tali da permettere una trasmissione di informazioni molto più ricca ed esaustiva, con risultati più efficaci nella visualizzazione delle forme.

In questo senso, la modellazione costituisce una strategia creativa, ma anche conoscitiva, utile a comprendere i volumi, gli aspetti nascosti della progettazione, oltreché le scelte geometrico-formali e statiche dell'organismo edilizio.

Le tecnologie informatiche applicate al campo della rappresentazione costituiscono dunque uno strumento estremamente efficace per la comprensione e l'analisi di un qualsiasi manufatto edilizio anche in uno studio realizzato per la verifica statica e il consolidamento strutturale.

Nel caso specifico di Monteoliveto, sulla base del rilievo misurato e a partire dalle conoscenze relative alle tipologie, alle problematiche strutturali, alle soluzioni geometriche architettoniche delle superfici voltate dell'epoca, è stato possibile ricostruire il modello geometrico originario che una volta deformato, ha trovato riscontro con la configurazione attuale.

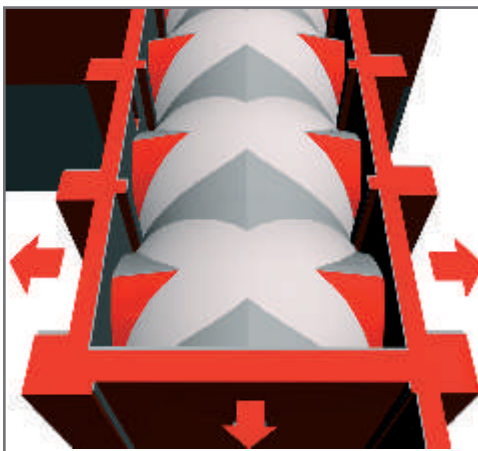
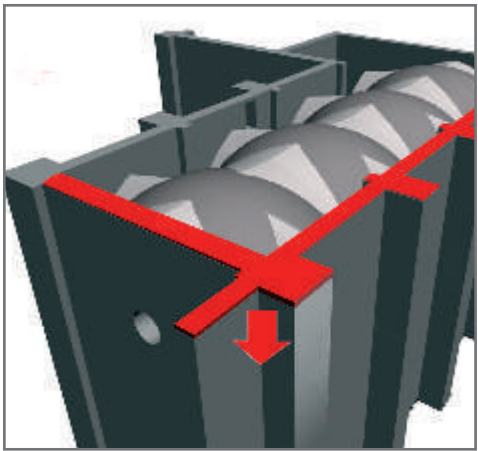
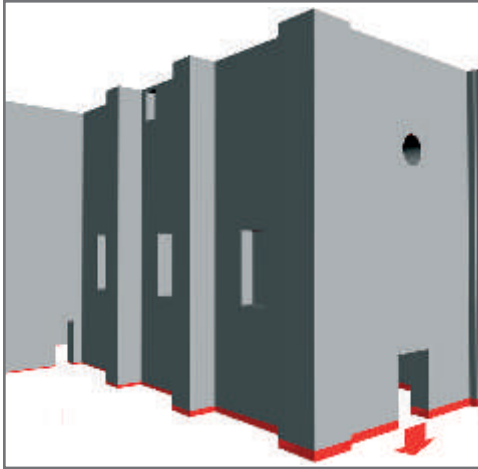


fig.19 movimenti strutturali della chiesa dell'abbazia di Monteoliveto

1.4 Lettura

1.4.1 Lettura del rilievo

In fase di restituzione, i dati derivati dalla misurazione hanno sottolineato una relazione tra le “irregolarità geometriche” evidenziate dal rilievo e una serie di movimenti strutturali subiti nel tempo dall'edificio nel suo complesso, nonché la rotazione e l'abbassamento d'alcuni suoi elementi costruttivi.

Le deformazioni (fig.19), iniziate presumibilmente all'epoca della costruzione, e ricostruite sulla base del rilievo e degli elementi che sembrano aver mantenuto la loro posizione iniziale, possono essere così schematizzati:

1) -Abbassamento del piano del pavimento in corrispondenza della facciata di circa 50 centimetri, con un movimento rigido della sezione trasversale della chiesa, avvenuto presumibilmente prima della costruzione del tetto.

2) -Abbassamento lineare del muro meridionale della navata con abbassamento dello spigolo sud-occidentale di circa 25 centimetri, presumibilmente tra la costruzione del tetto e quella del pavimento attuale.

3) -Apertura della sezione trasversale con rotazione verso l'esterno di 11 centimetri del muro sul fianco settentrionale della chiesa (misurata in corrispondenza della finestra) e di 8 cm. in corrispondenza di quella sud, avvenuta presumibilmente dopo la realizzazione della volta inferiore, che non sembra deformata.

4) -Schiacciamento eccentrico (maggiore in corrispondenza del foro) della calotta della volta quattrocentesca della campata centrale con perdita della geometria originaria, abbassamento del cervello e aumento del raggio di curvatura della parte superiore; l'entità di tale abbassamento può essere determinato per via geometrica, ma non conoscendo l'esatta quota di imposta delle volte il margine di incertezza è troppo elevato.

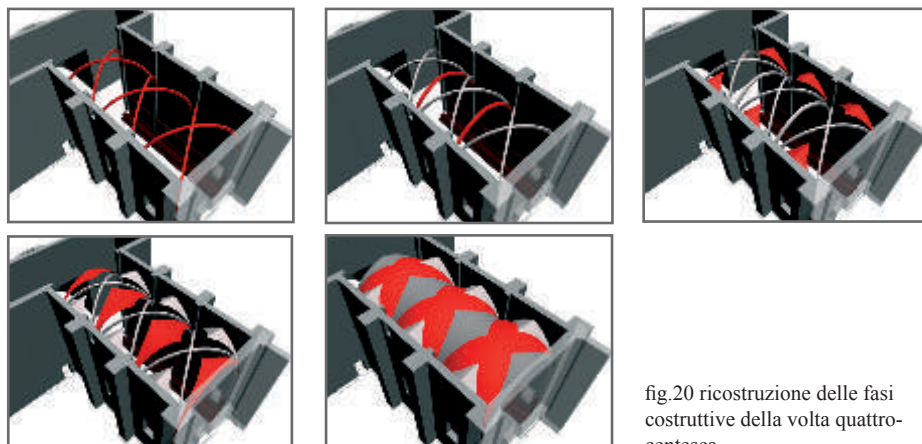


fig.20 ricostruzione delle fasi costruttive della volta quattrocentesca

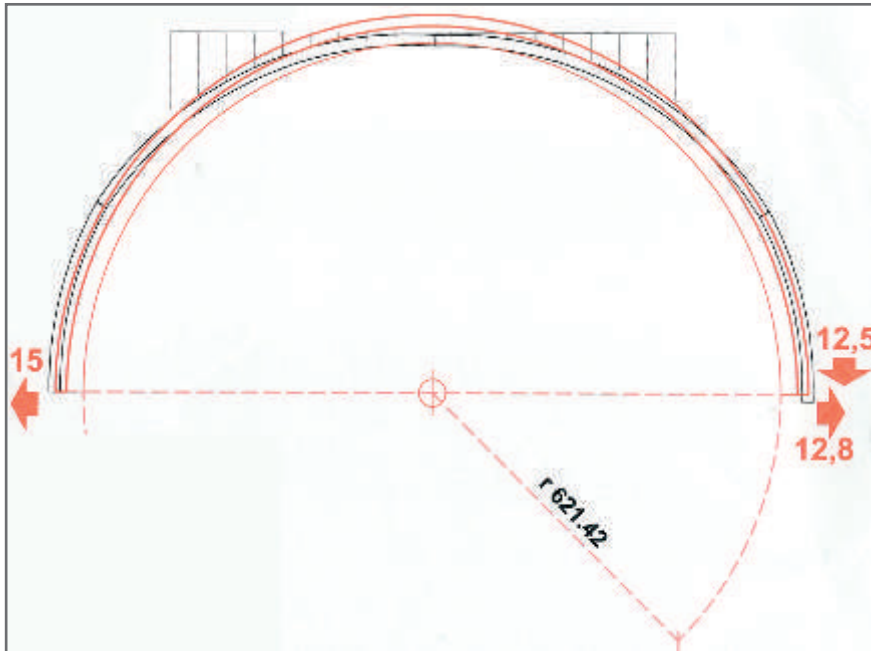


fig.21 ricostruzione della calotta sferica originaria e sue deformazioni

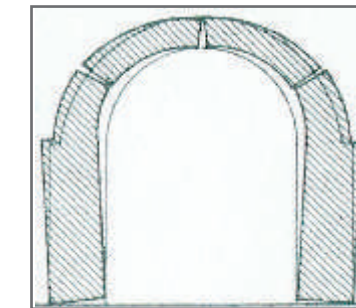
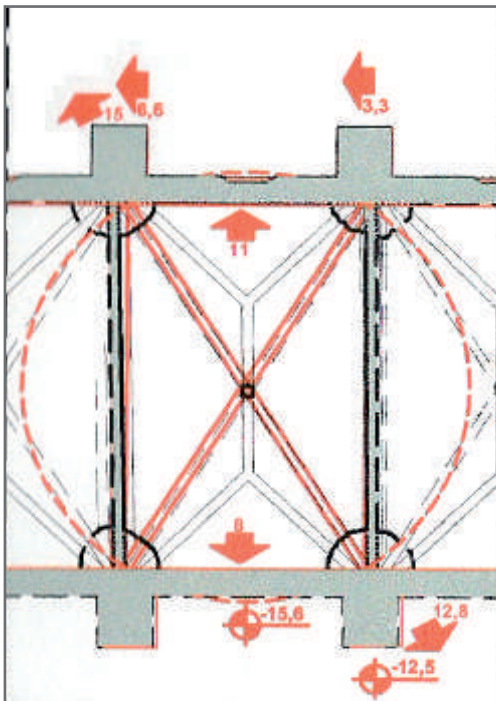


fig. 22 schema rottura arco

fig. 23 campata originaria ipotizzata e suoi movimenti

Le osservazioni conseguite dalla lettura del rilievo sono state poi confermate dalla successiva analisi strutturale.

1.4.2 Lo studio delle deformazioni architettoniche a partire dalle conoscenze geometriche-costruttive-metrologiche

La successione dei movimenti strutturali, emersa dalla lettura analitica del rilievo, trova conferma nella ricostruzione dell'ipotetica configurazione originaria del sistema voltato di copertura, realizzata tramite un modello tridimensionale, e dal suo confronto con il rilievo misurato.

La ricostruzione del modello originario è stata impostata sulla base di considerazioni tipologiche-costruttive e delle soluzioni geometriche delle superfici voltate dell'epoca. La geometria ipotizzata nel progetto di rilievo (calotta sferica e unghie a sesto acuto rialzate) ha trovato riscontro in fase di misurazione e restituzione, confermando la tipologia della volta a stella, nonostante l'apparecchiatura dei mattoni e la presenza dei costoloni diagonali (apparentemente ingiustificati) portassero ugualmente a considerare tale struttura una crociera.

La presenza dei costoloni diagonali a sostegno della porzione sferica centrale trova tuttavia una giustificazione relativamente alla soluzione di problemi costruttivi.

I costoloni, infatti, oltre a svolgere una funzione strutturale nel rispondere a un preciso vincolo di resistenza nelle volte a crociera, venivano introdotti per ridurre la centinatura necessaria a sostenere l'opera durante l'esecuzione e rendere meno onerosa la costruzione.

Il costo della centinatura e la complessità di esecuzione che essa comportava, dovendo essere sufficientemente robusta per sostenere la struttura finché le malte non avessero fatto presa, venivano contenuti entro limiti accettabili costruendo gli archi diagonali (costoloni) che poi servivano come appoggio per la costruzione delle superfici voltate. Questa tecnica, introdotta dagli "architetti romani", era tanto efficiente che le nervature precostituite divennero un elemento fisso delle volte composte nei secoli successivi, comprese le volte a stella⁶.

Nel caso specifico di Monteoliveto, le centine utilizzate per la realizzazione degli archi diagonali, una volta smontate, sono state poi, presumibilmente riutilizzate per la centinatura degli archi a sesto acuto delle unghie trasversali, che, come dimostrato nella ricostruzione dei movimenti strutturali della volta (fig. 20), avevano lo stesso raggio di curvatura. Questo stratagemma era particolarmente utile per la riduzione dei costi del legname per la centinatura.

La ricostruzione tridimensionale del modello originario ipotizzato ha consentito di visualizzare al meglio le deformazioni e i movimenti spaziali subiti dall'edificio nel corso dei secoli.

La definizione del modello geometrico, nell'ipotesi di una volta a vela con unghie a sesto acuto (volta leccese), ha considerato come dato di partenza la lunghezza della diagonale della campata teorica, ottenuta avvicinando i muri laterali per compensare la rotazione degli appoggi e riportare la campata alle dimensioni originarie⁷.

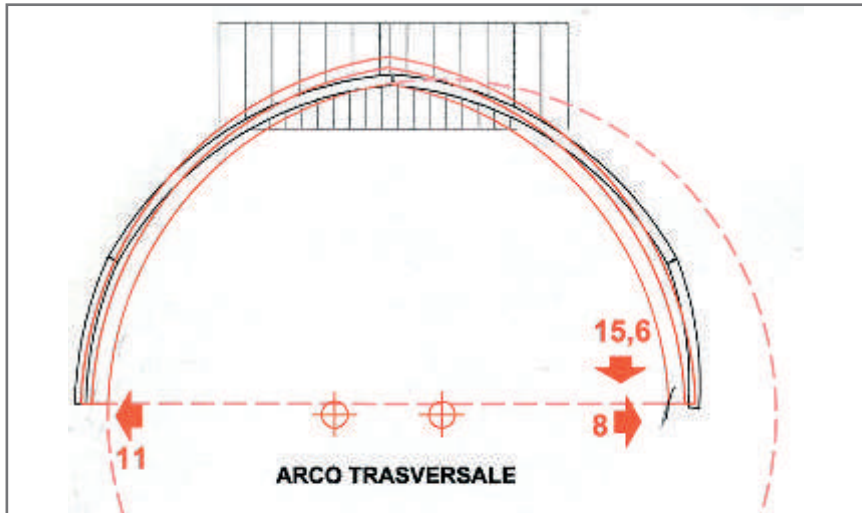


fig.24 ricostruzione dell'arcone trasversale e sue deformazioni

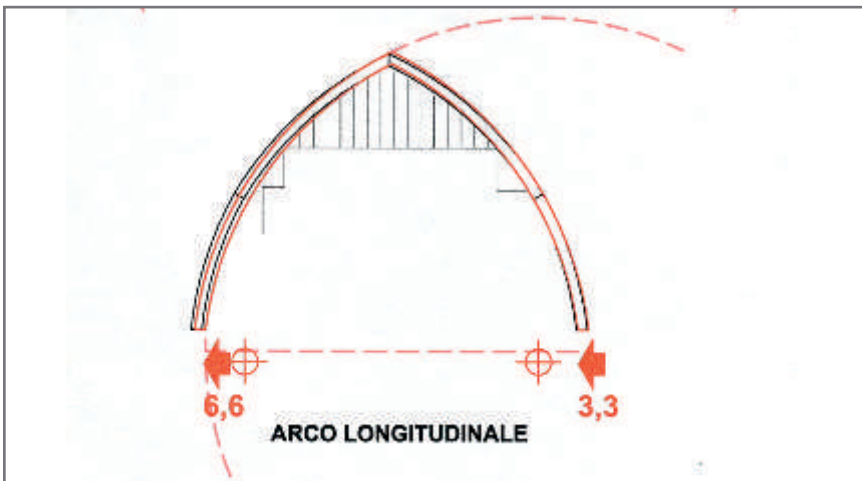


fig.25 ricostruzione dell'arco longitudinale e sue deformazioni

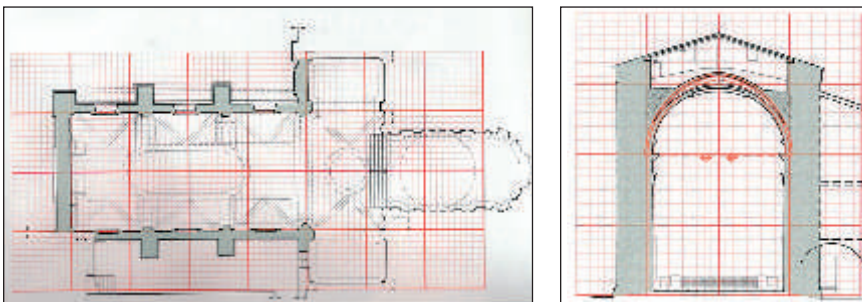


fig.26 verifica metrologica: sovrapposizione con griglia metrica da braccio senese a terra

Il raggio di curvatura della calotta sferica è stato dunque individuato nella misura di ml.6,51, pari a un diametro di ml.13,02 (equivalente a 23 $\frac{2}{3}$ braccia senesi) (fig.,21). Il modello geometrico della calotta sferica (ricostruita) è stato quindi sottoposto alle deformazioni teoriche causate dai cedimenti fondativi ipotizzati dagli strutturisti: movimenti derivati da un'asimmetria dei carichi, da una non uniforme distribuzione delle tensioni sul terreno al punto da indurre una rotazione delle pareti, alla base delle stesse.

In questo senso, la rotazione delle pareti determinerebbe lesioni ad eventuali strutture ad arco, con allargamenti all'intradosso (in corrispondenza della chiave), all'estradosso (in corrispondenza delle reni) ed un evidente abbassamento dei conci in chiave⁸ (fig.22).

La calotta sferica (compresi i sottostanti costoloni), deformata in seguito ai movimenti strutturali ipotizzati⁹ e secondo le modalità teorizzate dagli strutturisti, è risultata compatibile con quella misurata, confermando in tal senso la correttezza della teorica costruzione originaria (fig.23).

Il raggio di curvatura teorico dell'intradosso dei costoloni diagonali (pari a ml. 6,21), corrispondente nella pratica costruttiva a quello della centina, è stato quindi utilizzato per la ricostruzione dell'arco trasversale di sostegno posto tra la I e II campata coerentemente con la necessità dei costruttori gotici di ridurre gli oneri per la realizzazione delle centine.

In questo senso, il raggio della centina è stato riportato sulla luce trasversale (della campata originaria)¹⁰ e traslato di una distanza pari a 30 cm. corrispondente allo spessore del costolone trasversale e per la costruzione del quale la centina era stata reimpiegata (fig.24).

L'arco trasversale è stato quindi deformato, sulla base delle modalità indicate dagli strutturisti e delle informazioni metriche ricavate dal rilievo¹¹ risultando ancora una volta compatibile al modello geometrico misurato.

La medesima operazione è stata eseguita, con gli stessi risultati, sull'arco longitudinale posto sulle pareti laterali della chiesa (fig.25).

La ricostruzione del modello geometrico originario, ha consentito di trovare il posizionamento dei centri delle superfici voltate individuando la quota di imposta ad una quota prossima a quella dei capitelli attuali.

Il riscontro di tali misure, ostacolato dai riempimenti di inerti nell'intercapedine in corrispondenza dell'innesto dei costoloni diagonali, è stato comunque possibile attraverso la verifica metrologica.

Il confronto storico-metrologico con l'unità di misura locale, infatti, ha dato risultati significativi, confermando la validità del modello originario teorico.

L'unità di misura costruttiva è stata individuata nel braccio senese a terra (cm. 55,12), nonostante il quel periodo storico, in area toscana, fossero utilizzate diverse unità di misura quali il braccio fiorentino (cm. 58,36) e il braccio senese¹² (cm. 60,11).

Il riferimento alla misura del braccio senese a terra ricorre nel posizionamento di tutti gli elementi importanti della fabbrica.

Dalla sovrapposizione planimetrica e altimetrica delle griglie metriche realizzate con le sopraccitate unità di misura, si è potuto constatare la regolarità geometrica dell'impianto della navata, pari a 40 braccia di lunghezza e a 20 braccia di larghezza (fig.26).

La singola campata risulta dunque pari a 13 $\frac{1}{3}$ braccia di larghezza per 20 braccia di

lunghezza e per 20 braccia di altezza (misurata in corrispondenza del portale principale ovvero ad abbassamento avvenuto).

Il rapporto tra la larghezza e la lunghezza della singola campata, pari ad un valore di 0,667, presenta maggiori analogie con la proporzione aurea, piuttosto che con il rapporto 5/7 (0,714) inizialmente ipotizzato¹³.

1.4.3 Compatibilità e congruità degli strumenti

Il rilievo di Monteoliveto ha evidenziato la ricerca di un notevole rigore geometrico nella costruzione realizzato, con ogni probabilità, con preliminari operazioni di tracciamento di derivazione topografica durante la fase costruttiva¹⁴.

Per tracciamento s'intende quel complesso di operazioni che si eseguono sul terreno per posizionare le varie parti dell'opera che si intende realizzare, riportandone in vera grandezza la forma e le dimensioni planimetriche, sia con metodi diretti che indiretti.

Il tracciamento di derivazione topografica (metodo indiretto) prevede l'uso di goniometri, diottrici e longimetri, mediante intersezione in avanti, ma anche di squadri, livelle e filo a piombo, come testimoniato dal già accennato dipinto parietale di Monteoliveto.

Il rilievo strumentale, eseguito in questa occasione, ha sottolineato sia l'utilità sia i limiti operativi dell'uso della stazione totale: in particolare è emersa l'impossibilità di utilizzare tale strumentazione in qualsiasi tipologia di ambiente e la difficoltà di individuare e misurare i punti notevoli delle superfici curve voltate, soprattutto se le linee di continuità non sono chiaramente leggibili.

In quest'ultimo caso, il rilevamento di strutture voltate risulterebbe più agevole mediante l'utilizzo di un laser scanner, ossia tramite un rilievo continuo per il quale la discretizzazione dei punti significativi non è necessaria trattandosi di una misurazione automatizzata, ma nel caso della volta superiore questo non sarebbe stato comunque agevole, per la necessità di effettuare un numero elevato di prese.

Le superfici voltate richiedono, inoltre, in fase di restituzione e dunque anche in fase di misurazione, l'individuazione di linee e punti significativi quali archi e punti d'imposta e linee d'intersezione tra le superfici.

La determinazione di questi elementi non potendo essere attuata mediante l'utilizzo del laser scanner, se non attraverso un infittimento esasperato della nuvola di punti, sottolinea la necessità di avvalersi congiuntamente di strumenti e tecniche del rilievo diretto, o indiretto e l'efficacia del rilievo integrato su sezioni significative preventivamente individuate.

La stazione totale, interfacciandosi allo strumento informatico allo stesso modo del laser scanner, permette un assemblaggio, dei dati acquisiti, senza dubbio più veloce e sicuro rispetto al metodo diretto e ai tradizionali eidotipi, anche se l'esperienza ha dimostrato l'utilità di questi ultimi per la corretta individuazione degli elementi in fase di restituzione.

L'acquisizione tridimensionale digitale, tipica delle attuali tecnologie applicate al rilevamento (stazione totale, laser scanner), consente di operare agevolmente nelle tre dimensioni registrando, di ogni punto, le coordinate spaziali, nel rilevamento come

nella restituzione.

Nella pratica di questa esperienza specifica, il rilevamento architettonico strumentale si è tradotto nella misurazione di un numero limitato di punti utili a ricavare sezioni piane significative, individuate sin dall'inizio per la successiva restituzione grafica.

Il rilevamento e la restituzione si configurano, quindi, ancora come operazioni sostanzialmente bidimensionali nonostante la caratteristica tridimensionalità del rilievo indiretto con la stazione totale.

L'impiego della stazione totale consente di misurare agevolmente punti inaccessibili o difficilmente accessibili (gronde, finestre, ecc), fondamentali nel rilievo dell'architettura, riducendo in tal modo i tempi del rilevamento e migliorando la qualità e l'affidabilità geometrica del rilievo.

Nel rilievo strumentale architettonico, con stazione totale, insistono tuttavia alcune imprecisioni: accidentali (derivati dall'imperfezione della nostra vista) e sistematiche (strumentali)¹⁵, errori tuttavia irrilevanti rispetto a quelli legati all'uso dello strumento e alle caratteristiche dell'architettura.

Nel caso specifico di Monteoliveto, infatti, le tolleranze di misure più significative sono riconducibili all'errore di posizionamento del teodolite sui vertici di stazione e all'errore di collimazione dei punti e dei segnali (errori angolari).

Gli errori di collimazione derivano sostanzialmente dalla difficoltà di collimare esattamente il punto desiderato (punti nascosti) o dalla non perfetta regolarità delle superfici architettoniche. All'interno della navata della chiesa di Monteoliveto, ad esempio, la linea d'imposta della volta barocca risultava nascosta alla vista (e alla collimazione) da una cornice sottostante.

Questi punti sono stati pertanto ricavati, dalla misurazione dei punti al di sotto della cornice e dei punti estremi e superiori della cornice, lasciando un margine d'incertezza, valutato intorno al centimetro e ritenuto ammissibile alla scala dell'architettura.

La stessa irregolarità delle superfici architettoniche, determina una imprecisione nella misurazione dei punti: murature non intonacate e spigoli, quasi sempre arrotondati, presentano, infatti, incertezze dell'ordine di 1-2 centimetri.

In questo senso, il profilo volumetrico esterno della chiesa di Monteoliveto, ricavato in fase di restituzione, ha sottolineato un errore di collimazione nell'ordine del centimetro: imprecisione derivata dalla irregolarità dalla deformazione del materiale costruttivo (legno) utilizzato per la realizzazione della copertura.

L'errore di messa in stazione, inversamente proporzionale alla distanza del punto da collimare, è stato risolto mediante la definizione dei vertici della poligonale con segnali fissi costituiti da treppiedi, prismi e basette e dunque con il centramento forzato¹⁶.

Il rilievo, attraverso il confronto con gli elementi che hanno mantenuto la loro posizione originale, ha permesso di individuare le deformazioni subite dalle strutture e ricostruire la successione di movimenti che hanno determinato la perdita della geometria originaria delle volte.

I punti rilevati con la stazione totale sono stati restituiti nello spazio e poi integrati con quelli del rilievo diretto, la maggior parte dei quali presi e riferiti a piani ausiliari (sezione gobba e piano catene) successivamente collegati alla nuvola di punti topografici.

Tutto ciò a dimostrazione del fatto che nell'architettura non esiste un metodo di rilevamento univoco, uno migliore di un altro; esistono vari tipi di rilievo, eseguiti sulla base di concetti e tecniche diverse e tutti validi, compresi i metodi di misurazione del passato.

Note

¹ Convenzione del 2003 tra il Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura e la Soprintendenza ai Beni Architettonici della Provincia di Siena:

“Rilievi, prove in situ, analisi strutturale e collaborazione nella redazione del progetto di consolidamento delle strutture di copertura della Chiesa dell'abbazia di Monte Oliveto Maggiore (SI)”

² Un affresco parietale presente nel chiostro adiacente alla chiesa raffigura i monaci con il filo a piombo durante la costruzione dell'abbazia.

³ Studi condotti nell'ambito del rilievo della camera di San Paolo (PR)

⁴ Stazione totale TRIMBLE tipo TRM 5605 DR 200+. Sono stati inoltre utilizzati :

- livello ottico TECNIX tipo AB 20
- squadro ottico autolivellante TECNIX Pentalevel
- misuratori laser tipo Disto Classic leika
- fotocamera digitale OLIMPUS C -2000 z
- strumenti tradizionali del rilievo diretto.

⁵ La volta superiore ha uno spessore costante di 20 cm. ed è realizzata con pezzi laterizi da cm. 20x24 disposti in filari paralleli o leggermente divergenti; la volta inferiore ha uno spessore di circa 8 cm ed è realizzata con mattoni in folio apparecchiati a spina di pesce e intonacati all'intradosso. Lo spessore esiguo della volta inferiore, unita alle difficoltà di lavoro nell'intercapedine, ha indotto a ridurre al minimo il prelievo delle misure all'interno del vano, nelle quali è stato necessario coinvolgere 3 persone contemporaneamente.

⁶ Cfr. Boaga Giorgio, *Corso di tecnologia delle costruzioni*, Calderoni, pag. 40

⁷ 11 cm sulla parete nord e 8 cm su quella sud.

⁸ Cfr. Boaga Giorgio, op. cit. in nota n°6, pag. 22

⁹ Abbassamento pari a cm.12,5 sulla parete a sud; allargamento della luce di cm.15 e cm.12,8 rispettivamente sulla parete nord e sud.

¹⁰ Anche in questo caso sono stati detratti i 19 cm. conseguenti all'apertura verso l'esterno delle pareti laterali.

¹¹ Abbassamento di cm.15,6 in corrispondenza della parete sud, allargamento della luce pari a cm.11 e cm.8 rispettivamente sulla parete nord e sud

¹² Cfr. Martini A., *Manuale di metrologia*, Torino 1883, pagg. 206-207

¹³ La predilezione per l'espressione numerica esatta portò a sostituire i rapporti geometrici di grandezze incommensurabili (vedi proporzione aurea) con rapporti approssimati dal punto di vista geometrico, ma espressi da numeri interi: il rapporto tra lato e diagonale del quadrato, ad esempio (1:√2), è stato sostituito dal rapporto 10:14 (5:7).

¹⁴ Metodo riportato da Villard de Honnecourt “dell'uovo e della pera” per l'individuazione di punti inaccessibili.

¹⁵ Stazione Trimble 5605 DR 200+: precisione angolare 5"/1,5 mgon; precisione distanze 2mm + 2ppm

¹⁶ Il centramento forzato è stato descritto nell'appendice A

Capitolo 2

Spazio fisico e spazio teorico: la geometria delle piazze medievali a Parma

2.1 Finalità del rilievo e caratteristiche dell'architettura: lo spazio urbano

Il rilievo delle due principali piazze della città di Parma, piazza del Duomo e Garibaldi (figg.1-2) è stato condotto al fine di analizzare i rapporti geometrico-proporzionali dell'invaso delle piazze medievali italiane del dodicesimo e tredicesimo secolo.

Piazza Garibaldi e piazza del Duomo sono state individuate come casi esemplari in virtù del comprovato ruolo civico e religioso assunto all'interno della città storica comunale (XIII sec.) e delle caratteristiche formali medievali derivate dalla realizzazione degli edifici rappresentativi ¹ costruiti per tali funzioni.

Anche questa esperienza si è rivelata un'occasione significativa per la verifica dell'utilizzo degli strumenti di misurazione indiretta, della stazione totale in particolare, nel rilevamento delle superfici dell'architettura a scala urbana.

Il rilievo è stato commissionato per verificare l'esistenza di geometrie progettuali di riferimento nella disposizione degli edifici e nell'articolazione dei fronti prospicienti le piazze, ovvero l'esistenza di un modello ideale preliminare definito geometricamente, sia nell'impianto planimetrico sia nell'alzato degli edifici.

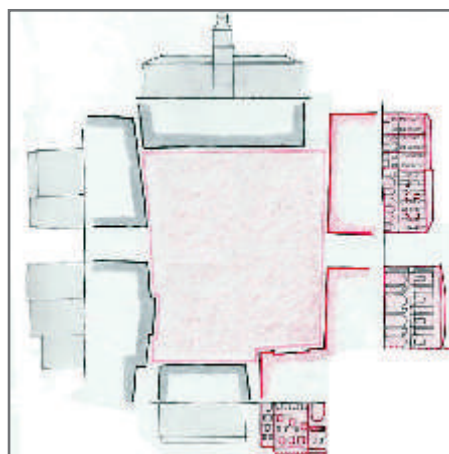


fig.1 Piazza Garibaldi: foto dall'alto e schizzo illustrante la finalità del rilievo

Lo studio ha riguardato, quindi, la ricerca delle regole geometrico-compositive sottese all'atto della fondazione delle due piazze, a partire dalla ricostruzione della genesi urbana e delle trasformazioni subite nel tempo da tali spazi.

In questo senso, la prima operazione è stata rivolta al riconoscimento degli elementi originali residui della piazza medievale, e all'individuazione degli elementi più significativi ai fini del rilievo.

L'individuazione delle regole geometriche e progettuali si è resa, tuttavia, piuttosto complessa, soprattutto nel caso di Piazza Garibaldi, a causa delle preesistenze architettoniche di epoca romana (foro) che hanno condizionato l'assetto medievale e delle successive trasformazioni della piazza.

L'architettura degli spazi urbani progettati, quali le piazze, per secoli è stata definita dimensionalmente da rapporti armonici proporzionali, controllati in fase progettuale con gli strumenti geometrici del disegno e in fase costruttiva mediante procedimenti di misurazione geometrici e matematici: gli strumenti del rilievo e del tracciamento.

Per questo motivo, la ricerca della geometria dell'impianto medievale delle piazze e delle eventuali leggi compositive progettuali non potevano prescindere da un rilievo geometrico alla scala architettonica del profilo della piazza e dei fronti degli edifici medievali (plano-altimetrico).

La necessità di eseguire un rilievo misurato, più architettonico che urbano, è stata, inoltre, evidenziata dalla mancanza di una documentazione grafica omogenea e geometricamente attendibile, reperita attraverso le fonti iconografiche, e dalla inadeguatezza della cartografia comunale, a scala urbana (rilievo aerofotogrammetrico), che non consentiva la verifica delle ipotesi geometriche considerate.

Il rilievo di un luogo urbano quale può essere una piazza, in considerazione dell'evidente estensione di tali spazi, e dell'impossibilità di accedere fisicamente alla maggior parte dei punti da rilevare, vincola il rilevatore ad utilizzare strumenti di misurazione di tipo indiretto; metodologie di estrema precisione offerte dall'elettronica che consentono di operare a distanza e non a diretto contatto dell'oggetto da rilevare come invece impone la tecnica del rilievo diretto.

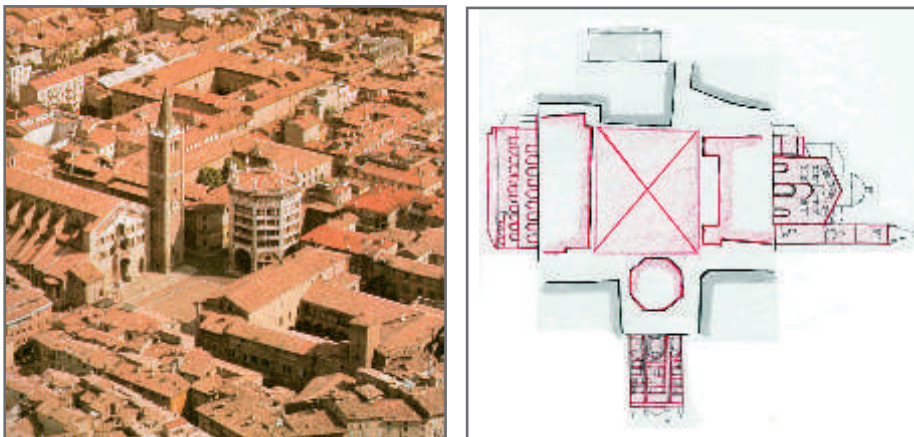


fig.2 Piazza del Duomo: foto dall'alto e schizzo illustrante la finalità del rilievo



fig.3 Impianto castrense di Parma: individuazione del foro romano e ritrovamenti archeologici

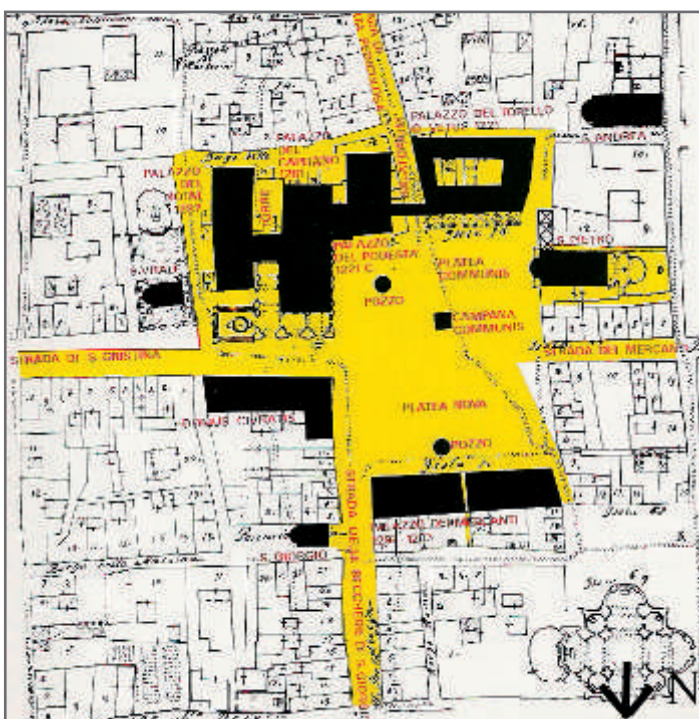


fig.4 Ricostruzione storica degli edifici di piazza Garibaldi



fig.5 Palazzo del Torello (Bondani)



fig.6 Palazzo del Podestà

L'analisi geometrica di Piazza Garibaldi e Piazza del Duomo, quindi, resa possibile mediante misurazione indiretta con stazione totale², ha fornito un'ulteriore occasione per verificare il campo d'uso dello strumento topografico in ambito architettonico.

Dal confronto con il precedente caso di Monteoliveto, nonostante la differente scala architettonica dei casi, è possibile tuttavia evidenziare alcune significative analogie.

Tra queste, la necessità di integrare metodi di misurazione diversi, la difficoltà di individuare i punti a terra più significativi (arredo urbano/ coro ligneo), ma soprattutto la configurazione concava degli spazi (invaso piazze e interno chiesa), che ha favorito la realizzazione del rilievo da un'unica stazione.

2.1.1 Piazza Garibaldi: note storico-architettoniche

Come tutte le città di fondazione romana, Parma ha mantenuto nel cuore del proprio assetto urbano l'impianto castrense (fig.3), caratterizzato dal grande spazio quadrangolare della piazza centrale, luogo d'intersezione dei due assi viari fondamentali dell'insediamento: il cardo e il decumano.

Il decumano insisteva, da est ad ovest, sulle attuali vie Repubblica e via Mazzini, mentre il cardo, da nord a sud, approssimativamente su via Cavour e via Farini passando per il fornice del palazzo comunale che lo divideva in due parti diseguali³.

Attorno a queste grandi direttrici e ai lati della piazza storica, è ancora visibile un tessuto urbano ortogonale, piuttosto regolare.

Secondo gli storici, il foro, che coincideva solo parzialmente con l'attuale Piazza Garibaldi⁴, era delimitato:

- a nord, dal decumano (l'area corrispondente a quello che è oggi il settore settentrionale della piazza risultava edificata);
- a est, dalla chiesa di San Vitale (già esistente nel 974);
- a sud, raggiungeva il fianco della chiesa di Sant'Andrea, sino a coincidere, per un tratto, con l'attuale Borgo della Salina⁵;
- a ovest, dal Capitolium⁶ (sulle cui fondamenta, nel IX sec, è stata costruita, in posizione leggermente aggettante rispetto al limite originario del foro, la chiesa di San Pietro⁷).



fig. 7 Palazzo nuovo del Capitano



fig. 9 Palazzo Fainardi (del Giudice Criminale)



fig. 8 Palazzo del Governatore o dei Mercanti

Nel corso del periodo compreso tra il XII e il XIII secolo la piazza trasforma la sua fisionomia da forum a platea (la piazza del Comune) e intorno ad essa iniziano a svilupparsi i primi palazzi del potere civile della città medievale.

In un'ipotetica ricostruzione storica⁸ (fig.4) delle architetture, a delimitazione di tale spazio, ritroviamo:

- a nord, il decumano,
- a est, il Palazzo Nuovo del Capitano, dove oggi sorge il Palazzo del Comune⁹;
- a sud il Palazzo del Torello (dal nome del podestà dell'epoca) e il Palazzo del Podestà;
- a ovest, la chiesa di San Pietro.

Il Palazzo del Torello (fig.5), la cui forma è parzialmente ricostruibile dall'iconografia storica¹⁰, venne realizzato (nel 1221) sull'area dell'antico foro romano, generando un restringimento del lato sud dell'invaso originario.

Lo stesso avvenne con l'edificazione del Palazzo del Podestà (fig.6), costruito tra il 1221 e il 1240, insieme a un passaggio sopraelevato per il collegamento con il Palazzo del Torello.

L'edificio podestarile originario, rintracciabile oggi in alcune tracce presenti in facciata, può essere ripartito verticalmente in due parti: la prima parte posta sull'angolo con la Strada di Porta Pediculosa (attuale via Farini)¹¹, la seconda, in adiacenza al Palazzo Nuovo del Capitano e leggermente sporgente verso la piazza.

Intorno al 1281, venne realizzato il Palazzo Nuovo del Capitano (fig.7); distrutto nel 1606, in seguito al crollo della torre civica adiacente, e sostituito qualche decennio più tardi, con il grande edificio porticato che ancora oggi ospita alcuni uffici del Comune.



fig. 10 Palazzo del Torello (Bondani) dopo i rifacimenti del Novecento

Con la realizzazione dei palazzi del Torello, del Podestà e del Capitano, la platea risultò alquanto ridimensionata e dunque insufficiente ai bisogni della comunità.

Per questo, il Comune, alla fine del XIII sec., acquistò alcune case poste a nord del decumano allo scopo di demolirle ed ampliare in tal modo la piazza civica.

La demolizione, tuttavia, fu solo parziale, in quanto parte dell'edificato venne preservato per la successiva realizzazione del Palazzo dei Mercanti¹² (fig.8), a delimitazione del lato settentrionale della piazza.

L'ampliamento della piazza civica, a nord del decumano, contribuì a dare visibilità ad un altro importante edificio pubblico e già esistente: il Palazzo del Giudice¹³ Criminale (fig.9), che comprendeva l'intero isolato tra il cardo, il decumano, piazzale Battisti e borgo Sant'Ambrogio.

Piazza Grande rimase sostanzialmente immutata sino al XVIII° sec, quando, lo spostamento dell'ingresso della chiesa di San Pietro sul lato ovest dell'invaso, contribuì alla trasformazione del relativo fronte¹⁴.

Le alterazioni architettoniche più importanti della piazza risalgono, tuttavia, all'inizio del XX° secolo, con la trasformazione di Palazzo Bondani (fig.10), e l'abbattimento dei due edifici nella testata ovest, causato dai bombardamenti aerei del 1945 (fig.11)¹⁵.

2.1.2 Piazza del Duomo: note storico-architettoniche

All'antico foro romano, l'attuale Piazza Garibaldi, sede del potere comunale e civico, si affianca Piazza del Duomo, sede del potere ecclesiastico.

La vicenda di Piazza del Duomo ha inizio con l'invasione longobarda e con lo



fig. 11 edificio all'ingresso di via Mazzini prima e dopo il rifacimento del novecento

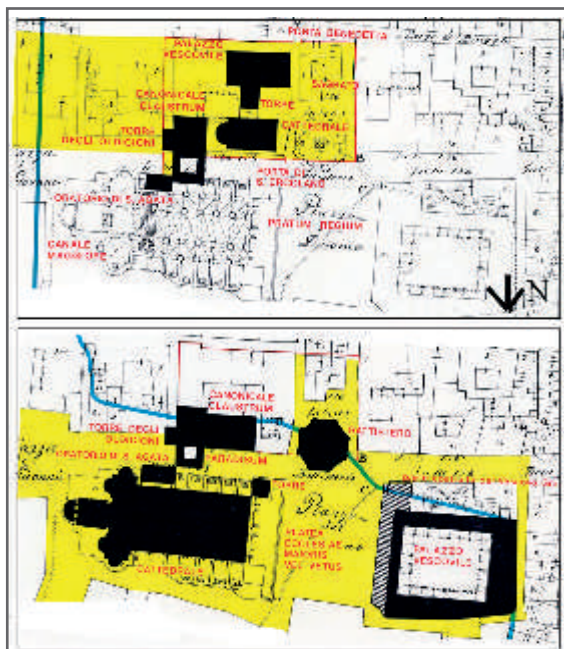


fig. 12 terza e quarta Mater Ecclesia

spostamento dell'antica cattedrale paleocristiana, all'epoca situata nei pressi della chiesa di San Lorenzo (seconda *Mater Ecclesia*), in un'area prossima all'attuale piazza del Duomo.

Ha origine così la terza *Mater Ecclesia* (860-1050 dc), sede del potere religioso, e insediata in un luogo recintato, addossato alle mura urbane settentrionali (fig.12).

L'inadeguatezza della sede vescovile, tuttavia, contribuì alla realizzazione di una nuova *Curtis Regia*, in prossimità della terza *Mater Ecclesia*.

Il primo edificio del complesso della quarta *Mater Ecclesia* fu il Palazzo Vescovile (fig.13), costruito a partire dal 1046 da Cadalo (Vescovo-Conte di Parma dal 1045 al 1072) e terminato intorno al 1055.

Secondo le fonti storiche, l'aspetto del Palazzo Vescovile doveva essere quello di un fortilizio a pianta rettangolare circondato da fossato e corredato da torri¹⁶; configurazione che, già un secolo dopo, venne radicalmente modificata: tra il 1172 e il 1175, con il rifacimento del Vescovo Bernardo¹⁷, e tra il 1232 e il 1234, con gli interventi del Vescovo Grazia.

Quest'ultimo, in particolare, realizzò importanti modifiche al palazzo, ampliandolo verso la platea per una profondità di circa sette metri e facendo costruire una nuova facciata porticata al piano terra. La facciata del Grazia, nonostante gli interventi cinquecenteschi, che hanno determinato la chiusura delle arcate al piano terra, è ancora oggi riconoscibile grazie ai restauri eseguiti all'inizio del XX° secolo.

La costruzione del Duomo (fig.14), venne iniziata intorno al 1090 per essere terminata nel 1178¹⁸: allineata all'andamento dei decumani e, secondo le fonti storiche, ad una distanza di circa sessanta metri dal primo Palazzo Vescovile.

Le modifiche più consistenti si ebbero nel XV secolo, con l'apertura delle cappelle



fig. 13 Palazzo Vescovile



fig. 14 Cattedrale



fig. 15 Battistero

lungo le navate laterali e l'aggiunta delle sagrestie, che inglobarono le absidi laterali. Nel 1196, abbattuti alcuni edifici che da più di un secolo erano sorti intorno alla Porta di Sant'Ercolano (ingresso esterno alla terza *Mater Ecclesia*), venne iniziata la costruzione del Battistero (fig.15) sul progetto di Benedetto Antelami che ne diresse la costruzione tra il 1196 e il 1216.

Il progetto originale prevedeva una struttura a pianta esterna ottagonale¹⁹, con un alto basamento nel quale erano inserite tre porte e quattro ordini di gallerie architravate con una fascia terminale ad archetti ciechi.

La configurazione originaria del Battistero venne modificata solamente tra la fine del XIII° secolo e i primi anni del XIV°, con l'inserimento, all'ultimo piano di una balaustra e di alcune edicole.

Nel 1221, Piazza del Duomo²⁰, era dunque delimitata:

- a nord, con le case dei Marsili, degli Ubaldini degli Oldicioni, ecc.;
- a est, con la Cattedrale;
- a sud, con il Battistero, le case dei Granoni e degli Adami (Palazzo Dalla Rosa Prati);
- a ovest, con il Palazzo del Vescovo.

2.2 La ricerca delle matrici progettuali: gli elementi della conoscenza

Da sempre connesso all'architettura e alla rappresentazione in scala, il disegno permette di rappresentare sia uno spazio presente nella mente dell'autore (progetto), sia uno spazio costruito ed esistente, attraverso il disegno di rilievo.

Nel caso specifico del rilievo, il disegno assume il duplice ruolo di strumento di rappresentazione e di ricerca.

Quest'ultima considerazione, unitamente alla relazione esistente tra progetto e rilievo, consente di individuare nel disegno lo strumento utile a comprendere le matrici progettuali e le regole geometriche, che il progettista pone alla base della composizione architettonica.

L'analisi grafica, associata al disegno di rilievo, può infatti rendere evidente ciò che non si percepisce in modo immediato, né con la visione diretta, né in una rappresentazione

bidimensionale, e costituisce un procedimento razionale che consente di rintracciare le matrici progettuali, i rapporti proporzionali e le caratteristiche compositive di un'architettura.

Questo comporta una conoscenza approfondita dell'oggetto, basata sulla integrazione di informazioni relative alla geometria (rilievo misurato), all'evoluzione storica e ai riferimenti geometrico-progettuali dell'epoca

La ricostruzione e l'analisi delle regole geometriche-compositive sottese all'atto della fondazione delle due piazze, non poteva dunque prescindere da uno studio preliminare relativo ai canoni proporzionali utilizzati nell'architettura antica (appendice C) e alla conoscenza dei sistemi di misurazione, delle unità di misura adottate in fase costruttiva.

La lettura metrologica²¹, infatti, costituisce un importante strumento di rilievo in quanto permette sia un'individuazione più immediata dei punti significativi da misurare sia la verifica dell'analisi grafica effettuata.

Fin dall'antichità, per realizzare le proprie opere architettoniche, l'uomo ha utilizzato strumenti mensuri adeguati, per il tracciamento ed il controllo geometrico in fase esecutiva.

Per questo, la conoscenza del sistema di misura e del metodo di misurazione adottato in fase progettuale ed esecutiva si rivelano necessari al fine della ricerca delle matrici geometriche progettuali dell'architettura.

A distanza di tempo e in luoghi diversi, le civiltà hanno adoperato unità di misura differenti tali da aver prodotto peculiarità dimensionali e proporzionali specifiche (fig.16). Le unità di misura impiegate precedentemente all'adozione del sistema metrico decimale²² erano organizzate in multipli e sottomultipli di 3,4,12, ecc., ovvero in numeri interi in grado di consentire sia la tripartizione che la divisione in parti pari. Questo aspetto condiziona notevolmente l'analisi geometrica dell'architettura antica e medievale richiedendo l'individuazione dell'unità di misura adottata all'epoca della costruzione al fine di rintracciare i numeri (interi) alla base della logica progettuale e costruttiva.

Lo studio geometrico dimensionale di uno spazio urbano richiede, inoltre, alcune considerazioni preliminari riguardo al disegno centuriario romano (misure romane)²³, e al condizionamento che questo ebbe sui tessuti urbani di molte città italiane.

La centuriazione, ovvero la suddivisione del territorio in centurie dalla quale aveva origine la pianificazione urbanistica delle colonie romane di nuova fondazione, presupponeva l'utilizzo della groma, da parte degli agrimensori romani (gromatici), per il tracciamento dei principali assi viari ortogonali: il decumano massimo (orientato da est a ovest secondo il percorso del Sole) e il cardo massimo (orientato da nord a sud, secondo l'asse dell'universo) (fig.17)²⁴.

La relazione tra misura e controllo costruttivo, contenuta nella centuriazione, ha sottolineato nella ricerca delle matrici progettuali di Piazza Garibaldi, in quanto spazio urbano di derivazione romana, la necessità di individuare il tracciamento urbano originario al quale ricondurre i "capisaldi" del rilievo architettonico misurato.

TRA STAZIONE TOTALE E LASER SCANNER

ambiti e soglie di applicazione degli strumenti a raggio laser nel rilievo indiretto dell'architettura storica

Egitto	1 cubito (52,36 cm) = 7 palmi x 4 digiti, poi 6 palmi x 4 digiti 1 cubito = 1,5 piedi
Mesopotamia	1 cubito = 1,5 piedi = 8 palmi
Perizia	1 piede = 3/8 cubito egizio
Giudea	1 piede = 4 palmi x 4 digiti 1 cubito = 1,5 piedi = 6 palmi 1 staba = 600 piedi cubo romeo = 37,75 cm cubo attico = 29,6 cm piede olimpico = 29,6 cm piede persico = 32,6 cm
Roma antica	1 piede (29,59 cm) = 4 palmi x 4 digiti o 4 palmi x 3 pollici 1 pertica (decempeda) = 10 piedi 1 milia = 500 pertiche 1 staba = 120 x 120 piedi 1 jugero = 120 x 240 piedi 1 sedda = 240 x 240 piedi 1 centuria = 240 x 240 pertiche
Firenze	1 braccio agrimensorio (56,19 cm) = 20 pollici x 12 diti (fino al medioevo) 1 canna agrimensoria = 5 piedi 1 braccio da muro (58,36 cm) = 14 di canne ferate
Roma	1 palma (25,34) = 1/10 canna architettonica 1 canna = 10 canne
Biologna	1 piede agrimensorio = 38 cm
Modena	1 braccio agrimensorio = 52,3 cm
Ragusa (Famila)	1 braccio agrimensorio = 54,51 cm
Pavia	1 braccio da legno e da muro (piede) = 51,31 cm 1 pertica = 6 piedi
Fiorenza	1 braccio da muro = 46,95 cm
Vienna	1 piede (0,43 cm) = 12 oncie 1 braccio = 6 piedi

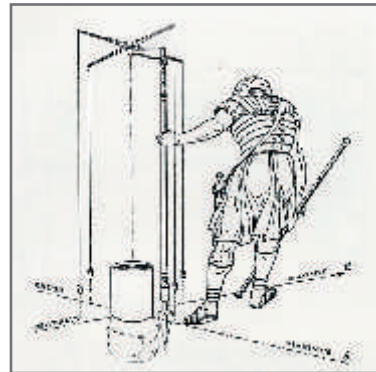


fig. 17 individuazione del cardo e decumano mediante groma

fig. 16 unità di misura adottate prima dell'introduzione del sistema metrico decimale

2.3 Misurazione: metodologie e problematiche

Il rilevamento dell'architettura di uno spazio urbano e la conseguente difficoltà nella misurazione di punti visibili, ma inaccessibili, presuppone l'utilizzo di strumenti e tecniche di tipo indiretto.

Per questo, il rilievo delle due piazze è stato eseguito utilizzando un teodolite elettronico dotato di un distanziometro a raggio laser capace di operare anche senza prisma riflettente, ovvero sfruttando la riflessione propria della superficie collimata.

La fase iniziale del rilevamento ha riguardato la programmazione delle operazioni di misurazione e la scelta dei punti caratteristici, ovvero di quelli utili a individuare le linee costruttive dalle quali si è sviluppato il controllo geometrico in fase costruttiva.

Questo ha comportato una preventiva formulazione di ipotesi di regolarità delle forme; una selezione di punti che pone il rilevatore davanti a scelte strategiche, tali per cui si possa parlare di "soggettività del rilievo", e che risulta strettamente correlata alla scala di rappresentazione nella quale deve essere restituito il rilievo.

Considerata la finalità del rilievo (analisi geometrica architettonica dell'invaso), le dimensioni spaziali delle piazze e nell'ipotesi di una rappresentazione grafica in scala 1:250, sono stati scelti, quali punti significativi di ogni edificio, i due punti estremi degli attacchi a terra, delle gronde dei tetti, nonché la posizione dei marcapiani, ma anche delle cornici e delle aperture nel caso degli edifici di impianto medievale (fig. 18).

La programmazione del rilievo presuppone inoltre l'individuazione del posizionamento ottimale del teodolite (punto di stazione), che deve essere eseguito in funzione dell'accesso visivo migliore al monumento, per effettuare le misurazioni su tutto il corpo di fabbrica ed evitare, per quanto possibile, eventuali spostamenti di stazione. Questo comporta una verifica sia a livello planimetrico che altimetrico, in quanto,

nel caso di edifici estremamente alti, quali possono essere torri e campanili, se il cannocchiale assume inclinazioni prossime ai 60-70°, la collimazione risulta maggiormente complessa.

Nel rilevamento di spazi urbani concavi quali sono le piazze, il posizionamento teorico più idoneo del teodolite è il punto centrale dell'invaso, previsto dal metodo per irraggiamento e mediante il quale le battute verso i punti sono effettuate da un'unica stazione.

Nel rilevamento di Piazza Garibaldi, il posizionamento centrale della stazione non è stato possibile, sia a causa del traffico veicolare lungo via Mazzini-via Repubblica sia a causa della presenza di alcune strutture temporanee di esercizio commerciale (edicole, bar) che ostacolavano la collimazione di punti a terra significativi per la definizione planimetrica dell'invaso (fig.19).

Relativamente a Piazza del Duomo, invece, il posizionamento centrale della stazione non ha avuto alcuna impedito, ma la misurazione dei punti più alti del campanile (posti ad un'altezza di circa 63 ml.) ha reso necessario l'individuazione di un'ulteriore stazione e lo spostamento del teodolite nell'antistante via del Duomo (fig.20), al fine di ridurre l'angolo visuale.

Definiti i punti significativi ed il metodo di misurazione più idoneo si è provveduto alla realizzazione degli eidotipi, ovvero degli schizzi geometrici sui quali delineare lo schema delle grandezze da conoscere, isolando le caratteristiche e le proprietà più significative dell'oggetto.

L'eidotipo deve essere completo e fedele nel riportare tutti quegli elementi e quelle indicazioni che permettono di individuare e descrivere i punti misurati.

In questa logica, e per una migliore organizzazione in fase di misurazione oltreché nella successiva fase restituiva, sono stati indicati con una diversa numerazione i punti misurati con l'utilizzo del prisma (punti a terra) da quelli senza.

Le condizioni di rilievo, la presenza di arredo urbano, di pluviali, di spigoli danneggiati e usurati nonché di cornicioni aggettanti, che ostacolavano la collimazione di alcuni punti significativi, hanno contribuito a rendere disagevole la determinazione geometrica dell'intero perimetro dell'invaso e dei singoli fronti. L'acquisizione di questi dati, la ricostruzione della loro posizione è stata tuttavia possibile a partire dal rilievo di punti corrispondenti e dal riscontro con la cartografia esistente.

La misurazione delle distanze è avvenuta sfruttando la doppia modalità offerta dallo strumento: con il riflettore, per il rilevamento dei punti a terra degli edifici altrimenti poco riconoscibili; senza, per i punti più alti delle facciate.

Nel complesso è stata rilevata la posizione topografica di 310 punti in Piazza Garibaldi, e 390 in piazza del Duomo, dove gli edifici medievali sono più numerosi.

La quantità dei punti misurati, non particolarmente rilevante, è stata pianificata sulla base dei rilievi diretti e fotoraddrizzamenti²⁵ disponibili ed acquisiti in altre circostanze.

In questo modo è stato creato uno scheletro topografico di riferimento che, mediante l'integrazione dei rilievi di cui sopra, ha permesso di ricostruire con buona approssimazione la forma attuale della planimetria delle due piazze e dei fronti dei singoli edifici che vi si affacciano.

2.4 Restituzione grafica: metodologie e problematiche

La rappresentazione dell'architettura, sia di rilievo sia di progetto, è avvenuta per oltre cinquecento anni secondo una procedura consolidata che prevedeva la trascrizione dell'idea o del reale su supporto cartaceo a mezzo di un segno riportato a matita o, quando le necessità lo imponevano, attraverso l'impiego dei plastici.

Le nuove tecnologie informatiche applicate alla rappresentazione costituiscono oggi uno strumento estremamente efficace per la comprensione e l'analisi di qualsiasi manufatto edilizio in quanto permettono sia la rappresentazione bidimensionale del disegno sia quella tridimensionale del modello plastico.

La flessibilità del materiale infografico, inoltre, offre la possibilità di sovrapporre contemporaneamente informazioni differenti attraverso l'accensione (o spegnimento) dei layer, rendendo più agevole sia la lettura sia la verifica delle ipotesi considerate in uno studio grafico-geometrico.

I problemi geometrici possono essere dunque affrontati e verificati tramite il disegno automatico, riproponendo anche in questo caso il disegno come tecnica autonoma di ricerca²⁶.

L'acquisizione dei dati topografici ha consentito di individuare il profilo planimetrico delle singole piazze, verificare la reale consistenza e posizione degli edifici circostanti evidenziando, da subito, la parziale sovrapposibilità con la cartografia esistente.

Quest'ultima, infatti, trattandosi di un elaborato ricavato da un rilievo aereofotogrammetrico (di un ridisegno), presentava alcune incongruità con il rilievo strumentale, determinato, con ogni probabilità, dalla difficoltà di individuare, da una foto aerea, l'esatta posizione degli attacchi a terra degli edifici.

Il rilievo strumentale, unitamente all'integrazione dei raddrizzamenti fotografici e dei rilievi diretti, ha consentito tuttavia una rappresentazione apprezzabile e immediatamente riconoscibile dei prospetti dei singoli edifici.

In considerazione delle dimensioni degli oggetti rilevati e della finalità per cui il rilievo è stato eseguito, la scala prescelta per la restituzione finale è stata la riduzione 1:250, sufficiente a garantire sia il controllo dell'intorno urbano sia una sufficiente leggibilità delle forme dell'architettura.

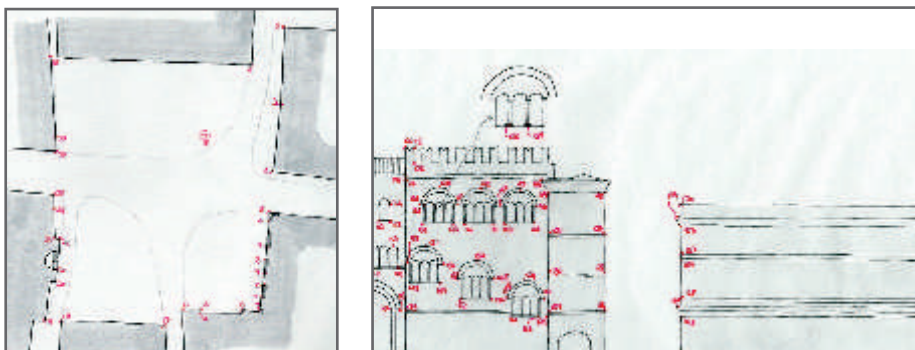


fig. 18 eidotipi topografici di Piazza Garibaldi: discretizzazione planimetrica e degli alzati

2.5 Rilievo

2.5.1 Lettura del rilievo

Sulla base delle conoscenze geometriche e metrologiche, delle informazioni storiche e del rilievo architettonico misurato delle due piazze è stato possibile ricostruire la geometria e l'idea progettuale originaria di questi spazi.

Nel caso specifico di Piazza Garibaldi, la ricerca delle matrici progettuali è stata realizzata a partire dall'individuazione degli allineamenti (griglie) della città romana, nonostante la difficoltà di ricostruire l'esatta perimetrazione delle mura di Parma in epoca tardomana.

Relativamente alla perimetrazione urbana, secondo alcuni studiosi²⁷, l'ipotesi più probabile è che questa coincidesse a ovest con via Oberdan – Carducci, a est con via Cairoli-XXII Luglio, a sud con borgo Riccio e a nord con borgo Angelo Mazza.

Il limite settentrionale della città sarebbe stato confermato²⁸, recentemente, dal ritrovamento (1965) di un blocco di oltre sette metri di spessore, all'angolo tra borgo Angelo Mazza e vicolo dell'Assistenza.

Accreditando tale ipotesi e a partire dalla conoscenza dell'unità di misura in vigore all'epoca, il piede romano (29,56 cm), sono stati ipotizzati gli allineamenti dell'antica centuriazione (un impianto ortogonale di circa 40 pertiche, pari a 118,24 ml.) e la probabile perimetrazione dell'invaso dell'antico foro romano, da cui ha avuto origine l'attuale piazza Garibaldi (fig.21).

La sovrapposizione di una griglia metrica (imposta sul piede romano) alla cartografia di base e al rilievo eseguito avrebbe individuato un involucro morfologicamente corrispondente ad un rettangolo aureo²⁹, confermando la perimetrazione del foro indicata dagli storici (fig.22):

- a nord, il decumano;
- a ovest, il Capitolium;

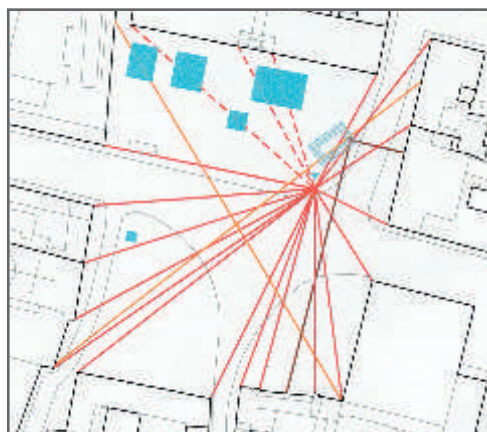


fig. 19 progetto di rilievo di Piazza Garibaldi

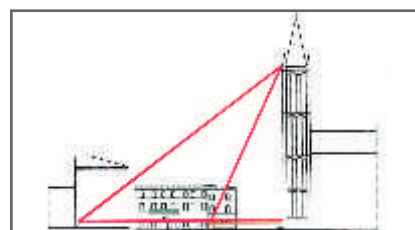


fig. 20 progetto di rilievo di Piazza Duomo

- a sud il rettilineo individuato dal fianco della chiesa di Sant'Andrea e di un tratto di borgo della Salina;

- a est, il limite risulta più incerto; nessun ritrovamento romano, infatti, attesta che la chiesa di San Vitale individuasse esattamente il limite orientale dell'invaso.

Il rettangolo aureo, individuato sulla base di queste considerazioni, trova riscontro in un quadrato di dimensioni pari a 2 iugeri³⁰, ovvero a 2 rettangoli di valore pari a 12x24 pertiche, per un totale di ml.70,94x70,94.

Valore, quest'ultimo, che corrisponde approssimativamente al segmento aureo della centuriazione ipotizzata e dunque a 118,24x0,618.

Gli accorgimenti geometrico-compositivi individuati e ipotizzati nell'impianto dell'invaso di epoca romana, tuttavia, non hanno trovato alcun riscontro nella platea medievale.

Al contrario di Piazza Garibaldi, Piazza del Duomo presenta una configurazione abbastanza regolare ed equilibrata, nonostante gli edifici che la definiscono siano stati realizzati in tempi diversi.

Per l'analisi grafica di piazza del Duomo, oltre al rilievo topografico, che ha permesso di definire le esatte dimensioni dell'impianto attuale, un contributo importante è stato offerto dai rilievi dei singoli edifici (diretto) e dalle fonti storiche relative.

Nel caso specifico, la ricerca delle matrici progettuali ha trovato fondamento nelle informazioni storiche relative al Vescovado, il primo edificio della IV Mater Ecclesia, e, in particolare, nell'individuazione dell'arretramento del fronte principale, tra l'altro confermato dal rilievo diretto.

Il Vescovado, il primo edificio realizzato a definizione di piazza del Duomo, infatti, aveva dimensioni inferiori rispetto all'impianto planimetrico attuale; il rilievo diretto del palazzo confermerebbe quanto riportato dalle fonti storiche, individuando un ampliamento e dunque un arretramento di circa 7 ml. del fronte principale originario, rispetto a quello attuale (fig.23).

La sovrapposizione della griglia metrica alla planimetria dell'invaso confermerebbe un'altra notizia riportata dalle fonti storiche dell'epoca, secondo la quale il Duomo sarebbe stato costruito a circa sessanta metri ³¹ (equivalenti a 20 pertiche romane) rispetto al fronte originario del Vescovado (fig.24).

Il prolungamento della stessa griglia ha inoltre evidenziato, sulla base grafica dei rilievi, le dimensioni della Cattedrale e, in particolare, della larghezza precedente agli interventi di ampliamento del XV secolo, corrispondente a circa 10 pertiche (29,56 ml.).

La presenza del numero dieci e del numero venti, riscontrata nel rilievo di Piazza Duomo, dunque, non sembra essere casuale.

Se il dieci, in tutte le epoche, era associato al numero sacro, il venti in epoca medievale era attribuito di un significato molto importante in quanto nell'esegesi cristiana indicava il numero delle opere della Creazione, dei libri dell'Antico Testamento e delle Virtù di Cristo.

Il tracciamento di un quadrato di lato pari a 20 pertiche, a partire dal fronte principale del Vescovado, del Duomo e del Battistero, e la corrispondenza tra l'edificato esistente sul lato nord della piazza con la delimitazione ipotizzata ha sottolineato la presenza di una precisa matrice geometrica nel disegno progettuale.

La posizione del Battistero rispetto all'ipotizzato quadrilatero risulta tuttavia piuttosto ambigua: il fronte principale del Battistero si trova infatti a 10 pertiche di distanza rispetto all'asse centrale del Duomo, ma quello in corrispondenza dell'ingresso del Battistero si trova ad una distanza di circa ml.3,46 rispetto la linea mediana del quadrato.

Secondo alcune³² tesi la localizzazione del monumento antelamico sarebbe stata condizionata dal preesistente tracciato del Canale Maggiore, che attraversava da nord a sud la città in adiacenza al lato est del quadrilatero tardo romano.

In questa ipotesi, il canale, giunto al limite settentrionale della città altomedievale, avrebbe sfruttato il preesistente tracciato delle fosse antistanti le difese romane per un breve tratto per poi ripiegare e congiungersi con il canale comune (fig.25).

Sul tracciato del canale si sarebbe edificato il Battistero.

Per altri³³, il Canale Maggiore sarebbe stato deviato sotto il Battistero solo in un secondo momento, mentre originariamente avrebbe seguito parallelamente il Canale Comune.

Il fatto che il Canale Maggiore non pieghi verso il Battistero alla fine dell'attuale via Cairoli, ma leggermente prima, per poi dirigersi con una ulteriore curvatura verso la sede vescovile, confermerebbe che la linea delle antiche fosse di difesa non coincidesse esattamente con l'asse via Duomo –via Cardinal Ferrari come ipotizzato da alcuni studiosi, ma fosse poco più a sud, in corrispondenza dell'allineamento via Angelo Mazza–borgo San Biagio.

2.5.2 Compatibilità e congruità degli strumenti

In relazione al rigore geometrico impiegato nel tracciamento dell'invaso delle piazze in fase esecutiva, mentre nel Foro Romano e in Piazza del Duomo è possibile ipotizzare l'utilizzo di strumenti di misurazione indiretta nell'impostazione dell'impianto urbano, nella Platea Civica medievale invece la sola ipotesi ammissibile è che tali strumenti siano stati utilizzati limitatamente alla costruzione dei singoli edifici.

La convenzione stipulata prevedeva la realizzazione di una planimetria (a terra) dell'invaso e la definizione dei fronti degli edifici adiacenti ovvero rappresentazioni bidimensionali.

In fase di restituzione, la non perfetta ortogonalità riscontrata nell'andamento planimetrico degli invasi e dei fronti degli edifici è stata risolta mediante proiezione su piani preventivamente definiti.

La misurazione tridimensionale con stazione totale, dunque, ha trovato riscontro in rappresentazioni grafiche bidimensionali, nonostante la mancanza di una preventiva definizione di piani di misurazione tipica della concezione tradizionale del rilievo,

Le maggiori imprecisioni, riscontrate nel rilievo delle due piazze, hanno riguardato la collimazione di elementi troppo sfuggenti, conseguente in alcuni casi al metodo di misurazione impiegato (irraggiamento), ma soprattutto la difficoltà, peraltro già riscontrata in Monteoliveto, di individuare con precisione i punti significativi del rilievo.

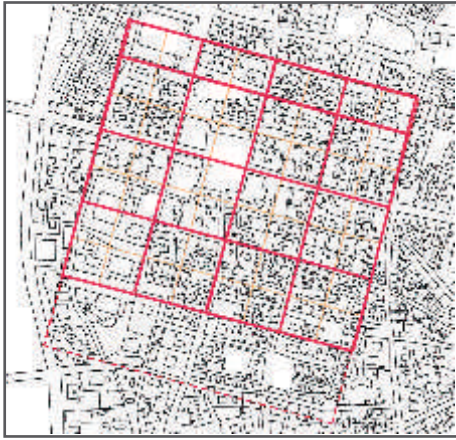


fig. 21 centuriazione romana (ipotesi)

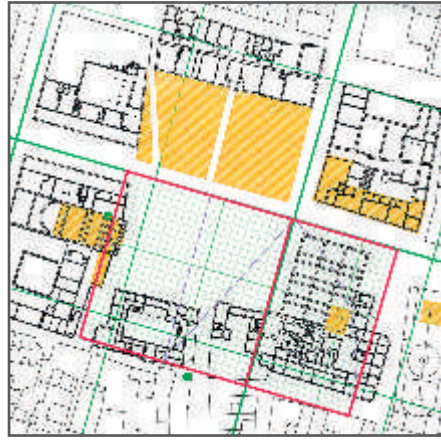


fig. 22 perimetrazione del foro romano (ipotesi)

Nello specifico, la muratura ordinaria (non intonacata) degli edifici, ha contribuito a imporre una maggiore tolleranza in fase di misurazione, accettando un margine d'incertezza dell'ordine di 2-3 cm., derivato dall'arrotondamento degli spigoli, dai giunti della muratura e dal degrado del materiale.

Il ricorso a metodologie diverse (rilievi diretti, fotogrammetrici, ecc) ad integrazione del rilievo strumentale ha consentito di ottenere rappresentazioni più efficaci, ed ulteriori elementi, utili alla lettura del tessuto (planimetria del Duomo e del Vescovado), sottolineando, anche in quest'occasione, l'importanza del rilievo integrato per l'architettura.

Un'eventuale verifica sulla corrispondenza degli allineamenti ritrovati con gli assi della centuriazione richiederebbe un rilevamento diverso, nel quale diventa fondamentale la georeferenziazione e l'apporto delle competenze disciplinari del topografo.

2.5.3 Le deformazioni del muro del Vescovado

In occasione del rilievo dei fronti degli edifici medievali delle due piazze (rilievo altimetrico), la presenza ricorrente di rastremazioni curve in corrispondenza degli spigoli verticali (entasi del muro) ha indotto a procedere con una verifica più accurata al rilievo dello spigolo sud-est del palazzo del Vescovado (figg.26-27).

L'entasi, il cui termine in architettura indica il rigonfiamento del fusto della colonna, costituisce un particolare accorgimento adottato nell'architettura classica, al fine di correggere l'effetto di distorsione ottica e di restringimento proprio degli elementi cilindrici allungati (fusto colonna).

Tale espediente veniva realizzato mediante progressiva riduzione del diametro del fusto (rastremazione) a partire, nella maggior parte dei casi, da un terzo dell'altezza della colonna³⁴, con un andamento che poteva essere sia rettilineo sia curvo (parabolico o iperbolico).

Le rastremazioni osservate nelle strutture verticali e portanti degli edifici³⁵ delle due



fig. 23 piazza Duomo: ricostruzione perimetrale

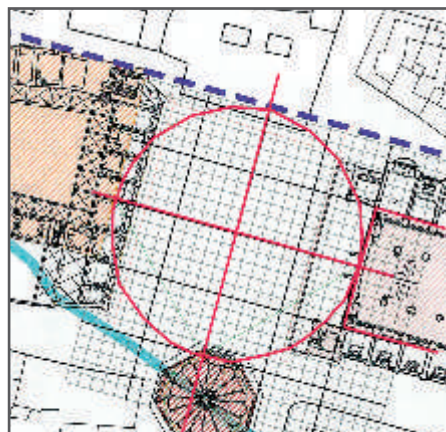


fig. 24 piazza Duomo: analisi grafica

piazze potrebbero tuttavia portare ad ipotizzare una relazione tra entasi e ragione statica (fig.28).

La volontà di comprendere la geometria e la reale natura di queste “specificità” (deformazioni o scelte costruttive) si è rivelata un’ottima occasione per sperimentare le modalità in scansione, offerte dalle tecnologie a raggio laser, e in particolare della stazione totale. Quest’ultima, infatti, a metà strada tra il teodolite ottico di prima generazione e il laser scanner, permette sia la misurazione di punti precisati sia la modalità in scansione continua.

A questo proposito, in corrispondenza dell’angolo sud-est dell’edificio sono state

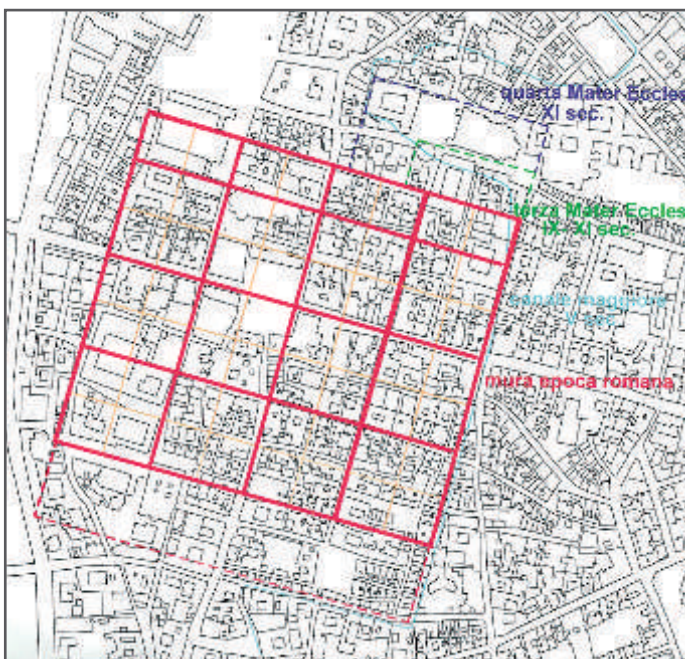


fig. 25 Le mura, il canale maggiore, il battistero



fig. 26 spigolo sud-est del Vescovado

rilevate due superfici (una per facciata), attraverso l'acquisizione di una griglia di punti impostata ad un passo prefissato di 20 cm.; superfici di dimensioni pari ml.3,00x18,00 e quindi per un totale di circa 2700 punti (fig.29).

Il passo di 20 cm., scelto in funzione del tempo necessario alla scansione, si è rivelato, tuttavia, da subito inadeguato a individuare l'andamento dell'entasi in corrispondenza del vertice tra le due pareti. Per questo motivo la scansione delle superfici è stata successivamente integrata con la misurazione di un fitto numero di punti in corrispondenza della linea, utilizzando la stazione totale in modalità standard.

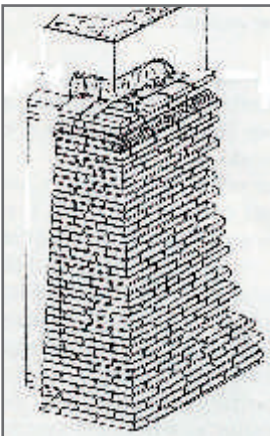


fig.28. sperone murario angolare

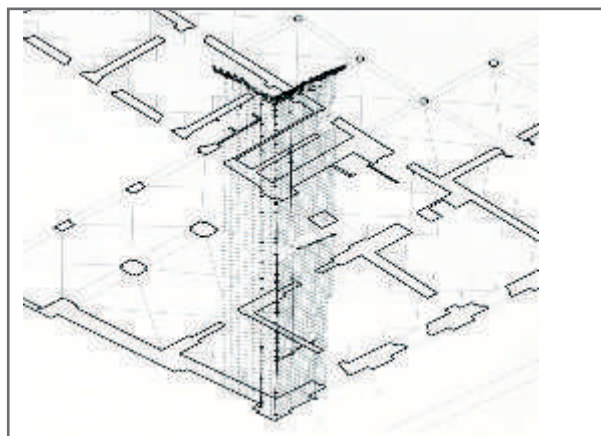


fig.29 Vescovado: rilievo in modalità di scansione

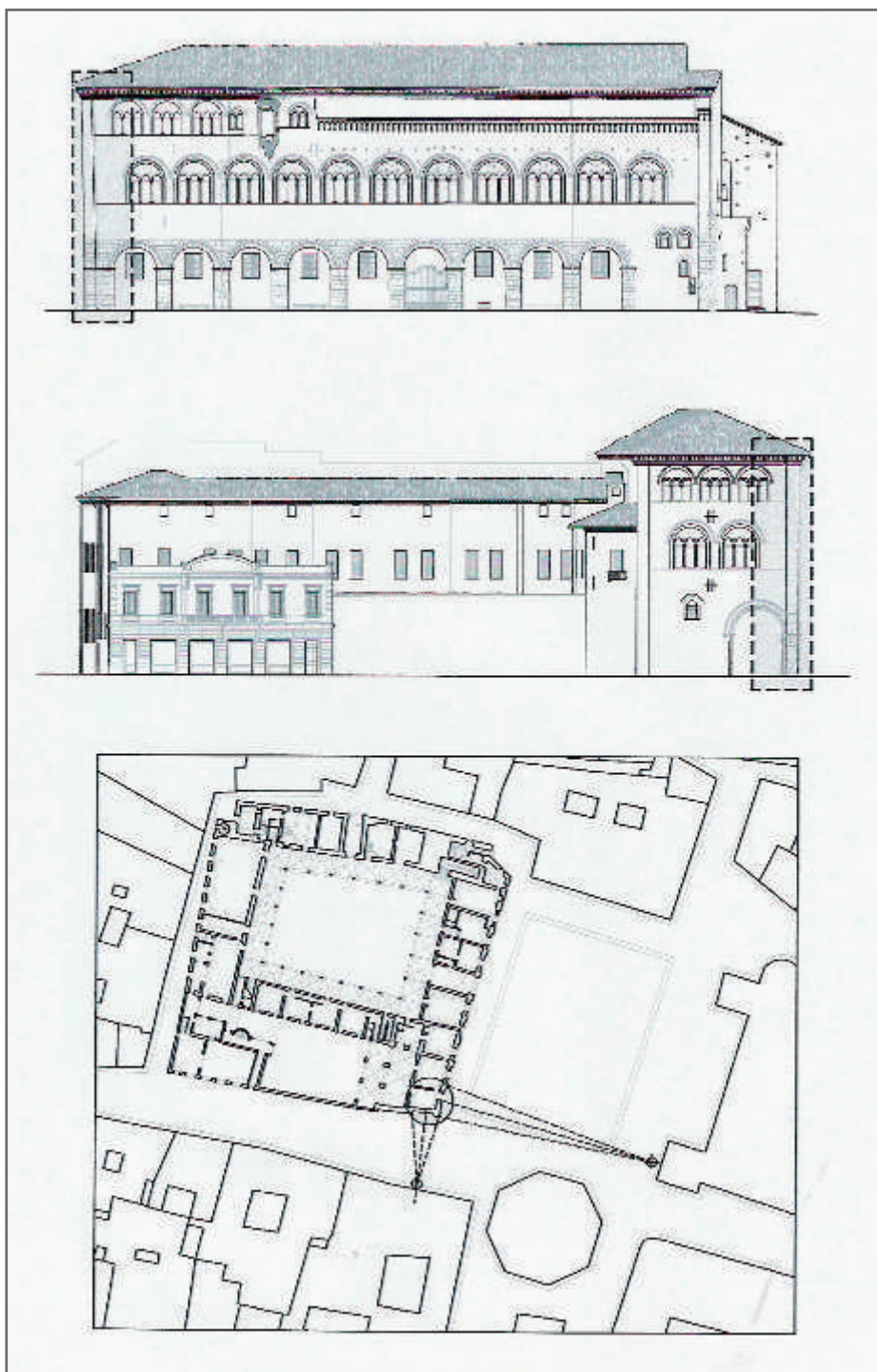


fig.27 Vescovado: rilievo dell'entasi del muro

Note

¹ Il palazzo del podestà Torello, il palazzo del Capitano, il palazzo dei Notai ed il palazzo dei Mercanti, per la piazza civica; il Duomo, il Battistero e il palazzo Vescovile per quella religiosa.

² Stazione totale TRIMBLE tipo TRM 5605 DR 200+.

³ L'arcone sotto la soggetta del Palazzo del Capitano del Popolo col retrostante cortile sembrano confermare l'esistenza di un antico accesso alla piazza allineato con l'imbocco dell'odierna Via Cavour.

⁴ Cfr. Banzola Vincenzo (a cura di), *Parma: la città storica*, Artegrafica Silva, Parma 1978.

⁵ Il ritrovamento di resti di trabeazioni e di un fabbricato in via Farini, all'altezza della farmacia Guareschi, consente di ipotizzare l'esistenza di un grande portico e di un edificio con portici che si affaccia sul foro.

⁶ Il massimo tempio della colonna.

⁷ Del tempio sono stati ritrovati i resti di un podio in pietra tufacea a m 4,30 di profondità, a nord del fianco settentrionale della chiesa di San Pietro.

⁸ I molteplici tentativi di ricomposizione della piazza civica di Parma avvenuti ad opera di diversi studiosi non sempre si trovano concordi in particolare per quanto riguarda l'ubicazione dei vari edifici realizzati in epoca medievale.

⁹ In adiacenza e parallelo ad esso si trovava il palazzo comunale di San Vitale o degli Anziani, con in mezzo la torre civica. Quest'ultimo è stato definito erroneamente dei Notai, per il fatto che quest'ultimi avevano la consuetudine di stazionare nei portici a pian terreno.

¹⁰ A tal proposito è possibile esaminare la *Pianta Prospettica di Parma*, realizzata da un anonimo nel 1570 e conservata presso il Museo Nazionale di Antichità. Alcuni dipinti, inoltre, lo propongono con un porticato ad arcate al piano terreno e un loggiato aperto composto da otto archi al piano primo.

¹¹ La prima parte comprendeva al piano terreno dei negozi e la rampa iniziale di uno scalone scoperto che procedeva poi all'interno, per l'altezza di due piani, sino alla *domus* podestarile della quale si notano ancora tre aperture a trifora verso la platea.

¹² Dal 1330 il Palazzo dei Mercanti prese la denominazione, che conserva tuttora, di Palazzo del Governatore, dal nome del reggente imperatore.

¹³ L'edificio, realizzato nel 1262, è oggi conosciuto come Palazzo Fainardi.

¹⁴ Il progetto di rifacimento della facciata venne affidato all'architetto Petitot.

¹⁵ Gli edifici furono prontamente sostituiti con due palazzi notevolmente distanziati tra loro secondo l'esigenza di trasformare la vecchia "Bassa dei Magnani" in una porticata strada moderna

¹⁶ Cfr. Banzola Vincenzo, op. cit. in nota n°4

¹⁷ Cfr. Banzola Vincenzo, op. cit. in nota n°4. Di tale intervento rimangono ancora segni evidenti, nel lato nord paramenti in muratura di cotto, comprendenti elementi in pietra squadrata alcuni dei quali compo-

no un portale ad arco a tutto centro e, nell'angolo nord-ovest una torre a pianta rettangolare.

¹⁸ La costruzione della cattedrale si sviluppò intorno a due campagne, la prima delle quali si concluse nel 1106, ma nel 1117 un violento terremoto distrusse l'edificio; dell'originaria costruzione rimase solo la parte terminale (transetto, cupola e abside).

Ebbe inizio così la seconda campagna (terminata nel 1120-1130) nella quale intervenne Benedetto Anelami, a cui venne assegnato il compito di coprire mediante strutture voltate la chiesa, di progettare una nuova sistemazione della facciata e con ogni probabilità, anche la progettazione di un grande portale in cui dovevano essere utilizzate le statue dei mesi oggi conservate in Battistero.

La facciata, con i due ordini paralleli di loggette e sulla quale si aprono tre porte corrispondenti alle tre navate, sembra sia stata progettata direttamente da Benedetto Anelami.

Il progetto antelamico prevedeva la costruzione di due torri, ma ne venne innalzata solo una (1284-1294) alta 63 metri.

La seconda torre fu iniziata solamente nel 1602 dall'ingegner Smeraldo Smeraldi e subito interrotta.

Nel 1281, Giambono da Bissone, inserì nella facciata l'attuale protiro, sormontato da una loggetta e sorretto da due leoni stilofori.

¹⁹ La pianta ottagonale è allusiva al battesimo.

²⁰ Piazza del Duomo, nel XIII secolo era chiamata Piazza Vecchia per distinguerla dalla Piazza Nuova (Piazza Garibaldi).

²¹ La metrologia è la scienza dei metodi e dei mezzi necessari per effettuare le misurazioni delle grandezze fisiche.

²² Il sistema metrico internazionale venne definito e introdotto nel 1875.

²³ I Romani adottarono come unità di misura lineare il "piede", identico a quello attico utilizzato nel mondo greco, che misurava 29,56 centimetri.

Dalla casa di Giulio Polibio, a Pompei, e sulle tavolette ritrovate ad Eraclea ci giunge notizia del piede tosco-italico, lungo 27,5 centimetri, ma l'utilizzo del *pes romanus* divenne in ogni caso obbligatorio sotto Augusto.

Il *pes romanus* (piede) aveva multipli quali il passo (5 p), la decempeđa o pertica (10 p), l'*actus* (120 p), lo *stadius* (625 p) e il *milium* (5000 p), ma anche sottomultipli quali il palmo (1/4 p), il digito (1/16 p) e il cubito (1,5 p).

L'equivalenza del *milium* a 8 stadi merita una precisazione: questa uguaglianza è riportata da Strabone e dalla maggior parte degli autori latini, ma secondo Polibio, un *milium* sarebbe equivalente a 8 stadi e 1/3. L'analisi storica giustifica la discordanza ipotizzando che Strabone faccia riferimento allo stadio alessandrino, pari a 184,85 metri, mentre Polibio si rifarebbe allo stadio attico lungo 177,6 metri. Qualunque fosse la dimensione del *milium* prevalentemente utilizzata, questa è una ulteriore dimostrazione del ginepraio di misure esistenti nell'antichità.

Il *miliarium* era utilizzato per misurare distanze di una certa consistenza con la medesima funzione dei nostri chilometri. Lo stesso termine *miliarium* indicava anche le pietre miliari, di solito cilindriche, alte da 2 a 4 metri e poste lungo le strade a mille passi di distanza l'una dall'altra a partire dal Foro Romano, dove Augusto faceva disporre il cosiddetto *miliarium aureum*.

Sulle pietre miliari era indicata la distanza dal punto di origine, il nome della strada e il nome di chi l'aveva costruita o restaurata.

Con il tramonto dell'Impero romano, ogni regione adottò, apportando alcune modifiche, le principali unità di misura del mondo classico: nel Rinascimento, il piede a Milano era pari a 43,00 cm., mentre il braccio da legno adottato a Parma era pari a 54,51 cm.

²⁴ Una volta raggiunta la lunghezza voluta degli assi (2400 piedi nel caso della centuria standard), si ripiantava la groma per delimitare i lati del quadrato che si voleva tracciare e che sarebbe poi stato suddiviso in ulteriori parti: l'*actus* (un rettangolo di 120 piedi), lo *iugerum* (un rettangolo di 120 piedi per 240), mentre due *iugera* costituivano il cosiddetto *heredium* e cento *heredia* equivalenti ad una centuria.

²⁵ Il rilievo diretto del Vescovado è stato realizzato dagli studenti del corso di Rilievo dell'Architettura della Prof.ssa Rossi, a.a 2002-2003. Il rilievo del Duomo è stato commissionato dalla Soprintendenza per i Beni Culturali, Ambientali e Architettonici di Bologna e realizzato dalla ditta Fo.A.R.T di Parma.

Il rilievo del Battistero è stato eseguito dall'architetto Paolo Mancini in occasione della tesi di dottorato: "Il Battistero di Parma: la geometria della forma costruita"- Università di Firenze -XI° Ciclo 1996-1998. I fotoraddrizzamenti degli edifici della Piazza Garibaldi sono stati realizzati dagli studenti del Corso di Disegno della Prof.ssa Chiara Vernizzi presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Parma.

²⁶ da *Il disegno come tecnica autonoma di ricerca: CAD e modelli geometrici per il rilievo*, di Marco Carpiceci, in *Disegnare* n°7, anno IV.

²⁷ Cfr. Conforti Paolo, *Le mura di Parma, dalle origini alle soglie del Ducato (1545), vol. I e vol.II, Dai Farnese alla demolizione*, Battei, Parma 1979-1980, pagg.19-20.

²⁸ Cfr. Banzola Vincenzo, op. cit. in nota n°4, pag. 49

²⁹ Dal trattato di Vitruvio (84 ac), dalla sua descrizione di come edificare i nuovi spazi aperti "...si definisca la larghezza in modo tale che si utilizzino due parti delle tre della lunghezza. Così la forma sarà oblunga e la sua disposizione sarà utile allo scopo degli spettacoli" apprendiamo che molti dei fori realizzati in epoca romana avevano un rapporto dimensionale pari a 3:2; rapporto simile a quello aureo greco.

³⁰ Cfr. Vagnetti Luigi, *L'architetto nella storia d'occidente*, edizioni CEDAM, Padova 1980, pag. 96. Il territorio rurale coltivato era suddiviso in porzioni quadrate con sup. di 200 jugeri; ciascuna porzione era a sua volta suddiviso in 100 piccoli appezzamenti quadrati di 2 jugeri ciascuno. Il lato dell'insula maggiore era dunque di 700 ml e quello della centuria, cioè del doppio iugero era di circa 70 ml. Iugero: superficie di terreno agricolo arabile in un giorno da una coppia di buoi, tale superficie corrispondeva nella centuriazione latina ad un rettangolo di 240x120 piedi romani.

³¹ Cfr. Banzola Vincenzo, op. cit. in nota n°4, pag. 91

³² Cfr. Conforti Paolo e Erenda Cristina, *Il battistero e il tracciato del canale maggiore*, in *Archivio storico per le province parmensi*, quarta serie volume XLVIII anno 1996, pagg 253-259 e Affò Ireneo, *Storia di Parma*, 1792

³³ Cfr. Banzola Vincenzo, op. cit. in nota n°4, pag. 93

³⁴ Cfr. Galliani G.V. (a cura di), *Dizionario degli elementi costruttivi*, UTET

³⁵ L'entasi delle strutture architettoniche verticali viene anche definita sperone. Gli speroni si configurano come muri a sezione inclinata in grado di contrastare l'azione della spinta grazie alle dimensioni e al peso della propria massa muraria. Spesso il termine indica anche le strutture di rinforzo impiegate per aumentare la sezione resistente dei muri di sostegno. Storicamente l'uso degli speroni murari come elementi di rinforzo risale all'epoca romana.

Capitolo 3

Macro e microarchitettura: le superfici plastiche nel cimitero della Villetta

3.1 Finalità del rilievo e caratteristiche dell'architettura: il complesso a scala urbana

La ricerca nell'ambito della documentazione del patrimonio storico architettonico offre ulteriori spunti per l'avvio di una riflessione sulle possibilità di applicazione degli strumenti informatici attualmente a disposizione nel settore del rilevamento.

Il "Rilievo per la catalogazione e schedatura delle parti monumentali del cimitero della Villetta", a Parma (fig.1), si è rivelato, ancora una volta, l'occasione di verifica dell'applicabilità delle tecniche strumentali ed informatiche nell'ambito del rilievo, sia in fase di misurazione, con l'impiego della stazione totale e del laser scanner sia in fase di restituzione, attraverso la realizzazione di un sistema informativo.

Il cimitero costituisce un complesso a scala urbana per la presenza, in uno spazio architettonicamente definito, di innumerevoli oggetti a scale diverse riuniti in un'unica architettura, molti dei quali di notevole pregio storico-artistico.

Nel cimitero della Villetta, il recinto porticato ottagonale disimpegna, riunisce e contiene

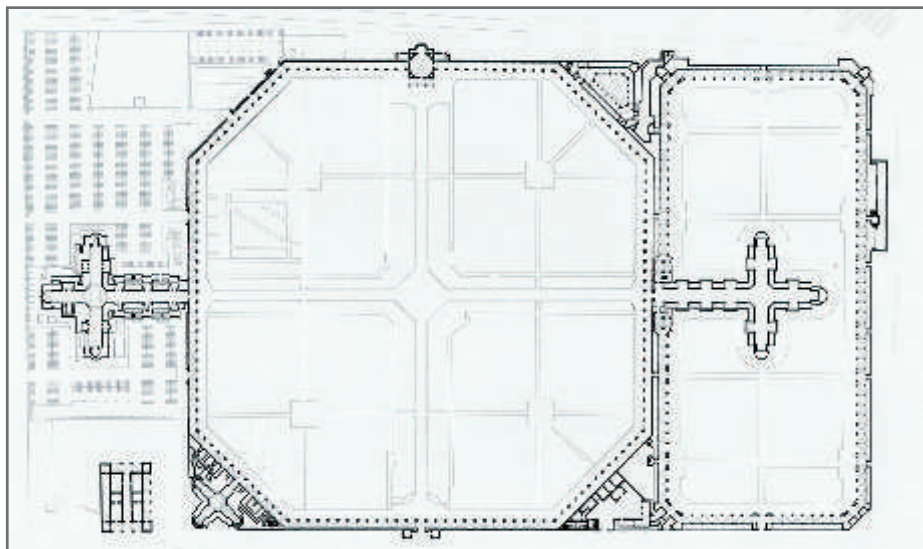


fig.1 il cimitero monumentale di Parma: planimeria del comparto storico della Villetta

una moltitudine di elementi: spazi urbani (gallerie), architetture (oratorio, ingresso, ecc.) e microarchitetture (tombe e cappelle); monumenti alla memoria nei quali, in molti casi, le forme della costruzione si fondono con quelle dell'ornato platico.

Quest'ultime in particolare, nonostante le ridotte dimensioni, presentano non poche difficoltà nel rilevamento, conseguentemente ai ricchi apparati decorativi di cui sono dotate.

La presenza di oggetti alle scale così diverse comporta radicali passaggi di scala anche nel rilievo, con il ricorso a strumenti e tecniche di misurazioni differenti, estremizzando il concetto di rilievo integrato.

A questa complessità di scale diverse corrisponde una evidente difficoltà nella scelta della modalità di restituzione più appropriata, al fine di visualizzare le caratteristiche architettoniche di oggetti di dimensioni tanto disomogenee.

La diversa scala del rilievo ha comportato quindi l'utilizzo di tecniche di rilevamento diverse (diretto, topografico, fotografico, laser scanner) e di strumenti per la restituzione di informazioni disomogenee (sistemi informativi).

La possibilità offerta dai sistemi informativi di inserire dati alfanumerici, di mantenere un riferimento diretto al materiale documentario-infografico d'archivio e di aggiornare rapidamente le informazioni acquisite confermano il ruolo del rilievo come sistema aperto di conoscenze¹.

La complessità architettonica del cimitero è una conseguenza della coesistenza, nella necropoli moderna, di modelli insediativi diversi, che rievocano la lunga tradizione funeraria della nostra civiltà.

Storicamente i luoghi di sepoltura e culto dei morti, per evidenti motivi igienici, venivano realizzati all'esterno dei centri abitati.

Nelle necropoli egizie (Menfi) ed etrusche (VI sec. a.c.), le tombe, concepite come dimore eterne, venivano allineate in vie sepolcrali rettilinee per dare origine a vere e proprie città a sistemi strutturalmente organizzati in strade, piazze, isolati, ecc.

Con la tradizione cristiana le sepolture vengono trasferite all'interno delle città: nelle chiese o a ridosso di esse.



fig. 2 rappresentazione pittorica del viale della Villetta (XIX sec) (Galleria Nazionale di Parma)

fig.3 condotti d'acqua di Parma e dintorni nel XIX secolo (Archivio storico comunale di Parma)

Questa pratica si è protratta fino alla seconda metà del XVIII sec., quando, con l'editto napoleonico di Saint-Cloud del 1804², le sepolture sono state riportate all'esterno delle cinte murarie (figg.2-3).

Da qui l'origine della figura architettonica cimiteriale, con la forma simbolica del recinto, metafora della separazione tra il mondo dei vivi e quello dei morti.

Il cimitero monumentale di Parma venne realizzato in seguito al decreto di Maria Luigia d'Austria³, seconda moglie di Napoleone, sulla base delle disposizioni del Decreto Napoleonico.

La Villetta prende il nome dalla fattoria⁴ che la duchessa scelse come luogo per impiantarvi il cimitero cittadino.

La costruzione⁵, iniziata nel 1817 e terminata nel 1823, consiste in un recinto a pianta quadrata all'esterno e ottagonale all'interno.

L'Ottagono, con quattro lati opposti maggiori e quattro minori, è costituito da un portico⁶ (156 archi), dotato di cripte sotterranee per le sepolture di cittadini benestanti, famiglie aristocratiche e confraternite religiose⁷.

Lungo il porticato ottagonale del lato ovest e in asse con l'ingresso è collocato l'Oratorio, un edificio neoclassico, la cui costruzione, approvata nel 1819, è stata terminata nel 1868.

Lo spazio interno definito dal portico ottagonale, è suddiviso da due viali centrali ortogonali a delimitazione di quattro campi, originariamente destinati alle sepolture comuni.

La consuetudine da parte delle famiglie borghesi di costruire monumenti funebri, all'interno dei campi, ha condotto (a partire dalla fine del XIX sec) alla completa edificazione di tali aree.

Gli spazi interstiziali compresi tra il recinto quadrato esterno e il portico ottagonale interno, sono stati dotati, da subito, di funzionalità specifiche.

L'angolo sud-ovest era destinato ad ossario, quello a sud-est alla sepoltura degli acattolici (ebrei, protestanti), quello a nord-ovest ai giustiziati e ai suicidi⁸, mentre quello a nord-est era destinato ad accogliere i bambini non battezzati o nati morti.

La città dei morti era destinata a crescere come, e forse più di, quella dei vivi.

Il primo ampliamento cimiteriale venne realizzato a partire dal 1876 con la costruzione delle due gallerie coperte, sui lati sud (fig.4) e nord del porticato: edifici a croce latina, con cappelle laterali, avelli ricavati nello spessore dei muri e cripte sotterranee.

L'ampliamento del cimitero è proseguito nel 1930, nella zona a Nord, con la realizzazione di arcate perimetrali a colombari, negli anni cinquanta, nella zona a sud, con la realizzazione del "campo Sud" e negli anni '80 con il settore "San Pellegrino".

Osservando la struttura cimiteriale originaria, possiamo dunque distinguere diverse tipologie costruttive-architettoniche:

- L'*Ottagono*: modello del recinto funerario, rintracciabile anche nel Camposanto di Pisa;
- Il *Viale*: modello del cimitero lineare delle necropoli etrusche;
- Le *Gallerie*: modello rintracciabile nelle sepolture di tradizione cristiana, all'interno delle chiese;
- Le *Cripte e gli avelli*: sul modello dei colombari nelle catacombe romane.

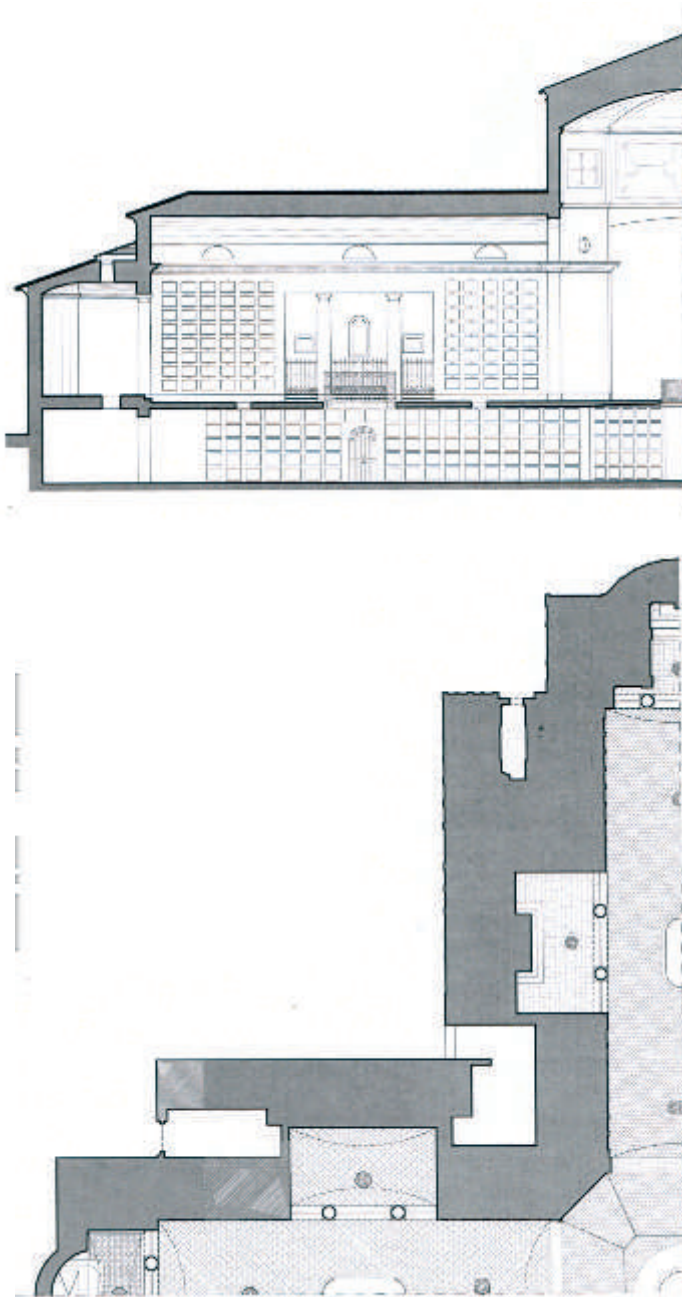


fig.4 Galleria sud: sezione orizzontale e verticale della porzione sud-ovest

L'impronta neoclassica della Villetta, riconoscibile peraltro in altre contemporanee strutture cimiteriali italiane, si evidenzia nelle regole geometriche-compositive adottate in fase progettuale e nella regolarità e simmetria dell'impianto, nel quale tutto è determinato e stabilito.

La Villetta riprende le forme della città: dal cerchio al quadrangolo e all'ottagono, per parafrasare l'architettura urbana nella forma simbolica del recinto.

L'utilizzo in architettura di semplici figure e schemi geometrici che mettono in rapporto di proporzionalità i diversi elementi dell'opera costruita, risale alle grandi civiltà del passato.

Il quadrato, in particolare, ricorre spesso in ambito urbano e architettonico sia per la semplicità di tracciamento sia per la sua associazione a particolari simbolismi: alla terra, al numero sacro 10, equivalente alla sommatoria dei numeri che compongono il numero quattro 1,2,3,4.

Anche l'ottagono è stato utilizzato frequentemente in architettura⁹.

La forma ottagonale, che secondo la simbologia cristiana di sant'Ambrogio rappresentava la resurrezione e quindi l'uomo, è stata presa a modello per la costruzione di numerosi edifici religiosi tra i quali i battisteri e i cimiteri: luoghi di passaggio ed esclusivi poiché soli i battezzati e i cristiani potevano entrare.

L'ottagono, inoltre, è stato utilizzato spesso in architettura in quanto facilmente tracciabile sia in fase progettuale sia in quella esecutiva mediante strumenti di misurazione quali diottrici, grome, ecc. (fig.5).

Le edicole funerarie e le tombe presenti alla Villetta, offrono un interessante campionario degli stili architettonici e ornamentali e delle opere degli architetti locali più conosciuti degli ultimi due secoli.

La costruzione delle edicole funebri nei quattro campi, aumentata considerevolmente all'inizio del XX sec., ha determinato la trasformazione di queste aree: eterogenee e densamente costruite al punto da non consentire più la visione complessiva del portico.

La Villetta, è dunque un museo all'aperto, che testimonia i linguaggi artistici di oltre un secolo: dal Neoclassicismo al Realismo, fino al simbolismo, al Liberty, al Decò, ed oltre¹⁰.

Tra i monumenti funebri più importanti in stile neoclassico un accenno meritano la tomba

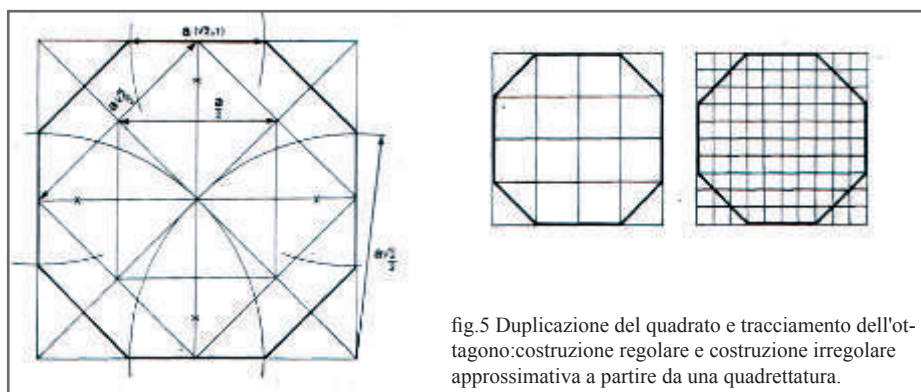


fig.5 Duplicazione del quadrato e tracciamento dell'ottagono: costruzione regolare e costruzione irregolare approssimativa a partire da una quadrettatura.

di Nicolò Paganini e la tomba Bosazza.

In stile liberty sono la cappella Romanelli, con le sculture bronzee di Emilio Trombara ed il famedio di Cleofonte Campanini dell'architetto Giuseppe Mancini, mentre in stile Decò è la cappella Dall'Aglio Zanzucchi dell'arch. Mario Monguidi e altre tombe dello stesso autore.

Numerose, inoltre, sono le edicole appartenenti al Revival storicistico: le cappelle Romanini e Bormioli progettate dall'arch. Ettore Leoni, la cappella Corazza dell'arch. Ennio Mora e le cappelle Milza e Grassi realizzate dall'arch. Camillo Uccelli.

3.2 Misurazione: metodologie e problematiche

La realizzazione di un sistema informativo per un oggetto di tale complessità non poteva prescindere da un elaborato grafico planimetrico dell'intero complesso cimiteriale, da utilizzare come base metrica e al quale riferire i rilievi dei singoli manufatti.

Gli elaborati planimetrici disponibili, tuttavia, si sono rivelati insoddisfacenti, piuttosto imprecisi (nelle misure) in quanto ottenuti dall'assemblaggio di elaborati precedenti eseguiti con criteri e per finalità differenti, alcuni dei quali piuttosto approssimativi.

Tale carenza ha determinato la necessità di realizzare una campagna di rilievo per la definizione di una base planimetrica misurata¹¹ sulla quale individuare l'esatta posizione e conformazione dei singoli compartimenti (portico ottagonale, campi, gallerie, oratorio ecc.) e alla quale riferire i rilievi diretti¹² e indiretti dei singoli oggetti.

Le dimensioni dell'impianto storico della Villetta, la difficoltà di accedere fisicamente ai punti da rilevare, hanno suggerito di utilizzare una metodologia di misurazione di tipo indiretto con stazione totale¹³.

La presenza di punti fermi opportunamente definiti (cordoli dei percorsi interni) all'interno del recinto ottagonale avrebbe consentito un rilevamento anche con metodo diretto, ma le operazioni di trilaterazione sarebbero risultate di certo più lunghe e dai risultati meno soddisfacenti.

Anche in questo caso, la prima operazione ha riguardato la definizione di un progetto, allo scopo di individuare i punti significativi da rilevare ed il metodo di rilevamento più adeguato.

La finalità del rilievo e l'inserimento di altri rilievi eseguiti a scale diverse ha semplificato la selezione dei punti significativi che è stata contenuta nei punti a terra degli estremi di ogni lato del portico, degli ingressi alle gallerie e all'oratorio, ai cordoli dei percorsi e dunque ai vertici dei campi interni.

L'operazione successiva ha riguardato l'individuazione della posizione ottimale per lo stazionamento del teodolite che, come già accennato nelle esperienze riportate precedentemente, deve essere stabilita in modo tale da riuscire a collimare i punti significativi necessari al rilievo da un numero minimo di stazioni.

Questo per limitare, per quanto possibile, gli errori derivati da un numero eccessivo di spostamenti di stazione.

Nonostante la simmetria dell'impianto cimiteriale suggerisse di adottare la metodologia ad irraggiamento, la presenza delle cappelle (e di qualche albero) che ostacolava la visione globale al portico ottagonale e ai vertici dei campi ha sottolineato la necessità

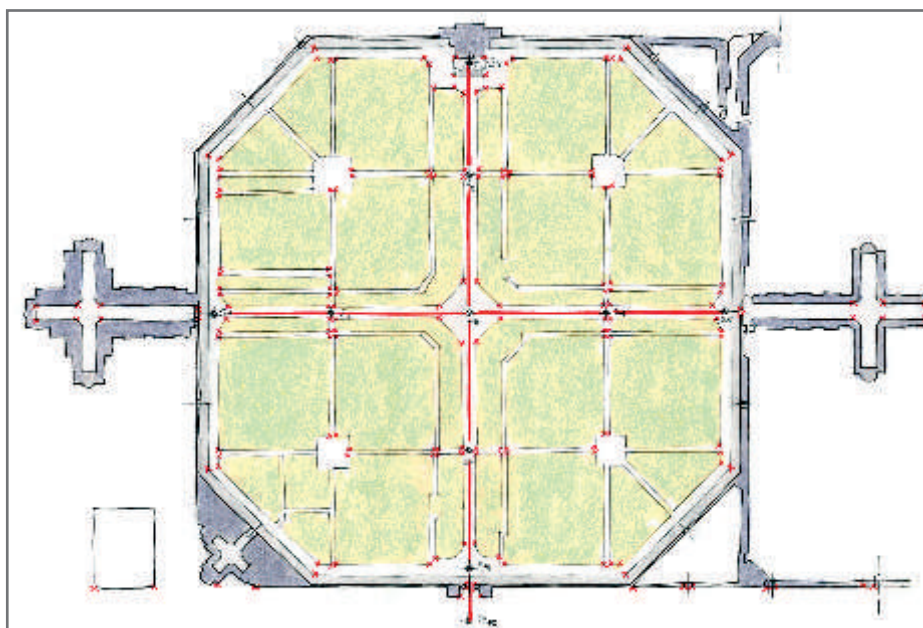


fig.6 Poligonale interna aperta per il rilievo topografico d'appoggio.

di realizzare una poligonale interna, aperta e centrale (fig.6).

La poligonale, costituita da due assi ortogonali posti in corrispondenza della mezzeria dei percorsi principali (assi di simmetria del recinto quadrangolare), deriva dal collegamento di nove stazioni interne al recinto, più una esterna (oltre l'ingresso).

Il rilievo è stato eseguito utilizzando un teodolite elettronico dotato di un distanziometro a raggio laser capace di operare anche senza prisma riflettente e cioè sfruttando la riflessione propria della superficie osservata.

La misurazione senza riflettore è stata utilizzata per il rilievo dei vertici superiori del portico, mentre con l'ausilio del prisma sono stati rilevati i punti a terra del portico (estremità dei lati), gli ingressi delle architetture principali (gallerie, oratorio, ingresso, camera mortuaria, ecc) e i vertici a definizione dei campi e dei percorsi interni.

Contrariamente a quanto verificatosi sia in Monteoliveto sia nelle delle due piazze, il rilievo della Villetta è stato attuato mediante la misurazione di un numero ridotto di punti da un numero consistente di stazioni.

Nel complesso è stata rilevata la posizione topografica di 240 punti.

Le misure prese sono state sufficienti per definire lo scheletro topografico, che oltre a definire la geometria del complesso e la perimetrazione dei diversi compartimenti è servito da appoggio ai rilievi dei singoli oggetti.

Oltre al rilievo planimetrico della Villetta, necessario alla costruzione del sistema informativo, sono stati realizzati i rilievi degli oggetti più interessanti (architettonicamente) che costituiscono il sistema cimiteriale, utilizzando sia il metodo diretto sia quello indiretto.

Tecniche e strumenti del rilievo diretto sono stati impiegati per le cappelle, le tombe, l'oratorio e il portico sud, mentre la misurazione con metodologie indirette ha riguardato

il portico est, la galleria nord e la galleria perimetrale.

La galleria sud è stata rilevata sia con il metodo diretto, sia con quello indiretto mediante l'uso del laser scanner; in quest'ultimo caso, il rilievo è stato realizzato per la verifica strutturale e nell'ambito di un progetto di consolidamento.

La diversa scala del rilievo ha comportato quindi l'utilizzo di tecniche di rilevamento diverse (diretto, topografico, fotografico, laser scanner) e di strumenti per la restituzione di informazioni disomogenee: i sistemi informativi.

Il ricorso ad un sistema informativo si è dimostrato particolarmente efficace per restituire, simultaneamente, rilievi realizzati con tecniche e strumenti diversi e, in particolare, per risolvere le problematiche legate alla gestione della importante mole di documenti ed informazioni relativi al complesso cimiteriale della Villetta: dati tecnici, anagrafici, documentazione fotografica, iconografica e archivistica.

Il sistema informativo, inoltre, ha reso possibile l'inserimento dei rilievi architettonici dei singoli manufatti, con tutte quelle informazioni che altrimenti non potevano essere restituite, in modo leggibile, in un unico elaborato grafico.

3.3 Restituzione grafica: metodologie e problematiche

Il rilievo della Villetta, dovendo essere utilizzato per l'appoggio ai rilievi dei singoli oggetti e come base geometrica e misurata di riferimento al sistema informativo, è stato successivamente restituito attraverso la sola realizzazione di un elaborato planimetrico leggibile ad una scala di riduzione 1:250, mentre i rilievi dei singoli manufatti sono stati restituiti con scale di riduzione diverse in relazione alla dimensione: scala 1: 50 le gallerie e l'oratorio, scala 1:20 le tombe e le cappelle.

Le molteplici informazioni raccolte dalla schedatura delle parti monumentali e i rilievi dei singoli manufatti, sono state quindi inseriti nel sistema informativo¹⁴.

La costruzione di un sistema informativo come restituzione di un rilievo si è rivelato particolarmente utile in quanto ha consentito di archiviare una moltitudine di informazioni disomogenee tra loro, trattandosi di oggetti tipologicamente e dimensionalmente diversi .

La schedatura delle parti monumentali, inserita successivamente nel software GIS, Archview, ha comportato, come prima operazione, l'individuazione dei "settori" (gallerie, portici, prato, percorso principale, cimiteri, ingresso, camera mortuaria, chiostro, oratorio, villa) e, all'interno di questi, le "unità base" (tomba, cappella, campata, quadro, braccio, percorso, area verde, area inumazione).¹⁵

Ognuna delle unità base è stata quindi opportunamente codificata e descritta tramite una scheda informativa acquisita successivamente dal software e collegata alla planimetria generale del cimitero (figg.7-8).

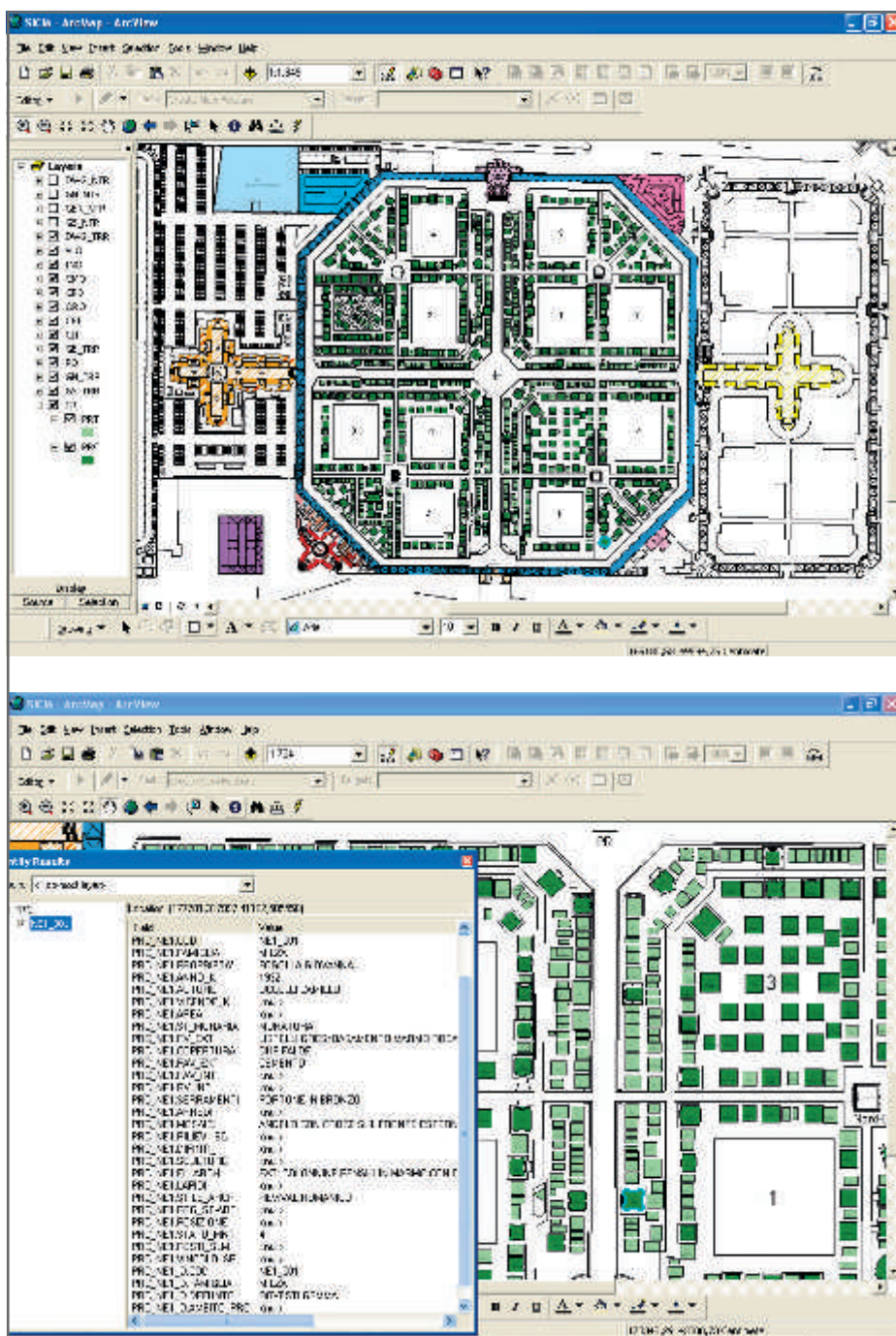


fig.7 Il sistema informativo cimiteriale:

- schermata generale con suddivisione dei settori
- collegamento ipertestuale dell'unità base cappella a relativa schedatura

TRA STAZIONE E LASER SCANNER

ambiti e soglie di applicazione degli strumenti a raggio laser nel rilievo indiretto dell'architettura storica

SETTORE PRATO			
Codifica			
Dati anagrafici e storici			
	cronologia interventi		
Dati fisici		vicende costruttive	
	superfici		
		cappelle	
		tombe	
		aree inumazioni	
		aree verdi	
		percorsi pedonali	
UNITA' CAPPELLA			
Codifica	NE1_001		
Dati anagrafici e storici			
	anagrafica		
		famiglia	Mitza
		proprietà	Fogolla Giovanna Francesca Margherita
		defunti	Rovati Gemma; Scribano Bianca
		anno costruzione	1932
		autore	Camillo Uccelli
		vicende costruttive	
Dati tecnici			
	dati architettonici		
		struttura muraria	muratura
		rivestimento esterno	lastelli gres; basamento in marmo rosa
		copertura	due falde; lanternina in rame
		marciapiede	cemento
		pavimentazione interna	marmo bianco
		rivestimento interno	marmo bianco; cornici in marmo grigio
	apparato decorativo di pregio		
		serramenti	portone in bronzo
		arredi	
		mosaici	angelo con croce sul fronte principale est; motivi floreali sulla cornice del portale
		rilievi scultorei	
		affreschi	
		sculture	
		elementi architettonici	est: colonne pensili in marmo con capitelli dorici
		lapidi (n°)	
	qualità architettonico-artistica		
		stile architettonico	revival romanico
		pregio storico-artistico	5
		posizione	4
		stato manutenzione	4
		dotazione posti salma	0
		vincolo soprintendenza	proprio

fig.8 Il sistema informativo cimiteriale:

- scheda del settore prato
- scheda dell'unità base cappella

3.4 Rilievo

3.4.1 Compatibilità e congruità degli strumenti

La regolarità geometrica (fig.9) dell'impianto architettonico individuata in fase di restituzione, ha evidenziato l'esistenza di un preciso progetto preliminare¹⁶, controllato in fase realizzativa, con ogni probabilità, mediante l'utilizzo di strumenti di misurazione indiretta.

Il rilievo eseguito al fine di definire la base d'appoggio per l'integrazione dei rilievi ha messo in risalto i limiti e le condizioni d'uso della stazione totale in un ambito analogo (dal punto di vista morfologico) a quello urbano.

La presenza di "edifici" che ostacolavano la collimazione, infatti, ha reso necessario la realizzazione di una poligonale di appoggio costituita da diverse stazioni, privilegiando il ricorso alla trilaterazione diretta per il posizionamento dei singoli monumenti funebri.

Il confronto con i rilievi precedenti ha sottolineato l'assenza di una qualsiasi relazione tra il numero delle stazioni e quello dei punti rilevati, oltreché l'importanza della forma dello spazio nella scelta di strumenti e metodi di rilievo.

La stazione totale è stata inoltre utilizzata per il rilievo della galleria nord, della galleria perimetrale e del portico est, sottolineando la massima efficacia negli spazi concavi.

Anche in questi casi, la difficoltà di collimare tutti i punti significativi al rilievo, se non attraverso la realizzazione di un numero troppo elevato di stazioni, ha evidenziato ancora una volta la necessità del rilievo diretto ad integrazione di quello strumentale e, dunque, l'importanza del rilievo integrato.

La complessità dell'oggetto, a metà tra sistema urbano e architettonico, era tale, infatti, da rendere inammissibile il rilievo di tutti gli oggetti presenti, attraverso l'utilizzo di una sola tecnica di misurazione.

Il metodo diretto è stato utilizzato sia per il rilievo delle microarchitetture (tombe e cappelle) sia degli oggetti a scala maggiore (galleria sud, lato sud del portico e oratorio).

Anche nel rilievo diretto si è resa tuttavia necessaria l'integrazione con le metodologie strumentali: all'interno dell'Oratorio e della Galleria sud, con distanziometro laser e stazione totale, nella misurazione di punti inaccessibili, e nel rilievo delle cappelle, con stazione totale, laddove la presenza di elementi decorativi aggettanti non consentiva la misurazione dell'altezza.

Metodologie di misurazione diverse sono state quindi verificate su oggetti analoghi: il lato est del portico ottagonale è stato rilevato con stazione totale, mentre quello a sud con metodo diretto (trilaterazione).

Il confronto tra i due ha dimostrato chiaramente una qualità maggiore in termini di precisione nel rilievo strumentale rispetto a quello tradizionale.

Le imprecisioni più consistenti in un rilievo strumentale dipendono da un posizionamento non propriamente scrupoloso del teodolite sui vertici di stazione.

Per questo motivo, per ridurre la possibilità di errori di stazionamento nella definizione

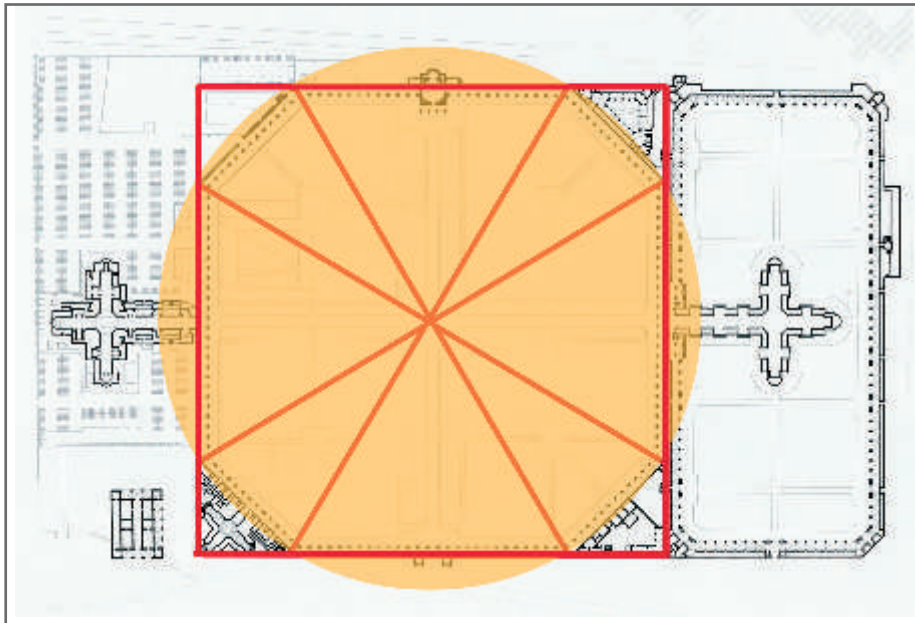


fig.9 regolarità geometrica del complesso cimiteriale

della rete d'inquadramento, si tende a privilegiare la costruzione di poligoni chiusi nelle quali la verifica risulta immediata.

Le poligoni chiusi tuttavia non sono sempre realizzabili o convenienti. Nel caso specifico, infatti, la realizzazione di una poligonale chiusa avrebbe comportato l'identificazione di un numero elevato di stazioni, con un aumento considerevole della possibilità di errore e del lavoro necessario alla compensazione.

La verifica di eventuali errori di stazionamento, nella poligonale della Villetta, è stata dunque risolta mediante il centramento forzato e la definizione dei vertici con segnali fissi costituiti da treppiedi, prismi e basette.

3.4.2 Il famedio di Cleofonte Campanini e il rilievo strumentale a raggio laser in modalità di scansione

La difficoltà riscontrata nella misurazione diretta di alcune microarchitetture della Villetta, derivata dalla presenza di elementi di natura scultorea che rendevano problematica l'individuazione dei punti significativi, ha suggerito di verificare le potenzialità e gli ambiti di utilizzo delle tecniche laser in modalità di scansione.

Gli strumenti utilizzati a questo proposito sono stati sia il laser scanner, la cui tecnologia consente esclusivamente la misurazione automatizzata, sia la stazione totale.

La scelta di rilevare il famedio di Cleofonte Campanini¹⁷ (figg. 10-11) è stata determinata dalle caratteristiche formali dell'oggetto, trattandosi di una microarchitettura arricchita da una consistente parte plastica-scultorea, soprattutto al di sopra del basamento architettonico (altorilievi bronzei).

Il rilievo di elementi di questa natura, la difficoltà riscontrabile nell'individuazione e nella misurazione dei punti significativi ha suggerito l'utilizzo di quegli strumenti che lavorando in modalità di scansione rendono trascurabile qualsiasi operazione di discretizzazione.

Il rilevamento del famedio è stato eseguito con il laser scanner Callidus: uno strumento il cui principio di funzionamento¹⁸ lo rende particolarmente adatto al rilievo dell'architettura e che, nel caso specifico, ha consentito di verificare le potenzialità della tecnologia laser (a scansione) anche in applicazione alla scala minore dell'architettura. Il rilevamento con laser scanner richiede, allo stesso modo della stazione totale, una preliminare programmazione delle operazioni di misurazione. Nel caso specifico, la programmazione riguarda la scelta dello strumento maggiormente idoneo, in funzione delle dimensioni e delle caratteristiche geometriche dell'oggetto (distanziometrico o a triangolazione), ma anche l'individuazione del posizionamento dello strumento.

In quest'ultimo caso, la scelta avviene in funzione delle condizioni ambientali (impedimenti e ostacoli visivi), della precisione richiesta e della configurazione dell'oggetto; stabilita in modo tale da coprire ogni parte dell'oggetto e limitando, per quanto possibile, il numero di scansioni.

La forma tridimensionale del famedio ha reso necessario la realizzazione di più scansioni (6), collegate mediante un preliminare rilievo d'appoggio con stazione totale e prismi, al fine di eseguire il concatenamento delle diverse scansioni ed ottenere una visione completa del monumento (fig.12).

La poligonale aperta di tre stazioni ha fornito la rete di inquadramento per la determinazione spaziale dei punti di appoggio (5) sui quali sono stati posizionati cavalletti con mire di precisione di riferimento alle singole scansioni laser.

La referenziazione dei punti d'appoggio rispetto la poligonale si è rivelata determinante. L'individuazione automatica delle mire¹⁹ da parte del raggio del laser scanner, infatti, ha consentito una maggiore precisione nell'unificazione delle singole scansioni, legate per fondersi in un'unica nuvola di punti (unico sistema di riferimento).



figg.10-11 il famedio di Cleofonte Campanini

Al fine di registrare il maggior numero possibile di informazioni sulle superfici architettoniche si è quindi proceduto alla scansione laser, mediante un sensore a base motorizzata, in grado di ruotare per 360° azimutali e 170° zenitali

In totale sono state eseguite 7 scansioni (6 esterne ed una interna), ciascuna con un angolo d'apertura orizzontale di 34-61° e con un passo di scansione 0,25° (verticale) e 0,0635° (orizzontale).

Al fine di ottenere una risoluzione uniforme su tutti gli elementi architettonici e una conseguente omogeneità delle caratteristiche geometriche del modello 3d, si è rivelato necessario mantenere, nelle diverse prese, una distanza dall'oggetto pressoché costante di circa 5 ml., laddove la presenza di tombe o cappelle adiacenti non ne ostacolavano la collimazione.

La correlazione tra distanza e passo di scansione, ha consentito di ottenere una nuvola di punti la cui distanza reciproca è di circa 2,5 cm. nella parte bassa del monumento e 3,5 cm. nella parte alta; passo ritenuto soddisfacente in fase di progetto per la rappresentazione dell'apparato plastico a scala architettonica.

La scansione interna ha invece permesso di ottenere una nuvola di punti ad una distanza di 0,5 cm. In una giornata di lavoro lo strumento ha completato l'operazione rilevando

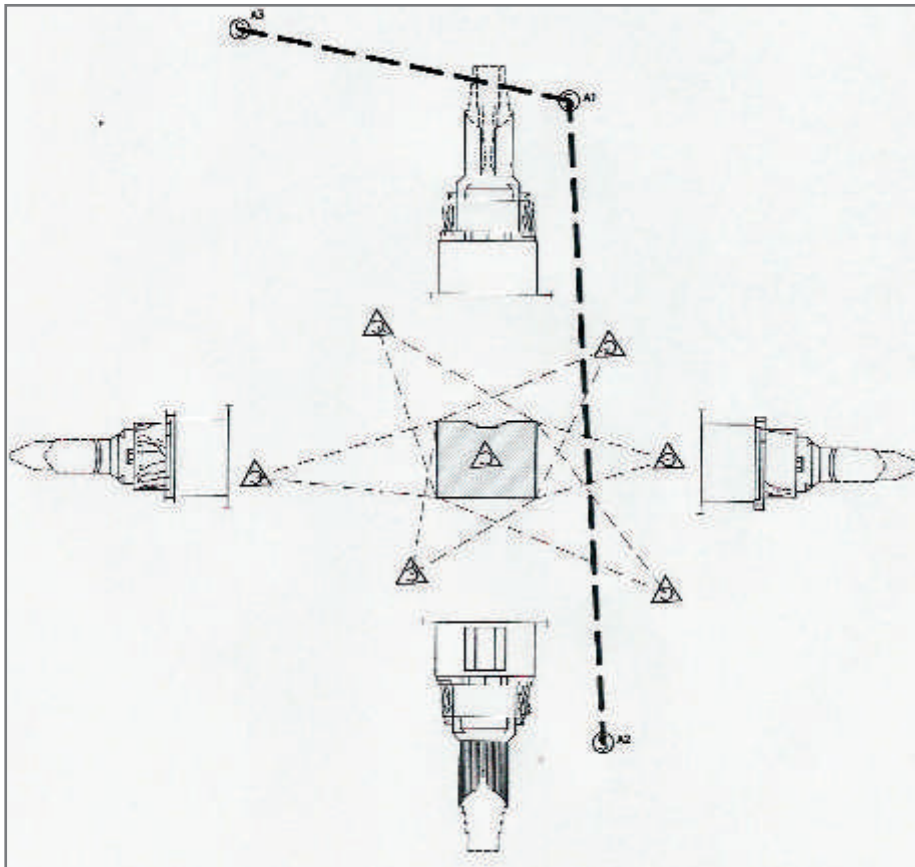


fig.12 Famedio Campanini: rete d'appoggio

un totale di 186.000 punti esterni e 790.000 interni e memorizzandone le coordinate spaziali, riferite al punto di stazione (figg.13-14).

Come risultato è stata ottenuta una nuvola di punti tridimensionale generata dall'unione delle singole scansioni, in grado di riprodurre complessivamente lo stato di fatto del monumento e la successiva rappresentazione 2D e 3D.

L'esperienza, ha messo in evidenza le potenzialità dello strumento in un caso estremo tra architettura e scultura, ma anche i limiti nella gestione della mole dei dati acquisiti.

La prima fase del processamento dei dati ha riguardato l'unione delle scansioni effettuate per riportarle ad unico sistema di riferimento (referenziazione).

Le singole scansioni, visualizzate grazie al software in dotazione allo strumento, il Callidus 3d extractor, sono state così esportate in formato .obj per essere referenziate con un programma specifico per la gestione delle nuvole di punti: Rapid Form.

L'unione delle scansioni implicava la rototraslazione delle coordinate cartesiane dei punti acquisiti con ogni scansione, per essere trasformate da un sistema intrinseco del sensore ad un sistema definito dall'operatore comune a tutte le scansioni.

Tale operazione è stata eseguita grazie alle potenzialità di Rapid Form, in grado di riconoscere i punti omologhi delle scansioni e dunque i punti d'appoggio individuati nel rilievo topografico.

L'assemblaggio delle scansioni ha così prodotto un modello complessivo, con informazioni che ammontavano a 17 MB di dati complessivi.

Operazione successiva all'unificazione delle scansioni ha riguardato il filtraggio dei dati sovrapposti e la riduzione del "rumore" (smoothing).

La riduzione del "rumore" consiste nell'eliminazione di quei punti che hanno un'alta probabilità di non appartenere alla superficie dell'oggetto.

Il "rumore" ha origine dal margine di errore di ogni punto dovuto alla deviazione standard dello scanner, ma anche dalla rugosità dei materiali di cui sono costituite le superfici; per tale motivo, talvolta, superfici anche piane vengono restituite impropriamente in modo irregolare.

Il filtraggio e la riduzione del "rumore" deve essere tuttavia realizzato salvaguardando il più possibile la complessità e la risoluzione dell'acquisizione; per questo motivo, tale operazione risulta più difficoltosa per lo sfoltimento di punti rilevati sugli elementi scultorei, per i quali il dettaglio è fondamentale, piuttosto che su quelli appartenenti a superfici piane.

Nel caso specifico, in fase di smoothing sono stati utilizzati parametri notevolmente bassi, ovvero: peso 0,2 (0,00-1,00) e iterazione 3.

La visione tridimensionale a monitor della nuvola di punti, nonostante l'immagine piuttosto realistica presentata, non forniva nessuna informazione definitiva sulla sua forma.

A questa fase è seguita dunque l'elaborazione della nuvola di punti, attraverso la meshatura, realizzata sempre con Rapid Form che ha permesso di trasformare la nuvola di punti 3D originari in una superficie costituita da un modello triangolato, una rete di elementi piani discreti il cui inviluppo riesce a creare un modello molto aderente alla superficie continua dell'oggetto.

TRA STAZIONE E LASER SCANNER

ambiti e soglie di applicazione degli strumenti a raggio laser nel rilievo indiretto dell'architettura storica

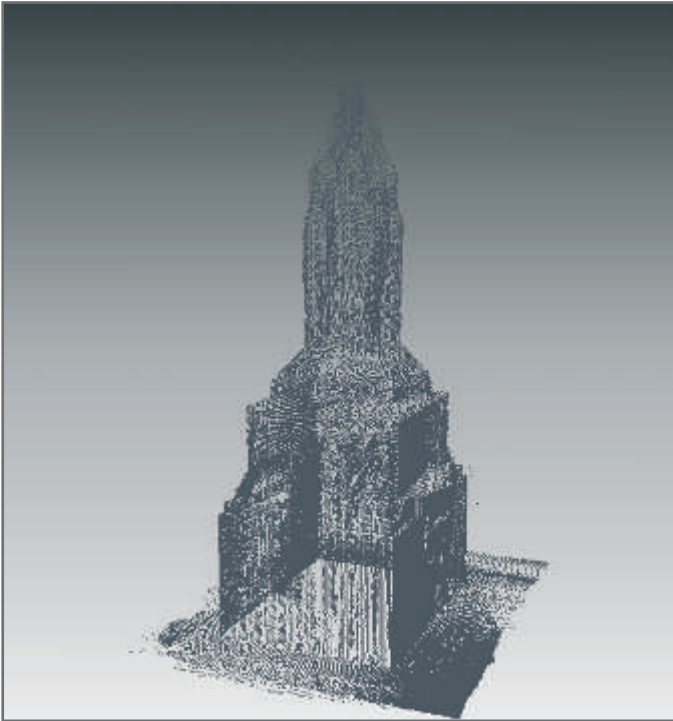


fig.13 Famedio Campanini:
nuvola esterna



fig.14 Famedio Campanini:
nuvola interna

Rappresentare curve e superfici irregolari nello spazio, tuttavia, non è cosa semplice essendo le stesse difficilmente approssimabili ad un'equazione matematica.

Con l'uso delle nurbs²⁰, delle mesh²¹ o delle patch poligonali, è possibile rappresentare sia forme regolari sia irregolari di curve tridimensionali.

La rappresentazione di superfici curve mediante Nurbs implica l'utilizzo di una minore quantità di dati e dunque una gestibilità semplificata del file; l'utilizzo delle mesh, trattandosi di facce piane, richiede invece un gran numero di piccole facce per rappresentare un bordo ricurvo in modo smussato, quindi un maggior numero di dati ed un conseguente sovraccarico del file del modello.

Le mesh tuttavia risultano più facilmente accettabili dalla maggior parte dei programmi di rendering e modellazione attualmente in uso.

La meshatura ottenuta, realizzata con triangoli di lato pari a cm. 2,5, è risultata tuttavia incompleta, soprattutto in corrispondenza della sommità del monumento dove lo strumento non poteva arrivare; la scelta (obbligata) del punto di stazione posto ad altezza uomo, infatti, non ha permesso di raggiungere le parti più alte della parte scultorea.

Questo ha comportato un'ulteriore elaborazione del modello al fine di completare le parti mancanti; operazione realizzabile in automatico tramite il software, ma che nel caso specifico si è rivelata troppo approssimativa e dunque inaccettabile a causa dei "buchi" troppo estesi.

Nonostante l'obiettivo primario di questa esperienza riguardasse la sola verifica delle potenzialità strumentali e non il conseguimento di un calco preciso dell'oggetto, si è proceduto alla ricostruzione delle parti mancanti attraverso una serie di operazioni "interpolazioni", con un risultato approssimativo, ma più tollerabile.

A questo proposito, è stata eseguita un'ulteriore meshatura della nuvola di punti, con una triangolazione di lato maggiore rispetto alla precedente, in modo tale da ottenere un oggetto completo e senza buchi.

Questa è stata successivamente frammentata attraverso la divisione di ogni singolo triangolo (faccia) in quattro parti e fatta aderire alla nuvola di punti originaria.

Il file ottenuto, in formato .mdl (Rapid Form) è risultato di dimensioni pari a 56MB (fig.15).

Il modello tridimensionale così ottenuto è stato convertito in formato dwg per essere elaborato con 3dStudioMax ed utilizzato come un normale modello 3d. L'esportazione del file nel formato dwg, ha causato tuttavia non poche difficoltà a livello gestionale, in quanto è risultato di dimensioni troppo elevate per elaboratori di uso corrente.

Ottenuto il modello tridimensionale, al rilevatore non rimane altro che definire il tipo di rappresentazione più adeguato a restituire le informazioni richieste: immagini che possono essere sia bidimensionali sia tridimensionali, in funzione della finalità della rappresentazione.

Informazioni di tipo metrico relativamente alle forme plastiche e scultoree del famedio di Cleofonte Campanini, difficilmente potevano essere restituite esclusivamente mediante le rappresentazioni tradizionali basate sulla geometria proiettiva; la natura geometrica di elementi architettonici particolarmente complessi ed articolati, infatti,

richiede quella completa visione spaziale d'insieme che solo un modello tridimensionale può rendere.

L'immagine tridimensionale, in ogni caso, non può sostituire la rappresentazione tradizionale.

Anche nel rilievo del famedio sono state pertanto ricavate immagini bidimensionali dalla meshatura della nuvola di punti.

L'estrazione dei profili può essere ottenuta direttamente dalla nuvola di punti, tramite digitalizzazione di una polilinea bidimensionale a collegamento dei punti 3d giacenti sul piano di sezione predefinito, oppure, mediante estrazione automatica dal modello tridimensionale.

Sulla mesh complessiva, dopo aver individuato i piani di sezione più significativi è stato possibile estrarre profili e piante dell'oggetto scansionato, ritrovando le rappresentazioni mongiane:

- pianta a quota + 1,50 ml.
- pianta a quota + 7,00 ml.
- sezione verticale longitudinale in mezzeria
- sezione verticale trasversale in mezzeria
- profili verticali esterni
- vista dall'alto

La scala di riduzione adottata (1:20-25) si è rivelata sufficiente e con un'approssimazione accettabile delle forme del modellato scultoreo



fig.15 Famedio Campanini:
meshatura

Al fine di comparare i due strumenti (laser scanner e stazione totale), al termine di questa esperienza, è stato eseguito il rilievo di una porzione di uno degli altorilievi che si trovano sulle pareti laterali esterne del famedio, mediante l'utilizzo della stazione totale in modalità di scansione.

La porzione, delle dimensioni di cm 40x120, è stata rilevata attraverso la scansione di una griglia di punti ad un passo di 1,5 cm e per un totale di 2664 punti. (fig.16).

Le dimensioni ridotte del campione di prova, derivano, da alcuni esperimenti realizzati preliminarmente al fine di verificare i tempi necessari di scansione e dai quali è emerso che a una distanza di 10-20 metri dall'oggetto è possibile registrare 7-9 punti al minuto.

L'aumento del passo di scansione avrebbe comportato una riduzione della definizione della superficie, ma una eccessiva approssimazione della nuvola finale.

Il rilievo del bassorilievo è stato eseguito in un tempo pari a circa 5 ore: un tempo lunghissimo rispetto quello impiegato dal laser scanner.

Il rilievo del famedio ha messo in evidenza la relazione esistente tra caratteristiche dimensionali-formali dell'oggetto ed efficacia delle scansioni a raggio laser, sia con stazione totale sia con laser scanner.

La scelta del punto di stazione ad altezza d'uomo, dovuta all'impossibilità di realizzare un ponteggio perimetrale sul quale installare il laser scanner, non ha, infatti, permesso di raggiungere in maniera sufficientemente precisa le parti più alte e nascoste, generando in tal modo numerose aree vuote e non documentate.

Nel caso specifico del laser scanner, la misurazione, inoltre, risulta più agevole negli interni (interno cappella) in quanto la forma concava degli ambienti consente la misurazione per irraggiamento e quindi da un'unica stazione centrale; gli esterni, in quanto forme convesse, necessitano invece di un rilevamento da poligonale.

Nel caso del famedio, il rilievo strumentale con laser scanner non ha consentito di realizzare un modello tridimensionale compiuto: la definizione degli elementi che costituiscono la microarchitettura, infatti, non è risultata del tutto leggibile e l'individuazione di profili orizzontali e verticali si è rivelato alquanto approssimativo, per la particolare ricchezza dell'apparato scultoreo.

Una maggiore definizione della nuvola di punti poteva essere conseguita mediante l'utilizzo di uno strumento laser a triangolazione ottica, specifico per il rilevamento di opere di natura scultorea.

Al di là della disponibilità strumentale ed economica del rilevatore, in generale, la tipologia di scanner che meglio si addice alle nostre esigenze non è sempre facilmente individuabile.

Gli scanner ad altissima risoluzione (triangolazione ottica), avendo un campo visivo piuttosto limitato, possono acquisire l'oggetto da distanze ravvicinate e per piccole porzioni rivelandosi maggiormente adatti al rilevamento di oggetti di piccole dimensioni. Con questi strumenti l'acquisizione di oggetti molto grandi richiede, infatti, tempi lunghissimi, con costi maggiorati, oltretutto una quantità di dati difficile da gestire con macchine comuni.

Per gli oggetti di grandi dimensioni, come quelli dell'architettura, si privilegiano quindi gli scanner a tempo di volo, nonostante la risoluzione inferiore di acquisizione.

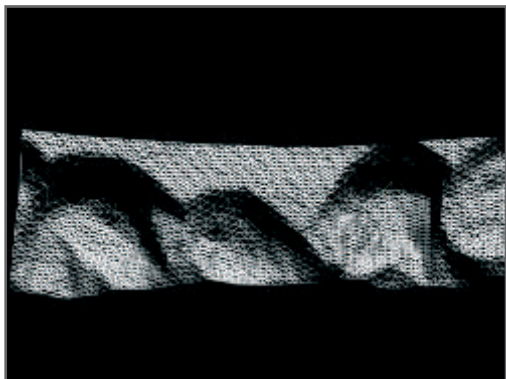


fig.16 Famedio Campanini:
scansione da stazione totale (meshatura)

Le imprecisioni delle scansioni laser riguardano esclusivamente difetti strumentali (dichiarati dal costruttore): variabili dai 3 ai 20 millimetri per una maglia di rilevazione larga e intorno a qualche millimetro per le scansioni più puntuali.

Nel rilievo con laser scanner, la precisione del rilievo restituito risulta invece strettamente correlata alle operazioni eseguite in fase di restituzione e, in particolare, dall'approssimazione della superficie mesh.

La modellazione, infatti, è sempre una procedura di interpretazione che porta ad una alterazione rispetto al dato rilevato, ad una approssimazione del reale, mentre il modello geometrico non è altro che la base di partenza per la lettura richiesta dal rilievo.

Nonostante le problematiche riscontrate in fase di elaborazione dati, relativamente alla gestione di un file di dimensioni notevoli come quello ottenuto dal rilevamento del famedio, le principali potenzialità strumentali (laser scanner) rilevate riguardano l'elevato dettaglio di acquisizione rispetto ai più tradizionali metodi di acquisizione e l'inutilità delle operazioni di discretizzazione.

Un altro vantaggio del laser scanner riguarda i tempi di scansione.

Il rilievo del bassorilievo del famedio, eseguito con stazione totale in modalità di scansione, ha evidenziato, infatti, l'indiscussa superiorità in termini di tempo del laser scanner rispetto alla stazione totale.

Note

¹ Cfr. Cundari Cesare, *Verso un sistema informativo dei beni architettonici. Il complesso monumentale di Monteoliveto in Napoli*, in Disegnare. Idee e immagini, a.III, n.3, dicembre 1991

² La Francia è il primo paese in cui vengono emanate una serie di leggi che mirano ad impedire i seppellimenti nelle chiese e a trasferire i cimiteri fuori dalle città. Nella seconda metà del settecento in Francia la scienza medica mette sotto accusa la tradizionale inumazione nelle chiese ritenuta contraria alla salute pubblica e chiede il trasferimento in otto zone esterne all'area urbana (decreto del 12 marzo 1763, confermato nel maggio 1776). Nel 1785 viene smantellato il Cimitero degli Innocenti (quartiere delle Halles). Nel 1804, con Decreto Napoleonico, viene sancita la laicizzazione dei cimiteri, pertanto i seppellimenti non saranno più gestiti dalla chiesa bensì dalle autorità municipali. In Italia le realizzazioni concrete dei cimiteri pubblici risalgono a decenni successivi al congresso di Vienna. Con tale legislazione, i cimiteri dovranno essere all'esterno del centro abitato, possibilmente esposto a Nord e cinto da un muro alto 2 mt.. Viene, tra l'altro, affermato il diritto alla sepoltura individuale. All'interno del cimitero è possibile piantare alberi ma non deve essere compromessa la circolazione di aria (è messa in discussione l'utilità degli alberi).

³ Maria Luigia d'Austria fu reggente di Parma dal 1816 al 1847

⁴ La proprietà in origine apparteneva al Collegio dei Nobili e prima ancora ai Gesuiti.

⁵ Il progetto venne realizzato dall'ing. Cocconcelli.

⁶ La costruzione è regolata dalla rivoluzione sovrana del 1819 che stabilisce che i portici dovranno risultare uniformi all'interno del portico le decorazioni potranno essere fatti da chiunque purchè si lasci libero il passaggio da un portico all'altra

⁷ Sepulture sia a tempo che in perpetuo.

⁸ L'area riservata al boia e alla sua famiglia è stata soppressa nel 1861.

⁹ Giorgio Vasari il giovane nel trattato *La città ideale* del 1598 propone un disegno di città ideale ottagonale, compromesso formale tra lo schema radiale e l'impianto ortogonale, nonché tra il quadrato, simbolo della terra, e il cerchio, rappresentativa del cielo.

¹⁰ La scultura funeraria della Villetta fra Ottocento e Novecento si muove all'interno di un sottile equilibrio tra gli aggiornamenti del linguaggio figurativo e le forti esigenze comunicative della committenza per cui fu eseguita.

Gran parte della produzione è ampiamente modellata su un classicismo moderato, caratterizzato da motivi iconografici quali geni custodi della tomba, virtù e allegorie di riferimento classico (clessidre, maschere tragiche, colonne spezzate), simboli consueti della tradizione sia classica che cristiana.

Lo stile romantico, affermatosi intorno alla metà del secolo, e presente in molte opere scultoree della Villetta, mostra invece un atteggiamento più intimista caratterizzato da immagini di personaggi con una più intensa rappresentazione degli aspetti emozionali: a ciò corrisponde una maggiore morbidezza ed un maggiore naturalismo delle rappresentazioni.

Il maggiore naturalismo si manifesta, inoltre, dall'utilizzo di simboli tratti dalla tradizione cristiana o dall'antichità tesi più alla concretezza: l'ancora come allegoria della speranza o la figura del dolente che abbraccia o contempla l'urna.

Anche nella cultura artistica di Parma, intorno alla metà degli anni sessanta, il gusto realista sembra rapidamente affermarsi.

La crudezza del realismo si propone senza alcuna mediazione idealizzante, non solo nella raffigurazione dei personaggi ma nella stessa ambientazione: la collocazione, ad esempio, in uno spazio non simbolico, ma reale, caratterizzerà numerose scene di compianti.

TRA STAZIONE E LASER SCANNER

ambiti e soglie di applicazione degli strumenti a raggio laser nel rilievo indiretto dell'architettura storica

Le caratteristiche peculiari del realismo si ritrovano in numerose sculture all'interno del cimitero: le espressioni di dolore, la dovizia di particolari con cui vengono rappresentati i personaggi, i volti, le acconciature e gli abiti resi con minuziosa cura.

Intorno agli anni Ottanta il descrittivismo narrativo del realismo cede gradualmente il passo ad immagini ambigue e indeterminate in cui le certezze positiviste appaiono travolte da una sempre più accentuata componente intimista e soggettiva. In sintonia con quanto accadde nella cultura europea anche nella scultura funeraria della Villetta emerge una stretta connessione fra sensualismo ed immaginario della morte: angeli che assumono sembianze femminili sensuali ed espressioni misteriose e lontane.

¹¹ Per questo motivo, la restituzione grafica ha riguardato esclusivamente la realizzazione di un elaborato planimetrico generale leggibile per una rappresentazione in scala 1: 250.

¹² I rilievi delle cappelle e delle tombe, così come dei lati di portico ottagonale, sono stati eseguiti dagli studenti del corso di Rilievo dell'Architettura (2003-04) tenuto dalla Prof.ssa Rossi.

¹³ Stazione TRIMBLE 5605 DR 200+

¹⁴ Il principio su cui si basano i moderni sistemi informativi, simbolismo e presenza di scale differenti in un unico elaborato, può essere rintracciato in alcune cartografie dell'antichità. Una delle mappe più antiche, a noi pervenute, in cui troviamo delle volute variazioni di scala, per esigenze di trasportabilità, è la Tabula Peutingeriana. Di essa è rimasta solo una copia redatta nel XII secolo, probabilmente tratta da un originale romano del III secolo d.C. riveduto e corretto tra il IV e V secolo. Disegnata su un lungo rotolo di pergamena, la carta rappresenta un itinerario stradale in cui le dimensioni geografiche dei luoghi appaiono decisamente deformate, con i mari che sono rappresentati da sottili strisce, e con indicazioni piuttosto schematiche dei luoghi. Tuttavia la successione delle stazioni e le distanze intermedie dovevano essere piuttosto precise. Nella Tabula Peutingeriana vengono utilizzate come unità di misura quelle dei singoli luoghi rappresentati, per cui si passa dalle miglia alle leugae (usate in Gallia), alle parasanghe persiane.

¹⁵ Per la presenza coesistente di più unità base, il settore prato, tra tutti, risulta il più complesso dal punto di vista organizzativo. La scheda di settore (prato) è suddivisa in due sezioni: la prima "storico-anagrafica" contiene informazioni relativamente alle vicende costruttive ovvero indicazioni (grafiche) sulla saturazione planimetrica del settore avvenuta nel corso degli anni; mentre nella seconda sezione "dati fisici" vengono riportate (calcolate in modo automatico) le superfici complessive delle singole unità base.

All'interno del settore prato, ma ad un livello inferiore nella struttura del database, ritroviamo le schede di ogni oggetto censito appartenente alle diverse unità (tomba, cappella, percorso, area verde, area inumazione) in funzione delle caratteristiche stesse dell'oggetto.

La scheda dell'unità cappella, come esempio esemplificativo, risulta quella sicuramente più esaustiva per la complessità degli elementi che la compongono ed è composta da diverse sezioni.

Nella prima sezione "anagrafica-storica" le informazioni contenute, inserite tramite la digitazione in caselle di testo multilinea, riguardano l'anagrafica (proprietà e nomi dei defunti sepolti); la cronologia interventi (anno di costruzione, autore e vicende costruttive, ovvero vengono elencati gli interventi costruttivi realizzati all'oggetto a partire dalla sua realizzazione) nonché una parte relativa alla documentazione storica dove le informazioni, la maggior parte delle quali immagini raster ed importate attraverso l'acquisizione con scanner, riguardano documenti di natura iconografica (rilievi, disegni di progetto, stampe, immagini pittoriche), fotografica, oltreché bibliografica ed archivistica.

Nella sezione "dati fisici" ritroviamo i valori relativi alla superficie dell'oggetto, ricavate automaticamente previo disegno di una polilinea di contorno eseguita sulla planimetria del complesso cimiteriale.

Nella sezione "dati tecnici" ritroveremo invece esclusivamente informazioni relative alla struttura architettonica dell'oggetto e dunque dati architettonici (struttura muraria, rivestimento esterno, copertura, pavimentazioni, rivestimento interno e stato conservativo), informazioni sull'apparato decorativo (mosaici, dipinti, bassorilievi, elementi decorativi architettonici, sculture e stato conservativo), nonché una parte contenente documentazione di tipo grafico e fotografico inerente rilievi atti a testare lo stato attuale dell'oggetto. L'ultima sezione riguarda invece la presenza di eventuali vincoli artistici, con le riportate indicazioni ministeriali ed una valutazione sulla qualità architettonica ed artistica dell'oggetto censito.

Gli oggetti così classificati sono stati gerarchicamente relazionati ed organizzati in una struttura ad albero che permette di acquisire e consultare tutte le informazioni ricavate da una precedente operazione di rilevamento,

descrivere in modo efficace, e dunque tutelare la qualità architettonica del complesso cimiteriale di Parma.

¹⁶ In questo senso, presso l'Archivio Storico Comunale di Parma, sono stati recuperati numerosi progetti.

¹⁷ Cfr. Capelli Gianni, *Gli architetti del primo Novecento a Parma*, Battei, Parma 1975, pagg. 59-73. Il famedio di Cleofonte Campanini è stato realizzato nel 1927 da Giuseppe Mancini (1881-1961). In quest'opera il Mancini concentrò tutto il suo estro: su un piccolo riquadro di terra sul viale centrale della necropoli, scelto in posizione ideale come centro focale di un quadro prospettico, egli realizzò un'opera che è un prodigio di originalità stilistica, di fantasia creativa e di abilità tecnica. Il famedio, pur nell'intonazione mistico-spiritualistica degli altorilievi bronzei, che lo racchiudono su due lati, non ricalca gli schemi consueti dell'iconografia cattolica, presentandosi piuttosto come un'opera celebrativa d'impronta spiccatamente laica. Improntato ad un deciso espressionismo e carico di significati allegorici; esso s'inquadra in quella fase del modernismo che a cavallo di due secoli rappresentò lucidamente il movimento laico della cultura italiana.

¹⁸ Il funzionamento dello strumento è basato su un procedimento distanziometrico.

¹⁹ Le mire hanno un coefficiente di riflettanza diverso rispetto agli altri punti.

²⁰ Nurbs: generazione di una superficie curva con interpolazione di punti. Acronimo per non uniform rational B-splines (spline Bezier razionali non uniformi).

²¹ Mesh: unione di punti con facce piane triangolari.

CONCLUSIONI

Metodi di rilievo a confronto

Il presente lavoro di ricerca ha permesso di verificare gli ambiti di utilizzo ottimale delle diverse metodologie e dei principali strumenti di misurazione indiretta in risposta alle esigenze del rilievo e alle diverse scale dell'architettura, soprattutto in relazione alla determinazione delle superfici curve.

Scopo di questo studio era confrontare tra loro gli sviluppi delle recenti innovazioni tecniche utilizzate nel rilevamento dell'architettura, ed in particolare degli strumenti a raggio laser, quali la stazione totale e il laser scanner.

Il confronto dei rilievi a scansione continua eseguiti sullo spigolo del palazzo del Vescovado e sul famedio di Cleofonte Campanini conclude momentaneamente questa fase della ricerca.

Nella prima fase di questo lavoro sono stati approfonditi tre aspetti legati alla cultura del rilievo architettonico, nel quale la "geometria", come scienza della misura delle forme, costituisce l'elemento di riferimento comune.

In questo ambito, la panoramica generale dei principali strumenti e delle relative tecniche di misurazione utilizzati nel passato hanno contribuito a sottolineare la continuità dei principi geometrici alla base del loro funzionamento, rintracciabili anche negli strumenti attuali del rilievo indiretto.

La schedatura dei principali strumenti di misurazione ha inoltre evidenziato l'esistenza di una relazione tra rilievo e controllo della costruzione, individuata nelle procedure di tipo topografico, che entrambe compiono come premessa operativa.

In questo senso, se il rilievo ha sempre utilizzato gli strumenti della costruzione e se la stazione totale può essere considerata l'evoluzione di una tradizione antica, il laser scanner e la diversa modalità di impostare il rilievo che esso implica rappresenta forse l'unica eccezione alla regola.

Ulteriori approfondimenti hanno riguardato il tema del proporzionamento delle parti, che trova una sua manifestazione nell'articolazione formale dell'architettura, con la premessa di moduli spaziali e numeri significativi, oltretutto un inquadramento schematico della geometria delle superfici curve, con riferimento alle strutture dell'architettura.

La conoscenza di questi presupposti ha favorito la lettura delle misure "progettuali", facilitando l'interpretazione dei dati acquisiti in fase di rilevamento.

La definizione degli ambiti di applicabilità degli strumenti di misurazione indiretta trova fondamento nell'esecuzione e nel confronto di alcune esperienze di rilievo condotte su oggetti con qualità specifiche.

Tali verifiche hanno permesso di individuare l'ottimizzazione strumentale in funzione delle diverse caratteristiche geometrico-dimensionali delle architetture e delle possibili finalità del rilievo; ogni metodologia, infatti, presenta peculiarità e ambiti d'uso specifici, tali da sconsigliare l'impiego indifferenziato nelle operazioni di rilevamento. In questo senso, le esperienze condotte hanno evidenziato l'impossibilità di utilizzare un unico strumento e metodologia operativa di rilevamento e dunque l'importanza di integrare l'uso di strumenti diversi.

Dai rilievi eseguiti sono emersi inoltre alcuni dati significativi sulla validità della stazione totale senza l'ausilio di un prisma riflettente e dei vantaggi che questo strumento offre all'architetto rilevatore.

I risultati derivati dall'uso della stazione totale possono essere ritenuti soddisfacenti, anche in alternativa al laser scanner; il suo impiego senza prisma, infatti, si è rivelato particolarmente utile nella misurazione di punti inaccessibili, fondamentali nel rilievo dell'architettura, potendo essere individuati e misurati a partire da un solo punto di stazione (origine del sistema di riferimento).

L'efficienza della stazione totale è stata inoltre rilevata in occasione della misurazione di alcune cappelle della Villetta e dunque ad integrazione del metodo diretto per il rilievo di piccoli manufatti, nell'agevolare la misurazione delle altezze complessive, di cornici e ornamenti posti ad altezza elevata o di punti che la presenza di elementi architettonici/decorativi aggettanti non consentivano la misurazione diretta con i tradizionali strumenti del rilievo (aste metriche).

L'uso della stazione totale unitamente al prisma riflettente si è rivelato anzi conveniente in particolare nell'ambito di oggetti di grandi dimensioni, per superare eventuali ostacoli che impedivano la collimazione dei punti a terra degli edifici e per le poligonali di collegamento delle sezioni e/o delle scansioni laser.

L'aspetto più delicato del rilievo, e quindi la scelta degli strumenti da utilizzare, riguarda tuttavia la determinazione della geometria delle superfici curve, per le quali la sola rappresentazione mongiana di piante e sezioni risulta spesso poco esauriente.

In questo senso, il rilievo delle volte di Monteoliveto ha sottolineato lo sviluppo qualitativo che gli strumenti a raggio laser hanno introdotto nel rilievo di architettura sia in termini di operatività che di restituzione.

La difficoltà emersa in questa occasione relativamente alla possibilità di realizzare modelli tridimensionali come restituzione del rilievo, per la relativa esiguità dei punti conosciuti rispetto alla continuità delle superfici da descrivere, induce tuttavia a chiedersi se questi modelli possano essere considerati *restituzioni* o non siano piuttosto delle *interpretazioni*.

L'impossibilità di determinare con esattezza matematica la geometria delle superfici curve con un rilievo discreto suggerisce quindi il ricorso al rilevamento in modalità di scansione continua; i rilievi eseguiti nel corso del triennio hanno, infatti, sottolineato

alcuni limiti operativi nella misurazione discreta nel rilievo delle superfici curve, sia di natura scultorea che architettonica, dove le linee di continuità non erano chiaramente leggibili.

I limiti evidenti nell'uso delle tecniche tradizionali ha suggerito pertanto il confronto con la scansione continua, che è stata verificata utilizzando sia il laser scanner sia la stazione totale.

Il rilievo di uno degli altorilievi del famedio, eseguito con entrambi gli strumenti, ha sottolineato l'efficacia dell'utilizzo della stazione totale in modalità di scansione, ma anche l'inadeguatezza dello stesso in termini di tempo, rispetto al laser scanner.

L'uso del laser scanner è risultato piuttosto soddisfacente nel rilievo delle superfici curve, nelle quali l'assenza di una geometria definita delle parti scultoree rende particolarmente complessa l'operazione di discretizzazione e di restituzione grafica.

L'acquisizione superiore rispetto ai metodi tradizionali, generata dall'automatizzazione del laser scanner, implica tuttavia notevoli difficoltà in fase di elaborazione dati, a causa dei file troppo pesanti e dunque difficilmente gestibili, nonostante l'impiego di potenti processori.

Un altro aspetto irrisolto nell'uso del laser scanner è legato alle caratteristiche formali dell'oggetto: il raggiungimento ottico non sempre possibile del manufatto determina, infatti, la presenza di zone d'ombra, rendendo necessaria la realizzazione di ponteggi per scansioni aggiuntive e dunque un utilizzo più complesso ed oneroso.

Gli strumenti a riflessione diretta risultano inoltre più vantaggiosi negli interni, in quanto la forma concava degli ambienti permette la misurazione per irraggiamento e quindi da un'unica stazione centrale, al contrario degli esterni e delle forme convesse che al contrario richiedono la definizione di poligoni di riferimento alle quali riferire le misurazioni eseguite anche con metodo diretto.

Anche il rilievo con il laser scanner ha richiesto tuttavia l'uso di altri strumenti e metodologie (rilievo diretto e/o uso della stazione totale) sia per la definizione della poligonale di riferimento necessaria alla referenziazione delle singole scansioni, sia per l'individuazione di quelle discontinuità e di quei punti significativi altrimenti non rilevabili (spigoli), se non mediante un infittimento eccessivo della nuvola di punti.

Nel rilievo delle superfici curve, la scansione continua tuttavia non sempre si è dimostrata la metodologia più efficace per acquisire e ricostruire digitalmente gli oggetti; se il rilievo continuo risulta infatti imprescindibile in assenza di geometrie facilmente discretizzabili, nel rilievo di quelle architetture in cui le discontinuità sono evidenti esso risulta svantaggioso.

In particolare, l'uso del laser scanner o della stazione totale in scansione continua può essere conveniente solo nel caso di superfici murarie assolutamente prive di elementi di discontinuità, come cornici o altri elementi plastici.

Il sistema di acquisizione automatizzato, infatti, completamente indipendente dalle caratteristiche morfologiche dell'oggetto, determina la misurazione di molti punti dove non servono e di pochi dove invece servirebbero per descrivere le discontinuità della forma (spigoli, archi imposta, intersezione tra superfici).

Quanto esposto trova conferma nel rilievo dello spigolo del Vescovado, dove la

curvatura della superficie muraria poteva essere agevolmente determinata mediante il rilievo discreto con stazione totale; in tempi più brevi rispetto la modalità di scansione e con la stessa qualità di risultato.

La verifica dell'efficacia dei diversi strumenti, in relazione ai casi limite evidenziati nelle esperienze descritte, si è basato sull'individuazione di parametri di confronto comuni:

- velocità di rilevamento,
- velocità e immediatezza di restituzione,
- affidabilità del risultato,
- chiarezza di lettura,
- possibilità di uso di un unico strumento.

Questo ha permesso di valutare l'adattabilità degli strumenti a riflessione rispetto a situazioni diverse e di riscontrare il condizionamento che la forma, piuttosto che la dimensione, dell'oggetto comporta sull'efficienza dello strumento stesso.

Le esperienze condotte hanno inoltre evidenziato che nel rilievo dell'architettura non sembra più essere il caso di distinguere tra *rilievo diretto* e *rilievo indiretto*, in quanto gli strumenti a raggio laser sono diventati un presupposto quasi imprescindibile del lavoro, ma piuttosto di *rilievo discreto* (per punti) o di *rilievo continuo* (per superfici). Il rilievo discreto con la stazione totale, nel quale in fase di misurazione l'operatore mantiene un rapporto diretto con l'architettura nell'individuazione dei punti significativi dell'oggetto, consente una lettura immediata dei dati anche se piuttosto schematica ed essenziale, mentre il rilievo continuo del laser scanner, automatizzando il processo di misurazione, richiede ulteriori e complesse elaborazioni per estrapolare i dati significativi.

A questo proposito, se il laser scanner riduce i tempi in fase di misurazione rispetto alla stazione totale, in fase di restituzione questi risultano senz'altro dilatati.

Il laser scanner dunque, al momento non sembra poter soppiantare la stazione totale, né tanto meno le tradizionali tecniche del rilievo diretto, avvalorando l'importanza di un rilievo integrato e l'insostituibilità della conoscenza dell'architettura in tutti i suoi aspetti costruttivi, geometrici e storici, ovvero di quel sapere, che come dice Severino, non può essere in alcun modo sostituito nemmeno dalle tecnologie più sofisticate.

Gli strumenti che la tecnologia oggi mette a disposizione non possono, infatti, sostituirsi alla cultura del rilievo, che invece richiede la capacità di discretizzare gli elementi e i punti significativi per offrire una lettura sintetica della realtà architettonica, talmente complessa e articolata da non poter essere rappresentata se non dopo aver selezionato, all'interno dell'infinita varietà dei suoi differenti aspetti, gli elementi caratteristici capaci di sintetizzarne la geometria.

Al rilevatore, dunque, non spetta altro che adottare la tecnica più idonea alla risoluzione del problema che ha di fronte al fine di rendere il rilievo davvero utile alla lettura e alla finalità per cui è stato eseguito, tralasciando la mera riproduzione dell'oggetto indagato, senza perdersi nell'ossessione di riprodurre una copia *uguale* alla realtà.

All'inizio di questo lavoro ci si chiedeva se l'avvento di strumenti capaci di rilevare la

continuità di superfici rendesse obsoleto il rilievo discreto, che è la finalità principale della stazione totale. L'esperienza ha dimostrato come sia difficile studiare l'architettura senza far riferimento a quei modelli semplificati che sono la base stessa dell'idea progettuale all'origine della costruzione; profetico in questo senso un racconto di Jorge Luis Borges:

...”In quell’Impero l’Arte della Cartografia raggiunse tale perfezione che la mappa di una sola provincia occupava tutta una città e la mappa dell’impero tutta una provincia. Col tempo, codeste mappe smisurate non soddisfecero e i Collegi dei Cartografi eressero una mappa dell’Impero, che eguagliava in grandezza l’Impero e coincideva puntualmente con esso. Meno dedite allo studio della cartografia, le generazioni successive compresero che quella vasta mappa era inutile e non senza empietà la abbandonarono all’inclemenza del sole e degli inverni. Nei deserti dell’Ovest rimangono lacere rovine della Mappa, abitate da animali e mendichi; in tutto il Paese non è altra reliquia delle Discipline Geografiche”.

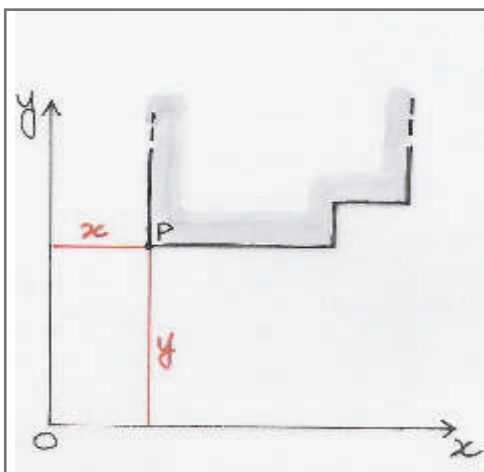
(J. L. Borges, *Del rigore nella scienza*, in *L’artefice*)

APPENDICI

Appendice A

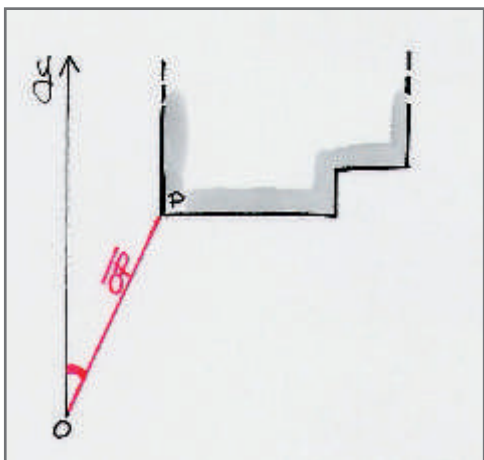
Strumenti e metodi di misura per il rilievo indiretto

RIFERIMENTI PER L'INDIVIDUAZIONE DELLA POSIZIONE SPAZIALE DI UN PUNTO



Coordinate cartesiane,

individuazione spaziale di un punto rispetto a due assi di riferimento predefiniti: la posizione del punto viene individuata mediante i valori numerici (x;y) corrispondenti alla distanza dagli assi.



Coordinate polari,

individuazione spaziale rispetto a un punto predefinito (polo): la posizione di un punto viene individuata mediante la distanza (di P) rispetto ad un punto fisso (O) detto polo e dall'angolo che tale distanza (OP) forma con la semiretta OX avente origine nel polo e stabilita come asse di riferimento.

METODO INDIRETTO DI MISURAZIONE: LA TRIGONOMETRIA, L'INTERSEZIONE IN AVANTI

Le metodologie di misurazione topografica sfruttano i principi geometrici-matematici della trigonometria. L'invenzione della trigonometria si può associare con un certa sicurezza agli studi astronomici della scuola geometrica di Alessandria, la città egiziana che prese il nome dal fondatore Alessandro Magno (III secolo a. C.) e che fu il centro della matematica greca fin quasi alla conquista araba.

Il fondatore della trigonometria è probabilmente Ipparco da Rodi che visse per lo più ad Alessandria nel II sec a.C., anche se la maggior parte delle notizie sui metodi trigonometrici alessandrini ci vengono dal massimo astronomo dell'antichità: Tolomeo Claudio (II sec. d. C.), che con la sua opera dal titolo *Composizione matematica*, poi mutata in *Almagesto*, pose le basi della teoria astronomica fino al XVII secolo.

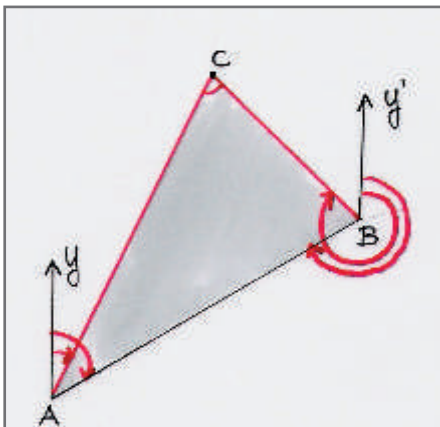
La trigonometria trovò successivamente impiego nella misura di quantità geometriche e nell'agrimensura, nel tentativo di risolvere problemi pratici come la misurazione di terreni o costruzioni.

Il termine **trigonometria** significa letteralmente "misura di trigoni", cioè di triangoli. La misura dei terreni fa uso della triangolazione, intesa come misura di un insieme scelto di triangoli: nella triangolazione pura si misurano gli angoli e il segmento di base di un triangolo (**intersezione in avanti**); nella triangolazione mista vengono misurati sia i lati che gli angoli mentre nella triangolazione a catena si misurano solo i lati.

Il principio della trigonometria, usato in agrimensura al fine di ridurre il numero delle misurazioni necessarie, è basato sulle funzioni trigonometriche (sin, cos, tan, ecc) ovvero sul rapporto esistente tra gli angoli e le coppie di lati di un triangolo rettangolo.

Le funzioni trigonometriche sono utili nella risoluzione dei triangoli, cioè nella determinazione della misura degli elementi di un triangolo a partire dalla conoscenza di almeno tre di essi, tra i quali vi sia almeno un lato.

La differenza fondamentale tra la trigonometria greca e la moderna è che al posto dei seni la trigonometria alessandrina usava le corde: seguendo la tradizione babilonese, che in parte è in uso ancora oggi, la semicirconferenza veniva divisa in 180 parti uguali (gradi) mentre il suo diametro in 120; si formava così una specie di goniometro, in cui



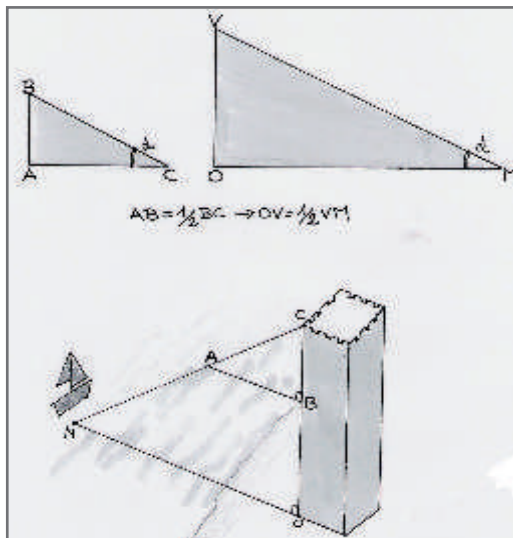
la parte tonda serviva a misurare gli archi, e la piatta a misurare le corde relative.

Nel primo libro dell'*Almagesto* di Tolomeo troviamo, tra le altre cose, una tavola delle corde che consentiva, a partire dalla conoscenza di un lato e di un angolo, di risolvere qualsiasi triangolo.

Intersezione in avanti:

individuazione di un punto incognito dati due punti noti, la loro distanza e gli angoli sottesi con il punto incognito.

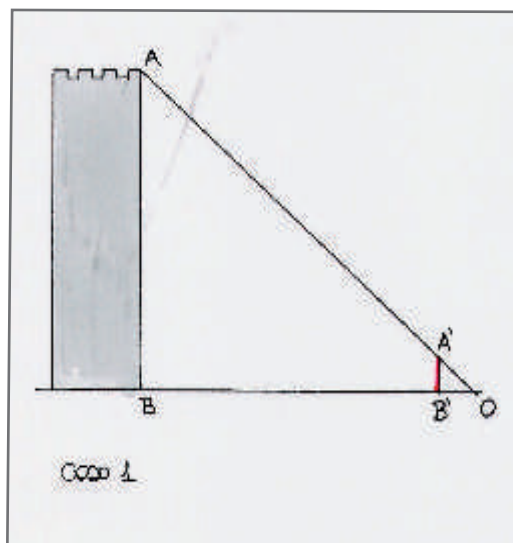
METODO INDIRETTO DI MISURAZIONE: LA SIMILITUDINE DEI TRIANGOLI



Determinazione della distanza di una nave dalla costa: principio di Talete

Dati due triangoli rettangoli aventi ipotenuse con uguale inclinazione rispetto alle basi, il numero che esprime quante volte l'altezza è contenuta nella base è il medesimo. Se per esempio il lato AB è la metà di BC nel triangolo ABC, anche il lato VO è la metà di OM nel triangolo VOM.

I triangoli sono simili e i lati proporzionali.
 - Immaginando che si possa sistemare un'asta parallela al livello del mare sporgente dalla torre in modo che un osservatore posto in C vede sulla stessa retta il punto A estremo dell'asta e il punto N dove si trova la nave. Misurando AB e BC e conoscendo CO si determina ON (CAB è simile a CNO).

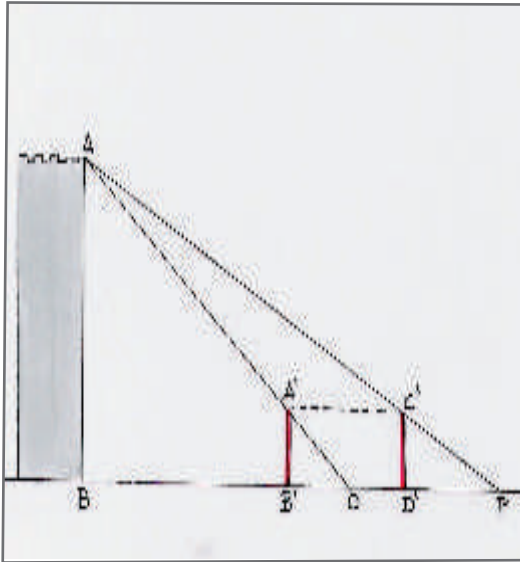


Metodo per misurare la sommità d'una torre: Leonardo Fibonacci da Pisa, nella Pratica Geometriae (1220)

L'osservatore si pone in un punto qualsiasi esterno (O); da qui traguardando l'estremo superiore (A) della distanza da misurare è possibile riconoscere un triangolo rettangolo avente per ipotenusa il raggio visivo OA e per cateti la linea orizzontale OB e l'altezza incognita AB, ma anche un altro triangolo più piccolo e simile al precedente avente come ipotenusa il raggio OA' dell'astrolabio e come cateti i segmenti OB' e A'B' rispettivamente proiezione orizzontale e verticale del raggio stesso. La misura incognita AB risulta dalla proporzione $OB:OB'=AB:A'B'$: le proprietà dei triangoli simili permettono di determinare per proporzione geometrica sia la distanza, sia l'altezza della torre.

TRA STAZIONE TOTALE E LASER SCANNER

ambiti e soglie di applicazione degli strumenti a raggio laser nel rilievo indiretto dell'architettura storica



Metodo per misurare la sommità d'una torre di cui non si conosce la distanza (OB): Leonardo Fibonacci da Pisa, nella Pratica Geometriae (1220)

Si posiziona un'asta fino a far coincidere la sommità della torre con l'estremità dell'asta. In un secondo momento la medesima asta viene spostata di una distanza a piacere e comunque in modo tale che ancora una volta la sommità dell'asta coincida con quella della torre.

Le distanze OB e PB in questo caso sono incognite.

$$OB':A'B'=OB:AB$$

$$PD':C'D'=PB:AB$$

Si calcola quante volte OB e PB stanno in AB

$$OB=(OB':A'B')AB$$

$$PB=(PD':C'D')AB$$

OP è lo spostamento noto (PB-OB)

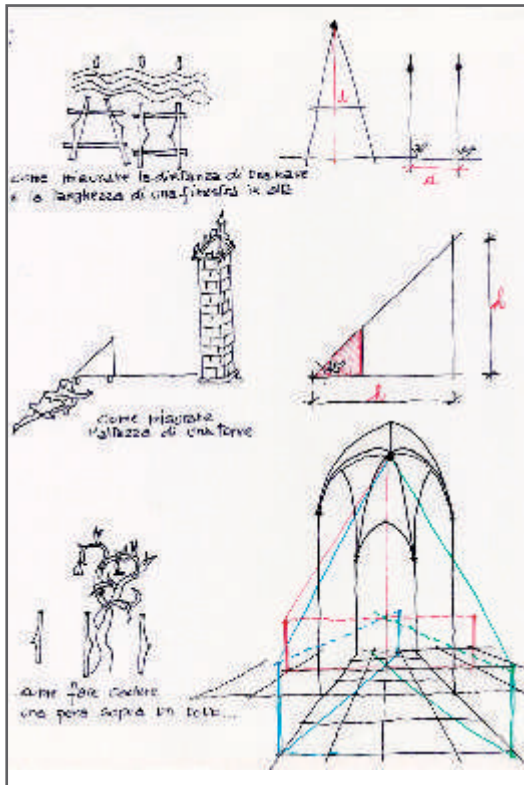
Si calcola quante volte OP sta in AB

$$OP:AB=(D'P-OB'):A'B'$$

$$OP=[(D'P-OB')AB]:A'B'$$

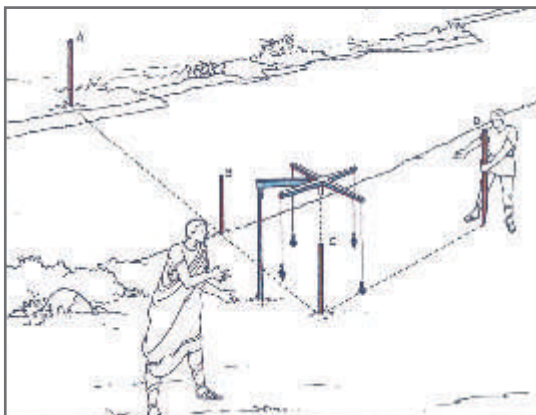
Essendo OP noto

$$AB=[(A'B' \times OP):(D'P-OB')]$$



Misurazione di distanze e altezze inaccessibili: Villard de Honnecourt

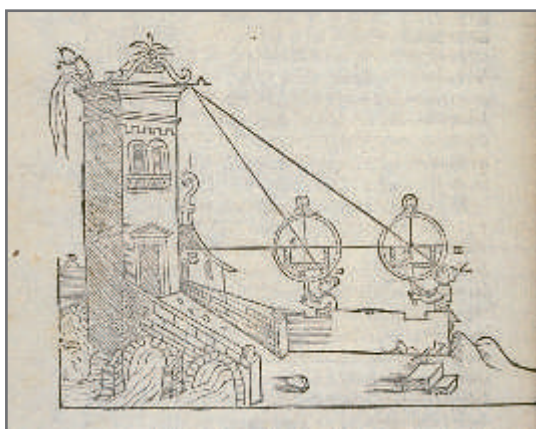
STRUMENTI DI MISURAZIONE INDIRETTA



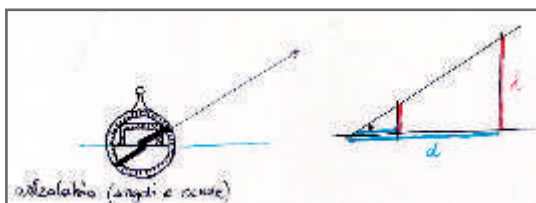
Groma: tracciamento di allineamenti ortogonali



Lychnia: misurazione di distanze

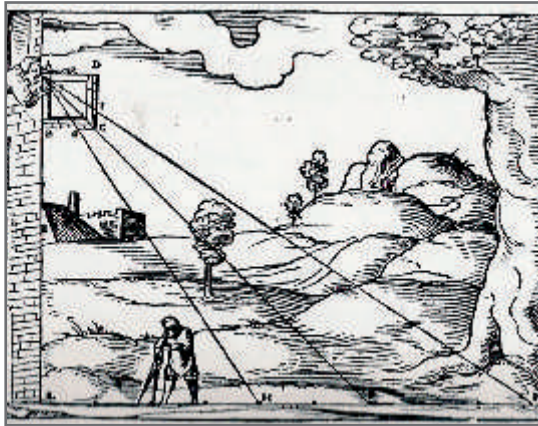


Astrolabio: determinazione di altezze inaccessibili

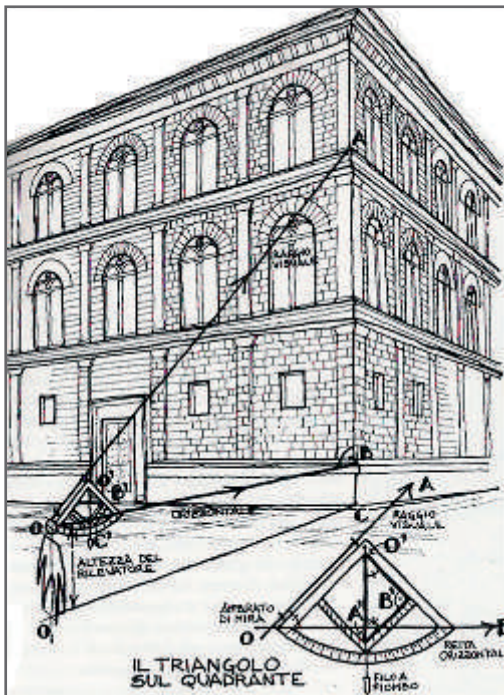


TRA STAZIONE TOTALE E LASER SCANNER

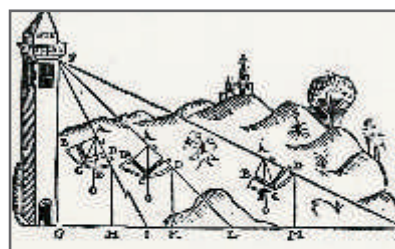
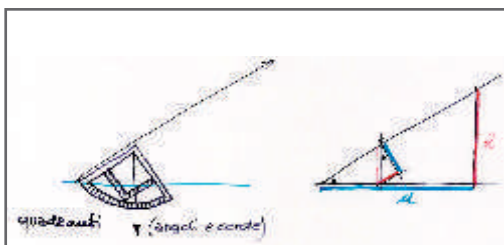
ambiti e soglie di applicazione degli strumenti a raggio laser nel rilievo indiretto dell'architettura storica

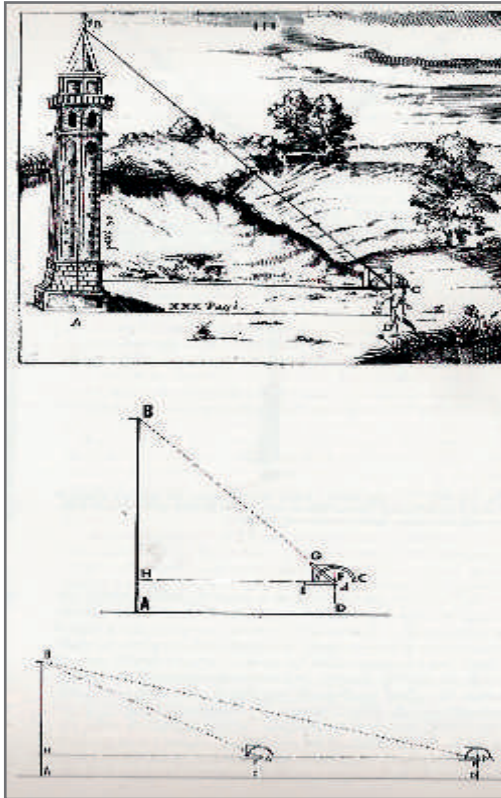


Quadrato: misurazione di distanze inaccessibili



Quadrante: misurazione di distanze e altezze inaccessibili



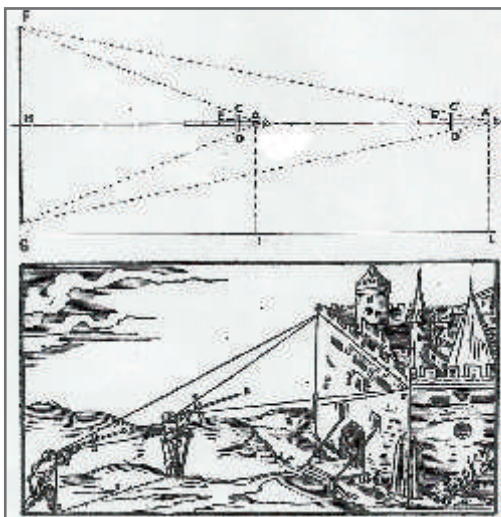


Squadra zoppa: misurazione indiretta

Caso 1- Metodo per determinare altezze di edifici di distanza nota: si pone l'alidada mobile a 45° e ci si avvicina o allontana fino a quando la stessa coincide con la sommità della torre. Per conoscere l'altezza della torre basterà a questo punto misurare la distanza AD (uguale a BH) e sommare la quota FD.

Caso 2 - Nel caso in cui l'edificio non sia avvicinabile, si pone lo strumento in C, si traguarda la sommità della torre, si legge il valore sulla scala altimetrica e si calcola quante volte questo sta a 60 (ex 2). Si fa quindi stazione in D in modo tale che il valore letto corrisponda alla metà di quello misurato dalla prima stazione. L'altezza incognita BH corrisponderà così ad $\frac{1}{2}$ della distanza CD.

Baculo: metodo per misurare una distanza.

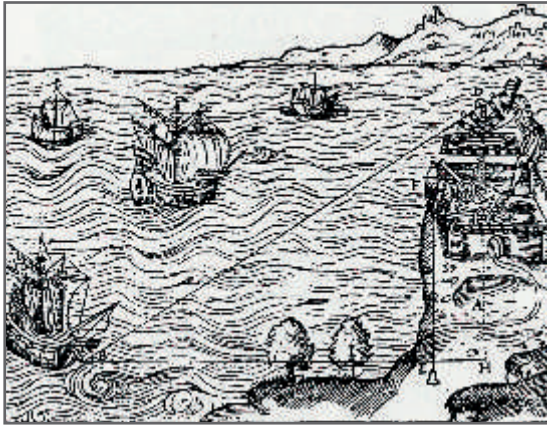


L'osservatore traguarda attraverso il mirino e, facendo scorrere il martello, porta a far coincidere le estremità CD del braccio trasversale (posto in corrispondenza della prima tacca) con i due punti di cui si voleva misurare la distanza (F e G). In un secondo momento, allontanatosi di alcuni passi dal primo punto di stazione e sempre rimanendo sul medesimo allineamento della prima osservazione, si ripete l'osservazione con il braccio trasversale posto sulla seconda tacca del bastone. La distanza incognita FG corrisponde alla distanza IL; il triangolo ACD è infatti simile al triangolo AFG e il triangolo A'C'D' simile ad A'FG.

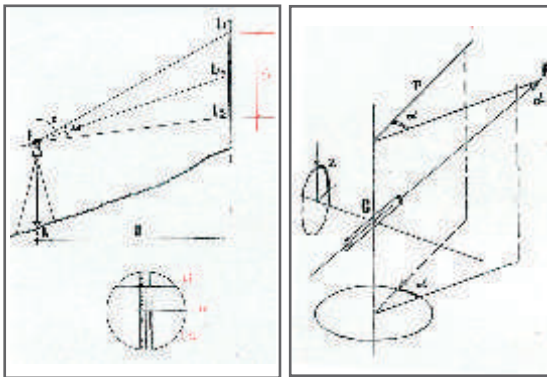
$AE:AH=CD:FG$ da cui $FG=(AH \times CD):AE$
 Dato $CD=AE$ allora $FG=AH$
 $A'E':A'H=C'D':FG$ da cui $FG=(A'H \times C'D')$
 $A'E'$ Dato $A'E'=1/2 CD$ allora $FG=A'H/2$
 Infine $AA'=IL=A'H/2=FG$

TRA STAZIONE TOTALE E LASER SCANNER

ambiti e soglie di applicazione degli strumenti a raggio laser nel rilievo indiretto dell'architettura storica



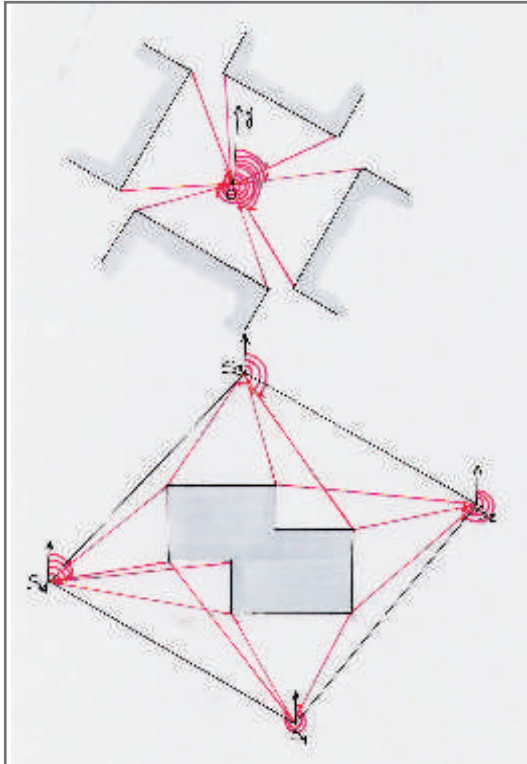
Teodolite: misurazione di distanze e altezze inaccessibili



$$D = K \sin^2 z$$

dove K è una costante strumentale

PROCEDIMENTI DI MISURAZIONE TOPOGRAFICA: IRRAGGIAMENTO E POLIGONALE

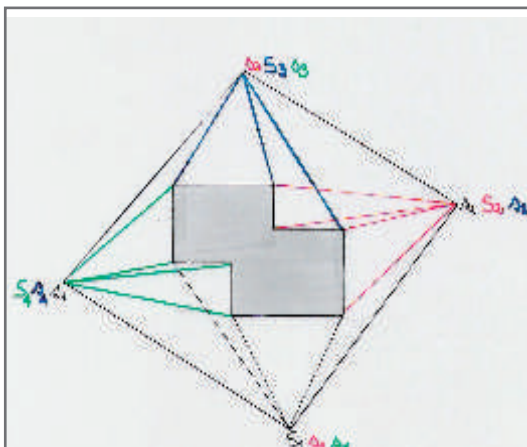


Irraggiamento:

misurazione per coordinate polari da un punto centrale

Poligonale:

misurazione per coordinate polari rispetto ad una spezzata di coordinate note



Centramento forzato:

individuata una poligonale definita da più stazioni strumentali dalle coordinate note, le misurazioni vengono effettuate dai singoli vertici previa "stazionatura", ossia da ogni vertice devono essere effettuate misure di angoli e distanze verso i vertici della precedente e successiva stazione per un più adeguato controllo geometrico delle misurazioni.

Appendice B

Superfici curve in architettura: i sistemi voltati

Le superfici curve

I sistemi voltati, dal punto di vista geometrico, possono essere classificati come superfici curve, ovvero superfici generate dal movimento di una retta nello spazio. In base al movimento, alla legge di moto che lo genera, è possibile ottenere diverse tipologie di superficie: superfici di rotazione, traslazione e rototraslazione. Alcune di queste rientrano nella classe delle superfici rigate.

Superfici di rotazione

Le superfici di rotazione (fig. 01) sono generate dal movimento di una linea (retta o curva) intorno ad una seconda, detta asse di rotazione, in modo che la configurazione "asse-curva" sia rigida. Forniremo equazioni canoniche per alcune delle superfici indicate, rispetto cioè ad un particolare riferimento, legato alla superficie, come si vede nelle figure. Le lettere a,b,c ecc. che compaiono nelle equazioni stanno per numeri positivi.

- **Cilindro circolare retto** (fig.02): generato dalla rotazione di una retta, detta generatrice, parallela all'asse di rotazione (punto comune all'infinito). $x^2+y^2=r^2$

- **Cono circolare retto** (fig.03): generato dalla rotazione di una retta, avente un punto comune (proprio) con l'asse di rotazione. $x^2+y^2-a^2 z^2=0$

- **Sfera** (fig.04): generata dalla rotazione di una circonferenza intorno ad un proprio diametro. $x^2+y^2+z^2 =r^2$

- **Quadriche di rotazione** (figg.05-06-07-08): generate dalla rotazione di una sezione conica (ellisse, parabola, iperbole) intorno ad uno dei propri assi. L'*ellissoide* ($x^2/a^2+y^2/a^2+z^2/b^2=1$) ha origine ruotando sia intorno all'asse minore, sia intorno a quello maggiore, mentre il *paraboloido ellittico* ($x^2/a^2+y^2/a^2-bz=0$) intorno al suo unico asse non trasverso. Nel caso dell'iperbole, se l'asse di rotazione coincide con l'asse non trasverso la quadrica ottenuta è un *iperboloido iperbolico* ($x^2/a^2+y^2/a^2-z^2/b^2=1$) o a una falda o rigato, se l'asse di rotazione coincide con l'asse trasverso la quadrica ottenuta è un *iperboloido ellittico* ($-x^2/a^2-y^2/a^2+z^2/b^2=1$) o a due falde.

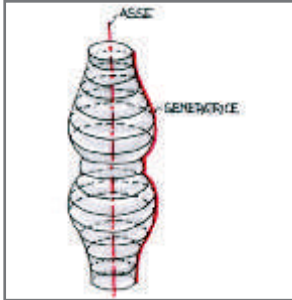


fig.1: superfici di rotazione

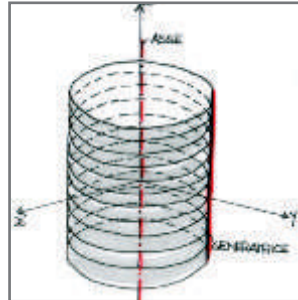


fig.2: cilindro circolare retto

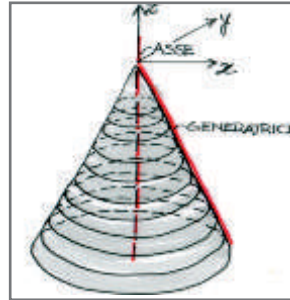


fig.3: cono circolare retto

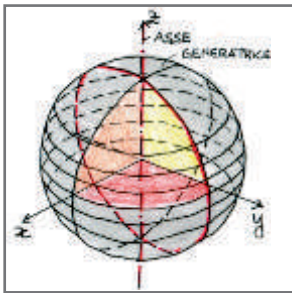


fig.4: sfera

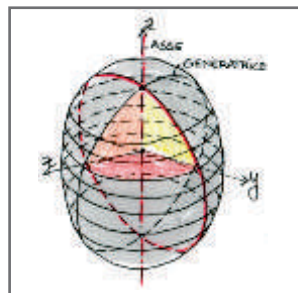


fig.5: ellissoide

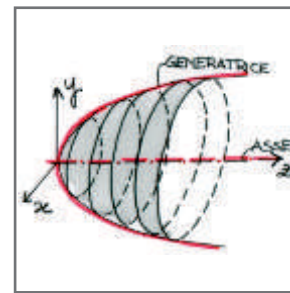


fig.6: paraboloide ellittico

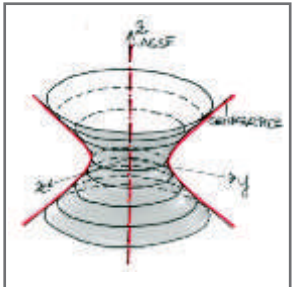


fig.7: iperboloido iperbolico

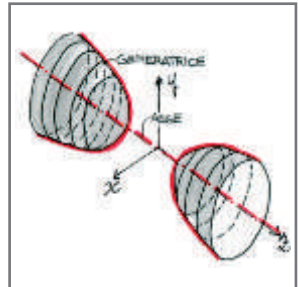


fig.8: iperboloido ellittico

Superfici di traslazione

Le superfici di traslazione (fig.09) sono generate dal movimento di una linea retta o curva (*generatrice*) che si sposta nello spazio parallelamente a se stessa seguendo un'altra linea, retta o curva detta *direttrice*.

- **Cilindro**: generato dal movimento di una linea retta in appoggio ad una linea curva.

Circolare retto: se la direttrice è una circonferenza giacente su un piano ortogonale alla generatrice (fig.10).

Circolare obliquo: se la direttrice è una circonferenza giacente su un piano non ortogonale alla generatrice (fig.11).

Parabolico: se la direttrice è una parabola (fig.12).

Iperbolico: se la direttrice è un'iperbole (fig.13).

Ellittico: se la direttrice è un'ellisse.

Generico: se la direttrice è una curva generica (fig.14).

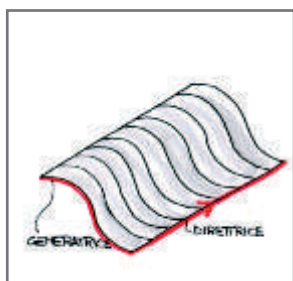


fig.9: superficie di traslazione

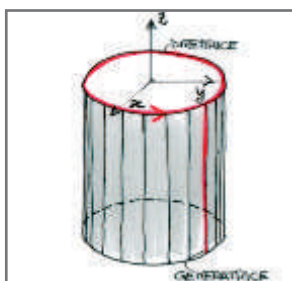


fig.10: cilindro circolare retto

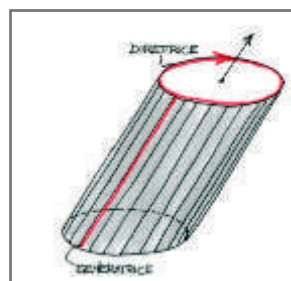


fig.11: cilindro circolare obliquo

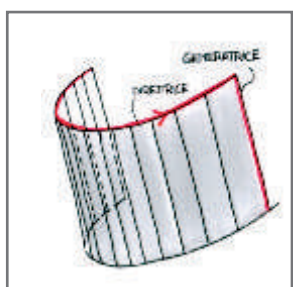


fig.12: cilindro parabolico

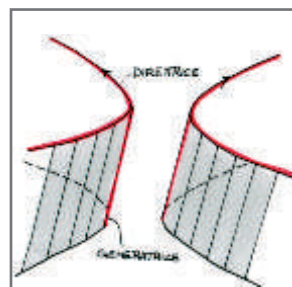


fig.13: cilindro iperbolico

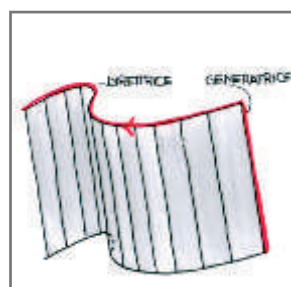


fig.14: cilindro generico

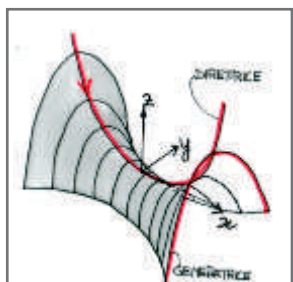


fig.15: paraboloide iperbolico

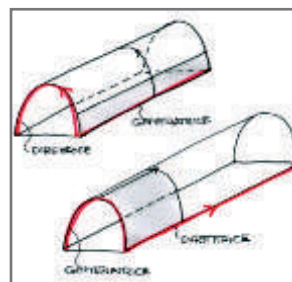


fig.16: traslazione del cilindro



fig.17: superficie rototraslazione

-**Paraboloide iperbolico** (fig.15): generato dalla traslazione di una parabola (generatrice) il cui vertice si sposta lungo la parabola direttrice.

Il cilindro e il paraboloide iperbolico sono superfici originate sia da un movimento di rotazione che di traslazione. Una superficie cilindrica, inoltre, ha origine sia dalla traslazione di una linea retta lungo una linea curva, sia dalla traslazione di una linea curva (arco) in direzione di una linea retta (fig.16).

Superfici di rototraslazione

Le superfici di rototraslazione, rintracciabili frequentemente in architettura nell'intradosso delle scale a chiocciola e nella copertura delle scale elicoidali, sono descritte da un duplice movimento di rotazione e traslazione. Esempi tipici sono gli *elicoidi*.

Superfici rigate

Le superfici rigate devono il loro nome alla notevole caratteristica di ammettere sempre che su di esse si possa appoggiare, in tutta la sua lunghezza, una riga, una linea retta (fig.18); in questo modo risultano definite superfici rigate sia superfici semplici quali i coni o i cilindri che superfici più complesse quali i paraboloidi, gli iperboloidi ecc.

Le superfici rigate sono generate dal moto di una retta detta appunto generatrice che si appoggia a una o più linee, curve o rette, di cui una eventualmente impropria e precisamente:

- **Cilindroide generico**: le direttrici sono una retta (a) e due curve (b e c)(fig.19).
- **Cilindroide a piano direttore**: le direttrici sono due curve (b e c) e una retta (a) impropria. La retta impropria implica la presenza di un piano direttore e quindi un movimento di traslazione (parallelismo rispetto al piano direttore)(fig.20).
- **Cilindro generico**: le direttrici sono una curva (c) e due rette improprie e dunque parallele (a e b)(fig.21).
- **Conoide a piano direttore**: le direttrici sono una retta propria (c), una curva (b) e un piano direttore (fig.22).
- **Cono a cuneo**: le direttrici sono una circonferenza (b), una retta parallela al piano della circonferenza (c) e un piano direttore, ovvero una retta impropria perpendicolare al piano della circonferenza (fig.23).
- **Cono generico**: le direttrici sono due rette (a e b) complanari e una curva (c); le generatrici intersecano il punto D comune alle due rette (fig.24).
- **Paraboloide iperbolico**: le direttrici sono due rette sghembe proprie (a e b) e un piano direttore (fig.25).
- **Iperboloide di rotazione**: le direttrici della superficie sono tre rette sghembe proprie. Tale superficie ha origine altresì dalla rotazione di queste tre rette intorno ad un asse qualsiasi (fig.26).
- **Iperboloide ad una falda**: le direttrici sono tre rette sghembe proprie (fig.27).



fig.18: superficie rigata

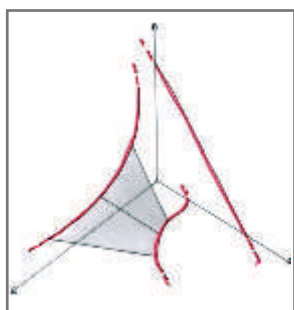


fig.19: cilindroide generico

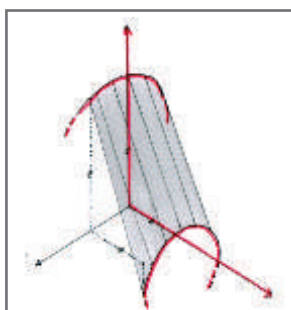


fig.20: cilindroide a piano direttore

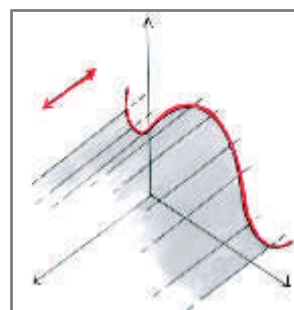


fig.21: cilindro generico

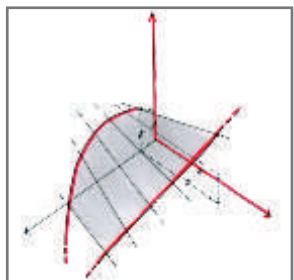


fig.22: conoide a piano direttore

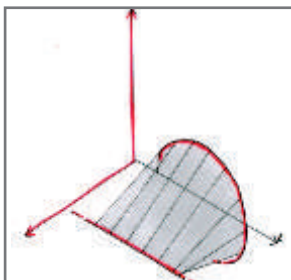


fig.23: cono a cono

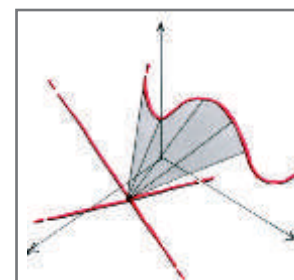


fig.24: cono generico

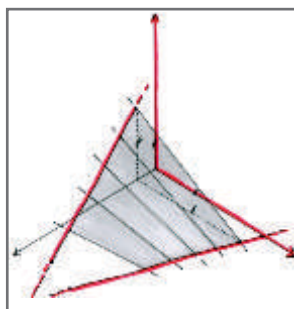


fig.25: paraboloide iperbolico

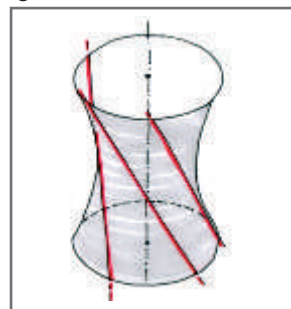


fig.26: iperboloide di rotazione

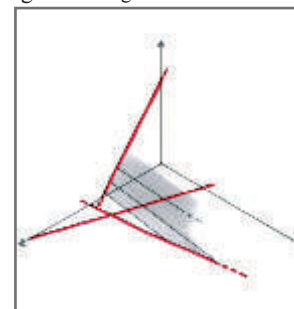


fig.27: iperboloide a una falda

Le superfici voltate

Le superfici voltate costituiscono particolari superfici curve, utilizzate in architettura fin dall'antichità per la copertura dei vani, generate, nella maggior parte dei casi, da un movimento di traslazione o di rotazione di una particolare linea curva, l'arco (fig.28).

Arco a tutto sesto: il centro dell'arco è nel punto medio della corda; è una semicirconferenza

Arco a sesto ribassato: il centro dell'arco è situato sull'asse della corda in posizione ribassata.

Arco pseudoellittico: figura simile ad un'ellisse, costituito da tre segmenti di circonferenza di cui uno centrale ribassato e due esterni uguali e simmetrici.

Arco ellittico: semiellisse

Arco a sesto acuto: costituito da due archi uguali e simmetrici rispetto all'asse dell'apertura. I centri dei due archi

si trovano o nei punti d'imposta o sulla corda, all'interno o all'esterno.

Arco rampante: costituito da tre segmenti di circonferenza; i punti d'imposta si trovano ad altezze differenti

Il rilievo di una superficie voltata, necessita altresì di una conoscenza basilare degli aspetti strutturali che consentono di realizzare tali opere.

Un sistema voltato è costituito da diversi elementi e precisamente (fig.29):

- *Conci*: blocchi di pietra che formano la struttura
- *Filari*: ricorsi orizzontali dei conci o dei mattoni
- *Chiave*: concio più alto dell'arco, posto sull'asse di simmetria della struttura
- *Piedritti*: appoggi della struttura
- *Piano d'imposta*: superficie superiore dei piedritti
- *Intradosso*: superficie inferiore della struttura
- *Linee d'imposta*: staccano l'intradosso dalla superficie interna dei piedritti
- *Arco d'imposta*: profilo che delimita sul fronte l'intradosso della volta.
- *Corda o luce*: distanza tra i piedritti
- *Freccia o saetta*: distanza tra il piano d'imposta e il punto più alto dell'intradosso
- *Estradosso*: superficie superiore della struttura.
- *Reni*: settori tra la linea d'imposta ed i letti il cui angolo di pendio è vicino ai 30°

Il procedimento costruttivo delle volte, utilizzato per la copertura degli ambienti, era già noto ai Sumeri ma solo con i Romani raggiunse la massima perfezione.

La costruzione di un arco o di una volta, autoportante sino al giunto alle reni (30°), necessitava di una struttura provvisoria di ausilio, la *céntina* (fig.30), in grado di sostenere la costruzione a partire da quest'ultimo e sino alla chiusura con il concio in chiave.

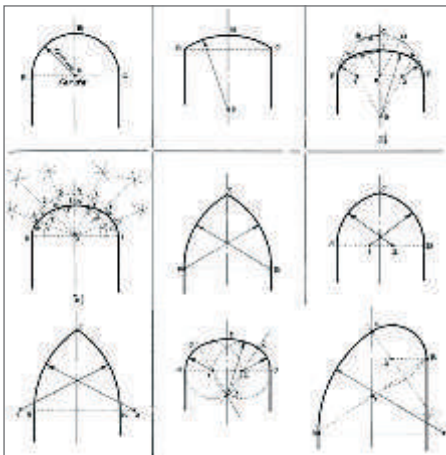


fig.28: tipologie di archi

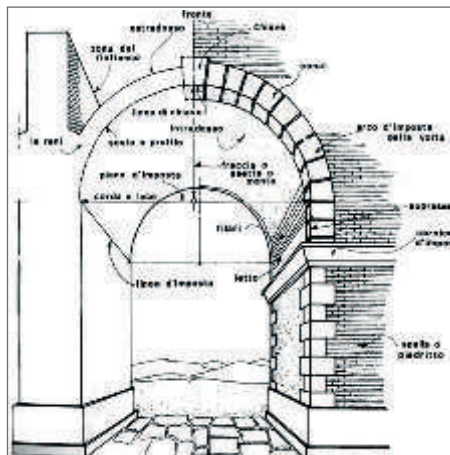


fig.29: elementi costruttivi delle volte

Tale struttura, realizzata con puntelli e tavolati di legno, costituiva l'ossatura che fungeva sia da sagoma per fissare nello spazio la forma dell'intradosso e facilitare il corretto posizionamento degli elementi costituenti la volta, sia da armatura provvisoria per sostenere il peso proprio della volta e contenere le parti nella fase in cui questa non avesse ancora sviluppato sufficienti capacità autoportanti.

Le centine erano costruzioni assai elaborate e pesanti; il loro montaggio (e il loro successivo smontaggio) richiedevano un lungo e difficile lavoro che, associato alla scarsità e all'onerosità del legname costringeva ad una semplificazione delle stesse costruzioni provvisorie.

In ogni epoca storica, per economizzare sulle centine, sono stati eseguiti diversi tentativi per limitare, se non addirittura evitare, l'impiego delle strutture provvisorie; la geometria della volta veniva stabilita dunque in funzione della sua facile "costruibilità" (centinata ed apparecchiatura dei mattoni) piuttosto che sulla base di opportune considerazioni statiche.

La cupola, ad esempio, permetteva di risolvere facilmente il problema della centina; secondo Viollet le Duc¹ i muratori orientali non costruivano centine di armatura per chiudere una cupola, ma si accontentavano di un'asta di legno attaccata al centro della cupola manovrata in ogni direzione costruendo la muratura secondo il raggio dato dall'asta.

Le superfici voltate realizzate dai costruttori romani², la maggior parte delle quali prive di costoloni, richiedevano nel corso della costruzione un supporto continuo sotto l'intera superficie; ciò implicava l'uso di centine mobili con le quali era possibile lavorare per sezioni successive e comunque una notevole quantità di legno per le armature.

In epoca gotica uno degli obiettivi essenziali era quindi costruire utilizzando la minore quantità possibile di centine le quali poi dovevano essere leggerissime (per il problema delle altezze) e tali da permetterne il reimpiego.

A tale scopo venne delineata e sviluppata la possibilità di utilizzare centine con un'unica sagoma reimpiegabile con gli archi a sesto acuto; la sopraelevazione dell'arco a sesto acuto consentiva di ridurre l'onere per le strutture provvisorie in legno: una campata rettangolare poteva essere coperta con una volta a crociera a sesto acuto aventi archi

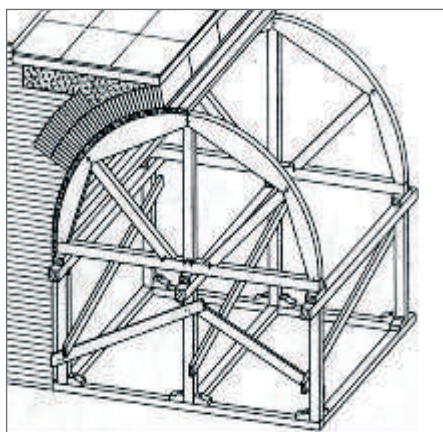


fig.30: centina

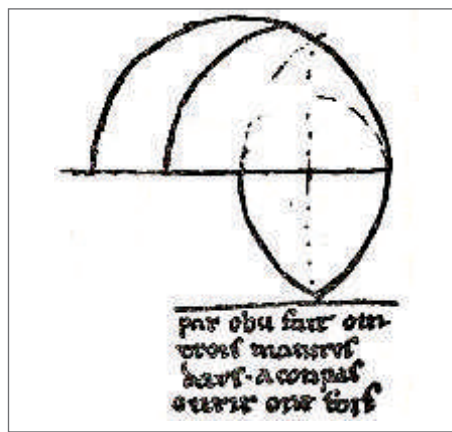


fig.31: Villard de Honnecourt: uniformità di curvatura delle campate gotiche

d'imposta costituiti da segmenti di circonferenza del medesimo raggio³.

Nel Taccuino, l'architetto Villard de Honnecourt (XIII sec) ha lasciato a tal proposito uno schizzo rappresentante due tipi di archi a sesto acuto ed un arco a tutto sesto con questa dicitura: “ In questo modo si possono fare tre tipi di archi mediante una sola apertura di compasso”⁴.

La figura (fig.31) mostra un arco a sesto acuto del tipo equilatero (dove cioè i due centri si trovano ai piedi dei segmenti opposti), un arco a sesto acuto del tipo spesso chiamato “in terzo punto” (i cui due centri dividono la base in tre parti) e un arco a tutto sesto: il disegno conferma l'aspirazione degli architetti gotici ad uniformare le curvature.

Una volta realizzate le nervature, con l'aiuto di leggere impalcature venivano costruite le unghie-vele della volta.

L'utilizzo delle centine risulta strettamente correlato all'apparecchiatura⁵, ovvero al modo di disporre i mattoni (o conci in pietra) per costituire la struttura resistente.

La disposizione dei conci, solitamente, avviene per filari: quando questi hanno uno sviluppo curvo, si comportano come archi elementari e in quanto tali hanno la possibilità di autosostenersi, in parte, nel corso della costruzione rendendosi particolarmente vantaggiosi riducendo l'utilizzo e il dimensionamento delle centine; questo vantaggio ovviamente non si ha qualora i filari siano rettilinei.

Le diverse modalità di apparecchiatura influenzarono il comportamento statico finale differenziandosi principalmente a seconda dello spessore complessivo che la volta doveva assumere: lo spessore minore è ottenuto disponendo i mattoni in folio mentre per spessori maggiori i mattoni vengono disposti a coltello a una o più teste.

Le volte a vela, ad esempio, possono essere realizzate ad anelli concentrici, a filari trasversali arcuati, a spina di pesce, a ventaglio, mentre le unghie delle volte a crociera possono essere realizzate per filari paralleli alle generatrici (a tessitura longitudinale), per filari arcuati paralleli alla direttrice (a tessitura trasversale) piuttosto che diagonale o a spina di pesce (fig.32).

Il procedimento a tessitura longitudinale fornisce una notevole rigidità longitudinale alla struttura, ma richiede che la costruzione proceda contemporaneamente su tutta la lunghezza della volta, mentre la tessitura trasversale fornisce una notevole rigidità trasversale e consente di costruire la struttura “per settori” realizzati in tempi successivi con evidente risparmio di centinatura; la spina di pesce e la tessitura diagonale consentono di costruire la volta senza l'ausilio di centine⁶

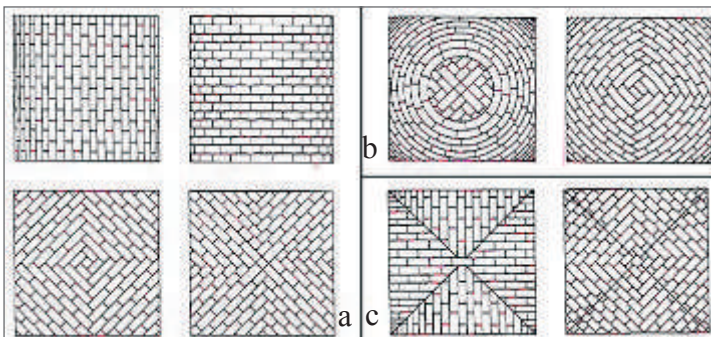


fig.32 apparecchiatura muraria

a volte a botte
b volte a vela
c volte a crociera

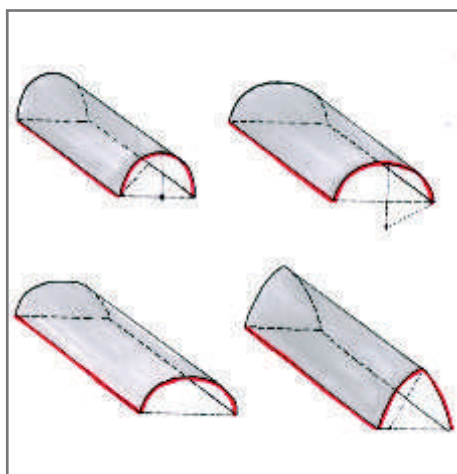


fig.33: arco e volta a botte

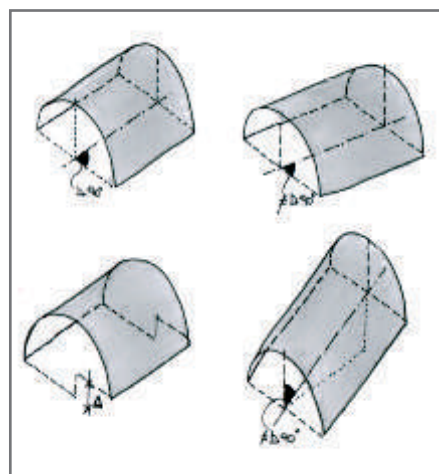


fig.34: inclinazione e volta a botte

- **Volta a botte**: superficie cilindrica generata dal movimento di una linea curva, un arco, che si sposta parallelamente a se stesso in direzione di una linea retta; in relazione al tipo di generatrice, di arco, si otterrà una volta a botte a tutto sesto piuttosto che a sesto ribassato, a sesto acuto, ellittica, parabolica o generica (fig.33).

La volta a botte potrà inoltre essere retta, se l'asse risulta normale al piano del profilo; obliqua, se l'asse non è ortogonale rispetto al piano del profilo; inclinata o rampante (fig.34).

(capannoni aeroportuali di Orly, Eugène Freyssinet, 1921 - aereoporto di Osaka, Renzo Piano, 1988-1993).

- **Volta lunettata**: costituita da una volta a botte intersecata con una o più volte cilindriche (lunette) (fig.35)



fig.35: volta lunettata

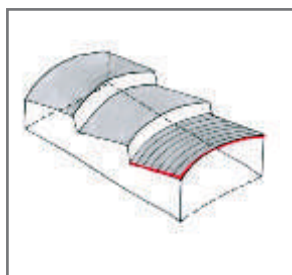


fig.36: volta a shed



fig.37: volta conica

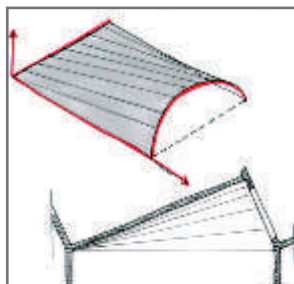


fig.38: volta conoidale

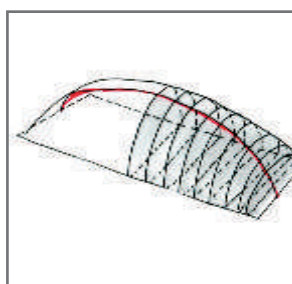


fig.39: volta a conca

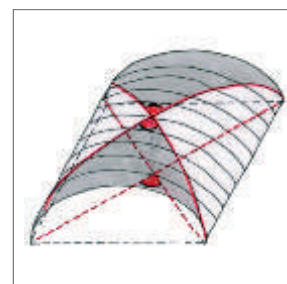


fig.40: unghie e fusi

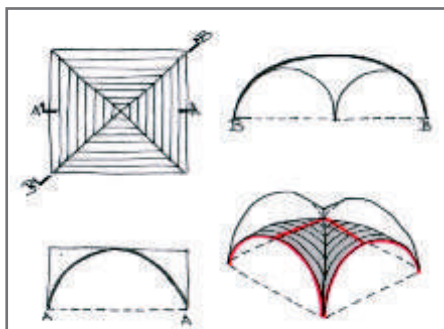


fig.41: volta a crociera quadrata

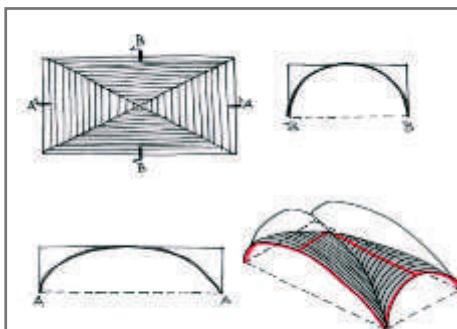


fig.42: volta a crociera rettangolare

- **Volta a shed**: superficie cilindrica con generatrici inclinate (fig.36).
- **Volta conica**: porzione di superficie conica appoggiata a muri rettilinei ma non paralleli, utilizzata come espediente di illusionismo prospettico nel periodo barocco: la convergenza delle pareti e del soffitto crea un effetto ingannevole di profondità (fig.37).

(Galleria di Palazzo Spada a Roma, Francesco Borromini).

- **Volta conoidale**: superficie rigata avente come direttrice una retta impropria, una linea retta e un arco di cerchio (fig.38).
- **Volta a conca**: superficie curva impostata su una direttrice semiellittica posta nella mezzeria del lato minore della campata rettangolare sulla quale si impostano le generatrici anch'esse semiellittiche perpendicolari alla prima e di cui si conoscono gli estremi dell'asse maggiore e la sommità dell'asse minore (fig.39).

- **Volta a crociera**: costituita dall'accostamento di più unghie (fig.40), porzioni di superficie determinate dall'intersezione di una volta a botte (cilindrica piuttosto che a sesto acuto) con un piano verticale passante per le sue diagonali; le quattro parti derivate, uguali due a due, prendono il nome di unghie, quelle in testa comprendenti gli archi di imposta, e di fusi, quelle laterali comprendenti le linee di imposta, le direttrici.

Ogni unghia e fuso sono costituiti da una superficie cilindrica la cui proiezione sul piano orizzontale è un triangolo; i costoloni delle unghie e dei fusi, a causa della posizione simmetrica dei piani verticali sezionanti e da cui hanno origine, risultano congruenti, uguali e quindi possono essere accostati per mezzo di una rotazione.

In relazione all'angolo coperto da ogni singola unghia possono così essere costruite volte a crociera a su ambienti quadrati (fig.41), rettangolari (fig.42) piuttosto che poligonali (fig.43).

- **Volta esapartita**: la volta a crociera può essere rialzata nel caso in cui la chiave della crociera è più alta delle chiavi degli archi d'imposta ed esapartita (fig.44) se impostata su un vano a pianta rettangolare e con due archi d'imposta affiancati su entrambe i lati lunghi.

La volta a crociera venne utilizzata in particolare nel periodo tardo romanico e nel periodo gotico (abbazia di Saint-Denis, 1140 - cattedrale di Durham – basilica di Sant'Ambrogio) rinforzata con archi di sostegno, detti costoloni, in corrispondenza dell'intersezione delle unghie, i quali consentivano di convogliare le spinte in punti precisi della struttura muraria e dunque la possibilità di alleggerire la stessa mediante la realizzazione di ampie pareti finestate.

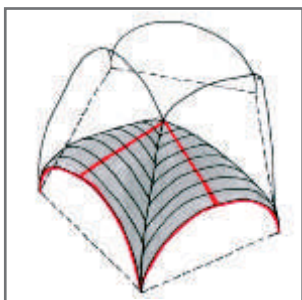


fig.43: volta a crociera poligonale

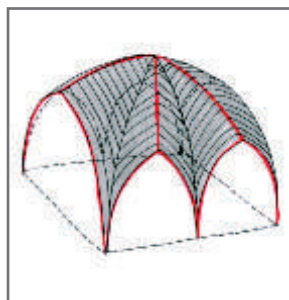


fig.44: volta esapartita

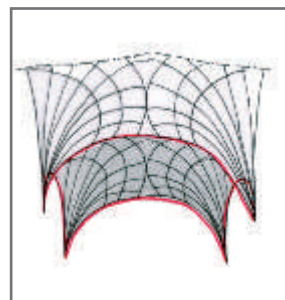


fig.45: volta a ventaglio

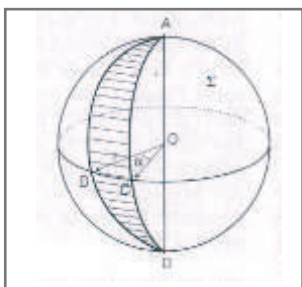


fig.46: unghie sferiche

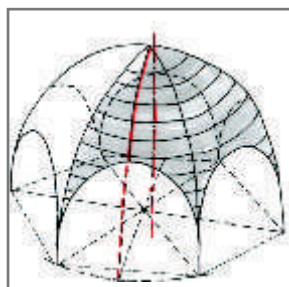


fig.47: volta a ombrello

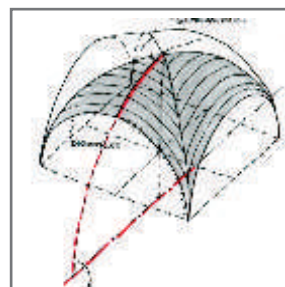


fig.48: volta a crociera rialzata

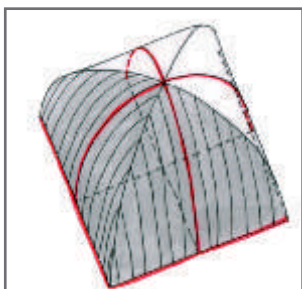


fig.49: volta a padiglione su base quadrata

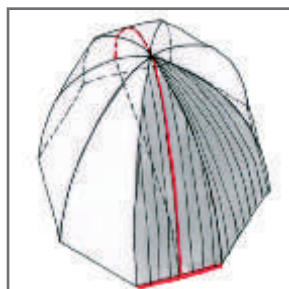


fig.50: volta a padiglione su base poligonale

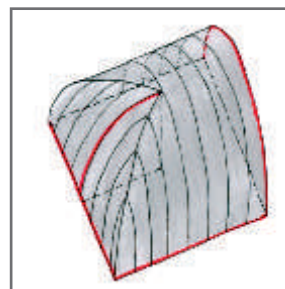


fig.51: volta cilindrica con testa a padiglione



fig.52: volta a schifo

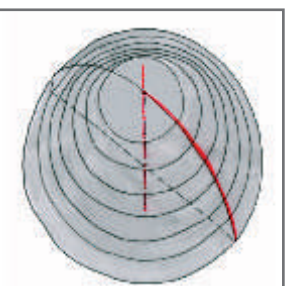


fig.53: volta a catino

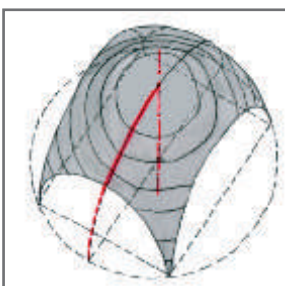


fig.54: volta a vela

L'utilizzo di unghie derivate da volte a botte a sesto acuto, inoltre, si rivelò particolarmente utile in quanto l'arco acuto, che resiste meglio staticamente poiché più vicino alla verticalità rispetto ad un arco a sesto ribassato, consentiva di realizzare in modo efficace, da un punto di vista statico campate su pianta rettangolare⁷ e quindi planimetrie più varie e ritmate.

- **Volta a ventaglio:** struttura tipica del gotico perpendicolare inglese, presenta l'intradosso nervato da fasci di costoloni a raggiera con l'origine sul fusto di una colonna o di una mensola; se le nervature sono concentriche alla circonferenza della pianta si ha la volta definita ad imbuto (fig.45). (cattedrale di Gloucester).

- **Volta ad ombrello:** volta a crociera con unghie sferiche (porzioni di superfici sferiche anziché cilindriche)(figg. 46-47)

- **Volta a crociera rialzata-curva:** le unghie sono superfici sferiche realizzate dalla rotazione di un arco di circonferenza intorno ad un asse appartenente al piano della campata e ortogonale alla corda dell'arco d'imposta. La chiave è dunque rialzata ed arcuata (fig.48).

- **Volta a padiglione:** analoghe alle volte a crociera, ma composte dall'accostamento di fusi anziché unghie; anche in questo caso l'ambiente può essere a pianta quadrata, rettangolare o poligonale (figg.49-50).

(cupola di Santa Maria del Fiore, Filippo Brunelleschi, XV secolo)

- **Volta cilindrica con testa a padiglione:** se la pianta rettangolare, è troppo allungata per essere coperta con una volta a padiglione, si utilizza una semplice volta a botte sulla quale vengono innestate, in corrispondenza dei lati minori dell'ambiente, due falde di padiglione, due fusi (fig.51).

(cappella Sistina).

- **Volta a schifo:** ottenute dall'intersezione di una volta a padiglione con un piano orizzontale; con tale espediente si facilitava la decorazione della volta in quanto su superficie piana anziché curva⁸ (fig.52).

- **Volta di rivoluzione, a bacino o a catino o cupole:** superficie di rivoluzione determinata dalla rotazione rispetto ad un asse verticale di una curva generatrice che può essere un arco di cerchio, di ellisse, di parabola (fig.53).

(Pantheon , costruito da Agrippa intorno al 27 a.c. - cappella della Sacra Sindone, Torino; Guarino Guarini).

- **Volta a vela:** di origine bizantina, deriva dall'intersezione di una cupola con piani verticali passanti per i lati della campata che potrà essere quadrata, rettangolare

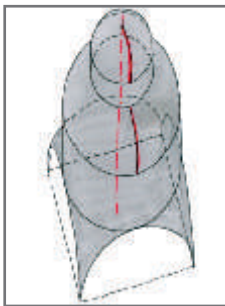


fig.55: volta a catino con pennacchi sferici

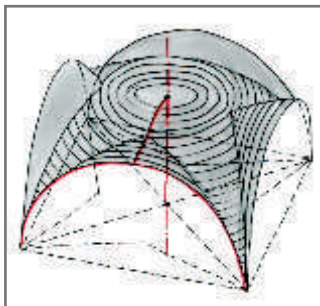


fig.56: volta a stella a spigolo

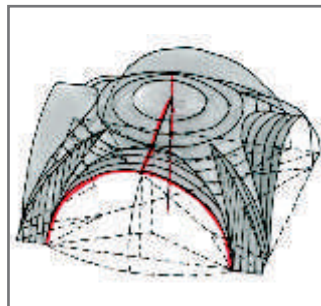


fig.57: volta a stella a squadro

piuttosto che poligonale (fig.54).

(Santa Sofia, Istanbul).

- **Volta a catino con pennacchi sferici:** dall'intersezione di una volta a vela con un piano orizzontale passante all'altezza dei vertici degli archi, otteniamo due parti distinte: i pennacchi che sono elementi di raccordo e la calotta che è una vera e propria cupola. La volta a catino con pennacchi sferici è la combinazione della volta a vela amputata della calotta superiore alla quale viene sostituita una volta a bacino, generalmente un emisfero, a volte sostenuta da un tamburo (fig.55).

(san Carlino alle Quattro Fontane, Borromini, 1634).

- **Volte a stella:** superfici derivanti dall'evoluzione della volta a crociera esapartita. Suddivise in più porzioni dalla forma variabile in relazione al luogo e all'epoca di realizzazione, si ricordano le volte leccesi "a spigolo" (fig. 56) e "a squadro" (fig.57). Nel primo caso, gli spigoli laterali delle unghie non coincidono con le diagonali della campata base e la parte centrale della superficie è coperta da una cupola; mentre, nel secondo caso, la superficie ha origine dall'intersezione di una cupola con due volte a botte aventi raggio inferiore alla campata e dunque con gli spigoli coperti da porzioni di una volta a padiglione impostata sulla campata stessa.

Note

¹ Cfr. Bechmann Roland, *Le radici delle cattedrali*, Mondadori, 1989, pag.146

² Cfr. Bechmann Roland, op.cit in nota n°1, pag.152

³ “Per costruire un arco a sesto acuto il cui raggio sia identico a quello dei costoloni a tutto sesto formanti gli archi diagonali bisognerà sopraelevare leggermente i centri avvicinandoli all’asse verticale”. Da *Disegno e costruzione delle volte gotiche*, Bertan Fiorenzo, in *Rappresentazione dell'architettura e dell'ambiente: principi costruttivi del progetto tra artificio e natura*, MURST, 1997

⁴ Cfr. Bechmann Roland, op.cit in nota n°1, pag.163

⁵ Apparecchio murario, indica la disposizione degli elementi costituenti un’opera muraria. Nella costruzione di una volta può avvenire per filari longitudinali, trasversali, diagonali o a spina di pesce. da *Dizionario degli elementi costruttivi*, a cura di Galliani G.V. , UTET, Torino

⁶ Cfr. Boaga Giorgio, *Corso di tecnologia delle costruzioni*, Calderini, pag. 224

⁷ Volte a crociera su pianta rettangolare e con archi d’imposta a tutto sesto e a sesto ribassato, comportano la realizzazione di archi trasversali diagonali notevolmente ribassati e dunque poco efficaci dal punto di vista statico in quanto molto prossimi all’orizzontalità.

⁸ Hanno l’aspetto di uno scafo rovesciato; il termine schifo è di origine marinaie per designare un battello a fondo piatto.

Appendice C

Rapporti geometrici e canoni numerici

In tutte le epoche, i progettisti sono ricorsi a tracciati geometrici per comporre le varie parti di un organismo utilizzando rapporti semplici e irrazionali derivati rispettivamente da numeri interi o da loro radici quadrate per proporzionare le varie parti.

L'utilizzo in architettura di semplici schemi geometrici che mettono in rapporto di proporzionalità i diversi elementi dell'opera costruita, risale alle grandi civiltà del passato.

La certezza che la rappresentazione del Bello potesse essere raggiunta attraverso poche elementari leggi proporzionali sono rimaste alla base di ogni forma artistica per quasi duemila anni: dall'età greca al Settecento ogni espressione d'arte è stata concepita e realizzata secondo canoni numerici derivati dalla musica, dalla matematica e dalla geometria.

Nella Grecia Classica lo studio della geometria e della matematica avevano un rilievo particolare; i numeri e la ricerca delle proporzioni matematiche ebbero una notevole influenza nella produzione artistica e architettonica.

Pitagora (570-500 ac) individuò nel numero l'*arché* la natura intima del tutto, punto di partenza, fondamento e causa di ogni cosa esistente: sono leggi numeriche quelle che regolano il tempo e le stagioni, il ciclo biologico e ogni forma di movimento.

Ogni figura geometrica, volume o corpo può essere pensato come un numero finito quindi tutto è numero e tutto è numeralizzabile; su questa certezza Pitagora definì le similitudini fra proporzioni numeriche ed armonia musicale.

Pitagora aveva ricercato le similitudini fra proporzioni numeriche ed armonia musicale

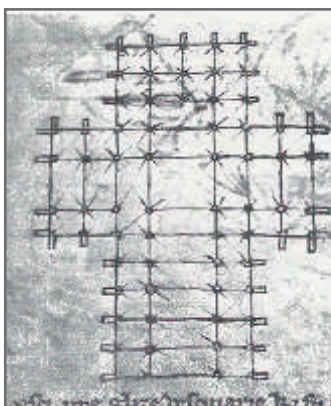


fig. 1: Dal Taccuino di Villard (XIII sec) "Questa chiesa è inscritta in un rettangolo $3/2$, cioè in un triplo quadrato doppio, corrispondente alla quinta, giacché la lunghezza è di dodici campate, la larghezza di otto. Il coro è una proiezione della quarta $4/3$, i due transetti materializzano il rapporto dell'ottava $4/2$. L'incrocio della navata e del transetto rappresenta un perfetto quadrato $4/4$, cioè l'unità principio di ogni armonia; e il quadrato ha chiaramente un ruolo fondamentale nella successione delle campate. la navata ricorda la terza: $5/4$.

riuscendo a dimostrare che le eufonie tipiche degli accordi utilizzati nella musica dell'epoca (accordi di ottava, quinta e quarta) si possono esprimere attraverso i rapporti numerici semplici di 1:2 2:3 3:4; rapporti che regolano la dimensione fra i lati del rettangolo di forma esteticamente corretta¹.

Pitagora aveva trovato che le armonie musicali sono determinate da rapporti di piccoli numeri interi: se nelle stesse condizioni vibrano due corde, una delle quali sia lunga metà dell'altra (1:2), il suono della più breve sarà di un'ottava (diapason) più alta della lunga; se le lunghezze delle due corde stanno nella relazione di 2:3, la differenza nell'altezza del suono sarà di una quinta (diapente); se si trovano nella relazione di 3:4, la differenza del tono sarà di una quarta (diatessaron) (fig.1).

Gli stessi pitagorici pensavano che ogni forma in natura fosse associabile e/o ricostruibile con alcune formule della geometria e della matematica: nella logica della natura che è sempre misurabile (la geometria) e numerabile (l'aritmetica), tutto è modulato con armonia e diventa proporzionale attraverso l'applicazione dei rapporti racchiusi nelle formule della musica, della media ed estrema ragione, e nelle proprietà del triangolo, del cerchio e del quadrato.

I Pitagorici, inoltre, dedicarono parecchia attenzione allo studio delle proprietà dei singoli numeri alla ricerca dei numeri perfetti che individuano nella sequenza 6-10-16-28-36-72-105-108; tali numeri venivano reputati perfetti, ovvero di qualità aritmetica, in quanto uguali alla somma dei loro divisori propri, per esempio il $6 = 3+2+1$ o il $28 = 1+2+3+4+5+6+7$.

Fra tutti i numeri che i Pitagorici consideravano secondo i principi della numerologia, un particolare valore simbolico veniva attribuito al 10, "la madre di tutti i numeri" in quanto rilevabile ovunque nella natura: la nascita del sistema numerico decimale deriva dalla definizione pitagorica del 10.

La tradizione pitagorica elaborò una grande varietà di teorie tendenti a spiegare con un approccio geometrico il piacere della sensazione estetica; fra queste teorie un posto di rilievo spetta alla sezione aurea (fig.2).

Trovare la sezione aurea di un segmento AB significa individuare il punto interno C in modo tale che $AC:CB=CB:AB$ ossia che la parte minore stia alla maggiore come questa all'intero; la sezione aurea pertanto può essere individuata in un rapporto numerico avente un valore pari ad un numero irrazionale di circa 0,618.

Se Ippocrate è ricordato per lo studio matematico della divisione di un segmento in "media ed estrema ragione" (o della sezione aurea), Euclide, più tardi, ci offre la

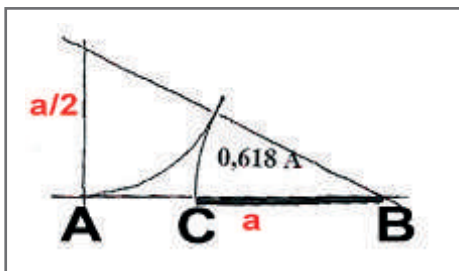


fig.2: rapporto aureo

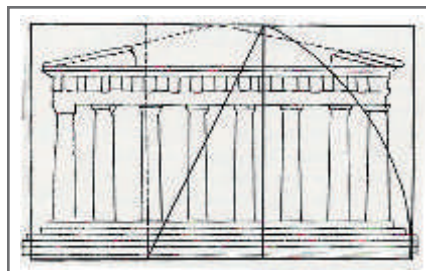


fig.3 Partenone: individuazione grafica del rapporto aureo

costruzione grafica per tracciare un rettangolo aureo: proiettando sul lato di un quadrato la diagonale del semi quadrato che si ottiene tracciandone l'asse ortogonale al lato su cui si effettua la proiezione.

Numerosi studi, mirati a trovare i criteri di proporzionamento che hanno guidato i progettisti dell'epoca, hanno dimostrato l'esistenza di rapporti modulari fra le varie parti di un'opera e fra queste e il tutto e che la sezione aurea è stata utilizzata quale concetto ordinatore e proporzionatore nella progettazione di numerosi organismi architettonici tra i quali il Partenone (fig.3).

Fra il VI° e V° secolo a.c. incominciò ad essere usata nella cultura figurativa occidentale un'altra forma geometrica rettangolare che si ottiene ribaltando la diagonale di un quadrato sul lato dello stesso: $L\sqrt{2}$; questo rettangolo fu definito magico e le sue proprietà sono largamente usate utilizzate anche dall'industria moderna ² (fig.4).

Le teorie greche trovarono vasta eco nella cultura romana che fece propri i concetti di proporzione e di modularità.

Vitruvio (I sec. a.c.) nei dieci libri del suo De Architectura offriva una completa panoramica della tecnica costruttiva del suo tempo e stabiliva che la composizione architettonica dovesse fondarsi sulla simmetria e sull'armonia proporzionale delle parti fra loro e con il tutto, stabilita su un sistema di rapporti modulari fondato sulle misure dell'uomo, sintesi della perfezione celeste e dell'armonia dell'universo.

A sua volta, Vitruvio, riprende un concetto già noto agli architetti greci, quello relativo ad un'idea di bellezza da ricercare all'interno delle proporzioni che caratterizzano un corpo umano ben formato: i numeri vengono dedotti dal modello umano, che ci mostra la perfezione del 10 dal numero delle dita delle mani, del 6 deducibile dal rapporto tra piede e altezza complessiva dell'uomo e tra palmo e cubito, mentre il rapporto tra cubito e dito rivela l'importanza del 24; il sedici risulta il numero perfettissimo (10+6).

Questo principio non era sconosciuto agli architetti greci del V° secolo che lo avevano espresso nelle proporzioni degli ordini architettonici e che tornerà ad avere grandissima fortuna a Firenze nel '400.

Nel trattato di Vitruvio viene inoltre riportata la dimostrazione dell'indovinello di Platone (fig.5) per individuare graficamente un quadrato di area doppia rispetto ad uno dato: "nel quadrato lungo e largo 10 piedi sia tracciata una linea diagonale da un angolo all'altro in modo da stabilire una separazione fra i due triangoli di uguale lunghezza, ciascuno di 50 piedi di superficie, che lo compongono. E prendendo come lato la

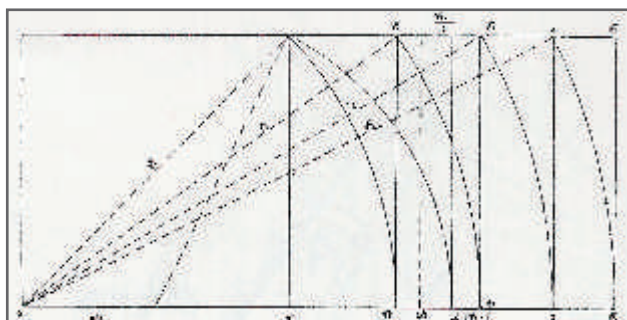


fig.4 Rettangolo magico: ribaltando la diagonale di un quadrato ($\sqrt{2}$) di lato unitario si ottiene un rettangolo i cui lati sono nel rapporto $1:\sqrt{2}$. Ribaltando la diagonale di un rettangolo così ottenuto si costruisce un altro rettangolo i cui lati sono nel rapporto $1:\sqrt{3}$.

lunghezza di questa linea diagonale, sia tracciata un'area quadrata. In questo modo: nel grande quadrato verranno determinati quattro triangoli della stessa grandezza e dello stesso numero di piedi dei due triangoli di 50 piedi delimitati dalla diagonale del quadrato piccolo.”

La caduta dell'Impero Romano d'Occidente, il diffondersi di una nuova concezione religiosa e la scarsa circolazione della cultura contribuirono, in epoca medievale, alla temporanea messa in crisi delle teorie estetiche classiche.

Il concetto classico di Vitruvio che legava la bellezza dell'architettura alla precisione dei rapporti bidimensionali e delle proporzioni veniva così abbandonata in favore di una maggiore libertà compositiva .

Nel primo Medioevo, infatti, più che i rapporti armonici o quello aureo si applicano schemi geometrici fondati soprattutto sul quadrato e i triangoli; l'utilizzazione in architettura di semplici matrici geometriche, se da una parte risponde a esigenze tecniche e pratiche, dall'altra si carica di significati simbolici che rimandano alla tradizione cristiana di cui è permeata la cultura medievale.

Le figure semplici hanno costituito in ogni periodo e in tutte le religioni i simboli primordiali della rappresentazione divina.

Nel medioevo il quadrato veniva usato costantemente; oltre ad essere una forma statica (equilibrio, uniformità perchè nessuna dimensione prevale sulle altre) il quadrato veniva associato a particolari simbolismi: alla terra, a Dio, alla Gerusalemme celeste, al numero sacro, il 10 (la somma dei numeri che compongono il numero quattro 1,2,3,4 equivale a dieci).

In modo diffuso, il quadrato, lo si ritrova nei disegni del taccuino di Villard, nei tracciati e negli schemi geometrici di numerose piante di edifici.

Villard, infatti, era stato architetto dell'ordine cistercense fondato da Bernardo; un ordine la cui scuola di pensiero si fondava sulla fusione dei misteri teologici con la cosmologia platonica in una sintesi che permetteva di leggere la teologia attraverso il numero, la matematica e la geometria.

L'applicazione delle “perfette proporzioni”, determinate da precisi rapporti matematici e geometrici (ideale estetico di Bernardo), divenne matrice tipologica, tradizione costruttiva di ogni architettura cistercense e dalle scuole si diffusero le leggi, i metodi, le forme che avrebbero regolato i progetti e la costruzione delle chiese e delle abbazie, modelli dell'universo cosmico medioevale.

Nel sapere medioevale, inoltre, con diverse connotazioni a seconda del periodo, della formazione o delle fonti, il numero era interpretato come manifestazione della

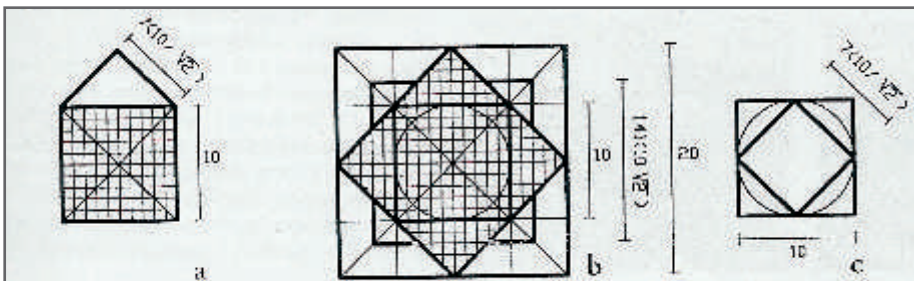


fig. 5: indovinello di Platone

sapienza divina, modalità del rapporto cosmico tra unità e pluralità, legge dell'armonia universale.

Anche i costruttori medievali, analogamente a quelli delle grandi civiltà antiche, lavorarono sui numeri adottando misure e proporzioni collegate con i numeri ciclici attinti dall'astronomia (3, 7, 12, 30, 360) o di altri ripresi dalla Bibbia: il 20 che nell'esegesi cristiana, è quello delle opere della Creazione, dei libri dell'Antico Testamento, delle Virtù di Cristo e il 21 numero della perfezione generato dal prodotto dei numeri sacri 7 e 3 e di cui nella Bibbia si parla a proposito delle "ventuno perfezioni della sapienza".

Sempre nel Medioevo, il matematico Leonardo Pisano (1170-1230) detto Fibonacci, pubblicò nel 1202 un libro "Il liber abaci" con le esperienze dei suoi studi e la famosa "successione" dei numeri in cui ogni termine successivo è uguale alla somma dei due precedenti (1,2,3,5,8,13,21,34,55,89...) e il cui rapporto fra i due termini successivi tende a coincidere con il rapporto della sezione aurea : $1:2=0,5$ $2:3=0,666$ $3:5=0,60$ $5:8=0,625$

La scoperta del testo di Vitruvio avvenuta nel 1414 nell'Abbazia di Montecassino, riporta l'interesse degli architetti rinascimentali alle teorie proporzionali del mondo classico; attraverso il ridisegno degli edifici della romanità e la verifica del testo vitruviano, con i modelli ritrovati gli architetti ricercavano i rapporti, le proporzioni, le regole formali, costruttive e soprattutto il linguaggio architettonico classico.

Da un esame su quanto esposto dai trattatisti del primo Quattrocento, si avince che le teorie elaborate relativamente a problemi legati all'architettura, tendevano a riconquistare il linguaggio classico per poterlo adottare nella prassi progettuale con lo scopo di far propria la disciplina insita nella sintassi degli ordini, che permettesse appunto, nella pratica, un risultato armonico e ordinato.

Lo studio delle proporzioni raggiunse il suo massimo sviluppo nel Rinascimento e nei secoli successivi non si registrarono ulteriori apporti teorici originali: tuttavia le regole stabilite dai grandi trattatisti del Cinquecento conservarono la loro validità fino alla moderna reazione agli ordini architettonici.

Note

¹ Cfr. Colistra Daniele, *Architettura e analisi delle geometrie sottese*, in *Il disegno dell'architettura*, edizioni del dipartimento di architettura e analisi della città mediterranea, settembre 1997

² raddoppiando o dividendo a metà un foglio UNI si ottiene sempre una figura simile a quella di partenza e caratterizzata dal rapporto $L\sqrt{2}$.

BIBLIOGRAFIA DI RIFERIMENTO

Gli strumenti e le tecniche

Adam Jean Pierre, *L'arte di costruire presso i romani*, Longanesi, Milano 1984

Andreozzi Luigi, *Un laboratorio per il passato*, Il lunario, Enna 2002

Bartorelli Ugo, *Topografia*, Patron editore, Bologna 1986

Bezoari Giorgio, Monti Carlo e Selvini Attilio, *Misura e rappresentazione*, casa editrice ambrosiana

Bezoari G.- Monti C.- Selvini A., *Fondamenti di rilevamento generale I – Topografia e Cartografia*, Hoepli, Milano, 1989.

Bezoari G.- Guzzetti F., *Impianto generale di un rilievo architettonico*, in «Recuperare», 2, 1992.

Candito Cristina, *Occhio, misura e rilievo*, Arti grafiche Lux, Genova, 2001

Carlucci Renzo, *Topografia*, edizioni DEI, Roma 1987

Crosilla F.- Visintini D., *Controllo di qualità del raddrizzamento digitale per il rilievo dell'architettura*, in «Bollettino della S.I.F.E.T.», 2, 1994.

Crosilla Fabio – Galetto Riccardo (a cura di), *La tecnica del laser scanning: teoria ed applicazioni*, CISM, Udine, 2002

Docci Mario, Diego Maestri, *Storia del rilevamento architettonico e urbano*, Editori Laterza, Roma-Bari 1993

Erede Giuseppe, *Elementi di Topografia*, ed. Bemporad & figlio 1915

Fondelli Mario, *Manuale di topografia*, editori Laterza, Roma 1990

Fondelli M., *Trattato di fotogrammetria urbana e architettonica*, Laterza, Bari, 1992

Gnemmi A., *Il rilievo di facciate mediante teodolite elettronico*, in «Bollettino della S.I.F.E.T.», 2, 1994.

Kraus K., *Fotogrammetria*, Volume 1: Teoria e applicazioni, Levrotto & Bella, Torino, 1994.

Marino L., *Il rilievo per il restauro*, Hoepli, 1990

Monti C., *Per una conoscenza metrica dell'Architettura*, in «TEMA rivista trimestrale di restauro. Dossier: «Un rilievo per il restauro?», 3-4, 1996.

Mori Attilio, *Cenni storici sui lavori geodetici e topografici...in Italia nel secolo XVIII e XIX*, I.G.M. 1903

Saint Aubin Jean-Paul, *Il rilievo e la rappresentazione dell'architettura*, Moretti e Vitali, Bergamo, 1999

Taccagni Carlo, *Rilevamento topografico e i suoi strumenti, monografia per il catalogo della mostra "l'Europa delle carte"* in Genova 1990

Vagnetti Luigi, *L'architetto nella storia d'occidente*, edizioni CEDAM, Padova 1980

Vardanega Tullio, *Lezioni di topografia*, S.E.I. 1948

Forma e deformazione: le volte della chiesa dell'abbazia di Monteoliveto

Arlati-Accoto, *Le volte leccesi tra tradizione e innovazione*, Congedo ed., Galatina 2001

A.V., *Rappresentazione dell'architettura e dell'ambiente: principi costruttivi del progetto tra artificio e natura*, MURST, 1997

Bechmann Roland, *Le radici delle cattedrali*, Mondadori, 1989.

Boaga Giorgio, *Corso di tecnologia delle costruzioni*, Calderoni

Breyman Gustav Adolf, *Archi, volte, cupole*, editrice librerie Dedalo, Roma 2003

Colaiani Vitogiorgio, *Le volte leccesi*, Dedalo, 1967

Crescenzi Carmela, *Superfici a semplici e doppia curvatura. Le ragioni geometriche delle coperture voltate in architettura. Palermo 1991*. Tesi Dottorato di Ricerca

Docci M.- Migliari R., *Scienza della rappresentazione*, Carocci editore, Roma 1999

Galliani G.V. (a cura di), *Dizionario degli elementi costruttivi*, UTET, Torino

Saccardi Ugo, *Applicazioni della geometria descrittiva*, Lef, Firenze 1989

Vagnetti Luigi, *L'architetto nella storia d'occidente*, edizioni CEDAM, Padova 1980

Spazio fisico e spazio teorico: la geometria delle piazze medievali a Parma

Banzola Vincenzo (a cura di), *Parma: la città storica*, Artegrafica Silva, Parma 1978

Capelli Gianni, *Piazza Grande da Parma romana al Duemila*, Parma, 1989

Castagneti C.- Hainess O.- Pellegrini E., *Le mura di Parma: da città murata a organismo in espansione (1860-1914)*, vol. III., Battei, Parma 1980

Colistra Daniele, *Architettura e analisi delle geometrie sottese, in Il disegno dell'architettura*, edizioni del dipartimento di architettura e analisi della città mediterranea, settembre 1997

Conforti Paolo, *Le mura di Parma, dalle origini alle soglie del Ducato (1545)*, vol. I e vol. II, *Dai Farnese alla demolizione*, Battei, Parma 1979-1980

Conforti Paolo e Erenda Cristina, *Il Battistero e il tracciato del canale maggiore*, in Archivio storico per le province parmensi, quarta serie volume XLVIII anno 1996,

De Rubertis Roberto- Clemente Matteo, *Percezione e comunicazione visiva dell'architettura*, Officina edizioni, Roma 2001

Galliani G.V. (a cura di), *Dizionario degli elementi costruttivi*, UTET
Affò Ireneo, *Storia della città di Parma*, rist. anast., Bologna, 1980

Giandebiaggi Paolo – Vernizzi Chiara, *Il Battistero di Parma: analisi grafica e confronti nella morfologia urbana* in Archivio storico per le province parmensi, quarta serie volume XLVIII anno 1996

Martini A., *Manuale di metrologia*, Torino 1883

Pellegrini Marco, *La cattedrale di Parma*, Silva editore

Quintavalle Arturo Carlo, *La cattedrale di Parma e il romanico europeo*, Parma, 1974

Vagnetti Luigi, *L'architetto nella storia d'occidente*, edizioni CEDAM, Padova 1980

Vitruvio, *Architettura Libri I-VII*, Roma 1960

Vittkover R., *Principi architettonici nell'età dell'Umanesimo*, Einaudi, Torino 1988

Macro e microarchitettura: le superfici plastiche nel cimitero della Villetta

Aloi Roberto, *Architettura funeraria Moderna*, Hoepli, Milano 1941

Bianchi Alessandro, *Disegno e simbolo nei monumenti alla memoria*, Tesi di Dottorato di Ricerca XIII ciclo, Firenze Dicembre 2000

Capelli Gianni, *Gli architetti del primo Novecento a Parma*, Battei, Parma 1975

Cremonini Lorenzo, *Architetture cimiteriali*, Alinea editrice

Dieguez Patao Sofia - Gimenez Carmen, *Arte e architettura funeraria*, Electa, 2003

Felicori Mauro – Canotti Annalisa (a cura di), *Cimiteri d'Europa: un patrimonio da conoscere e restaurare*, Compositori Industrie Grafiche, Bologna 2004

Fiotto Francesco, *La città chiusa*, Saggi Marsilio, 1992

Ginex Giovanna (a cura di), *Pietre della memoria: le arti nel cimitero monumentale di Mantova*, Publi Paolini Editore, Mantova 2000

Grignolini Elvira, *Parma la città dei morti: struttura e immagine fra sec. XIX e XX*, Tesi di Laurea in materie letterarie, Università degli studi di Parma-Facoltà di magistero, relatore prof. A.C. Quintavalle, Anno accademico 1989-90.