



Università degli Studi di Parma

Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura

**Dottorato di Ricerca in Forme e Strutture dell'Architettura**

(ICAR 08 - ICAR 09 - ICAR 10 - ICAR 14 - ICAR17 - ICAR 18 - ICAR 19 - ICAR 20- MAT 02)

**XXVIII Ciclo**

**Massimo Cotti**

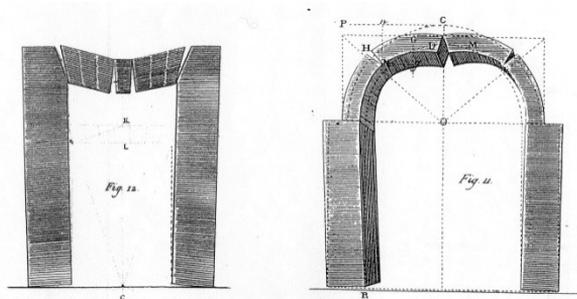
**Dal dissetto al sesto.**

**Relazioni tra forma, deformazione e modellazione strutturale.**

**ICAR 19**

**From disorder to order.**

**Relations between form, deformation and structural modelling.**



Relatore: prof. Eva Coisson

Coordinatore del Dottorato: prof. Aldo De Poli





Università degli Studi di Parma  
Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura

**Dottorato di Ricerca in Forme e Strutture dell'Architettura**  
(ICAR 08 - ICAR 09 - ICAR 10 - ICAR 14 - ICAR17 - ICAR 18 - ICAR 19 - ICAR 20- MAT 02)

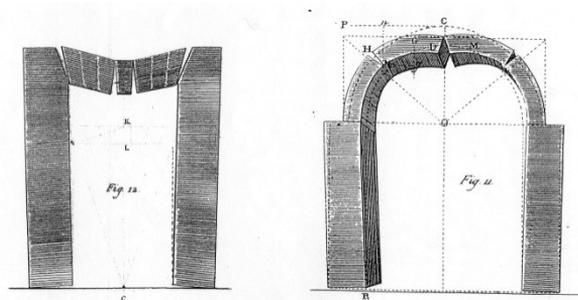
**XXVIII Ciclo**

**Massimo Cotti**

**Dal dissenso al sesto.**  
**Relazioni tra forma, deformazione e modellazione strutturale.**

**ICAR 19**

**From disorder to order.**  
**Relations between form, deformation and structural modelling.**



Relatore: prof. Eva Coisson

Coordinatore del Dottorato: prof. Aldo De Poli





Università degli Studi di Parma  
Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura

**Dottorato di Ricerca in Forme e Strutture dell'Architettura**  
(ICAR 08 - ICAR 09 - ICAR 10 - ICAR 14 - ICAR17 - ICAR 18 - ICAR 19 - ICAR 20- MAT 02)

### **XXVIII Ciclo**

Coordinatore del Dottorato: prof. Aldo De Poli

#### **Collegio docenti:**

prof. Bruno Adorni  
prof. Carlo Blasi  
prof.ssa Eva Coisson  
prof.ssa Agnese Ghini  
prof. Paolo Giandebiaggi  
prof. Ivo Iori  
prof. Marco Maretto  
prof.ssa MariaEvelina Melley  
prof.ssa Federica Ottoni  
prof. Enrico Prandi  
prof. Carlo Quintelli  
prof. Paolo Ventura  
prof.ssa Chiara Vernizzi  
prof. Michele Zazzi  
prof. Andrea Zerbi

#### **Massimo Cotti**

**Dal dissesto al sesto.**  
**Relazioni tra forma, deformazione e modellazione strutturale.**

ICAR 19

**From disorder to order.**  
**Relations between form, deformation and structural modelling.**

Relatore: prof. Eva Coisson





## SOMMARIO

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
1.1	Definizione dell'ambito della ricerca	3
1.2	Obiettivi della ricerca	5
1.3	Metodologie di indagine	8
<b>2</b>	<b>PARTE I – LO STATO DELL'ARTE</b>	<b>11</b>
2.1	Forma	12
2.1.1	Il rilievo geometrico	12
2.1.2	L'evoluzione delle tecniche di rilevamento	16
2.1.3	L'attenzione al quadro deformativo e fessurativo	40
2.1.4	L'evoluzione delle tecniche di rappresentazione	46
2.2	Struttura	51
2.2.1	I metodi di modellazione degli edifici in muratura	53
2.2.2	I parametri meccanici e l'incertezza della determinazione	72
2.2.3	Le peculiarità nella modellazione di edifici esistenti	81
2.2.4	Quale modello geometrico per il modello numerico?	83
2.3	Riflessioni preliminari sui rischi degli automatismi nei rapporti fra rilievo e modellazione	88
<b>3</b>	<b>PARTE II – STRATEGIE E PROPOSTE OPERATIVE</b>	<b>90</b>
3.1	Forma	91
3.1.1	Dal dissesto al sesto	92
3.1.2	Approccio parametrico per la ricostruzione dei sestì	94
3.1.3	Gli algoritmi come supporto alla ricostruzione delle geometrie	97
3.1.4	La generazione di modelli parametrici	99
3.2	Struttura	105
3.2.1	Dal sesto al dissesto	105
3.2.2	Il codice UDEC nella modellazione D.E.M.	106
3.2.3	La definizione dei parametri operativi	111
3.2.4	Il problema della geometrie complesse	116
3.3	Conclusioni	121
<b>4</b>	<b>PARTE III – CASI STUDIO</b>	<b>124</b>
4.1	Presentazione	125

---

4.1.1	Calibrazioni di modelli elementari	125
4.1.2	I motivi della scelta	132
<b>4.2</b>	<b>Cattedrale di Parma</b>	<b>134</b>
4.2.1	Cenni storici	135
4.2.2	Organizzazione ed evoluzioni delle strutture	137
4.2.3	L'arcone della navata	139
<b>4.3</b>	<b>Torre della Ghirlandina di Modena</b>	<b>152</b>
4.3.1	Cenni storici	154
4.3.2	Organizzazione ed evoluzioni delle strutture	163
4.3.3	L'arcone di collegamento alla Cattedrale	167
<b>4.4</b>	<b>Casa Romei di Ferrara</b>	<b>189</b>
4.4.1	Cenni storici	191
4.4.2	Organizzazione ed evoluzioni delle strutture	192
4.4.3	L'arcone delle baldresche	194
<b>4.5</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>206</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>208</b>
<b>5.1</b>	<b>Questioni aperte</b>	<b>210</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA RAGIONATA</b>	<b>213</b>
<b>6.1</b>	<b>Indice delle Figure</b>	<b>221</b>
<b>7</b>	<b>APPENDICE</b>	<b>235</b>
<b>7.1</b>	<b>Della storia degli strumenti per la misura topografica</b>	<b>236</b>
7.1.1	Premessa	236
7.1.2	La misura angolare	237
7.1.3	La misura delle distanze	246
7.1.4	La misura dei dislivelli	258
7.1.5	Gli strumenti minori	264



## 1 Introduzione

Il sempre maggior spazio che le strumentazioni elettroniche per il rilevamento architettonico stanno conquistando nell'ambito scientifico e professionale, unito al sempre più diffuso utilizzo di programmi di calcolo ed elaborazione strutturale, rischia di diffondere prassi procedurali che vedono come soluzione quasi "ideale" l'utilizzo del puro rilievo geometrico, sia esso di natura bi-dimensionale o tri-dimensionale, come base per la modellazione strutturale automatica nelle sue varie modalità operative e procedurali.



*Figura 1 Sito archeologico di Palmyra (Siria), arco severiano sulla via colonnata, 120 d.C. circa. Dissesto di arco in conci di pietra per rotazione del piedritto e scorrimento verticale del concio di chiave (1992).*

Ma un edificio esistente - e quindi anche le singole componenti che lo costituiscono (siano questi orizzontamenti piuttosto che maschi murari o setti verticali) - ha già subito, nello scorrere del tempo, modificazioni sia di natura geometrica che, conseguentemente, anche nel comportamento strutturale:

terremoti, cedimenti, deformazioni dei materiali sono infatti fra i fattori che più comunemente vanno a modificare la forma originaria e trasformano l'edificio in ciò che l'occhio (e gli strumenti) vedono oggi, modificando al tempo stesso ciò che non si vede, ovvero lo stato di sollecitazione interno del materiale.

In questo contesto è quindi apparso come un utile, se pur piccolo, contributo il percorso di studio sviluppato nella presente ricerca che ha cercato, attraverso un'analisi critica dello stato dell'arte, sia delle procedure di rilievo che della modellazione, con particolare attenzione alle strutture di carattere storico-monumentale, di porre in maggiore risalto i rischi che implementazioni di dati eccessivamente "automatizzate" possono portare in termini di corretta valutazione degli stati tensionali all'interno delle strutture e di conseguenza della loro maggiore o minore distanza dal limite di resistenza, in altre parole del loro livello di sicurezza. Le indagini svolte hanno permesso di mettere in evidenza come una non corretta interpretazione geometrica della forma attuale, intesa come risultato di un processo di trasformazione, pur a parità di altre condizioni di analisi, come le caratteristiche dei materiali e le condizioni al contorno impostate nei modelli di calcolo, possa essere alla base di divergenti valutazioni sulla sicurezza e conseguentemente possano potenzialmente condurre alla scelta di interventi inutili se non addirittura dannosi, privi di reale motivazione strutturale. Altresì è risultato evidente come l'interpretazione critica (e, come tale, umana) della geometria sia da ritenersi elemento basilare sia nella definizione dello stato iniziale dell'elemento oggetto di indagine, sia della necessaria semplificazione che ogni tipo di modellazione porta con sé.

## 1.1 Definizione dell'ambito della ricerca

In un vasto ambito di possibili indagini in questo settore, il presente studio, pur trattando in modo relativamente ampio di metodologie di rilievo e modellazione, pone, attraverso i casi di studio proposti nella *Parte III – Casi studio*, una particolare attenzione sugli edifici di carattere storico-monumentali. Su di essi risulta infatti particolarmente evidente l'impronta lasciata dalla storia, che è l'aspetto che qui si vuole analizzare in termini di rapporto tra deformazione e coazione.

All'interno poi di tali corpi di fabbrica, di cui il panorama italiano ed emiliano offrono innumerevoli esempi, attenzione particolare è stata rivolta alle strutture voltate ed alle strutture ad arco.

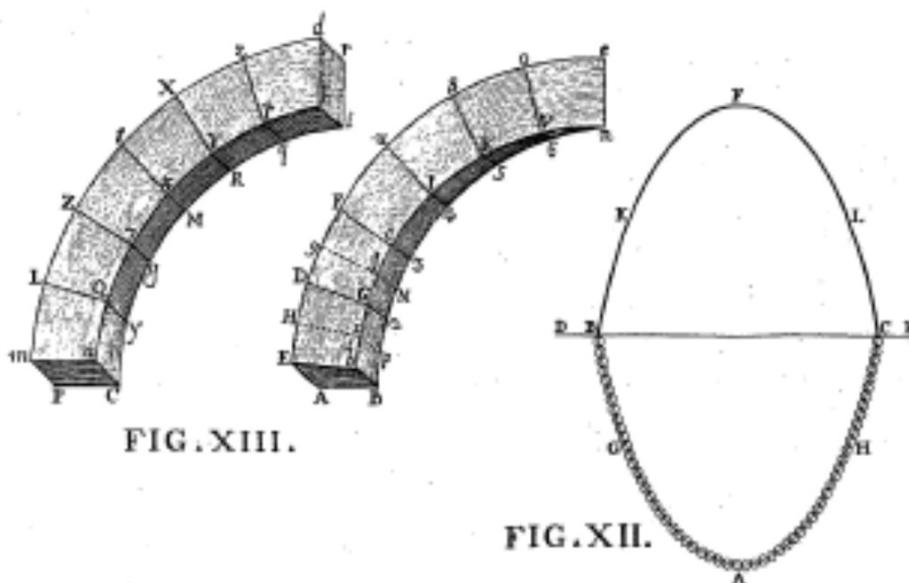


Figura 2 Giovanni Poleni, *Memorie istoriche della gran cupola del tempio Vaticano*, Tavola D, pagina 34, archi.

Tale scelta è stata suggerita principalmente dal rapporto particolarmente stretto in essi presente (riscontrabile già in fase di costruzione) tra la forma e la struttura, che permette di evidenziare meglio gli effetti che le modifiche alla prima hanno sulla seconda; aspetto questo

indagato nella storia già da numerosi studiosi e architetti quali Galileo Galilei e Giovanni Poleni<sup>1</sup>.

*“... La costruzione degli Archi, e delle Cupole, si dee senza dubbio riputare per la parte più difficile nella Meccanica particolar dell'Architettura. E niente di certo determinare si avrebbe potuto senza il soccorso delle matematiche ...”*

Così il Poleni, nelle memorie del 1747<sup>2</sup> sulla stabilità della cupola della Basilica Vaticana iniziava la sua trattazione della corretta realizzazione di archi e cupole; già allora veniva posta l'attenzione sulle differenze fra le geometrie originali e lo stato dei luoghi che lui stesso descrive nella prima parte del trattato. Già al suo tempo questa tipologia di struttura era stata ampiamente studiata ed erano già note le configurazioni principali delle deformazioni dalle quali erano afflitte.

Oggi come allora, alla luce delle nuove tecnologie a nostra disposizione, da una parte al servizio del rilievo architettonico e dall'altra dell'analisi strutturale, appare importante fornire indicazioni procedurali al passo con le tecnologie a nostra disposizione ma altresì poterle confrontare con quelle contenute negli antichi manuali e trattati che hanno guidato la costruzione e lo studio di queste strutture nei secoli passati.

---

<sup>1</sup> Per ulteriori approfondimenti sull'argomento si suggerisce Ivo Iori, *Minimi strumenti di scienza del costruire*, Parma, Monte Università Parma, 2010 e Salvatore Di Pasquale, *L'arte del costruire fra conoscenza e scienza*, Venezia, Marsilio, 2003.

<sup>2</sup> Giovanni Poleni, *Memorie storiche della gran cupola del tempio Vaticano*, XIII Della figura degli archi ed in universale della vera regolar figura delle cupole, pp. 30-42.

## 1.2 Obiettivi della ricerca

La ricerca negli ultimi decenni ha riportato alla luce quello che nei secoli è sempre stato uno stretto legame fra architettura e proporzioni, fra forma e geometria: aspetto che, per certi versi, è stato trascurato o comunque non sufficientemente tenuto in considerazione quando, con l'arrivo delle nuove tecnologie costruttive nate dopo la rivoluzione industriale<sup>3</sup>, si sono sviluppate nuove scienze e nuovi modelli teorici in grado di prevedere il comportamento dei nuovi materiali introdotti nel mondo delle costruzioni. La grande differenza di comportamento fra i materiali antichi e quelli moderni è stata ben illustrata già dal Milani nel suo trattato<sup>4</sup>, dove la differenza di comportamento fra la specificità delle costruzioni in muratura e quella dei sistemi "elastici" viene esposta in maniera chiarissima: per i primi il problema risolutivo si basa essenzialmente sull'equilibrio mentre per i secondi si sposta nel campo della resistenza e della rigidità dei materiali.

Oggi come allora quindi lo studio di un'antica fabbrica non può esimersi, in primo luogo, dalla comprensione delle tipologie strutturali, delle proporzioni e quindi della forma, non solo per riscoprire il progetto originariamente concepito, ma altresì per correttamente identificare le successive deformazioni e i cinematismi che il tempo ha prodotto nelle strutture; aspetto, quest'ultimo, spesso trascurato soprattutto dai professionisti ma non solo. Pertanto, a differenza di edifici di nuova costruzione in cui la progettazione può essere vista come la determinazione di una struttura reale avente un comportamento il più aderente possibile con quello teorico definito dal calcolo, per edifici esistenti, la cui costruzione è legata maggiormente a proporzioni che non a calcoli di resistenza, la procedura più corretta appare quella di definire modelli che portino a risultati simili a quelli prodotti dal tempo. Il monumento diventa così,

---

<sup>3</sup> Carlo Blasi, Eva Coisson, Sesti e disesti, in Paolo Bertozzi, Agnese Ghini, Luca Guardigli (a cura di), *Le forme della tradizione in architettura, esperienze a confronto*, Milano, Franco Angeli, 2005.

<sup>4</sup> Giovanni Battista Milani, *L'ossatura murale: studio statico-costruttivo ed estetico-proporzionale degli organismi architettonici*, con speciale riferimento alle strutture elastiche nelle loro varie e moderne applicazioni pratiche, tavola 7, Torino, Società italiana edizioni artistiche C.Crudo & C., 1920.

etimologicamente, documento di se stesso, rappresentando una sorta di provino in scala reale, sottoposto nel tempo ad azioni che devono essere prima di tutto identificate e poi inserite nel modello virtuale perché questo possa riprodurre al meglio il percorso dell'edificio nella storia ed arrivare, auspicabilmente, ad analoghi risultati.

Ma in un tempo in cui lo sviluppo tecnologico si sta impadronendo sempre più di tutti gli aspetti anche relativi al calcolo ed alla progettazione, al rilievo ed alla restituzione, con la sempre maggiore diffusione di strumenti con tecnologia B.I.M.<sup>5</sup> e modellatori tridimensionali da una parte e con lo sviluppo di laser scanner e fotogrammetria dall'altra, con la facilità con cui si ottengono interscambi di dati fra una prodotto e l'altro, occorre evitare che i troppi automatismi e le facilitazioni informatiche portino all'errore, alcune volte già riscontrato, di considerare un modello definito dal rilievo come già adatto all'essere utilizzato come base per i successivi modelli destinati al calcolo strutturale. Se questo può essere vero nello sviluppo progettuale di un nuovo edificio in cui l'interconnessione fra i vari software, a titolo di esemplificazione quelli architettonici e quelli strutturali, permette di estrapolare rapidamente le geometrie dal primo e direttamente utilizzarle nel secondo per le verifiche di norma, certamente non sembra essere una buona soluzione procedurale per un edificio di carattere storico monumentale o che abbia comunque già subito gli effetti dello scorrere del tempo.

La messa in luce delle differenze tra i risultati ottenuti seguendo i due percorsi appare quindi come uno spunto di riflessione finalizzato alla messa in risalto delle possibili problematiche che alcune facilitazioni tecnologiche, se non debitamente e criticamente controllate e gestite, possono apportare allo studio di edifici esistenti in muratura, con l'auspicio che le indicazioni

---

<sup>5</sup> Acronimo di Building Information Modeling, il BIM può essere definito come una rappresentazione computabile delle caratteristiche fisiche e funzionali di una struttura e delle sue informazioni relativa al ciclo di vita previsto; un unico contenitore di disegni, attributi, specifiche tecniche, schede e caratteristiche. Recenti studi in ambito BIM fanno intendere come, già affermato di Vladimir Bazjanac (Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California), oltre alla modellazione tridimensionale si vada verso una sempre maggiore collaborazione fra i diversi soggetti tecnici coinvolti in un progetto, una interoperabilità dei software architettonici e strutturali sempre maggiore attraverso un'integrazioni maggiore dei processi.

fornite, in questo periodo storico particolare, di rapida evoluzione tecnologica, possano evitare una diffusione di pratiche automatizzate che estromettono pericolosamente il ruolo dell'interpretazione critica (e pertanto necessariamente umana, legata alla sensibilità dell'architetto piuttosto che dell'ingegnere) dei dati forniti dalle macchine.

### 1.3 Metodologie di indagine

L'approccio alla ricerca, in accordo con quanto brevemente esposto precedentemente, si è sviluppato attraverso il mantenimento di un dualismo fra gli aspetti legati alla forma e quelli legati alla struttura, al fine di sottolineare un legame che rappresenta l'elemento fondante della ricerca stessa.

Nella *PARTE I – Lo stato dell'arte*, è stata sviluppata una necessaria indagine finalizzata a definire lo stato dell'arte relativamente all'analisi della forma, intesa sia come rilievo che come relativa rappresentazione dello stato attuale dei monumenti. A questo si aggiunge anche un'indagine storica atta a chiarire quali erano i livelli di conoscenza dei nostri antichi colleghi architetti o ingegneri nell'ambito delle metodologie di misura e conseguentemente quali potevano essere ragionevolmente le precisioni delle loro costruzioni; un aspetto questo di notevole rilievo quando la ricostruzione degli antichi sestri appare come un elemento basilare per lo studio degli edifici al giorno d'oggi. Dall'altra, una critica disamina delle soluzioni di analisi (codici di calcolo) maggiormente utilizzate e disponibili sul mercato ha permesso di indagarne le peculiarità principali e di chiarirne gli ambiti di utilizzo maggiormente efficaci, con attenzione particolare per la tipologia di studio prevista.

Nella *Parte II – Strategie e proposte operative*, mantenendo il dualismo dell'indagine, da una parte ha sviluppato un approccio parametrico mediante algoritmi che permettessero di generalizzare la risoluzione della ricostruzione delle geometrie originarie partendo dai dati metrici dei rilievi e dall'altra ha approfondito uno specifico codice di calcolo ad elementi distinti, andandone a indagare le peculiarità, i limiti e proponendo implementazioni ed integrazioni con algoritmi per superare alcune limitazioni nella definizione delle geometrie. Questo aspetto permetterà quindi futuri possibili sviluppi ed applicazioni, oltre a quelli trattati nella *Parte III – Casi studio*, essendo la trattazione geometrica di natura puramente teorico-matematica e gli algoritmi generalizzati per la risoluzione di famiglie simili di geometrie.

La *Parte III – Casi studio*, di carattere prettamente pratico-applicativo, ha visto la scelta di alcuni casi studio presenti all'interno di problematiche scientifiche emergenti da attività del Dipartimento di Ingegneria Civile,

dell’Ambiente, del Territorio e Architettura dell’Università degli Studi di Parma connesse a convenzioni di ricerca; pertanto gli elementi analizzati appartengono ad edifici storici tutti riconducibili alla tutela di edifici storici vincolati, al fine di garantire un futuro approfondimento dei temi trattati ed altresì poter fornire, attraverso i dati desumibili dalla analisi, un supporto allo studio reale delle problematiche dei singoli edifici.

L’ultima parte dello scritto, *Conclusioni*, da vedersi non tanto come un punto di arrivo fine a se stesso ma come un possibile punto di partenza per nuovi approfondimenti di indagine, mette in evidenza quelli che sono i riscontri ottenuti nei casi di studio in merito alle aspettative della ricerca ed altresì quelli che sono i contributi, seppur piccoli, nell’ambito dell’implementazione di algoritmi per il superamento di taluni limiti nella creazione di forme. Altresì la ricerca permette di valutare quali sono i “rischi” che i colleghi architetti o ingegneri possono correre nel procedere a modellazioni aventi come base uno sterile rilievo non criticamente integrato dalla conoscenza delle geometrie e forme originali e dalle trasformazioni che nel tempo hanno portato l’originale organismo alla configurazione che ci troviamo all’oggi dinnanzi.

Altresì, si affrontano criticamente le “questioni ancora aperte” o non sufficientemente indagate unitamente a quelli che sono i possibili futuri approfondimenti da sviluppare in successive ricerche.



## **2 PARTE I – Lo stato dell’arte**

## 2.1 Forma

La presente ricerca ha come target principale gli edifici storici, caratterizzati principalmente da strutture in muratura o più generalmente dall'accostamento e dalla sovrapposizione di blocchi, per le quali è ben nota la “non resistenza” a trazione ed altresì quasi “infinita” quella a compressione<sup>6</sup>, per cui essi non possono avere qualunque forma ma possono correttamente sopportare solo determinate condizioni di carico: risulta pertanto evidente la necessità di approfondire quelle che sono le forme della strutture<sup>7</sup> che, soprattutto nel passato, erano strettamente legate alle proporzioni, alla numerologia.

L'indagare sulla forma della strutture è quindi il primo passo, da compiere nel percorso di conoscenza per comprendere i rapporti geometrici che regolano l'equilibrio, differentemente da quello che accade per moderne strutture in acciaio o calcestruzzo, per le quali è invece prioritario l'aspetto legato alla resistenza dei materiali. Risulta importante quindi una primaria analisi dello stato dell'arte delle metodologie di rilievo e di rappresentazione che all'oggi vengono utilizzate nel processo e delle tipologie di informazioni che ci possono fornire sia in termini qualitativi che quantitativi. Altresì, la conoscenza delle tecnologie che si sono sviluppate nel passato di pari passo con lo sviluppo costruttivo risulta di uguale importanza per poter criticamente rapportarsi con le forme originali delle strutture e con le modalità con le quale sono state messe in opera.

### 2.1.1 Il rilievo geometrico

Identificabile come un rapporto, come un dialogo, fra l'uomo e l'ambiente circostante, il rilievo o comunque la rappresentazione di elementi architettonici, di natura prima semplice e col trascorrere del tempo e lo

---

<sup>6</sup> Va intesa non come valore puramente numerico (chiaro è il fatto che tutti i materiali hanno un limite di resistenza) ma come una notevolissima differenza fra le due resistenze di cui la prima si considera sostanzialmente trascurabile e la seconda sufficientemente elevata di norma da non influire sul comportamento complessivo della struttura.

<sup>7</sup> Carlo Blasi, Eva Coisson, La geometria della fabbrica, in Carlo Blasi, Eva Coisson (a cura di), La Fabbrica del Duomo di Parma, stabilità, rilievi e modifiche nel tempo, Parma, Grafiche Step, 2006.

sviluppo della civiltà sempre più complessi, non è certamente una prerogativa del mondo moderno. Fin dall'antichità infatti l'uomo, in forma embrionale e concettualmente in un modo molto diverso da oggi, non si è mai accontentato di operare per modificare lo spazio e i luoghi in cui generalmente si insediava stabilmente ma ha tentato spesso di raffigurare quanto da lui compiuto sia come modifiche del territorio che come creazioni su di esso. Se si riflette sulla volontà dell'uomo di conoscere, di perpetuare in qualche modo gli elementi della vita quotidiana in cui egli si muove ed in generale le sue conoscenze, ecco che si possono individuare alcune delle ragioni di questo modo di procedere; spesso infatti testimonianze interessanti di antiche civiltà sono, oltre che nei manufatti litici o reperti archeologici, reperibili proprio nelle rappresentazioni di capanne, di case, di territori, di avvenimenti vari, incise dipinte o scolpite su supporti di varia natura che, resistendo al tempo, sono divenuti per noi come un piano di rappresentazione su cui leggere importanti informazioni.

Le prime rappresentazioni di edifici e di agglomerati urbani, contrariamente a quanto si è portati a pensare, sono piuttosto antiche e risalgono alla Mesopotamia e all'Egitto; in questo caso si fa riferimento a rappresentazioni di edifici ed insediamenti, presumibilmente esistenti, che presentano certamente un carattere estremamente sintetico ma altresì dimostrano come chi le ha eseguite avesse definito "precise norme" per passare dalla realtà tridimensionale al supporto bidimensionale e presentino altresì il tentativo di stabilire una serie di convenzioni simbologiche e, più in generale, una grafia. Certamente in questi casi siamo ben lontani da quanto oggi si intende per rilievo architettonico, sia per quanto riguarda il lato teorico, sia per quanto riguarda le applicazioni pratiche; occorre però ricordare che molte conquiste dell'antichità sia nel campo della geometria sia nel campo fisico-astronomico, hanno condizionato ed informato buona parte della civiltà occidentale fino al Medioevo e, per alcuni aspetti, dato il via a quegli studi di carattere architettonico - figurativi del Rinascimento che può essere considerato come uno dei migliori periodi nello sviluppo del rilievo geometrico architettonico. Come non si può dimenticare come diverse civiltà antiche, e in particolare quella greca, hanno raggiunto livelli speculativi tali, in campo geometrico, che ancora oggi costituiscono la base di partenza per

ulteriori studi, altresì non si possono dimenticare le conquiste dei Mesopotamici e degli Egizi in campo astronomico, per le misurazioni della terra, o la quantità di soluzioni pratiche messe a punto dai Romani nel settore topografico a grande e piccola scala.

Di indiscussa importanza in moltissimi settori tecnici della nostra società il rilievo riveste un ruolo imprescindibile anche nell'ambito del restauro degli edifici; è infatti unicamente riconosciuto ed accettato il fatto che non si dovrebbero iniziare operazioni di restauro di un qualunque fabbricato senza una adeguata ed approfondita opera di rilievo che permette di giungere ad una approfondita e critica conoscenza dello stesso fondamentale per pianificare e predisporre una corretta metodologia di intervento. Considerando altresì che per un corretto intervento non è sufficiente la conoscenza dei soli aspetti geometriche - morfologici generali, le indagini conoscitive preliminari si pongono come basilare mezzo di indagine sia per le parti interne e non visibili, ma spesso di fondamentale importanza, che per quelle esterne definenti l'immagine generale dell'edificio o dell'opera. Sia quindi che l'aspetto esteriore di un edificio o organismo edilizio – architettonico si presenti, come accade per le murature in pietra, legato a una tecnica costruttiva od a un unico materiale costituente, oppure che derivi da particolari conformazioni di parti non visibili, il rilievo della forma deve essere di tipo razionale, critico al fine di cogliere anche gli aspetti non esplicitamente visibili ma di indubbia importanza per le operazioni successive a quella conoscitiva.

Quando l'attenzione è posta su edifici di carattere storico monumentale l'indagine deve porsi come obiettivo una ben precisa conoscenza dell'opera, che va esaminata secondo un numero definito di aspetti, pertinenti e criticamente approfonditi, appunto in vista degli interventi e delle operazioni. Andranno identificati i fattori climatici, eolici, geologici, di inquinamento che concorrono o hanno concorso nel passato al degrado dell'edificio, come pure quelli che accelerano i fenomeni del disgregamento dei materiali. Per i fenomeni di degrado e di dissesto, ad esempio risulterà importante individuare le cause attuali del fenomeno, se presenti ed ancora in essere, oppure ripercorrere la vita dell'edificio e, attraverso lo studio dei documenti archivistici, iconografici e bibliografici, al

fine di ricostruire il loro sviluppo nel tempo; attenta osservazione delle caratteristiche morfologiche ed accurata ricerca d'archivio, che consenta di comprendere preventivamente, anche mediante consultazione e studio di disegni e carte storiche, l'organizzazione delle parti che anche nella più complessa delle architetture antiche risponde a criteri di razionalità e proporzionalità, permetterà una volta a contatto con l'architettura in esame di scegliere le parti a cui dedicare maggior attenzione. Con ciò non si vuole erroneamente affermare che sia possibile trascurare gli elementi che ad una prima analisi si siano giudicati, per esempio, staticamente trascurabili, ma che è necessario iniziare già da subito quel processo critico di discretizzazione delle informazioni in acquisizione.

In considerazione altresì del fatto che a distanza di tempo e in luoghi diversi, le varie civiltà hanno adoperato unità di misura differenti, e ciò può aver prodotto peculiarità dimensionali e proporzionali differenti e specifiche, anche in questo settore di indagine si rivela di elevata importanza la conoscenza dei sistemi di misura adottati all'atto della progettazione o ideazione dell'edificio e della sua successiva costruzione. Lasciando al lettore la facoltà di approfondire tale fenomeno, in illustri ed approfonditi trattati, si vuole qui sottolineare dato il peso che esso assume nelle operazioni di restauro ed analisi degli edifici storici, il determinare con sicurezza l'unità di misura che ha sovrinteso alla realizzazione di un complesso architettonico piuttosto che di una o più parti di esso, al fine di altresì stabilire se l'opera ricada nell'ambito di maestranze e personalità di formazione professionale e culturale riconducibili o estranee all'area di realizzazione. Conseguenza è quindi il fatto che la corretta cognizione del sistema metrico e dell'unità di misura utilizzati è di sicuro aiuto e contributo per la miglior definizione dei dati del problema architettonico – strutturale che si ha dinnanzi e conseguentemente ad indirizzare ed orientare al meglio prima le verifiche e successivamente la progettazione degli interventi e la loro finale realizzazione.

### 2.1.2 L'evoluzione delle tecniche di rilevamento

Il tentativo dell'uomo di riprodurre il paesaggio circostante non è, come già in precedenza espresso, prerogativa della società moderna in quanto, anche se in forme diverse da come sono oggi intese, esperienze di riproduzioni sono presenti fin dalla nascita delle prime civiltà. Un'analisi di tali aspetti e dei loro sviluppi fino ai giorni odierni permette allo studioso come al progettista di prendere coscienza del livello tecnologico in essere al tempo dell'edificazione di un determinato manufatto e conseguentemente valutare criticamente lo stato di fatto che esso all'oggi si trova ad analizzare; è evidente infatti che se in un determinato periodo storico sviluppate erano le conoscenze matematiche e tecniche per tracciare un arco "perfetto" difficilmente se all'oggi lo studioso lo vede deformato può pensare ad un banale errore dell'allora costruttore.

E' in Mesopotamia che si ritrovano le prime testimonianze, rappresentate da serie di rappresentazioni schematiche di edifici e di città, realizzate su tavolette di argilla o su sculture a basso rilievo, di rilievo dal punto di vista dell'osservazione del costruito e della relativa sua rappresentazione; le tavolette d'argilla particolarmente famose e studiate in questo campo, ritrovate a Nippur, risalgono al 1500 circa a.C. e sviluppano temi urbani di rappresentazione planimetrica di una città mediante i suoi elementi salienti quali mura, edifici sacri, corsi fluviali<sup>8</sup>.

Ma è con la civiltà egizia che si assiste ad uno sviluppo delle conoscenze in campo geometrico e della rappresentazione architettonica in generale, oltre che nel campo delle misurazioni geodetiche e dell'astronomia; la casta di questi antichi architetti, appartenente con ogni probabilità al mondo sacerdotale, aveva sviluppato un complesso ed articolato insieme di conoscenze geometriche essenzialmente legate alla risoluzione di problemi pratici di carattere costruttivo e topografico, piuttosto che sviluppi puramente di carattere teorico, e questo fin dal 1500 circa a.C..

---

<sup>8</sup> Per un approfondimento in merito si rimanda alla lettura di Giancarlo Cataldi, Michela Rossi, a cura di, Luigi Vagnetti architetto - disegni progetto opere, Milano, Hoepli, 2010, pp 11-12 e Luigi Vagnetti, L'architetto nella storia di occidente, Firenze, Teorema, 1974.

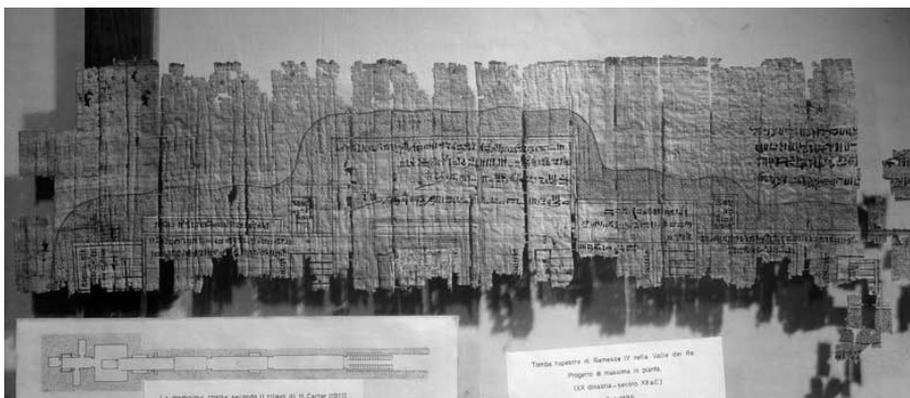


Figura 3 Papiro con il progetto della tomba di Ramses IV. Torino, Museo Egizio.

A partire da tale periodo infatti, come documentato da innumerevoli ritrovamenti archeologici, gli architetti egizi mostrano di possedere conoscenze specifiche e raccolte di dati per i vari aspetti interessati dalla geometria e dal rilievo quali “geografia” intesa come la descrizione e conoscenze della terra, “corografia” relativa la territorio egiziano, “topografia” contenente la descrizione del sistema idrico del Nilo e delle vie d’acqua<sup>9</sup>. Diversi residui di mappe<sup>10</sup> riprodotte su supporto di papiro mostrano una particolare maestria nella visualizzazione degli oggetti e denotano una capacità nel disegno strumentale tecnico. La strumentazione, di tipo tradizionale della quale disponevano<sup>11</sup> non ha però impedito di raggiungere livelli di precisione molto elevati come facilmente riscontrabile dallo studio dell’architettura e dai lasciti agrimensori presenti nella valle del Nilo.

<sup>9</sup> Luigi Vagnetti, *L’architetto nella storia di occidente*, Firenze, Teorema, 1974.

<sup>10</sup> Riferimento al regno di Ramesses II (1292 – 1225 a.C.) ed alle scene dipinte nella tomba di Neferrompe, detta anche di Kenro, a Tebe ed alla rappresentazione di tipo architettonico, riportata su un frammento papiraceo risalente al 1200-1085 a.C., relativa alla pianta della tomba di Ramesses IV.

<sup>11</sup> Per una lettura approfondita si rimanda a Mario Docci, Diego Maestri, *Storia del Rilievamento Architettonico e Urbano*, Laterza, Roma, 1984 e Hermes Balducci, *Il Rilievo Architettonico*, Hoepli, Milano, 1930.

La civiltà greca trasse da quella egizia<sup>12</sup> e mesopotamica importanti nozioni di geometria e agrimensura; che fra gli architetti greci fosse diffusa la conoscenza di un sistema di misura ed altresì sviluppate conoscenze di rilievo topografico del territorio, astronomico ed architettonico è facilmente intuibile dallo studio della loro cultura ove in grande considerazione furono tenute la geometria e i problemi ad essa connessi, dall'importanza data alla correzione ottiche in molti edifici monumentali, dai risultati ottenuti nel campo dell'astronomia e dei molti riferimenti che si possono ritrovare in scritti di vario genere fino a noi pervenuti. Fra le figura più importanti riconducibili a questa civiltà vi è sicuramente Erone di Alessandria, vissuto presumibilmente fra il 215 e il 100 a.C., ed il suo trattato sulla "diottra"<sup>13</sup> in cui vengono non solo perfezionati i sistemi di misura in uso ma altresì poste le basi per lo sviluppo del primo strumento per la misura degli angoli sia zenitali che azimutali: il "traguardo"; esso consentiva la misura di luoghi non accessibili, quali mura, torri, livellazioni per le derivazioni delle acque, costruzioni di ponti, mura, ecc.

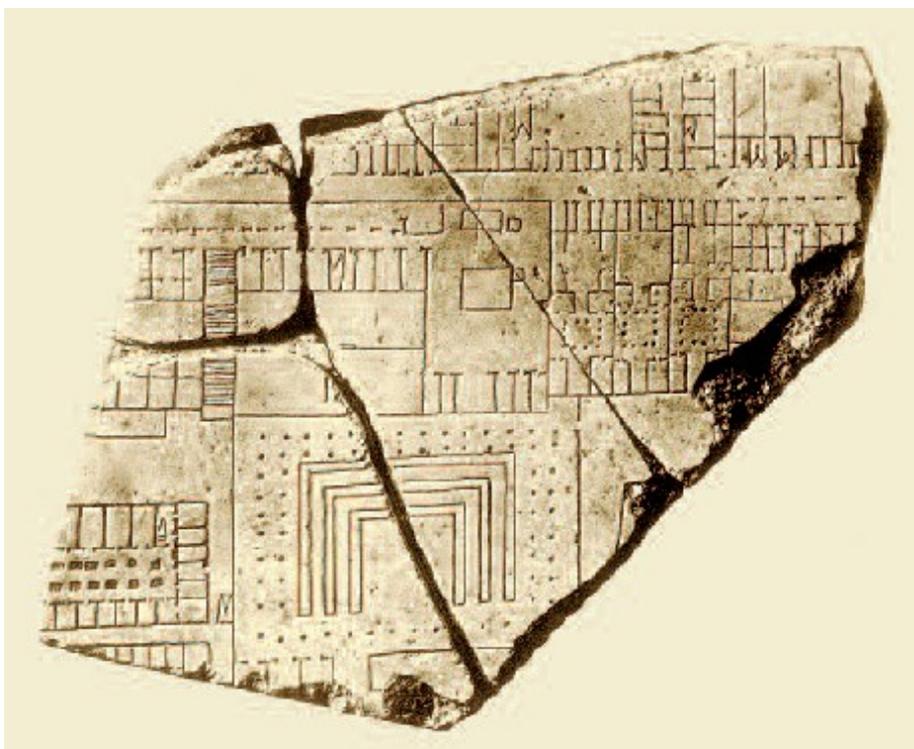
La cultura romana, soprattutto grazie alle conquiste militari che nei secoli di espansione l'hanno messa a stretto contatto con molte civiltà precedentemente insediate nel bacino del Mediterraneo, mutuò molti principi degli Etruschi, dai Greci ma soprattutto dagli Egizi ma, a differenza di queste ultime nelle quali le conoscenze erano in mano alle caste sacerdotali piuttosto che a matematici o filosofi piuttosto che filosofi e uomini di cultura, sviluppò una vera e propria categoria professionale riconosciuta dallo Stato con prerogative specifiche e scuole di formazione altamente qualificate. Va oggettivamente riconosciuto che l'attenzione dei Romani fosse rivolta più all'attività pratica che alla mera ricerca scientifica anche in campo edilizio ma

---

<sup>12</sup> Prime testimonianze storiche risalenti a Talete di Mileto (VII – VI sec. a.C.) cui si deve, secondo la biografia, l'invenzione, sulla base di cognizioni geometriche apprese in Egitto, di strumenti elementari per la determinazione della distanza delle navi dalla costa e per la determinazione dell'altezza di un organismo architettonico.

<sup>13</sup> Strumento per determinare allineamenti rettilinei costituito da un'alidada (o regolo) con due mire (o traguardi) di cui il primo fisso ed il secondo mobile; usata presso i greci soprattutto in astronomia è stato uno degli strumenti più longevi utilizzato, con vari perfezionamenti, fino al XVIII – XIX secolo, per opere di tracciamento.

assolutamente questo non deve far pensare che le loro fossero, come già espresso da M. Docci e D. Maestri ne “Il rilevamento architettonico – storia metodi e disegni”, “geometrie di approssimazione”; lo dimostrano, ancora oggi, tanto le grandi opere di ingegneria (acquedotti, ponti, strade, canalizzazioni sotterranee), le centuriazioni territoriali, le opere portuali, gli impianti urbanistici e la maggior parte dell'architettura pubblica. La grande maestria raggiunta dagli architetti è ancora oggi visibile e si palesa nella “Forma Urbis”<sup>14</sup>, la pianta della città di Roma tracciata con criteri prettamente geometrici a seguito di una campagna di rilevamenti urbani accurati.



*Figura 4 Frammenti della Forma Urbis Romae (III sec. d.C.), pianta marmorea di dimensioni monumentali e di grande precisione descrittiva, testimonianza della grande maestria tecnica posseduta in termini di rilievo che di esecuzione dei monumenti.*

---

<sup>14</sup> Detta anche Pianta marmorea di Roma, ascrivibile al primo quarto del III secolo d.C. e ritrovata nel 1562. Per una disamina esauriente sull'argomento cfr. AA.VV., La pianta marmorea di Roma, cit., p. 200 – 229.

Risultano alquanto scarse le notizie relative a forme di rilievo per il periodo storico compreso fra la caduta dell'Impero Romano e la fine del Medioevo, e cioè fino al risveglio culturale europeo del XIII secolo. Sicuramente. Come già emerso dagli accurati studi svolti da Mario Docci su tale argomento, non si può parlare di una completa cesura fra i due periodi storici ma più realisticamente di una continuità seppur attenuata delle pratiche legate altresì al fatto che col declino dell'impero il monopolio delle conoscenze scientifiche era finito in mano ai padri della Chiesa che poco interesse avevano generalmente nello sviluppare tali studi. La pratica del rilevamento era dunque principalmente nelle mani della cartografia che, piuttosto rudimentale, non aveva ancora basi scientifiche come propriamente sono intese. L'avvento della civiltà araba nel bacino del mediterraneo porta all'avvio di un nuovo periodo in cui il rinnovato interesse nei confronti della matematica, della geometria e delle esplorazioni si esprime attraverso il nascere di nuovi studi della terra eseguito tramite ricerche astronomiche, al calcolo dell'anno solare, al calcolo della dimensione della terra stessa<sup>15</sup>. Nei primi tre secoli dopo l'anno mille si assiste a notevoli progressi in campo architettonico e matematico in seguito sia alle prime crociate con le quali si intensificano i contatti con il mondo arabo sia ai viaggi di missionari e mercanti verso i paesi d'oriente ma soprattutto alla rinascita intellettuale dell'uomo unite al ritrovato gusto per la ricerca e la scoperta. Ne sono di indubbia testimonianza le traduzioni di testi di Euclide<sup>16</sup>, di Tolomeo<sup>17</sup>, di Teodosio<sup>18</sup> e gli scritti "Liber abaci" e "Practica geometriae" di Leonardo da Pisa<sup>19</sup> che sono alla base degli studi geometrico matematici del primo rinascimento; interessante ricordare che nell'ultima delle sue opere

---

<sup>15</sup> Il matematico arabo Al-Khuwarizmi svolge studi anche per apportare correzioni all'opera geografica di Tolomeo.

<sup>16</sup> Traduzione dall'arabo degli Elementi di Euclide, da parte del monaco inglese Adelardo di Bath (1120).

<sup>17</sup> Traduzione dal latino dell'Alagesto di Tolomeo.

<sup>18</sup> Traduzione dell'arabo della Sphaerae di Teodosio ad opera di Platone da Tivoli (1110 – 1145 circa)

<sup>19</sup> Leonardo o Leonardi Fibonacci da Pisa (1170 -1240)

citare il matematico descrive, tra l’altro, un quadrante che può essere utilizzato come strumento di agrimensura ma in generale come strumento topografico.

#### *2.1.2.1 La grande tradizione del rilievo del rinascimento ad oggi*

E’ sicuramente dal rinascimento che si assiste ad una vasta ed accurata opera di rilievo degli edifici antichi, soprattutto del periodo romano, ora spesso scomparsi o parzialmente distrutti, di cui appunto i soli disegni hanno trasmesso fino a noi notizie ed informazioni; va sicuramente altresì osservato che gli studi qui compiuti portano spesso a disegni non del tutto rispondenti al vero dell’edificio. Tale periodo infatti, come ogni altra epoca, sviluppa una concezione tutta propria del rilievo architettonico degli edifici alquanto diversa da quello che si intende oggigiorno; lo scopo principale non era, a differenza di quanto accade oggi, di raggiungere una profonda e completa conoscenza ma quella di scoprire e approfondire le regole sottese alla costruzione degli antichi edifici al fine di risolvere problemi edilizi del tempo. Accade spesso infatti che il rilievo di molte parti di edifici antichi sia alla base della progettazione di nuovi organismi come anche nella determinazione degli sviluppi planimetrici, si assiste anche nelle conformazioni delle parti interne e meno visibili sia sulla scorta di edifici esistenti che consultando gli scritti di Vitruvio, con particolare attenzione al trattato la cui riscoperta avvenuta intorno al primo quarto del XV secolo ed alla sua larga diffusione perdurata fino al XVI secolo. L’osservazione dei disegni, fino all’inizio del XVI secolo porta alla luce il come ogni architetto avesse non solo una particolare maniera di osservare e comprendere l’organismo edificato ma altresì non è assolutamente uniforme le rese grafiche. Con la seconda metà del XVI secolo si assiste ad una maturità ed obiettività maggiore con la diminuzione dei soggettivismi grafici ed un progressivo aumento della ricerca scientifica finalizzata alla rappresentazione che tende ad essere più rigorosa ed oggettiva; Antonio da Sangallo il Giovane, come già riconosciuto dagli studi di Mario Docci, può essere considerato come uno dei primi tentativi in tal senso.

*“Né è da sottovalutare, a proposito di questo mutamento del concetto di rilievo, l’apporto dato dalla*

*trattatistica a dalla fondazione delle prime accademie, come quella Vitruviana, detta anche delle Virtù [...]”<sup>20</sup>*

Certamente anche in questo periodo i rilievi vengono eseguiti a vista senza l’ausilio sistematico di strumenti di misura e le restituzioni, anche ad opera di personaggi illustri come Filippino Lippi (Prato 1457 – Firenze 1504), Piero delle Francesca (Borgo Sansepolcro, 1416/1417 circa – Borgo Sansepolcro 1492), Domenico Corradi detto il Ghirlandaio (Firenze, 1449 – Firenze, 1494) sono generalmente redatti attraverso schemi planimetrici senza l’apposizione di misure se non qualche indicazione sulle dimensioni principali; a tal riguardo lo storico dell’arte ed architetto Giorgio Vasari (Arezzo, 1511 – Firenze, 1574) nel trattato “Vite de’ più eccellenti pittori, scultori e architettori italiani, da Cimabue insino a’ tempi nostri” (edito nel 1550 e successivamente rivisto ed ampliato nel 1968) elogia la bravura nel disegno a vista degli architetti di quel tempo dicendo, con riguardo del Ghirlandaio:

*“Dicono che ritraendo anticaglie di Roma, archi, terme, colonne, colisei, aguglie, anfiteatri e acquedotti, era si giusto nel disegno, che lo faceva ad occhio, senza regolo o seste o misure; e misurandole dappoi fatte che le aveva, erano giustissime come se l’avesse misurata. Et ritraendo a occhio il Coliseo, vi fece una figura retta appiè: che misurando quella, tutto l’edificio si misurava”<sup>21</sup>*

---

<sup>20</sup> Mario Docci, La storia del rilievo architettonico, p.55.

<sup>21</sup> Giorgio Vasari, Le vite, MDL, volume II, p. 195

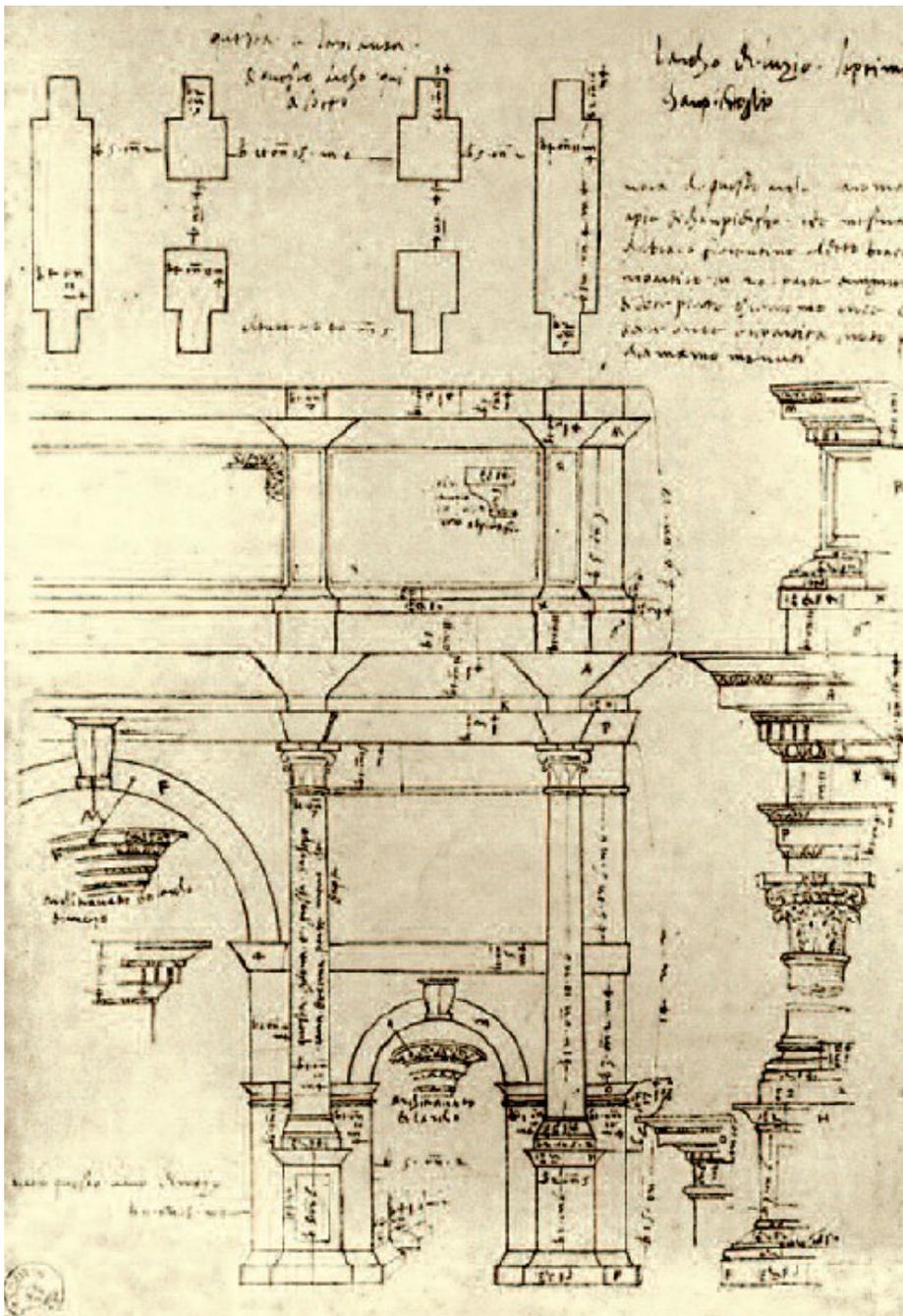
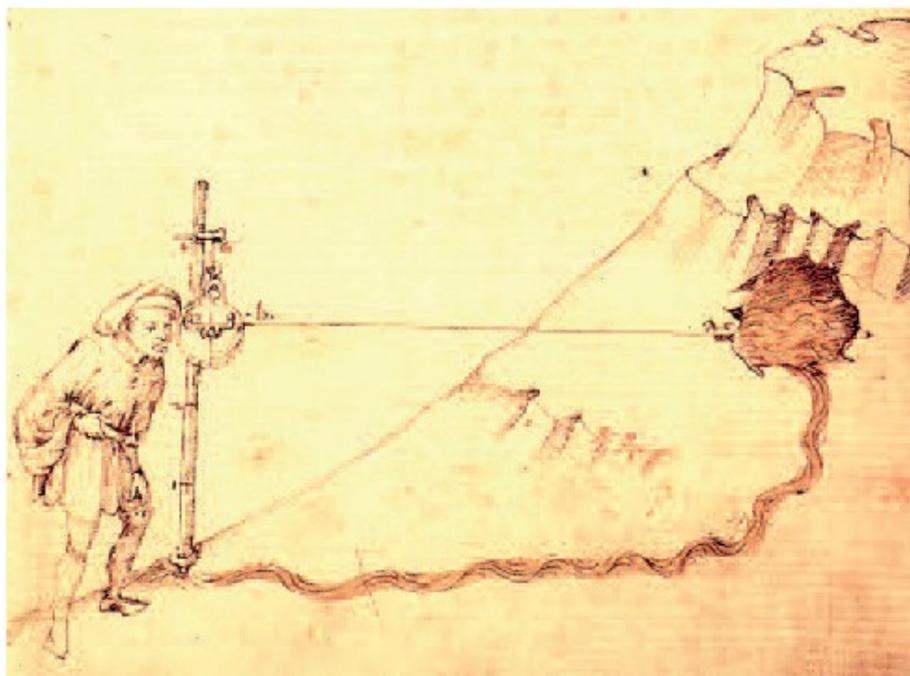


Figura 5 Rilievo dell'arco di Settimio Severo, a Roma, di Antonio da Sangallo il Giovane(inizio del XVI sec.). Il disegno in pianta e in alzato è corredato di particolari, quote e annotazioni.

Appare qui di interesse notare non solo l'elogio all'architetto ma anche l'interessante notazione sulla presenza di strumenti di misura

disponibili a quel periodo la cui diffusione però si avrà maggiorante verso la fine del periodo rinascimentale dove la maggior cura non solo planimetrica ma anche al rilievo della facciate e degli schemi compositivi ad esse sottese vede la genesi di rilievi maggiormente dettagliati e arricchiti di informazioni metriche e di annotazioni di carattere descrittivo.



*Figura 6 Quadrante, strumento di rilievo topografico, da Mariano di Jacopo, detto il Taccola (metà del XV sec.).*

E' da ricercarsi nella rinnovata passione per le armonie, tipica di questo periodo storico, rilevabili nelle opere antiche il percorso che condusse ad una riscoperta di strumenti di rilievo già noti, ma caduti in disuso nel Medioevo; dalle opere riscoperte di Vitruvio, Erone e Archimede gli intelletti rinascimentali trassero spunto per inventare nuovi dispositivi (quadrante, baculo, teodolite, ecc.) o per sperimentare nuove tecniche di rilevamento (triangolazione). Progrediscono molti studi e ricerche relativamente le strumentazioni scientifiche ivi incluse quelle inerenti rilievo architettonico e topografico; l'attenzione degli studiosi, specie in campo matematico e geometrico, si rivolge al continuo perfezionamento di quanto introdotto dalla cultura araba ed alla costruzione e ricostruzione di antichi apparecchi le cui

descrizioni venivano recuperate dalla lettura e dallo studio degli antichi autori.

L’introduzione di una prima strumentazione scientifica va quindi di pari passo col sia col rafforzamento del rapporto fra scienza e tecnica che con la stesura, da parte di architetti, ingegneri, matematici, ecc. di “trattati” sull’architettura, sulla prospettiva, sulle macchine da guerra; produzioni poi sviluppatesi e approfonditesi nei secoli successivi; come spesso è accaduto durante lo sviluppo della civiltà umana sono state le necessità militari di rendere preciso il fuoco d’artiglieria, e la rivoluzione scientifica aperta da Galileo e Newton, a fornire al rilievo nuovi metodi e strumenti. Aspetti di scienza e tecnica questi che vanno sviluppandosi, dalle base qui gettate, fino al XVIII secolo vedendo il pieno sviluppo di concetti appena introdotti nel ‘500.

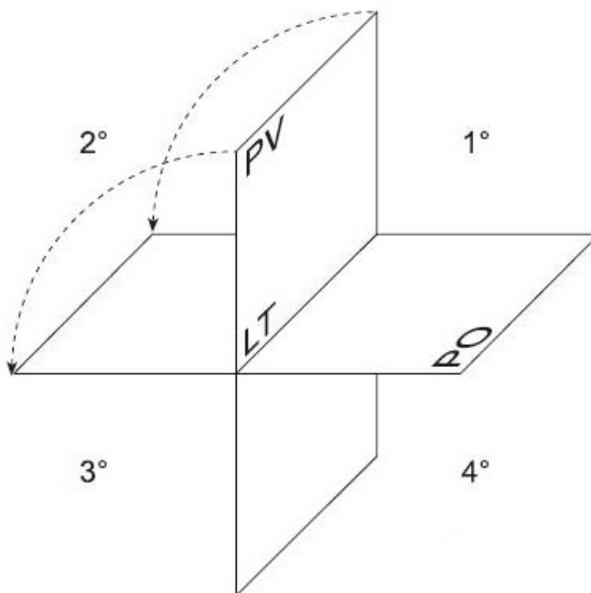
Nei campi della cultura della scienza ed in particolare anche del rilevamento si nota una differenza sostanziale nel diverso modo di concepirle arrivando ad una sempre maggiore codificazione dei sistemi di rappresentazione che si riversa nell’opera di Gaspard Monge (Beaune, 1746 – Parigi, 1818)<sup>22</sup>, una ricca elaborazione dei fattori geometrici, un diverso modo di guardare all’architettura ed alle civiltà del passato e, di maggiore interesse per il presente studio, ampio sviluppo del rilevamento sia a scala urbana che territoriale.

Va inoltre messo in evidenza che, ad una produzione di rilievi ed elaborati di tipo personale sviluppati per usi privati, si affermano sempre più un lavoro di squadra che coinvolge molteplici figure e lo scopo finale diviene di nature divulgativa, conseguenza al fatto che i primi campi d’indagine si sono ampliati e specializzati tanto da costituire vere e proprie discipline indipendenti con finalità e caratteristiche specifiche: il rilievo dei monumenti assume un carattere di tipo conoscitivo generale e tende a raggiungere una maggiore obiettività e si assiste altresì alla modifica delle rese grafiche che

---

<sup>22</sup> Marco Ceccarelli, Michela Cigola, Contiguità e commistione tra geometria descrittiva e teoria dei meccanismi nell’ingegneria italiana del XIX secolo, in *Disegnare idee e immagini*, anno XX, numero 39, pp 12-14.

passano dal disegno al vero a grafici molto rispondenti alla realtà del costruito e finalizzati ad intenti divulgativi.



*Figura 7 Il metodo di Monge è basato sulla corrispondenza biunivoca che sussiste tra i punti dello spazio e le loro proiezioni ortogonali su due piani mutuamente ortogonali che dividono lo spazio in quattro diedri (1°, 2°, 3°, 4°). I due piani sono detti rispettivamente piano orizzontale (PO) e piano verticale (PV), detti piani di proiezione, mentre la loro retta di intersezione è detta linea di terra (LT). Dopo aver proiettato i punti dello spazio sul piano orizzontale e sul piano verticale, per operare sopra un unico piano (piano geometrico) ruotiamo (ad esempio in senso antiorario) PV intorno ad LT in modo che esso vada a sovrapporsi a PO. Operando in tal modo abbiamo che:– un punto P, dello spazio, può essere rappresentato (biunivocamente) da una coppia (P1; P2) di punti di PO appartenenti ad una retta ortogonale ad LT; – una retta r non di profilo, ossia che giace su un piano ortogonale ad LT, può essere rappresentata (biunivocamente) da un coppia (r1; r2) di rette distinte di PO.*

Lo sviluppo delle tecniche incisorie e della stampa, la conseguente necessità di ridurre i dettagli e le informazioni vede lo sviluppo di codificazioni di varie convenzioni grafiche finalizzate non tanto ad una corretta restituzione del rilievo quanto ad una miglior comprensione e gradimento da parte del sempre più vasto pubblico interessato a queste opere; si assiste quindi ad uno sviluppo della ricerca di effetti grafici a discapito però di un allontanamento degli elaborati finali dal rigore scientifico che sarebbe stato auspicabile visto il perfezionamento delle tecniche di rilievo e degli studi. Sul campo invece si assiste alla nascita di veri e propri gruppi di lavoro, sotto la guida di architetti e ingegneri, che svolgono attività

di rilievo volte ad ottenere la massima cognizione dell'edificio da studiare attraverso l'uso sistematico di convenzioni grafiche sempre più precise e attraverso la stesure sia di elaborati planimetrici che di alzati quotati dettagliatamente. E' interessante notare come in alcuni casi il rilievo venga poi utilizzato per effettuare confronti con il progetto teorico dell'edificio. Un vero e proprio precursore degli attuali studi preliminari che si svolgono sugli edifici esistenti potrebbe essere considerato il caso di Ottavio Bertotti Scamozzi, che rilevò molte delle opere di Andrea Palladio andando poi ad indagare a fondo sul divario e sulle discrepanze che esse presentavano con il progetto originale<sup>23</sup>.

Iniziata quindi nel Rinascimento e proseguita nel periodo Barocco e settecentesco con la precisazione delle norme grafiche, dei concetti teorici e del campo di indagine, ereditata e sviluppata per tutto l'ottocento specialmente nelle Accademie e nelle Facoltà Universitarie, la tradizione e concezione del rilevamento ha mantenuto una formulazione pressoché immutata relativa al considerare il monumento quasi esclusivamente nella sua apparenza esteriore tralasciando l'aspetto strutturale e costruttivo; aspetto questo che non poteva portare ad una lettura storica e critica dell'edificio stesso in quanto i disegni, anche se frutto di attente campagne di misurazione, erano condizionati da preconcetti sull'architettura del passato e quindi a parte l'immagine esteriore poco o addirittura nulla riproducevano della storia dello stesso.

### *2.1.2.2 La tecnologia al servizio del rilievo odierno*

La nascita dell'elettronica e la sua applicazione al mondo del rilevamento architettonico ha portato a grosse modificazione nell'approccio allo stesso; se fino al secolo scorso si basava essenzialmente sull'utilizzo simultaneo di strumenti per allineare (paline, squadra o traguardo, squadra agrimensorio), strumenti per le misure delle distanze (longimetri per misure dirette, longimetri per misure indirette), strumenti per la misurazione degli angoli (goniometri quali teodoliti, tacheometri), strumenti per la misura dei

---

<sup>23</sup> Ottavio Bertotti Scamozzi, *Le fabbriche e i disegni di Andrea Palladio*, Vicenza, Giovanni Rossi, 1776.

dislivelli (bicchieri graduati, livelli ottici), strumenti per le riprese fotografiche (monocamere, camere stereo fotogrammetriche), cioè strumentazioni che si sono consolidate nei secoli, oggi strumenti come stazioni totali piuttosto che laser scanner permettono di integrare in un'unica operazione di rilievo tutte le prese metriche necessarie demandando a successive fasi il filtraggio dei dati rivelandosi come altamente funzionali garantendo da una parte una elevata precisione e dall'altra parte una riduzione delle tempistiche necessarie all'espletamento del lavoro. Altresì legato allo sviluppo tecnologico ed alla diffusione delle macchine fotografiche dotate di sensore CCD per l'acquisizione delle immagini, si sono sviluppate le tecniche di fotogrammetrie terrestri che, unite allo sviluppo software ed all'aumento delle capacità elaborativa del personal computer, permette oggi di ottenere modelli digitali di elementi architettonici attraverso la semplice mappatura fotografica delle stessa.

#### *2.1.2.2.1 La stazione totale ed il laser a scansione*

La stazione totale ed il laser a scansione sono strumenti il cui utilizzo si è sviluppato negli ultimi anni per il rilievo indiretto dei manufatti architettonici in quanto entrambi consentono di misurare punti della superficie anche fisicamente irraggiungibili (la condizione è ovviamente che siano visibili all'occhio del laser) e quindi nel caso di edifici monumentali in cui le altezze sono spesso fuori dalla portata delle tradizionali tecniche di misura diretta. Hanno dimostrato la loro utilità anche per rilievi finalizzati alla quantificazione dei dissesti e delle deformazioni strutturali in quanto permettendo di una notevole precisione (rapportata alla scala del rilievo e delle necessità) che consente di cogliere efficacemente anche piccole variazioni formali. Nel caso infatti di deformazioni o dissesti infatti il discostamento dall'ipotetico "sesto" si quantifica in misure di centimetri e questo risulta anche possibile attraverso un basso margine di errore nel rilievo delle posizioni reciproche di punti tridimensionali tra loro anche distanti, non adiacenti e non collegati fra di loro.

Formalmente il funzionamento dei due strumenti è, in qualche modo, simile in quanto il laser a scansione o laser scanner terrestre può essere considerato come una stazione totale motorizzata ad elevata automazione, in

grado di acquisire milioni di punti in pochi minuti. Il principio su cui si basa tale tecnologia, in estrema sintesi, è il calcolo del tempo di volo (time-of-flight) di un impulso laser. L’impulso elettrico prodotto dal generatore, collimato da un diodo laser trasmittente, crea un raggio di luce infrarossa; il segnale degli eco riflessi dall’oggetto colpito (di differente intensità in base alla riflettanza di quest’ultimo) viene captato da un fotodiodo ricevitore che genera un segnale elettrico di ricezione. Il tempo di volo, ossia l’intervallo di tempo che intercorre tra l’impulso trasmesso e l’impulso ricevuto, calcolato tramite un orologio con una frequenza stabilizzata al quarzo, consente di individuare la distanza d’ogni singolo punto rilevato. Al calcolo del tempo di volo è associato anche una misurazione angolare di precisione data dalla rotazione di due specchi rotanti attorno agli assi x e z (l’asse y è associato alla distanza e la z è la verticale). Specificatamente le scansioni poi, la rotazione dello specchio, in funzione della risoluzione angolare impostata dall’operatore per la scansione, crea la spaziatura tra i differenti punti rilevati sul target e genera la nuvola di punti rilevando l’oggetto indagato di carattere tridimensionale in cui le coordinate (x, y, z) del singolo punto vengo determinate trigonometricamente a seguito dell’acquisizione della distanza inclinata del punto indagato dall’apparecchiatura di rilievo e dei valori di angolo azimutale ed orizzontale rispetto ad un orientamento scelto dall’operatore.

Ampia differenza invece sta nella fase operativa in cui, mentre con un processo a scansione è la macchina ad indagare, impostati i passi di analisi nelle due direzioni orizzontali ed azimutali, la superficie mediante l’acquisizione arbitraria di un numero molto elevato di punti, con l’utilizzo di un rilevamento mediante teodolite è l’operatore che deve pianificare preventivamente le aree da indagare ed i punti maggiormente significativi al fine di garantire, con un numero limitato di punti visto che ognuno degli stessi deve essere otticamente identificato e misurato, un campione significativo dell’oggetto da misurare.

#### 2.1.2.2.2 *La fotogrammetria terrestre*

*“La fotogrammetria è la scienza che consente di ottenere informazioni affidabili di oggetti fisici e dell’ambiente*

*circostante mediante processi di registrazione, misura e interpretazione delle immagini fotografiche e digitali formate dall'energia elettromagnetica radiante e da altri fenomeni fisici.*"<sup>24</sup>

Sin dalla sua invenzione, la fotografia è sempre stata considerata come una soluzione ideale per la "registrazione" del reale; acquisire delle informazioni sullo spazio fisico è una esigenza specifica delle discipline che si interessano alla documentazione, alla conservazione e alla valorizzazione del patrimonio architettonico; la si può infatti considerare, a tutti gli effetti, un supporto privilegiato per condurre l'analisi delle superfici e per interpretare la forma, le proporzioni e le misure degli elementi che compongono l'oggetto architettonico.

Le tecniche di restituzione fotogrammetrica basate sulla corrispondenza geometrica tra una proiezione prospettica e una ortografia hanno permesso, nel corso del secolo scorso, la nascita di una stretta relazione tra lo spazio della fotografia e quello della rappresentazione. Oggi, grazie al progresso delle tecnologie informatiche nei campi della fotogrammetria e della modellazione geometrica, questa relazione acquisisce un'altra dimensione: lo spazio della rappresentazione diventa tridimensionale e la fotografia rappresenta una delle possibili viste di questo spazio. Le nuove tecnologie offrono al mondo culturale la possibilità di creazione e di condivisione di conoscenza, la digitalizzazione del patrimonio contribuisce allo sviluppo della società dell'informazione ed all'ampliamento delle vie di accesso alla cultura; fra questi nuovi strumenti la foto modellazione fa esclusivamente riferimento all'utilizzo di fotografie per condurre la ricostruzione tridimensionale d'oggetti reali.

La foto modellazione introduce un ambiente di lavoro che permette la ricostruzione tridimensionale di un edificio, o più in generale di un oggetto solido, basandosi sull'integrazione globale e coerente delle fasi di rilievo, modellazione e rappresentazione. Ciò consiste nell'estrarre direttamente

---

<sup>24</sup> American Society of Photogrammetry, Manual of photogrammetry, Bethesda, Maryland, Asprs Pubns, 1980

dalle fotografie tutte le informazioni bidimensionali di piante e prospetti: vertici e profili per la ricostruzione tridimensionale degli elementi, texture per arricchire visivamente i volumi creati. Si tratta quindi della possibilità, partendo da semplici fotografie, di arrivare ad elaborare delle rappresentazioni realistiche tridimensionali nelle quali le texture non rappresentano solamente un escamotage per la simulazione della realtà ma costituiscono un prezioso archivio di informazioni relativo alla conservazione.

Esiste una forte relazione tra la prospettiva e la misurazione ed in effetti, se le tecniche di rilevamento utilizzate nel Medioevo sono implicate nelle origini della prospettiva, dopo la sua invenzione, quest'ultima è stata rapidamente impiegata come strumento di misura. Già infatti nel XV secolo Filippo Brunelleschi introduceva un procedimento geometrico che permetteva di dipingere con precisione una porzione osservata di spazio reale; nel suo libro *De Pictura*<sup>25</sup> proponeva una prospettiva con un punto di fuga centrale per simulare la visione umana (formalizzazione del passaggio da una prospettiva ottica ad una geometrica).

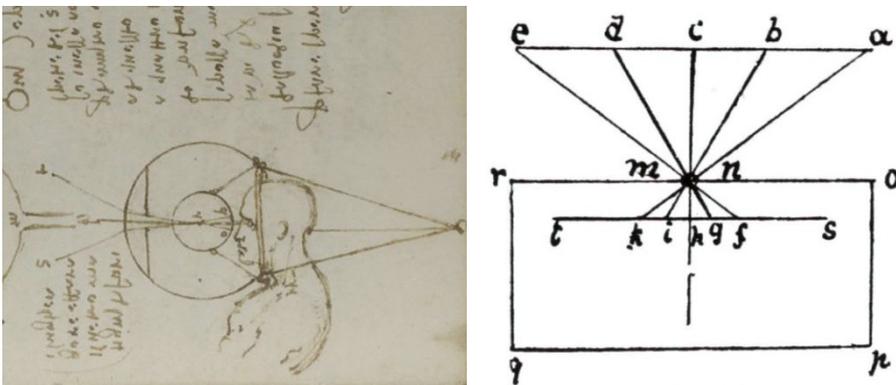


Figura 8 La camera "obscura" di Leonardo da Vinci, disegno originale del Codice Atlantico e principio di funzionamento.

Dopo la formulazione di questo metodo e una prima "macchina per disegnare" concepita da Albrecht Durer è con Leonardo da Vinci<sup>26</sup> che si ha la prima definizione di prospettiva: "la prospettiva non è nient'altro che vedere

<sup>25</sup> Leon Battista Alberti, *De pictura* (La pittura), Genova, 1935.

<sup>26</sup> Leonardo da Vinci, *Codice Atlantico*, 1515.

un oggetto dietro un vetro piano e ben trasparente, la cui superficie contiene tutte le cose che sono dietro: esse possono essere riportate al punto dell'occhio tramite delle piramidi e queste tagliano il vetro menzionato".

Ma è con Jean-Henri Lambert (1728 – 1777), filosofo matematico fisico e astronomo svizzero contemporaneo di Eulero, che alcuni principi fondamentali come il raggio visivo o la linea di fuga, già presenti nelle prime formulazioni, furono sviluppati per trovare le regole inverse della geometria proiettiva che consistono nel determinare la posizione dell'osservatore, nel trovare la linea dell'orizzonte e nello stimare l'orientamento degli oggetti contenuti in un quadro. Egli capì che i punti di fuga potevano essere sfruttati come supporto geometrico per l'inversione della prospettiva; veniva così inventata quella che oggi viene chiamata, in fotogrammetria, la calibrazione della camera aprendo il cammino all'emergere della geometria proiettiva, che unisce l'approccio puramente geometrico con il metodo delle coordinate.

I progressi negli studi della geometria proiettiva, ad opera prima di uomini come Pascal o Desargues, nel corso del XVII secolo, successivamente di Jean Victor Poncelet, nel 1822, trovarono con Felix Klein, a metà del XIX secolo, la chiarificazione del legame fra geometria proiettiva e geometria euclidea. Ma, al di là dei progressi realizzati in geometria, è anche importante guardare parallelamente quanto avviene attorno allo sviluppo delle macchie per la "cattura della realtà". Dalla prima "camera obscura" ideata da Leonardo nel 1515 chiamata "stenoqueo", attraverso un processo di progressivo perfezionamento, legato all'aggiunta di lenti, diaframmi, specchi, si arrivò nel 1839 all'invenzione della prima macchina fotografica ad opera di Niépce, Daguerre e Talbot con l'inserimento di pellicole fotosensibili in grado di "fissare la luce".

Vero innovatore nell'individuare le potenzialità della fotografia, per l'estrazione di informazioni a carattere spaziale, fu Aimé Laussedat<sup>27</sup> a metà del XIX secolo quando utilizzando la camera chiara di Wollaston registrò fotograficamente le prospettive: nasceva così la fotogrammetria con il

---

<sup>27</sup> Viene ricordato come "fondatore" della fotogrammetria, nel 1843 con un processo denominato "iconometria" sviluppa il primo processo di analisi delle fotografia per la redazione di mappe topografiche.

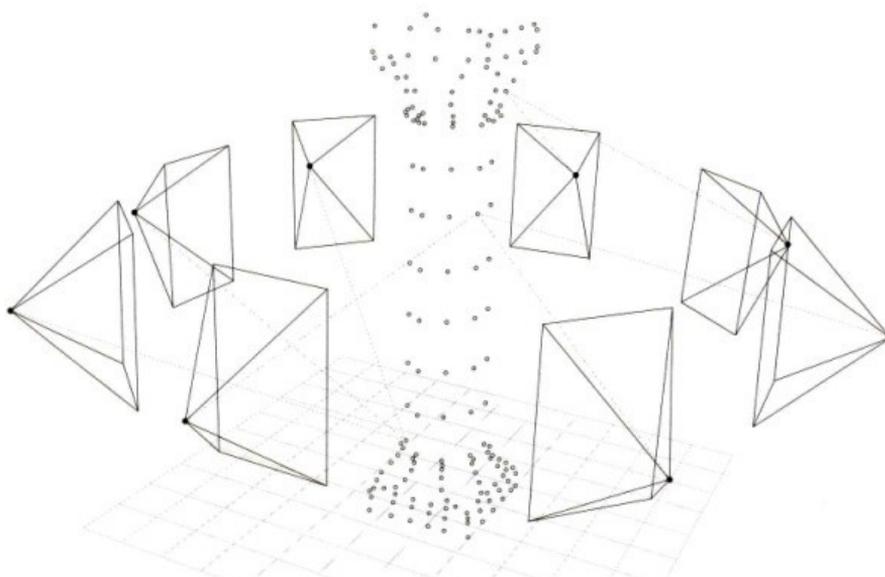
metodo della “metrofotografia”. L’idea fondamentale alla base di questa nuova disciplina è semplice: su una fotografia la scena tridimensionale è proiettata su un piano a due dimensioni. Di conseguenza, un qualsiasi punto dell’oggetto fotografato, indipendentemente dalla sua posizione dello spazio, sarà sempre e comunque posizionato lungo il raggio che, partendo dal centro ottico della macchina fotografica, si prolunga all’infinito. Tuttavia, se lo stesso oggetto è visibile su due fotografie distinte, questo punto si troverà allora sull’intersezione dei due raggi corrispondenti. Questo procedimento, conosciuto con il metodo di triangolazione, permette di ritrovare un qualsiasi punto nello spazio a condizione che questo sia presente su almeno due fotografie.

A partire da questi principi, il vero progresso in fotogrammetria si manifesterà all’inizio del XX secolo quando l’austriaco Eduard Ritter *von Orel* (1841-1892) costruisce il primo “restitutore” analogico che permette di determinare la dimensione e la forma dell’oggetto due volte fotografato grazie all’osservazione stereoscopica. Da una trentina d’anni, la fotogrammetria ha rotto con l’universo analogica evolvendo verso una sempre maggior integrazione con algoritmi matematici di calcolo senza però dimenticare i principi fondamentali introdotti da Poncelet; questo connubio permette oggi di introdurre nozioni di “geometria di immagini multiple” e leggi che relazionano e governano una scena 3D e le sue possibili proiezioni 2D.

In fotomodellazione l’elaborazione del modello tridimensionale di un edificio passa dall’espressione geometrica degli oggetti che lo compongono alla restituzione dell’aspetto superficiale nelle sue differenti parti. Ciò corrisponde ad un processo in tre fasi d’elaborazione interdipendenti: l’acquisizione delle coordinate spaziali, la ricostruzione tridimensionale e la ricostruzione dell’apparenza visiva. Lo stretto legame fra queste fasi risulta inizialmente dalla scelta delle informazioni che sono ricavate dalle fotografie per condurre le operazioni di ricostruzione 3D, in funzione delle procedure di modellazione geometrica delle superfici e dei volumi. In seguito essa dipende dal grado di approssimazione geometrica scelto in fase di modellazione, oltre che dalla strategia adottata per l’estrazione delle texture. In effetti nella maggior parte delle applicazioni, il legame fra la fase di misura, di

modellazione e di estrazione delle texture è stabilito sin dalle prime operazioni di rilievo fotografico, al fine di assicurare sul terreno l'acquisizione dell'insieme di informazioni necessarie alla rappresentazione dell'oggetto.

La fase di acquisizione delle coordinate spaziali consiste nel determinare le caratteristiche metriche della porzione di spazio fotografata. Generalmente, per passare da una rappresentazione bidimensionale (foto) a una tridimensionale (modello) della scena, sono necessarie almeno due immagini.

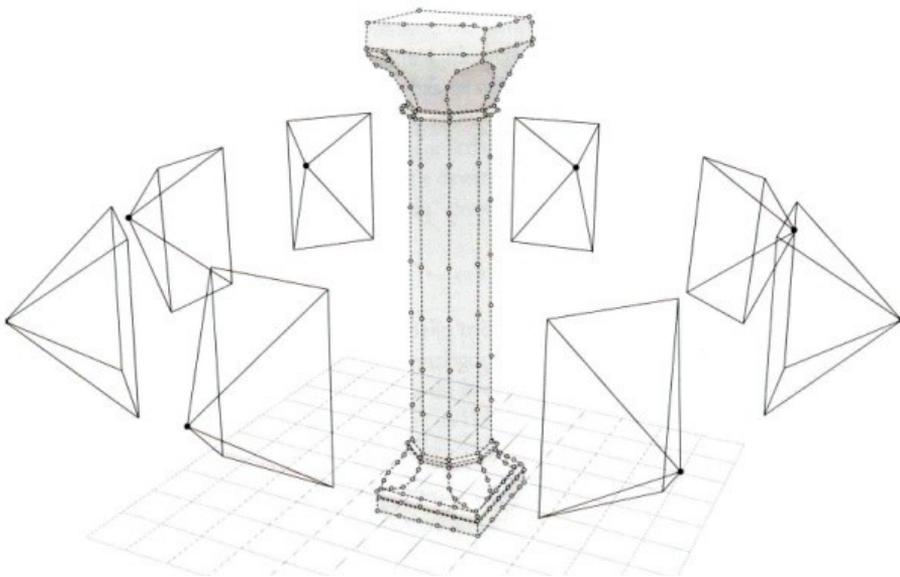


*Figura 9 Acquisizione di coordinate spaziali, Massimo Cotti, Edificio residenziale a La Habana un approccio innovativo per il restauro ed il riuso, Università degli Studi di Parma, Tesi di Laurea, 2012*

A partire dalle differenti proiezioni note di un elemento e della conoscenza dei parametri relativi alle macchine fotografiche utilizzate (dedotti o conosciuti a priori), si possono determinare la posizione e l'orientamento nello spazio delle stesse al momento dello scatto. Nel corso di questa fase si selezionano dei punti su un'immagine e li si associano ai punti omologhi in altre immagini della stessa scena. Una volta raggiunto un numero sufficiente di corrispondenze, la procedura di calibrazione ed orientamento delle camere permette di stabilire le relazioni proiettive tra i centri ottici delle macchine fotografiche (o più genericamente delle camere), i punti sulle immagini e le coordinate 3D nello spazio.

A partire dalla deduzione delle proprietà proiettive, delle posizioni e degli orientamenti di ogni fotografia, questa procedura determina la posizione nello spazio dei punti selezionati sulle immagini. Una volta calcolata una prima soluzione di calibrazione è possibile aggiungere altre corrispondenze (punti omologhi) nel fine duplice di migliorare il calcolo dei parametri delle camere e di estrarre i punti caratteristici delle forme necessari alla loro ricostruzione nello spazio. Una volta stabilite le relazioni geometriche tra i centri ottici delle camere, le loro proprietà proiettive e la posizione dei punti nello spazio, l'impalcatura della geometria della scena è raffigurata in un unico riferimento spaziale. Una volta introdotte nel sistema le informazioni dimensionali (misure di riferimento prese sul campo in fase di rilievo), è possibile ricavare diversi tipi di misure quali angoli, distanze, quote, direttamente dalle fotografie.

Una volta definiti dei punti nello spazio, è possibile costruire una rappresentazione tridimensionale che raggruppi l'insieme di questi punti e che esprima la natura geometrica degli elementi della scena fotografata.

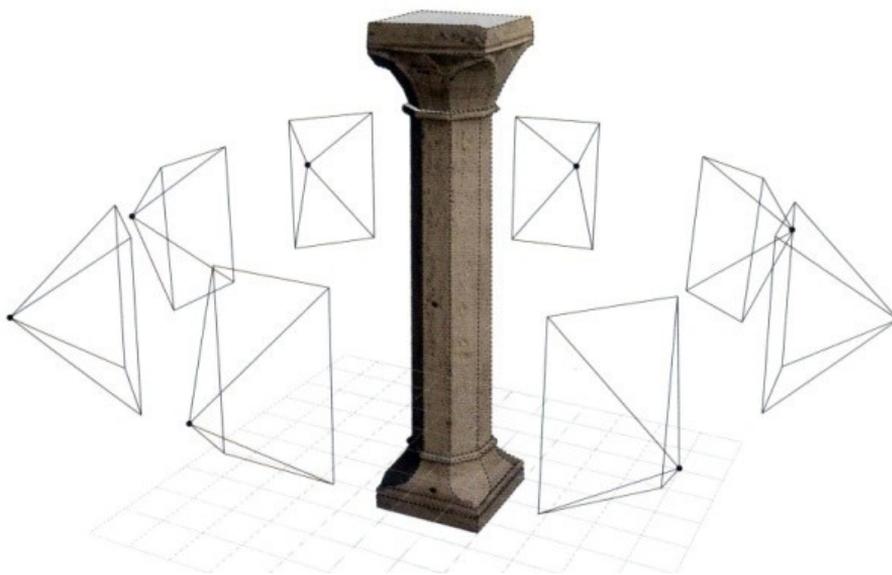


*Figura 10 Ricostruzione tridimensionale, Massimo Cotti, Edificio residenziale a La Habana un approccio innovativo per il restauro ed il riuso, Università degli Studi di Parma, Tesi di Laurea, 2012.*

Questa fase consiste in una vera e propria modellazione geometrica che può essere basata sull'aggiustamento (posizionamento e deformazione)

di primitive geometriche su delle funzioni di estrusione di facce poligonali o su delle procedure più complesse di generazione di superfici parametriche a partire da profili.

In questa fase ci si interessa all'arricchimento della geometria precedentemente generata attraverso degli attributi capaci di descrivere gli aspetti di superficie. Si tratta principalmente di associare al modello 3D, le texture acquisite al momento della ripresa fotografica.



*Figura 11 Restituzione dell'apparenza visiva, Massimo Cotti, Edificio residenziale a La Habana un approccio innovativo per il restauro ed il riuso, Università degli Studi di Parma, Tesi di Laurea, 2012*

Sfruttando le relazioni proiettive stabilite in fase di calibrazione tra i centri ottici delle camere, i poligoni creati nello spazio e i piani immagine (rappresentazioni delle fotografie nello spazio), questa operazione permette di estrarre delle porzioni di immagine che sono in seguito proiettate sul modello 3D a partire da una o più foto simultaneamente.

La fotografia è logicamente una soluzione per la registrazione del reale; la quantità di informazioni che è possibile registrare in una campagna di rilievo è enorme. In effetti per ogni fotografia una macchina tradizionale permette di registrare circa 12 milioni di pixel. Una volta terminata la procedura di calibrazione ed orientamento delle camere, tutti i pixel

contenuti in una fotografia possono potenzialmente essere trasformati in coordinate nello spazio.

Malgrado ciò, bisogna sempre tener presente il fatto che, eccetto il caso di una correlazione automatica, l’estrazione di queste coordinate resta un’operazione iterativa e quindi molto lunga. Questo limite, dovuto al fatto che la fotomodellazione è una tecnica di rilievo indiretto, è al tempo stesso un vantaggio: la fotografia è un documento che garantisce la possibilità di ricavare delle misure complementari anche in un secondo momento. In effetti l’informazione contenuta nelle fotografie può essere estratta in maniera più o meno dettagliata in funzione della finalità della ricostruzione e della complessità dell’oggetto da ricostruire. Logicamente è di fondamentale importanza la possibilità di associare alle riprese fotografiche il rilievo, anche manuale, di alcuni punti o distanze di riferimento. Queste informazioni complementari potranno in seguito essere sfruttate per introdurre una unità di misura nella scena foto modellata, per definire dei vincoli geometrici in fase di calibrazione o di orientamento delle camere ed infine per verificare i risultati.

La qualità della calibrazione e dell’orientamento delle camere sono essenzialmente legate alla risoluzione spaziale dei pixel dell’immagine 3D; questo aspetto impone la presa in conto di preoccupazioni di ordine metodologico in fase di rilievo fotografico. Un grande vantaggio della fotomodellazione consiste nella flessibilità in fase d’acquisizione; essa permette un facile e rapido spostamento attorno all’oggetto e rispetto ai metodi di rilievo topografico classico questo aspetto aumenta in maniera considerevole la quantità di informazioni spaziali registrabili sul sito.

Per quanto riguarda la quantità e varietà di informazioni acquisite, è evidente che tutti i dati registrati da una fotografia presentino le qualità di veridicità ed esaustività; si tratta di informazioni estremamente importanti per la documentazione dello stato attuale di un edificio, soprattutto per quanto riguarda l’analisi dei materiali e del loro stato di conservazione.

Per quanto concerne la fase di ricostruzione 3D, un limite importante della foto modellazione riguarda la difficoltà nel riprodurre le forme che non presentano delle discontinuità evidenti, per esempio sculture o bassorilievi.

Questo problema, fra l'altro risolvibile adottando specifiche soluzioni in fase di ripresa, è principalmente legato alla difficoltà di selezionare sulle fotografie degli insiemi di punti che descrivono la geometria di superfici continue. Malgrado questi limiti, il progresso continuo nella produzione di macchine fotografiche digitali permette oggi di considerare la fotomodellazione come una soluzione economica ed efficace per molteplici applicazioni, che riguardano l'analisi e la documentazione grafica tridimensionale di edifici.

Se la misura, la ricostruzione tridimensionale e la restituzione dei materiali diventano possibili a partire da una semplice acquisizione fotografica, l'applicazione della fotomodellazione alla documentazione del patrimonio costruito resta un compito difficile perché la problematica legata al rilievo architettonico resta identica. In effetti non si tratta di riprodurre in tre dimensioni le forme architettoniche dell'oggetto, ma di estrarre dalla fotografia le informazioni capaci di descrivere le forme architettoniche e di rappresentarle in funzione dei codici grafici propri; partendo da semplici foto il controllo della tecnica di fotomodellazione permette di ottenere misure, piante, prospetti, sezioni, ortografie, ecc., per la documentazione materica dell'edificio e l'analisi del suo stato di conservazione, nonché ricostruzioni tridimensionali dei volumi e degli elementi di dettaglio e di decoro per la rappresentazione esaustiva nello spazio dei caratteri architettonici, delle visualizzazioni foto realistiche, ecc.

Cinque approcci differenti costituiscono le principali applicazioni della foto modellazione all'architettura.

- i. Un primo approccio si concentra sull'estrazione di informazioni dimensionali; è caratterizzato da una strategia d'acquisizione che mira ad isolare un insieme di coordinate nello spazio per estrarre in seguito delle distanze reciproche. In questo caso la sola fase di calibrazione ed orientamento delle camera sono sufficienti.
- ii. Un secondo riguarda l'elaborazione di rappresentazioni bidimensionali come piante, sezioni e prospetti; come nel caso precedente si tratta di una acquisizione di un insieme di punti pertinenti per restituire i caratteri di una parte dell'edificio su di un piano in due dimensioni (esame di degradi, quadri fessurativi, ecc.).

- iii. Un terzo mira alla ricostruzione geometrica tridimensionale dell'oggetto; un gran numero di punti deve essere estratto a partire dalle fotografie per la generazione e rappresentazione descrittiva di superfici e volumi nel modo più coerente possibile. Si tratta di una prassi ben più lunga dell'elaborazione di una rappresentazione bidimensionale poiché necessita di accorgimenti in fase di presa fotografica e del controllo delle funzioni di modellazione geometrica a volte molto complesse.
- iv. Un quarto riguarda la restituzione dell'apparenza visiva delle superfici; non vi è l'obbligo di una attenta e precisa ed approfondita descrizione geometrica in quanto l'approssimazione può essere celata dall'applicazione texture integranti il dettaglio delle forme (utile soprattutto per la produzione di contenuti multimediali a scopo divulgativo culturale anche se non viene completamente eliminata l'analisi metrica).
- v. Un ultimo approccio è quello che mira alla restituzione di più aspetti alla volta e si basa sull'adozione di una strategia di rilievo sul campo esaustiva e capace di supportare le diverse esigenze dei trattamenti precedentemente citati che vengono sfruttati in modo combinato per generare molteplici rappresentazioni dell'edificio.

### 2.1.3 L'attenzione al quadro deformativo e fessurativo

Anche se il rilievo, la misurazione e la conseguente resa grafica del costruito hanno da sempre seguito lo sviluppo delle conoscenze intellettuali sulle costruzioni, portando ad un accrescimento dell'attenzione ai vari aspetti di un edificio, che risentiva della peculiari necessità del tempo in cui esso veniva realizzato, si può considerare di sviluppo decisamente recente una specifica attenzione ad una attenta analisi e successiva resa grafica del quadro fessurativo e dei dissesti di un apparato costrittivo.<sup>28</sup>



*Figura 12 L'attento rilievo del quadro fessurativo lungo il perimetro di un pilone del Panthéon (Archives Nationales, 56AJ/6, foto di Carlo Blasi) è stato fondamentale nella comprensione delle cause del danneggiamento e nella conseguente definizione dell'intervento riparatore.*

Sicuramente va riconosciuto che, da una parte lo sviluppo normativo avvenuto negli ultimi decenni, dall'altra una aumentata attenzione nell'approcciarsi ad edifici storico monumentali (ma lo stesso processo intellettuale si potrebbe applicare ad un qualsiasi organismo architettonico

---

<sup>28</sup> Sisto Mastrodicasa, *Dissesti statici nelle strutture. Diagnosi consolidamento istruzioni teoriche applicazioni pratiche*, Milano, Hoepli, 1943.

oggetto di indagine) hanno valorizzato l'importanza della conoscenza di quelle che sono le deformazioni delle singole strutture ed altresì del quadro fessurativo cui sono interessate.

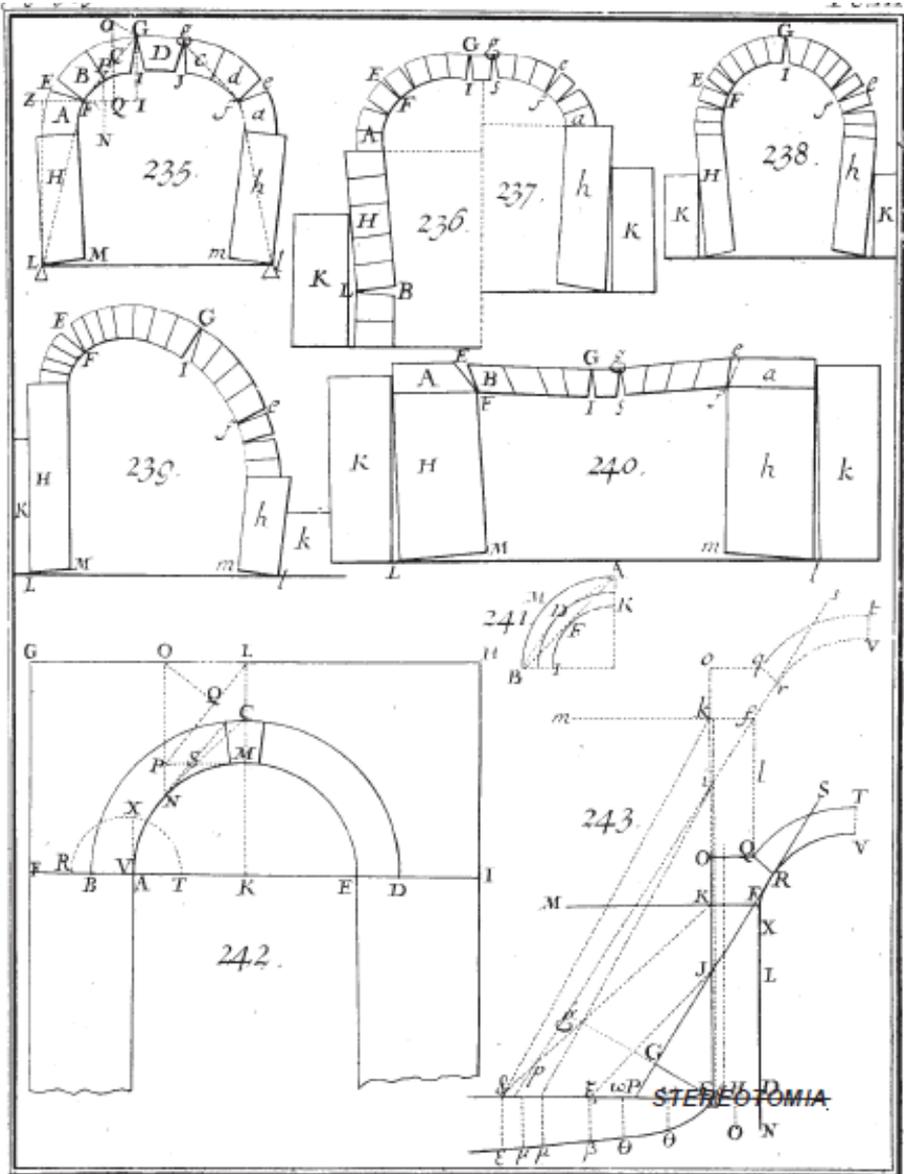


Figura 13 L'attenta osservazione dei dissesti nelle strutture era alla base degli studi anche nei secoli passati, Amedeo Frezier, *La teoria e la pratica del taglio delle pietre e dei legni per la costruzione delle volte*, Strasburgo, 1737-1739, tomo III, p.389.

Altresì occorre sottolineare che il progresso tecnologico legato all'introduzione di rilievi a scansione laser e fotogrammetrici piuttosto che mappature termografiche o soniche hanno semplificato non poco l'acquisizione e la gestione di queste informazioni; quando le misurazioni indirette erano ancora lontane dal divenire di ampio utilizzo la semplice verifica di perdite di verticalità di facciate piuttosto che di deformazioni di archi poteva risultare alquanto complicata ed altresì spesso definibile per un numero limitato di punti.

Quando oggi si parla di valutazione del quadro deformativo – fessurativo occorre, per prima cosa, chiarire la nozione di dissesto. In generale, si può considerare che le condizioni di sicurezza o di efficienza strutturale<sup>29</sup> possono essere ridotte, ed in certi casi vanificate, da dissesti o crisi che possono interessare l'intero complesso edilizio oppure una singola parte; esse sono originate potenzialmente da innumerevoli agenti fra i quali si possono citare, a titolo esemplificativo rimandando a letture scientifiche di maggior approfondimento<sup>30</sup>, le alterazioni del piano fondale o altresì la loro insufficiente portanza, la variazioni (da considerarsi normalmente in aumento) delle azioni sulle strutture, alterazione dello schema strutturale (risultato spesso di modifiche nei setti murati piuttosto che di sostituzioni di orizzontamenti), errati interventi di restauro spesso legati ad accostamenti di strutture con funzionamenti e comportamenti fra loro incompatibili ed non in ultimo i degradi legati al naturale scorrere del tempo<sup>31</sup>, alle azioni naturali eccezionali come terremoti (causa di azioni orizzontali nelle strutture alla quali spesso non vi sono elementi in grado di fronteggiarle).

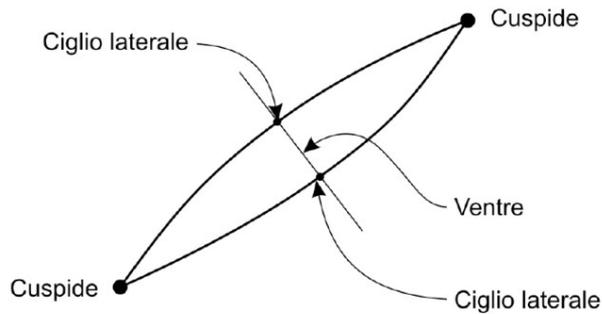
---

<sup>29</sup> Un manufatto per la sua efficienza strutturale dovrebbe possedere le seguenti qualità macroscopiche: resistenza del sistema di resistere e non rompersi quando soggetto a azioni, capacità di rimanere stabile cioè di subire perturbazioni senza allontanarsi in modo indefinito dalla sua configurazione di equilibrio, capacità di subire deformazioni permanenti senza rompersi e senza perdere apprezzabilmente resistenze ed infine la capacità del sistema di portare a terra le forze tramite più percorsi.

<sup>30</sup> Giovanni Menditto, Fessurazioni nelle strutture, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2010, pp 35-300.

<sup>31</sup> UNI 9124-2 – Edilizia residenziale- Strutture di elevazione di muratura (ed elementi costruttivi associati). Classificazione dei degradi e degli interventi.

La presenza di uno, o più, dissesti denuncia quindi un comportamento anomalo della struttura che richiede, al fine di valutare criticamente se trattasi di situazione di pericolo ed in quale misura, opportuni approfondimenti da decidere in funzione dell'obiettivo della ricerca o della progettazione. Si può quindi affermare che il dissesto vede la luce per effetto di stati tensionali che la struttura, o il singolo elemento, non sono in grado di sopportare e che hanno come conseguenza una riduzione localizzata delle resistenza; conseguenza quindi è il fatto che essi, al fine di una lettura coerente e successiva interpretazione, vengano generalmente classificati<sup>32</sup> in base alla direzione (longitudinali o verticali piuttosto che trasversali o diagonali), alla lunghezza ed alla profondità distinguendo qui fra fratture sottili e lesioni<sup>33</sup>.



*Figura 14 Elementi tipologici di una frattura: la cuspide rappresenta l'estremità della frattura o lesione, il ventre individua invece la sezione di maggior ampiezza della stessa ove si percepisce un più evidente allontanamento dei due bordi, detti cigli laterali.<sup>34</sup>*

Tali indicazioni, relative ad una possibile classificazione che si riconduce all'analisi della loro ampiezza, trova riscontri altresì nella

<sup>32</sup> Ad oggi, in Italia, non risultano codificate in modo univoco le indicazioni per un esame ed una classificazione dei dissesti e dei quadri fessurativi non essendovi riferimenti in norme di unificazione UNI (Ente Unificazione Italiana).

<sup>33</sup> Si parla generalmente di frattura sottile o capillari quando si osservano piccoli scostamenti o spostamenti di due punti originariamente contigui generalmente derivanti da contrazioni del materiale in prossimità della superficie dell'elemento; si invece di parla di lesione quando soluzioni di continuità chiaramente visibili evidenziano la rottura del tessuto resistente manifestando sull'esterno un difetto di funzionamento delle struttura o dell'elemento.

<sup>34</sup> Giovanni Menditto, Fessurazioni nelle strutture, Dario Flaccovio Editore, Palermo, 2010, cap.1, p 7.

letteratura scientifica che dal 1977 con T.G. Bidwell<sup>35</sup> e successivamente con le opere di Philip Rainer<sup>36</sup> e Dov Kaminetzky<sup>37</sup> che, ognuno con specifiche singolarità, hanno generalmente definito come si possano considerare sottili fino ad ampiezze di 1 – 1,5 mm ed altresì ampie al superamento dei 10 – 15 mm.

A queste caratteristiche di natura prettamente geometrica occorre affiancare, per avere una lettura complessiva dello stato di salute dell'elemento piuttosto che dell'intera struttura, l'estensione delle stesse sia all'interno di un singolo elemento che in rapporto ad elementi tipo logicamente simili che altresì all'intero edificio<sup>38</sup>.

Con specifico riferimento alle strutture in muratura, che affidano la loro concezione statica alla sola resistenza a compressione occorre porre, nell'osservazione del quadro fessurativo e deformativo, una particolare attenzione all'individuazione della natura della manifestazione distinguendo fra lesioni dovute a schiacciamento ed invece legate a fenomeni di trazione; le seconde saranno meno insidiose delle prime sia per la loro maggiore evidenza sia perché segmentando la struttura in più elementi consentono in generale nuove situazioni di equilibrio in quanto si creano delle soluzioni della continuità preesistente nella compagine strutturale ma rimangono invariate le caratteristiche meccaniche degli elementi che vengono separati.

Di particolare importanza, specialmente nello studio storico delle deformazioni di una struttura e conseguentemente nella sua analisi, è la

---

<sup>35</sup> T.G. Bidwell, *The conservation of brick buildings. The repair alteration and restoration of brickwork*, Brick Development Association, Londra, 1977, pp. 6-15.

<sup>36</sup> P. Rainer, *Movement control in the fabric of buildings*, Nicolas Publishing Co, New York, 1983.

<sup>37</sup> D. Kaminetzky, *Verification of structural adequacy. Rehabilitation renovation and preservation of concrete and masonry structures*, American Concrete Institute, Detroit, 1985, pp 141-142.

<sup>38</sup> All'interno di un generico edificio si potranno, generalmente, distinguere dissesti indiretti se coinvolgono elementi portati e diretti se invece coinvolgono elementi portanti (così come rispettivamente definiti in 2.5.1.3 NTC 2008); ed all'interno di tale macro-distinzione avranno carattere locale se interessano un solo elemento e non trovano ripetizione in elementi tipo logicamente simili, globali se interessano la totalità degli elementi o anche solo quelli tipo logicamente simili, limitati nelle situazioni di diffusione intermedia.

datazione delle lesioni andando ad individuare quelle recenti da quelle preesistenti; questo aspetto risulta importante per poter abbinare le stesse ad eventuali cause perturbatrici che si sono manifeste nel corso della storia dello stesso. Le fessure pregresse infatti sono il sintomo di vecchi dissesti che possono esseri esauriti nel tempo o perché le strutture hanno trovato un nuovo assetto di equilibrio o per l’esecuzione di lavori di consolidamento; l’instaurarsi di un nuovo dissesto per le medesime cause che provocarono quello vecchio, o anche per altre cause, ma che comporti una sovrapposizione dei quadri fessurativi vecchio e nuovo, è probabile che le vecchie fratture, per un certo periodo di tempo rimasti invariate, riprendano la loro progressione. Sarà riscontrabile questo analizzando la differenza fra le superfici di frattura che appariranno vecchie nelle zone intorno al ventre e nuove verso i limiti della cuspide<sup>39</sup>.

L’interpretazione dei segni esterni dei dissesti, intesa come l’attento esame della forma, dell’andamento e dell’ampiezza della lesioni, l’analisi degli spostamenti della parte del materiale che è traslato rispetto alla parte contigua rimasta nella sua posizione originale (o più spesso il moto di ciascuna delle due parti) permettono, allo studio come al professionista, di risalire, come risultato finale, alle cause dello stesso andando a classificarle tipologicamente come distacchi, rotazioni, scorrimenti o ancora spostamenti fuori dal piano ecc.; si ha quindi la nascita di quello che oggi tutti conoscono come “quadro fessurativo”, cioè la rappresentazione grafica degli elementi che vanno a perturbare l’equilibrio statico di una struttura mediante simbologia per una rapida interpretazione, una sintesi grafica del percorso conoscitivi realizzato.

---

<sup>39</sup> Per un approfondimento sul monitoraggio dei dissesti e dei quadri fessurativi si rimanda a Giovanni Menditto, Salvatore Menditto, Indagini semidistruttive e non distruttive nell’ingegneria civile: disciplina tecnica applicativa e normativa, Pitagora Editrice, Bologna, 2008, cap.4.

#### **2.1.4 L'evoluzione delle tecniche di rappresentazione**

Quando ci si avvicina al rilievo di un qualsiasi elemento, indipendentemente dalla dimensione e dallo scopo del rilievo, il processo si distingue in due fasi ben distinte: la prima, già illustrata ne “Il rilievo geometrico” e “

L'evoluzione delle tecniche di rilevamento", relativa alle operazioni di misura di tutti gli elementi ritenuti utili all'espletamento del processo e la seconda relativa alla restituzione di quanto acquisito, cioè all'insieme di tutti quei processi volti alla resa grafica sia sui tradizionali supporti cartacei sia su quelli multimediali. Anche in questo campo lo sviluppo delle tecniche e dell'accuratezza si è sviluppato nel corso della storia delle civiltà andando di pari passo con lo sviluppo delle tecniche già dettagliatamente illustrato in "L'evoluzione delle tecniche di rilevamento".

Come la notevole evoluzione degli strumenti di misurazione ha rivoluzionato sensibilmente la prima fase, permettendo una sempre maggior accuratezza nel rilievo di quelle parti non direttamente accessibili<sup>40</sup> o addirittura non raggiungibili<sup>41</sup>, così ha altresì profondamente modificato l'aspetto legato alla rappresentazione ed al disegno mediante una sempre maggior presenza sul mercato di software di calcolo ed elaborazione di dati vettoriali ed immagini raster. Va soprattutto sottolineato come negli ultimi anni, l'utilizzo sempre più diffuso di tecniche basate sulla fotogrammetria e sul laser scanner, abbia permesso di approcciarsi al rilievo in tempi brevi e con acquisizione di "infiniti" punti appartenenti all'oggetto in indagine con una conseguente necessità di demandare ad una fase di successiva elaborazione la scelta di dati effettivamente utili.

Una mole così imponente di dati provenienti dal rilievo, ha quindi richiesto uno sviluppo anche delle tecniche di rappresentazione attraverso un moltiplicarsi di possibilità offerte al disegnatore. Accanto alle classiche bidimensionali doppie proiezioni Mongiane, alle prospettive, alle assonometrie su basi proiettive, la vera novità sta nell'introduzione della spazialità tridimensionale e nella quarta dimensione: il tempo<sup>42</sup>.

---

<sup>40</sup> Il riferimento è alla fotogrammetria digitale terrestre, all'utilizzo di sistemi di rilevamento tipo laser-scanner ed in ultimo all'utilizzo di droni.

<sup>41</sup> Il riferimento è alle tecnologie di rilievo indiretto quali quelle di carattere termografico, soniche ed ultrasoniche, georadar, endoscopiche, ed in generale tutte quelle che permettono di indagare, senza danno, le parti poste al di sotto dello stato visibile degli elementi.

<sup>42</sup> Grazie allo sviluppo di sempre più sofisticate superfici virtuali che maggiormente approssimano i dati tridimensionali del rilievo sono oggi permesse vere e proprie viste dinamiche con la

Non c'è stata nella storia della rappresentazione visiva una trasformazione così radicale come quella nel campo della visualizzazione tecnica; nemmeno il passaggio dal Medioevo al Rinascimento può essere assunto come termine di paragone. L'utilizzo del computer nella rappresentazione visiva, pur essendo solamente un aspetto tecnico e non introducendo concettualmente nuove rivoluzionarie forme di rappresentazione, assume una rilevanza storica e crea una netta separazione tra due ere: prima e dopo il computer; infatti le possibilità date dal mezzo informatico sono molteplici.

Si intende per computer grafica l'insieme dei sistemi di rappresentazione visiva ottenuti mediante l'utilizzo dell'elaboratore elettronico; essa ha accresciuto a dismisura le potenzialità operative nel settore della rappresentazione degli oggetti; il computer è in grado di svolgere una grande quantità di operazioni in base alle istruzioni che riceve attraverso i programmi (il software). I programmi che permettono l'uso del computer per il disegno, trasferendo le caratteristiche di un oggetto come informazioni digitali, cioè numeriche, prendono il nome di sistemi CAD<sup>43</sup>.

Nato come strumento operativo a servizio della progettazione industriale, il CAD si è progressivamente diffuso attraverso l'elaborazione di programmi specializzati per ogni tipo di progettazione (meccanica, strutturale, impiantistica, ecc.), intervenendo in tutti i settori dove la complessità dei problemi da affrontare rende conveniente l'uso del computer.

La rappresentazione grafica degli oggetti nello spazio tridimensionale, definita modellazione, parte dalla definizione di un modello matematico degli oggetti stessi; i programmi progettati a tale scopo infatti prevedono un sistema di riferimento di coordinate cartesiane tridimensionali (x, y, z) in base al quale definire la posizione dei diversi punti che costituiscono gli oggetti da rappresentare. La ricostruzione di geometrie nello spazio può essere più o

---

conseguente possibilità di realizzare vere e proprie esplorazioni virtuali dei modelli di rilievo anche attraverso la realizzazione di filmati multimediali.

<sup>43</sup> Acronimo di Computer Aided Design, cioè di sistemi di disegno e progettazione assistiti dal computer.

meno complessa: gli elementi piani e le superfici piane sono di rapida definizione, il modello si complica quando si tratta di definire superfici curve, in quanto queste vengono calcolate come una sequenza di facce poligonali di tre o di quattro lati e dunque più fitta è la suddivisione in facce più operazioni di calcolo vanno eseguite per la definizione del modello matematico.

Esso può essere poi modificato sia nella forma sia nella sua posizione spaziale tramite le varie funzionalità di modellazione che i vari software forniscono; ciò consente di visualizzare in tempo reale gli oggetti ancora in fase di progettazione e di percepirne correttamente le forme potendo così intervenire rapidamente per apportare variazioni, correzioni e studiare diverse soluzioni contemporaneamente.

A partire dal modello matematico si può giungere alla definizione di un'immagine fotorealistica che rappresenti il modello tridimensionale come apparirà realmente una volta realizzato. L'operazione di trasformazione di un modello matematico in un'immagine di sintesi si chiama rendering.

Per ottenere l'immagine di sintesi finale è necessario sottoporre il modello matematico di partenza a una serie di operazioni per le quali sono stati sviluppati appositamente diversi software. La prima operazione da fare è quella di assegnare alle superfici visibili dell'oggetto l'aspetto finale effettuando una operazione detta di mappatura superficiale, ovvero applicando alle superfici i materiali e i colori desiderati.

Avendo quindi costruito un modello su base matematica, e non una semplice disegno bidimensionale, si possono arbitrariamente scegliere i punti di vista, cioè la posizione dalla quale si vuole osservare il modello, aspetto questo un tempo impensabile.

Le rappresentazioni dell'architettura così definite permettono anche di associare, ai vari elementi rilevati, informazioni aggiuntive di varia natura spaziando, secondo le esigenze dalla, dalla mappatura fotografica delle superfici alle immagini termografiche, dalle informazioni sui materiali alla posizione di fratture o crepe negli elementi; nasce così una forte implementazione di informazioni all'interno dello stesso modello che si trasforma sempre di più in un contenitore all'interno del quale far confluire tutti i dati che i vari aspetti del rilievo e dell'indagine portano alla luce.

A tal proposito grande impulso viene dato dall'utilizzo della tecnologia B.I.M. all'interno della quale ad ogni elemento architettonico possono essere associati, oltre che dati di natura prettamente geometrica, informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali, sulla tipologia degli stessi, ecc.

Anche in questo caso si parlerà di un modello di natura matematica di base e di informazioni associate ai vari elementi mediante appositi database che i programmi si costruiscono internamente: il semplice disegno va quindi "progettato" e anche la semplice restituzione di un rilievo comporta una pianificazione preliminare sugli aspetti e le informazioni da integrare e, ancor di maggior importanza, successivamente poter analizzare.

## 2.2 Struttura

Lo studio di una costruzione storica, o anche semplicemente di una singola sua parte, pone una serie di problematiche peculiari, aggiuntive rispetto a quanto richiesto per costruzioni nuove, alle quali l'analista, o in generale chi esegue verifiche di tipo numerico, deve porre particolare attenzione.

Le difficoltà derivano in primo luogo dalla necessità di modellare complesse geometrie, materiali e azioni, ed altresì dal "significato della storia" cioè dalla necessità di collegare l'analisi strutturale agli eventi storici che nel tempo hanno interessato l'edificio. Facilmente osservabile a proposito dello studio di casi reali, un'analisi strutturale scollegata dalla storia, o comunque che non consideri gli effetti del tempo sulla struttura e che si limiti alla pura indagine dello stato di fatto, può mostrarsi sterile o può produrre risultati non completamente coerenti con la realtà.

Certamente, parte delle difficoltà derivano dalla complessità generale che si riscontra nelle strutture storiche, sia in termini di caratteristiche dei materiali, delle geometrie e delle azioni. La muratura, essendo un materiale composito e fragile, sviluppa infatti complessi fenomeni meccanici e di resistenza la cui simulazione risulta ancora difficile, nonostante lo sviluppo sempre maggiore di teorie e metodi informatici. Un'esatta modellazione dei materiali e delle interfacce fra di essi presenti risulta spesso impedita dall'impossibilità di raggiungere una completa caratterizzazione di essi; l'impossibilità di fatto è spesso legata alla necessità di limitare l'estensione di ispezioni distruttive ed invasive e la preferenza per i metodi più indiretti con conseguenza che le informazioni sui materiali e composizione interna rimangono in molti casi limitati.

Un'altra difficoltà viene spesso riscontrata nella comprensione dei concetti di progettazione e metodi di costruzione originariamente utilizzati per produrre le costruzioni; l'ignorare gli obiettivi originari, le idee che ispirarono le strutture, i processi di realizzazione e le successive fasi di

attuazione di edificazione della fabbrica<sup>44</sup>, non è certamente di aiuto nella comprensione globale della struttura.

A causa di queste prime considerazioni, metodi convenzionali di calcolo, nonché criteri convenzionali per la valutazione della sicurezza strutturale, sono difficilmente applicabili allo studio delle antiche costruzioni; codici ufficiali per la progettazione strutturale, normalmente orientati a costruzioni moderne, non sono così facilmente trasferibili al caso di edifici storici.

È l'impronta della storia ciò rende l'analisi di un edificio storico così impegnativo e nello stesso tempo impedisce l'applicabilità dei metodi convenzionali; questo non deve essere però considerato un ostacolo solo perché non consente di passare direttamente e velocemente dal semplice modello rilevato a quello di calcolo ma ci fornisce lo spunto per far sì che la storia diventi una fonte di comprensione e di verifica del modello stesso. La conoscenza su fatti storici può fornire empiriche, ma preziose, informazioni<sup>45</sup>.

*“Dal momento che metodi e concetti convenzionali possono non essere utilizzabili, è necessario un approccio più generale che considera tutte le fonti di prova importanti, tra cui l'indagine e l'ispezione, la storia, il monitoraggio e l'analisi strutturale.”<sup>46</sup>*

---

<sup>44</sup> Esemplicativi, sull'importanza della fusione di conoscenze interdisciplinari per la miglior comprensione di un edificio esistente, risultano essere gli studi sulla stabilità della Catedral-Basílica de Santa María o Seu de Mallorca nei quali solo grazie alla simulazione delle successive fasi costruttive è stato possibile ottenere modelli di calcolo rispettosi e coerenti con lo stato di fatto. Si vedano in particolare Pere Roca, Consideration on the significance of history for the structural analysis of ancient constructions, in Claudio Modena, Paulo B. Lourenco, Pere Roca, Structural analysis of historical constructions, London, Taylor & Francis Group plc, 2005, p 72, e Luca Pelà, Julien Bourgeois, Pere Roca, Miguel Cervera, Michele Chiumenti Analysis of the Effect of Provisional Ties on the Construction and Current Deformation of Mallorca Cathedral, International Journal of Architectural Heritage.

<sup>45</sup> ICOMOS, Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage, Barcelona, 2005.

<sup>46</sup> Pere Roca, Consideration on the significance of history for the structural analysis of ancient constructions, in Claudio Modena, Paulo B. Lourenco, Pere Roca, Structural analysis of historical constructions, London, Taylor & Francis Group plc, 2005, p 64.

### **2.2.1 I metodi di modellazione degli edifici in muratura**

In generale la modellazione delle strutture in muratura, con particolare attenzione agli edifici storici che nascono da una progettazione avente come principi basilari le semplici proporzioni e l’equilibrio, presenta una complessità di problematiche che ha orientato, negli anni, la ricerca scientifica allo sviluppo ed alla formulazione di diverse teorie e metodi di modellazione; essi si differenziano tra loro non solo per complessità ed ipotesi di base ma, con altrettanta importanza, per grado di dettaglio dei risultati ottenuti ed onere computazionale richiesto per la loro elaborazione.

Alla luce di ciò, ed altresì in considerazione dell’importanza sociale che riveste la stima della resistenza sismica delle murature e della sicurezza degli edifici esistenti, il capitolo si propone di fornire una descrizione delle tipologie di modellazione oggigiorno maggiormente proposte, discusse e utilizzate. Il lettore avrà quindi modo di osservare la trattazione di molteplici approcci di analisi, propri dell’ingegneria strutturale, in quanto la risoluzione di tali problematiche non presenta una preferenziale ed univoca strada; di volta in volta deve essere la problematica stessa a suggerire allo studioso ed al progettista quale approccio risulta essere il maggiormente indicato ed oggettivamente praticabile al fine di rispondere alle specifiche richieste.

Indubbiamente fra le principali discriminanti nella scelta del tipo di modellazione vi è, oltre all’indubbia importanza dell’onere computazionale, il tipo di analisi che si intende effettuare; sull’intero edificio o piuttosto sul singolo elemento. Da questo punto di vista è possibile individuare una serie di classificazioni basate sia sulle diverse tipologie di modellazione sia sui tipi di analisi che si andranno ad effettuare.

Relativamente alla diversa tipologia di modellazione può apparire utile, in una prima classificazione generale fatta seguendo un ordine logico che va dal “più complesso” a quello “più semplice”, distinguere fra:

- modelli agli elementi finiti;
- modelli agli elementi di contorno;
- modelli agli elementi distinti;
- modelli discreti o macro-modelli.

All'interno poi di ciascuna di queste tipologie di modellazione sono, in linea teorica e di principio, applicabili le seguenti tipologie di analisi di tipo non lineare:

- analisi statica incrementale - iterativa di spinta o "pushover"<sup>47</sup>;
- analisi dinamica incrementale o "I.D.A."<sup>48</sup>;
- analisi limite<sup>49</sup>.

Appare di interesse sottolineare che l'applicazione dell'analisi limite, a differenza delle altre tipologie di modellazioni sopra esposte, presuppone a priori un attento esame della strutture finalizzato all'individuazione dei potenziali meccanismi di crisi e collasso; a tal proposito sono stati proposti e implementati in software commerciali specifici alcuni modelli orientati

---

<sup>47</sup> L'analisi di pushover o analisi di spinta (letteralmente pushover significa "spingere oltre") è una procedura statica non lineare impiegata per determinare il comportamento di una struttura a fronte di una determinata azione (forza o spostamento) applicata. Essa consiste nello "spingere" la struttura fino a che questa collassa o un parametro di controllo di deformazione non raggiunge un valore limite prefissato; la "spinta" si ottiene applicando in modo incrementale monotono un profilo di forze o di spostamenti prestabilito. In sostanza l'analisi di spinta è una tecnica di soluzione incrementale - iterativa delle equazioni di equilibrio statico della struttura in cui la forzante è rappresentata dal sistema di spostamenti o forze applicato. L'analisi di spinta consente di definire un legame scalare forza-spostamento caratteristico del sistema studiato, detto curva di capacità, che permette di ricondurre la ricerca dello spostamento massimo di un sistema soggetto ad una certa azione esterna a quella di un sistema SDOF equivalente.

<sup>48</sup> Nell'analisi dinamica non-lineare la struttura viene sottoposta ad un terremoto naturale o artificiale e costituisce ad oggi il metodo più accurato per la valutazione della risposta di una struttura all'azione sismica: l'analisi evolutiva nel tempo permette l'esatta comprensione dei fenomeni dinamici che si innescano e si evolvono sotto l'azione sismica, per tale motivo l'uso delle analisi dinamiche non-lineari può risultare molto apprezzato.

<sup>49</sup> L'Analisi Limite di una struttura consiste nella determinazione del carico di collasso della stessa. Questo viene raggiunto quando si forma un numero di cerniere plastiche tale da rendere la struttura labile. Per tale teoria vengono richieste le seguenti ipotesi: a) elementi con una dimensione prevalente sulle altre due; b) conservazione delle sezioni piane; c) spostamenti piccoli rispetto alle dimensioni dell'elemento (effetti del 2° ordine trascurabili); d) ogni sezione della struttura possiede un momento flettente massimo, il momento plastico  $M_p$ , corrispondente alla plasticizzazione completa; e) nelle vicinanze delle sezioni in cui  $M = M_p$  si formano delle zone a forte curvatura (cerniere plastiche) che si possono supporre concentrate in queste sezioni (sezioni critiche); f) la rotazione nelle cerniere plastiche, una volta raggiunto il momento plastico, non ha limiti ( $\theta_p \rightarrow \infty$ ).

all’applicazione dell’analisi limite, che meritano una trattazione specifica a parte.

### 2.2.1.1 *Metodo agli elementi finiti*

L’approccio di modellazione agli elementi finiti appare, ad oggi, probabilmente, il più versatile nell’ambito degli approcci considerati maggiormente accurati disponibili nella letteratura scientifica. Esso si basa sulla descrizione di elementi finiti di tipo piano-bidimensionali o solido-tridimensionali, ai quali vengono associati legami costitutivi con anche diverso comportamento a trazione ed a compressione. In particolare le leggi costitutive possono essere caratterizzate da una resistenza a trazione limitata o nulla, per meglio descrivere il comportamento delle murature storiche. Essendo infatti la muratura un materiale con comportamento di tipo fratturante, particolare attenzione va prestata alla tipologia di legame costitutivo, alla sua energia di frattura ed altresì al meccanismo individuato.

Seguendo la classificazione proposta da Lourenço et al. (2007), allo scopo di fornire un quadro sufficientemente completo del metodo, appare utile descrivere sinteticamente i differenti approcci di modellazione per la simulazione del comportamento della muratura mediante elementi finiti; possono essere suddivisi macroscopicamente in due classi, orientate a due diverse scale di modellazione:

- modelli continui (o “macro-models”), in cui viene utilizzato un unico elemento finito per rappresentare il comportamento della muratura che viene quindi pensata come solido omogeneo;
- modelli discontinui (o “micro-models”), in cui vengono discretizzati in maniera distinta gli elementi della muratura (blocchi o elementi lapidei) e i giunti di malta per quindi rappresentare la muratura come un elemento dotato di discontinuità.

A differenza dei secondi dove ogni componente (concio di laterizio e/o pietra e letto di malta di posa) viene modellato separatamente, e a ciascuno vengono attribuite le corrispondenti proprietà costitutive, nei primi ci si avvale di differenti tecniche di omogeneizzazione, allo scopo di poter definire un continuo equivalente alla tessitura muraria. Nella praticità del processo di

omogeneizzazione, pur essendo la muratura composta di malta e mattoni, che sono elementi dotati di differenti caratteristiche meccaniche e fisiche, vengono individuati dei moduli ricorrenti e stabilite delle caratteristiche equivalenti al singolo modulo che può pertanto essere modellato come un continuo.

Perfettamente coerente dal punto di vista teorico e formale, elegante dal punto di vista matematico, la “micro-models” presenta l’indubbio vantaggio di essere svincolata dalla necessità di introdurre a priori ipotesi sulla risposta (circostanza che la rende applicabile in modo del tutto generale) e la colloca tra i metodi di modellazione più avanzata oggi disponibili. Per contro invece, essa richiede un onere computazionale estremamente elevato e in molti casi tale da renderla, allo stato attuale della tecnica, inapplicabile per la simulazione della risposta di interi edifici o comunque di porzioni di notevoli dimensioni. Non in ultimo occorre sottolineare che l’estrema sensibilità alla scelta di alcuni parametri caratteristici del materiale, primo tra tutti il valore della resistenza a trazione, porta in genere le modellazioni di dettaglio a stime dal basso dell’effettiva resistenza della struttura, a causa di problemi legati alla non convergenza della soluzione o all’instaurarsi meccanismi di collasso locali, irrilevanti da un punto di vista globale, che tuttavia determinano l’interruzione dell’analisi numerica.

Senza alcun dubbio alcuno occorre comunque riconoscere che esse sono attualmente ritenute le più avanzate modellazioni nell’ambito della ricerca scientifica, e anche se oggi non risultano le più adeguate rappresentano un fondamentale riferimento alle modellazioni semplificate in quanto offrono un importante ruolo di confronto, verifica e taratura dei parametri; considerate invece da un punto di vista più operativo, viste le loro peculiari caratteristiche, i modelli continui sono orientati alla modellazione di interi edifici, mentre quelli discontinui sono rivolti a modellazioni di dettaglio.

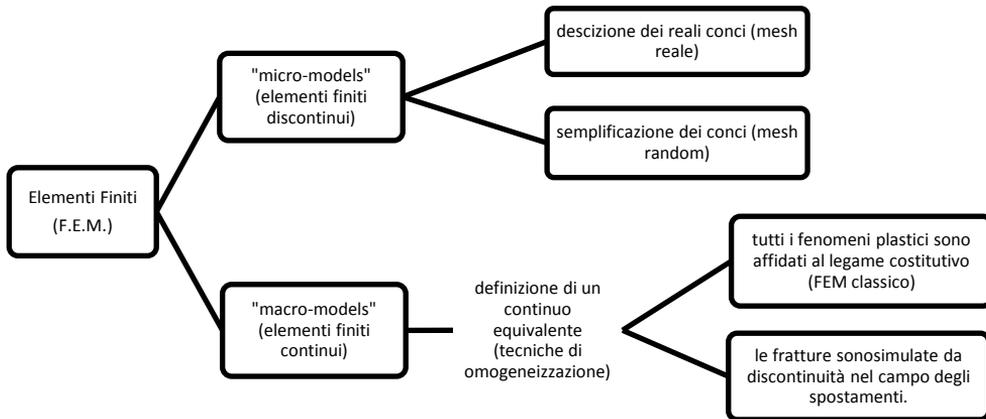


Figura 15 Tipologia dei modelli F.E.M.

### 2.2.1.1.1 Modelli continui

Il paramento murario, in generale, è un materiale composto da due elementi che presentano caratteristiche meccaniche notevolmente differenti: mattoni (o blocchi) e malta disposti in una tessitura; all’interno di essa, se risulta individuabile una disposizione sufficientemente regolare dei mattoni, le tecniche di omogeneizzazione rappresentano un potente strumento per l’analisi strutturale. Esse si basano infatti su di un approccio di tipo macroscopico, nel quale non vi è più distinzione tra gli elementi che costituiscono la tessitura muraria e i giunti di malta; si introduce un unico “elemento finito”, che ha il compito di simulare il comportamento globale del materiale “muratura”. L’omogeneizzazione delle proprietà meccaniche, che rappresenta una degli elementi di maggior importanza in questa metodologia, ha riscosso negli ultimi decenni l’interesse di numerosi studiosi e ricercatori portando alla definizione di procedure di omogeneizzazione, ormai disponibili nella letteratura tecnico-scientifica, e che possono seguire diversi approcci.

Almeno in via strettamente teorica, un metodo piuttosto generale e rigoroso consiste nell’utilizzo di un continuo generalizzato alla Cosserat<sup>50</sup>; in

<sup>50</sup> E’ una delle teorie, in campo bi e tridimensionale, della meccanica del continuo, branca della meccanica classica, che studia i corpi continui; a differenza della teoria classica di riferimento di Cauchy avente una struttura più puntuale, essa presenta una struttura locale più ricca espressa anche

quest'ambito le prime proposte sono state formulate da Besdo (1985) e Mühkhaus (1993). Sebbene il continuo alla Cosserat sia stato nuovamente approfondito in tempi recenti da alcuni autori (Casolo, 2004) (Stefanou et al., 2008), limitandosi generalmente al campo lineare, recentemente sono state avanzate alcune proposte per l'estensione del modello anche al campo non lineare (Addessi, 2010). Sono state inoltre condotte alcune simulazioni, mirate al confronto tra continuo alla Cosserat e alla Cauchy (Trovalusci e Masiani 1996, Salerno e De Felice 2009).

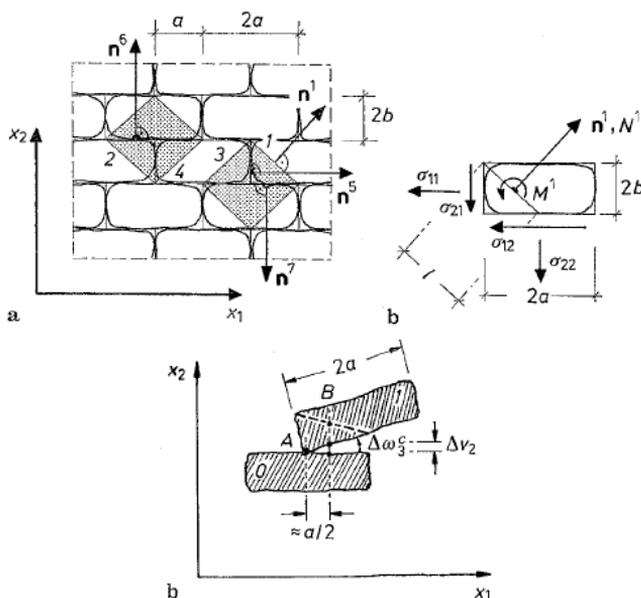


Figura 16 Teoria del Continuo di Cosserat, applicazione per soluzioni numeriche in strutture a blocchi, Aristotle University of Thessaloniki, 21st ALERT Graduate School – Mathematical modelling in Geomechanics, 2010.

L'approccio alla Cosserat (Figura 16), a causa soprattutto della sua complessità, non è mai stata applicato a casi di studio reali; si è infatti progressivamente diffuso l'utilizzo di un materiale omogeneo equivalente per la muratura le cui caratteristiche possono essere assegnate definendo un modulo base ricorrente e su di esso delle grandezze medie derivanti

---

in termini di orientazione dei suoi punti materiali. Per una disamina della teoria ed approfondimenti qui non trattati si rimanda a F. Pradel, K. Sab, 'Cosserat, Overall modelling of periodic discrete structures', a cura di J.Phys.Solids, 1999.

dall’applicazione di relazioni alle caratteristiche dei materiali componenti il paramento.

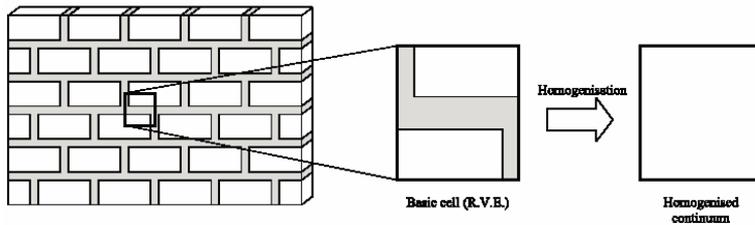


Figura 17 Esempio di definizione della cella elementare (Zucchini e Lourenço, 2002), l’elemento si compone di caratteristiche che tendono ad unire quelle dei due materiali da cui è derivato con l’inevitabile semplificazione della realtà.

La formalizzazione della tecnica dell’omogeneizzazione fonda le sue origini negli studi condotti da Bakhvalov e Panasenko nel 1989 e si possono individuare due metodologie principali per la definizione di un modello continuo, entrambe basate sull’individuazione di una cella base.

Il primo è basato sulla taratura del modello continuo mediante modellazioni di dettaglio o sperimentazioni dirette condotte esclusivamente sulla cella elementare. La definizione delle caratteristiche equivalenti del modello continuo avviene quindi su tali dati. Tale approccio è sicuramente il più accurato tra i due, ma non consente di ottenere le proprietà da attribuire all’equivalente continuo in una forma chiusa. In accordo con questo tipo di approccio esistono in letteratura diverse proposte fra le quali di sicuro interesse risulta essere quella introdotta da Anthoine che l’ha prima formalizzata (1995 e 1997) e successivamente applicata con Pegon (1997) anche se non va dimenticato che altri autori l’hanno fatta propria e successivamente riproposta con alcune variazioni (e.g. Urbanski, 1995).

Il secondo approccio consiste nella semplificazione della geometria della cella, allo scopo di individuare delle soluzioni per l’omogeneizzazione in forma chiusa. Tale approccio, sebbene approssimato, è di più immediata interpretazione, e, per tanto, più diffuso. Nell’ambito di tale metodo sono state negli anni avanzate numerose proposte, ognuna delle quali focalizza la sua attenzione su determinati parametri meccanico-fisico: Pande et al. (1989) e di Maier (1991) utilizzano funzioni di danneggiamento, Pietruszczak e Niu (1992), e dopo qualche anno quelle Lee et al. (1996) un modello fratturante,

Lourenço (1996) si avvale di un modello plastico, mentre Uva e Salerno (2006) di un modello con danno ed attrito.

In entrambe le tipologie illustrate l'approccio consta di due distinte fasi: nella prima una fila di mattoni viene omogeneizzata con i giunti di malta verticali tra loro interposti, mentre nella seconda fase le file di mattoni vengono omogeneizzate le une con le altre. Ovviamente tale procedura di semplificazione presenta il limite di non tenere conto dell'effettiva tessitura muraria in quanto gli elementi sono considerati allineati prima verticalmente e poi orizzontalmente mentre nella realtà costruttiva i corsi degli elementi sono sfalsati.

In tal senso sono, quindi, stati introdotti ulteriori modelli che tengono conto di una valutazione più dettagliata dell'interazione tra le diverse componenti della cella base; proposte in tale direzione sono dovute a Lopez et al. (1999), van der Plujim (1999), e Zucchini e Lourenço (2002 e 2009), aventi affrontato la questione in maniera indipendente.

Altri approcci che si basano sull'osservazione che il collasso della muratura avviene con il danneggiamento (a taglio, o a fessurazione) dei giunti di malta sono stati formulati da Luciano e Sacco (1997 e 1998), Gambarotta e Lagomarsino (1997a), De Buhan e De Felice (1997), Lourenço (2000), Sab (2003), Calderini e Lagomarsino (2006 e 2008), Sacco (2009).

Limitando gli studi al solo campo elastico ed avvalendosi dei principi variazionali (detto anche Principio di minima azione, o dell'azione stazionaria) per i movimenti di un sistema meccanico (Sir William Rowan Hamilton), a far dal 2004, autori come Carbone e Codegone, hanno introdotto altri approcci per la derivazione delle proprietà omogeneizzate.

Le tecniche di omogeneizzazione, prima applicate al caso piano, sono inoltre state estese al campo tridimensionale, includendo pertanto le azioni fuori piano. Ad esempio Cecchi, che aveva inizialmente formulato una proposta per il comportamento con Di Marco (2000), con Rizzi (2001) con Sab (2002a), ha successivamente esteso tale formulazione con Sab (2002b) studiando il comportamento tridimensionale nel dettaglio con Milani e Tralli (2005); un'altra proposta è infine dovuta a Chengqing e Hong (2006). Le tecniche di omogeneizzazione sono state inoltre estese al caso di murature

non regolari, nelle quali cioè non è possibile individuare una cella base modulare (Cluni e Gusella 2003, Stefanou et al. 2010).

#### *2.2.1.1.2 Modelli discontinui*

I modelli discontinui consistono invece nella modellazione separata dei mattoni dei giunti di malta e dell’interfaccia mattone-malta (e.g. Fouchal et al.,2009), adottando un’appropriata legge costitutiva per ciascuna di tali componenti; tale approccio permette un’elevata accuratezza nei risultati specialmente a livello locale a discapito di un elevato onere computazionale.

Si sono pertanto sviluppati altri approcci, leggermente più semplificati, secondo i quali le proprietà della malta e dell’interfaccia con i mattoni possono essere concentrati in un unico elemento; seppur con una riduzione dell’accuratezza della soluzione si ottengono notevoli riduzione degli oneri computazionali. I mattoni vengono in genere modellati mediante elementi rigidi o elastici, mentre gli elementi di interfaccia hanno il compito di simulare il distacco degli elementi contigui a seguito delle tensioni normali di trazione e lo scorrimento.

Di notevole importanza in questo caso appare la scelta della mesh e la conseguente disposizione degli elementi di interfaccia può seguire due possibili criteri di cui il primo legato al reale caso in esame ed il secondo alle necessità dello studio che si intende eseguire.

Il primo criterio, maggiormente rigoroso ed accurato, propone una mesh che riproduce fedelmente la tessitura muraria con gli elementi e i giunti di malta disposti secondo la reale distribuzione. Questo approccio è stato applicato frequentemente per una modellazione dettagliata di piccoli paramenti murarie a partire dal 1978 con Page e successivamente nel 1978 da Lofti arrivando fino al 1994 con gli studi di Shing. Altresì di particolare interesse sono gli studi di Lourenço e Rots (1997a), Formica et al. (2002), Pelissou e Lebon (2009), Rekik e Lebon (2010), oltre a Giambanco et al. (1997 e 2001) e Senthivel e Lourenço (2009) che propongono un modello di interfaccia tra i blocchi con spessore nullo: i blocchi vengono modellati ed alla superficie di contatto vengono attribuite le caratteristiche proprie dello strato di malta. Alcuni studi, inoltre, sono inerenti all’introduzione di

specifiche interfacce con particolare riferimento al loro comportamento ciclico (e.g. Oliveira e Lourenço, 2004).

Una tipologia strutturale che ben si presta all'impiego dei modelli discontinui è quella della muratura a blocchi con giunti a secco, per la quale modelli di interfacce coesive riescono a cogliere con efficacia il suo comportamento non lineare. Alcune applicazioni, come quelle proposte da Caddemi et al. (2010) e Rizzo et al. (2010) riguardano valutazioni della risposta non lineare di templi greci.

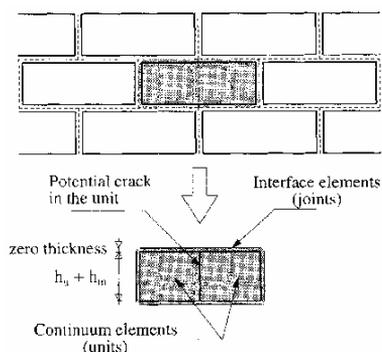


Figura 18 Modelli agli elementi finiti con elementi di interfaccia: esempio di modello che riproduce la reale tessitura (Lourenço e Rots, 1997).

Il secondo criterio considera invece una mesh che riproduce mediamente l'effettiva distribuzione dei giunti di malta che in alcuni casi può essere generata in modo casuale. Un esempio di questo tipo è stato proposto da Beer (1985) e implementato in un software di calcolo denominato CASTEM 2000, all'interno del quale sono state sviluppate da Pegon et al. (2001) delle procedure di generazione automatica della mesh.

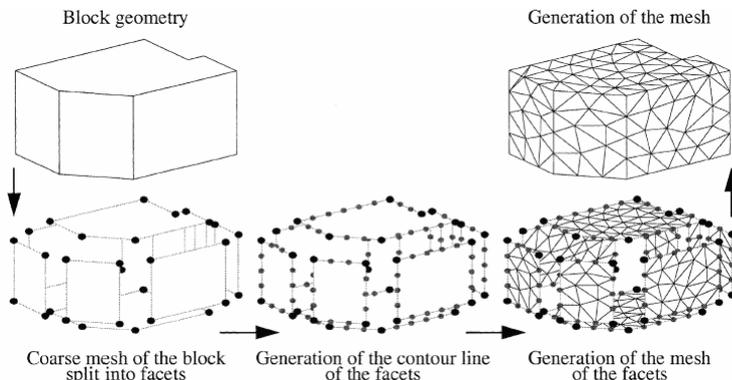


Figura 19 Modello con generazione random automatica della mesh (Pegon et al., 2001).

Tutti questi modelli vengono tuttavia applicati in un ambito estremamente ristretto, poiché l’altissimo dettaglio con cui vengono modellati gli elementi in muratura comporta un restringimento del campo di impiego; pertanto le applicazioni sono in genere rivolte alla simulazione di prove di laboratorio condotte su piccoli pannelli murari.

#### *2.2.1.2 Metodo agli elementi di contorno*

Il metodo agli elementi di contorno, o Boundary Element Method (BEM), inizialmente proposto con riferimento a problemi geotecnici e solo in un secondo momento esteso a quelli strutturali, consiste nella discretizzazione del contorno dell’elemento strutturale oggetto di studio.

L’estensione al campo non lineare di questo metodo ha consentito di studiare la propagazione della frattura e il comportamento di materiali fragili come il calcestruzzo. Tuttavia rimangono molto limitate le applicazioni al campo delle strutture murarie. In particolare, un approccio proposto da un team di ricercatori dell’Università di Palermo, dal quale è stato derivato KARNAK SBGM, un software ad uso commerciale (Cucco et al., 2002), mira all’interpretazione del quadro fessurativo di strutture murarie e studia il comportamento elastico di strutture in presenza di sconnessioni (Panzeca et al., 2008). Altre proposte, come quelle di Rashed et al. (1997) e Hatzigeorgiou e Beskos (2002), sono invece mirate a considerare il comportamento non lineare della muratura.

Esistono poi degli approcci ibridi, che combinano l’uso degli elementi di contorno con quello degli elementi finiti. Un esempio di questo approccio applicato alle strutture murarie è quello dovuto a Papia (2005). L’autore si occupa dello studio di infilled frames e propone di condurre analisi statiche, includendo sia le non linearità meccaniche che quelle geometriche, utilizzando il boundary element method (BEM) per la muratura e dividendo opportunamente il telaio in elementi finiti, considerando la mutua interazione dei due sottosistemi come tensioni distribuite al contorno per la muratura e forze nodali per il telaio. Questo approccio consente, inoltre, di considerare il distacco tra le due sottostrutture quando insorgono tensioni di trazione all’interfaccia.

### 2.2.1.3 Metodo agli elementi discreti/distinti

Uno dei metodi che all'oggi si è maggiormente imposto per la modellazione di strutture in muratura, vista l'aspetto di eterogeneità nei materiali che la compongono, è il metodo degli elementi distinti o degli elementi discreti; il doppio nome di uno stesso metodo è legato alla compresenza nella letteratura scientifica di entrambe le nomenclature per mancanza di accordo fra gli autori delle ricerche. In ambito internazionale per il medesimo approccio sono ricorrenti anche i nomi di "rigid block analysis" e "discontinuous deformation analysis".

In generale l'approccio risulta applicabile a tutti quei sistemi che possono essere considerati come un assemblaggio di elementi (o blocchi), in genere rigidi, che interagiscono tra loro.

Mentre dal punto di vista cinematico viene in genere assunta l'ipotesi di grandi spostamenti, sono state proposte molteplici soluzioni relativamente al comportamento meccanico dei singoli blocchi (o elementi distinti) e sulla tipologia di interazione fra gli stessi presente. Generalmente i blocchi contigui vengono fatti interagire con vincoli di contatto di tipo unilatero, non reagenti a trazione ed elastici (o elasto-plastici) a compressione, mentre lo scorrimento è generalmente di tipo attritivo. L'approccio classico a tale metodo non prevede nessun tipo di omogeneizzazione o alterazione della reale tessitura muraria che nel modello viene fedelmente riprodotta.

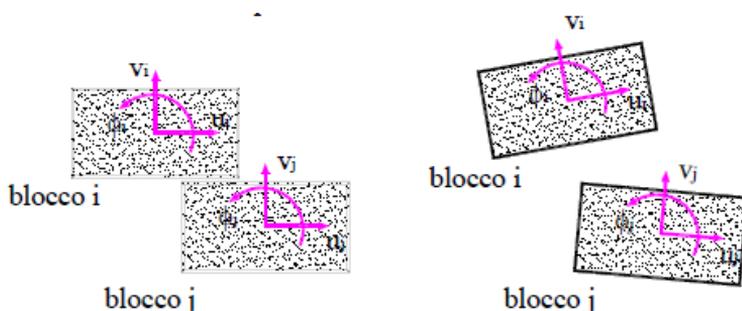


Figura 20 Rappresentazione di due blocchi contigui nella configurazione originale indeformata e in quella corrente, 3D macro, 2012.

Questo modello concettuale ha visto, per la prima volta nel 1971 ad opera di Cundall, tale metodologia come approccio numerico applicato inizialmente alla modellazione di geo-materiali quali rocce, sottosuoli, fronti.

Inizialmente il modello, con comportamento piano era costituito da elementi rigidi, ma nel corso degli anni è stato variamente modificato ed arricchito introducendo, grazie agli studi condotti da Cundall ed Hart e altri nel 1988, il comportamento tridimensionale. Non essendo associato nessun grado di libertà all'interfaccia di contatto, i gradi di libertà del modello coincidono con i gradi di libertà degli elementi che lo compongono; il numero complessivo di gradi di libertà del modello sarà quindi pari a  $3N$  nel caso di modelli piani e  $6N$  nel caso di modello tridimensionali, dove con  $N$  si indicano il numero totale di elementi che lo compongono.

Altresì dal punto di vista computazionale il considerare i blocchi come elementi rigidi si traduce in una notevole riduzione dei gradi di libertà del sistema con conseguente riduzione dei tempi di elaborazione. Tuttavia, tali modelli risultano spesso caratterizzati da un numero elevato di elementi (soprattutto per le modellazioni di dettaglio o di elementi di notevoli dimensioni) a discapito comunque dei tempi di elaborazione importanti.

Le applicazioni di questa tipologia comportamentale nel campo delle strutture murarie vanno ricercate nel lavoro svolto da Pagnoni (1994) e Pagnoni e Vanzi (1995) con la modellazione mediante elementi distinti di archi e pannelli murari mediante l'utilizzo di software CICE, implementato da Hocking et al. (1987). Quasi contemporaneamente, Jean (1995) e Acary e Jean (1998) sviluppano il metodo dei contatti dinamici per la simulazione dell'interazione tra gli elementi distinti, basato su un legame attritivo alla Coulomb e sull'integrazione delle equazioni dinamiche del sistema. Successivamente, Boffi e Casolo (1998), introducono un modello basato su elementi rigidi, a due a due connessi con tre contatti elementari (assiale, a momento e a taglio), il cui comportamento non lineare è considerato mediante l'introduzione di leggi isteretiche.

La metodologia ad elementi distinti appare quindi meglio adattarsi alla tipologia strutturale a blocchi squadrati specie se di notevole dimensione come archi, antichi templi, volte a conci, che facilmente posso essere individuati in edifici storico monumentale come quelli mostrati tipologicamente in figura.

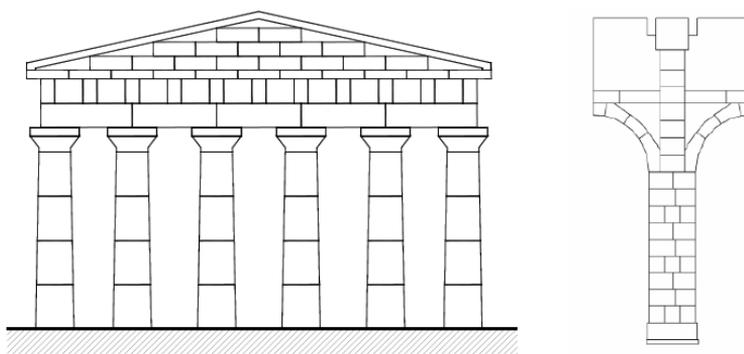


Figura 21 Esempi di strutture a blocchi: tempio greco e portale ad archi.

Tale predisposizione è dovuta alla circostanza singolare derivante dal fatto che in strutture del genere il numero di elementi risulta, comunque, relativamente contenuto, e l'estrema regolarità della tessitura muraria rende possibile una modellazione realistica della struttura. Viceversa nel caso di muratura ordinaria la tessitura muraria, ammesso che sia nota, può presentarsi di tipo irregolare o variabile da punto a punto della struttura rendendo sostanzialmente inapplicabile tale metodo nella sua formulazione più semplice. Esistono tuttavia delle applicazioni anche con riferimento a murature a tessitura irregolare: in questo caso gli elementi lapidei sono modellati come corpi rigidi mentre elementi di contatto deformabili dotati di coesione ed attrito simulano il comportamento dei giunti di malta.

Casolo ha introdotto ulteriori modelli per la simulazione del comportamento di strutture murarie che sfruttano corpi rigidi interagenti mediante molle che, per l'affinità col modello proposto in questo lavoro, verranno considerati in maniera più approfondita. Altre applicazioni sono invece state indirizzate verso la simulazione del comportamento del calcestruzzo (Mayorca e Meguro, 2003). Sulla base del metodo agli elementi distinti, sono stati proposti dei metodi ibridi, a metà col metodo agli elementi finiti. In particolare Munjiza (2004) definisce metodo agli elementi finiti-discreti una formulazione numerica per la simulazione del comportamento fratturante dei materiali.

Applicazioni di questa metodologia alle strutture murarie sono dovute allo stesso Munjiza (1995) e a Brookes e Mehrkar-Asl (1998), che considerano blocchi deformabili con mesh di elementi triangolari, che possono distaccarsi

e separarsi nel corso dell’analisi, sulla base di criteri derivati dalla meccanica della frattura. Altre proposte, che rientrano nel metodo agli elementi discreti finiti, considerano invece una formulazione classica agli elementi finiti per ciascuno dei blocchi (Barbosa 1996, Mamaghani e al. 1999).

Un altro approccio sviluppato sulla base del metodo degli elementi distinti è il DDA (Discontinuous Deformation Analysis), basato sull’assunzione di comportamento deformabile per tutti i blocchi, con comportamento rigido dei contatti. Proposto da Shi e Goodman (1988) con riferimento a problemi di meccanica delle rocce, è stato successivamente applicato alle strutture murarie da Ma et al. (1996) e Bicanic et al. (2001).

Un confronto tra la metodologia agli elementi discreti implementata nel codice UDEC, e quelle agli elementi finiti non lineari, sia mediante tecniche di omogeneizzazione (ABAQUS) che mediante micromodellazione (Visual CASTEM 2000), è stato effettuato da Giordano et al. (2002) mediante l’effettuazione di analisi statiche non lineari su un edificio storico, dimostrando la comparabilità dei risultati tra le metodologie proposte.

#### *2.2.1.3.1 La riduzione dei gradi di libertà (RBSM)*

Nell’ambito dell’applicazione degli elementi distinti alle murature, come già accennato nei paragrafi precedenti, di particolare interesse risultano essere gli studi di Siro Casolo che ha inizialmente sviluppato modelli di calcolo delle murature fuori dal piano e successivamente l’impiego di RBMS, ossia Rigid Body Spring Models, nello studio delle murature.

Finalizzato alla riduzione dei gradi di libertà in gioco nella modellazione degli edifici in muratura, sia in campo bidimensionale che tridimensionale, rispetto a quanto richiesto comunemente dal metodo normale agli elementi finiti, il modello semplificato per la simulazione del comportamento strutturale di pareti piane in muratura, che rientra nell’ambito dei Rigid Body Spring Models (RBSM), si basa su un semplice schema meccanico che, con opportune procedure di taratura, è in grado di cogliere il comportamento meccanico della muratura; si propone l’uso di elementi rigidi per la simulazione di pareti in muratura a tessitura regolare. Ciascun pannello murario è modellato mediante una mesh arbitraria di elementi rigidi piani di forma quadrata. Gli elementi sono connessi gli uni con

gli altri da due molle ortogonali e una molla a taglio su ciascun lato dell'elemento. Le caratteristiche meccaniche gli elementi di connessione sono definiti tenendo in conto anche gli effetti della tessitura muraria: in particolare, la rotazione locale dei blocchi è ottenuta assegnando rigidità diverse alle molle a taglio, secondo il loro orientamento, mentre la rigidità flessionale è ottenuta disponendo in posizione appropriata le due molle ortogonali.

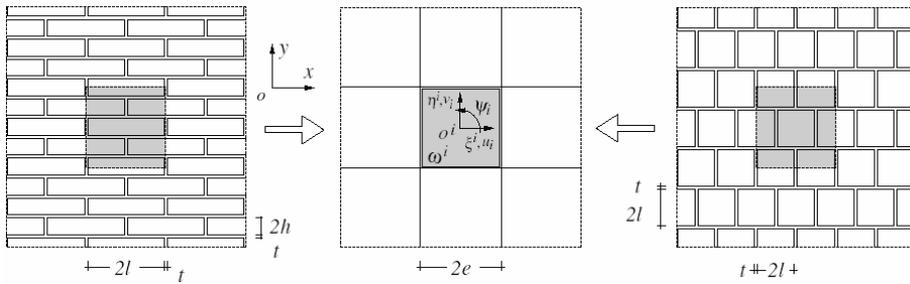


Figura 22 Schema del modello discreto proposto da Casolo, discretizzazione della muratura in una mesh regolare (Casolo, 2004).

Le molle flessionali orizzontali ( $k_x$ ) e verticali ( $k_y$ ) e le molle a scorrimento ( $k_s$ ) vengono tarate imponendo una equivalenza di tipo energetico tra il modello discreto e un modello di dettaglio agli elementi finiti della cella elementare, soggetti entrambi a regimi di carico assiale in direzione parallela e ortogonale ai giunti di malta, a taglio e flessionale.

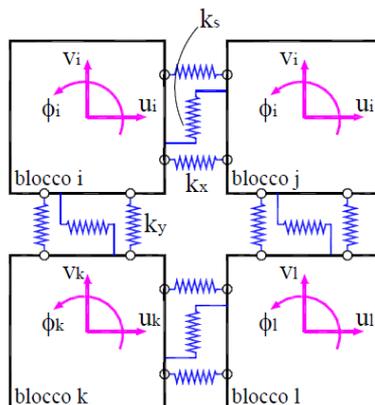


Figura 23 Schema del modello discreto proposto da Casolo, particolare del modulo base.

In particolare le rigidità delle molle flessionali vengono tarate con riferimento ai carichi di tipo assiale, le molle a scorrimento facendo

riferimento al carico tagliante, ed infine mediante i carichi di tipo flettente vengono determinati gli interassi secondo cui disporre le molle flessionali.

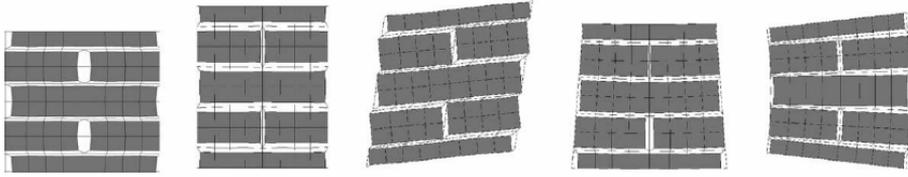


Figura 24 Stati di sollecitazione applicati alla cella elementare: compressione, trazione, taglio e stati di sollecitazione flessionali.

Il tipo e la geometria della tessitura muraria intervengono così nella determinazione dei parametri meccanici degli elementi discreti condizionando il comportamento della cella elementare. In questo modo il modello discreto conserva una memoria della tessitura originale.

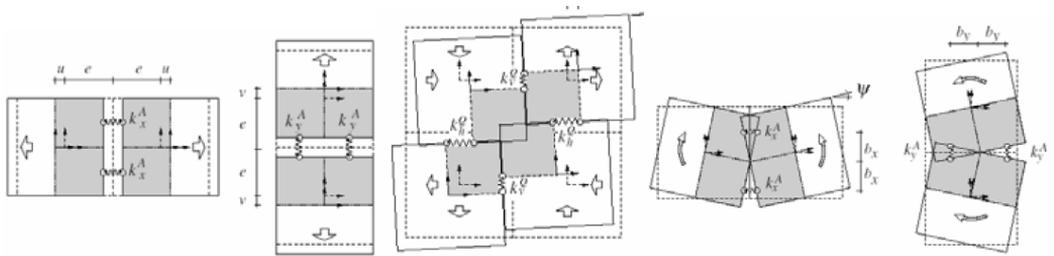


Figura 25 Stati di sollecitazione riprodotti dal modello discreto: compressione, trazione, taglio e stati di sollecitazione flessionali.

Tale modello differisce in modo sostanziale dai comuni modelli agli elementi distinti e assume alcuni aspetti salienti di un modello agli elementi finiti, ad esempio l'utilizzo di elementi quadrati in sostituzione della reale disposizione degli elementi. Tuttavia conserva la caratteristica saliente di un modello agli elementi distinti che fa uso di elementi discreti. Lo stesso Casolo (2006) ha inoltre condotto uno studio per valutare la corrispondenza tra il modello discreto che ha proposto e la classica teoria del continuo di Cosserat. Il modello, inizialmente studiato in campo statico lineare, è stato successivamente esteso da Casolo e Peña (2007) anche al caso dinamico con comportamento isteretico. Il modello proposto da Casolo, visto l'esiguo numero di gradi di libertà necessari per la definizione della cinematica dell'elemento (tre gradi di libertà nel piano), si adatta perfettamente all'impiego di analisi dinamiche, ed è suscettibile di estensioni poiché

consente di separare fenomenologicamente i diversi meccanismi possibili (comportamento assiale delle molle ortogonali e quello a taglio) ma anche di metterli facilmente in relazione attraverso, ad esempio, il criterio di Mohr-Coulomb.

La modellazione per elementi rigidi, è stata applicata dallo stesso Casolo e Sanjust (2009), per lo studio del comportamento sismico di un edificio monumentale (il Castello Maniace presso Siracusa). Nello studio viene utilizzato un approccio 'ibrido'. È stato infatti inizialmente implementato un modello tridimensionale lineare agli elementi finiti dell'intero complesso strutturale. Una volta compreso il comportamento d'insieme e individuate le zone più deboli, è stato predisposto un modello piano RBSM di una parete allo scopo di valutarne la resistenza sismica mediante analisi statiche e dinamiche non lineari. Pur non essendo stata effettuata una modellazione globale dell'edificio tenendo conto del comportamento non lineare dello stesso, il lavoro rappresenta un significativo passo verso la simulazione del comportamento sismico di edifici in muratura (in particolare il caso di studio è un edificio monumentale) mediante approcci semplificati.

#### *2.2.1.4 Le diverse strategie di modellazione.*

Un edificio in muratura può esibire un comportamento più o meno duttile in relazione ai meccanismi di danno che si attivano in occasione di un evento sismico. Gli edifici che esibiscono un comportamento scatolare manifestano un danneggiamento diffuso garantendo comunque un comportamento duttile che, in molti casi, rende l'edificio in grado di fronteggiare eventi sismici di entità anche rilevante.

Tale concetto è noto da tempo e ampiamente richiamato nelle normative nazionali che orientano il progetto di nuovi edifici in modo da ottenere strutture dal comportamento scatolare dotate di una significativa duttilità globale attraverso prescrizioni atte a definire una buona connessione fra le pareti nelle intersezioni, buona connessione delle pareti con gli orizzontamenti, strutture orizzontali e copertura non spingenti, specchiature delle pareti di dimensioni limitate (solai e pareti di controvento non troppo distanziati fra loro).

Una funzionamento così definito permette la realizzazione di una modellazione per le azioni sismiche globale, con modello tridimensionale, in quanto il sistema in tutte le sue parti collabora all'assorbimento dell'azione: i solai, ben collegati e rigidi nel proprio piano, distribuiscono le azioni fra le pareti, secondo la loro rigidità e posizione in pianta.

Tali regole tecniche e dell'arte non sempre trovano riscontro negli edifici esistenti nei quali è assai consueto riscontrare connessioni fra le pareti ortogonali non sempre è efficaci e talvolta del tutto assente, solai in legno ed i solai realizzati con profilati metallici e voltine o tavole che non presentano un'apprezzabile rigidità nel loro piano e non sono in grado di offrire un efficace collegamento fra le pareti contrapposte.

Dalle prime due considerazioni, consegue che l'edificio non è in grado di manifestare un chiaro comportamento globale ma piuttosto tende a reagire al sisma come un insieme di sottosistemi tra loro indipendenti; in generale il crollo della struttura muraria avviene per perdita dell'equilibrio di tali sottosistemi, cioè per l'attivazione di meccanismi locali.

Ne consegue che in tali casi una verifica globale deve lasciare il posto ad una serie di verifiche su un numero significativo di sottosistemi locali che verranno individuati sulla base dell'esperienza di terremoti passati e dall'attenta osservazione della costruzione, della sua storia costruttiva, del suo quadro fessurativo.

Per ogni possibile meccanismo locale ritenuto significativo per l'edificio, si prevede la trasformazione di una parte della costruzione in un sistema labile attraverso l'individuazione di corpi rigidi, definiti individuando possibili piani di frattura; in tale modello, quindi, le strutture murarie sono considerate come costituite da corpi rigidi: i macroelementi coinvolti nei cinematismi che sono in grado di ruotare o scorrere tra loro. È fatto ovvio che le verifiche sugli edifici in muratura eseguite con l'analisi limite dell'equilibrio hanno significato solo se è garantita una adeguata monoliticità delle pareti murarie, tale da impedire il collasso locale per disgregazione della muratura.

### 2.2.2 I parametri meccanici e l'incertezza della determinazione

La muratura costituisce il primo materiale composito impiegato nelle costruzioni e quindi appare di fondamentale importanza una definizione delle caratteristiche globali con particolare attenzione a come queste sono influenzate dalle caratteristiche del singolo componente. Gli aspetti che caratterizzano maggiormente il suo comportamento meccanico possono essere così riassumibili:

- disomogeneità;
- anisotropia;
- asimmetria di comportamento;
- non linearità del legame sforzo - deformazioni.

La muratura è un materiale composito i cui elementi costituenti hanno caratteristiche molto differenti tra loro: la sua disomogeneità dipende fortemente da questa ragione è legata al fatto: risulta essere molto difficoltoso ricavare le proprietà della muratura a livello macroscopico partendo dalla conoscenza delle proprietà dei singoli materiali.

L'anisotropia riguarda invece la differenza di comportamento del materiale nelle varie direzioni considerate: questo fenomeno è legato alla disposizione dei vari elementi e dalla loro proporzione. La muratura presenta elementi disposti in corsi orizzontali collegati tra loro con giunti continui di malta, mentre in direzione verticale i giunti tra le teste dei laterizi risultano essere discontinui, per cui risulta evidente che il comportamento nelle due direzioni sia profondamente differente.

Con asimmetria si intende la notevole differenza di comportamento, sia dei laterizi che della malta, nei confronti di sollecitazioni di compressione o di trazione: la resistenza a trazione risulta per entrambi decisamente inferiore a quella a compressione. Un ruolo importante in questo senso viene giocato dall'interfaccia malta-laterizio, la quale possiede una resistenza a trazione addirittura minore e più aleatoria di quella dei singoli elementi. Sulla base di queste osservazioni la muratura viene frequentemente modellata come materiale non reagente a trazione (modelli no tension).

La non linearità nel comportamento della muratura deriva dalle caratteristiche fin qui elencate: per qualsiasi stato e livello di sollecitazione, anisotropia e disomogeneità assieme alla bassissima resistenza a trazione del materiale, determinano una fessurazione diffusa con conseguente allontanamento dalla linearità di comportamento ben prima di arrivare al massimo sforzo sopportabile.

#### *2.2.2.1 Il paramento murario*

La muratura è un materiale che, per effetto della presenza dei giunti di malta, che agiscono come piani di debolezza, presenta un comportamento fortemente anisotropo. La muratura è “intrinsecamente discreta”, strutturalmente discontinua e tale discontinuità rende la modellazione di questo materiale tanto complessa. Pertanto il livello di accuratezza che si intende perseguire governa la scala di analisi.

L’analisi accurata dipende quindi dalla modellazione dei due “elementi” fondamentali costitutivi, ossia le “unità” (blocchi, mattoni) e la malta. In questo senso, in funzione del grado di approfondimento dell’analisi, di distinguono classicamente tre diverse strategie di modellazione accurata:

- Micro-modellazione dettagliata
- Micro-modellazione semplificata
- Macro-modellazione

Nell’ambito della micro-modellazione dettagliata, vengono definiti tre elementi meccanicamente responsabili del comportamento del materiale: l’unità, i giunti di malta e le superfici di interfaccia. In questo approccio sia le unità che i giunti sono modellati come continui (dotati quindi di tutti i propri parametri meccanici) mentre le superfici di interfaccia sono le discontinuità in cui sono concentrate le potenziali linee di scorrimento/frattura.

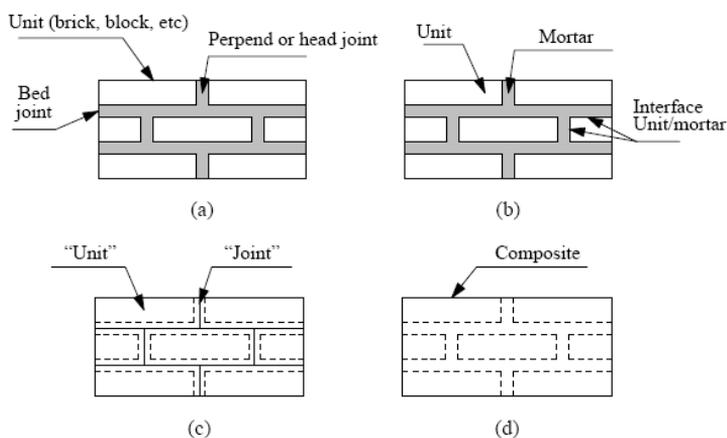


Figura 26 - Scale di modellazione di strutture in muratura: (a) campione di muratura; (b) micro-modellazione dettagliata; (c) micro - modellazione semplificata; (d) macro-modellazione.

Nella micro-modellazione semplificata, a cui spesso ci si riferisce come “modellazione ad interfacce”, si prendono in considerazione soltanto le unità opportunamente connesse da superfici di interfaccia. In questo modo, pur continuando a concentrare nelle superfici di interfaccia le potenziali linee di frattura/scorrimento, i giunti vengono difatti ridotti ad uno spessore nullo, e le unità vengono congruentemente espanse per conservare la geometria oggetto di analisi. Sulla modellazione ad interfacce si tornerà diffusamente nella [Parte II – Strategie e proposte operative](#), dove verranno illustrate delle applicazioni condotte con il codice UDEC (Universal Distinct Element Code, Itasca Consulting Group, Inc). Nel modello ad interfacce si verifica ovviamente una perdita di dettaglio rispetto alla micro-modellazione dettagliata, ed in particolare vengono trascurato gli effetti di contrazione trasversale alla Poisson all’interno della malta.

Con l’approccio omogeneo, o macro-modellazione, si rinuncia completamente alla distinzione tra unità, giunti e superfici a vantaggio di un unico materiale anisotropo “equivalente”; chiaramente la calibrazione del materiale così ottenuto dipenderà comunque dai singoli costituenti, ma il risultato finale meglio si presterà ad analisi di natura ingegneristica.

Va da sé che i tre approcci qui presentati vanno scelti alla luce del problema da risolvere. L’avvento dei calcolatori elettronici e la crescente capacità di calcolo e di storage dei dati ha permesso l’uso di modelli estremamente raffinati, capaci di prevedere con grande accuratezza il

comportamento di strutture in muratura. Ovviamente l’adozione di modelli più semplificati potrebbe preferirsi qualora si fosse alla ricerca di un compromesso tra accuratezza e costi della modellazione (e qualora l’ambito di applicazione – pareti “sufficientemente” grandi – permetta di prescindere dalla effettiva localizzazione degli sforzi ma piuttosto di guardare al comportamento su grande scala).

### 2.2.2.2 L’interfaccia malta-mattone

I modelli accurati richiedono una dettagliata comprensione del comportamento sperimentale del materiale e dei suoi costituenti. A questo riguardo, l’aspetto fenomenologicamente più rilevante che governa la risposta meccanica di pareti in muratura è rappresentato dal comportamento delle interfacce malta-mattone, di cui in questa sezione vengono forniti brevissimi cenni, strettamente propedeutici alla discussione di quanto nel seguito presentato, distinguendo il comportamento dei bed joints (giunti orizzontali) dagli head joints (giunti verticali).

#### 2.2.2.2.1 Comportamento dei bed joints

Due diverse fenomeni caratterizzano il comportamento dei giunti orizzontali (bed joints): uno associato alla rottura per trazione (modo I) ed uno associato alla rottura per taglio (modo II). Di tali modalità di rottura si discuterà brevemente, poiché esse rappresentano i fondamenti di qualsivoglia modellazione.

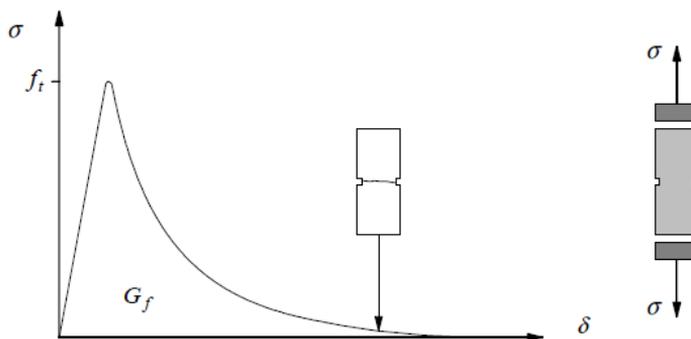


Figura 27 - Prova di trazione uni assiale e definizione di  $G_f$  (energia di frattura associata al modo I).

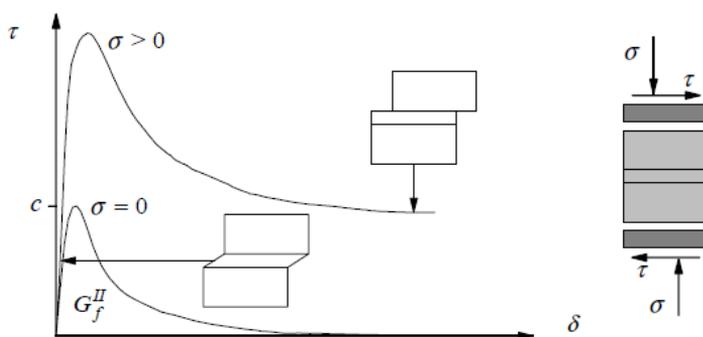


Figura 28 - Prova di taglio su doppietta e definizione di  $G_f^{II}$  (energia di frattura associata al modo II).

In Figura 27 è riportato l'andamento qualitativo dei legami tensione-ampiezza delle fessure per prove di trazione uniassiale; in Figura 28 una medesima rappresentazione è riportata per prove di taglio diretto su accoppiamenti malta-mattone. Dall'analisi dei diagrammi è possibile osservare, qualitativamente, non soltanto la non-linearità dei legami, ma la spiccata presenza di un ramo di softening (indebolimento) dovuto al comportamento microscopico del provino nel corso della prova. Con riferimento ad esempio alla prova a trazione, il ramo iniziale è relativo alla formazione di micro-cricche all'interno dei materiali che, essendo inizialmente stabili, si espandono solo per effetto di un carico crescente. All'aumentare del carico (e quindi al numero e all'apertura delle microcricche), intorno al valore di picco delle tensioni, fanno la loro comparsa macrocricche instabili che determinano una progressiva diminuzione del carico sopportabile dal provino.

I grafici illustrano inoltre due parametri fondamentali che intervengono nell'ambito delle modellazioni accurate, ossia l'energia di frattura associata al modo I e al modo II. Tali energie di fratture sono valutate come l'integrale delle curve  $\sigma - \delta$  e rappresentano pertanto veri e propri parametri meccanici distintivi del materiale. Le energie di frattura infatti regolano il ramo di softening e pertanto sono fondamentali nel definire l'evoluzione del comportamento post-picco delle strutture in muratura.

Alcuni autori hanno condotto estese campagne sperimentali finalizzate alla valutazione del comportamento delle interfacce

malta-mattone, dimostrando come, per il modo I di frattura, il ramo di softening possa essere ben approssimato da una curva ad andamento esponenziale, dipendente, tra gli altri parametri, proprio dall’energia di frattura.

Una delle più estese campagne sperimentali condotte allo scopo di descrivere il comportamento delle interfacce a trazione e a taglio è quella di Van der Pluijm (1992). Tra gli altri numerosi interessanti risultati a cui l’autore è giunto nella sua ricerca, vi è senz’altro da segnalare l’osservazione fatta sui provini soggetti a trazione al termine dei test. Si evidenziava infatti che l’area di effettivo contatto (net bond surface) era sensibilmente minore rispetto alla sezione trasversale lorda del provino. Tale riduzione dell’area di contatto, che sembra concentrarsi nella parte interna della superficie di contatto, è probabilmente originata da una parte dai fenomeni di ritiro della malta, dall’altra dalla modalità esecutiva delle murature stesse, ossia la sovrapposizione stessa di mattoni su letti di malta. Le stime dell’area netta rappresentano in verità un aspetto piuttosto significativo, poiché consente di valutare con maggior precisione sia la resistenza a trazione dell’interfaccia, che l’energia di frattura del modo I.

L’autore ha riscontrato per i provini un’area netta pari mediamente a circa il 35% dell’area lorda, estrapolando quindi, per una parete rettangolare, un valore dell’area pari al 59% dell’area lorda.

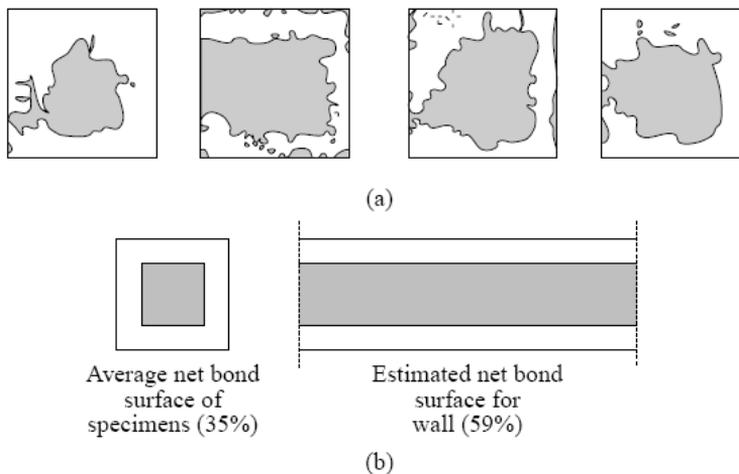
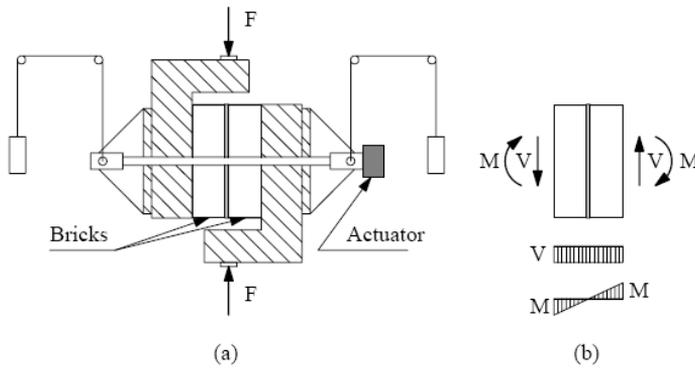


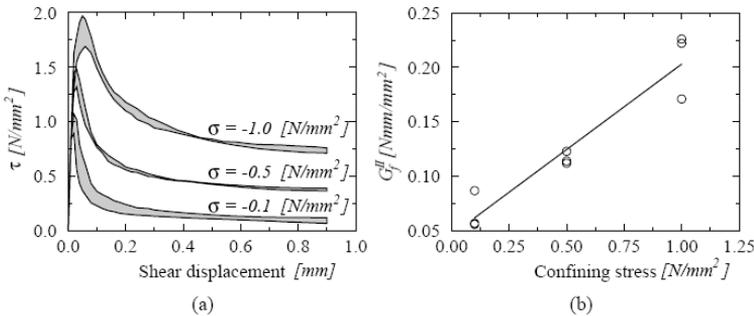
Figura 29 - (a) Tipiche “net bond surface” di provini sottoposti a trazione al termine della prova; (b) estrapolazione dell’area netta per provini e sezioni rettangolari.



Test set-up to obtain shear bond behavior, Van der Pluijm (1993):  
 (a) test specimen ready for testing; (b) forces applied to the test specimen during testing.

Figura 30 - (a) Setup sperimentali delle prove a taglio; (b) sollecitazioni applicate sul provino.

Con riferimento alle prove di taglio, i risultati di Van der Pluijm sono particolarmente apprezzati poiché il setup sperimentale della sue prove è concepito in maniera tale da generare uno stato di tensioni praticamente uniforme all'interno del provino (Figura 31).



Typical shear bond behavior of the joints for solid clay units, Van der Pluijm (1993): (a) stress-displacement diagram for different normal stress levels (the shaded area represents the envelope of three tests); (b) mode II fracture energy  $G_f^{II}$  as a function of the normal stress level.

Figura 31 Legame forza-spostamento per le prove di taglio; (b) correlazione tra energia di frattura di modo II e sforzo normale di confinamento.

Altresì con riferimento alle prove di taglio, i risultati di Van der Pluijm hanno evidenziato il tipico comportamento attritivo esprimibile attraverso un legame alla Mohr-Coulomb, ma hanno fornito anche una stima dell'energia di frattura di modo II in funzione della pressione di confinamento agente sui giunti. Alla luce di quanto precedentemente illustrato, questo risultato è

particolarmente apprezzato considerando che molto raramente nell’ambito della modellazione si dispone dei valori numerici dell’energia di frattura. Le prove di Van der Pluijm rappresentano infine un fondamentale supporto anche nella stima dell’angolo di dilatanza  $\psi$ , ossia la misura dell’uplift (spostamento normale di “sollevamento”) di una unità rispetto alla sottostante nell’ambito di un test a taglio. I valori di dilatanza ottenuti sono stati tutt’altro che trascurabili, con una prevedibile tendenza ad una dilatanza inversamente proporzionale rispetto alla pressione di confinamento (Figura 32, Figura 33).

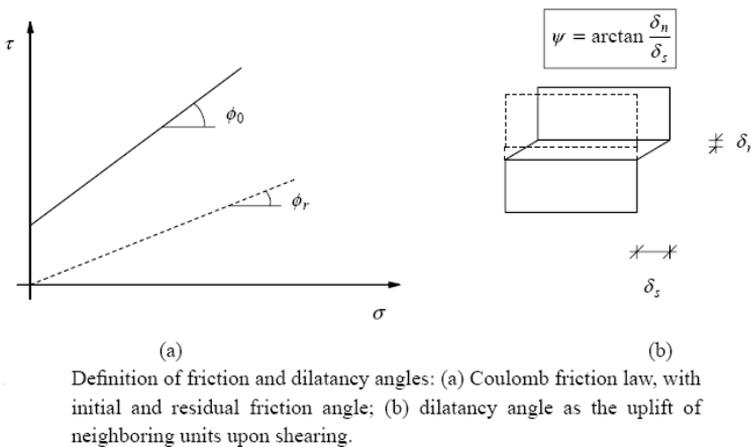
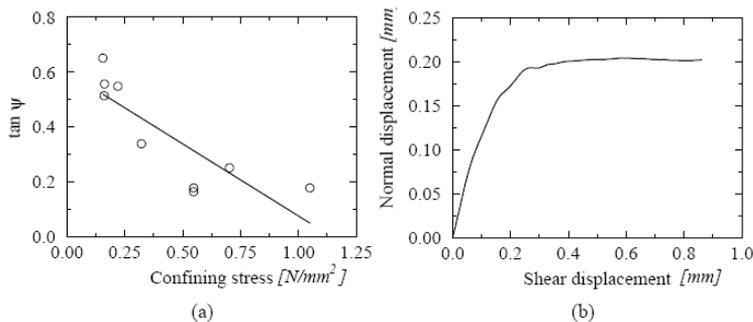


Figura 32 (a) Legge di Mohr-Coulomb; (b) descrizione del fenomeno della dilatanza.



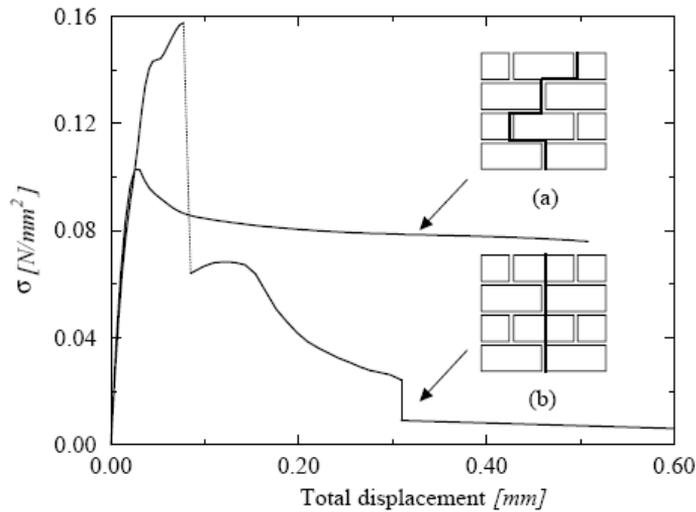
Typical shear bond behavior of the joints for solid clay units, Van der Pluijm (1993): (a) tangent of the dilatancy angle  $\psi$  as a function of the normal stress level; (b) relation between the normal and the shear displacement upon loading.

Figura 33 (a) Correlazione tra dilatanza e tensione di confinamento; (b) Misura dell’uplift per una prova sperimentale.

#### 2.2.2.2 *Comportamento degli head joints*

Se si sottopone un campione di muratura ad una trazione ortogonale ai giunti verticali, il collasso sarà tipicamente causato per effetto del superamento della debole resistenza a trazione del giunto verticale malta-mattone. In questo caso quindi, la resistenza complessiva della muratura coincide, in buona sostanza, con la resistenza a trazione del giunto stesso. Nel caso di unità particolarmente deboli (ad esempio perché forate) accoppiate con malte ad alta resistenza può invece avere luogo un collasso localizzato nell'unità stessa, ed in tal caso la resistenza a trazione della muratura coincide, in maniera grossolana, con la resistenza a trazione dell'unità.

È interessante sottolineare che in letteratura sono state realizzate prove sperimentali specificamente tese alla analisi di questo problema, tra cui si ricorda in particolare il lavoro di Backes (1985). La configurazione sperimentale adottata per l'esecuzione della prova prevedeva, come illustrato in Figura 34, un provino realizzato da quattro filari, inizialmente accostati secondo l'usuale prassi costruttiva e successivamente ruotato di 90° poco prima dell'esecuzione del test per mezzo di uno speciale dispositivo (Figura 34).



Typical experimental stress-displacement diagrams for tension in the direction parallel to the bed joints, Backes (1985): (a) failure occurs with a stepped crack through head and bed joints; (b) failure occurs vertically through head joints and units.

Figura 34 Diagrammi tensione-deformazione per prove di trazione ortogonale ai giunti di testa.

### 2.2.3 Le peculiarità nella modellazione di edifici esistenti

Da quanto sinteticamente espresso nei paragrafi precedenti emerge come l'analisi di strutture esistenti in muratura non può prescindere da un accurato esame del corpo di fabbrica. Tale esame deve essere mirato ad accertare le tecniche costruttive, i materiali utilizzati, nonché lo stato di degrado della struttura e l'eventuale presenza di danneggiamenti locali (dissesti, lesioni, distacchi delle pareti nei cantonali, etc.). Questo passo preliminare è fondamentale per comprendere il comportamento qualitativo della struttura e per individuare i parametri di resistenza e di deformabilità che dovranno poi essere impiegati nelle analisi numeriche e soprattutto per la scelta, tutt'altro che banale, della tipologia di modellazione da adottare.

Tale scelta non può pertanto prescindere da un'attenta analisi dell'esistente e dei dettagli costruttivi ed il grado di dettaglio della modellazione deve essere il giusto compromesso tra costi e benefici ovvero tra oneri computazionali e risultati che ci si propone di ottenere; il peso che può essere attribuito a ognuno dei contrapposti interessi è certamente

diverso se le analisi da condurre sono relative a scopi di ricerca o all'ambito professionale. Nel secondo caso viene quasi sempre adoperato un approccio semplice che, pur non cogliendo appieno il comportamento non lineare di dettaglio della struttura, presenta il notevole vantaggio di essere compatibile con le conoscenze della maggioranza dei professionisti del settore e di fornire in tempi brevi risultati facilmente interpretabili purché conservino un'adeguata attendibilità.

La caratterizzazione dei particolari costituenti una determinata struttura si inquadra quindi come un'analisi critica della stessa supportata dalle informazioni acquisite durante le fase di rilievo ed integrate con le conoscenze tecniche personali e con le ricerche archivistiche che, come già precedentemente espresso, devono integrarsi al fine di sopperire con l'una le mancanze dell'altre e viceversa. Le strutture in muratura, o in generale le strutture composte da blocchi sovrapposti, presentando quelle caratteristiche particolari, già precedentemente illustrate, che richiedono particolare attenzione nella gestione e nella caratterizzazione delle proprietà meccaniche essendo le stesse fortemente disomogenee richiedendo quindi

Se tale aspetto si rivela importante già nella progettazione e modellazione dell'edificio nuovo, in cui comunque le caratteristiche dei materiali vengono decise a priori dal progettista e poi realizzate e verificate in opera (al fine di rispettare le richieste prestazionali previste per le strutture), riveste un aspetto altrettanto importante nelle strutture esistenti, indipendentemente dalla loro importanza storico-culturale, in cui le caratteristiche dei materiali non sono diffusamente ed approfonditamente conosciute<sup>51</sup>. In via teorica infatti una coerente modellazione dovrebbe considerare la reale disposizione dei blocchi nello spazio ed una definita caratterizzazione delle loro proprietà fisico meccaniche, una definizione delle caratteristiche delle interfacce di contatto fra gli stessi soprattutto in relazione specie in considerazione degli spostamenti fra i blocchi ed alla conseguente possibilità di riposizionarsi in nuove giaciture.

---

<sup>51</sup> La ricostruzione delle caratteristiche degli apparati murari esistenti si basa spesso sul loro confronto tipologico con abachi provenienti da manuali tecnici storici e molto limitatamente, spesso per l'impossibilità oggettiva di procedere a diffuse ed estese campagne di sondaggio, da prove in sito.

Calando quanto esposto nell'ambito di presente ricerca, con riguardo specifico alle strutture a geometria curva (archi e volte in particolare), analizzati nei dettagli nella Parte III – Casi studio, si dovrà porre, in primo luogo, particolare attenzione su di una corretta individuazione della forma e geometria dell'elemento oggetto di indagine. Tale aspetto appare particolarmente importante al fine di non confondere quanto l'occhio osserva all'oggi con l'originale idea che ha portato alla realizzazione dell'opera: il rilievo di un profilo ad arco ribassato, in modo esemplificativo, non può essere semplicemente visto come la semplice idea dell'antico architetto ma va indagato che non sia il risultato di azioni sull'originale conformazione a tutto sesto.

#### **2.2.4 Quale modello geometrico per il modello numerico?**

La scelta del modello geometrico da inserire all'interno di un programma di calcolo numerico, sia questo di natura bidimensionale che tridimensionale, risulta una scelta non certamente da sottovalutare nel processo di analisi di un elemento; non meno della scelta delle condizioni al contorno del modello di calcolo o altresì delle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali di cui si compone.

Le tipologie di analisi, che si intende eseguire su una determinata struttura, deve suggerire al professionista come al ricercatore le indicazioni fondamentali per approcciare ad una corretta gestione e interpretazione del modello geometrico. Appare evidente infatti che, soprattutto quanto la trattazione è relativa ad edifici storici, che presentano una morfologia geometrica spesso complessa, vuoi per la presenza di decorazioni piuttosto che di deformazioni delle strutture, occorre ben distinguere quali sono gli elementi di un tipo piuttosto che dell'altro. Definire una strada univoca appare poco plausibile perché molteplici sono le differenti problematiche e possibili sfaccettature che si incontrano analizzando diversi edifici.

Trattandosi, nello specifico del campo indagato, di analisi finalizzate alla valutazione di aspetti di natura prettamente strutturali occorre porre l'attenzione su alcuni aspetti:

- l'inserimento delle pure geometrie provenienti dal rilievo architettonico deve essere valutata criticamente in quanto si

introducono dettagli e particolari geometrici che, se da una parte possono rendere visivamente più verosimile il modello virtuale alla realtà, andranno ad introdurre elementi che strutturalmente non solo non hanno valore significativo ma, andando ad aumentare la complessità delle geometrie, comportano oneri computazionali (sia in termini di meshatura che in termini di elaborazione) maggiormente elevati con altresì il rischio di distogliere l'attenzione su aspetti decisamente più di interesse;

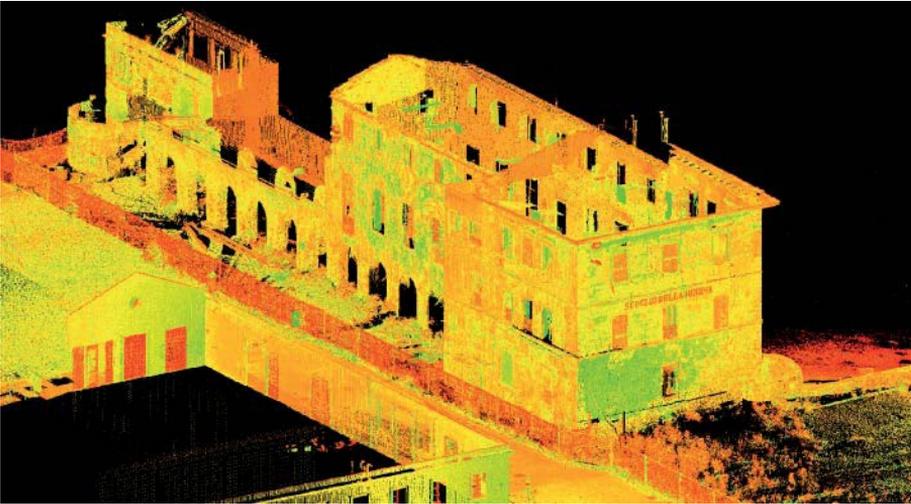
- la complessità e l'accuratezza con la quale il modello riproduce la realtà deve essere valutata in funzione sia delle analisi che si intendono condurre che altresì delle informazioni che si hanno a disposizione (che spesso per gli edifici esistenti sono incomplete, non uniformemente diffuse, desunte spesso per analogie costruttive o dalla letteratura di settore);
- la tipologia di "elemento" che si intende utilizzare per l'analisi dovrà essere opportunamente calibrata con la tipologia dello stesso, analisi di dettaglio piuttosto che analisi globali prediligono l'utilizzo di elementi con caratteristiche di analisi differenti proprio per meglio riprodurre i comportamenti di queste strutture.

Ponendo, anche solo per un attimo, l'attenzione sul solo aspetto geometrico del modello, chiarito il fatto che sono necessarie quelle opportune semplificazioni della geometri<sup>52</sup> atte all'eliminazione degli elementi valutabili come accessori per un fine di modellazione, occorre criticamente valutare quale geometria risulta maggiormente opportuno inserire. Sia in letteratura tecnico-scientifica che nella pratica professionale si riscontrano, su tale aspetto, una pluralità di procedure, soluzioni e abitudini consolidate che, criticamente analizzate, possono presentare diverse insidie le quali, non opportunamente valutate e conseguentemente gestite, possono produrre risultati non propriamente coerenti.

---

<sup>52</sup> Giuseppe Chellini, Luca Nardini, Barbara Pucci, Walter Salvatore, Riccardo Tognaccini, Evaluation of seismic vulnerability of Santa Maria del mar in Barcelona by an integrated approach based on terrestrial laser scanner and finite element modeling, International journal of architectural heritage, Londra, Taylor & Francis Group, 2014, vol.8 (6), pp 795 – 819.

Di indubbia attualità sono sicuramente le metodologie di elaborazione di dati tridimensionali per la generazione automatica di modelli per il calcolo strutturale; si tratta generalmente di processi automatici o semi-automatici in cui nuvole di punti tridimensionali provenienti da rilievi a scansione o tecniche di rilievo close-range vengono processate<sup>53</sup> per ottenere un modello a poligoni atto a definire volumetricamente tutti gli elementi in modo che gli stessi siano infine discretizzabili in un numero finito di elementi.



*Figura 35 Stabilimento balneare "Scoglio della Regina", Livorno, nuvola di punti proveniente da rilievo a scansione, G. Caroti, A. Franconi, A. Piemonte, Metodologie di elaborazione di dati laser scanner per la generazione di modelli utili al calcolo strutturale, Atti 16° conferenza nazionale ASITA, Fiere di Vicenza 6-9 novembre 2012, p.382.*

---

<sup>53</sup> Si definisce come un'operazione di "retopology" il passaggio da modello a nuvola di punti a modello a superficie poligonale, le informazioni quantitative e qualitative presenti nel modello puntiforme sono tradotte e adattate per ottenere una rappresentazione triangolare o quadrangolare necessaria al fine di esplicitare la superficie.

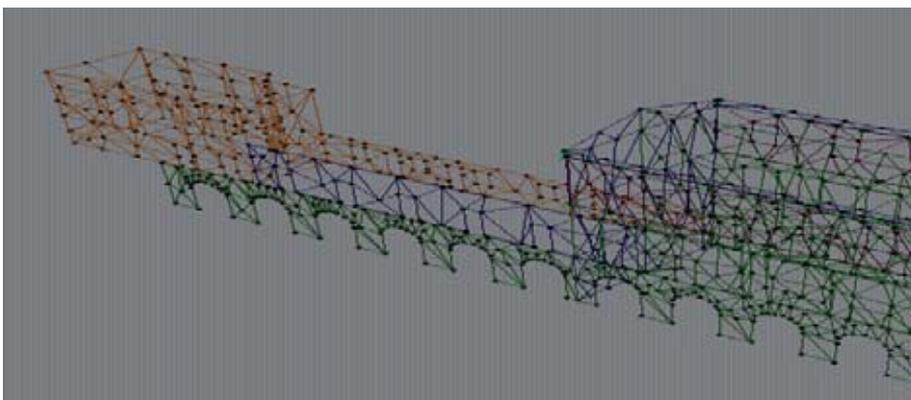


Figura 36 Stabilimento balneare "Scoglio della Regina", Livorno, modello per calcolo strutturale ad elementi shell, G. Caroti, A. Franconi, A. Piemonte, *Metodologie di elaborazione di dati laser scanner per la generazione di modelli utili al calcolo strutturale*, Atti 16° conferenza nazionale ASITA, Fiere di Vicenza 6-9 novembre 2012, p.382.

Se tale processo da un punto di vista architettonico e di accuratezza nulla ha da eccepire, occorre sicuramente porsi alcuni interrogativi su quale geometria viene inserita nel modello di calcolo. Trattasi evidentemente di geometrie che, rappresentando lo stato odierno, ricostruiscono una forma, in certi casi deformata e frutto di azioni che si sono succedute nel tempo, come lo stato iniziale da cui partire per le analisi e le verifiche; aspetto questo che deve far riflettere perché, analizzando proprio quanto riportato in Figura 35, con riferimento alle strutte ad arco identificabili al piano terreno dell'edificio, il processo così come strutturato non si interroga, esemplificativamente, sull'eventuale deformazione della chiave ricostruendo nel caso quindi una geometria ad arco "ribassato" ove invece questa è il frutto di un nuovo equilibrio raggiunto dal dissesto di un arco a tutto sesto.

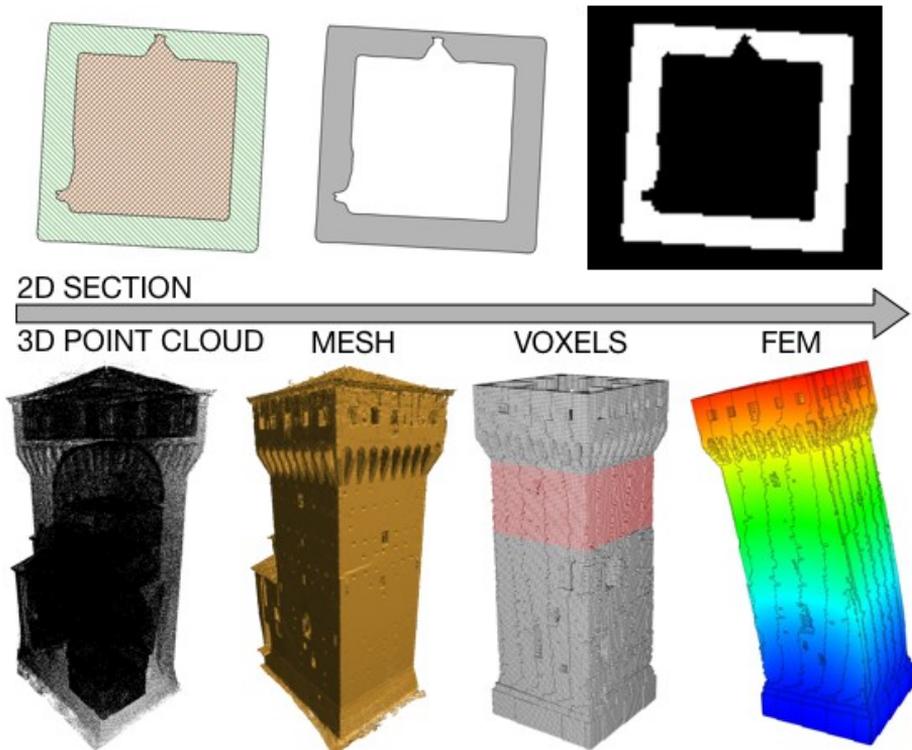
Di altrettanto interesse, al fine di ottenere una visione sufficientemente approfondita dell'ambito, sono le procedure semiautomatiche che trasformano punti tridimensionali, sempre originati da analisi a scansione, in modelli finiti tridimensionali<sup>54</sup>; l'approssimazione avviene attraverso la creazione di sezioni successive il cui passo varia in

---

<sup>54</sup> Giovanni Castellazzi, Antonio Maria D'Altri, Gabriele Bitelli, Ilenia Selvaggi, Alessandro Lambertini, *From laser scanning to finite element analysis of complex buildings by using a semi-automatic procedure*, in *Sensor* 2015, 15(8), Vittorio M.N. Passero, 2015

funzione dell’accuratezza richiesta dal caso specifico che vengono successivamente approssimate mediante solidi a sei facce a due a due parallele (parallelepipedo).

Anche in questo caso si rileva che la procedura garantisce sicuramente una qualità elevata della corrispondenza geometrica fra il modello creato e lo stato di fatto rilevato; altresì, come già valutato precedentemente, sussiste la problematica della corretta interpretazione geometrica delle forme.



*Figura 37 Esplicitazione del processo che, partendo dal rilievo a punti definito dalla procedura di rilievo a scansione, passando per una fase intermedia di meshatura, ottiene un modello ad elementi finiti aventi forma di parallelepipedo (realizzato mediante l'applicazione del programma CLOUD2FEM) per la successiva analisi strutturale, G. Castellazzi, A. Maria D’Altri, G. Bitelli, I. Selvaggi, A. Lambertini, op. cit.*

### 2.3 Riflessioni preliminari sui rischi degli automatismi nei rapporti fra rilievo e modellazione

Il progresso tecnologico all'oggi vede come soluzione quasi "ideale" quei processi che, attraverso l'elaborazione di nuvole di punti, permettono di ottenere accurati e dettagliati modelli finalizzati sia al rilievo architettonico che all'analisi strutturale, altresì considerando l'implementazione e l'applicazione delle tecnologia di Information Modeling<sup>55</sup> con la conseguente possibilità di inserirvi caratteristiche intrinseche (metriche, geometriche, formali, etc.); la conseguente riduzione dei tempi di elaborazione di questi processi<sup>56</sup> li rende fortemente appetibili sia alla platea dei professionisti che alle applicazioni di ricerca.

Come sinteticamente riportato nel capitolo precedente, alla luce altresì delle caratteristiche ben conosciute della muratura e delle strutture a blocchi in generale, occorre vagliare con attenzione tali procedure in quanto si potrebbe incappare nel rischio di, iniziando analisi da pure considerazioni derivanti da un rilievo, pure accurato, ma comunque di una situazione non originale, di perdere o più generalmente omettere alcune informazioni nel processo di verifica strutturale dell'edificio o dell'elemento specifico. Considerando quanto riportato in (54) potrebbe lineare a funzionale al procedura quando applicata alla discretizzazione di maschi murali regolari ma altresì potrebbero apparire alquanto rischiose applicazioni a strutture voltate o ad archi; in questi, per la formulazione matematica della procedura adottata la ricostruzione avverrebbe per accostamento di elementi aventi tutte le facce di contatto parallele ad uno dei piani cartesiani andando quindi a perdere le informazioni legate alla geometria della giacitura dei blocchi in tali strutture. Ne consegue il fatto che, considerando lo scenario di analisi

---

<sup>55</sup> Pur non essendovi in letteratura scientifica una definizione univoca, rappresenta la tecnologia digitale che permette di abbinare informazioni aggiuntive a modelli numerici di natura vettoriale attraverso l'interrelazione con database.

<sup>56</sup> B.I.M. e analisi strutturale per la conservazione del patrimonio. La metodologia del building information modeling strutturale applicata a Villa dei Misteri a Pompei, <http://www.campuspompei.it/2015/05/08/b-i-m-e-analisi-strutturale-per-la-conservazione-del-patrimonio-la-metodologia-del-building-information-modeling-strutturale-applicata-a-villa-dei-misteri-a-pompei/>, CampusPompei, 2015.

strutturale del modello, vengono notevolmente a variare quelle che sono le interfacce di contatto e conseguentemente le azioni e reazioni che fra di esse si scambiano senza in ultimo dimenticare che per differenti orientamento dei piani di contatto fra i blocchi differenti sono altresì le nuove configurazioni di equilibrio che si verrebbero a creare in caso di simulazione di spostamenti o applicazione di forze esterne.

### 3 Parte II – Strategie e proposte operative

*“Ogni arte liberale ha un preciso bisogno della Geometria. L’architettura n’abbisogna più di ogni altra. Mancano i fondamenti a quella dell’architetto, che non possiede un sufficiente capitale di geometria. Quanto egli fa, così nel disegnare ,come nell’eseguire, dipende da questa Madre Scienza. Egli misura, compone, divide, unisce le parti a tenore di giuste regole, e norme; le dispone con ordine, le adatta nelle posture convenienti, le accorda con opportune proporzioni, le contorna con varie figure.*

*Or chi non sa, che in tutte queste operazioni è necessaria la Geometria?*

*In vista di questa necessità ci siamo determinati a permettere un breve saggio di questa facoltà, affinché serva di preparazione all’architettura. Ce ne sapran buon grado i principianti, a cui lo dirigiamo, quando per esperienza ne conosceranno il vantaggio, anzi per dir meglio la necessità.”<sup>57</sup>*

---

<sup>57</sup> Antonini, 1828.

### 3.1 Forma

Nell'introdurre questa seconda parte della ricerca non si può prescindere dal constatare che, dato di fatto, vi è una costante crescita d'interesse verso la progettazione parametrica computazionale sia nel panorama professionale che accademico; di ciò vi è dimostrazione sia il "proliferare" di corsi di perfezionamento sul tema nonché la nascita dei primi master post-universitari che si avvalgono di queste tecniche quale fondamento per le proprie ricerche e sperimentazioni. Altresì anche la realizzazione architettonica italiana sta lentamente subendo l'influsso e il fascino dei risultati raggiunti da professionisti internazionali che hanno sviluppato interessanti concept mediante un sapiente controllo di processi progettuali parametrici.

*“La propulsione all’ibridazione con l’arte e le scienze fisiche o matematiche che da sempre ha pervaso la mente degli architetti, da Fidìa a Peter Eisenmann passando per Palladio, diventa fondamento generativo dello spazio architettonico e non solo di un sistema di proporzionamento applicato a schemi mentali precostituiti”<sup>58</sup>*

E' apparso quindi di interesse l'inserimento di tali procedure nella presente ricerca al fine di sfruttare le opportunità legate all'applicazione della matematica nella generazione delle forme di base dell'architettura che si traducono in uno sviluppo di concept comunque generalmente applicabili anche in altri campi, in un aumento di flessibilità e controllo nella definizione delle forme e soprattutto, passando attraverso processi di carattere logico, avere sempre un controllo del risultato con la possibilità di intervenire nel flusso generati con le correzioni, integrazioni, modifiche che la ricerca mano a mano richiedeva.

---

<sup>58</sup> Fulvio Wirz, Zaha Hadid Architects.

### 3.1.1 Dal dissesto al sesto

La ricerca della forma originale, rispetto allo stato dei luoghi che si riscontrano all'odierno, è concettualmente come il ripercorrere, a ritroso, la "time history" dello stesso fino al momento della sua nascita.

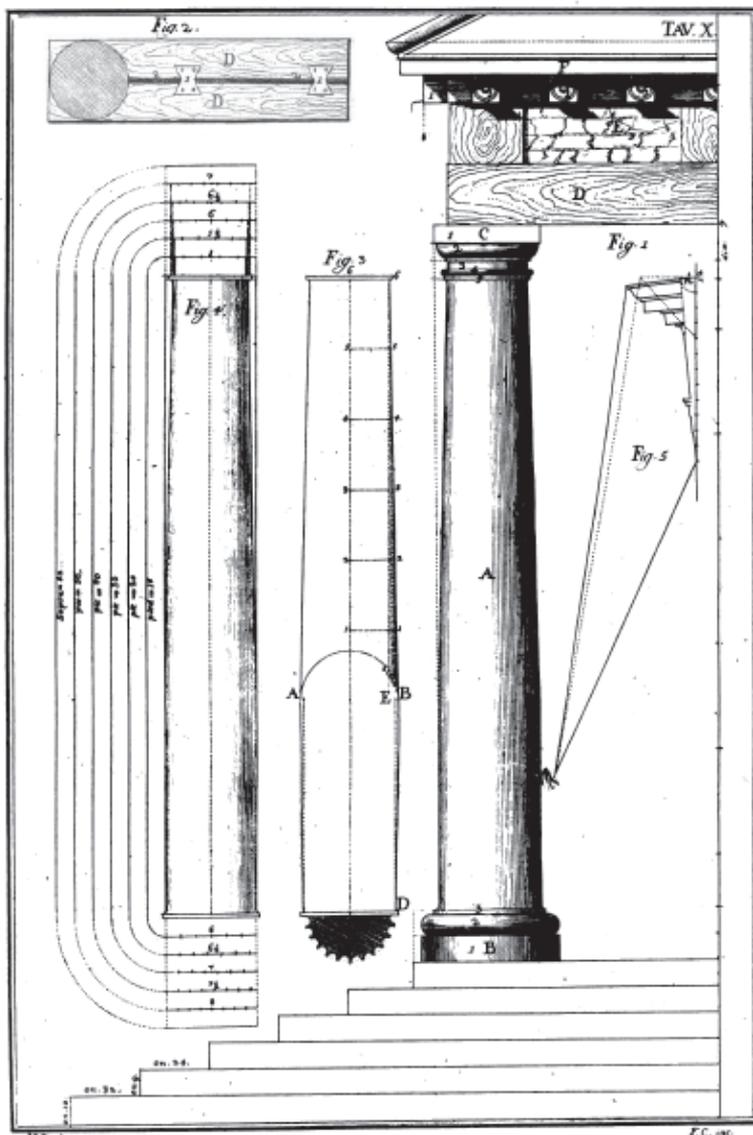


Figura 38 Lo studio delle proporzioni negli antichi sistemi costruttivi, Tavola X, ordine Tuscanico, L'architettura di Marco Vitruvio Pollione tradotta e commentata dal marchese Bernardo Galiani, Siena, Stamperia di Luigi e Benedetto Bindi, 1790.

Appare quindi chiaro come l'osservazione di insieme dello stato di fatto di una struttura porta all'individuazione sintetica degli aspetti geometrici più appariscenti perché anomali rispetto a quanto ci si può aspettare in una eseguita a regola d'arte<sup>59</sup>.

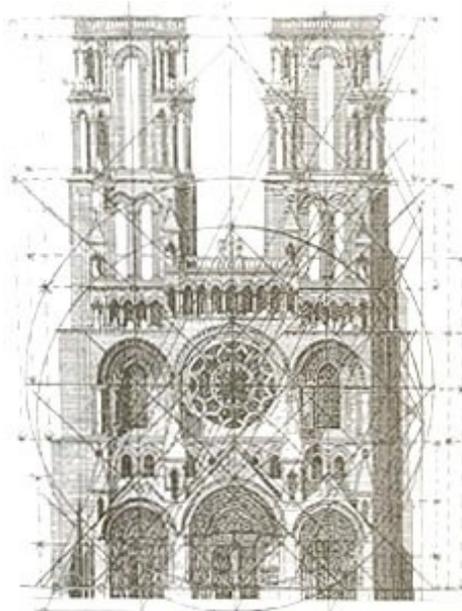


Figura 39 Proporzione aurea nella facciata della cattedrale di Notre-Dame di Laon (1157-1205), Picardia, Francia, da Auguste Bouxin, *La cathédrale Notre-Dame de Laon*, Cambridge, MA, Harvard University, 1902.

Pertanto, la ricostruzione delle presunte forme originali di un edificio, piuttosto che di un singolo elemento, deve partire dalla consapevolezza di quali erano le tecniche costruttive in uso nel periodo storico di realizzazione ed altresì quelle che erano le peculiarità costruttive maggiormente diffuse in edifici di pari livello artistico – culturale – sociale, evidente nel passato era il fatto che le manodopera maggiormente specializzate erano ragionevolmente individuabili ove erano maggiori le disponibilità economiche ed altresì in questi luoghi migliori erano i materiali utilizzati e le accuratezze esecutive. Si procederà quindi all'individuazione di quali elementi sono rimasti,

---

<sup>59</sup> Le regole dell'arte possono essere considerate come l'insieme di prescrizioni, anche non formalizzate, attinenti all'arte di edificare attraverso la letteratura tecnica che le ha mutate dalla tradizione costruttiva di decenni di esperienze tramandate nel tempo per via orale dalla mano d'opera o desunta dalle fabbriche esistenti.

presumibilmente, immutati durante le storia e che possono, ragionevolmente, fornire una “base sicura” di partenza. Si concluderà infine il processo andando ad applicare, con spirito critico, a questi ultimi elementi, le regole dell’arte, le proporzioni e le conoscenze di carattere geometrico–matematico di cui certa era l’applicazione fin dall’antichità.

### **3.1.2 Approccio parametrico per la ricostruzione dei sestì**

Sulla scia di un sempre crescente affermarsi, sia nel panorama architettonico italiano, sia accademico che professionale, della progettazione computazionale come strumento di grande flessibilità in grado di superare taluni vincoli imposti da tradizionali programmi di disegno e/o modellazione sia di geometrie bi-dimensionali che tri-dimensionali, in considerazione altresì delle necessità operative della presente ricerca e della necessità di poter avere un totale e rapido controllo sulle geometrie finalizzato non solo all’ottenimento di un output grafico ma, più importante, l’esportazione di pacchetti sequenziali di dati numerici, un approccio parametrico è apparsa come un ottimo connubio fra flessibilità e rapidità realizzativa.

La natura “associativa” dei software parametrici consente di trasferire una maggior coerenza fra la fase progettuale e quella realizzativa, pianificando ed integrando quest’ultima nel processo progettuale stesso attraverso al generazione di elaborati capaci di adattarsi ai futuri sviluppi e consentendo di stabilire il metodo più appropriato di razionalizzazione della forma: un procedimento indispensabile per concretizzare correttamente l’idea progettuale. Tutto ciò appare semplificato dall’iter processuale del progetto parametrico che segue prettamente una struttura logica che va dal particolare al generale nella quale il ricercatore, il progettista, si concentra a risolvere una condizione o una problematica tipica del progetto per poi fare in modo che l’algoritmo la copi e la diversifichi secondo le specifiche necessità funzionali e formali, in tutto unito quindi in un unico gesto coerente.

Mentre per anni l’unico modo di personalizzare ed ottenere che un’applicazione si adattasse coerentemente a propri scopi specifici era

passare attraverso l'apprendimento di linguaggi di programmazione specifici detti "scripting", LISP per AutoCAD<sup>60</sup>, MEL per Maya<sup>61</sup>, VB per Rhinoceros<sup>62</sup>, solo per citare alcuni esempi, con Grasshopper per la prima volta è possibile esprimere le relazioni alla base del processo progettuale e costruttivo attraverso un'interfaccia grafica a nodi mantenendo il concept aperto a futuri cambiamenti nonché a nuove applicazioni e sviluppi di ricerca; aprendo una definizione di Grasshopper non è possibile non pensare alle reti neurali, alle sinapsi ed ai collegamenti logico matematici.

Al fine di comprendere meglio le specificità del GH appare quindi necessario una breve analisi dello scenario in cui esso si è sviluppato nel tempo ed altresì una disamina delle specifiche necessità che era chiamato a risolvere. Il programma Rhinoceros, sul quale esso si implementa, è uno dei più noti software per la creazione di modelli bidimensionali e tridimensionali basati su curve e superfici NURBS<sup>63</sup>; apprezzato per la precisione dei risultati, la possibilità di analisi dei modelli realizzati e l'esportazione in molteplici formati di interscambio (ASCII, CNC), è utilizzato principalmente come modellatore di tipo tradizionale in cui il disegnatore utilizza le geometrie di base che attraverso opportune manipolazioni e modifiche, possono adattarsi alle esigenze ed alle specifiche richieste. Tale approccio presenta però alcune limitazioni legate alla flessibilità delle forme di base per particolari esigenze e alla difficoltà di ottenere modifiche rapide ed associative di modelli complessi.

---

<sup>60</sup> Auto CAD è un marchio registrato Autodesk.

<sup>61</sup> Maya è un marchio registrato Autodesk.

<sup>62</sup> Rhinoceros, RhinoScript, Grasshopper ed Explicit History sono marchi registrati Robert McNeel & Associates

<sup>63</sup> Acronimo di Non Uniform Rational B-Spline (**Non-Uniform** si riferisce alla parametrizzazione della curva, ovvero sono presenti dei punti di controllo non equidistanti tra loro. **Rational** si riferisce all'uso del peso, valore intero solitamente positivo. **B-Spline** si riferisce a basis spline, cioè curve polinomiali che hanno una rappresentazione parametrica, formate da una serie di curve di Bezier.), sono delle rappresentazioni matematiche della geometria 3D, le quali definiscono accuratamente qualunque forma: da una semplice linea, ad un cerchio, un arco o una curva, fino al più complesso solido o superficie a forma libera 3D.

La possibilità di ovviare a tali limiti è offerta dal RhinoScript, linguaggio di programmazione eseguibile internamente al programma base, in grado di generare in maniera flessibile modelli bi e tridimensionali ed apportare modifiche “dall’interno” dell’applicazione. L’approccio alla generazione di forme tramite scripting offre al progettista nuove opportunità soprattutto dal lato del controllo come:

- Automazione delle procedure;
- Definizione delle geometrie mediante funzioni matematiche;
- Generazione di modelli parametrici che consentono veloci e profonde variazioni delle geometrie iniziali;
- Possibilità di ottenere rapidamente forme di grande complessità attraverso elementi geometrici reiterati.

Va sicuramente evidenziato che la diffusione delle tecniche di programmazione ha incontrato comprensibili ostacoli, anche di natura operativa, derivanti spesso dall’insufficiente background informatico, ma altresì positivamente conquistando l’ambito della ricerca. Con lo scopo di avvicinare un maggior numero di utenti alla potenzialità offerte dall’utilizzo di procedure automatizzate mediante scripting è stato sviluppato dalla McNeel & Associates, in forma open source<sup>64</sup>, un applicativo di tipo visuale basato non più sull’inserimento di codici ma sulla più accessibile logica algoritmica. Dal programmatore David Rutter è nato così Explicit History come precursore ed più recente ed evoluto Grasshopper. Esso si presenta quindi come un editor visuale per lo scripting che, attraverso un intuitivo metodo grafico basato su un’interfaccia a nodi, permette all’utente di definire sequenze di istruzioni che vengono tradotte in modelli tridimensionali. La possibilità di poter inserire una qualsivoglia funzione matematica ed altresì quella di poter ottenere, oltre che ad una visualizzazione grafica,

---

<sup>64</sup> Open source (termine inglese che significa sorgente aperta), in informatica, indica un software di cui gli autori, o più precisamente i detentori dei diritti, rendono pubblico il codice sorgente, favorendone il libero studio e permettendo ad altri soggetti di apportarvi modifiche, estensioni, ecc.; questa possibilità è regolata tramite l'applicazione di apposite licenze d'uso e condizioni di utilizzo.

l’esportazione di dati numerici relativi al modello generato lo hanno reso un alleato ideale per lo studio delle forme di cui alla presente ricerca.

### 3.1.3 Gli algoritmi come supporto alla ricostruzione delle geometrie

Il conseguimento di un obiettivo è sempre legato alla corretta individuazione e soluzione dei diversi nodi problematici relativi allo specifico ambito di interesse.



Figura 40 Una pagina dall'Algebra di al-Khwarizmi<sup>65</sup>

Generalmente si può considerare che un procedimento risolutivo è definito mediante la sua scomposizione in passaggi più semplici, in un

<sup>65</sup> Abū Ja'far Muhammad ibn Mūsā al-Khwarizmi, (Corasmia o Baghdad, 780 circa – 850 circa), è stato un matematico, astronomo, astrologo e geografo persiano, il libro "Algoritmi de numero indorum", traduzione latina di uno dei suoi più importanti studi sul sistema di numerazione indiano, introdusse la notazione posizionale e il numero zero nel mondo occidentale nel XII secolo. La parola algoritmo e la sua variante meno usata algorismo derivano da Algoritmi, la latinizzazione del suo nome.

numero finito di essi, che garantiscono una maggior efficienza di gestione del processo stesso garantendo nel contempo tracciabilità e trasmissibilità dei dati da un passaggio all'altro. Tale approccio, che nell'uomo rappresenta una sintesi dei meccanismi cognitivi e di ragionamento, risulta trasferibile e codificabile al computer attraverso l'utilizzo di algoritmi; in ambito informatico si può, in estrema sintesi, affermare che la soluzione di un problema può essere interpretato come un percorso attraverso il quale ottenere un risultato partendo da dati iniziali.

Un algoritmo non è altro che una semplice procedura che tenta di risolvere un determinato problema applicando un certo numero di passi elementari. Analogamente, in informatica, un algoritmo non è altro che un semplice procedimento che permette la risoluzione di specifici problemi mediante l'applicazione di una sequenza finita di precise istruzioni (che a loro volta devono essere interpretate ed eseguite, fino alla loro conclusione, seguendo un certo ordine. Da questa definizione, si deducono quindi le seguenti proprietà fondamentali che deve avere un qualunque algoritmo:

- i passi dell'algoritmo devono essere elementari, cioè non possono essere ulteriormente divisibili (atomicità);
- i passi dell'algoritmo non possono essere interpretati in altri modi (non ambiguità);
- l'algoritmo deve per forza essere svolto in un certo numero di specifici passi e, nello stesso tempo, deve richiedere in ingresso soltanto una determinata quantità di dati (finitzza);
- l'esecuzione dell'algoritmo deve terminare entro un certo periodo di tempo (terminazione);
- l'esecuzione dell'algoritmo deve portare ad un risultato univoco (effettività);
- ogni passo dell'algoritmo deve essere ben stabilito (determinismo).

Ciò definito appare chiaro che, individuato un problema e definiti i dati iniziali, il risultato di maggior interesse di un algoritmo non risiede tanto nella risoluzione di uno specifico problema o particolare caso di studio ma nel procedimento stesso che ha portato al risultato. Un algoritmo infatti ha come

obiettivo finale la definizione di un procedimento generalizzato per la risoluzione di problemi analoghi a quello specifico definito dai dati di input.

Andando a circoscrivere il campo di studio a quanto di interesse nella presente ricerca si riporta nel seguito come affrontare in termini algoritmici un problema di natura geometrica legato alla definizione delle geometrie delle strutture di archi e volte.

### **3.1.4 La generazione di modelli parametrici**

Gli strumenti matematici per la grafica computerizzata costituiscono uno dei campi di sviluppo più ferventi dell'analisi numerica. Dai risultati pionieristici di Bézier e de Casteljau molto è stato sviluppato: dalle curve e superfici polinomiali si è passati a quelle razionali introducendo la possibilità che punti di controllo distinti influissero in maniera diversa sulla forma dell'oggetto (attraverso l'attribuzione dei pesi), poi sono state concepite le B-spline per permettere un migliore controllo locale, in seguito anche queste sono state estese dal caso polinomiale a quello razionale, creando le NURBS, al momento uno dei capisaldi del CAGD. Ma la ricerca non si è affatto fermata ad esse: pur con tutti i vantaggi che queste offrono rispetto agli strumenti passati, sono state ideate delle loro evoluzioni, che permettessero di ottimizzare ulteriormente quanto già le NURBS permettevano di fare rispetto alle B-spline e alle curve di Bézier. In particolare, dopo una successione di passaggi intermedi, si è giunti alle T-spline, attualmente ritenute uno dei metodi più avanzati nel campo della computer grafica.

Di pari passo allo sviluppo di curve e superfici che presentano formulazioni sempre più complesse, ma che al contempo permettono una sempre maggior flessibilità ed adattabilità ad una elevata tipologia di situazioni, si sono sviluppati i concetti di parametrizzazione dei modelli geometrici in ambiente CAD. Queste innovative procedure per la realizzazione di elementi grafici sia di carattere bidimensionale che tridimensionale fondano le loro radici nella teoria geometrica e nell'analisi matematica andando a sfruttare le potenzialità offerte dalle funzioni, generalmente considerate nella loro forma parametrica.

Dal un punto di vista matematico le curve parametriche possono essere viste come un modo alternativo di rappresentazione, rispetto alla

classiche formulazioni analitiche, quando le coordinate cartesiane  $(x, y)$  o polari  $(\rho, \nu)$  di un punto appartenente a  $\gamma$  sono espresse in funzione di una terza variabile  $t$  detta parametro.

Definizione: *data una curva  $\gamma$  in un riferimento cartesiano o polare, si chiamano equazioni parametriche di  $\gamma$  quelle che esprimono le coordinate di un generico punto  $P(x; y) \in \gamma$  in funzione del parametro  $t$ :*

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t), \end{cases} \quad \begin{cases} \rho = \rho(t) \\ \vartheta = \vartheta(t) \end{cases}$$

*Figura 41 Formulazione generica di equazione parametrica di una curva (o curva parametrica) per coordinate cartesiani (sinistra) e polari (destra).*

Considerando esemplificativamente un punto  $P$  che si muove nel piano  $xy$  durante un intervallo di tempo  $a \leq t \leq b$ , le due coordinate di  $P$  saranno entrambe funzioni reali del tempo  $t$ ,

$$x = f(t),$$

$$y = g(t),$$

definite nell'intervallo  $[a, b]$ . Quindi al variare del tempo, per  $t \in [a, b]$  le due coordinate del punto  $P(t) = (f(t), g(t))$  descriveranno nel piano  $R^2$  "una qualche figura" che indicheremo con  $C$ .

Indipendentemente dalla forma delle funzioni  $f$  e  $g$ ,  $C$  può avere aspetti molto diversi: un segmento, un arco circolare, un punto, una spirale, il grafico di una funzione seno, una intricata ragnatela di segmenti o curve, o anche peggio. Anche considerando  $f$  e  $g$  funzioni continue la figura nel piano può avere le forme più strane.

Le potenzialità offerte dalla loro applicazione al mondo della computer grafica, che già ha un forte sviluppo in quelle che sono le generazioni delle superfici delle più moderne architettura<sup>66</sup> e anche nella progettazione ingegneristica, sono potenzialmente illimitate e dipendono

---

<sup>66</sup> Arturo Tedeschi, *Architettura parametrica introduzione a grasshopper*, Napoli, Le Penseur, 2010.

esclusivamente dall'abilità di riscoprire scienze antiche come la matematica e le geometrie e dar loro una nuova campo di sviluppo.

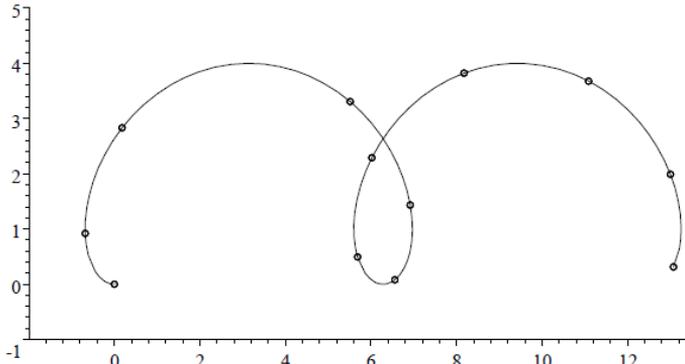


Figura 42 Esempio di curva parametrica, tracciata per un numero finiti di punti  $(t-2\sin t, 2-2\cos t)$ ,  $t \in [0,12]$ , ambiente di sviluppo Derive versione 6.0.

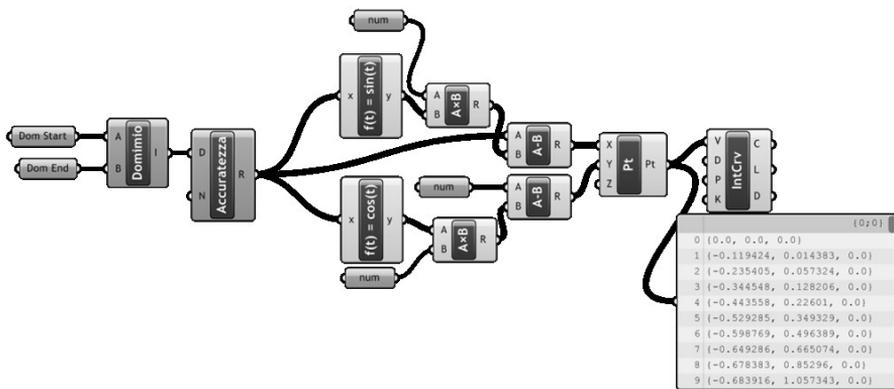
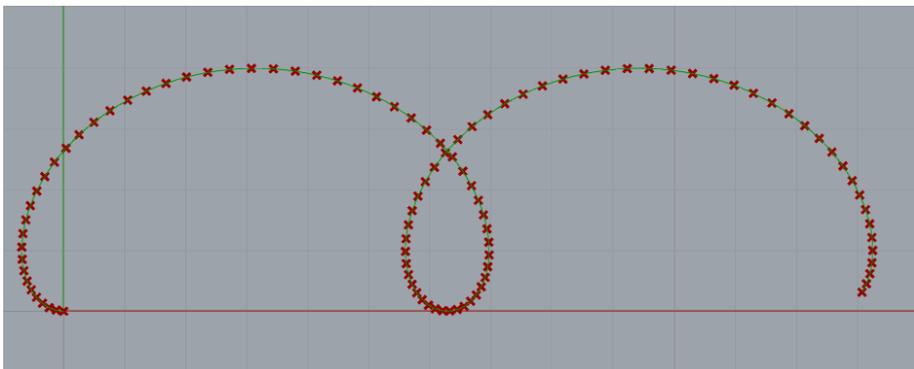


Figura 43 Algoritmo in ambiente GH per la generazione di curva mediante funzioni parametriche, rappresentazione in Figura 44, sono definiti il dominio della stessa, il numero dei punto con cui viene discretizzate e le coordinate ordinate degli stessi.



*Figura 44 Rappresentazione della curva in ambiente CAD Rhinoceros, eseguito mediante l'utilizzo di algoritmi a base matematica riportato in Figura 43, sono rappresentati con croci rosse la posizione dei punti (numero finito) che discretizzano la curva in colore verde.*

La generazione di modelli parametrici, sviluppati su base matematica, oltre allo spazio R2 sono estendibili allo spazio R3<sup>67</sup> attraverso l'opportuna implementazioni delle funzioni e delle variabili ad esse collegate; aspetto questo che permette di gestire e conseguentemente analizzare una notevole varietà di superfici riscontrabili nell'architetture sia antica che più recente. Partendo dalla volte a botte, siano queste alzate o ribassate in chiave, passando attraverso le volte composte a vela e le varie tipologie di cupole, si arriva fino a coperture continue ad oscillazione costante e non.

Esempio di tale potenzialità è stato applicato alla ricostruzione della copertura delle "Scuole Provvisorie della Sagrada Famiglia" in Barcellona, progettate dall'architetto Antonio Gaudì; essa si presenta come una superficie ondulata continua avente come sezione verticale, sui lati maggiori, una curva periodica definibile attraverso funzioni trigonometriche.



*Figura 45 Barcellona, Scuole provvisorie delle Sagrada Famiglia, prospetto sul lato strada in lato ovest.*

Lo studio esemplificativo ha quindi cercato di mantenere la massima flessibilità parametrica delle superfici al fine di garantire ogni possibile

---

<sup>67</sup> R2 ed R3 rappresentano rispettivamente, secondo la comune definizione matematica, gli spazi vettoriali bidimensionali e tridimensionali, Silvana Abeasis, *Elementi di algebra lineare e geometria*, Bologna, Zanichelli, 1993.

modifica atta ad una più corretta approssimazione allo stato di fatto; al fine di ciò rendere possibile, è stato sviluppato un algoritmo in ambiente GH con le seguenti caratteristiche discrezionabili:

- Definizione della dominio, corrispondente alle dimensioni planimetriche della copertura, si spazio bidimensionale R2, necessario per la tipologia di formulazione utilizzato;
- Definizione delle proprietà della funzione periodica atta a definire le curve corrispondenti alle sezioni verticali con possibilità di variazione in termini di ampiezza, pulsazione e frequenza;

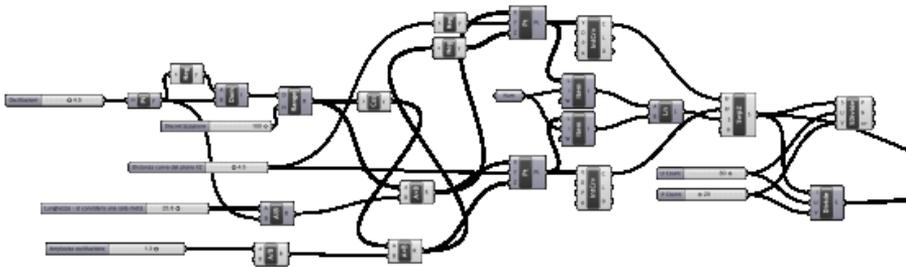


Figura 46 Procedura, sviluppata in ambiente GH, per la creazione della superficie con possibilità di modifica dei parametri citati nello scritto.

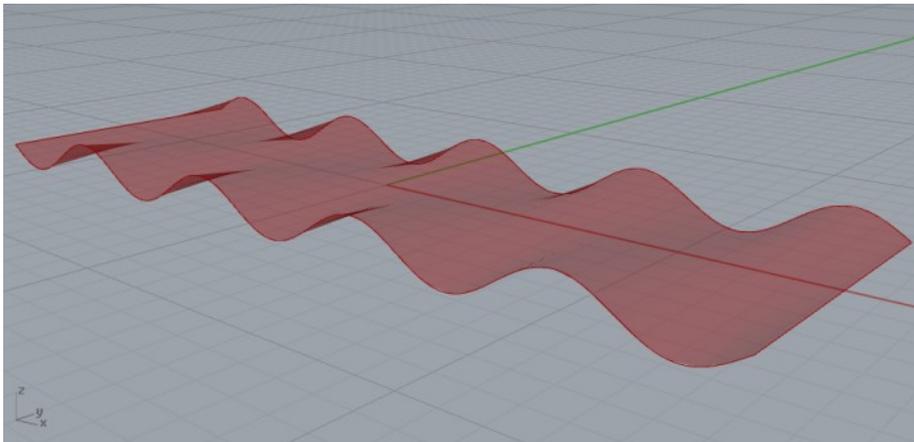


Figura 47 Rappresentazione della superficie in ambiente CAD Rhinoceros.

Finalizzata alla dimostrazione delle potenzialità complessive della procedura si è poi proceduto ad una ulteriore implementazione finalizzata all'ottenimento di una divisione della superficie matematica, di carattere continuo, con un numero finito e arbitrariamente definibile di elementi (o

blocchi) che andassero a discretizzarla ed altresì ad estrapolare, in maniera ordinata, le coordinate spaziali dei vertici dei quadrilateri per uno loro eventuale successivo utilizzo in ambito di ricostruzione della geometria in ambiente software di analisi.

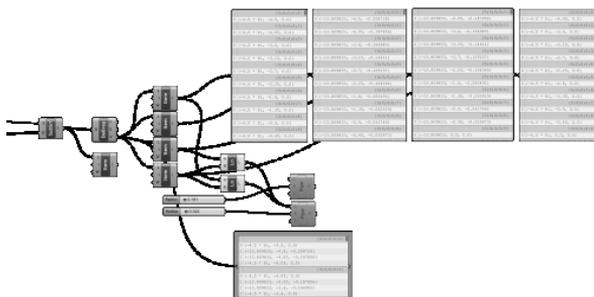


Figura 48 Procedura, sviluppata in ambiente GH, per la discretizzazione della superficie matematica in un numero finito di elementi quadrangolari ed estrapolazione (box di colore giallo) delle coordinate degli stessi..

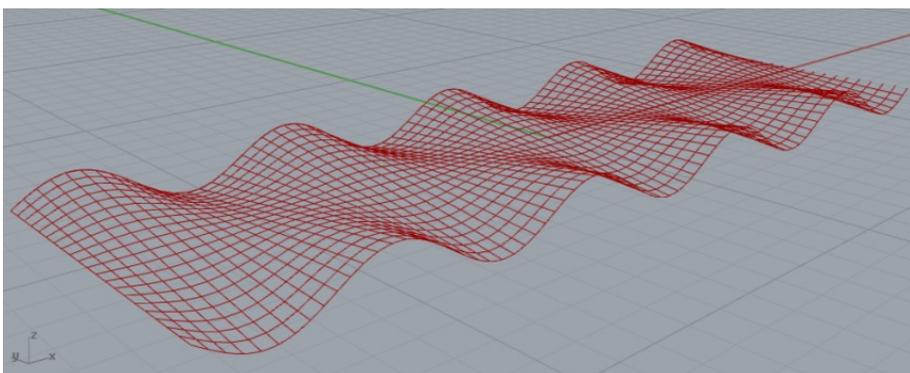


Figura 49 Rappresentazione della discretizzazione della superficie in ambiente CAD Rhinoceros.

Avendo quindi la possibilità di arbitrariamente variare sia i parametri relativi alla forma che quelli relativi alla sua discretizzazione per eventuali implementazioni di verifiche strutturali si apprezza la flessibilità di tale approccio anche in presenza di superfici e forme più complesse.

## 3.2 Struttura

### 3.2.1 Dal sesto al dissesto

Compiuto il primo passo, cioè quello di comprendere e ricostruire le originali forme che l'antico architetto aveva pensato per un determinato edificio o elemento strutturale<sup>68</sup>, occorre ragionare in termini di simulazione strutturale al fine di ottenere un modello che la meglio rappresenti lo stato attuale non solo in termini di deformazioni e spostamenti ma anche in termini di corretta analisi delle tensioni nei materiali componenti l'insieme costruito.

In questo caso sarà come applicare al modello di calcolo tutte quelle azioni, quelle modifiche, che nella storia la struttura ha sopportato, considerando le modifiche antropiche, le azioni accidentali, le e tutto quanto l'analisi storica ed il rilievo in loco mettono a disposizione dello studioso.

Considerando quindi il percorso "storico" che il modello deve seguire per meglio adattarsi alle attuali conformazioni, visto altresì le peculiarità dei vari metodi di modellazione che lo sviluppo tecnologico e scientifico mettono a disposizione, parallelamente alla quali è stato criticamente valutato eventuali aspetti positivi e negativi nella loro applicazione a strutture generiche a blocchi, è apparsa come una lineare e logica conseguenza la scelta di approccio a macro elementi<sup>69</sup> considerando altresì la tipologia di casi studio analizzata ove facilmente è individuabile la tessitura costruttiva e la disposizione degli elementi.

Tale approccio per elementi distinti, come già precedentemente approfondito, per la sua formulazione intrinseca matematica, permette di bene approcciarsi a strutture che presentano, fra le loro peculiarità costruttive, la possibilità di avere grandi spostamenti fra gli elementi che comportano quindi un cambiamento delle originali posizioni di contatto fra di essi in favore di nuove situazioni e posizioni di equilibrio anche con geometria

---

<sup>68</sup> Antonio Becchi, Federico Foce, *Degli archi e delle volte. Arte del costruire tra meccanica e stereotomia*, Venezia, Marsilio, 2002.

<sup>69</sup> 2.2.1.3 Metodo agli elementi discreti/distinti

notevolmente discostanti da quelle dell'origine ma non per questo da considerarsi a priori pericolose o instabili.



*Figura 50 Grandi spostamenti dei conci in chiave di un arco in pietra, gli originali punti di contatto hanno lasciato il posto a nuove configurazioni stabili di equilibrio. Sito archeologico di Palmyra (Siria), arco di trionfo, 120 d.C. circa, Freer Gallery of Art, Arthur M. Sackler Gallery Library, Smithsonian Institution Libraries (1867 – 1876)*

Va altresì sottolineato che tale metodologia, che per la sua semplificazione non permette accurate analisi degli interni dei blocchi considerati ben si adatta, anche formalmente, alle antiche strutture ove l'accostamento dei blocchi avveniva per semplice accostamento e sovrapposizione<sup>70</sup> degli stessi.

### **3.2.2 Il codice UDEC nella modellazione D.E.M.**

La risoluzione di problemi come precedentemente illustrati o comunque l'esecuzione di indagini e ricerche sono affrontabili mediante un

---

<sup>70</sup> Nell'ipotesi semplificata di non considerare le proprietà e le resistenze a trazione dei giunti di malta interposti.

programma ad elementi distinti. In questo approccio infatti la struttura è considerata come un insieme di blocchi distinti, deformabili o meno secondo le necessità di ricerca, che interagiscono mediante elementi di contatto. Come già visto nel paragrafo Metodo agli elementi discreti/distinti dedicato a tale approccio, si possono scegliere equazioni costitutive diverse per i giunti a seconda dell'approssimazione desiderata ed altresì delle finalità ultima dell'elaborazione. Un'equazione costitutiva più complessa, prettamente tipica di analisi agli elementi finiti<sup>71</sup>, non significa una soluzione necessariamente avente un'approssimazione migliore.

Il metodo, alla cui base vi è una formulazione che prevede contemporaneamente grandi spostamenti per giunti ed interfacce e piccole deformazioni per i blocchi di cui si compone il modello, prevede anche la possibilità di avere contatti non di tipo fisso che quindi permettono, durante il ciclo di analisi, che si possano perdere quelli originali e contemporaneamente che se ne formino di nuovi. Queste ultime due caratteristiche del D.E.M. permettono di simulare correttamente i meccanismi di collasso causati da rotazioni, spostamenti o urto tipiche delle strutture composte da blocchi o elementi assimilabili.

La soluzione viene data, a valle di una definizione delle condizioni al contorno del modello quali le geometrie dei blocchi le condizioni di carico, le condizioni di spostamento, ecc., mediante equazioni differenziali del moto calcolate in modo esplicito<sup>72</sup>. Fra i vantaggi maggiori che si riscontrano si annovera sicuramente la possibilità di controllare l'andamento degli spostamenti fino al raggiungimento della rottura ed altresì la possibilità di applicarlo a qualsivoglia struttura (anche con notevole numero di elementi)

---

<sup>71</sup> Si rimanda al paragrafo 2.2.1.1 ed alla bibliografia ad esso riconducibile per ogni approfondimento.

<sup>72</sup> Nelle procedure di calcolo, a differenza del "modo implicito" tipico delle procedure step by step in cui un opportuno criterio di convergenza permette di proseguire o meno l'analisi, eventualmente riducendo l'incremento di tempo, a seconda dell'accuratezza dei risultati al termine di ogni step, con l'utilizzo del metodo "esplicito" non si presentano invece eventuali problemi di non convergenza ad una soluzione finita, dato che in questo caso l'analisi "non è condizionata da un criterio di convergenza" e l'incremento di tempo viene definito all'inizio dell'analisi e rimane costante durante il calcolo.

senza avere un eccessivo aggravio dell'onere computazionale e dei tempi di elaborazione. Di contro va sicuramente riconosciuto che l'uso di questa metodologia di analisi risulta più problematica quando si vuole descrivere lo stato tensionale interno ad una determinata cella o blocco; l'approssimazione alle differenze finite utilizzata per creare la mesh interna non risulta infatti sufficientemente. Per la soluzione e lo studio di queste casistiche si ricorrerà ad altre modellazioni, come quelle viste all'inizio del capitolo, che presentano un maggior dettaglio nella modellazione a discapito di maggiori oneri computazionali.

La scelta operativa per la presente ricerca è stata individuata nel software di calcolo ad elementi distinti UDEC – Universal Distinct Element Code<sup>73</sup>; Peter Cundall nel 1971<sup>74</sup> scrisse la prima versione di questo codice di calcolo che successivamente, nel 1985, venne riadattato per i primi computer IBM che vedevano la luce in quel periodo. Inizialmente pensato per implementare e risolvere problemi di tipo bidimensionale, ne è stata negli ultimi anni sviluppata anche una versione (3DEC – 3d Element Code) che supporta geometrie tridimensionali.

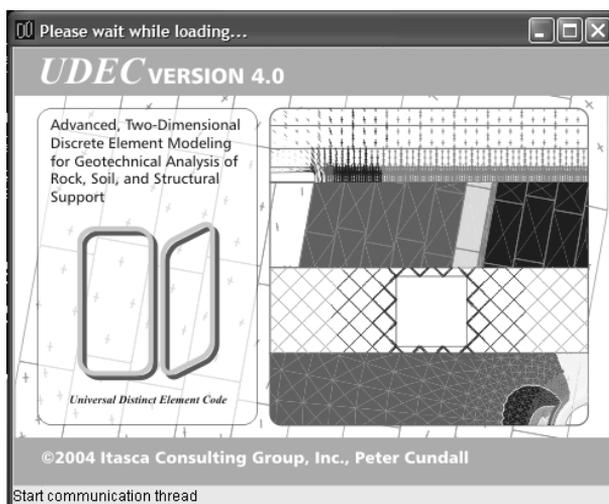


Figura 51 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, interfaccia software nella versione 4.0, 2004

<sup>73</sup> UDEC è un marchio registrato Itasca Consulting Group, Inc.

<sup>74</sup> Peter Cundall, Otto D.L. Starck, A discrete numerical model for granular assemblies, Géotechnique 29, no.1, pp 47-65, Advanced Technology Group, Dames & Moore, London, 1979.

Come anzidetto, il programma è un modello numerico per l'approssimazione del comportamento meccanico di problemi riguardanti strutture composte da blocchi, problemi cioè di discontinuità. Inizialmente il software era indirizzato principalmente allo studio ed alla risoluzione di problematiche di carattere geotecnico e tale aspetto è facilmente riscontrabile anche nell'interfaccia grafica; essa infatti appare ottimizzata per la descrizione di terreni, rocce infrante, scavi sotterranei, gallerie, pendii ecc.. Pertanto per la gestione del mezzo discontinuo, che a differenza di quello continuo vede la presenza di contatti o interfacce fra i corpi discreti che compongono il sistema, si hanno metodologie specifiche per gestire e rappresentare nella formulazione numerica i contatti ed altresì per gestire e rappresentare i corpi rigidi.

Per la sua nascita iniziale in ambito geotecnico, il metodo degli elementi distinti UDEC, rappresenta una massa rocciosa come un insieme di blocchi discreti. I giunti sono visti come interfacce tra corpi distinti (ad esempio, la discontinuità è trattata come una condizione al contorno) e le forze di contatto e spostamento poste alle interfacce dei blocchi (o di un gruppo di essi) vengono determinate attraverso una serie di calcoli che vanno a definire e tracciare i movimenti dei blocchi stessi; si ottiene così una propagazione, attraverso il sistema di blocchi, dei disturbi causati dall'applicazione di carichi o forze in cui la velocità di propagazione stessa, essendo il sistema dinamico, dipende dalle proprietà fisiche del sistema e dei materiali che lo compongono. Il comportamento dinamico è rappresentato, dal punto di vista numerico, mediante un algoritmo tipo "timestepping" (o passo temporale) nel quale la dimensione del passo è limitata dal presupposto che la velocità e l'accelerazione rimangono costanti all'interno del passo temporale stesso. Il metodo DEM, in generale, si basa sul concetto che il passo temporale sia sufficiente piccolo per cui, all'interno di un singolo passo, non si possano propagare disturbi fra un elemento del sistema e i suoi vicini; ciò corrisponde al fatto che esiste comunque una velocità limitata con cui le informazioni possono essere trasmesse con un qualunque mezzo fisico. Se si parla di blocchi rigidi a definire la limitazione del passo concorrono le caratteristiche di rigidità del blocco e quelle dell'interfaccia fra gli stessi;

parlando invece di blocchi deformabili le limitazioni sono legate ai moduli dei blocchi ed alla rigidità dei contatti.

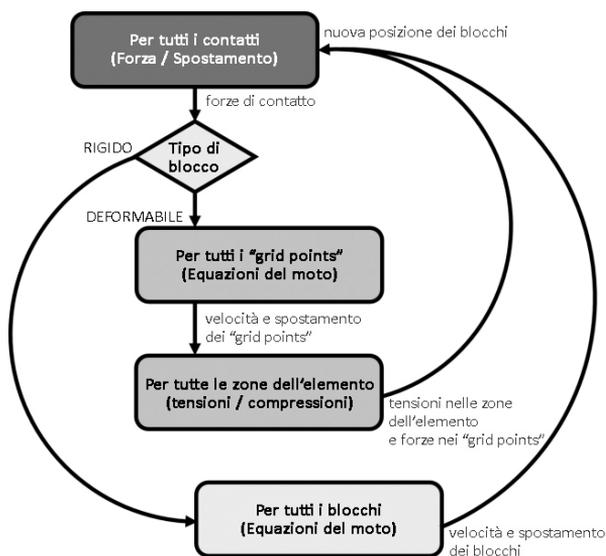


Figura 52 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, digramma di flusso per la gestione dei modelli all'interno del software, possibilità di gestire con specifiche funzionalità ed analisi diversificate il comportamento di blocchi rigidi e blocchi deformabili.

I calcoli effettuati attraverso l'UDEC, col metodo degli elementi distinti, prevede quindi un'alternata applicazione di una legge forza-spostamento a tutti i contatti e della seconda legge di Newton in tutti i blocchi. La legge forza-spostamento viene utilizzato per trovare le forze di contatto che vengono a generarsi in funzione degli spostamenti noti (e fissi) mentre la Seconda legge di Newton permette di definire il moto dei blocchi risultanti dall'applicazione delle forze note (e fisse) che agiscono su di essi. Nel caso si presentino blocchi deformabili il movimento è invece calcolato sui vertici degli elementi finiti, di tipo triangolare, che vanno a definire le deformazioni e le nuove sollecitazioni tensionali all'interno del blocco stesso.

L'uso del codice UDEC è quindi ottimale quando la struttura può essere descritta tramite blocchi che interagiscono tra loro con elementi di contatto permettendo di descrivere anche situazioni che contemplano grandi spostamenti; rivela invece i suoi limiti quando si cerca lo stato tensionale all'interno del singolo blocco. Le principali proprietà del programma sono quelle di permettere grandi spostamenti e rotazioni, anche con l'eventuale

distacco di questi, e la creazione automatica dei nuovi elementi di contatto durante il susseguirsi del processo di calcolo.

### **3.2.3 La definizione dei parametri operativi**

In generale all'interno di un codice di calcolo, e così anche in UDEC, la definizione dei parametri operativi necessari al fine di ottenere una risoluzione della struttura (o in generale del calcolo) può essere schematizzata nelle seguenti macro fasi, tutte concatenate, e necessaria ognuna a definire una parte indispensabile:

- Definizione complessiva della geometria del modello;
- Definizione delle condizioni al contorno del modello, da intendersi come l'insieme di vincoli, carichi, spostamenti, azioni termiche che agiscono sul bordo degli elementi;
- Definizione delle condizioni interne del modello, da intendersi come l'insieme di pressioni, azioni termiche che agiscono internamente agli elementi;
- Definizione delle caratteristiche fisico - meccaniche dei materiali di cui si compone la struttura;
- Definizione delle caratteristiche fisico – meccaniche delle giunzioni fra i vari elementi della struttura.

#### *3.2.3.1 Descrizione dei blocchi*

Gli elementi, o blocchi, in UDEC possono, secondo le specifiche esigenze di modellazione, essere assunti con proprietà differenti; si avranno così in generale due macro classi di elementi:

- Elementi assunti infinitamente rigidi (come avviene nel caso di molti problemi geotecnici, branca dalla quale nasce la codifica di questo solutore)
- Elementi deformabili.

Nei casi di studio di strutture in muratura è preferibile utilizzare blocchi deformabili in modo elastico lineare; in questo caso quindi il blocco sarà omogeneo, isotropo e continuo con un legame sforzi - deformazioni di tipo lineare. Nella maggior parte dei casi la rappresentazione dei blocchi ad

elementi elastici lineari è una buona approssimazione. Si possono, tuttavia, scegliere anche altre equazioni costitutive per i blocchi. Un modello più performante per i blocchi è quello con plasticità Mohr-Coulomb; il modello con questa formulazione si può usare quando ci si aspetta un collasso del blocco oltre che del giunto.

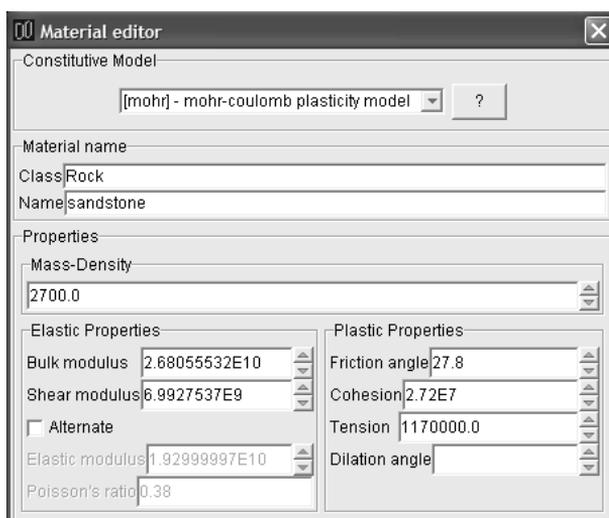


Figura 53 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, interfaccia per inserimento caratteristiche fisico – meccaniche per materiali aventi legami costitutivi tipo Mohr-Coulomb, 2004

Altri modelli, implementati nel software, che si possono usare per le definizioni delle caratteristiche dei materiali, variazioni del modello di Mohr-Coulomb, sono:

- Ubiquitous joint model: modello di plasticità anisotropico nel quale si sono aggiunte al modello di Mohr-Coulomb delle superfici di debolezza.
- Strain-softening/hardening model: permette, con buona approssimazione, la rappresentazione di materiali non lineari nei quali il ramo di softening dipende dalla variazione di coesione, frizione e dilatanza.
- Drucker-Prager plasticity model: criterio di rottura semplice che include l'influenza delle forze idrostatiche nella rottura.

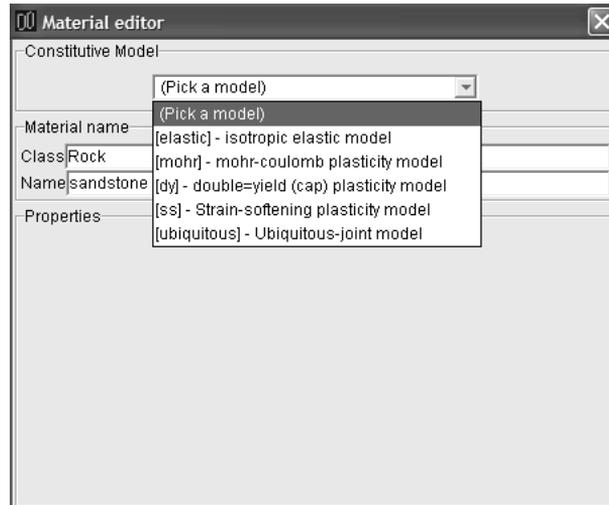


Figura 54 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, interfaccia per inserimento della tipologia di legame interno dei materiali, 2004

### 3.2.3.2 Descrizione dei giunti

La rappresentazione dell'interfaccia tra i blocchi avviene mediante una serie di punti di contatto. Ci possono essere diversi tipi di contatto ma tutti sono ricondotti a due coppie: due blocchi che sono a contatto mediante un bordo in comune oppure il vertice di un blocco che incontra il lato di un altro blocco.

Ad ogni contatto, l'interazione meccanica è rappresentata da una forza che si scompone in una componente normale  $F_n$  al contatto e una componente tangente al contatto  $F_s$  (s sta per shear, tangente). Le forze di contatto sottostanno alle leggi di Mohr-Coulomb e, per poterle descrivere, bisogna introdurre i seguenti parametri:

- $K_n$ : normal stiffness (modulo di elasticità normale)
- $K_s$ : shear stiffness (modulo di elasticità tangenziale)
- $N_t$ : tensile strength (resistenza a trazione)
- $\Phi$ : friction angle (frizione)
- $\mu$ : dilatanza
- $c$ : coesione

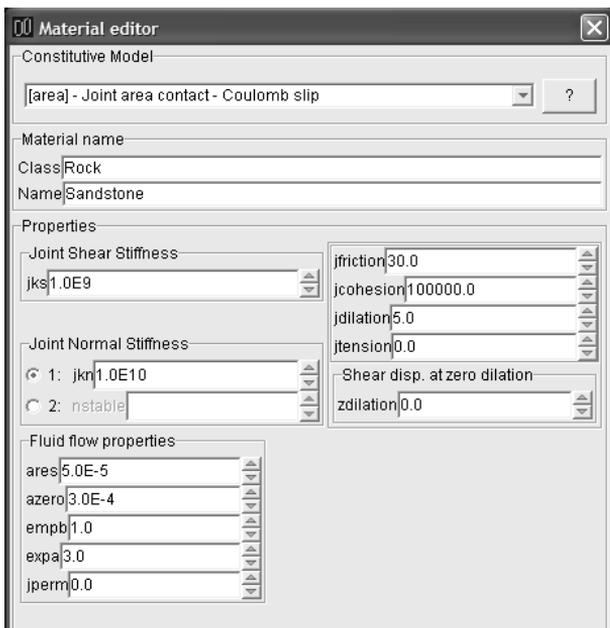


Figura 55 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, interfaccia per inserimento caratteristiche fisico – meccaniche per giunti di interfaccia fra i blocchi, 2004

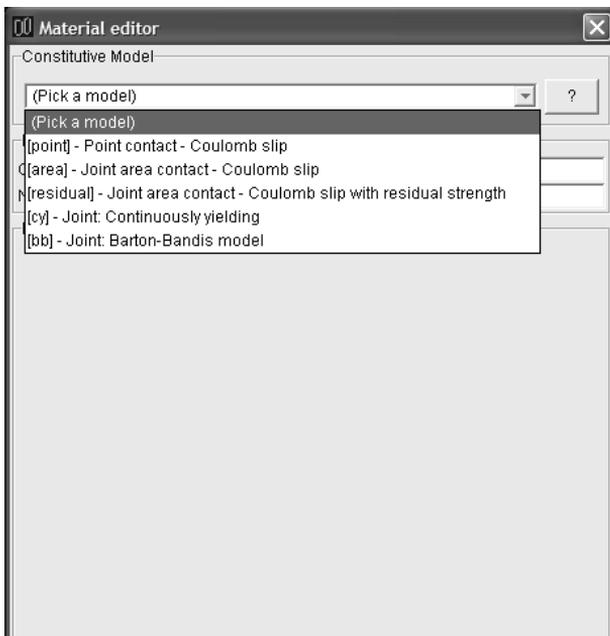


Figura 56 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, interfaccia per inserimento della tipologia di legame di interfaccia fra i blocchi, 2004

Ci sono anche altri tipi di modelli per i giunti. Così si può contemplare una variazione del modello di Mohr-Coulomb, nel quale si aggiunge la perdita di coesione e resistenza a trazione una volta arrivati a collasso della resistenza tangenziale. Un modello più complesso è il continuously yielding model nel quale si raggiunge il collasso a causa dell'accumulo di spostamenti tangenziali plastici.

### 3.2.3.3 FISH e la definizione di nuove variabili

In risposta alla variabilità di processi di analisi cui il programma può dover rispondere è stato sviluppato un linguaggio interno di programmazione che, mediante l'inserimento di sequenze comandi, permette di implementare funzioni e variabili, automatizzare processi sia di definizione delle geometrie che altresì per l'affinamento delle tecniche di analisi.

Relativamente a questo secondo aspetto, le potenzialità di una programmazione personalizzata risultano particolarmente indicati quando una particolare situazione del modello non può essere definita in modo standard utilizzando; è evidente infatti che i modelli pre definiti per modellare le equazioni costitutive non possono descrivere tutta la casistica che sia dei giunti che dei blocchi. La programmazione con tale linguaggio, che appare piuttosto complessa, permette di implementare nuove leggi e legami, arrivando ad un numero praticamente infinito di variazioni sia, come si è detto, relativamente ai blocchi ed alle zona di contatto fra di essi ma altresì alle condizioni di vincolo, forze applicate al modello e spostamenti.

```

new
block 0,0 0,10 10,10 10,0
gen edge 10
prop mat=1 dens 1000 k 1e9 g 0.7e9
bound 0, 10 -0.01, 0.01 yvel 0.0
set grav 0 -10

def stress_y
  zoneIdx = b_zone(block_head)
  stress_y = z_syy(zoneIdx)
end

hist stress_y

```

*Figura 57 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, FISH, sequenza elementare di istruzioni per la creazione di un blocco avente definite proprietà fisico-meccaniche e l'analisi dello stato tensionale lungo la direzione di azione della forza gravitazionale.*

Le potenzialità di questo compilatore sono pertanto molteplici; può essere utilizzato per modificare aspetti alquanto semplici, come i file di stampa, oppure più complicati, come le leggi costitutive. Ma può essere utilizzato per modificare anche i risultati che il programma mantiene in memoria; si possono praticamente modificare i contenuti presenti nella memoria interna dell'UDEc, questo obbliga all'utilizzo delle FISH con grande attenzione.

### **3.2.4 Il problema della geometrie complesse**

Nascendo il programma, come già illustrato, per applicazioni di carattere prettamente geotecnico, presenta ampie possibilità per quanto riguarda le gestione delle caratteristiche fisico - meccaniche sia di blocchi che delle interfacce di contatto ed altresì per la definizione delle condizioni al contorno del modello (da intendersi con questo l'insieme dei vincoli, degli spostamenti e delle azioni agenti sul modello); relativamente alla parte di definizione del modello geometrico bidimensionale, che comunque rappresenta un primo fondamentale passo in una modellazione, le procedure e le funzionalità permettono di realizzare qualsivogliano geometrie ma con un numero limitato di operatori risulta operazione non sempre di facile esecuzione.

In generale la procedura di creazione di una geometria all'interno del programma avviene, per fasi logiche e successive, nel seguente modo:

- Definizione del rettangolo esterno la cui estensione andrà poi a delimitare quella del modello mediante inserimento di coordinate riferite al piano cartesiano di lavoro  $[x, y]$ ;
- Divisione del rettangolo generale in un numero finito di elementi mediante "tagli" con elementi tipo linea, arco, cerchio (da definirsi mediante inserimento di coordinate riferite al piano cartesiano di lavoro  $[x, y]$ ) oppure elementi di frattura sia continui che discontinui (da definirsi nel primo caso mediante un passo o distanza costante fra le fratture mentre nel secondo aggiungendo l'intervallo di discontinuità fra le fratture stesse;

- Modifica degli elementi realizzati in termini di geometria e di numero al fine di convergere il più possibile il modello verso la geometria desiderata.

Chiaro quindi che se la casistica del modello prevede un numero limitato e regolare di blocchi distinti appaio sufficienti gli elementi messi a disposizione dal programma ma, come nel caso del presente studio, si presenta la necessità di realizzare modelli potenzialmente composti da un numero elevato di blocchi distinti ed altresì da geometrie che non sempre possono essere facilmente ricondotte a semplici geometrie, la ricerca si è posta il problema di come sfruttare quanto visto in Gli algoritmi come supporto alla ricostruzione delle geometrie e La generazione di modelli parametrici per cercare di fornire non solo una risposta maggiormente coerente con le necessità di ricerca ma altresì di fornire possibili spunti per una implementazione futura di funzionalità.

A ciò finalizzato, lo studio si è concentrato dapprima sulla generazione di modelli elementari al fine di comprendere le procedure logico – operative interne al programma UDEC e conseguentemente poter intervenire su tale processo con le modifiche ed implementazioni richieste dall’ambito di ricerca.

In primo luogo, come riportato in Figura 58 e Figura 59, l’attenzione si è concentrata su paramenti regolari con disposizione dei blocchi secondo piani di giacitura paralleli ai piani principali verificando la possibilità di vedere il modello finale sia come un “macro blocco” successivamente diviso secondo un numero finito di fratture aventi posizione nota, ma anche (Figura 57) come insieme di blocchi ognuno dei quali caratterizzato da coordinate cartesiane coerenti con quelli adiacenti.

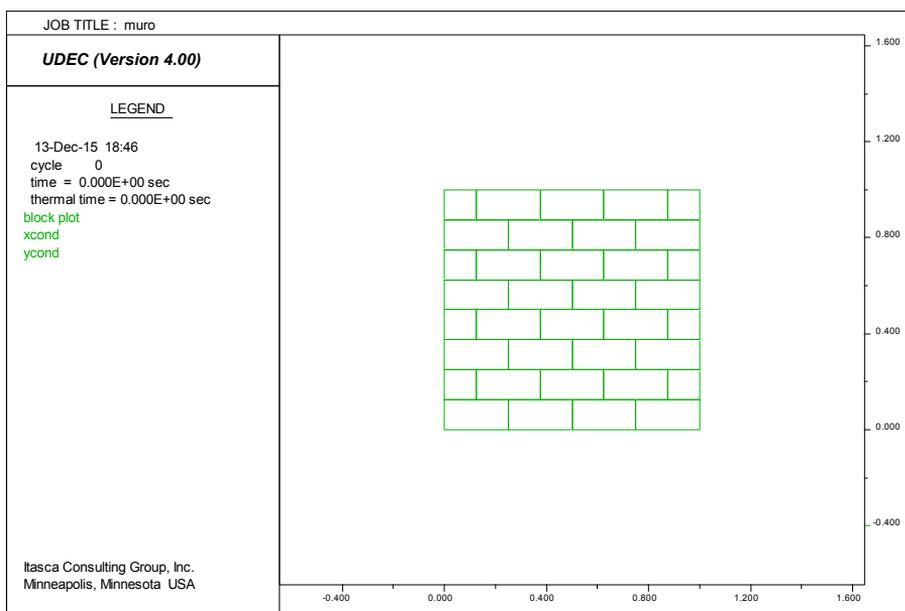


Figura 58 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, tessitura muraria elementare, blocchi 12 x 25 cm, rettangolo esterno dimensioni 100 x 100, divisione in blocchi orizzontale ottenuta per frattura continua a passo costante, divisione verticale ottenuta per frattura discontinua a passo costante.

```

4 text block 0.0,0.0 0.0,1.0 1.0,1.0 1.0,0.0
4 text jset 0.0,0.0 1.0,0.0 1.0,0.0 0.125,0.0 0.0,0.0 0
4 text jset 90.0,0.0 0.125,0.0 0.125,0.0 0.25,0.0 0.0,0.0 0
4 text jset 90.0,0.0 0.125,0.0 0.125,0.0 0.25,0.0 0.125,0.125 0
4 text set gravity=0.0 -9.81
0 eof

```

Figura 59 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, tessitura muraria elementare, estratto tabulato numerico per la ricostruzione del modello.

Quest'ultimo aspetto, l'utilizzo delle coordinate ed del linguaggio di programmazione FISH proprietario del programma stesso, hanno permesso di proporre una soluzione parametrica del problema, attraverso la realizzazione di una implementazione algoritmica in GH che, attraverso la definizione iniziale delle dimensioni del blocco base, del numero di blocchi (o porzioni degli stessi) poste in ogni fila ed in ultimo del numero delle file sovrapposte del paramento, andasse a generare quella serie ordinata di coordinate necessarie allo scopo. Il vantaggio operativo lo si apprezza maggiormente nella possibilità di ottenere da una sola procedura la generazione di un numero praticamente infinito di possibili configurazioni del modello (anche con numeri molto elevati di elementi) senza la necessità di procedere ad inserimenti di tipo puntuale dei singoli elementi attraverso l'interfaccia tradizionale del programma.

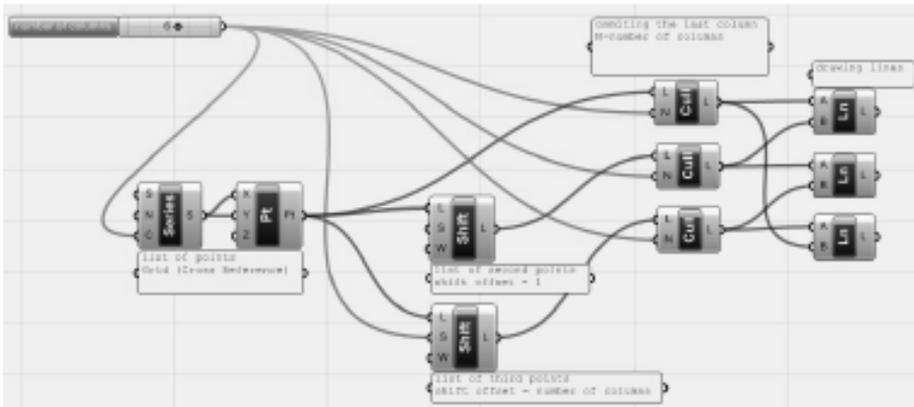


Figura 60 Algoritmo in ambiente GH, realizzazione di tessitura muraria (blocchi), estrapolazione delle coordinate bidimensionali ( $X_p; Y_p$ ) per la lettura in ambiente UDEC.

In modo coordinato con lo studio proposto in questa ricerca, un approfondimento è stato svolto sugli aspetti relativi alla costruzione di geometria riconducibili ad archi e volte.

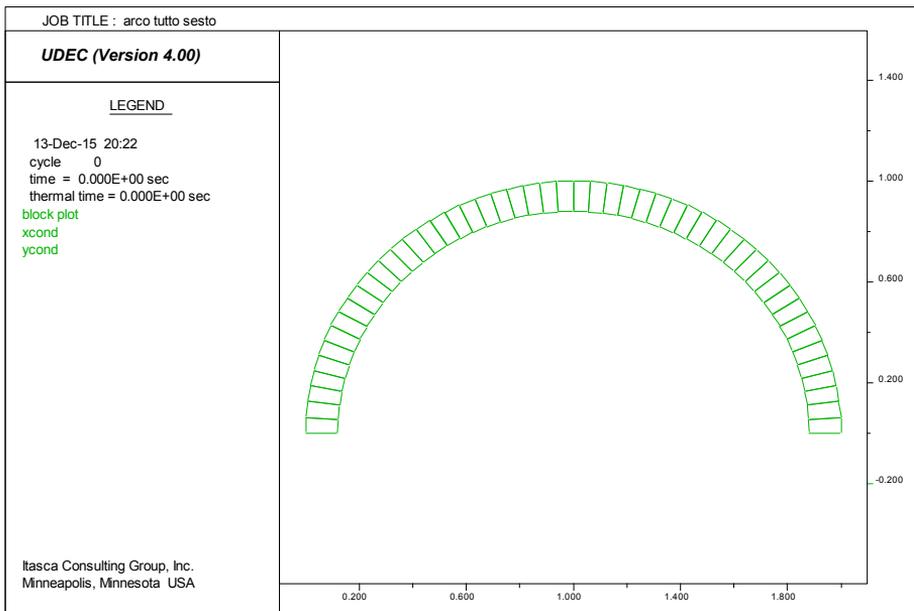


Figura 61 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, arco a tutto sesto, blocchi 12 x 25 cm, rettangolo esterno dimensioni 200 x 100, divisione in blocchi ottenuta per fratture successive dei conci all'intradosso ed all'estradosso e radiale, successiva eliminazione degli elementi componenti il rettangolo originale.

```

4 text block 0,0,0,0,0,0,1,0,2,0,1,0,2,0,0,0
4 text arc (1,0,0,0) (2,0,0,0) 180,0 50
4 text crack -7,8593194E-4,0,06247943,0,12275303,0,05549679
4 text crack 0,0078080893,0,12532316,0,12705004,0,10920938
4 text crack 0,016939223,0,18816689,0,13618118,0,1656076
4 text crack 0,03144163,0,24886212,0,14853507,0,21824594
4 text crack 0,048629656,0,30902022,0,16303748,0,2714214
4 text crack 0,070651814,0,36831895,0,18291113,0,3237375
4 text crack 0,09535961,0,4252543,0,20385905,0,3753016
4 text crack 0,12329016,0,4816525,0,22910397,0,4236429
4 text crack 0,15498058,0,53643936,0,23757164,0,47198427
4 text crack 0,19150516,0,58800346,0,28872496,0,51764
4 text crack 0,22964111,0,6384933,0,3225639,0,56061006
4 text crack 0,2709998,0,6846861,0,3580142,0,60304296
4 text crack 0,31558126,0,7276562,0,39776152,0,64171606
4 text crack 0,3623112,0,7712709,0,43912023,0,6778109
4 text crack 0,4117268,0,80940676,0,4820903,0,7127241
4 text crack 0,5282831,0,7433403,0,46436515,0,84431994
4 text crack 0,57608736,0,77180797,0,51807773,0,8770847
4 text crack 0,62550294,0,79705286,0,57447594,0,9060894
4 text crack 0,67631507,0,8180008,0,6317336,0,929723
4 text crack 0,72787917,0,8362631,0,6908175,0,95174515
4 text crack 0,7810546,0,852914,0,7515127,0,96839607
4 text crack 0,8347672,0,8641936,0,81274503,0,9834356

```

*Figura 62 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, arco a tutto sesto, estratto del tabulato numerico per la ricostruzione del modello.*

In modo analogo a quanto precedentemente illustrato (relativo alla ricostruzione di paramenti regolari), l'approccio metodologico ha visto ancora una volta l'utilizzo del linguaggio di programmazione proprietario (FISH) al fine di implementare una serie ordinata e coerente alle procedure interne del software di dati generati mediante la costruzione di algoritmi in ambiente GH; questi ultimi sono stati sviluppati partendo dalla formulazione parametrica tradizionale di curve piane come cerchi ed ellissi ed andando successivamente a modificare ed inserire le variabili necessarie all'affinamento del risultato ed alla gestione di specifiche situazioni.

### 3.3 Conclusioni

Gli approfondimenti di ricerca sviluppati in questa “Parte II – Strategie e proposte operative”, hanno permesso di confutare quanto la riscoperta della matematica come supporto anche all’odierna rappresentazione grafica possa fornire numerosi vantaggi sia in termini di tempo che di qualità del prodotto realizzato; appare infatti evidente come una tale sinergia permetta un’infinità di possibili realizzazioni, cui solo il limite posto dalla fantasia dell’operatore può porre un limite.

Da un punto di vista strettamente formale occorre notare come un siffatto approccio possa considerarsi “matematicamente elegante” in quanto permette di raggiungere un completo controllo ed accuratezza sulla procedura di creazione del modello sia in ambiente CAD e, ancora più importante, in ambiente UDEC andando così a superare quelle difficoltà di natura prettamente operativa, già illustrate precedentemente, che potrebbero rappresentare un possibile ostacolo e portare ad un dilatarsi del tempistiche operative. Concettualmente la procedura che si viene così a definire vede il crearsi di un cardine “forma-matematica” attorno al quale si sviluppano due sentieri fra loro paralleli: il primo sfrutterà lo studio delle funzioni per giungere, partendo dalla forma deformata attuale, alla ricostruzione della più probabile geometria originariamente concepita mentre il secondo vedrà lo studio delle strutture per giungere dall’originaria geometria allo stato attuale.

Scenario di altrettanto interesse risulta essere la gestione delle geometrie in campo tridimensionale, che pur se non direttamente applicata ai casi di studio riportati nella “Parte III – Casi studio” ma esclusivamente dal punto di vista geometrico matematico e delle forme ha già mostrato la sue potenzialità suggerendo già nuove strade per possibili e sicuramente interessanti sviluppi. Come dimostrato per le forme di carattere bidimensionale, anche in spazio tridimensionale l’approccio parametrico permette, posta la necessaria attenzione atta a correttamente definire la procedura di generazione, di avere un controllo completo sulla generazione del modello, garantisce un’elegante coerenza formale e permette di in ultimo, ma non per ordine di importanza, quelle correzioni in tempi operativi

notevolmente ridotti consentendo l'analisi di diversi scenari di configurazione geometrica.



## **4 Parte III – Casi studio**

## 4.1 Presentazione

La necessità di procedere ad una applicazione sul campo di quanto fino ad ora visto obbliga, per coerenza di ricerca, a procedere gradatamente andando in primis ad applicare il modello proposto su strutture semplici ed altamente controllabili e, solo successivamente, su elementi di maggior complessità.

In risposta al primo quesito, riscontrata la necessità di avere un confronto con dati provenienti da prove su elementi reali e considerata l'impossibilità di effettuare prove dirette sulle strutture inserite nei casi studio, si è provveduto a ricercare nella letteratura scientifica campagne sperimentali su elementi campione in murature di laterizio sottoposti ad azioni di compressione e taglio e di cui fossero noti i diagrammi Forza-Spostamento per le varie configurazioni.

Solo successivamente a queste preliminari verifiche, finalizzate all'affinamento del modello di calcolo ed alla valutazione dei parametri che maggiormente influenzano i risultati, si è provveduto all'applicazione del metodo ad elementi maggiormente complessi, che poi rappresentano la quotidianità nell'approccio ad edifici esistenti.

### 4.1.1 Calibrazioni di modelli elementari

Come premesso, al fine di valutare qualitativamente la risposta del programma scelto per l'esecuzione delle modellazioni sui casi studio, il percorso prescelto è partito dalla ricerca nella letteratura scientifica di una campagna sperimentale di prove eseguite su paramenti murari, di cui fosse possibile avere tutti i dettagli relativi a geometrie, condizioni al contorno (sia in termini di vincoli che in termini di carichi applicati), nonché, ovviamente, di sforzi e deformazioni.

E' stata presa a riferimento la campagna sperimentale riportata in (Vermeltoorf e Raijmakers, 1993)<sup>75</sup> che in anni successivi è stata più volte

---

<sup>75</sup> A.T. Vermeltoorf, T.M.J. Raymakers, H.J.M. Janssen, Shear tests on masonry walls, in A. Ahmad, H. Hamid, H.G. Harris (a cura di), Conference Paper: 6th North American Masonry Conference, 6-9 June 1993, Philadelphia, Pennsylvania, USA, Lancaster: Technomic Publ. Co., 1993, (pp. 1183-1193).

presa come modello per successive campagne di sperimentazione condotte su porzioni di muratura (Oliveira, 2000) (Roca, 2004)<sup>76</sup>. La sperimentazione condotta prevedeva la creazione di pannelli in muratura di laterizio pieno (Figura 63), posati a singola testa di dimensioni ( $b \times h \times t$ ) 1000 x 990 x 100 [mm], costituiti da 18 corsi di mattoni di dimensioni ( $b' \times h' \times t$ ) 210 x 52 x 100 mm (disposti con giunti sfalsati nel numero di 4 mattoni e  $\frac{1}{2}$  mattone per fila), intervallati da giunti di malta aventi uno spessore di 10 mm.

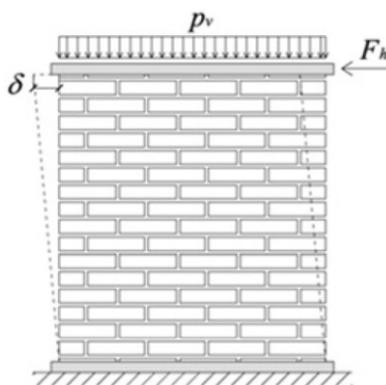


Figura 63 Schema di esecuzione della prova sperimentale: una traversa metallica rigida posta alla testa del pannello impediva la rotazione in testa, i giunti verticali di malta sono sfalsati di  $\frac{1}{2}$  mattone e ogni corso è composto da 4 mattoni e  $\frac{1}{2}$  mattone, A.T. Vermeltoort, T.M.J. Raymakers (1993).

La prova prevedeva l'applicazione di un carico di compressione  $p_v$  (nelle varie serie di sperimentazioni rispettivamente di 30, 120, 210 kN, corrispondenti rispettivamente 0.3, 1.2, 2.1 MPa) e successivamente l'applicazione di una forza orizzontale  $F_h$  alla sommità del pannello ottenendo un conseguente spostamento  $\delta$ .

<sup>76</sup> Le campagne sperimentali citate presentano alcune differenze in termini di dimensioni dell'elemento sottoposto a prova, in termini di spessore dei giunti orizzontali di malta fra i mattoni ed altresì nello spessore del paramento murario.

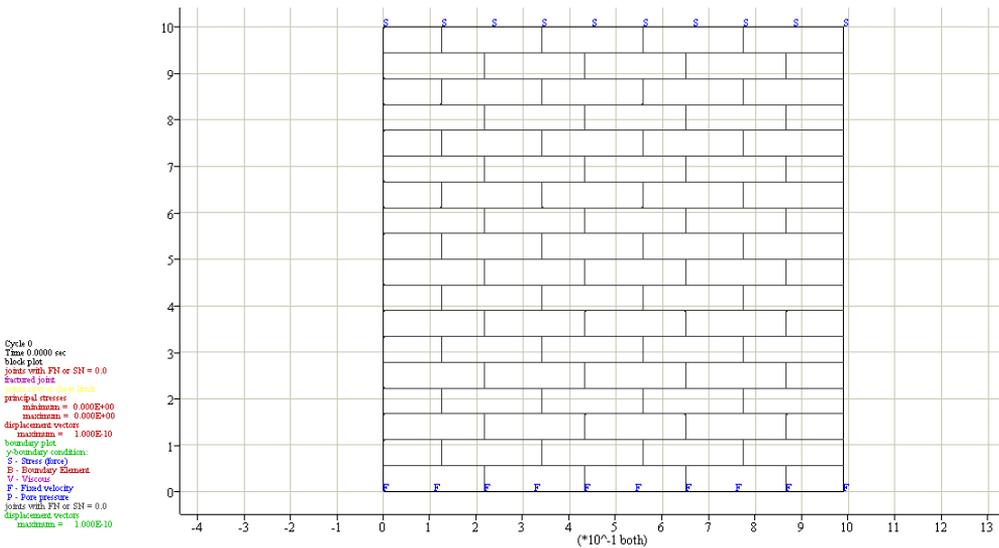


Figura 64 Modellazione del paramento murario mediante elementi distinti con codice UDEC con settaggio delle condizioni al contorno desumibili dalla letteratura: spostamenti impediti per l'interfaccia di appoggio inferiore (F), applicazione della forza di precompressione sommitale (S) e della forza orizzontale nel vertice destro, modello ottenuto mediante applicazione di algoritmo con generazione dei blocchi per coordinate cartesiane dei vertici degli stessi.

Al fine di avere una opportuna risposta in termini qualitativi dei risultati, sono state analizzate tre prove relative a tre pannelli murari (J4D, J6D, J7D)<sup>77</sup> differenziati per l'aumento progressivo del carico sommitale di precompressione rispettivamente di 30 kN per il pannello J4D, di 120 kN per il pannello J6D e 210 kN per il pannello J7D.

Bed joint (Thickness)	Ref. no	$b$ (mm)	$h$ (mm)	$t$ (mm)	$\nu$	$E_c$ (MPa)	$\phi$	$c$ (MPa)
Mortar (10 mm)	J4D	1000	990	100	0.14	5000	60°	2.2
	J6D				0.11			
	J7D				0.14			

Figura 65 Riassunto dei parametri delle 3 prove analizzate, A.T. Vermeltoort, T.M.J. Raymakers (1993).

<sup>77</sup> Codice identificativo della prova eseguita durante la campagna sperimentale del 1993 di riferimento della prova sperimentale.

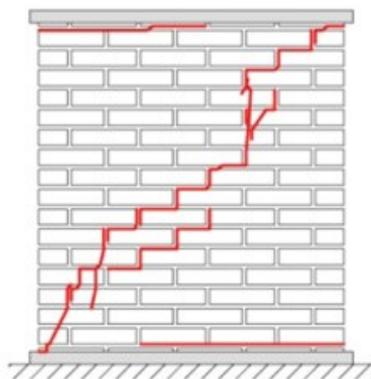


Figura 66 Quadro fessurativo sperimentale del pannello J4D, A.T. Vermeltfoort, T.M.J. Raymakers (1993).

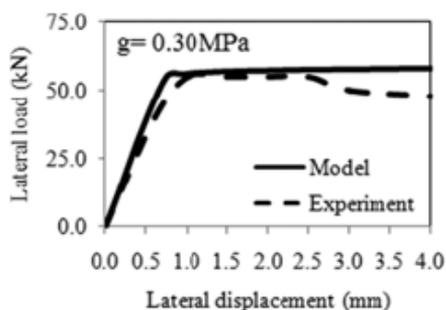


Figura 67 Grafici Forza-Spostamento dei pannelli murari: prova J4D, A.T. Vermeltfoort, T.M.J. Raymakers (1993).

La fase di calibrazione di modello elementare, passa attraverso una successione di passaggi finalizzati alla valutazione dei vari parametri interni al programma ed all'influenza che questi hanno nel processo di elaborazione andando ad indagare nello specifico:

- Influenza della contemporanea applicazione di forza di compressione verticale e forza orizzontale di spostamento;
- Influenza sull'apertura e sull'estensione del quadro fessurativo delle caratteristiche fisico meccaniche dei giunti (Figura 55);
- Influenza sulla conformazione finale della componente di deformazione dei blocchi (ipotesi di blocco indeformabile).

Specificatamente alla prima valutazione effettuata, seguendo le condizioni definite dalle prove di laboratorio, si sono eseguite prove sulla simultanea, intesa come all'interno dello stesso ciclo di calcolo, applicazione

al modello delle azioni indotte da forza di gravità, dalle pressioni di compressioni verticali e delle forze orizzontali; si è potuto verificare come, anche all'interno di un semplice elemento costruttivo, si ottenevano risposte non sufficientemente allineate con i dati sperimentali specialmente nella fase iniziale del ciclo di calcolo. A tempo iniziale si riscontrava un eccessivo spostamento della parte sommitale con formazione di eccessivi scorrimenti orizzontali; una disamina attenta dei dati ha permesso di verificare come fosse necessario al programma un tempo iniziale in cui le azioni si di compressione si distribuissero su il modello prima che lo stesso rispondesse in modo maggiormente fedele.

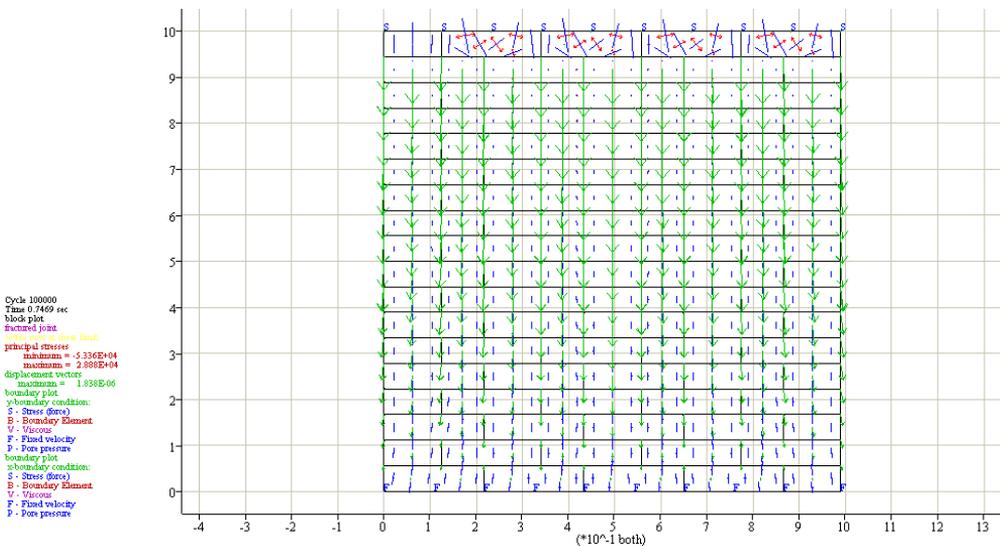


Figura 68 Analisi del paramento murario, in configurazione J4D, con applicazione del solo carico di precompressione sommitale di 30 kN corrispondente ad una pressione di 0.3kPa.

La scelta operativa ha quindi visto come prima fase per le successive verifiche la realizzazione di cicli di calcolo relativi all'applicazione delle azioni verticali che permettessero di lavorare su un modello già "assestato", come in un reale test di laboratorio.

Il secondo aspetto indagato, considerata l'importanza che le interfacce assumono in una modellazione così condotta, è stata l'influenza dei parametri meccanici interni ai giunti di interfaccia siano questi verticali od orizzontali andando nello specifico a valutare l'influenza degli angoli di attrito e coesione. Le simulazioni condotte, a parità delle altre condizioni di calcolo,

hanno permesso di valutare l'influenza che questi valori hanno<sup>78</sup> molto maggiore di quella indotta dal considerare indeformabili i blocchi di laterizio. Angoli di attrito interni superiori a 25° hanno permesso di ottenere configurazioni di danno compatibili con le prove a scala reale eseguite e, aumenti dello stesso hanno mostrato un mantenimento nella conformazione delle rotture con una simultanea traslazione verso il basso della stessa.

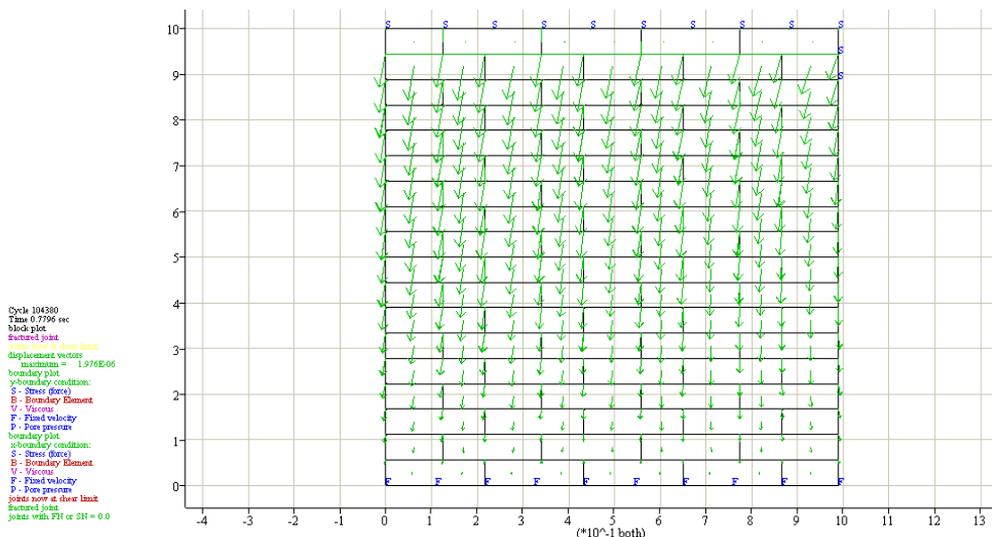


Figura 69 Analisi degli spostamenti degli elementi componenti il paramento murario, in configurazione J4D, con applicazione del carico di precompressione sommitale e della forza orizzontale pari a 10 kN.

<sup>78</sup> Sono state realizzate simulazioni con variazione di valori progressivamente aumentati che, a parità di azione verticale indotta, portavano ad un aumento progressivo della componente tangenziale del vettore tensione. Con angoli superiori a 20° la risposta del modello risultava rispecchiare quanto desumibile dalla letteratura.

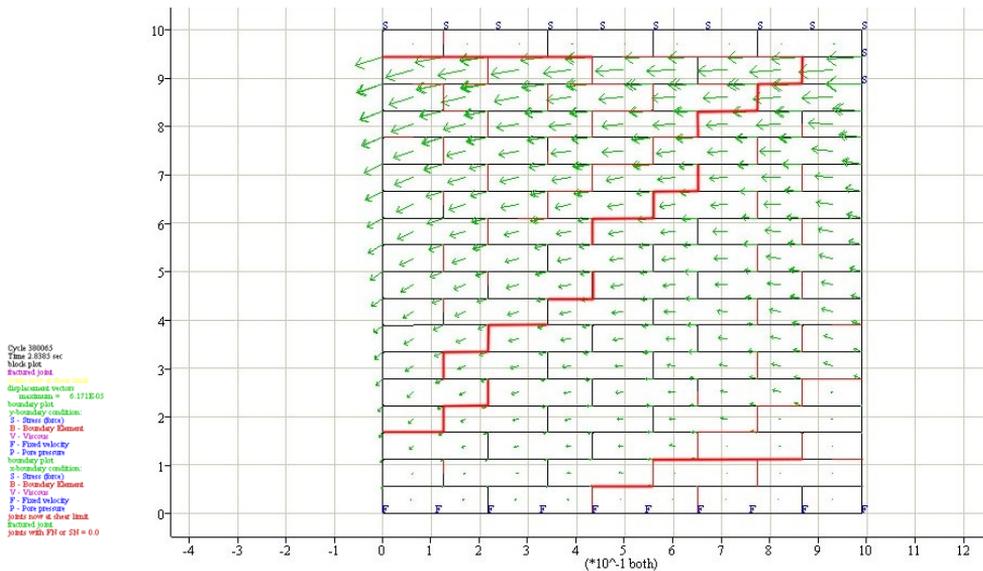


Figura 70 Analisi degli spostamenti degli elementi componenti il paramento murario, in configurazione J4D, con applicazione del carico di precompressione sommitale e della forza orizzontale pari a 50 kN, sono evidenziate le ampiezze delle fessurazioni maggiori (rosso spesso) rispetto al quadro fessurativo generale (rosso sottile).

Il confronto fra i risultati sperimentali e le simulazioni condotte con il codice di calcolo UDEC, graficamente illustrate nel seguito, permette di apprezzare qualitativamente la congruenza dei risultati con riferimento particolare alla corrispondenza degli spostamenti in funzione dell'aumento della forza applicata nonché nell'individuazione delle aree in cui si formano le fratture ed i distacchi fra i blocchi. La successione dei fenomeni fessurativi individuabile attraverso l'utilizzo del codice di calcolo rispecchia con sufficiente approssimazione quella desumibile dalla realtà<sup>79</sup>: comparsa iniziale di fessure orizzontali in testa ed al piede del pannello per poi osservare una progressiva apertura di quelle diagonali per arrivare a condizioni prossime al collasso in cui i giunti orizzontali ai bordi sono in rottura.

Aspetto importante da considerare quindi è l'importanza nella definizione delle interfacce; rappresenta l'aspetto più significativo e più

<sup>79</sup> Si vedano i diagrammi di rottura riportati in Figura 66 e la simulazione di cui alla Figura 70; altresì i dati relativi agli spostamenti di cui alla figura Figura 67 e il corrispettivo di simulazione di cui alla Figura 70.

importante in una modellazione dettagliata come quella eseguita. Essa infatti deve portare in conto tutti i possibili meccanismi di collasso e l'evoluzione dei domini limite all'avanzare del danneggiamento.

#### **4.1.2 I motivi della scelta**

La scelta dei casi di studio proposti nel presente capitolo, considerando la stragrande varietà di casi offerta dall'architettura storica, è stata volutamente concentrata sui elementi architettonici di beni monumentali per i quali il Dipartimento già svolge attività di consulenza e/o monitoraggio attraverso convenzioni o altre forme di collaborazione. È stata privilegiata la possibilità di affrontare casi di studio nei quali i risultati ottenuti possono essere spunto per successivi ed ulteriori approfondimenti di indagine finalizzati tutti al conseguimento di un sufficiente livello di sicurezza delle strutture anche in virtù della fase di riparazione dei danni che nella nostra regione sta avvenendo a seguito dell'evento sismico del maggio 2012.

Nella consapevolezza che tale tipologia di indagine ed analisi possa essere estesa ad altre strutture, in prima istanza, a sostegno di quanto fino ad ora illustrato nello scritto sono stati identificati i seguenti casi di studio:

- I) Cattedrale di Parma: indagini sugli arconi in pietra della navata centrale; i risultati potranno essere utilizzati ed eventualmente implementati per approfondire il monitoraggio cui le strutture vengono sottoposte al fine di pianificare eventuali opere di manutenzione e restauro;
- II) Torre della Ghirlandina in Modena: indagini sugli archi di collegamento fra la torre e l'adiacente Cattedrale, per una migliore comprensione degli effetti di interazione tra le due strutture;
- III) Casa Romei in Ferrara: indagini sugli arconi posti al piano terra del cortile maggiore al fine di fornire supporto alle verifiche di sicurezza sismica finalizzate alla definizione degli interventi necessari per il ripristino e il miglioramento strutturale a seguito dei danneggiamenti occorsi con il sisma del maggio 2012.

Per ognuno dei casi studio, in attuazione del percorso conoscitivo e di ricerca fino a qui intrapreso, le verifiche sono state precedute da un'analisi della fabbrica nel suo complesso, intesa come organizzazione spaziale e strutturale nonché come sviluppo storico delle principali modifiche che l'hanno interessata; si è poi passati attraverso una disamina dei dissesti, dei quadri fessurativi e delle deformazioni che interessano le specifiche strutture indagate.

Lo studio vede poi la ricostruzione della presunta geometria originaria dell'elemento e la preparazione di due modelli distinti finalizzati al calcolo DEM, di cui il primo fa partire l'analisi dalla forma originaria ed il secondo da quella odierna, con applicazioni di paritarie condizioni al contorno in termini di vincoli e azioni.

## 4.2 Cattedrale di Parma

La Basilica Cattedrale di Parma vede la posa delle prime pietre nella seconda metà dell'XI secolo per essere successivamente terminata all'inizio del XII secolo. Danneggiata già dall'inizio della sua storia dal terremoto del 1117 (ma a tal proposito le cronache ed i documenti non permettono di definire con precisione l'entità dei danni<sup>80</sup>) è stata successivamente ricostruita, mantenendo l'originale impianto strutturale di prima fondazione, apportandovi numerose modifiche.

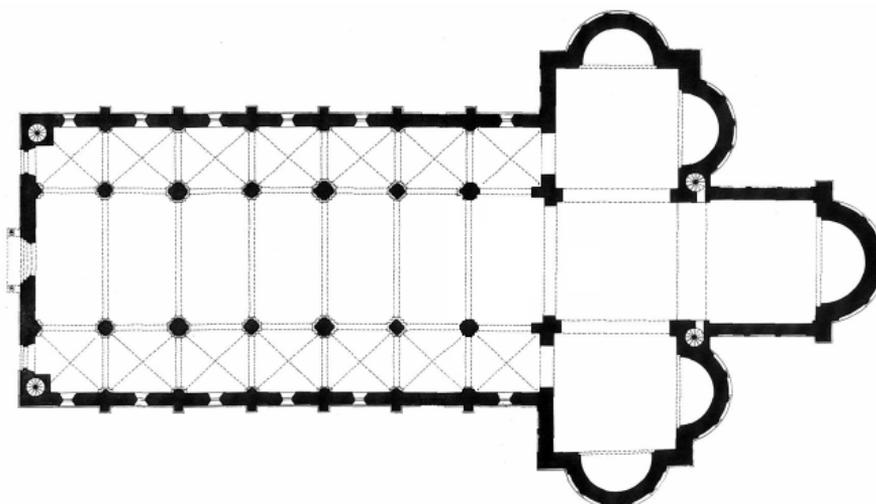


Figura 71 Cattedrale di Parma, ricostruzione planimetrica presunta al periodo di prima fondazione, XII secolo circa.

La pianta di fondazione, che si è mantenuta fino ai giorni nostri, presenta una chiesa con pianta a croce latina, corpo longitudinale in direzione ovest - est a tre navate voltate a crociera; matronei si sviluppano al di sopra delle navate laterali affacciandosi, al primo livello, sulla navata centrale. Il transetto poliabsidato, con sottostante cripta, che incrocia la

---

<sup>80</sup> Un terremoto di grado 8,1 della scala Mercalli colpisce la chiesa e causa crolli parziali; per individuare le parti crollate e ricostruite, in assenza di documenti, è necessario "leggere" le murature, i materiali, le tecniche e i dissesti: si mostra così che sono crollate le parti superiori dei muri longitudinali e della facciata e di conseguenza le volte originarie a base quadrata. Per uno studio ed approfondimento sull'aspetto storico costruttivo: Carlo Blasi, Eva Coisson (a cura di) Il terremoto del 1117 e le conseguenze dell'architettura del XII secolo, in "La Fabbrica del Duomo di Parma", grafiche STEP editore, 2006.

navata centrale nella parte terminale a est, genera uno spazio quadrangolare coperto dalla grande cupola in muratura di sezione acuta poggiante su tamburo ottagonale. La facciata a capanna, a ovest, risulta invece interamente ricoperta esternamente da elementi in pietra che sono stati addossati all'originale in muratura.

Sono quindi identificabili, legati ai molteplici interventi che nel corso del tempo si sono susseguiti, i seguenti materiali da costruzione: muratura prevalentemente in mattoni con alcuni elementi in pietra (facciata, pilastri, arconi, lesene e parte dei contrafforti), coperture originariamente in legno (con capriate su navata principale e transetti), oggi quasi interamente sostituite da strutture in cemento armato risalenti alla seconda metà del XX secolo sulla navata principale.

#### **4.2.1 Cenni storici**

Sulle prime fasi costruttive della Cattedrale persistono ancora molti dubbi. Le due date certe sono il 1058, quando un incendio distrusse la precedente cattedrale, e il 1092, quando la presenza della nuova cattedrale viene citata in un documento, senza però specificare lo stato di avanzamento dei lavori; ne consegue quindi che è nella seconda metà del secolo XI che va collocato l'inizio della costruzione della struttura ecclesiastica.

Parma ed i suoi territori, in questo periodo, erano sotto il controllo del Sacro Romano Impero e le influenze di tale cultura sono facilmente riscontrabili. Solo nel 1106 la città tornerà ufficialmente sotto il controllo papale ed a questa data la chiesa era già stata, in buona parte, costruita; in particolare era completato il coro (dove i documenti storici riportano una predica nel 1104) e tutta la parte absidale ad est, con una sorprendente somiglianza con il Duomo di Spira<sup>81</sup>, modello dell'architettura romanica imperiale. Questa somiglianza si interrompe bruscamente al passaggio tra

---

<sup>81</sup> Il Duomo dei Santi Maria e Stefano di Spira, Renania, Germania, la cui prima edificazione risale al periodo fra il 1030 ed il 1061 ad opera dell'imperatore Corrado II e di cui nel 1080 l'imperatore Enrico IV ne ordina la riedificazione, rappresenta uno dei principali esempi di architettura romanica giunti fino a noi in cui si riscontra la presenza di deambulatorio del matroneo ad archetti sorretti da colonne e posto in alto vicino al tetto ( <http://whc.unesco.org/en/list/168>, <http://www.dom-speyer.de> )

transetto e navata centrale, a testimonianza del mutato orientamento politico della città che doveva riflettersi anche sulle forme della nuova Cattedrale: la loggia esterna si interrompe, all'interno si introducono i matronei e addirittura i pilastri che separano le navate sono più larghi in alcuni punti dei muretti di fondazione che erano stati realizzati in precedenza per sorreggerli, a testimonianza di questo cambiamento progettuale.

La facciata, interamente ricoperta da blocchi di pietra squadrati, è quella tipica "a capanna" dell'architettura lombarda, con 2 ordini di loggette orizzontali e uno inclinato lungo gli spioventi e un protiro duecentesco davanti al portale maggiore; anche il campanile risale alla seconda metà del XIII secolo.



*Figura 72 Cattedrale di Parma, navata centrale vista dal presbiterio, gli abbassamenti in chiave degli archi e conseguentemente delle volte si evidenziano lungo tutta la navata.*

All'interno, i pilastri in pietra che sostengono le volte a crociera delle navate sono polistili, ovvero composti da un fascio di colonnette o paraste, ciascuna destinata a concludersi in un elemento architettonico della parte

superiore (costoloni, archi, cornici), anche se questa corrispondenza è oggi solo parziale, perché le attuali volte su pianta rettangolare sono state introdotte dopo il terremoto del 1117; i pilastri, che presentano l'alternata presenza di uno debole (di sezione minore) e uno forte (di sezione maggiore), avvalorano l'ipotesi<sup>82</sup>, sulla presenza in origine di un sistema di volte basato su pianta quadrata (e conseguentemente maggiormente spingente), a differenza dell'attuale che si sviluppa su pianta rettangolare.

La parte orientale, di ispirazione imperiale, ha una geometria molto pulita, composta da tre bracci sostanzialmente identici (i due transetti e il coro) che si articolano attorno alla cupola centrale. Questi tre bracci hanno pianta quadrata, sono coperti da volte a crociera (introdotte nella metà del XII secolo) e terminano con cinque absidi semicircolari coperte da semicupole. Sopra al presbiterio svetta la cupola a sesto acuto, con soprastante lanterna in muratura e copertura curva in legno e rame; essa poggia su un tamburo ottagonale che si collega, attraverso quattro pennacchi, ai quattro arconi posti su base quadrata che scaricano le loro sollecitazioni sui piloni posti in posizione angolare. Otto finestre circolari, dette "occhi", illuminano la cupola stessa ed i pregevoli affreschi dell'Assunzione della Vergine realizzati dal Correggio<sup>83</sup> fra il 1524 ed il 1530.

Sotto a tutta la parte orientale si estende la cripta, coperta da voltine a crociera poggianti su colonne in pietra, in uno stretto rapporto spaziale con la chiesa superiore. Una simile articolazione, con estensione non solo sotto al coro ma anche sotto ad entrambi i bracci del transetto, si trova ancora una volta nel Duomo di Spira, che di questa porzione del Duomo di Parma è stato modello ispiratore.

#### 4.2.2 Organizzazione ed evoluzioni delle strutture

Nella sua conformazione originaria, la sezione trasversale del Duomo di Parma era composta solo da una navata centrale affiancata da due navate laterali, tutte voltate. Le volte a crociera generano spinte puntuali in sommità

---

<sup>82</sup> Carlo Blasi, Eva Coisson, op.cit.

<sup>83</sup> Antonio Allegri detto il Correggio (Correggio 1489 - 1534).

ai pilastri polistili. Queste spinte sono contrastate dalla presenza di contrafforti esterni, che contribuiscono con il loro peso a “deviare” verso il basso le forze orizzontali. Inoltre, anche le volte delle navate laterali (originarie) e quelle dei matronei (inserite nel XVI secolo) contribuiscono con le loro spinte in direzione opposta a stabilizzare le murature longitudinali del cleristorio. L'aggiunta quattro-cinquecentesca delle cappelle laterali ha portato un ulteriore contributo alla stabilità, diventando un naturale prolungamento dei contrafforti. I tiranti metallici posti alle imposte degli archi trasversali, sia nella navata centrale che in quelle laterali, sono stati inseriti dopo la costruzione (forse nel XII secolo) per assorbire parte della spinta delle volte e aiutare i contrafforti, che sono stati più volte rialzati in quanto insufficienti.

La struttura di copertura della navata centrale è basata su un sistema di capriate (originariamente in legno, oggi in cemento armato) che pertanto non esercitano spinte sulle murature longitudinali, ma per alcuni secoli è stato presente un sistema di capriate con catena spezzata e inclinata che ha aggravato le condizioni delle murature longitudinali. Sulle navate laterali e sulle cappelle sono invece presenti delle travi inclinate, che oggi terminano in un cordolo in c.a. che ne assorbe le spinte.

Nella zona del presbiterio, le spinte delle volte su transetti e coro sono contrastate dalle cinque semicupole delle absidi.

La cupola ha una sezione a sesto acuto: questo favorisce il sostegno alla lanterna in muratura posta in sommità e riduce le spinte alla base. La copertura in legno e rame (inserita in occasione dei lavori del Correggio, per proteggerne meglio gli affreschi) poggia sopra il tamburo, che con il suo peso contribuisce a verticalizzare le spinte. La cupola ha pianta ottagonale e trasferisce il suo peso attraverso i pennacchi su quattro grandi arconi che poggiano a loro volta sui piloni d'angolo.

La pavimentazione del presbiterio poggia sulle volte a crociera e sulle colonne in pietra dell'ampia cripta seminterrata.



*Figura 73 Cattedrale di Parma, sottotetto della navata centrale, gli interventi alle coperture del 1951 vedono la creazione di una nuova struttura con capriate in conglomerato cementizio armato e travetti prefabbricati che, rispetto alle precedente lignea, presenta una massa maggiore.*

### **4.2.3 L'arcone della navata**

#### *4.2.3.1 Quadro dei dissesti*

La struttura degli arconi, ad oggi, presenta una forma non più in linea con quella pensata dagli architetti che ne hanno seguito l'edificazione; i dati di rilievo e le campagne di verifiche eseguite<sup>84</sup> in molteplici occasioni hanno messo in evidenza una rotazione delle murature longitudinali verso l'esterno la cui causa è da ricercarsi in molteplici fattori che si sono succeduti nel corso del tempo.

---

<sup>84</sup>Carlo Blasi, Eva Coisson, opera citata.



*Figura 74 Cattedrale di Parma, arconi trasversali della navata centrale, evidenti segni di deformazioni con forte abbassamento della chiave che ha portato ad un profilo intradossale della parte centrale dell'arco tendente all'orizzontalità.*

In primo luogo vanno individuate le spinte trasversali delle volte della navata centrale (in alcuni casi enfatizzate da eventi sismici) ed altresì l'originale mancanza dei contrafforti superiori (edificati successivamente alla data di fondazione) per arrivare anche alla presenza di cedimenti verticali differenziali fra la parte nord e quella sud. Il risultato è il manifestarsi di una perdita di verticalità (o fuori piombo) dei pilastri principali che all'imposta degli arconi raggiunge valori di circa 20 cm; tale conformazione ha prodotto nelle strutture arcuate una perdita delle forma con uno schiacciamento in chiave e con conseguente abbassamento della volta a crociera che ad essi si appoggia.

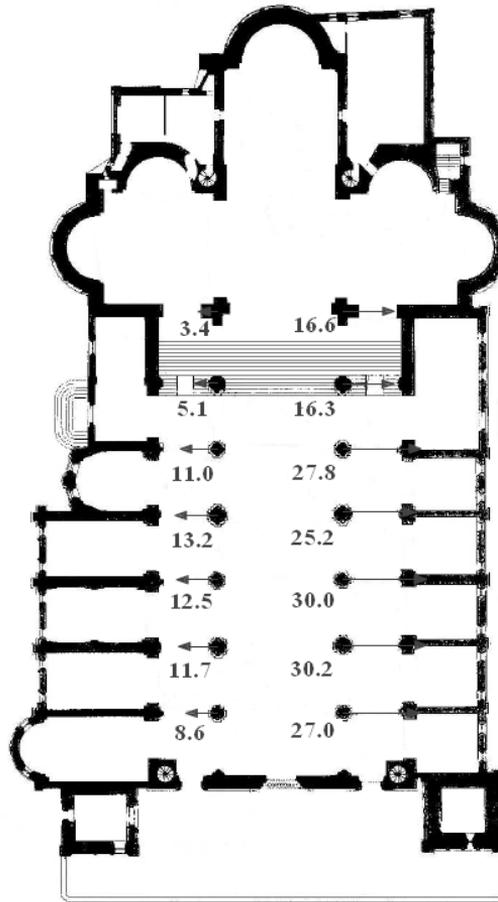


Figura 75 Cattedrale di Parma, pianta di rilievo dello stato attuale, valori (espressi in cm) rilevati dei fuori piombo dei pilastri della navata centrale.

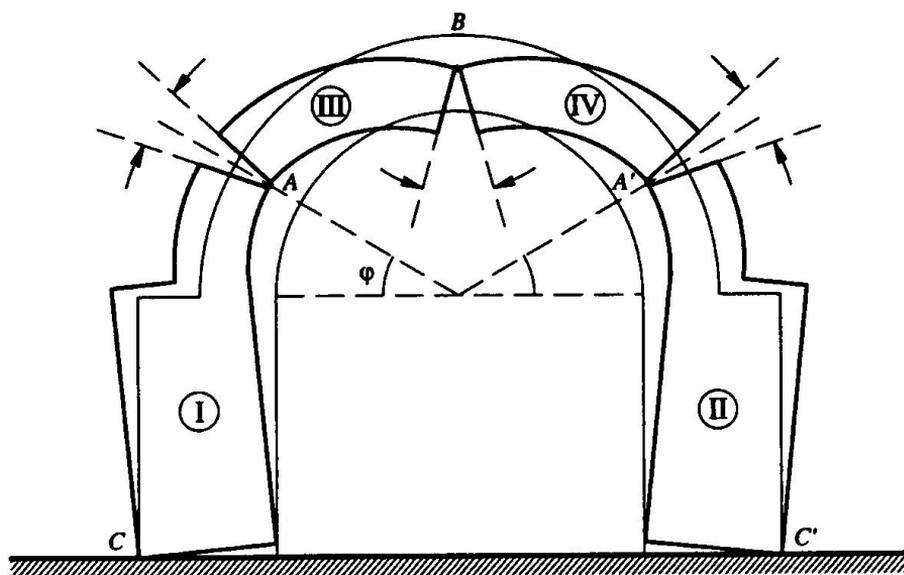


Figura 76 Schematizzazione del dissesto degli arconi, tipologia già conosciuta dagli antichi progettisti, sviluppa un meccanismo di rottura che prevede la formazione di cerniere all'intradosso (A) ed all'estradosso (B) della struttura.<sup>85</sup>

#### 4.2.3.2 Modellazione

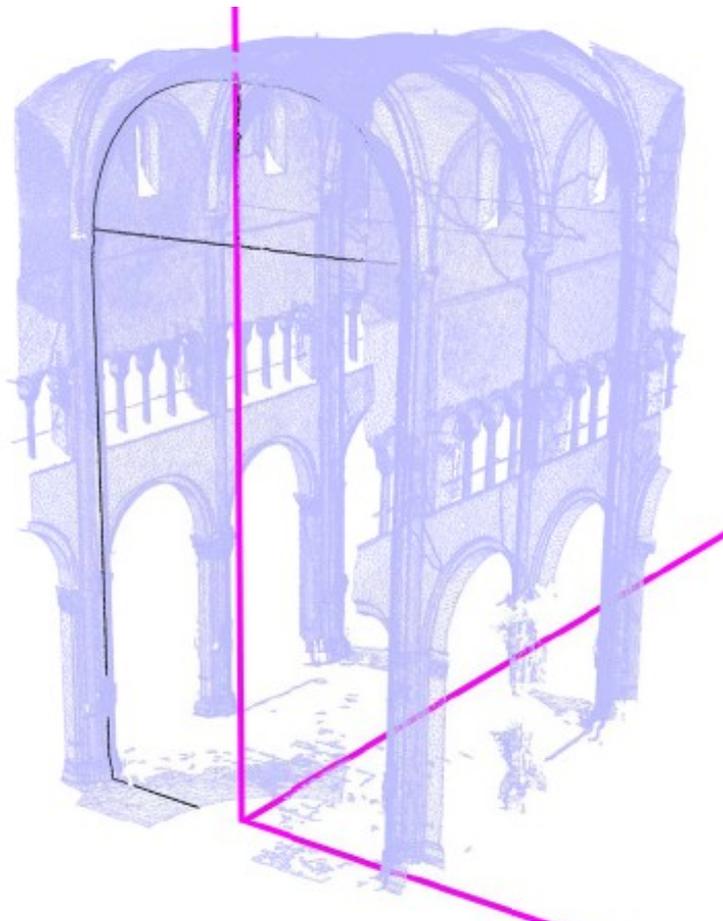
Alla base delle verifiche strutturali nel seguito illustrate vi è stata una preliminare fase tesa alla ridefinizione della geometria originaria indeformata da porre come base delle successive modellazioni.

L'utilizzo, durante la campagna di rilievi e di indagini del 2004-2006 effettuata dal Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura dell'Università degli Studi di Parma, di tecnologia con laser a scansione ha permesso di avere a disposizione, limitatamente alla porzione centrale della navata principale, un accurato rilievo tridimensionale dal quale è stato possibile estrapolare una dettagliata curva delle deformazioni

<sup>85</sup> Lorenzo Mascheroni propose nel suo lavoro *Nuove ricerche sull'equilibrio delle volte* (1785) un meccanismo a rottura dell'arco che prevede una rottura multipla e la formazione di lesioni all'intradosso in chiave e all'estradosso alle reni. Il meccanismo è più realistico di quello di De Belidor poiché prevede una rottura per effetto della rotazione di parti rigide (dovuta alla formazione delle cerniere e non per scivolamento). Si può vedere la struttura come un sistema articolato di 4 corpi rigidi (I, II, III, IV) vincolati a cerniera esternamente in C e C', e internamente in A, A' e B.

attualmente in essere ed altresì valutare e quantificare l'entità delle perdite di verticalità (fuori piombo) dei pilastri su cui insistono gli archi oggetto di indagine.

Mediante elaborazione dei dati di rilievo in computer grafica (Rhinceros) è stato possibile estrapolare i profili bidimensionali, nella loro versione deformata attuale, in corrispondenza dei 3 pilastri interessati dal rilievo; altresì con la stessa procedura si sono estrapolate, dalle sezioni longitudinali, i dati relativi agli abbassamenti delle volte quadripartite che si sviluppano fra gli arconi principali.



*Figura 77 Cattedrale di Parma, modello tridimensionale a mesh triangolari della porzione centrale della navata principale, utilizzo della computer grafica (Rhinceros) per l'estrapolazione della sezione bidimensionale trasversale di interesse nel suo stato deformato (piano di sezione X, Z).*

Per la ricostruzione dello stato geometrico presunto originale ed “indeformato”, se si escludono ovviamente le normali incertezze di realizzazione tipiche del lavoro manuale, si è proceduto seguendo un processo logico che, in fasi successive, potesse essere ripercorso mediante algoritmo generale; le ipotesi poste alla base di questo processo sono state:

- Originaria verticalità dei pilastri, ricostruita partendo dalla posizione a terra (ipotesi che non vi siano traslazioni orizzontali alla base degli stessi);
- Rotazione rigida del pilastro, che permette di ricostruire geometricamente l'altezza, all'imposta dell'arco indeformato con compensazione dei cedimenti differenziali;
- Arco indeformato considerato a tutto sesto<sup>86</sup>.

Gli aspetti di natura geometrica qui descritti sono stati rielaborati mediante sequenze logiche di comandi in un algoritmo di Grasshopper sia al fine di garantire un controllo sui parametri al contorno con la conseguente rapidità di modifica delle geometrie, sia per poter poi riutilizzare quanto realizzato per i casi di studio successivi.

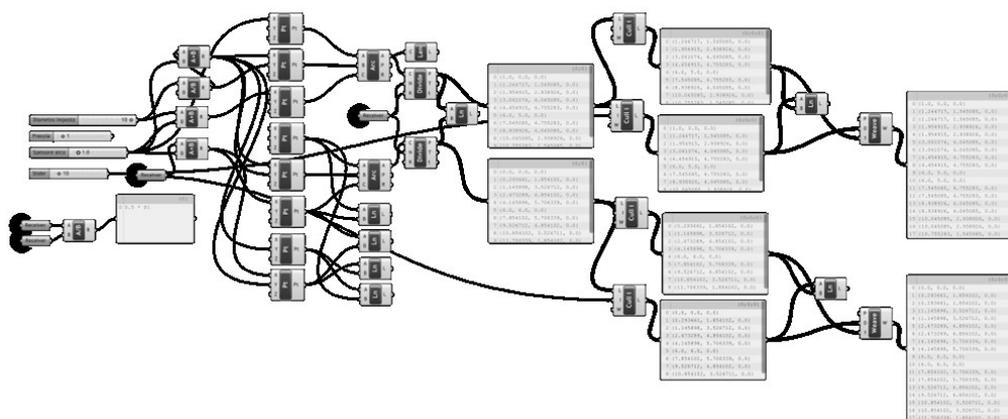


Figura 78 Algoritmo in ambiente GH, realizzazione di arco con le condizioni al contorno imposte, discretizzazione in un numero finito di elementi (conci), estrapolazione delle coordinate bidimensionali (Xp;Yp).

<sup>86</sup> La conformazione di arco a tutto sesto è suggerita sia dallo studio della trattatistica storica relativa a tali costruzioni ma altresì per i riferimenti storico architettonici cui l'edificio si ispira.

La procedura prevede, identificato il piano di intersezione verticale del modello tridimensionale di rilievo, la definizione da parte dell'operatore del punto considerato come la posizione della cerniera cilindrica rispetto alla quale il pilastro ha ruotato e la posizione sommitale della quota di imposta dell'arco; lo strumento informatico ricostruisce, mediante funzioni parametriche, il profilo intradossale dell'arco in oggetto andando a calcolare le posizioni spaziali dei punti di inizio e fine di ogni concio<sup>87</sup>

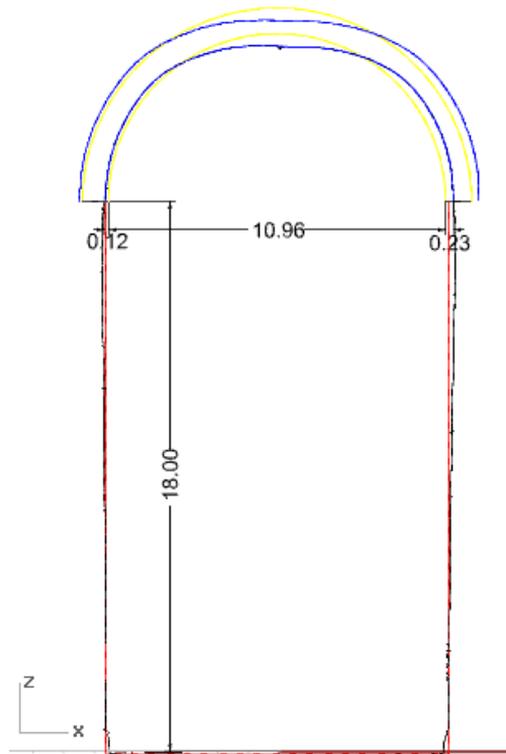


Figura 79 Modello geometrico comparativo (su piano X, Z) fra la configurazione originale indeformata dell'arco (giallo) e dei piloni (rosso) e la configurazione attuale desunta dal rilievo sia dell'arco (blu) che dei pilone (nero).

Per gli scopi della presente ricerca, sono state separatamente utilizzate le due differenti geometrie individuate (Figura 79), per la generazione, in ambiente UDEC, di due modelli distinti di cui il primo in

<sup>87</sup> Si precisa che, nella procedura adottata, si ipotizza che le facce di contatto fra i vari conci abbiano un andamento radiale e tale condizione definisce altresì il calcolo delle posizioni estradossali dei punti di inizio e fine dei vari conci, necessarie a definire la geometria complessiva.

rappresentazione dell'originaria conformazione ed il secondo di quella oggi visibile; sono state inoltre considerate costanti le caratteristiche dei materiali e le condizioni al contorno nei modelli:

- Materiale:
  - Pietra: Densità 2700, angolo di attrito 35°
  - Laterizio: Densità 1800, angolo di attrito 30°
- Arco discretizzato, in entrambe le configurazioni di analisi, in un numero finito di 50 conci<sup>88</sup>;
- Carichi superiori per la presenza di volta (considerati decrescenti, procedendo dalla chiave verso le imposte, per meglio simulare l'andamento dell'area di influenza)<sup>89</sup>
- Sono stati modellati le estensioni superiori delle murature al fine di attenuare l'effetto di compressione verticale indotto dall'azione dei carichi proveniente dalla superiore muratura e dalla copertura a falde<sup>90</sup>.

Specificatamente per l'analisi del modello indeformato sono stati imposti, in accordo con quanto desumibile dai confronti geometrici, i seguenti spostamenti all'imposta dell'arco: -12 cm a sinistra e 23 cm a destra<sup>91</sup>.

---

<sup>88</sup> In fase di ricerca sono state effettuate prove di sensitività relative al numero di elementi in cui scomporre l'arco (non essendo a disposizione dati a tal proposito ed essendo impossibilitata un'indagine in loco vista la presenza di affreschi e decori nella parte intradossale e di una cappa in conglomerato cementizio nella parte estradossale) andando a verificare che l'utilizzo di elementi di minor dimensione in numero maggiore non andasse ad influenzare, se non in minima parte considerate e dimensioni della struttura, i risultati, a parità di altre condizioni al contorno.

<sup>89</sup> Le azioni agenti sono state individuate mediante considerazioni sull'area di influenza delle porzioni di volte, per il solo peso del materiale e senza l'applicazione dei coefficienti previsti per i carichi strutturali dalla N.T.C. 2008.

<sup>90</sup> Sono state eseguite prove anche relativamente all'aumento di peso indotto sulle murature verticali dalla sostituzione dell'originale tetto a struttura lignea con quello a struttura laterocementizia che, pur inducendo maggiori tensioni di compressione nella muratura non influenzano in modo significativo il comportamento dell'arco, essendo che la componente di spinta orizzontale da essi indotta è contrastata ora dalla presenza della catena metallica.

<sup>91</sup> Rotazione rispettivamente dei piloni a nord ed a sud della fabbrica.

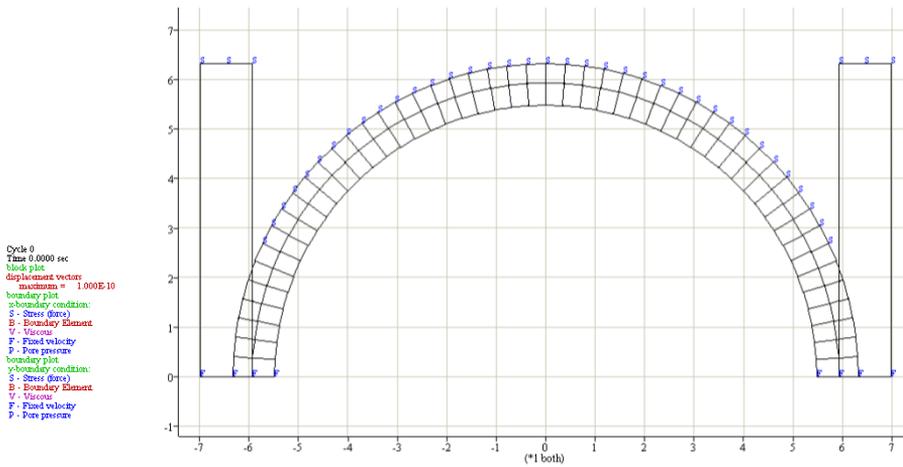


Figura 80 Modello ad elementi distinti, in ambiente UDEC, riportante la geometria originale ricostruita, con indicazione delle principali condizioni al contorno di stress (S) e vincoli (F).

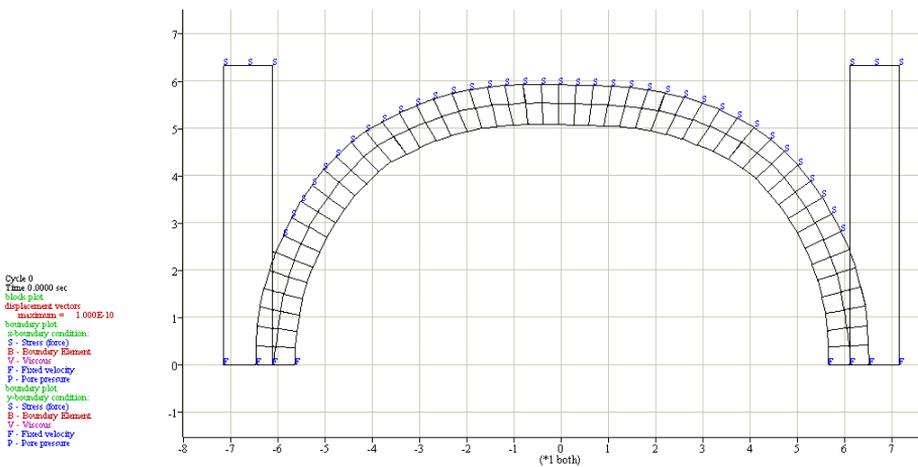


Figura 81 Modello ad elementi distinti, in ambiente UDEC, riportante la geometria nella conformazione attuale risultante dal rilievo, con indicazione delle principali condizioni al contorno di stress (S) e vincoli (F).

Lo studio relativo alla configurazione indeformata, al fine di coerentemente seguire i propositi illustrati nei capitoli precedenti, ha seguito due distinte fasi di cui la prima relativa alla sola applicazione dei carichi gravitazionali, al fine di simulare il comportamento iniziale della struttura e la messa in carico della stessa (Figura 82).

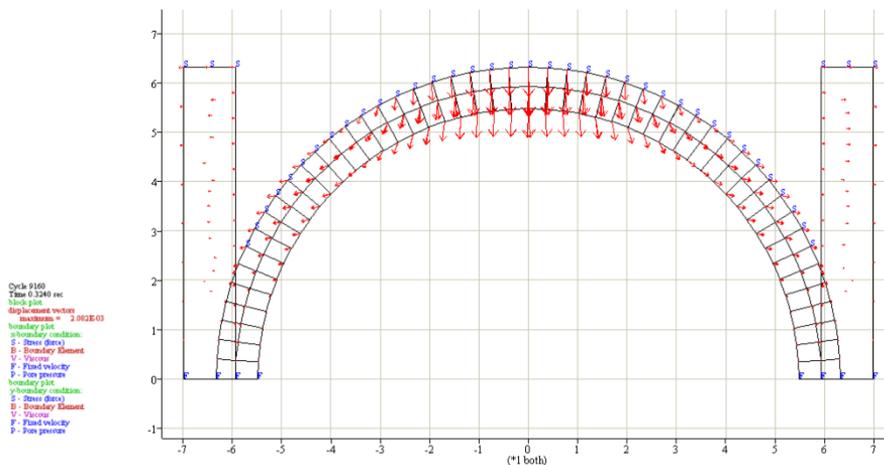


Figura 82 Modello, in ambiente UDEC, della geometria originale con indicazione degli spostamenti (rosso) dei singoli blocchi dovute all'applicazione dei soli carichi gravitazionali.

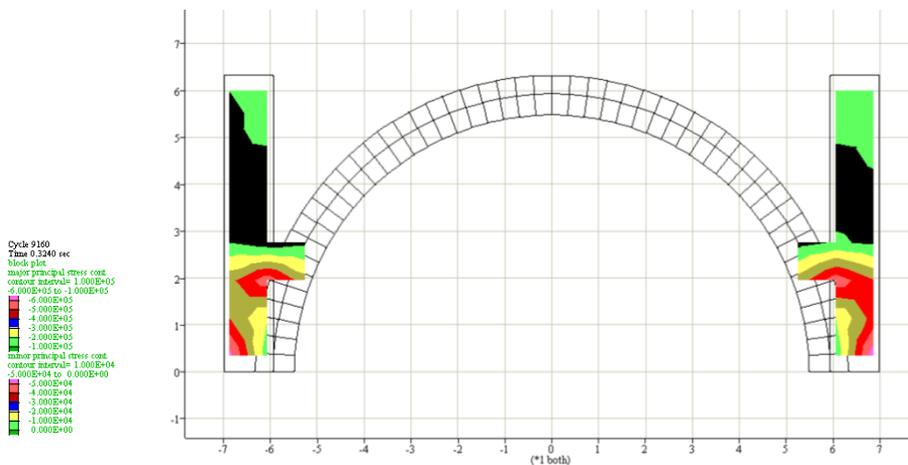


Figura 83 Modello, in ambiente UDEC, della geometria originale con indicazione delle tensioni principali sviluppatesi all'interno dei singoli blocchi dovute all'applicazione dei soli carichi gravitazionali.

La successiva applicazione, per passi incrementali, degli spostamenti delle imposte dell'arco ha permesso di ricostruire invece il percorso della struttura attraverso i secoli, apprezzando come, mantenendo invariate le condizioni di carico e vincolo, la configurazione geometrica dell'arco si sia a poco a poco avvicinata allo stato di fatto in essere andando altresì ad individuare alcune parzialiizzazioni nei contatti fra i blocchi che trovano corrispondenza nello stato dei luoghi.

Si sono così presi in considerazione globalmente gli effetti, altrimenti non singolarmente identificabili, dei cedimenti, dei diversi sismi, della

viscosità delle murature sottoposte alle spinte delle volte, delle numerose modifiche costruttive intervenute. Si è quindi sfruttato il monumento come documento di se stesso, come esperimento in scala reale di cui si conoscono i risultati solo in termini di spostamento, per andare a ricostruirne gli aspetti tensionali, che sono quelli che più interessano ai fini della definizione del livello di sicurezza attuale.

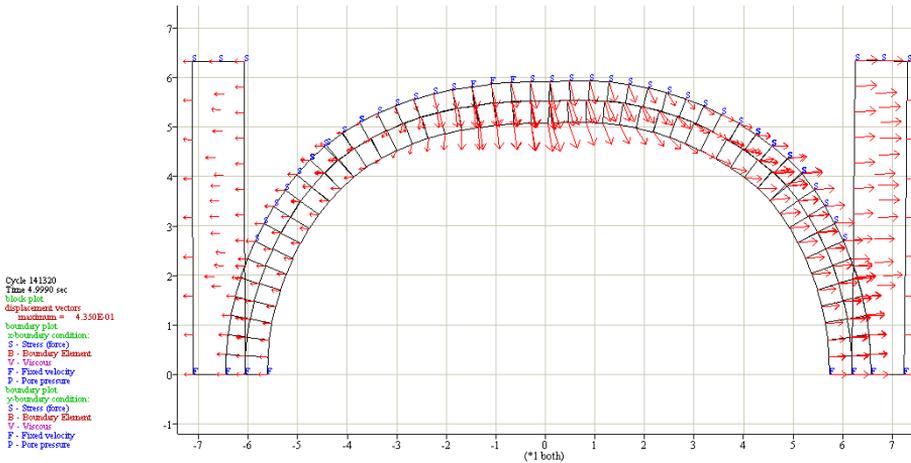


Figura 84 Il progressivo incremento nello spostamento delle imposte dell'arco provoca una nuova configurazione di equilibrio all'interno dei blocchi che, in alcuni casi, perdono l'originale interfaccia di contatto per generarne di nuove; l'analisi permette di apprezzare l'apertura di fessurazioni intradossali e la parzializzazione delle superfici di contatto fra i blocchi.

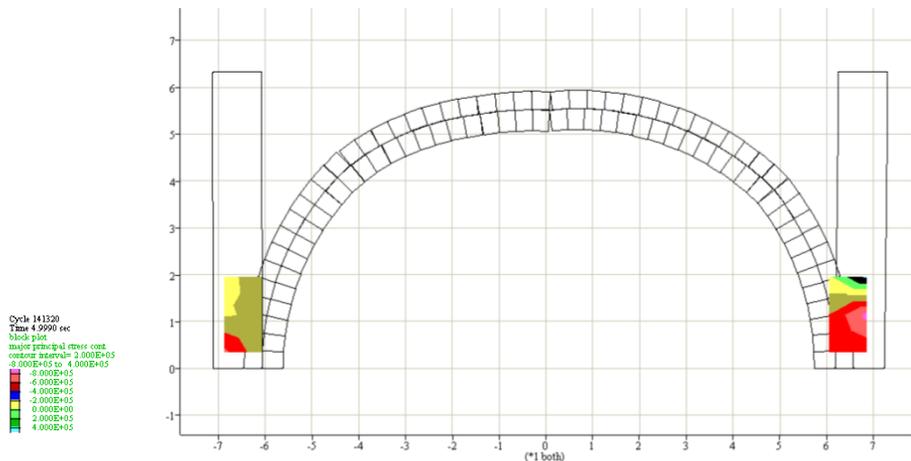


Figura 85 La nuova configurazione geometrica dell'arco ed i nuovi equilibri instauratisi fra i blocchi porta ad una variazione dello stato tensionale interno alla struttura.

La modellazione della configurazione deformata vede invece un processo che si articola, dal punto di vista concettuale, in una sola fase: l'applicazione delle azioni gravitazionali sulle strutture così come rilevate nello stato attuale. Le deformazioni legate alle perdite di verticalità delle strutture verticali sono infatti già insite nella configurazione geometrica del modello.

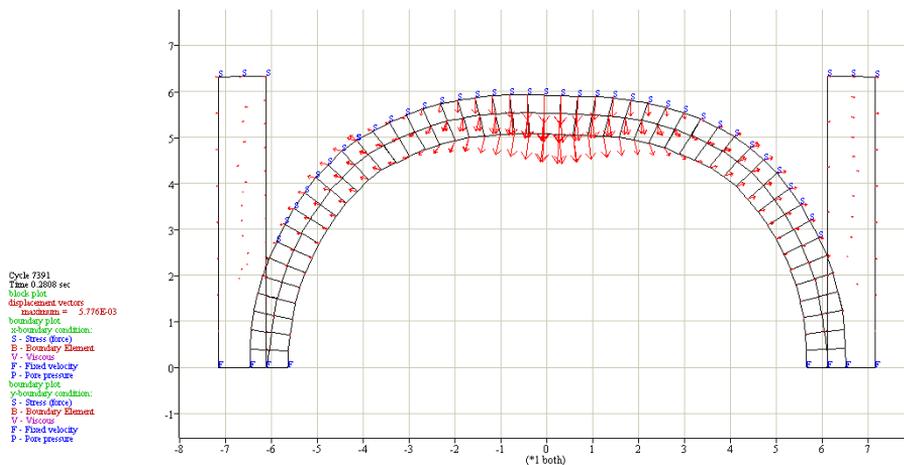


Figura 86 L'applicazione dei carichi alla configurazione deformata provoca il formarsi di cedimenti, di piccole dimensioni nella parte centrale della struttura legate soprattutto all'estrema orizzontalità della stessa.

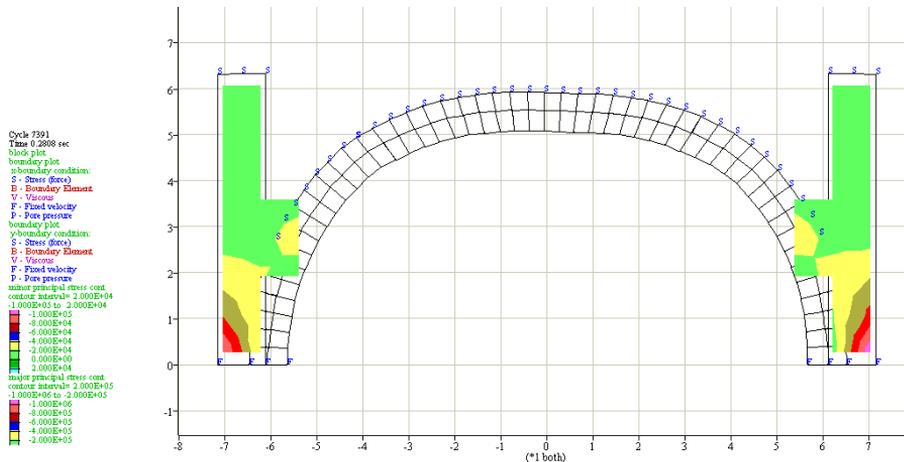


Figura 87 Analisi delle tensioni interne alla struttura.

Da un punto di vista qualitativo, considerando la non disponibilità di dati estremamente precisi relativi alle caratteristiche meccaniche dei materiali dei blocchi e dei giunti fra di essi interposti, il primo modello (Figura

81) ha ottenuto una conformazione geometrica finale molto simile allo stato di fatto desumibile dal rilievo; risultato però ottenuto mediante l'applicazione della storia degli spostamenti e deformazioni cui la struttura è stata sottoposta.

Relativamente all'analisi delle tensioni interne ai materiali, il confronto fra i risultati ottenuti con le due conformazioni di calcolo mette in risalto una differenza (Figura 85, Figura 87) nell'andamento delle stesse legata alla diversa conformazione che i blocchi hanno assunto nelle due prove con discrepanze di circa  $\frac{1}{15}$  in termini di variazioni assolute.

Mentre nella prima, l'imposizione di un cedimento per il raggiungimento della geometria finale ha permesso di apprezzare il cambiamento nelle interfacce e nei punti di contatto, con la nascita di fratture e parzializzazioni nei giunti fra i blocchi, nella seconda simulazione ciò non è accaduto perché partendo da una configurazione geometrica deformata a priori le interfacce dei blocchi erano continue e l'analisi ha visto l'apparire di parzializzazioni solo in minima parte. Nello specifico di questo caso di studio le tensioni massime di compressione sono maggiori nella modellazione che parte dalla configurazione indeformata rispetto a quella deformata.

Questi risultati dimostrano i notevoli limiti delle procedure che vedono un rapporto diretto e automatico tra il modello rilevato e il modello analizzato strutturalmente. Queste procedure, che, come mostrato nei capitoli precedenti, stanno trovando sempre maggiore diffusione, rischiano infatti di sovrastimare pericolosamente il livello di sicurezza della struttura.

### 4.3 Torre della Ghirlandina di Modena

Parlare della Torre delle Ghirlandina, detta anche Torre di San Geminiano<sup>92</sup>, significa, per gli aspetti di interesse di questa ricerca, allargare lo sguardo anche all'adiacente Duomo di Modena al quale è sempre stata indissolubilmente legata non solo per aspetti storici ma anche per la presenza di strutture di collegamento: il corpo di collegamento appunto alla cui base sono presenti gli arconi oggetto di studio.



*Figura 88 Scorcio di Piazza Grande con la Ghirlandina, le absidi del Duomo e il Palazzo comunale in scorcio.*

Essi, infatti, non solo rappresentano il punto di accesso dal Duomo alla Torre ma, per il comportamento strutturale dei due monumenti, rappresentano anche un elemento fondamentale per la loro stabilità reciproca andando a ostacolare quella rotazione che, per effetto dell'incremento dei cedimenti differenziali, sta avvenendo da secoli.

---

<sup>92</sup> Dal nome del Santo il cui corpo è custodito all'interno di una teca posta nella cripta dell'adiacente cattedrale.

A differenza del Duomo, per il quale ampia documentazione permette una ricostruzione storica sostanzialmente univoca<sup>93</sup>, altrettanto non si può affermare della torre, per la quale esistono ricostruzioni cronologiche discordanti dovute alla parziale assenza di documentazione archivistica relativa alle fasi di prima costruzione. Allo stato attuale degli studi in merito si è concordi nell'affermare che la costruzione della torre ebbe presumibilmente inizio con quella della fabbrica del duomo<sup>94</sup> in un arco temporale compreso fra il 1099 ed il 1106; entrambi i cantieri videro la presenza, sotto la guida dell'arch. Lanfranco<sup>95</sup> delle medesime maestranze e altresì l'utilizzo dei medesimi materiali quali laterizi, materiali lapidei, marmi<sup>96</sup>.

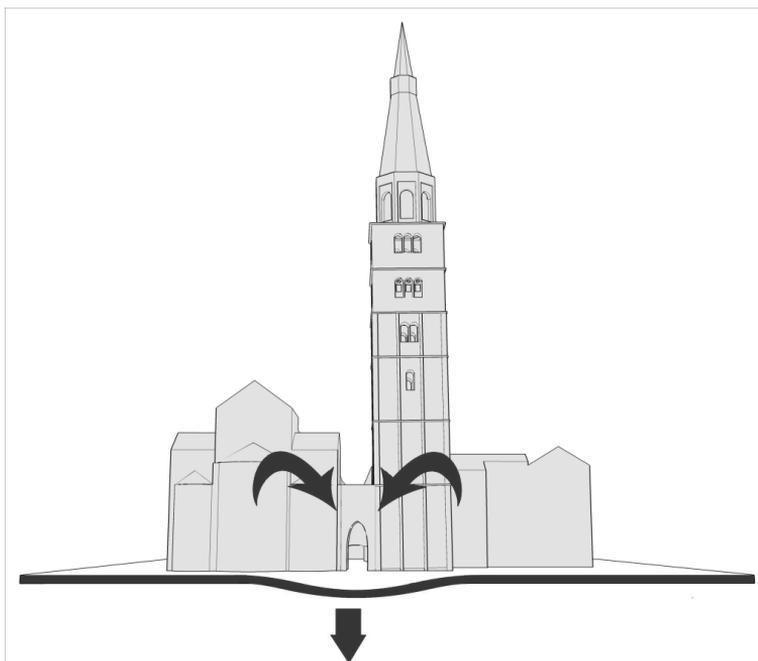
---

<sup>93</sup> A questo proposito è in corso di pubblicazione un volume con un interessante contributo di Elena Silvestri che rivede le fasi costruttive in funzione dell'evolversi dei dissesti generati dallo sprofondamento della vicina Ghirlandina.

<sup>94</sup> Cristina Dieghi, *Fonti e studi per la storia delle Ghirlandina*, in Rossella Cadignani (a cura di), *La torre Ghirlandina. Un progetto per la conservazione*, Roma, Luca Rossella Editore, 2009, pp.48–65.

<sup>95</sup> AA.VV., *Quando le cattedrali erano bianche*, Modena, Edizioni Panini, 1985.

<sup>96</sup> Stefano Luigi, Cesare Andrea Papazzoni, Silvia Gavioli, Carlotta Melloni, Giulia Rossetti, Simone Tintori, Riccardo Zanfognini, *Le pietre della torre della Ghirlandina*, in Rossella Cadignani (a cura di), *La torre Ghirlandina. Un progetto per la conservazione*, Roma, Luca Rossella Editore, 2009, pp.96-117.



*Figura 89 Schematizzazione dei cedimenti della torre della Ghirlandina e della fabbrica del Duomo nella sua porzione absidale; la convergenza dei movimenti sottopone gli archi intermedi a sforzi di compressione orizzontale e cedimenti verticali differenziali.*

### 4.3.1 Cenni storici

La ricostruzione dello sviluppo storico delle torre passa forzatamente attraverso un'analisi delle varie teorie che nel tempo si sono succedute non essendovi, come citato, univocità nella definizione dello sviluppo storico. Con la cronaca redatta a cura di Francesco Panini<sup>97</sup> (fine '500 circa) hanno inizio le tesi sulla costruzione della torre che, almeno per i primi periodi, si rivelano poco approfondite. Il cronista ritiene infatti che il campanile sia opera dell'architetto Lanfranco e sia sorto contemporaneamente alla cattedrale, ma solo fino a dove giunge la parte quadrata, e siano realizzati con lo stesso materiale di recupero; Panini attribuisce la Ghirlandina allo stesso tempo in cui a Reggio si edificò la torre della Basilica di San Prospero<sup>98</sup> e a Bologna

<sup>97</sup> Francesco Panini, Cronica delle città di Modena, Rolando Rossi, Roberto Montagnani (a cura di), Modena, Edizioni Panini, 1978.

<sup>98</sup> Giuseppe Cappelletti, Le chiese d'Italia dalle origini fino ai giorni nostri, Venezia, Giuseppe Antonelli, vol.XV, pp.365-367.

quella degli Asinelli, finita nel 1108. Successivamente, in una relazione datata 27 giugno 1569 il Barbieri<sup>99</sup>, cancelliere perpetuo della comunità, aveva raccolto dagli antichi documenti comunali le notizie relative alla sua origine, alla funzione difensiva, alla continua proprietà comunale e gli obblighi del Comune verso la Fabbriceria laica ed altresì, basandosi su manoscritti antichi<sup>100</sup> ipotizza che la torre dovesse già esistere ai tempi della costruzione della cattedrale in quanto sarebbe stata di epoca romana e ad uso militare e difensivo, aspetto per lui sostenuto dalla sua presenza a margine dell'allora via consolare. Infine è il Vedriani<sup>101</sup> ritiene che la torre sia stata edificata fino alla fine della parte quadrata all'epoca di re Desiderio (sec.VIII) facendo riferimento ad una lapide nella stanza dei torregiani.

Sono gli studi, maggiormente approfonditi dei precedenti, condotti da Carlo Borghi<sup>102</sup>, che portano alla possibilità di ritenere la torre e l'adiacente duomo contemporanei in quanto egli osserva per primo l'importanza dell'inclinazione del campanile e pensa che la pendenza debba risalire a prima del 1319 perché nella parte ottagonale l'inclinazione è corretta verso sud e descrive poi il piano interrato notando che il pilastro di sud-ovest è più grosso degli altri e con il Valdrighi<sup>103</sup>, nel 1876, viene documentata la possibilità del suo antico uso di difesa del comune con Azzo D'Este nel 1306. Con l'opera di Dondi<sup>104</sup>, dell'ordine dei Canonici di Padova, si acquisiscono nuove informazioni e per la torre vengono suggeriti tre tempi di cui il primo, del 1159, deriva da un'iscrizione su un bassorilievo romano sul lato est sotto la seconda cornice<sup>105</sup>, ed i successivi del 1261 e 1319 derivano dall'osservazione dell'inclinazione delle torre stessa: fino al quinto piano pende verso Sud ed è stata completata entro il 1159, nel sesto è orizzontale

---

<sup>99</sup> ASCMo, Miscellanea Cose varie, F. I, fasc. 2.

<sup>100</sup> I documenti presi a riferimento sono "Il libro della Cronica" e "Relatio" di cui all'Archivio Capitolare di Modena, codice 0,II,11.

<sup>101</sup> Ludovico Vedriani, *Historia dell'antichissima città di Modena*, Modena 1667.

<sup>102</sup> Carlo Borghi, *Il Duomo ossia cenni storici e descrittivi della Cattedrale di Modena*, Modena, Cappelli, 1845, pp.155-156.

<sup>103</sup> Luigi Francesco Valdrighi, *Delle storie di Modena*, Modena, 1876.

<sup>104</sup> Antonio Dondi, *Notizie storiche ed artistiche del Duomo di Modena raccolte e ordinate dal canonico A.D. coll'elenco dei codici capitolari in appendice*, Modena, 1896.

<sup>105</sup> In altri studi la stessa incisione viene letta come 1106, 1169, 1179 e 1209

ed è stato completato successivamente. Nell'ultimo quarto del XIX secolo sono altresì gli studi del Sandonini a destare interesse in quanto, riferendo di campagne di scavo eseguite in aree limitrofe alla torre riporta l'individuazione di tre strati di selciato per il progressivo innalzarsi del terreno, al di sotto del quale si trova lo zoccolo di mezzo metro che fa da basamento alla torre, più giù ancora viene scoperto un muro di mattoni regolari fino a tre metri di profondità, al di sotto del quale la muratura si fa irregolare e da ciò conclude che la torre sia stata costruita su un edificio precedente ed altresì, avendo individuato a cinque metri di profondità il selciato romano della via Claudia, che la torre e il duomo siano contemporanei perché la muratura della volta del sotterraneo è composta di mattoni manubriati come quelli impiegati nella costruzione del duomo e che la torre sia stata completata più tardi.

Sono però gli studi del XX secolo che offrono maggiori spunti di riflessione. Nella monografia sulla Cattedrale di Modena il Quintavalle<sup>106</sup> tratta del campanile indicando un rapporto modulare tra la torre nei primi quattro piani e la zona absidale della cattedrale; la sua tesi è dunque che il progetto lanfranchiano fosse limitato ai primi quattro piani, di cui il primo sarebbe nato insieme alla cattedrale, gli altri a seguire entro il 1130; in epoca campionesa si sarebbe provveduto ad ornare il campanile con le sculture dal secondo piano in su. La torre nel suo primitivo aspetto avrebbe quindi avuto il carattere di torre fortificata date le pochissime aperture e lo spessore delle murature; al culmine poi sarebbe stata conclusa da una merlatura in pietra e agli anni 1160 e 1170 sarebbe da assegnarsi il quinto ripiano.

Di poco posteriore è l'ipotesi del Salvini<sup>107</sup> che ritiene la parte quadrata della torre costruita tra il 1161 e 1179 fino al quinto piano, in quanto un decreto emesso nel 1161 autorizzava a "cavar pietre" in città e in campagna con l'accresciuto fabbisogno di materiale edilizio a causa della costruzione della torre. Fu sopraelevata poi di un altro livello nel 1261 e

---

<sup>106</sup> Carlo Arturo Quintavalle, *La cattedrale di Modena: problemi di romanico emiliano*, Modena, 1964, vol.2.

<sup>107</sup> Erika Frigeri, *Il duomo di Modena tra filosofia e storia*, Verona, Gabrielli Editore, 2004, p.56 e Roberto Salvini, *Il duomo di Modena e il romanico nel modenese*, Modena, 1966.

coronata con quattro torrette cuspidate, poi distrutte. La cuspide ottagonale sarebbe opera di Enrico da Campione nel sec. XIV . Secondo il Salvini, il luogo dove far sorgere la torre sarebbe stato già prescelto da Lanfranco e non si può escludere che fossero già state gettate le fondamenta, ma è probabile che i lavori di costruzione furono intrapresi soltanto al tempo dei Campionesi, perché carattere campionese presentano tutti gli elementi architettonico-decorativi e tutte, salvo quelle antiche di reimpiego, le sculture che adornano il monumento.

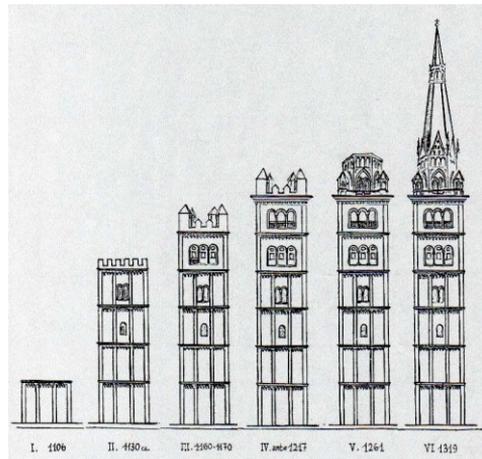
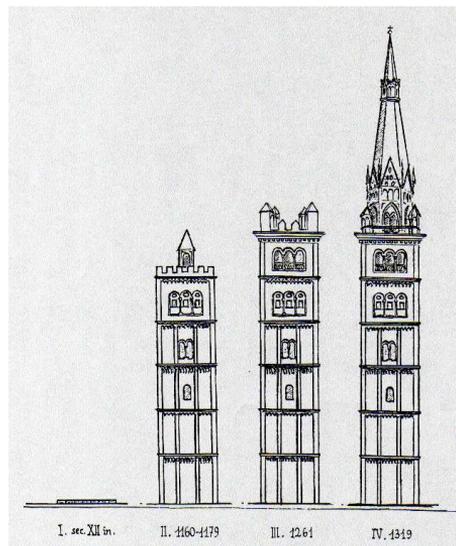


Figura 90 Carlo Arturo Quintavalle, ricostruzione temporale dello sviluppo costruttivo della torre delle Ghirlandina, op.cit.



*Figura 91 Roberto Salvini, ricostruzione temporale dello sviluppo costruttivo della torre delle Ghirlandina, op.cit.*

Fra il 1971 ed il 1976 il Gandolfo prima e successivamente il Montorsi, ipotizzano il primo che l'edificazione della torre sia successiva di circa trent'anni al compimento delle limitrofa cattedrale (confutando quindi la tesi del Quintavalle) osservando che i moduli dei primi tre livelli hanno analogie con quelli del duomo e solo il quarto presenta delle variazioni ed avalla la sua ricostruzione analizzando differenti perdite di verticalità che le varie porzioni della torre presentano<sup>108</sup>; il secondo invece ipotizza che la torre sia stata costruita in tre differenti fasi di cui la prima lanfranchiana del 1106 con la costruzione dei primi quattro piani, la seconda terminata nel 1169 con l'aggiunta del quinto piano e l'ultima campagna del 1261 con l'aggiunta del sesto piano e della struttura ottagonale con la sopraelevazione della guglia del 1319.

Fra le ultime ipotesi formulate, Pezzani nel 1984 e la Baracchi nel 1988, troviamo invece univocità nell'affermare che la torre sia stata eretta su una struttura precedente; nella prima infatti si affermano due ipotesi di cui la prima afferma che in epoca lanfranchiana si siano utilizzate semplicemente le fondamenta di un edificio preesistente e nella secondo che sia stata riutilizzata la parte affiorante di una struttura preesistente con la conseguenza che nel successivo periodo campionesse si dovettero fare i conti con una struttura già esistente ed altresì progettata secondo un modulo ben definito. Nella seconda (1988) si sostiene l'ipotesi dell'origine romana e difensiva delle torre (essendo l'originale accesso a oltre 2 metri sotto il piano di calpestio attuale come la profondità di alcune tombe ritrovate sotto il pavimento del precedente duomo) in quanto nel libro della Cronica è documentata una torre romana di 18 braccia (936 cm circa) che potrebbe essere proprio la torre della Ghirlandina (oggi 1050 cm circa) attribuendone la differenza all'ispessimento delle originali murature necessario a sostenere le sopraelevazioni avvenute nei secoli. Ritiene inoltre la torre sicuramente non contemporanea al duomo perché non viene mai citata nelle cronache

---

<sup>108</sup> I dati analizzati dal Gandolfo sono quelli della campagna di misure effettuata ad inizio del XX secolo da F.Cavani e riportata in F.Cavani, Pendenza stabilità e movimenti delle torri la Garisenda di Bologna e la Ghirlandina di Modena, Bologna, 1903.

coeve alla costruzione dello stesso. Sarebbe stata dunque la cattedrale ad allinearsi alla torre e alla via Emilia, inclinata di circa 45 gradi rispetto all'asse della chiesa precedente. Sempre secondo la Baracchi, l'interramento sarebbe dovuto all'alluvione del VI sec., e la pendenza della torre deriverebbe da un eccessivo sopraelevamento di circa 7 m del 1587: l'inclinazione infatti è documentata a partire dal 1600.

Traendo qualche conclusione dalle tesi esposte è chiaro come allo stato attuale sia impossibile dare una risposta certa al quesito sulle origini della Ghirlandina; si può comunque ragionevolmente ipotizzare che la torre che oggi vediamo sia contemporanea al duomo, ma che la stessa possa essere stata edificata sui resti di un struttura preesistente, forse una parte delle mura leodoiniane, databili alla fine del IX sec., che corrisponderebbero alla parte di muratura irregolare della fondazione di cui parla il Sandonnini.<sup>109</sup> Sulla base degli ultimi rilievi, svolti nel 2006, possiamo inoltre studiare la pendenza dei vari piani, ognuno dei quali presenta un'inclinazione diversa. Questo ci fa pensare che ogni piano sia stato edificato in momenti successivi, correggendo la pendenza del piano inferiore. Il primo livello della torre presenta una inclinazione diversa dal resto del fusto, per cui è stato probabilmente realizzato in una prima fase. Successivamente la torre fu sopraelevata di tre livelli, fino a circa 36 metri: sono infatti evidenti le correzioni "in corso d'opera" effettuate nel piano nord-sud.

---

<sup>109</sup> Cristina Dieghi, *Fonti e studi per la storia della Ghirlandina*, in Rossella Cardignani, a cura di, *La torre della Ghirlandina un progetto per la conservazione*, Roma, Luca Sossella Editore, 2009, pp.48-65.

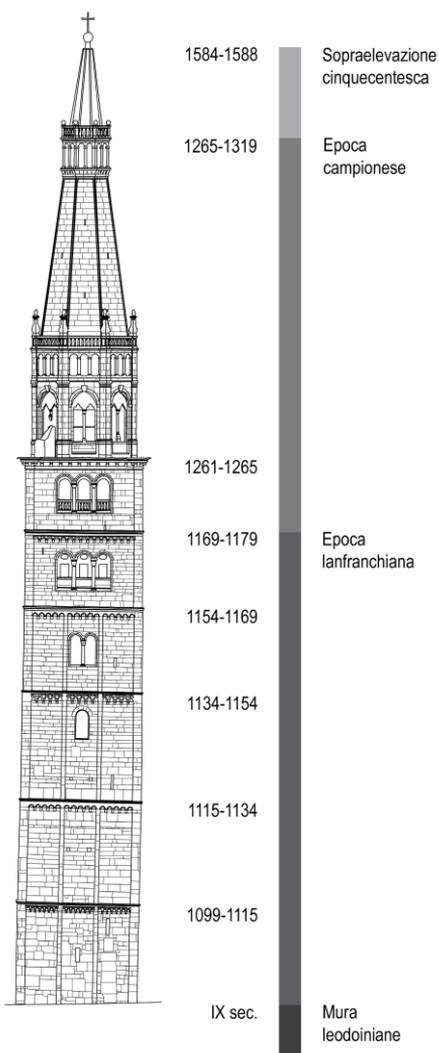


Figura 92 Ricostruzione temporale delle fasi costruttive, rappresentazione grafica delle teorie evolutive.

Notizie più precise si hanno sugli ultimi livelli: al 1169–1179 risalirebbe l'intervento dei Campionesi sul quinto livello, al 1261–1265 il sesto livello, come dimostrano le differenti inclinazioni a questi piani e le evidenti rastremazioni. Nel 1265 iniziarono i lavori sulla parte ottagonale e la guglia fu conclusa il 28 settembre 1319; quest'ultima fu sopraelevata di circa 7 metri tra il 1584 e il 1588. A supportare questa scansione temporale delle fasi costruttive è anche lo studio condotto sulle tipologie di pietre utilizzate nel rivestimento della torre<sup>36</sup>. Infatti si è evidenziato come fino al quinto livello

compreso, le pietre risultino essere di tipologie simili a quelle riscontrate negli scavi delle necropoli romane: è quindi probabile che siano materiale di reimpiego, che ha caratterizzato la prima fase del cantiere della torre. Invece dal sesto livello in poi la pietra utilizzata è esclusivamente l'ammonitico veronese, che doveva essere appositamente acquistato ed importato. Questo a riprova che il quinto livello sia da attribuire ancora al cantiere iniziato da Lanfranco, mentre dal sesto in poi le maestranze siano di origine campionesa.

Altrettanto di interesse appare la storia dell'adiacente fabbrica del duomo<sup>110</sup> di cui però, essendo abbondante la documentazione disponibile, sono di datazione certa le principali fasi storico evolutive; esso infatti riconosciuto come la prima chiesa delle città e dell'Archidiocesi di Modena-Nonantola, capolavoro dello stile romanico, edificata a partire dal 1099 su direzione dell'architetto Lanfranco cui si affiancò nel corso della realizzazione lo scultore Wiligelmo che affiancò il Lanfranco anche nella direzione dei lavori partendo dalla facciata e lasciando le absidi all'architetto andando così a determinare delle irregolarità compositive nelle bifore delle facciate laterali sia sul lato nord che su quello sud. La nuova cattedrale andò quindi a sostituire la precedente chiesa risalente alla metà del secolo XI che minacciava di crollare già verso la fine del secolo; la celerità dei lavori di costruzione è desumibile dal fatto che nel 1106 la fabbrica fosse già coperta tanto da permettere la traslazione del Santo patrono nella nuova cripta.

---

<sup>110</sup> AA.VV. Lanfranco e Wiligelmo Il duomo di Modena, Modena, Edizioni Panini, 1984.

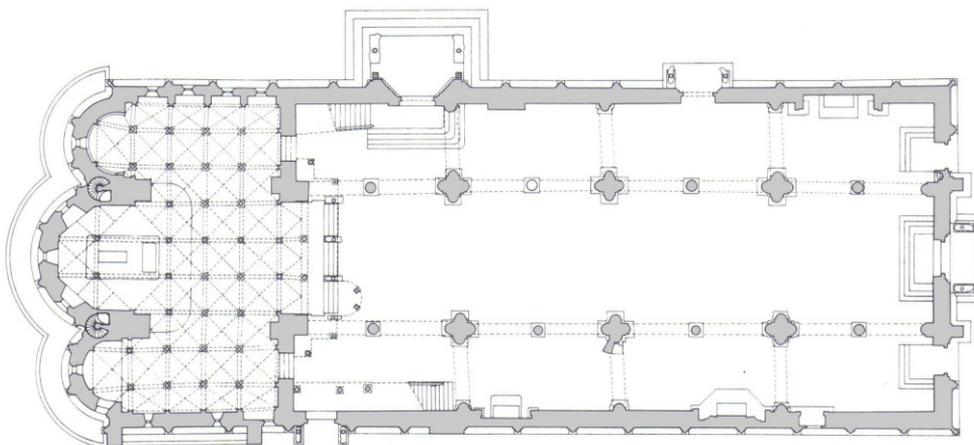


Figura 93 Duomo di Modena, pianta al livello della cripta.

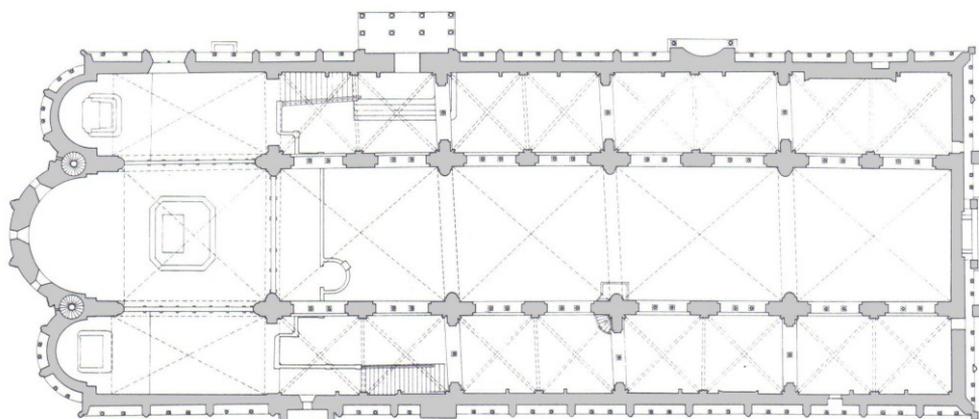


Figura 94 Duomo di Modena, pianta al livello dell'abside.

Occorre arrivare al XV secolo per avere traccia di importanti lavori sulla fabbrica relativi alla costruzione di volte a crociera interne alla navata (1437 – 1455) per nascondere alla vista dei fedeli la copertura lignea. Successivamente, al secolo XVII, risale l'ultima importante modifica relativa alla conformazione dell'abside centrale con rivestimenti marmorei, rifacimento delle volte e degli stucchi<sup>111</sup>. Interventi maggiormente vicini nel tempo videro alla fine dell'ottocento ed all'inizio del novecento l'esecuzione

<sup>111</sup> Intervento legato ad un lascito testamentario di un canonico alla fabbrica del Duomo.

dei lavori di isolamento del duomo dagli edifici ad esso vicini ed altresì nel 1936 si ricostruirono le guglie a loggetta che sovrastano i pilastri della facciata cadute in seguito all'evento sismico del 1797 e mai ricollocate<sup>112</sup>.

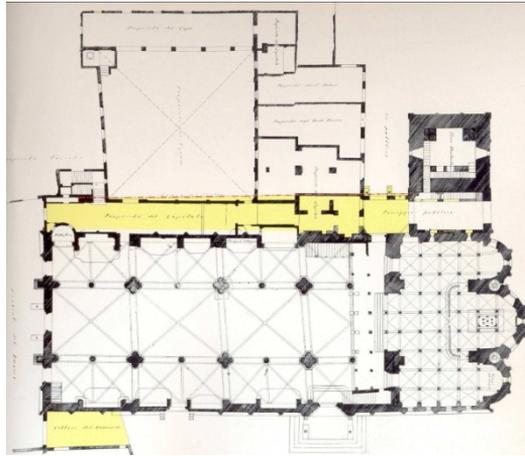


Figura 95 Pianta del duomo con segnato in giallo le parti di edificio abbattute e con la linea rossa il nuovo profilo delle canoniche, da C.Acidini Luchinat, L.Serchia, S.Piconi, *I restauri del Duomo di Modena 1875-1984*, Modena, 1984.

#### 4.3.2 Organizzazione ed evoluzioni delle strutture

La torre Ghirlandina è una struttura relativamente semplice, sostanzialmente basata sulla presenza di setti murari verticali che diminuiscono di spessore con l'altezza e di un numero limitato di orizzontamenti, in parte spingenti. Le articolate fasi costruttive, però, hanno influenzato l'omogeneità della struttura, che cambia forma e materiali in funzione del periodo di costruzione.

Seguendo quindi un ordine cronologico nella descrizione delle strutture che compongono la torre, possiamo evidenziare come le fondazioni non siano state particolarmente curate: non è presente una palificata di fondazione, l'allargamento fondale è molto modesto e non si sono tenute in considerazione le preesistenze al di sotto del piano di fondazione. Tutto ciò, come visto, ha portato fin dalle origini all'insorgere di fenomeni di cedimento differenziale.

<sup>112</sup> Luciano Serchia, *Le torrette della facciata. Proposte di ricostruzione 1937*, in AA.VV *I restauri del duomo di Modena*, Modena, Edizioni Panini, 1987, pp.268-271.

La parte inferiore, fino al primo cornicione, realizzata all'inizio del XII secolo, è massiccia, con murature di notevole spessore, limitati volumi interni e due orizzontamenti voltati. Dal primo al quarto cornicione l'interno della torre cambia completamente e diventa caratterizzato da un grande volume a pozzo unico con quattro possenti piloni angolari in muratura, collegati da scale, anch'esse in muratura, sostenute da archi rampanti. I due successivi segmenti sono decisamente più leggeri, aperti da trifore in ogni lato e sostenuti da quattro piloni sugli angoli, indeboliti dalla presenza delle scale.

Sopra inizia la parte chiaramente gotica, piramidale su pianta ottagonale e interamente vuota all'interno, tenuta insieme da una serie di raggiere metalliche. La torre termina con l'ulteriore sopraelevazione della guglia della fine del XVI secolo.

La struttura è sostanzialmente in muratura di mattoni, di buona qualità, uniforme e ben realizzata; un contrasto con la modestia e gli errori del progetto fondale.

All'esterno il rivestimento è interamente in pietra di vario spessore e di varia tipologia. Le lastre di pietra sono collegate alla muratura in mattoni con modalità variabili: in alcune zone sono completamente staccate, con delle intercapedini anche di qualche centimetro, in altre, come nella guglia, sono ancorate con staffe metalliche.

La complessa vicenda costruttiva della torre si rispecchia anche nelle inclinazioni della torre stessa: l'applicazione del cosiddetto "monitoraggio storico"<sup>113</sup> all'analisi di queste inclinazioni può quindi fornire preziose informazioni, utili sia a chiarire le fasi costruttive (sulle quali scarseggia la documentazione), sia a capire cosa sia successo nei secoli successivi, fino ai giorni nostri.

Per ottenere queste informazioni è necessario disporre di dati aggiornati e precisi sulla geometria dell'edificio: a questo proposito è stato fondamentale il rilievo fotogrammetrico e topografico svolto nel 2006 dal

---

<sup>113</sup> Per il concetto di monitoraggio storico si veda Coisson, F. Ottoni, *Il monitoraggio storico, ovvero la lezione della storia agli strutturisti*, In: *Filosofia della Conservazione e Prassi del Restauro*, pp. 364-368, Arte Tipografica Editore, Napoli, 2013.

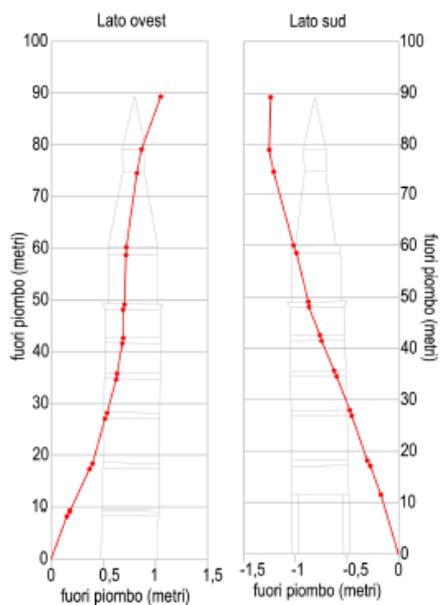
gruppo di rilievo dell'Università di Parma, in collaborazione con la ditta FOART.

Bisogna però tenere presente che la realtà geometrica della Ghirlandina non è quella di un solido semplice e rettilineo, in quanto la torre è il risultato di successive correzioni della verticalità durante le varie fasi della costruzione, per cui non è possibile nemmeno individuare un asse geometrico e la quantificazione dei dissesti e degli strapiombi non è univoca, ma dipende dal riferimento che si adotta.

Il primo interessante aspetto che è stato colto da chi ha analizzato queste misure<sup>114</sup> è il diverso andamento dell'inclinazione della torre nelle due direzioni principali di pendenza, ovvero il sud (verso il Duomo) e l'ovest (verso la sacrestia). Se si esclude la parte della piramide ottagonale, che oltre ad essere stata costruita in epoca molto successiva ha anche subito numerosi interventi di rimaneggiamento a causa delle frequenti infiltrazioni, si nota infatti che i vari piani della torre hanno una inclinazione sostanzialmente omogenea in direzione ovest, mentre in direzione sud mostrano un andamento curvilineo, tipico delle costruzioni che subiscono cedimenti già in corso di costruzione e che poggiano ogni nuovo piano (costruito a piombo) su una struttura sottostante già inclinata. Se ne deduce quindi che l'inclinazione verso il Duomo è cominciata subito dopo l'inizio della costruzione ed è via via rallentata, mentre l'inclinazione verso la sacrestia è cominciata solo dopo che la torre era già stata completata, portando ad una inclinazione uniforme in questa direzione.

---

<sup>114</sup> 22. Blasi C, Coisson E. "Fasi costruttive ed evoluzione dei fenomeni di dissesto / Building phases and the development of disorder phenomena." In: (a cura di Rossella Cadignani.) La Torre Ghirlandina: un progetto per la conservazione. p. 147-154, ROMA: Luca Sossella Editore.



*Figura 96 Rappresentazione grafica delle inclinazioni della torre in riferimento all'atezza.*

A questi dati sull'evoluzione dell'inclinazione nel corso dei secoli si aggiungono poi le informazioni sull'attuale velocità dell'evoluzione stessa, misurata per mezzo di un sistema di monitoraggio strumentale automatico, che conferma la variazione di direzione del cedimento principale, da sud a ovest.

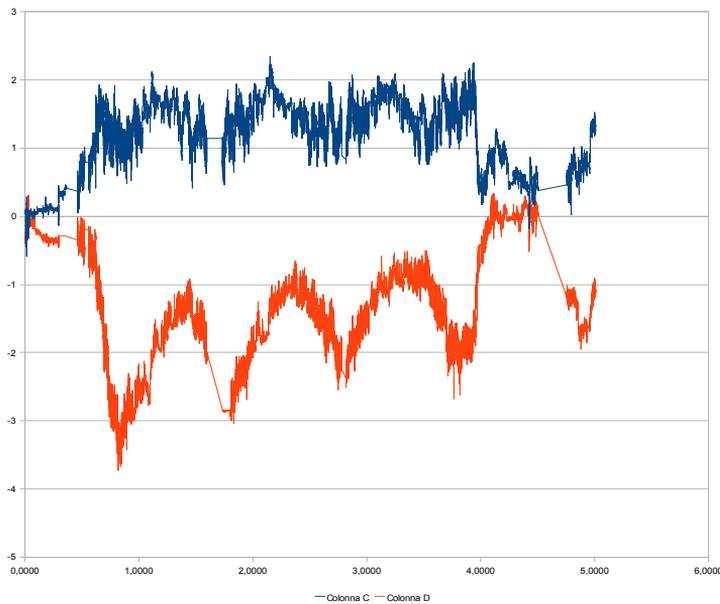


Figura 97 Registrazione temporale dell'evoluzione degli spostamenti della torre rilevati da sistemi automatici.

### 4.3.3 L'arcone di collegamento alla Cattedrale

Già dal 1319 torre e duomo venivano collegati da arconi, nel tentativo di contrastare i cedimenti che fin dalla costruzione avevano interessato la Ghirlandina. L'azione di contrasto senza dubbio ci fu, come dimostrato anche dal monitoraggio storico, ma non fu sufficiente a bloccare completamente il movimento, che continuò, andando inevitabilmente a danneggiare gli arconi stessi, tanto da pervenire alla decisione, all'inizio del XX secolo, di sostituirli. Nella primavera del 1900, infatti, il Tosi, direttore dei restauri, procedeva alla completa rimozione delle ultime sovrastrutture rimaste che nascondevano ancora parte del paramento della parete del duomo e dei due muri trasversali; il riapparire delle antiche strutture permise di verificare allora la mancanza di adesione delle testate dei muri contro le pareti del duomo e della Ghirlandina. Constatazione che ribaltava la primitiva convinzione sull'azione di contrasto e quindi di consolidamento svolta dagli arconi a contenimento dello strapiombo della parete del duomo, da quella parte piuttosto pronunciato.

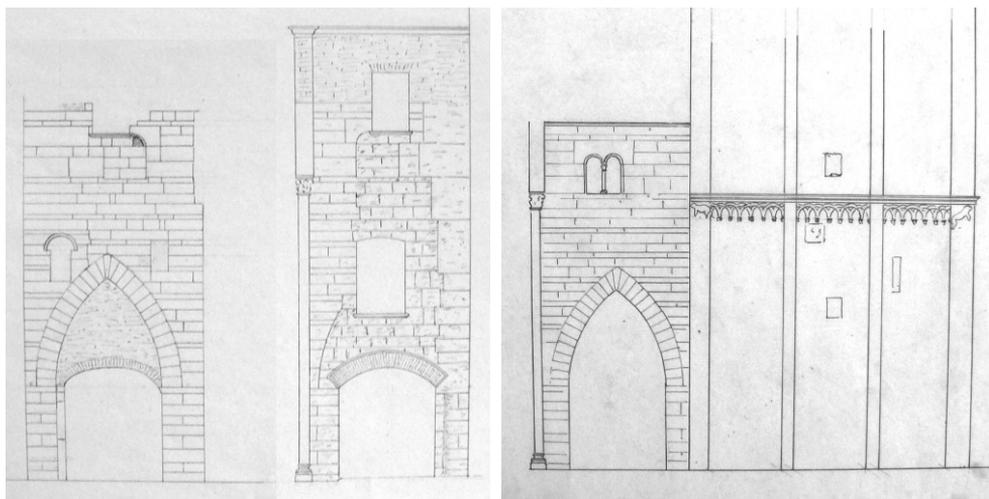


Figura 98 Giovanni Tosi, rilievo dei muri trasversali tra il Duomo e la Ghirlandina e progetto degli stessi, da ASCMo, Cartografia, cartella VII ter, 1898.

La rimozione dei rinfianchi e dei sostegni della volta del passaggio mise allo scoperto oltre alla reale conformazione del paramento murario, anche una vasta superficie affrescata. Per gli affreschi rinvenuti venne disposto il distacco sotto la direzione artistica dei professori Grandi e Goldoni, non prima che il Faccioli ottenesse dal Ministero la preventiva autorizzazione (14 agosto 1900). L'iniziativa del Comitato volta a vedere il duomo perfettamente isolato, spingeva ormai i fautori del progetto a cogliere anche il minimo pretesto per raggiungere lo scopo che si erano prefissi. La constatazione dello stato di grave deterioramento dei muri, che presentavano ampie fenditure e distacchi dalle pareti del duomo e della Ghirlandina, era un buon motivo per ritornare sulla proposta iniziale di abbattimento dei muri.

La Commissione tecnica presieduta dal Sandonnini e composta da Silvio Canevazzi, professore di Scienza delle Costruzioni, Alfonso Parenti, Ingegnere Capo dell'Ufficio Comunale, dal Faccioli e da altri rappresentanti del Comune e studiosi, formulò il parere di conservare e risistemare i muri solo per effettive e valide ragioni storiche ed estetiche, altrimenti si mostrò favorevole al loro abbattimento. Contemporaneamente i commissari espressero parere favorevole alla proposta del Faccioli di riempire "la camera sotterranea" della torre con un getto di calcestruzzo e di aprire sulla sua facciata meridionale, un'altra porta di ingresso al piano terra in sostituzione

dell'altra posta ad un livello superiore; questa ennesima variante al progetto iniziale consentiva di eliminare la rampa di scale e il relativo muretto di sostegno che impedivano la vista della parete della Ghirlandina, e di razionalizzarne l'accesso. Il quesito a cui avrebbero dovuto rispondere i componenti della Commissione provinciale, riunitasi il 5 giugno 1901, era dunque sufficientemente chiarito almeno nelle motivazioni statiche dal parere dell'altra Commissione tecnica patrocinata dal Comitato per i restauri. Nell'esporre il suo punto di vista all'organo consultivo, il Faccioli, che non aveva diritto di voto, sentì il dovere di sottolineare come l'incapacità strutturale dei muri fosse motivo sufficiente per eliminarli una volta per tutte; temendo però che un simile provvedimento potesse provocare la reazione dell'opinione pubblica locale, abituata a vederli e considerarli come sostegni dei due monumentali edifici, consigliò di applicare degli «specchi» (biffe) di segnalazione che tenessero sotto controllo eventuali movimenti degli arconi, salvo poi demolirli dopo qualche anno, ad apprensioni calmate e ad esperimento fatto. Si chiarisce a questo punto che il più convinto assertore della loro demolizione era proprio il Faccioli, inizialmente appoggiato dal Sandonnini. La Commissione provinciale che pure si era riunita per valutare il problema sia sotto l'aspetto statico che sotto il profilo storico artistico, votò quasi all'unanimità per la loro conservazione, ed inoltre di non fare opera di restauro eccessivamente costosa, di lasciare all'Ufficio Regionale di determinare le modalità del restauro d'accordo col Comitato per i restauri del Duomo. Scongiurata per il momento la demolizione dei muri, l'attenzione poteva essere rivolta alla proposta di aprire un nuovo ingresso nel prospetto meridionale della Ghirlandina. Le ricerche sulla stabilità della torre dirette dall'Ingegnere Capo Parenti dell'Ufficio Comunale, avevano permesso di stabilire mediante una serie di scavi la conformazione delle fondazioni e la consistenza del terreno sul quale poggiavano. Nel sotterraneo (coperto da una volta a spicchi, sostenuta da quattro pilastri addossati alle pareti della torre) venne scoperto l'antico piano del pavimento sotto un riempimento di calce e terra alto 60 centimetri. L'innalzamento del livello del pavimento fu attuato su suggerimento del Menia per ovviare all'inconveniente del ristagno dell'acqua dovuto presumibilmente all'affioramento della falda freatica, il getto di uno strato di calcestruzzo previsto dal Faccioli a riempimento della base e attuato nel settembre del

1901, oltre ad assicurare una maggiore stabilità alle fondamenta della Torre, eliminava per quel che era possibile la persistente umidità dell'ambiente.

Completati i saggi di esplorazione anche all'esterno della parete meridionale della Ghirlandina, venne rivelato

*“che l'antica porta d'ingresso alla Torre... ha un'altezza di m 1,80 ed una larghezza di m 0,96, ed è sormontata da un architrave lungo m 2,00 e alto m 0,70, che essa è sotterrata dal piano stradale esterno per tutta la sua altezza, non rimanendone fuori che l'indicato architrave; che la sua soglia è formata da una banchina di marmo di Verona, che sporge dal paramento marmoreo del muro della Torre di m 0,50; che al di sotto di tale soglia o banchina, della grossezza di m 0,35, si presenta una muratura di mattoni laterizi costruita piuttosto con cura”.*

La scoperta dell'antico ingresso permise al Faccioli di perfezionare la sua proposta di sistemazione della parete della Ghirlandina con un progetto, presentato alla Commissione provinciale il 21 agosto 1901 e sul quale si aprì un ampio e contraddittorio dibattito. Nel disegno del prospetto meridionale della Torre illustrante la proposta appaiono quattro aperture distinte dalle lettere A, B, C, D; per il Faccioli aprire una nuova porta (B) al di sopra dell'antico accesso (A) significava *“seguire il disegno degli antichi costruttori della Torre, che avevano collocato l'accesso in quel punto [...], non già presso gli angoli del lato ove la Torre pende ed ha maggior bisogno di consolidamento”.* Verso l'angolo sud-est esistevano infatti le tracce chiaramente visibili di una antica porta (D) sollevata da terra di circa m 1,50; questa per il Barberi (membro della Commissione) doveva essere ripristinata al posto della nuova apertura, considerata una indebita *“innovazione”* al monumento. Criterio di restauro ineccepibile per quel periodo; ciò nonostante valsero per i commissari le considerazioni espresse dai tecnici sulla stabilità della Torre, su cui si stavano conducendo studi approfonditi. Votarono contro l'approvazione del progetto il Barberi e il Maestri; quest'ultimo facendo rilevare che la nuova apertura avrebbe intaccato in

parte il profilo della volta interna. Sia il Prefetto che il Faccioli misero al corrente il Ministero dell'intenzione di procedere alla nuova sistemazione dell'ingresso della Torre, ed anche se agli atti manca la prescritta autorizzazione non c'è ragione di dubitare sulla favorevole accoglienza ministeriale dell'iniziativa. La morte dell'ingegner Tosi (17 febbraio 1902) e il ritiro dalla carica di direttore dell'Ufficio Regionale del Faccioli (marzo 1902), causarono un ulteriore rallentamento dei lavori.

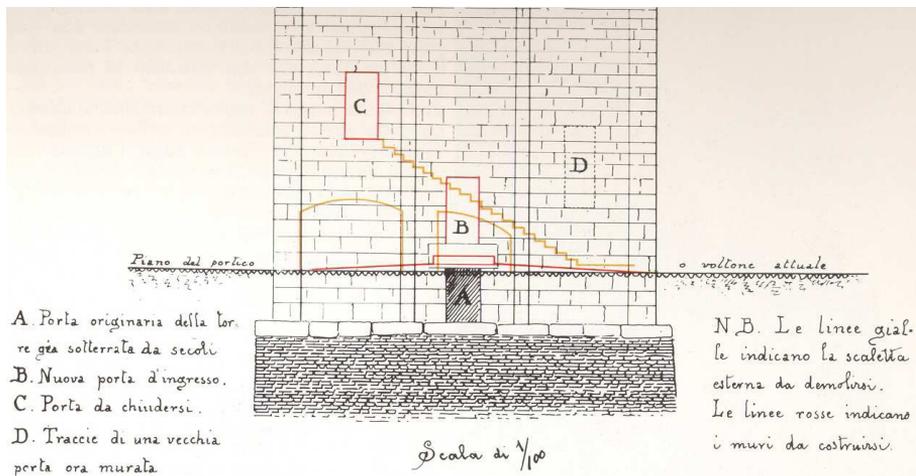


Figura 99 Ufficio Regionale, prospetto meridionale della base della Ghirlandina, 1901, in da Cristina Acidini, Cristina Acidini Luchinat, Luciano Serchia, Sergio Picone, I restauri del Duomo di Modena 1875-1984, Modena, Panini, 1984.

Solo nell'autunno del 1902, dopo la nomina dell'ingegnere Alfonso Modenesi dell'Ufficio Tecnico Comunale a nuovo direttore dei lavori per il restauro dei muri trasversali e più in generale per il completamento delle opere di isolamento, la situazione tornò a normalizzarsi. Al nuovo Direttore dell'Ufficio Regionale Tito Azzolini, il Modenesi comunicava il 30 giugno 1903 che il muro occidentale (verso la Porta della Pescheria) era stato abbattuto nel mese di maggio dopo il rilevamento grafico e fotografico del paramento di pietra; e l'aggravio delle condizioni statiche venute a determinare *“dovendo il nuovo muro elevarsi all'altezza di m 12 (perché a tale altezza riscontransi le vecchie tracce)...ma prima alzavasi a circa m 8,00”*. Riteneva non particolarmente utile, anche dal punto di vista storico ed artistico, riproporne la costruzione. Le convinzioni del Modenesi scaturivano dalla nota constatazione che le testate della fondazione dei due arconi, messe a nudo

dagli scavi, non erano immorsate con quelle del duomo e che quindi non offrivano il contrasto desiderato per il contenimento degli strapiombi.

Proprio per valutare questo stato di cose il Barberi, convinto assertore della conservazione dei muri, aveva condotto un'attenta prospezione sulle fondamenta; per ribattere infatti in sede di Commissione Provinciale le argomentazioni della Commissione tecnica patrocinata dal Comitato per i restauri, egli ne aveva rilevato attentamente le misure. La poderosa muratura larga circa m.1,40 scendeva ad una profondità dal piano stradale per m. 3,40; il primo tratto per un'altezza di m.1,50 era costituito da laterizio, il secondo tratto da ciottoli di fiume. Inoltre il loro allineamento non era perfettamente ortogonale alla parete della torre; il muro di levante presentava un disassamento di cm 17 e quello di ponente di cm 13.

Nell'autunno 1902, approfonditi ulteriormente gli scavi, il Modenesi ebbe modo di completare le indagini incominciate dal Barberi presentando all'Ufficio Regionale una puntuale descrizione delle opere di consolidamento che si stavano conducendo sotto il piano stradale:

*“nel muro di fondazione ad Est a m 0,50 dal piano del pavimento attuale, esisteva una breccia (A) di m 0,54 di profondità per m 0,80 di larghezza e al di sotto ancora un antico cunicolo (B) di 0,25 x 0,40 che attraversa detta fondazione ricoperto con mattoni romani a maniglia. Questo cunicolo vi è lasciato perché pieno d'acqua di infiltrazione; mentre la breccia si è stretta con muratura nuova del pari che la fenditura (C) che scendeva in verticale in corrispondenza del piedritto verso il Duomo per un buon tratto. Di nuovo poi si è praticato il cunicolo (D) che conduce le acque dello sfondo aderente al muro del Duomo (eseguito di recente) nel fognato stradale, cunicolo che ha la tenue sezione di m 0,20 x 0,20 ed è profondo dal piano del pavimento m 1,25”.*<sup>115</sup>

---

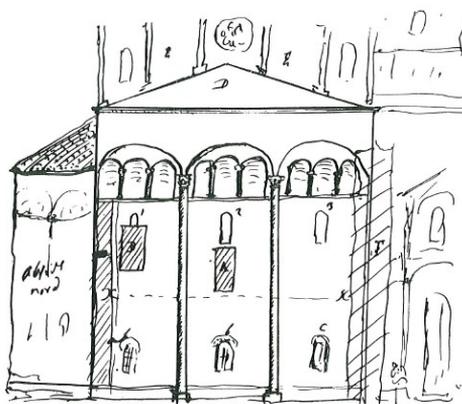
<sup>115</sup> Lettera del Modenesi al Faccioli del 18 novembre 1902, ASBAAE.

#### 4.3.3.1 Quadro dei dissesti

Gli arconi di collegamento tra Torre e Duomo che oggi sono visibili non sono le strutture originarie, realizzate presumibilmente a partire dal 1338, ma un rifacimento risalente agli inizi del secolo XX. La presenza degli originali archi, verso la metà del XIV secolo, si deve probabilmente ad una necessità di tipo funzionale legata alla realizzazione di un spazio riservato al clero che permettesse l'accesso diretto dal duomo alla torre a quel tempo ad essi riservata ma, contemporaneamente, assunse anche ad una funzione strutturale di contrasto ai movimenti reciproci delle due strutture. Questo percorso aveva accesso diretto dalla zona presbiterale, sopraelevata rispetto alla navata. La ricostruzione del sistema di accessi è stato possibile durante i lavori di isolamento della parete settentrionale del Duomo, una volta esaminati i ritrovamenti avvenuti sulla parete esterna della Cattedrale compresa tra i due archi.

*“...Si lavora tra la torre ed il Duomo: si è scoperta un'altra porta che aveva la soglia un metro più in basso dell'altra che era aderente all'altare delle reliquie, soglia corrispondente all'antico piano del presbiterio e si trovava sotto alla finestrella del secondo arco al punto - A - di questo informe disegno ... Modena 1 agosto 1900-Durante il mese di luglio si è sempre lavorato fra la torre e il Duomo. Abbattute finalmente le volte e tolti i muri su cui poggiavano, si sono scoperte antiche pitture a fresco, che insieme a quelle levate nel 1882 coprivano la parete del Duomo a poca altezza da terra, terminanti tutte in alto ad una stessa linea indicante che lì eravi un piano, corrispondente appunto alla soglia della porta più bassa. Nell'arcata a sinistra verso il palazzo del Comune c'era la pittura murale di S. Geminiano levata nel 1882 ed illustrata dal Bortolotti, in quella di mezzo si è trovato un trittico con la Vergine nel mezzo che allatta il Bambino; a sinistra un santo con in mano un coltello ed un libro, forse S. Pietro martire, a destra S. Geminiano. Nell'altra arcata dimezzata dal muraglione, un vescovo, di cui si vede solamente una parte della persona, un S.*

*Tommaso d'Aquino. La pittura continua voltando sul muraglione dove c'è una Vergine con Bambino. Questa pittura, quando venne levato il piano orizzontale contro cui finiva, venne in parte guasta, quando al piano a travatura fu sostituito una volta, la cui monta le passò per mezzo, volto che costrinse anche a spezzare la cornice del muraglione...Modena 25 Giugno 1900”<sup>116</sup>*



- A - traccia di porta  
 B - idem  
 1, 2, 3, finestrelle, la prima troncata dalla porta B  
 a, b, c, finestrelle a pian terreno antiche  
 X - - - X  
 Parte del Duomo compresa fra i muraglioni, fra il Duomo e la torre  
 D - frontone in mattoni  
 E - frontone in marmo con colonne a somiglianza di quello che guarda in piazza costruito su quello in mattoni preesistente  
 F - spessore del muraglione  
 G - idem

*Figura 100 Tommaso Sandonnini, schizzo con l'individuazione delle aperture e identificate con le lettere A e B a quote differenti, Mantova, 1900, ASBAAE.*

Dei due accessi A- B indicati (Figura 100), quello più alto il B immetteva dal presbiterio alla sagrestia salendo alcuni gradini, da cui poi si accedeva alla Torre attraverso un'apertura ricavata in prossimità dello spigolo sud ovest. L'accesso denominato con la lettera A venne utilizzato quando all'inizio del '500 venne rifatto il voltone tra i due archi di collegamento e impostato ad una quota inferiore. Da qui si comprende come il collegamento tra Torre e Duomo fosse costituito da setti murari, solai e archi.

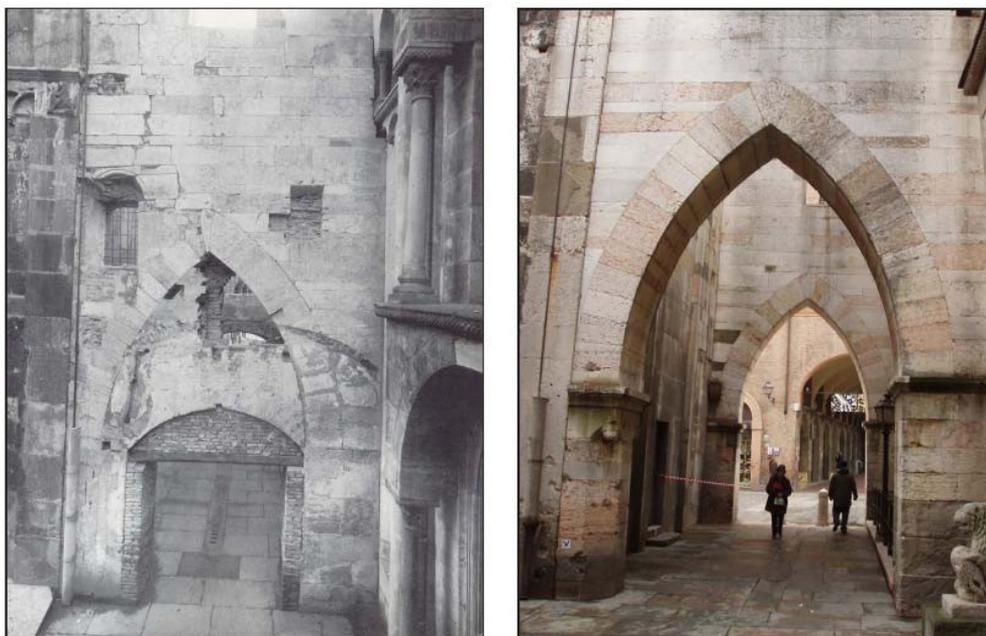
<sup>116</sup> Tommaso Sandonnini, segretario del Comitato per i restauri del duomo, estratto delle memoria del 25 maggio 1900,

Relativamente al ruolo strutturale assolto, forse involontariamente, da queste strutture, ampio fu il dibattito agli inizi del 1900 in occasione della loro demolizione durante i lavori di isolamento del Duomo. Per comprenderne l'utilità da un punto di vista statico si iniziarono una serie di studi legati all'analisi della pendenza e della stabilità della Torre, andando altresì ad eseguire dei saggi sulle fondazioni dei piedritti degli archi (Figura 98).



*Figura 101 La facciata interna del muro occidentale. Fotografia Orlandini precedente il 1902, in Lanfranco e Wiligermo, op.cit.*

Verificato durante le operazioni di demolizioni il mancato ammorsamento con quelle del duomo, l'ing. Tosi, direttore dei restauri, interpretò la scoperta come una inutilità degli stessi; la commissione di tecnici creata per la valutazione della possibilità di ripristinare gli archi, anche di fronte allo stato avanzato delle lesioni, che mostravano un movimento progressivo della Torre verso il Duomo, decisero di ricostruirli, decisione questa di grande importanza specie se vista oggi alla luce della attuali conoscenza sul comportamento della struttura e sull'evoluzione storica del quadro dei dissesti.

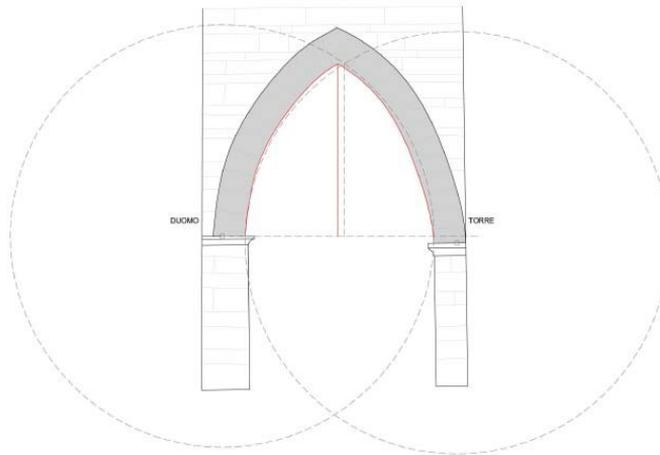


*Figura 102 Comparazione fotografica fra la conformazione della struttura muraria del muro ovest, visto dalla porta del lato pescheria, a sinistra foto di archivio ASCMo antecedente al 1902 ed a destra la conformazione attuale.*

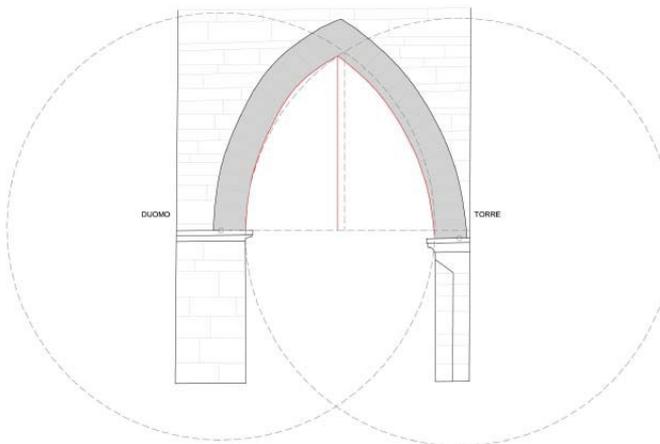
Per comprendere oggi se il fenomeno di inclinazione della torre avesse finito il suo decorso, è stato condotto un rilievo geometrico ed una analisi dello stato fessurativo degli archi.

Dalla loro ricostruzione di inizi '900 sono state rilevate delle deformità geometriche che mostrano come in realtà gli archi siano schiacciati verso la Torre; entrambi gli archi mostrano una traslazione geometrica in direzione orizzontale verso il Duomo e solo quello a sud ovest si è abbassato in direzione verticale.

Da questo rilievo si può desumere come gli archi abbiano svolto un ruolo attivo nella statica del complesso Torre-Duomo. In particolare quello di rallentare il processo di avvicinamento reciproco dei due edifici.



*Figura 103 Arcone sud-est, profilo dei rilievi eseguiti sugli archi di collegamento tra torre e Duomo, in rosso il profili deformati odierni, in tratteggiato grigio la geometria ricostruita secondo le regole dell'arte (Arch. Silvia Tosini, arch. Matteo Bonini).*



*Figura 104 Arcone sud-ovest, profilo dei rilievi eseguiti sugli archi di collegamento tra torre e Duomo, in rosso il profili deformati odierni, in tratteggiato grigio la geometria ricostruita secondo le regole dell'arte (Arch. Silvia Tosini, arch. Matteo Bonini).*

Per quanto attiene lo stato fessurativo degli archi l'analisi ha mostrato lesioni legate alla formazione di cerniere all'estradosso dell'arco, in prossimità della chiave, del tutto simili alle lesioni che si erano rilevate agli inizi del '900, e delle aperture divergenti in senso verticale nelle posizioni di contatto tra archi e Torre. Questo conferma ancora una volta il ruolo statico condotto dagli archi a sostegno della Torre e come la conoscenza della loro evoluzione storica sia importante per procedere alla loro successiva verifica e modellazione.

Il rilievo fotogrammetrico della Torre, eseguito nel 2006, che ha consentito la misurazione delle pendenze, è servito per un confronto con i risultati ottenuti dallo studio della pendenza di inizi '900 eseguito dall'ing. prof. Francesco Cavani dell'Ateneo di Bologna.

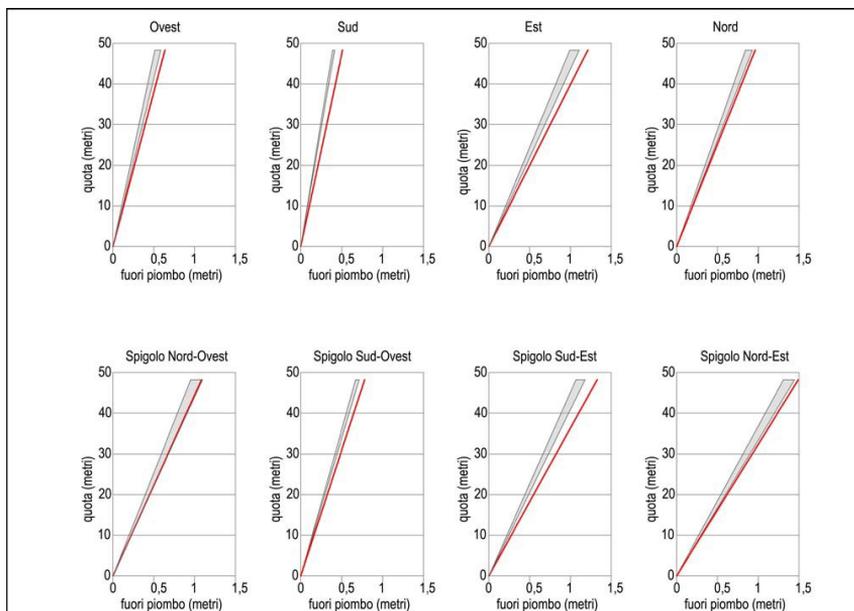


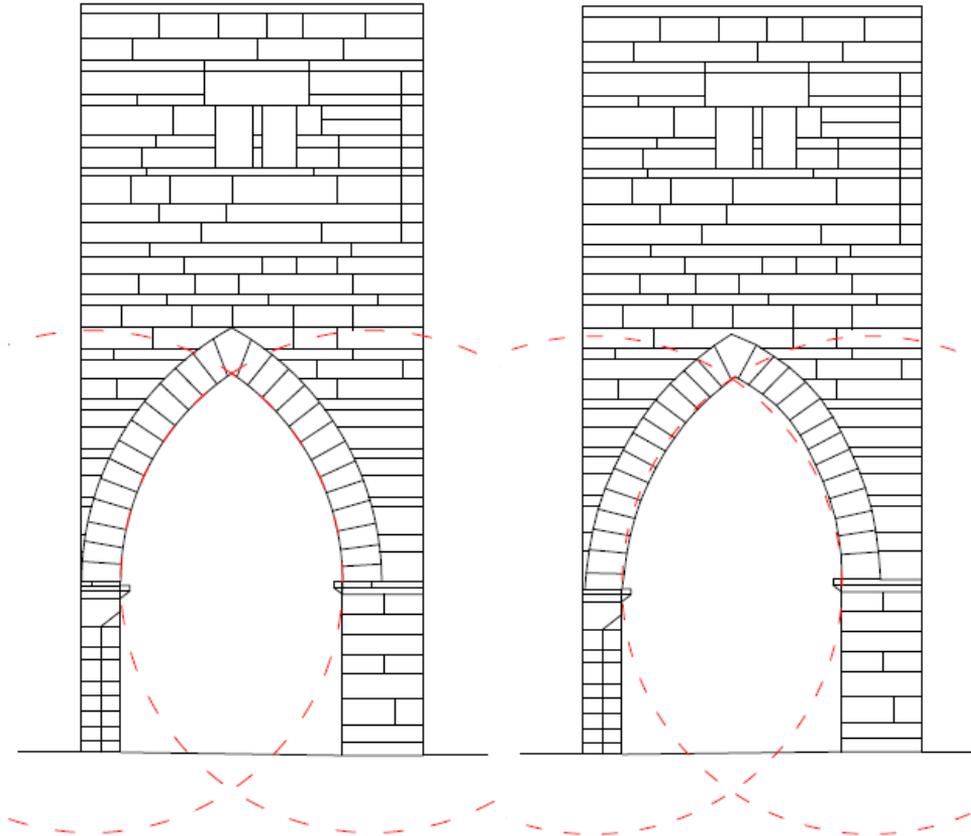
Figura 105 Arch. Silvia Tosini, arch. Matteo Bonini: elaborazione grafica dei fuori piombo della torre dove si mettono a confronto le inclinazioni misurate nel 2006 (rosso) con quelle minime e massime misurate nel 1901.

Il risultato del confronto evidenzia in maniera significativa l'incremento delle inclinazioni verso il Duomo, particolarmente accentuati in direzione ovest e trovano ampio riscontro nelle lesioni rilevate nei prospetti interni settentrionali della Cattedrale. Si possono infatti vedere le lesioni nelle porzioni in cui gli archi si appoggiano al Duomo con particolare attenzione all'arco est, quello corrispondente all'angolo sud-ovest della torre che è causa principale di un'importante lesione con rottura delle parti fuori dal piano che prosegue anche nella sottostante cripta.

#### 4.3.3.2 Modellazioni

La ricostruzione della geometria indeformata della struttura, con riferimento a quella ricostruita negli interventi di inizio XX secolo, si è basata sul rilievo metrico e sui disegni di progetto dell'epoca (Figura 98) dai quali è

stato possibile risalire alle forme poste in opera ed altresì valutare i dissesti ad oggi avvenuti (Figura 103, Figura 104).



*Figura 106 Ricostruzione della geometria indeformata secondo i dati di progetto (sinistra) e geometria attuale (destra), le tracce degli archi (rosso) fanno apprezzare le deformazioni occorse nell'arco di un secolo.*

Secondo quanto desumibile dai documenti dell'epoca, per la ricostruzione dello stato geometrico presunto originario ed "indeformato", escludendo anche in questo caso le normali incertezze di realizzazione, sono state considerate le seguenti condizioni:

- Verticalità dei piedritti laterali, sia lato duomo che lato torre;
- Altezza delle imposte degli archi differenziate come da progetto (circa 6 cm);
- Arco indeformato considerato a sesto acuto con numero di conci definito secondo la reale geometria visibile in loco (essendo i giunti fra i blocchi di pietra a vista).

Per la ricostruzione del modello in ambiente UDEC, per le esecuzioni delle analisi necessarie alla presente ricerca, considerando la necessità di riprodurre (Figura 106) sia elementi a natura ortogonale che a concio, la scelta dell'integrazione con algoritmo si è limitata alla sola costruzione dei due profili curvilinei di intradosso e di estradosso, andando ad integrare gli elementi di completamento come sovrapposizione di blocchi con piani di posa orizzontali e giunti verticali sfalsati.

Per gli scopi della presente ricerca, sono state separatamente utilizzate le due differenti geometrie individuate (Figura 103, Figura 104) per la generazione, in ambiente UDEC, di due modelli distinti di cui il primo in rappresentazione dell'originaria conformazione dei primi del Novecento ed il secondo della situazione oggi visibile; sono state inoltre considerate costanti le caratteristiche dei materiali e le condizioni al contorno nei modelli:

- Materiale:
  - o Pietra: Densità 2700 kN/mc, angolo di attrito 35°
- Arco discretizzato, in entrambe le configurazioni di analisi, in un numero finito di 27 conci;
- Carichi superiori per la presenza del collegamento fra duomo e torre<sup>117</sup>
- Sono state modellate come corpi rigidi le porzioni laterali rispettivamente di torre e duomo per simulare il confinamento cui la struttura è sottoposta.

Specificatamente per l'analisi del modello indeformato sono stati imposti, in accordo con quanto desumibile dai confronti con il rilievo geometrico, gli spostamenti sviluppatasi dall'epoca della loro realizzazione ad oggi e verificabili, in termini di spostamento, per mezzo dei monitoraggi effettuati<sup>118</sup>.

---

<sup>117</sup> Angelo Di Tommaso, Renato Lancellotta, Francesco Focacci, Federica Romano, La struttura, in Rossella Cadignani (a cura di) La torre Ghirlandina storia e restauro, Roma, Luca Sossella Editore, 2010, pp.202-227.

<sup>118</sup> Stefano Alfieri, Carlo Blasi, Matteo Carobbi, Eva Coisson, La struttura dissesti e lesioni, in Rossella Cadignani (a cura di) La torre Ghirlandina un progetto per la conservazione, Roma, Luca Sossella Editore, 2009, pp.144-207.

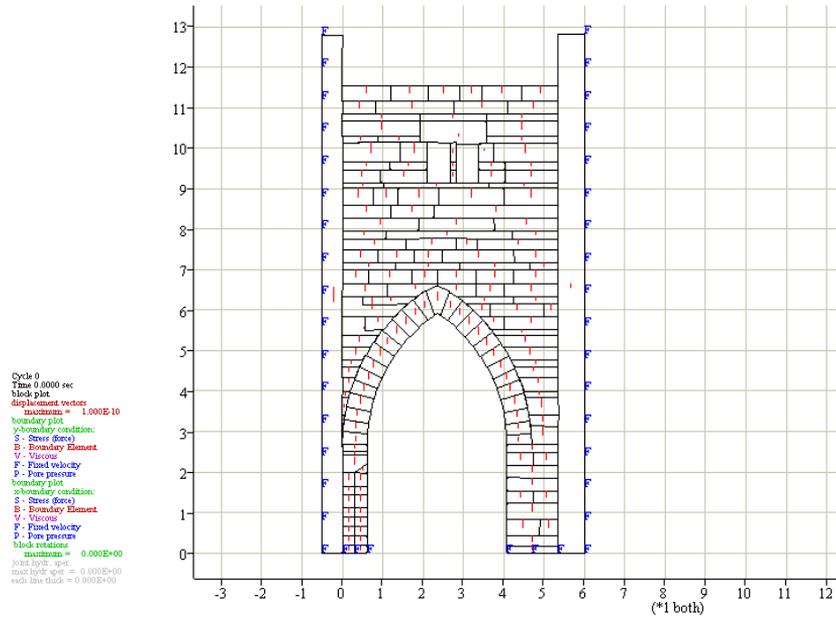


Figura 107 Modello ad elementi distinti, in ambiente UDEC, riportante la geometria indeformata con indicazioni delle principali condizioni al contorno di stress (S) e vincoli (F).

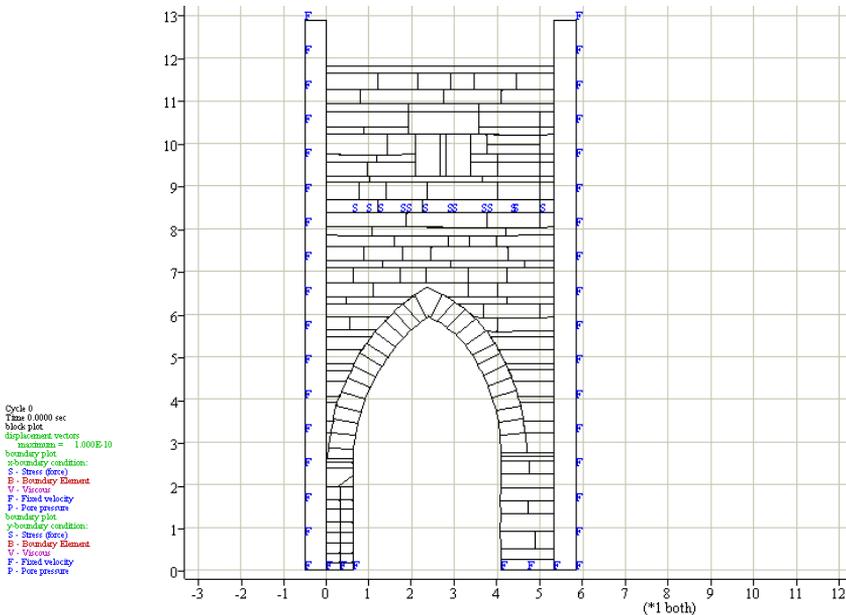


Figura 108 Modello ad elementi distinti, in ambiente UDEC, riportante la geometria nella conformazione attuale risultante dal rilievo, con indicazione delle principali condizioni al contorno di stress (S) e vincoli (F).

Lo studio relativo alla configurazione indeformata, al fine di coerentemente seguire i propositi illustrati nei capitoli precedenti, ha seguito due distinte fasi di cui la prima relativa alla sola applicazione dei carichi verticali alla configurazione indeformata, così da simulare il comportamento iniziale della struttura e la messa in carico della stessa (Figura 109).

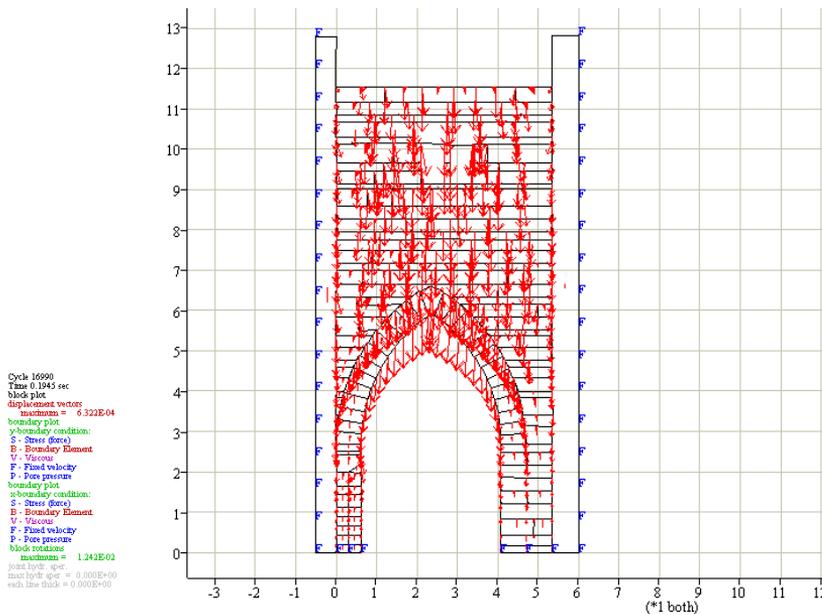


Figura 109 Modello, in ambiente UDEC, della geometria originale con indicazione degli spostamenti (rosso) dei singoli blocchi dovuti all'applicazione dei soli carichi gravitazionali.

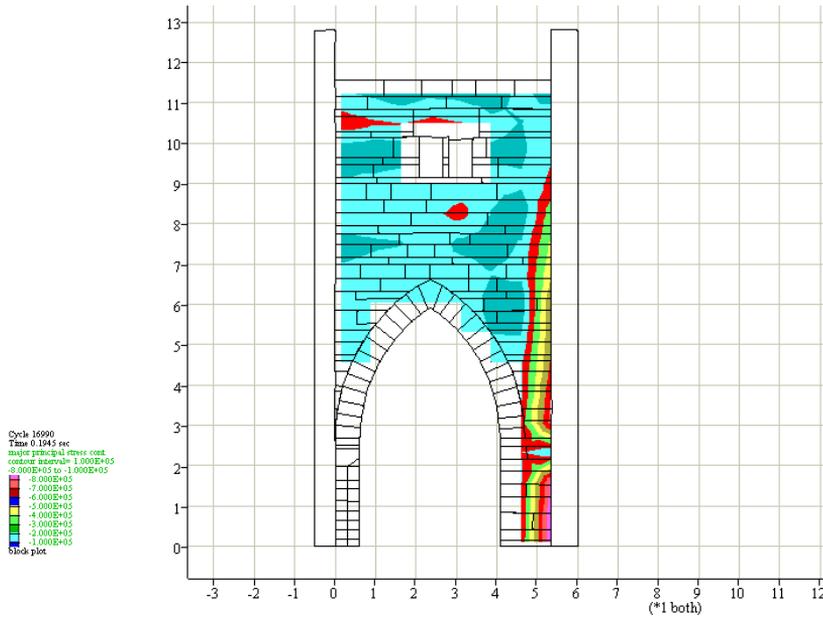


Figura 110 Modello, in ambiente UDEC, della geometria originale con indicazione delle tensioni principali sviluppatasi all'interno della struttura dovute all'applicazione dei soli carichi gravitazionali.

La successiva applicazione, per passi incrementali, degli spostamenti verticali differenziali della torre (con compensazione quindi degli spostamenti avvenuti sul lato del duomo) ha permesso di apprezzare come, mantenendo invariate le condizioni di carico e vincolo, la configurazione geometrica dell'arco si sia a poco a poco avvicinata allo stato di fatto in essere andando altresì ad individuare alcune parzializzazioni nei contatti fra i blocchi che trovano corrispondenza nel quadro fessurativo rilevato.

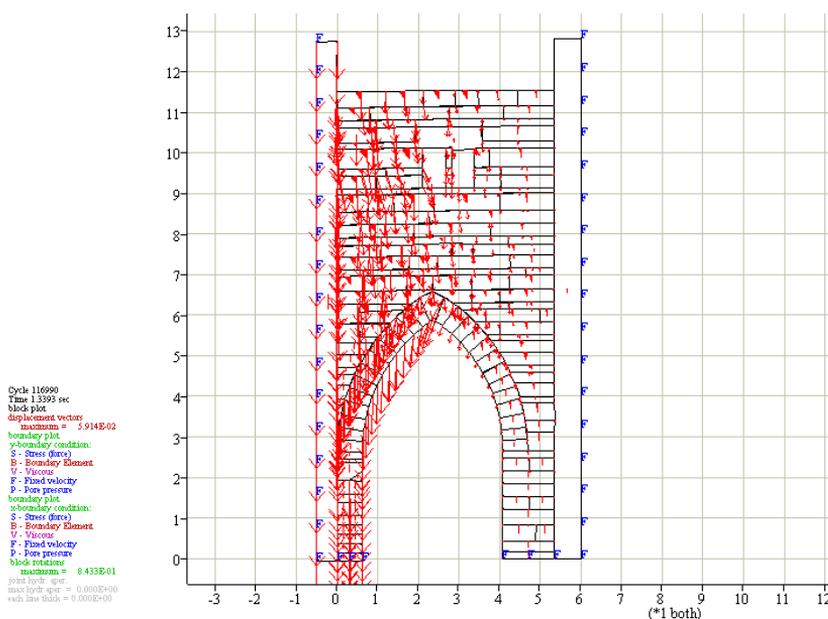


Figura 111 Il progressivo incremento dei cedimenti (lato torre) provoca nella struttura in generale, e nell'arcone in particolare, una modifica delle condizioni di equilibrio iniziali con distacco di alcune interfacce a la creazioni di nuovi punti di contatto tra i blocchi; l'analisi permette di apprezzare l'apertura nei conci di chiave di fessure intradossali riscontrabili in loco.

Riformulando l'operazione di simulazione andando ad inserire un ulteriore parametro derivato dall'analisi storica, l'andamento della perdita di verticalità della torre e la sua rotazione verso la fabbrica del duomo (Figura 89), la configurazione geometrica ha visto un miglioramento della corrispondenza con lo stato rilevato andando ancor meglio a cogliere alcuni elementi di interesse come la posizione delle aperture intradossali con particolare riguardo a quelle in chiave (Figura 115).

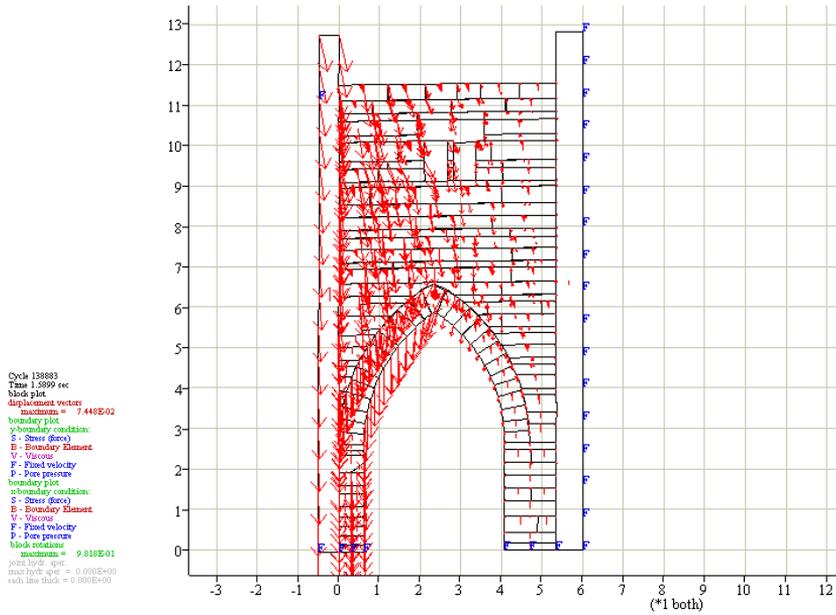


Figura 112 Considerando anche la rotazione della torre, preso come punto di rotazione (cerniera) il vertice alla base della stessa, si assiste ad uno schiacciamento della porzione d'arco posto in lato torre ed un aumento di curvatura del suo opposto.

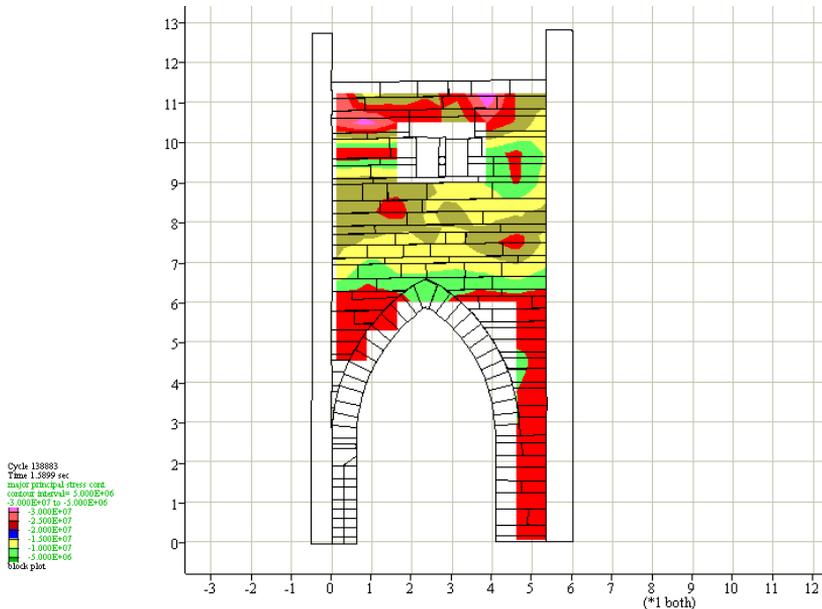


Figura 113 Lo sviluppo tensionale interno mostra la formazione di un "punto" all'interno della tessitura muraria in opposizione alla spinta fornita dalla torre; l'effetto è riscontrabile sull'opposta muratura del duomo ove un importante quadro fessurativo si sviluppa.



Figura 114 Particolare dell'apertura intradossale di fessurazione in corrispondenza dei conci sommitali dell'arco come altresì suggerito dalla modellazione, foto ASCMo, 2008.

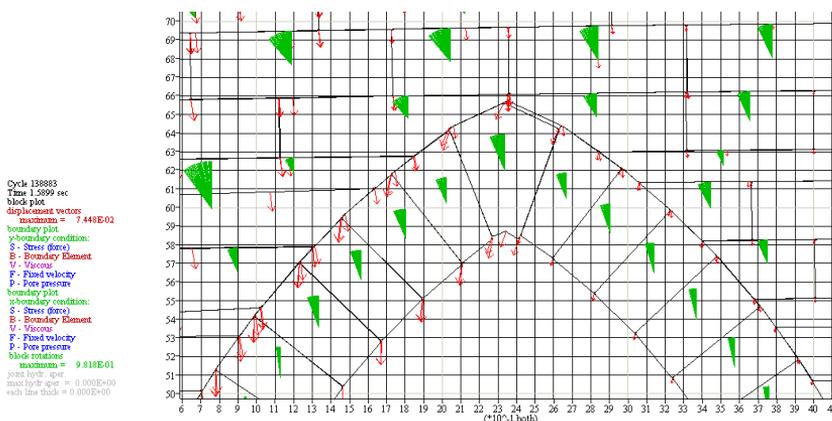


Figura 115 Particolare della risposta del modello di calcolo in corrispondenza dei blocchi sommitali, la procedura di simulazione evidenzia la rotazione dei blocchi (verde) che trova riscontro anche nel dettaglio (Figura 114).

La modellazione della configurazione deformata vede ancora una volta un processo articolato, dal punto di vista concettuale, in una sola fase: l'applicazione delle azioni gravitazionali direttamente sulle strutture come precedentemente identificate nella fase di rilievo. Le deformazioni legate alle perdite di verticalità delle strutture limitrofe sono infatti già insite nella configurazione geometrica del modello.

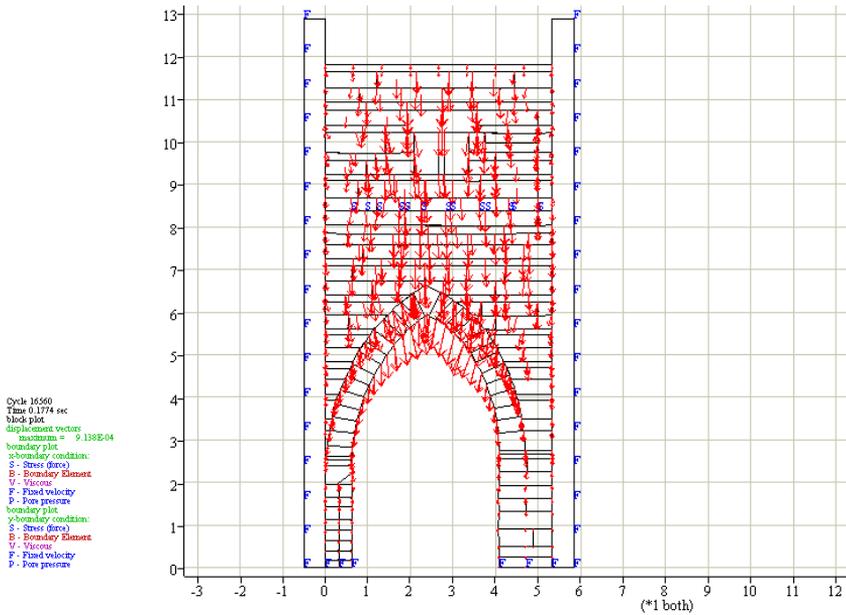


Figura 116 Analisi degli spostamenti degli elementi soggetti al carico verticale.

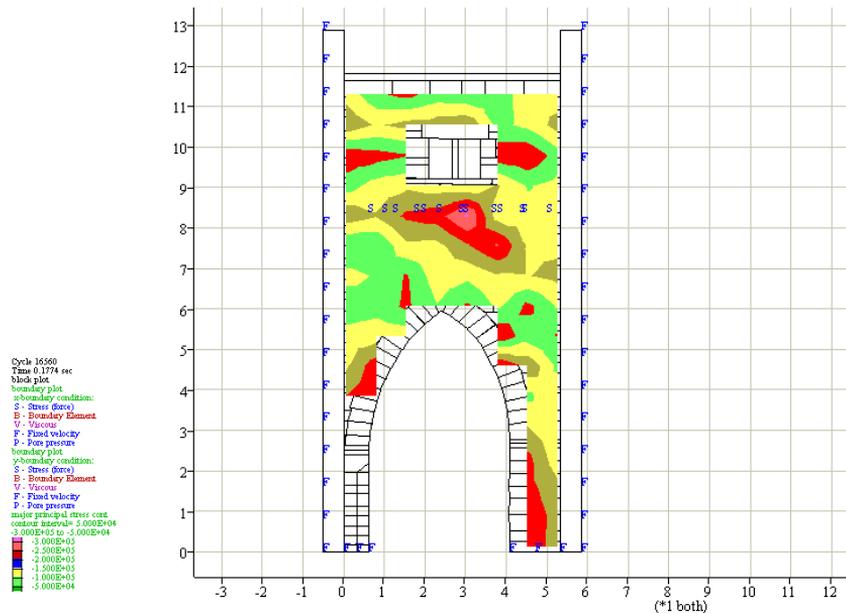


Figura 117 Analisi delle tensioni interne alla struttura.

Considerando l'impossibilità di avere dati estremamente precisi relativi alle caratteristiche meccaniche dei materiali dei blocchi e dei giunti fra di essi interposti, il primo modello (Figura 107) ha ottenuto una conformazione geometrica finale compatibile con lo stato rilevato ed altresì

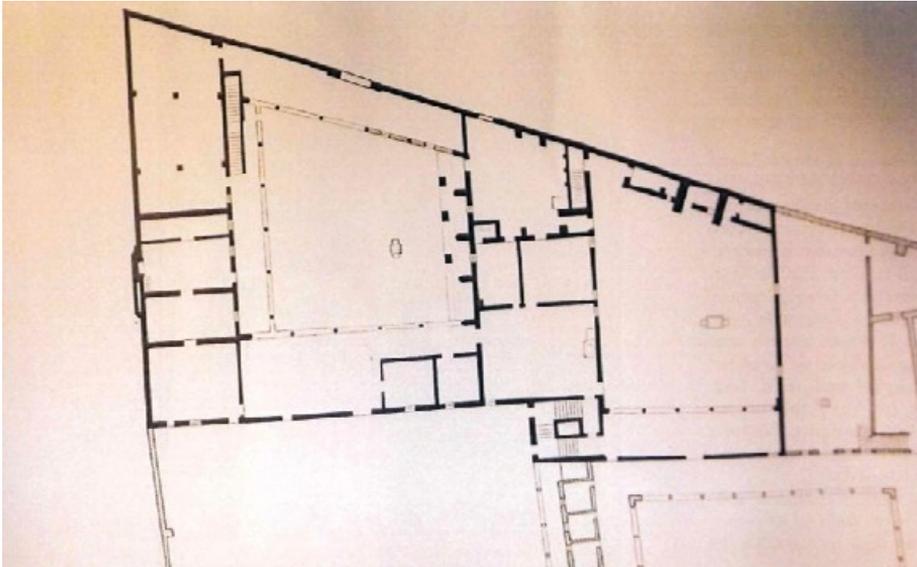
con la formazione di aperture intradossali coerenti, in termini di posizione, con lo stato dei luoghi.

Relativamente all'analisi dello stato tensionale, il confronto fra i risultati ottenuti fra le due conformazioni di calcolo mette in risalto una differenza nell'andamento delle stesse; la disposizione dei blocchi nella prima conformazione, modificata dai successivi passaggi cui la struttura è stata sottoposta, presenta interfacce di contatto non più perfettamente aderenti.

La parzializzazioni provoca un aumento degli stati tensionali in particolare nei blocchi costituenti l'arco con un aumento delle tensioni (Figura 113, Figura 117) fra la configurazione deformata e quella definita dalla configurazione indeformata; si ravvisa un picco tensionale in corrispondenza della porzione in chiave, nella quale la parzializzazione della sezione di contatto fra i blocchi e la rotazione degli stessi, riduce l'area di contatto (Figura 114) ed un raddoppio dello stato tensionale di compressione che si traduce, nella realtà, nella fatturazione delle interfacce di contatto riscontrate durante le indagini.

#### 4.4 Casa Romei di Ferrara

“Casa Romei” è un complesso architettonico sito in Ferrara, via Savonarola 30, che si sviluppa attorno a due cortili interni di cui uno principale, posto ad ovest, ed uno secondario, posto a est del corpo di impianto, e verticalmente per due piani fuori terra oltre il sottotetto non praticabile.



*Figura 118 Planimetria del piano terra risalente agli interventi del 1950, Museo si Casa Romei, Ferrara (FE).*

Il cortile principale (Figura 119) è uno spazio molto suggestivo caratterizzato da forme architettoniche ancora medievali: i loggiati su due piani con raccordi asimmetrici, le “baldresche” (tozze mensole di sostegno della loggia est) sono ancora distanti dalla metrica rinascimentale, anche se l’architettura è ingentilita dai resti di vivaci decorazioni floreali e araldiche di gusto tardogotico. Il grande monogramma di san Bernardino che spicca sulla parete di fronte all’ingresso (Figura 119) è uno dei più importanti esempi dell’uso del cotto per la decorazione architettonica nella Ferrara estense: anch’esso, come le pareti del cortile, ha perduto l’originale finitura colorata.

Attorno al cortile si sviluppava la casa del facoltoso mercante Giovanni Romei nella prima fase di costruzione: al momento delle nozze con Polissena D’Este la dimora venne ampliata con l’aggiunta di un secondo cortile loggiato

e di due corpi di fabbrica che si affacciano su di esso. Tra questi, due singolari ambienti divisi da pareti in legno dipinto, siti al piano nobile al di sopra del loggiato, rappresentano un elemento peculiare dell'edificio.



*Figura 119 Casa Romei, Ferrara, interno del cortile maggiore in lato ovest dell'impianto strutturale, parete in lato sud riportante il monogramma di San Bernardino ed adiacenti baldresche sul lato sinistro.*

Attraverso la scala che parte dalla loggia in angolo nord-ovest, e passando per il loggiato, si accede quindi a quello che alla fine dell'Ottocento veniva considerato come l'appartamento del cardinale Ippolito II, ovvero la serie di stanze con soffitti a fasce decorati "a grottesche" che occupa l'intero piano.

Dopo la morte di Giovanni Romei, il convento passò in proprietà del Convento del Corpus Domini e ne rimase parte integrante fino al 1872, quando, ormai decaduta e abbandonata, Casa Romei entrò a far parte del demanio dello Stato. Restaurata nelle strutture e nelle decorazioni, dal 1955 è organizzata come museo che raccoglie affreschi, sculture e lapidi provenienti da edifici ecclesiastici della città.



*Figura 120 Casa Romei, Ferrara, interno del cortile maggiore in lato ovest dell'impianto strutturale, loggiato nord ed adiacenti baldresche sul lato destro.*

#### **4.4.1 Cenni storici**

La costruzione del complesso architettonico inizia nel 1440 mediante l'unione di tre precedenti abitazioni presenti nell'area a opera della famiglia Romei, ma già nel 1483 parte della casa viene donata all'adiacente Convento del Corpus Domini; annessione che diviene completa nel 1491. E' in questo periodo che, al fine di rifunzionalizzare l'edificio per la nuova destinazione, vengono chiuse le finestre su via Savonarola (lato nord del complesso); soltanto nella metà del XVI secolo si hanno notizie di lavori di abbellimento di alcuni dei locali di Casa Romei mediante l'esecuzione di pitture murali grazie ai lavori promossi dal Cardinale Ippolito d'Este<sup>119</sup>

E' nel 1866 che, a seguito delle Leggi Sabaude di soppressione degli ordini religiosi, Casa Romei diventa di proprietà statale divenendo un ricovero per le famiglie indigenti della città fino al 1890; ne segue un periodo di completo abbandono durante il quale si assiste ad un repentino decadimento del complesso tanto che nel 1895 il Comune di Ferrara ne propone la completa demolizione. Nel 1897 la casa viene acquisita dall'Ufficio Regionale

---

<sup>119</sup> Cardinale di Santa Romana Chiesa, Ferrara, 20 marzo 1479, Ferrara, 3 settembre 1520.

per la conservazione dei monumenti, l'odierna Soprintendenza per i Beni Ambientali ed Architettonici che a tutt'oggi ne detiene la proprietà. Verso la fine del XIX secolo si assiste ad un considerevole degrado e dissesto strutturale con la conseguenza che molti archi sono puntellati o tamponati sia nelle logge a nord e nelle baldresche; nella loggia principale vengono ricavati dei vani chiusi; il salone viene diviso in più ambienti; le finestre vengono più volte modificate o tamponate.

Tra l'inizio del XX secolo e la metà dello stesso si assiste ad una serie di interventi di restauro, realizzati dal nuovo ente proprietario, sia delle finiture ma altresì delle strutture fra cui riparazione di tetti, fognature, pavimenti, infissi e manutenzione straordinaria e consolidamento strutturale. La maggior attenzione posta al bene ed alla sua salvaguardia, pur riscontrando l'invasività di alcuni interventi legata alle prassi un tempo di uso comune, ha permesso di avere oggi un discreto stato di conservazione che, pur intaccato dai dagli eventi sismici del maggio 2012, potrà presto essere ripristinato grazie al progetto di consolidamento già citato ed in corso di attuazione.

#### **4.4.2 Organizzazione ed evoluzioni delle strutture**

L'edificio attualmente si sviluppa in altezza su due piani principali (piano terra e piani primo) occupati dal Museo e dagli uffici ad esso pertinenti e si articola, come detto, attorno a due cortili caratterizzati da loggiati sui due piani. Un sottotetto, accessibile per le opere di manutenzione, si estende per una porzione limitata dell'edificio ubicata a sud.

Parlare dell'evoluzione strutturale che ha portato l'edificio fino ai giorni nostri significa esaminare con attenzione gli interventi che, nel corso del XX secolo si sono sistematicamente succeduti.

Nel 1912 vengono riaperte le finestre archiacute quattrocentesche, chiuse nel periodo di insediamento conventuale, e negli anni successivi tra il 1913 ed il 1919 avviene il primo restauro dei dipinti della sala delle Sibille posta al piano primo del corpo di fabbrica sud del cortile maggiore. Con il terremoto del 1920 si hanno notizia di danni alle strutture e puntellamenti vengono effettuati nelle logge del piano primo mentre è soltanto nel 1924 che vengono rimossi i pilastri costruiti a sostegno delle baldresche dopo l'evento sismico e ricostruite due volte, alcune baldresche e tre arcate della

loggia soprastante. Tra il 1920 ed il 1940 si eseguono importanti interventi di restauro e consolidamento strutturale ed altresì, nel 1931, vengono inserite alcune catene alla quota del solaio dei loggiati al fine di contrastare i cedimenti e limitare le spinte delle arcate.

Nel 1941 vengono effettuati i rilievi delle deformazioni della facciata principale, delle logge e dei solai. Vengono inoltre raddrizzate le colonnine del loggiato superiore, realizzate sottofondazioni in muratura sotto la facciata principale ed il colonnato interno e riaperte finestre sul lato e sulla facciata, e riaperti tre portali di ingresso. Negli anni '50 viene sostituita la copertura in legno dell'ala sud con capriate prefabbricate in C.A.; per ristrutturare l'ingresso e l'abitazione del custode vengono stravolti i vani dell'angolo nord-est; viene inoltre demolita la scala del XV secolo e collocata una nuova scala all'angolo nord-ovest. Vengono scrostati i muri dei chiostrini dall'intonaco che presentava tracce delle decorazioni originali. Soffitti lignei, decorazioni ed affreschi vengono invece restaurati con la massima cura. Tra il 1950 ed il 1951 viene restaurata la sala delle Sibille con distacco dei dipinti e riposizionamento alle pareti previo fissaggio su pannelli di supporto.

Nel 1952 viene istituito il Museo di Casa Romei, in cui si custodiscono marmi ed affreschi per i Beni Ambientali e Architettonici di Ravenna, Forlì e Ferrara è tuttora impegnata in un organico restauro architettonico di Casa Romei e di valorizzazione delle opere in essa ospitate. A tal proposito nell'ultimo trentennio del secolo vengono effettuati una serie di interventi finalizzati ad una corretta gestione e conservazione del bene fra cui si ricorda: 1975 viene effettuato il taglio alla base dei muri per limitare l'ascesa per capillarità dell'umidità proveniente dalle fondazioni e sottofondazioni in laterizio; 1987 vengono posizionati doccioni in rame al fine di migliorare lo smaltimento delle acque meteoriche unitamente alla sistemazione del sistema di raccolta delle acque a terra e della fognature; tra il 1989 ed il 1990 vengono rifatti gli intonaci ed a partire dal 1975 i dipinti vengono sottoposti a periodica revisione e manutenzione come anche i soffitti che nel 1988 e nel 1992 vengono restaurati con carte dipinte. In ultimo nel 1990 vengono restaurate le superfici esterne relative al cortile principale.

Nel 2012, maggio, l'edificio è stato lesionato dall'evento sismico che ha interessato ampie aree della Romagna con la conseguente necessità, per

la Direzione Generale per i beni culturali che l'ha in gestione, di procedere alla redazione di un progetto per interventi di ripristino e miglioramento strutturale con la consulenza tecnica del Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura dell'Università degli studi di Parma.

Le indagini effettuate in occasione della redazione del progetto di consolidamento post-sismico, hanno permesso di caratterizzare maggiormente i materiali e le strutture presenti che, sinteticamente<sup>120</sup> sono identificabili in:

- murature portanti interamente in mattoni pieni e malta di calce;
- orizzontamenti costituiti per lo più da solai lignei; in alcune sale sono presenti volte in cannicciato sostenute da strutture lignee;
- copertura in parte costituita da solai lignei e in parte da solai "Varese", ossia da un sistema di travetti prefabbricati e tavelloni in laterizio forato, con cordolo perimetrale, che ha sostituito l'originario solaio ligneo nel corso di precedenti interventi, descritti nel seguito;
- presenza di incatenamenti ai vari piani.

#### **4.4.3 L'arcone delle baldresche**

Oggetto di particolare attenzione della presente ricerca sono le accentuate deformazioni degli archi posti in angolo sud e nord del lato est del cortile maggiore ove si intersecano gli archi esterni delle baldresche.

---

<sup>120</sup> Per maggiori dettagli ed approfondimenti si rimanda al Progetto per il ripristino ed il miglioramento strutturale a seguito di eventi sismici del maggio 2012, progettista arch. Gabriele Pivari, consulenza Università degli Studi di Parma, DICAeA, prof.arch. Carlo Blasi, prof.ing. Eva Coisson, prof.ing. Beatrice Belletti, arch. Federica Borghi, ing. Cecilia Damoni, arch. Massimo Cotti, arch. Lia Ferrari.



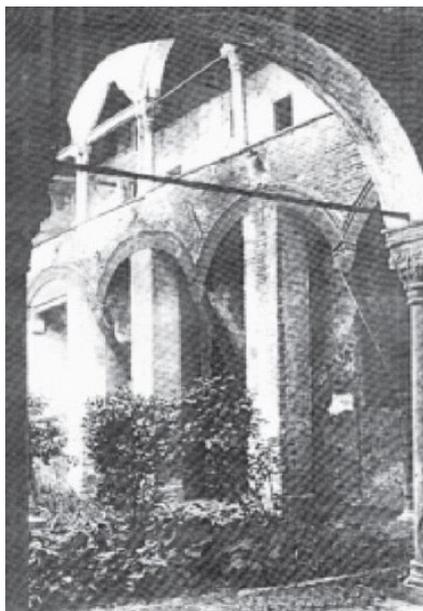
*Figura 121 Arco in angolo est del loggiato sul lato nord del cortile minore in corrispondenza dell'intersezione con l'arco delle baldresche con evidenti segni di deformazione; il confronto fra la situazione deformata e la possibile conformazione iniziale indeformata è di notevole importanza per la determinazione dell'evolversi del quadro degli stati tensionali, dei quadri fessurativi e di deterioramento e conseguentemente per meglio proporre gli eventuali interventi di consolidamento.*

In questa posizione infatti, rispetto al rimanente fronte nord dove sugli archi vanno ad agire carichi di carattere sostanzialmente distribuito (indotti dal primo impalcato ligneo del loggiato e dalla balaustra laterizia superiore), le azioni verticali indotte dall'arco esterno delle baldresche sono concentrate su uno sviluppo di in poche decine di centimetri (quelle orizzontali risultano infatti contrastate dalla presenza di catene metalliche orizzontali posta alla quota dell'imposta dell'arco stesso, per tutto lo sviluppo del fronte est, che le prove in sito hanno dimostrato essere in un corretto stato tensionale); si genera così una configurazione di carico asimmetrica (carico distribuito sommato al carico concentrato lateralmente) sulla struttura che, nonostante la presenza di catene metalliche a contrasto delle spinte orizzontali poste all'imposta, trova un nuovo equilibrio deformandosi necessariamente in modo asimmetrico. In questo caso risulta ancor più complesso comprendere la configurazione tensionale che si è venuta a creare

all'interno della compagine muraria, non potendosi neppure avvalere dei metodi di statica grafica (tipo Méry) che si fondano sull'ipotesi fondamentale della simmetria di geometrie e carichi.

#### 4.4.3.1 *Quadro dei dissesti*

La struttura che ad oggi è presente sul fronte est del cortile maggiore non è, almeno per la parte centrale, quella originalmente eretta dalle antiche maestranze. Dalla documentazione storica ed archivistica ad oggi disponibile<sup>121</sup> si evince infatti come, per le precarie condizioni di stabilità che interessavano la parte agli inizi del XX secolo, nel 1924 su progetto dell'arch. Luigi Corsino vennero demolite e poi ricostruite le due arcate centrali del suddetto fronte.



*Figura 122 Arconi delle baldresche in una fotografia del 1924, i già presenti problemi di stabilità del fronte ne avevano imposto un puntellamento di sicurezza fino agli interventi del 1924.*

---

<sup>121</sup> Carla Di Francesco, Casa Romei un ritrovamento e molti problemi, in Musei Ferraresi Bollettino annuale, n. 15, 1985/1987, pp. 79 - 82.

Tale intervento, come altresì confermato durante le recenti indagini<sup>122</sup>, nonostante l'inserimento di elementi metallici nelle strutture di muratura ricostruita non ha risolto le problematiche di stabilità generale del fronte che, per la sua conformazione geometrica, vede comunque alcune criticità legate allo sbalzo su cui si sviluppa l'arco rispetto agli appoggi ed altresì alla presenza degli archi esterni in appoggio diretto su di un arcone ad essi trasversale.



*Figura 123 Individuazione delle due baldresche e le tre arcate superiori ricostruite nell'intervento del 1924: l'arco piano terreno a nord (sinistra della foto) e l'arco piano terreno a sud (destra della foto) agiscono puntualmente a circa ½ dall'imposta degli archi ortogonali dei rispettivi fronti nord e sud.*

Nel dettaglio dello stato odierno si riscontrano deformazioni simili sia nell'arco sul fronte nord che in quello sul fronte sud, legate alla presenza, oltre che del carico distribuito<sup>123</sup>, di un carico puntuale<sup>124</sup> legato alla

<sup>122</sup> Progetto per il ripristino ed il miglioramento strutturale a seguito di eventi sismici del maggio 2012, progettista arch. Gabriele Pivari, consulenza Università degli Studi di Parma, DICAeA, prof.arch. Carlo Blasi, prof.ing. Eva Coisson, prof.ing. Beatrice Belletti, arch. Federica Borghi, ing. Cecilia Damoni, arch. Massimo Cotti, arch. Lia Ferrari.

<sup>123</sup> Sul fronte nord il carico distribuito è legato alla presenza del primo impalcato di piano della soprastante loggia e del parapetto in muratura di essa perimetrale mentre sul fronte sud il carico distribuito è legato alla presenza del primo impalcato di piano (stanza delle Sibille) ed del muro continuo che si sviluppa fino alla quota delle coperture.

conformazione geometrica dell'arco laterale del fronte est. A causa dell'intensità maggiore delle azioni concentrate, l'arco a nord (Figura 121) risulta avere un accentuamento delle deformazioni con la formazione di fratture intradossali in corrispondenza del carico concentrato nonché in area estradossale in corrispondenza della chiave, legate le prime alla formazione di una cerniera estradossale e le seconde ad una intradossale.

A completare il quadro delle deformazioni, riscontrate durante l'ultima campagna di rilevamenti effettuata con tecnologia del laser a scansione, sono dei cedimenti differenziali riscontrabili fra i due appoggi e legati in parte alla differenza di tensioni indotte dai carichi non simmetrici e dall'altra legate alla conformazione del terreno sottostante che, come riscontrato da recenti indagini geotecniche<sup>125</sup>, risulta avere scarse qualità meccaniche.

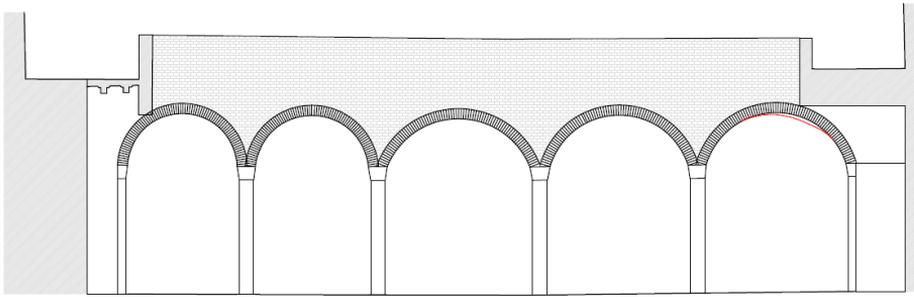
#### 4.4.3.2 Modellazioni

La ricostruzione della geometria indeformata della struttura, intesa come quella più prossima possibile a quella originaria, si è basata, non essendo a disposizione elementi certi precedenti a quelli legati ai progetti di intervento che si sono succeduti durante il secolo scorso, su analogia costruttive e confronto con gli altri elementi della stessa tipologia posti che cortile maggiore che, secondo le indagini storiche, risalgono al medesimo periodo costruttivi e difficilmente possono essere state realizzati in modo geometricamente differente.

---

<sup>124</sup> Specificatamente il carico concentrato che agisce puntualmente sull'arco a sud è frutto esclusivamente della reazione verticale dell'arco esterno sud del fronte delle baldresche, il carico concentrato che agisce sull'arco a nord è frutto in parte della reazione verticale dell'arco esterno nord del fronte delle baldresche maggiorato dell'azione derivante dalla presenza in asse di una colonna che ivi trasmette le azioni provenienti dalle coperture.

<sup>125</sup> Progetto per il ripristino ed il miglioramento strutturale a seguito di eventi sismici del maggio 2012.



*Figura 124 Ricostruzione della geometria indeformata secondo i dati di progetto ed inserimento (rosso) dell'accentuata deformazione dell'arco di destra oggetto di indagine dettagliata.*

Escludendo dalla ricostruzione quello che poteva essere ritenuto opera di errori costruttivi o dovuto al succedersi degli interventi, mantenendo come base il rilievo tridimensionale effettuato, sono state considerate le seguenti condizioni:

- Verticalità dei piedritti laterali, sia lato duomo che lato torre (sono stati escluse eventuali traslazioni orizzontali degli appoggi);
- Altezza delle imposte degli archi compensate;
- Arco indeformato considerato con centro ribassato rispetto alle imposte (geometria riscontrabile negli altri elementi presenti nel cortile maggiore) e discretizzato secondo la conformazione visibile (Figura 121)

Per gli scopi della presente ricerca, sono state separatamente utilizzate le due differenti geometrie individuate (Figura 124) per la generazione, in ambiente UDEC, di due modelli distinti di cui il primo in rappresentazione dell'originaria conformazione ed il secondo di quella oggi visibile; sono state inoltre considerate costanti le caratteristiche dei materiali e le condizioni al contorno nei modelli:

- Materiale:
  - Laterizio: Densità 1800 18 KN/mc
- Arco discretizzato, in entrambe le configurazioni di analisi, in un numero finito di 80 conci di laterizio;

- Carichi superiori analizzati in accordo con le relazioni di calcolo del progetto di consolidamento<sup>126</sup>
- Sono state modellate le porzioni laterali delle murature ed i vincoli legati alla presenza di catene in ferro<sup>127</sup>.

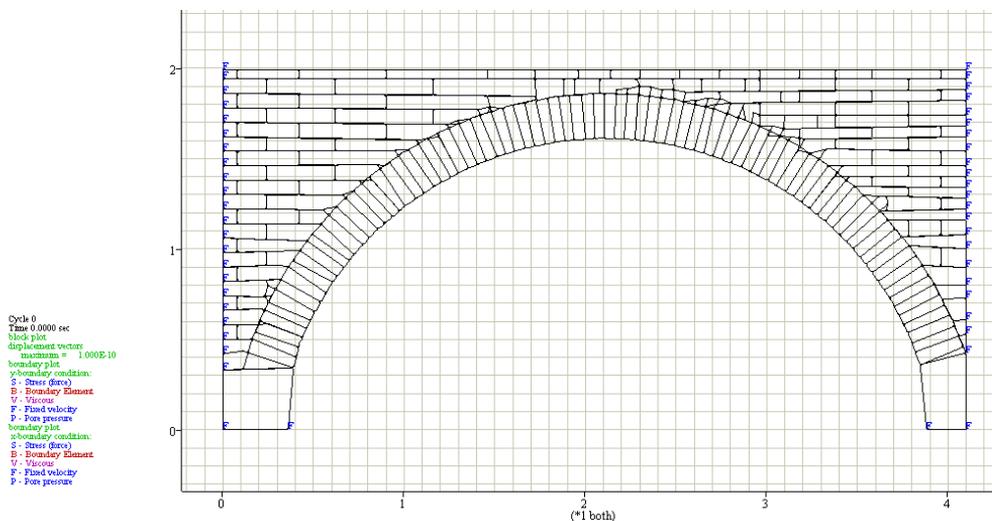


Figura 125 Modello ad elementi distinti, in ambiente UDEC, riportante la geometria indeformata con indicazioni delle principali condizioni al contorno di stress (S) e vincoli (F) sia laterali per simulare la presenza dei setti murari che orizzontale per la simulazione degli appoggi e dei cedimenti.

<sup>126</sup> Relazione di calcolo strutturale comprensiva della illustrazione sintetica degli elementi essenziali del progetto strutturale, in Progetto per il ripristino ed il miglioramento strutturale a seguito di eventi sismici del maggio 2012, progettista arch. Gabriele Pivari, consulenza Università degli Studi di Parma, DICAeA, cap.2, pp.16-146.

<sup>127</sup> Determinazione del carico e verifica strutturale delle catene di rinforzo di Casa Romei, Università degli studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria Industriale, in Progetto per il ripristino ed il miglioramento strutturale a seguito di eventi sismici del maggio 2012, progettista arch. Gabriele Pivari, consulenza Università degli Studi di Parma.

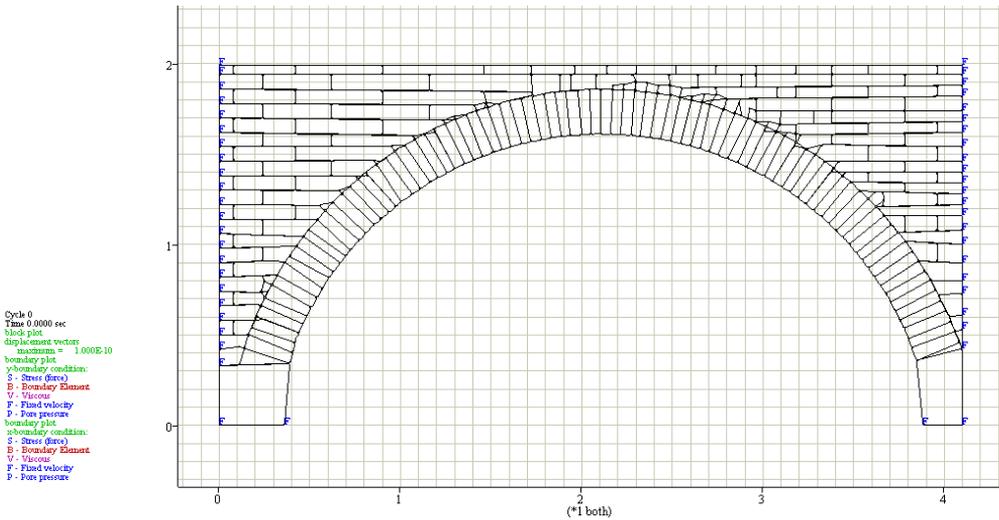


Figura 126 Modello ad elementi distinti, in ambiente UDEC, riportante la geometria deformata con indicazioni delle principali condizioni al contorno di stress (S) e vincoli (F)..

Lo studio relativo alla configurazione indeformata ha seguito due distinte fasi la cui differenza principale sussiste nella simulazione di un diverso vincolo laterale per la presenza attuale di catene metalliche un tempo non poste in opera.

A tal proposito la prima fase di analisi vede l'utilizzo di un modello che, per simulare la prima fase di costruzione, non prevede lo svilupparsi di cedimenti né verticali né orizzontali al fine di valutare la risposta della struttura sottoposta alle azioni verticali indotte dalle porzioni di impalcati del primo piano che ivi agiscono ed altresì dai carichi concentrati dovuti, agente direttamente sulla struttura dell'arco, dalla componente verticale dell'arco nord della struttura delle baldresche e, agente sommitale al parapetto del piano primo, alla colonna che da questo piano si sviluppa a sostegno della porzione di copertura sopra posta.

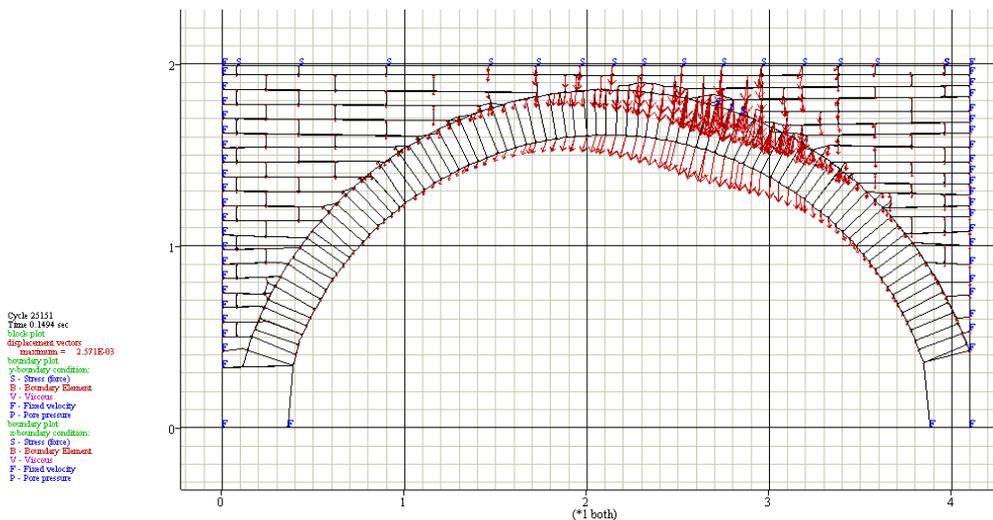


Figura 127 Considerando le azioni delle strutture invariate nel corso del tempo la simulazione mostra che, anche in assenza di fenomeni esterni come cedimenti degli appoggi differenziali e perdiche di verticalità dei muri esterni, la struttura risentisse già criticità concentrate in corrispondenza dello svilupparsi delle azioni concentrate.

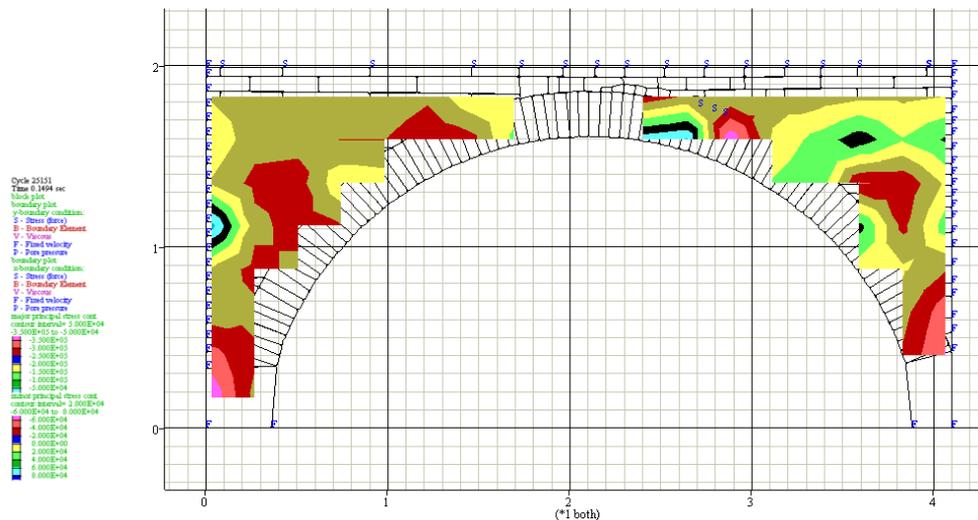


Figura 128 L'analisi tensionale conferma il crescere delle stesse in corrispondenza dei carichi concentrati ed in corrispondenza della parzializzazione e distacco delle interfacce

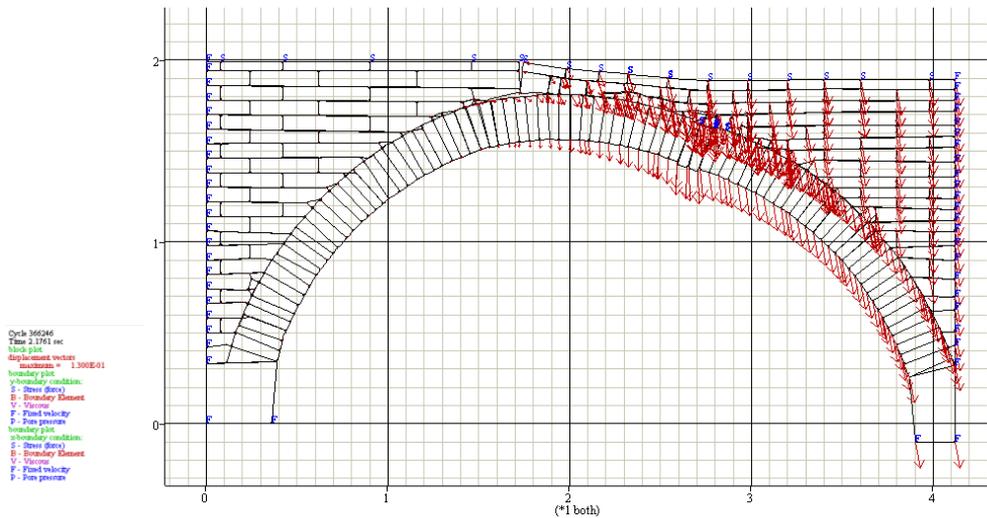


Figura 129 Gli spostamenti indotti all'appoggio, in termini di scorrimento verticale ed orizzontale, configurano l'arco come il rilievo lo presenta oggi (spostamenti amplificati per meglio cogliere le similitudine); in particolare il distacco di alcuni elementi in corrispondenza della verticale dei carichi è riscontrabile in loco.

Successivamente il modello ha simulato lo spostamento orizzontale<sup>128</sup> e quello verticale mantenendo costante l'applicazione delle azioni verticali indotte alla struttura e valutabili in circa 6 cm di differenza di quota alle imposte ed altrettanto relativamente allo spostamento laterale del vincolo.

<sup>128</sup> L'ampiezza del cedimento orizzontale è stata valutata in funzione della perdita di verticalità sia del muro perpendicolare all'arcata in lato est che della muratura di appoggio dell'arco stesso; per il cedimento differenziale si è fatto riferimento ai dislivelli presenti nelle strutture dei capitelli che, presumibilmente, alla loro realizzazione erano posto alla stessa quota.

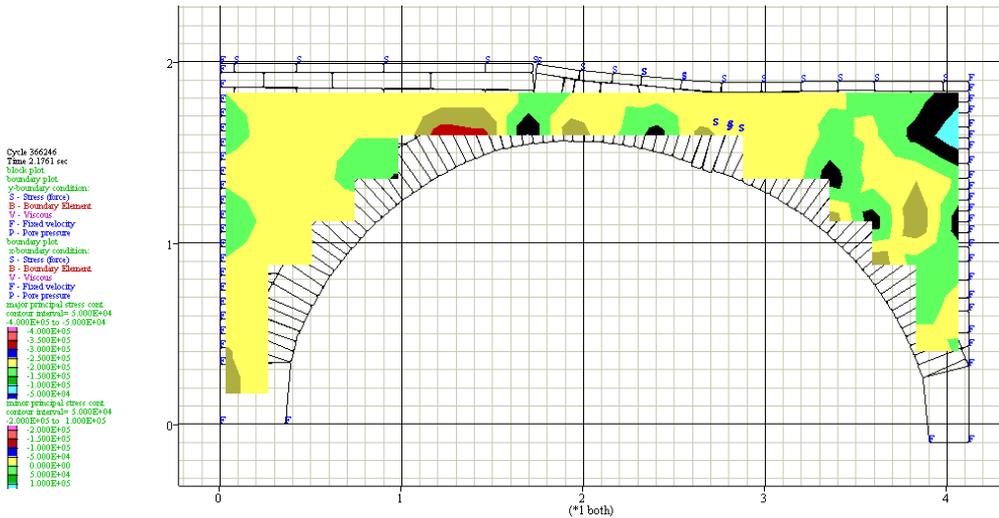


Figura 130 Analisi tensionale della struttura.

Il modello permette di apprezzare, come altresì visibile in loco, la presenza di forti schiacciamenti ed appiattimenti dell'intradosso in corrispondenza dei carichi e la formazioni di fratture e distacchi fra i conci ivi posti per rotazioni degli stessi e formazioni di tensioni di trazione cui le proprietà meccaniche non possono opporsi.

La presenza ora di catene metalliche, per le loro caratteristiche meccaniche indagate, permette di affermare che lo stato tensionale e deformativo non dovrebbe ulteriormente aggravarsi vista anche la previsione, nel progetto di consolidamento, di interventi atti a migliorare le collaborazioni fra le strutture anche in quell'area.

La modellazione della configurazione deformata vede ancora una volta un processo articolato, dal punto di vista concettuale, in una sola fase: l'applicazione delle azioni sulle strutture come precedentemente identificate. Le deformazioni legate alle perdite di verticalità delle strutture verticali sono infatti già insite nella configurazione geometrica del modello.

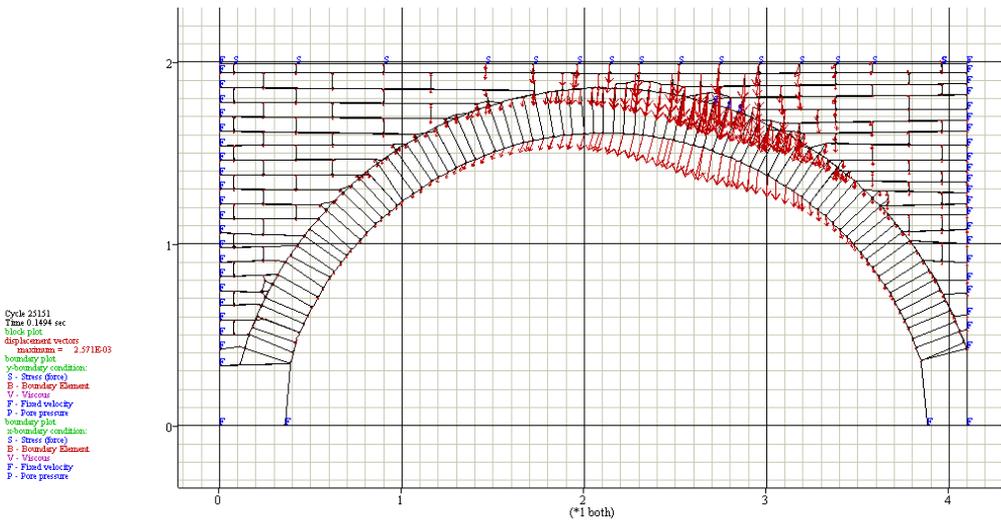


Figura 131 Analisi degli spostamenti degli elementi soggetti al carico verticale.

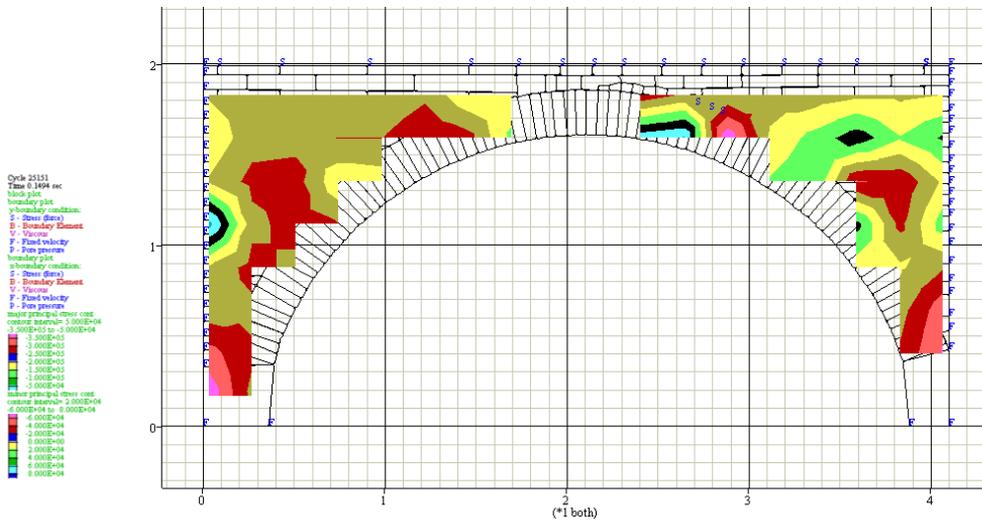


Figura 132 Analisi delle tensioni interne alla struttura.

Come già accaduto per gli altri casi studio la prima considerazione è che, ancora una volta, il primo modello (Figura 107) ha ottenuto una conformazione geometrica finale compatibile con lo stato rilevato ed altresì con la formazione di aperture intradossali compatibili, in termini di posizione, con lo stato dei luoghi rilevato.

## 4.5 Conclusioni

I casi studio qui riportati, limitati per numero ma non per risultati ottenuti, hanno permesso di valutare le potenzialità e la flessibilità dell'utilizzo di modellatori parametrici per la ricostruzione degli antichi sestri ma anche di apprezzare l'utilizzo degli elementi distinti come metodologia per la valutazione della strutture in muratura o più generalmente concepite come un accostamento di blocchi. Nel complesso, hanno permesso di evidenziare come per la valutazione di talune situazioni non sia indispensabile l'utilizzo di modellazioni particolarmente sofisticate (analisi FEM ad alto grado di dettaglio) proprio per il fatto che il soggetto in analisi garantisce una resistenza maggiormente per effetto dell'equilibrio piuttosto che per la pura resistenza dei materiali.

A questa prima considerazione va ulteriormente aggiunto che in tutti i casi sottoposti a studio si sono apprezzate notevoli differenze, in termini di tensioni interne ai materiali e sulle interfacce di contatto fra i blocchi, fra i modelli che avevano alla base la geometria dello stato di fatto e quelli che, avendo alla base la geometria originale ed indeformata, raggiungevano la conformazione attuale sviluppando nuovi stati di equilibrio interni. Proprio questi stati di equilibrio interni risultano particolarmente difficili da ricostruire per le strutture storiche, in quanto sono notevolmente influenzati dal percorso che le strutture stesse hanno svolto attraverso i secoli, subendo sollecitazioni e coazioni sostanzialmente impossibili da ricostruire fedelmente a posteriori. Partire dall'interpretazione critica del risultato deformativo che queste azioni hanno avuto sulla costruzione ha quindi rappresentato una efficace proposta per ricollegare il modello virtuale non soltanto alla realtà materica presente, con il suo quadro deformativo e fessurativo, ma anche al suo processo evolutivo, indagato mediante specifica indagine storica. Quest'ultima assume così un ruolo fondamentale non tanto in virtù di una conoscenza fine a se stessa, quanto per le dirette conseguenze che queste informazioni hanno sulla capacità del modello di rappresentare efficacemente la realtà. I casi studio indagati hanno infatti dimostrato che tralasciare queste informazioni porta in genere a sovrastimare il livello di sicurezza della struttura, con gravi rischi per la conservazione stessa.



## 5 Conclusioni

Si può leggere, all'interno di questa ricerca, come sia importante, per qualunque intervento sul patrimonio edilizio esistente, la conoscenza del bene, da intendersi come l'insieme delle informazioni mensorie, storico-critiche, archivistiche, bibliografiche, tecniche, che consentono di avere una piena consapevolezza del fatto che lo stato che lo studioso o il professionista vedono oggi non è altro che un processo di stratificazione protrattosi per tutto il tempo di vita dell'edificio stesso; ne consegue quindi che la corretta e critica conoscenza del bene possa esserne considerata come un "primo livello di salvaguardia".

Proprio come nel campo del restauro lo sviluppo culturale e scientifico negli ultimi secoli ha portato sempre una maggior attenzione e consapevolezza sull'importanza della conservazione delle stratificazioni storiche che si incontrano sulla superficie di un edificio piuttosto che di un monumento, proprio come segno tangibile del tempo trascorso, portando alla nascita di principi ormai inequivocabilmente accettati, così anche per gli aspetti prettamente di carattere strutturale occorre intraprendere il medesimo percorso e porre la medesima attenzione alle tracce lasciate dal tempo e dalla storia sulle strutture.

L'applicazione, anche agli aspetti di natura propriamente strutturale, dei principi classici del restauro, è la direzione che questa ricerca ha cercato di perseguire. Partendo dal riconoscimento dell'importanza della conoscenza e della conseguente comprensione del comportamento strutturale odierno e pregresso ai fini della definizione di qualsiasi tipo di intervento, si sono illustrate nuove strategie orientate alla coerenza del percorso nonché alla congruenza dei risultati con lo stato all'oggi riscontrabile in loco.

Conoscere, dal latino volgare *conoscĕre* significa avere notizia di una cosa, coscienza di come essa sia fatta. Ne appare la naturale conseguenza il fatto che, con l'evoluzione della cultura, ed in particolare con l'avvento

tecnologico, il mondo scientifico ha parallelamente sviluppato nuove modalità di controllo e documentazione relativa ad un determinato bene. Lo sviluppo del rilievo, cui ampio spazio è stato dato nella presente ricerca, permette proprio di capire meglio questo concetto, già noto agli antichi architetti che studiavano edifici esistenti in modo maggiormente approfondito di ciò che accade oggi, redigendone sempre più accurate documentazioni, in quanto era la loro unica fonte di conoscenza sul comportamento strutturale degli stessi e di previsione del futuro comportamento dei nuovi edifici.

Partendo proprio da questi legami, e cioè di come geometria e forma, proporzioni e matematica<sup>129</sup>, siano sempre state indissolubilmente legate nel corso di millenni di evoluzione costruttiva dell'uomo, il lavoro di ricerca svolto ha permesso di meglio comprendere come ancora oggi sia necessario riscoprire questi legami che si stanno in certi casi affievolendo, probabilmente a causa dell'eccessiva semplificazione apportata sia dalle tecnologie di rilievo e modellazione, sia dai "modus operandi" riscontrabili nella pratica professionale,.

Di particolare interesse è apparsa l'applicazione combinata di software nati per scopi differenti: da una parte UDEC, che vede la sua origine nel campo geotecnico ma con potenzialità che lo hanno reso apprezzato anche nell'ambito dell'ingegneria civile, e dall'altra Grasshopper, che nasce come supporto per la creazione pura di forme geometriche e che sempre maggiore spazio sta acquisendo nell'architettura moderna. La combinazione sinergica di forma e struttura si è quindi rivelata vincente come primo passo nella costruzione dei modelli, sia geometrici che strutturali, andando proprio a ricostruire quel legame antico ma al contempo integrandolo con la tecnologia contemporanea.

Rimane auspicabile che sviluppi futuri della ricerca e della tecnica possano permettere una maggiore interazione fra i due programmi, che nella presente ricerca può essere considerata come allo stato embrionale, bisognosa quindi del supporto di campi diversi, quali l'informatica, per

---

<sup>129</sup> Giovanni Poleni, Op. cit., p. 3.

migliorarsi ed affinarsi; è apparso infatti evidente, almeno per lo studio eseguito, come la nascita delle prime sinergie abbia permesso una gestione maggiormente accurata dei modelli, permettendo anche di apportare modifiche in tempistiche ristrette, mantenendo nel contempo un controllo sui risultati e, non in ultimo, garantendo la possibilità di procedere facilmente alla riproducibilità del modello stesso.

Le applicazioni pratiche, cui il metodo di analisi individuato è stato applicato, pur considerando la limitata estensione nel numero dei casi affrontati, hanno comunque permesso di confermare come per giungere a valutazioni di quali siano le condizioni strutturali attuali di un edificio storico (o comunque esistente) in muratura siano di indubbia importanza l'apporto delle conoscenze storiche, delle ispezioni ed indagini in sito, del monitoraggio ed ovviamente della modellazione, ma solo se questi dati vengono costantemente confrontati e correlati tra loro. I risultati ottenuti dimostrano come tentare di giungere a conclusioni esclusivamente attraverso indagini storiche, o ancora basandosi su una sterile modellazione numerica, sia un sentiero pericoloso da percorrere: nel primo caso non vi è alla base nessuna ipotesi posta sull'effettivo comportamento della struttura mentre nel secondo caso le ipotesi introdotte nel modello non sono in alcun modo provate. Storia, monitoraggi e rilievo delle condizioni attuali forniranno quindi delle prove empiriche che saranno alla base delle ipotesi della modellazione; il modello potrà quindi considerarsi attendibile, e conseguentemente utilizzabile per predire eventuali sviluppi futuri degli assestamenti (magari legati a nuovi utilizzi piuttosto che ad interventi di restauro), nel momento in cui dalla geometria indeformata originale sarà in grado di riprodurre lo stato di fatto odierno applicandovi "la storia", così come proposto e applicato nella presente ricerca.

## 5.1 Questioni aperte

Non aderente alla realtà sarebbe il ritenere che la ricerca abbia esaurito tutti i possibili aspetti di un mondo così vasto com'è quello che si para dinanzi allo studioso piuttosto che al pratico tecnico quando si avvicina ad un edificio esistente; aspetti che ovviamente sono differenti da quelli relativi ad una nuova progettazione. Considerando quanto qui affrontato e

sviluppato è corretto ritenere che si possano individuare due possibili, distinti, filoni di sviluppo.

Il primo, relativo principalmente all'aspetto di ricostruzione delle originali forme geometriche ed alla migliore sinergia sviluppabile fra i due programmi utilizzati, potrebbe portare, mediante un approccio interdisciplinare, alla stesura di protocolli software maggiormente flessibili in grado non solo di assorbire al loro interno la risoluzione di molteplici famiglie di problematiche (a differenza dell'attuale ricerca che ha visto lo sviluppo di una procedura software specifica per ogni caso di studio) ma anche di permettere una riscrittura automatica dei dati all'interno del file di pertinenza del programma di calcolo UDEC (aspetto che nell'attuale ricerca è stato realizzato attraverso l'utilizzo di un editor di testo esterno ai due programmi citati nella relazione). Non in ultimo, sempre su tale aspetto, la possibilità di applicazione delle medesime procedure anche ad altri programmi, finalizzati al calcolo con metodologia ad elementi distinti anche in ambito tridimensionale; oltre a software di tipo commerciale quale 3DEC; una particolare attenzione potrebbe aversi su CHRONO ENGINE<sup>130</sup>, già utilizzato in progetti seguiti all'interno del DICATeA.

Per quanto riguarda il legame fra forma e struttura, qui analizzato attraverso casi studio che hanno visto come geometria prevalente quella voltata e ad arco, si ritiene che un notevole spazio potrebbe aprirsi con l'analisi di altri elementi architettonici quali piattabande, setti murari ecc, al fine di avere risultati su un numero statisticamente significativo di elementi tipologici, per giungere alla stesura di linee guida generali per la gestione corretta dei modelli di analisi. Da ultimo, ma non per la minore importanza che esso riveste, si sottolinea l'importanza di confrontare i risultati attraverso prove in sito sulle strutture o su modelli in scala di tipo sperimentale, per andare a settare attraverso processi iterativi quei parametri operativi interni alle procedure di calcolo.

---

<sup>130</sup> Programma di calcolo, Open Source, sviluppato dal Prof. Alessandro Tasora (Università degli Studi di Parma, Dipartimento di Ingegneria meccanica) e Dan Negrut (University of Wisconsin, Madison) per applicazioni di simulazione meccanica ma applicato in alcune ricerche relativo all'analisi delle volte sottili (<http://projectchrono.org>).



## 6 Bibliografia ragionata

Marco Vitruvio Pollione, *De Architectura*, sec I a.C., Torino, Pierre Gros (a cura di), Antonio Corso, Elisa Romano (traduzione e commento), Giulio Einaudi Editore, 1997.

Leon Battista Alberti, *De pictura*, Genova, 1435.

Leon Battista Alberti, *De Re Aedificatoria*, 1452.

Leonardo da Vinci, *Codice atlantico*, 1515.

Giorgio Vasari, *Le vite*, 1568.

Andrea Palladio, *I quattro libri dell'architettura*, 1570.

Vincenzo Scamozzi, *L'idea dell'architettura universale*, 1615.

Galileo Galilei, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze*, 1638.

Ludovico Vedriani, *Historia dell'antichissima città di Modena*, 1667.

Amédée-Frezier, *La théorie et la pratique de la coupe des pierres et des voûtes pour la construction des voutes et autres parties des bâtiments civils & militaires*, Hachette Livre, 1737-1739.

Giovanni Poleni, *Memorie storiche della gran cupola del tempio Vaticano*, 1747.

Charles Augustin Coulomb, *Essais sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique relative à l'architecture*, *Mémoires de mathématique et de physique*, Paris, Académie Royal des Sciences, 1776.

Ottavio Bertozzi Scamozzi, *Le fabbriche e i disegni di Andrea Palladio*, Vicenza, Giovanni Rossi, 1776.

Lorenzo Mascheroni, *Nuove ricerche sull'equilibrio delle volte*, 1785.

Bernardo Galiani, *L'architettura di Marco Vitruvio Pollion tradotta e commentata dal marchese Bernardo Galiani*, Siena, Stamperia di Luigi e Benedetto Bindi, 1790

Nicola Cavalieri, *Istruzioni di architettura statica e idraulica*, Bologna, Tipografia Cardinale e Frulli, 1827.

Carlo Antonini, *La storia dei cinque ordini*, 1828.

Carlo Antonini, *Il Vignola illustrato proposto da Carlo Antonini*, Roma, Angelo Ajani, 1828.

Jean Baptiste Rondelet, *Traité theorique et pratique de l'art de batir*, Paris, Firmin Didot Frères, Fils et C, libraires, Imprimeurs de l'Institut, Rue Jacob 56, 1867, prima traduzione italiana sulla sesta edizione originale, con note aggiunte di Basilio Soresina, Mantova 1831-1835.

Quatremère de Quincy, *Dizionario storico dell'architettura*, traduzione italiana del 1842.

Carlo Borghi, *Il Duomo ossia cenni storici e descrittivi della Cattedrale di Modena*, Modena, Cappelli, 1845.

Leonce Reynaud, *Traité d'architecture contenant des notions generals sud le principes de la construction et sur l'histoire de l'art*, Paris, Victor Delmont Editeur, 1858, Antonelli, Venezia, 1853.

Eugène Emmanuel Viollet-L-Duc, *Dictionnaire raisonné de l'architecture francaise du Xle au XVIe siècle*, 1854-1868.

Luigi Francesco Valdrighi, *Delle storie di Modena*, Modena, 1876.

Giuseppe Musso, Giuseppe Copperi, *Particolari di costruzioni murali e finimenti di fabbricati*, Torino, G.B.Paravia, 1885-1887.

Giovanni Curioni, *L'arte di fabbricare ossia corso completo di istruzioni teorico pratiche per gl'ingegneri per gli architetti per i periti in costruzione e per i periti muratori*, Torino, Negro, 1867-1884.

Adolf Breyman Gustaf, *Trattato generale di costruzioni civili con cenni speciali intorno alle costruzioni grandiose*, Milano, Vallardi, 1884.

Antonio Dondi, *notizie storiche ed artistiche del Duomo di Modena raccolte e ordinate dal canonico A.D. coll'elenco dei codici capitolari in appendice*, Modena, 1896.

Giovan Battista Milani, *L'ossatura murale. Studio statico-costruttivo ed estetico-proporzionale degli organismi architettonici con particolare riferimento alle strutture esastiche nelle loro varie e moderne applicazioni pratiche*, Torino, Società Italiana edizioni artistiche C.Curdo, & C, 1901.

Carlo Balducci, *Il rilievo architettonico*, Milano, Hoepli, 1930.

Sisto Mastrodicasa, *Dissesti statici nelle strutture. Diagnosi consolidamento istruzioni teoriche applicazioni pratiche*, Milano Hoepli, 1943.

Gustavo Colonnati, *Scienza delle costruzioni. Teoria generale dell'equilibrio*, Torino, Einaudi, 1953.

Ferdinando Castagnoli, *La pianta marmorea di Roma antica*, Monaco, C. H. Beck'Sche Verlagsbuchhandlung, 1961.

N. Davey N. *A history of building materials*, Phoenix House, London, UK, 1961

Mariano Cuminetti, *Il programma di insegnamento della topografia negli Istituti per Geometri*, in *Bollettino SIFET*, num.1, 1962.

Carlo Arturo Quintavalla, *La cattedrale di Modena; problemi di romanico emiliano*, Modena, 1964.

Mariano Cuminetti, Attilio Selvini, *Che cos'è la fotogrammetria*, in *La Prealpina*, num.6, 13, 20, 27, 1965.

Ermanno A. Arslan, *Osservazioni sull'impiego e la diffusione delle volte sottili in tubi fittili*, in *Bollettino d'Arte*, 1965, num.I-II.

Ermanno A. Arslan, *Osservazioni sull'impiego e la diffusione delle volte sottili in tubi fittili*, *Bollettino d'Arte*, 1965, I-II, pp. 45-52;

Ermanno A. Arslan, *Il significato spaziale delle volte sottili romane e paleocristiane*, in *Mesopotamia II*, Torino, Giappichelli Editore, 1967.

Michele Pagano, *Teoria degli edifici vol.1: edifici in muratura*, Napoli, Liguori Editore, 1968.

Attilio Selvini, Carlo Saibene, *Il corso di specializzazione in topografia all'Istituto Tecnico Carlo Cattaneo di Milano: una esperienza significativa*, in *Bollettino SIFET*, num.4, 1969.

Mariano Cuminetti, *Progetto per l'istruzione permanente*, Milano, Politecnico di Milano, 1974.

Luigi Vaghetti, *L'architetto nella storia di occidente*, Firenze, Teorema, 1974.

Francesco Panini, *Cronica della città di Modena*, Rolando Rossi, Roberto Montagnani (a cura di), Modena, Edizioni Panini, 1978.

Peter Cundall, Otto D.L. Starck, *A discrete numerical model for granular assemblies*, in *Géotechnique* 29, Advanced Tecnology Group, London, Dames & Moore, num.1, 1979.

American Society of Photogrammetry, *Manual of photogrammetry*, Bethesda, Maryland, Asprs Pubns, 1980.

Edoardo Benvenuto, *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, Firenze, Sansoni, 1981.

P. Rainer, *Movement control in the fabric of buildings*, NewYork, Nicolas Publishing, 1983.

Luigi Ramazzotti, *L'edilizia e la regola. Manuali nella Francia dell'ottocento*, Roma, Edizioni Kappa, 1984.

Mario Docci, DiegoMaestri, *Storia del rilevamento architettonico e urbano*, Roma, Laterza, 1984.

Salvatore Di Pasquale, *Statica dei solidi murari. Teoria ed esperienza*, Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Costruzione, Pubbl. 27, 1984.

AA.VV., *Lanfranco e Wiligelmo il Duomo di Modena*, Modena, Edizioni Panini, 1984.

D. Kaminetzy, *Verification of structural adequacy. Rehabilitation renovation and preservation of concrete and masonry structures*, Detroit, American Concrete Istituto, 1985.

Carla Di Francesco, *Casa Romei un ritrovamento e molti problemi*, in *Musei Ferraresi Bollettino annuale*, Ferrara, num.15, 1985

Antonio Giuffrè, *La meccanica nell'architettura. La statica*, Roma, Carocci Editore, 1986.

Mariano Cuminetti, *Ciò che serve sapere di fotogrammetria per un geometra*, in *Atti corso aggiornamento PMI*, Foligno, 1986.

AA.VV., *I restauri del Duomo di Modena*, Modena, Edizioni Panini, 1987.

J. Musgrove, B. Fletcher. *Sir Banister Fletcher's: A history of architecture*, Butterworths, London, UK, 1987

Antonio Giuffrè, Monumenti e terremoti. Aspetti statici del restauro, Roma, Multigrafica, 1988.

Paolo Torsello, La materia del restauro, Venezia, Marsilio, 1988.

Giancarlo Roversi (a cura di), Le torri di Bologna. Quando e perché sorsero, come vennero costruite, chi le innalzò, come scomparvero, quali esistono ancora, Bologna, Edizioni Grafis, 1989.

E. Benvenuto, M. Corradi, F. Foce, Sintesi storica sulla statica di archi cupole nel XIX secolo, in Palladio, num.2, 1989.

Michele Pagano, Costruire in muratura, Napoli, Liguore Editore, 1990.

Antonio Giuffrè, Lettura sulla meccanica delle murature storiche, Roma, Edizioni Kappa, 1991.

B. A. Izzuddin, Nonlinear Dynamic Analysis of Framed Structures, PhD Thesis, Imperial College, London, 1991

C. D. Elliott, Technics and architecture: The development of materials and systems of buildings, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1992.

Benito De Sivo, Il restauro degli edifici in muratura, Palermo, Dario Flaccovio, 1992.

Silvana Abeasis, Elementi di algebra lineare e geometrica, Bologna, Zanichelli, 1993.

A.T. Vermeltfoort, T.M.J. Raymakers, H.J.M. Janssen, Shear tests on masonry walls, in A. Ahmad, H. Hamid, H.G. Harris (a cura di), Conference Paper: 6th North American Masonry Conference, 6-9 June 1993, Philadelphia, Pennsylvania, USA, Lancaster: Technomic Publ. Co., 1993

Salvatore Di Pasquale, L'arte del costruire tra coscienza e scienza, Venezia, Marsilio Editore, 1996-2003.

Antonio Migliacci, L'architettura dell'equilibrio e della deformazione, Milano, Edizioni Masson, 1996.

Giovanni Carbonare, Restauro architettonico, Torino, UTET, 1996.

Antonio Migliacci, L'architettura dell'equilibrio e della deformazione, Milano, Edizione Masson, 1996.

Sebastian Storz, La tecnica edilizia romana e paleocristiana delle volte e cupole a tubi fittili, in Claudia Conforti (a cura di), Lo specchio del cielo, Milano, Electa, 1997.

T.G. Bidwell, The conservation of buildings. The repair alteration and restoration of brickwork, Londra, Brick Development Association, 1997.

Antonio Giuffrè, Codice di pratica per la sicurezza e conservazione del centro storico di Palermo, Bari, Laterza, 1999.

F. Predal, K. Sab, Cosserat overall modelling of periodic discrete structures, J.Phys (a cura di), Solids, 1999

Renato Sparazio, La scienza e i tempi del costruire, Torino, UTET Università, 1999.

Ivo Iori, Un diario didattico. Principi statici e tecniche costruttive nel loro sviluppo storico, Benevento, Hevelius Edizioni, 2000.

Antonio Becci, Federico Foce, Degli archi e delle volte. Arte del costruire tra meccanica e stereotomia, Venezia, Marsilio, 2002.

Erika Frigeri, Il duomo di Modena fra filosofia e storia, Verona, Gabrielli Editore, 2004.

Giovanni Cangi, Manuale del recupero strutturale e antisismico, Roma, DEI Tipografia del Genio Civile, 2005.

Carlo Blasi, Eva Coisson, Sesti e dissesti, in Paolo Bertozzi, Agnese Ghini, Luca Guardigli (a cura di), Le forme della tradizione in architettura esperienze a confronto, Milano, Franco Angeli, 2005.

Pere Roca, Consideration on the significance of history for the structural analysis of ancient constructions, in Claudio Modena, Paulo B. Lourenco, Pere Roca, Structural analysis of historical constructions, London, Taylor & Francis Group plc, 2005.

Luca Pelà , Julien Bourgeois , Pere Roca , Miguel Cervera , Michele Chiumenti, Analysis of the Effect of Provisional Ties on the Construction and Current Deformation of Mallorca Cathedral, in International Journal of Architectural Heritage, Londra, Taylor & Francis Group, 2006.

COMOS, Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage, Barcelona, 2005.

Pere Roca, Consideration on the significance of history for the structural analysis of ancient constructions, in Claudio Modena, Paulo B. Lourenco, Pere Roca, Structural analysis of historical constructions, London, Taylor & Francis Group plc, 2005

Fulvio Giuliani Cairolì, L'edilizia nell'antichità, Roma, Carocci, 2006.

Carlo Blasi, Eva Coisson (a cura di), La fabbrica del Duomo di Parma stabilità rilievi e modifiche nel tempo, Parma, Grafiche Step, 2006.

Giovanni Menditto, Salvatore Menditto, Indagini semidistruttive e non distruttive nell'ingegneria civile: disciplina tecnica applicativa e normativa, Bologna, Pitagora Editrice, 2008.

Ornella Zerlenga, Rappresentazione geometrica e gestione informatica dei modelli, Napoli, La Scuola di Pitagora, 2008.

Marco Ceccarelli, Michela Cigola, Contiguità e commistione tra geometria descrittiva e teoria dei meccanismi nell'ingegneria italiana del XIX secolo, in Disegnare idee e immagini, Roma, Rivista semestrale del Dipartimento RAADAR, Anno XX, num.39/2009.

Rossella Cadignani (a cura di) La torre della Ghirlandina. Un progetto per la conservazione, Roma, Luca Rossella Editore, 2009.

Ivo Iori, Minimi strumenti di scienza del costruire, Parma, Monte Università, 2010.

Giovanni Menditto, Fessurazioni nelle strutture, Palermo, Dario Flaccovio Editore, 2010.

Mario Como, Statica delle costruzioni storiche in muratura, Roma ARACNE Editrice, 2010.

Arturo Tedeschi, Architettura parametrica introduzione a grasshopper, Napoli, Le Penseur, 2010.

Rossella Candignani (a cura di), La torre della Ghirlandina storia e restauro, Roma, Luca Sosella Editore, 2010.

Giancarlo Cataldi, Michela Rossi (a cura di), Luigi Vaghetti architetto – disegni progetti opere, Milano, Hoepli, 2012.

Pietro Lenza, Aurelio Ghersi, Bruno Calderoli, Edifici in muratura alla luce della nuova normativa sismica, Palermo, Dario Flaccovio Editore, 2011.

Stefano Podestà, Verifiche sismiche di edifici in muratura. Aggiornato a NTC e Linee Guida per la valutazione e riduzione della vulnerabilità sismica, Palermo, Dario Flaccovio Editore, 2012.

Eva Coisson, Federica Ottoni, Il monitoraggio storico ovvero la lezione della storia agli strutturisti, in Filosofia delle conservazione e prassi del restauro, Napoli, Arte Tipografica Editore, 2013.

Carlo monti, Attilio Selvini, considerazioni su di un programma ministeriale, in Geomedia, num.2, 2013

Giuseppe Chellini, Luca Nardini, Barbara Pucci, Walter Salvatore, Riccardo Tognaccini, Evaluation of seismic vulnerability of Santa Maria del mar in Barcelona by an integrated approach based on terrestrial laser scanner and finite element modeling, in International journal of architectural heritage, Londra, Taylor & Francis Group, 2014, vol.8.

Giovanni Castellazzi, Antonio Maria D'Altri, Gabriele Bitelli, Ilenia Selvaggi, Alessandro Lambertini, Form laser scanning to finite element analysis of complex buildings by using a semi automatic procedure, in Sensor, Vittorio M.N. Passero, 2015, num.15.

## 6.1 Indice delle Figure

Figura 1 Sito archeologico di Palmyra (Siria), arco severiano sulla via colonnata, 120 d.C. circa. Dissesto di arco in conci di pietra per rotazione del piedritto e scorrimento verticale del concio di chiave (1992).....	1
Figura 2 Giovanni Poleni, Memorie storiche della gran cupola del tempio Vaticano, Tavola D, pagina 34, archi. ....	3
Figura 3 Papiro con il progetto della tomba di Ramesse IV. Torino, Museo Egizio. ....	17
Figura 4 Frammenti della Forma Urbis Romae (III sec. d.C.), pianta marmorea di dimensioni monumentali e di grande precisione descrittiva, testimonianza della grande maestria tecnica posseduta in termini di rilievo che di esecuzione dei monumenti. ....	19
Figura 5 Rilievo dell'arco di Settimio Severo, a Roma, di Antonio da Sangallo il Giovane(inizio del XVI sec.). Il disegno in pianta e in alzato è corredato di particolari, quote e annotazioni.....	23
Figura 6 Quadrante, strumento di rilievo topografico, da Mariano di Jacopo, detto il Taccola (metà del XV sec.).....	24
Figura 7 Il metodo di Monge è basato sulla corrispondenza biunivoca che sussiste tra i punti dello spazio e le loro proiezioni ortogonali su due piani mutuamente ortogonali che dividono lo spazio in quattro diedri (1°, 2°, 3°, 4°). I due piani sono detti rispettivamente piano orizzontale (PO) e piano verticale (PV), detti piani di proiezione, mentre la loro retta di intersezione è detta linea di terra (LT). Dopo aver proiettato i punti dello spazio sul piano orizzontale e sul piano verticale, per operare sopra un unico piano (piano geometrico) ruotiamo (ad esempio in senso antiorario) PV intorno ad LT in modo che esso vada a sovrapporsi a PO. Operando in tal modo abbiamo che:– un punto P, dello spazio, può essere rappresentato (biunivocamente) da una coppia (P1; P2) di punti di PO appartenenti ad una retta ortogonale ad LT; – una retta r non di profilo, ossia che giace su un piano ortogonale ad LT, può essere rappresentata (biunivocamente) da un coppia (r1; r2) di rette distinte di PO.....	26

Figura 8 La camera "oscura" di Leonardo da Vinci, disegno originale del Codice Atlantico e principio di funzionamento. ....	31
Figura 9 Acquisizione di coordinate spaziali, Massimo Cotti, Edificio residenziale a La Habana un approccio innovativo per il restauro ed il riuso, Università degli Studi di Parma, Tesi di Laurea, 2012.....	34
Figura 10 Ricostruzione tridimensionale, Massimo Cotti, Edificio residenziale a La Habana un approccio innovativo per il restauro ed il riuso, Università degli Studi di Parma, Tesi di Laurea, 2012.....	35
Figura 11 Restituzione dell'apparenza visiva, Massimo Cotti, Edificio residenziale a La Habana un approccio innovativo per il restauro ed il riuso, Università degli Studi di Parma, Tesi di Laure, 2012.....	36
Figura 12 L'attento rilievo del quadro fessurativo lungo il perimetro di un pilone del Panthéon (Archives Nationales, 56AJ/6, foto di Carlo Blasi) è stato fondamentale nella comprensione delle cause del danneggiamento e nella conseguente definizione dell'intervento riparatore.....	40
Figura 13 L'attenta osservazione dei dissesti nelle strutture era alla base degli studi anche nei secoli passati, Amedeo Frezier, La teoria e la pratica del taglio delle pietre e dei legni per la costuzione delle volte, Strasburgo, 1737-1739, tomo III, p.389.....	41
Figura 14 Elementi tipologici di una frattura: la cuspidè rappresenta l'estremità della frattura o lesione, il ventre individua invece la sezione di maggior ampiezza della stessa ove si percepisce un più evidente allontanamento dei due bordi, detti cigli laterali. ....	43
Figura 15 Tipologia dei modelli F.E.M.....	57
Figura 16 Teoria del Continuo di Cosserat, applicazione per soluzioni numeriche in strutture a blocchi, Aristotle University of Thessaloniki, 21st ALERT Graduate School – Mathematical modeling in Geomechanics, 2010. .	58
Figura 17 Esempio di definizione della cella elementare (Zucchini e Lourenço, 2002), l'elemento si compone di caratteristiche che tendono ad unire quelle dei due materiali da cui è derivato con l'inevitabile semplificazione della realtà. ....	59

Figura 18 Modelli agli elementi finiti con elementi di interfaccia: esempio di modello che riproduce la reale tessitura (Lourenço e Rots, 1997). .....	62
Figura 19 Modello con generazione random automatica della mesh (Pegon et al., 2001). .....	62
Figura 20 Raffigurazione di due blocchi contigui nella configurazione originale indeformata e in quella corrente, 3D macro, 2012. ....	64
Figura 21 Esempi di strutture a blocchi: tempio greco e portale ad archi.....	66
Figura 22 Schema del modello discreto proposto da Casolo, discretizzazione della muratura in una mesh regolare (Casolo, 2004).....	68
Figura 23 Schema del modello discreto proposto da Casolo, particolare del modulo base. ....	68
Figura 24 Stati di sollecitazione applicati alla cella elementare: compressione, trazione, taglio e stati di sollecitazione flessionali.....	69
Figura 25 Stati di sollecitazione riprodotti dal modello discreto: compressione, trazione, taglio e stati di sollecitazione flessionali.....	69
Figura 26 - Scale di modellazione di strutture in muratura: (a) campione di muratura; (b) micro-modellazione dettagliata; (c) micro - modellazione semplificata; (d) macro-modellazione. ....	74
Figura 27 - Prova di trazione uni assiale e definizione di $G_{fI}$ (energia di frattura associata al modo I).....	75
Figura 28 - Prova di taglio su doppietta e definizione di $G_{fII}$ (energia di frattura associata al modo II).....	76
Figura 29 - (a) Tipiche “net bond surface” di provini sottoposti a trazione al termine della prova; (b) estrapolazione dell’area netta per provini e sezioni rettangolari. ....	77
Figura 30 - (a) Setup sperimentali delle prove a taglio: (b) sollecitazioni applicate sul provino.....	78

Figura 31 Legame forza-spostamento per le prove di taglio; (b) correlazione tra energia di frattura di modo II e sforzo normale di confinamento.....	78
Figura 32 (a) Legame di Mohr-Coulomb; (b) descrizione del fenomeno della dilatanza. ....	79
Figura 33 (a) Correlazione tra dilatanza e tensione di confinamento; (b) Misura dell'uplift per una prova sperimentale. ....	79
Figura 34 Diagrammi tensione-deformazione per prove di trazione ortogonale ai giunti di testa.....	81
Figura 35 Stabilimento balneare "Scoglio della Regina", Livorno, nuvola di punti proveniente da rilievo a scansione, G.Caroti, A.Franconi, A.Piemonte, Metodologie di elaborazione di dati laser scanner per la generazione di modelli utili al calcolo strutturale, Atti 16° conferenza nazionale ASITA, Fiere di Vicenza 6-9 novembre 2012, p.382. ....	85
Figura 36 Stabilimento balneare "Scoglio della Regina", Livorno, modello per calcolo strutturale ad elementi shell, G.Caroti, A.Franconi, A.Piemonte, Metodologie di elaborazione di dati laser scanner per la generazione di modelli utili al calcolo strutturale, Atti 16° conferenza nazionale ASITA, Fiere di Vicenza 6-9 novembre 2012, p.382. ....	86
Figura 37 Esplicitazione del processo che, partendo dal rilievo a punti definito dalla procedura di rilievo a scansione, passando per una fase intermedia di meshatura, ottiene un modello ad elementi finiti aventi forma di parallelepipedo (realizzato mediante l'applicazione del programma CLOUD2FEM) per la successiva analisi strutturale, G.Castellazzi, A.Maria D'Altri, G.Bitelli, I.Selvaggi, A.Lambertini, op. cit.....	87
Figura 38 Lo studio delle proporzioni negli antichi sistemi costruttivi, Tavola X, ordine Tuscanico, L'architettura di Marco Vitruvio Pollione tradotta e commentata dal marchese Bernardo Galvani, Siena, Stamperia di Luigi e Benedetto Bindi, 1790. ....	92
Figura 39 Proporzione aurea nella facciata della cattedrale di Notre-Dame di Laon (1157-1205), Picardia, Francia, da Auguste Bouxin, La	

cathédrale Notre-Dame de Laon, Cambridge, MA, Harvard University, 1902. .....	93
Figura 40 Una pagina dall'Algebra di al-Khwārizmī.....	97
Figura 41 Formulazione generica di equazione parametrica di una curva (o curva parametrica) per coordinate cartesiani (sinistra) e polari (destra).....	100
Figura 42 Esempio di curva parametrica, tracciata per un numero finiti di punti ( $t-2\sin t, 2-2\cos t$ ), $t \in [0, 12]$ , ambiente di sviluppo Derive versione 6.0. .....	101
Figura 43 Algoritmo in ambiente GH per la generazione di curva mediante funzioni parametriche, rappresentazione in Figura 44, sono definiti il dominio della stessa, il numero dei punto con cui viene discretizzate e le coordinate ordinate degli stessi.....	101
Figura 44 Rappresentazione della curva in ambiente CAD Rhinoceros, eseguito mediante l'utilizzo di algoritmi a base matematica riportato in Figura 43, sono rappresentati con croci rosse la posizione dei punti (numero finito) che discretizzano la curva in colore verde. ....	102
Figura 45 Barcellona, Scuole provvisorie delle Sagrata Famiglia, prospetto sul lato strada in lato ovest. ....	102
Figura 46 Procedura, sviluppata in ambiente GH, per la crazione della superficie con possibilità di modifica dei parametri citati nello scritto. ....	103
Figura 47 Rappresentazione della superficie in ambiente CAD Rhinoceros. ....	103
Figura 48 Procedura, sviluppata in ambiente GH, per la discretizzazione della superficie matematica in un numero finito di elementi quadrangolari ed estrapolazione (box di colore giallo) delle coordinate degli stessi.....	104
Figura 49 Rappresentazione della discretizzazione della superficie in ambiente CAD Rhinoceros. ....	104
Figura 50 Grandi spostamenti del conci in chiave di un arco in pietra, gli originali punti di contatto hanno lasciato il posto a nuove configurazioni	

stabili di equilibrio. Sito archeologico di Palmyra (Siria), arco di trionfo, 120 d.C. circa, Freer Gallery of Art, Arthur M. Sackler Gallery Library, Smithsonian Institution Libraries (1867 – 1876).....106

Figura 51 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, interfaccia software nella versione 4.0, 2004.....108

Figura 52 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, digramma di flusso per la gestione dei modelli all'interno del software, possibilità di gestire con specifiche funzionalità ed analisi diversificate il comportamento di blocchi rigidi e blocchi deformabili.....110

Figura 53 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, interfaccia per inserimento caratteristiche fisico – meccaniche per materiali aventi legami costitutivi tipo Mohr-Coulomb, 2004.....112

Figura 54 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, interfaccia per inserimento della tipologia di legame interno dei materiali, 2004 .....113

Figura 55 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, interfaccia per inserimento caratteristiche fisico – meccaniche per giunti di interfaccia fra i blocchi, 2004.....114

Figura 56 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, interfaccia per inserimento della tipologia di legame di interfaccia fra i blocchi, 2004.....114

Figura 57 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, FISH, sequenza elementare di istruzioni per la creazione di un blocco avente definite proprietà fisico-meccaniche e l'analisi dello stato tensionale lungo la direzione di azione della forza gravitazionale.....115

Figura 58 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, tessitura muraria elementare, blocchi 12 x 25 cm, rettangolo esterno dimensioni 100 x 100, divisione in blocchi orizzontale ottenuta per frattura continua a passo costante, divisione verticale ottenuta per frattura discontinua a passo costante.....118

- Figura 59 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, tessitura muraria elementare, estratto tabulato numerico per la ricostruzione del modello. ....118
- Figura 60 Algoritmo in ambiente GH, realizzazione di tessitura muraria (blocchi), estrapolazione delle coordinate bidimensionali ( $X_p; Y_p$ ) per la lettura in ambiente UDEC. ....119
- Figura 61 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, arco a tutto sesto, blocchi 12 x 25 cm, rettangolo esterno dimensioni 200 x 100, divisione in blocchi ottenuta per fratture successive dei conci all'intradosso ed all'estradosso e radiale, successiva eliminazione degli elementi componenti il rettangolo originale.....119
- Figura 62 Itasca Consulting Group, Universal distinct Element Code, arco a tutto sesto, estratto del tabulato numerico per la ricostruzione del modello. ....120
- Figura 63 Schema di esecuzione della prova sperimentale: una traversa metallica rigida posta alla testa del pannello impediva la rotazione in testa, i giunti verticali di malta sono sfalsati di  $\frac{1}{2}$  mattone e ogni corso è composto da 4 mattoni e  $\frac{1}{2}$  mattone, A.T. Vermeltfoort, T.M.J. Raymakers (1993). ....126
- Figura 64 Modellazione del paramento murario mediante elementi distinti con codice UDEC con settaggio delle condizioni al contorno desumibili dalla letteratura: spostamenti impediti per l'interfaccia di appoggio inferiore (F), applicazione della forza di precompressione sommitale (S) e della forza orizzontale nel vertice destro, modello ottenuto mediante applicazione di algoritmo con generazione dei blocchi per coordinate cartesiane dei vertici degli stessi. ....127
- Figura 65 Riassunto dei parametri delle 3 prove analizzate, A.T. Vermeltfoort, T.M.J. Raymakers (1993). ....127
- Figura 66 Quadro fessurativo sperimentale del pannello J4D, A.T. Vermeltfoort, T.M.J. Raymakers (1993). ....128
- Figura 67 Grafici Forza-Spostamento dei pannelli murari: prova J4D, A.T. Vermeltfoort, T.M.J. Raymakers (1993). ....128

Figura 68 Analisi del paramento murario, in configurazione J4D, con applicazione del solo carico di precompressione sommitale di 30 kN corrispondente ad una pressione di 0.3kPa. ....129

Figura 69 Analisi degli spostamenti degli elementi componenti il paramento murario, in configurazione J4D, con applicazione del carico di precompressione sommitale e della forza orizzontale pari a 10 kN. ....130

Figura 70 Analisi degli spostamenti degli elementi componenti il paramento murario, in configurazione J4D, con applicazione del carico di precompressione sommitale e della forza orizzontale pari a 50 kN, sono evidenziati le ampiezze delle fessurazioni maggiori (rosso spesso) rispetto al quadro fessurativo generale (rosso sottile).....131

Figura 71 Cattedrale di Parma, ricostruzione planimetrica presunta al periodo di prima fondazione, XII secolo circa.....134

Figura 72 Cattedrale di Parma, navata centrale vista dal presbiterio, gli abbassamenti in chiave degli archi e conseguentemente delle volte si evidenziano lungo tutta la navata. ....136

Figura 73 Cattedrale di Parma, sottotetto della navata centrale, gli interventi alle coperture del 1951 vedono la creazione di una nuova struttura con capriate in conglomerato cementizio armato e travetti prefabbricati che, rispetto alle precedente lignea, presenta una massa maggiore. ....139

Figura 74 Cattedrale di Parma, arconi trasversali della navata centrale, evidenti segni di deformazioni con forte abbassamento della chiave che ha portato ad un profilo intradosale della parte centrale dell'arco tendente all'orizzontalità.....140

Figura 75 Cattedrale di Parma, pianta di rilievo dello stato attuale, valori (espressi in cm) rilevati dei fuori piombo dei pilastri della navata centrale. ....141

Figura 76 Schematizzazione del dissesto degli arconi, tipologia già conosciuta dagli antichi progettisti,sviluppa un meccanismo di rottura che prevede la formazione di cerniere all'intradosso (A) ed all'estradosso (B) della struttura. ....142

Figura 77 Cattedrale di Parma, modello tridimensionale a mesh triangolari della porzione centrale della navata principale, utilizzo della computer grafica (Rhinoceros) per l'estrapolazione della sezione bidimensionale trasversale di interesse nel suo stato deformato (piano di sezione X, Z). .....143

Figura 78 Algoritmo in ambiente GH, realizzazione di arco con le condizioni al contorno imposte, discretizzazione in un numero finito di elementi (conci), estrapolazione delle coordinate bidimensionali ( $X_p; Y_p$ )...144

Figura 79 Modello geometrico comparativo (su piano X, Z) fra la configurazione originale indeformata dell'arco (giallo) e dei piloni (rosso) e la configurazione attuale desunta dal rilievo sia dell'arco (blu) che dei pilone (nero).....145

Figura 80 Modello ad elementi distinti, in ambiente UDEC, riportante la geometria originale ricostruita, con indicazione delle principali condizioni al contorno di stress (S) e vincoli (F).....147

Figura 81 Modello ad elementi distinti, in ambiente UDEC, riportante la geometria nella conformazione attuale risultante dal rilievo, con indicazione delle principali condizioni al contorno di stress (S) e vincoli (F).147

Figura 82 Modello, in ambiente UDEC, della geometria originale con indicazione degli spostamenti (rosso) dei singoli blocchi dovute all'applicazione dei soli carichi gravitazionali. ....148

Figura 83 Modello, in ambiente UDEC, della geometria originale con indicazione delle tensioni principali sviluppatasi all'interno dei singoli blocchi dovute all'applicazione dei soli carichi gravitazionali.....148

Figura 84 Il progressivo incremento nello spostamento delle imposte dell'arco provoca una nuova configurazione di equilibrio all'interno dei blocchi che, in alcuni casi, perdono l'originale interfaccia di contatto per generarne di nuove; l'analisi permette di apprezzare l'apertura di fessurazioni intradossali e la parzializzazione delle superfici di contatto fra i blocchi.....149

Figura 85 La nuova configurazione geometrica dell'arco ed i nuovi equilibri instauratisi fra i blocchi porta ad una variazione dello stato tensionale interno alla struttura.....149

Figura 86 L'applicazione dei carichi alla configurazione deformata provoca il formarsi di cedimenti, di piccole dimensioni nella parte centrale della struttura legate soprattutto all'estrema orizzontalità della stessa. ....	150
Figura 87 Analisi delle tensioni interne alla struttura.....	150
Figura 88 Scorcio di Piazza Grande con la Ghirlandina, le absidi del Duomo e il Palazzo comunale in scorcio.....	152
Figura 89 Schematizzazione dei cedimenti della torre della Ghirlandina e della fabbrica del Duomo nella sua porzione absidale; la convergenza dei movimenti sottopone gli arconi intermedi a sforzi di compressione orizzontale e cedimenti verticali differenziali.....	154
Figura 90 Carlo Arturo Quintavalle, ricostruzione temporale dello sviluppo costruttivo della torre delle Ghirlandina, op.cit.....	157
Figura 91 Roberto Salvini, ricostruzione temporale dello sviluppo costruttivo della torre delle Ghirlandina, op.cit. ....	158
Figura 92 Ricostruzione temporale delle fasi costruttive, rappresentazione grafica delle teorie evolutive.....	160
Figura 93 Duomo di Modena, pianta al livello della cripta.....	162
Figura 94 Duomo di Modena, pianta al livello dell'abside.....	162
Figura 95 Pianta del duomo con segnato in giallo le parti di edificio abbattute e con la linea rossa il nuovo profilo delle canoniche, da C.Acidini Luchinat, L.Serchia, S.Piconi, I restauri del Duomo di Modena 1875-1984, Modena, 1984.....	163
Figura 96 Giovanni Tosi, rilievo dei muri trasversali tra il Duomo e la Ghirlandina e progetto degli stessi, da ASCMo, Cartografia, cartella VII ter, 1898. ....	168
Figura 97 Ufficio Regionale, prospetto meridionale della base della Ghirlandina, 1901, in da Cristina Acidini, Cristina Acidini Luchinat, Luciano Serchia, Sergio Picone, I restauri del Duomo di Modena 1875-1984, Modena, Panini, 1984.....	171

Figura 98 Tommaso Sandonnini, schizzo con l'individuazione delle aperture e identificate con le lettere A e B a quote differenti, Mantova, 1900, ASBAAE.....174

Figura 99 La facciata interna del muro occidentale. Fotografia Orlandini precedente il 1902, in Lanfranco e Wiligelmo,op.cit.....175

Figura 100 Comparazione fotografica fra la conformazione della struttura muraria del muro ovest, visto dalla porta del lato pescheria, a sinistra foto di archivio ASCMo antecedente al 1902 ed a destra la conformazione attuale.....176

Figura 101 Arcone sud-est, profilo dei rilievi eseguiti sugli archi di collegamento tra torre e Duomo, in rosso il profili deformati odierni, in tratteggiato grigio la geometria ricostruita secondo le regole dell'arte, in Stefano Alfieri, Il problema dell'iterazione suolo struttura per gli edifici storici, Università degli Studi di Parma, Tesi di dottorato XXI ciclo, p.188. ....177

Figura 102 Arcone sud-ovest, profilo dei rilievi eseguiti sugli archi di collegamento tra torre e Duomo, in rosso il profili deformati odierni, in tratteggiato grigio la geometria ricostruita secondo le regole dell'arte, in Stefano Alfieri, Il problema dell'iterazione suolo struttura per gli edifici storici, Università degli Studi di Parma, Tesi di dottorato XXI ciclo, p.188. ....177

Figura 103 Arch. Silvia Tosini, arch. Matteo Bonini: elaborazione grafica dei fuori piombo della torre dove si mettono a confronto le inclinazioni misurate nel 2006 (rosso ) con quelle minime e massime misurate nel 1901.....178

Figura 104 Ricostruzione della geometria indeformata secondo i dati di progetto (sinistra) e geometria attuale (destra), le tracce degli archi (rosso) fanno apprezzare le deformazioni occorse nell'arco di un secolo. ....179

Figura 105 Modello ad elementi distinti, in ambiente UDEC, riportante la geometria indeformata con indicazioni delle principali condizioni al contorno di stress (S) e vincoli (F).....181

Figura 106 Modello ad elementi distinti, in ambiente UDEC, riportante la geometria nella conformazione attuale risultante dal rilievo, con indicazione delle principali condizioni al contorno di stress (S) e vincoli (F). 181

Figura 107 Modello, in ambiente UDEC, della geometria originale con indicazione degli spostamenti (rosso) dei singoli blocchi dovuti all'applicazione dei soli carichi gravitazionali. ....182

Figura 108 Modello, in ambiente UDEC, della geometria originale con indicazione delle tensioni principali sviluppatesi all'interno della struttura dovute all'applicazione dei soli carichi gravitazionali. ....183

Figura 109 Il progressivo incremento dei cedimenti (lato torre) provoca nella struttura in generale, e nell'arcone in particolare, una modifica delle condizioni di equilibrio iniziali con distacco di alcune interfacce a la creazioni di nuovi punti di contatto tra i blocchi; l'analisi permette di apprezzare l'apertura nei conci di chiave di fessure intradossali riscontrabili in loco. ....184

Figura 110 Considerando anche la rotazione della torre, preso come punto di rotazione (cerniera) il vertice alla base della stessa, si assiste ad uno schiacciamento della porzione d'arco posto in lato torre ed un aumento di curvatura del suo opposto. ....185

Figura 111 Lo sviluppo tensionale interno mostra la formazione di un "puntone" all'interno della tessitura muraria in opposizione alla spinta fornita dalla torre; l'effetto è riscontrabile sull'opposta muratura del duomo ove un importante quadro fessurativo si sviluppa. ....185

Figura 112 Particolare dell'apertura intradossale di fessurazione in corrispondenza dei conci sommitali dell'arco come altresì suggerito dalla modellazione, foto ASCMo, 2008. ....186

Figura 113 Particolare della risposta del modello di calcolo in corrispondenza dei blocchi sommitali, la procedura di simulazione evidenzia la rotazione dei blocchi (verde) che trova riscontro anche nel dettaglio (Figura 112). ....186

Figura 114 Analisi degli spostamenti degli elementi soggetti al carico verticale. ....187

Figura 115 Analisi delle tensioni interne alla struttura. ....187

Figura 114 Planimetria del piano terra risalente agli interventi del 1950, Museo si Casa Romei, Ferrara (FE). .....	189
Figura 115 Casa Romei, Ferrara, interno del cortile maggiore in lato ovest dell'impianto strutturale, parete in lato sud riportante il monogramma di San Bernardino ed adiacenti baldresche sul lato sinistro.....	190
Figura 116 Casa Romei, Ferrara, interno del cortile maggiore in lato ovest dell'impianto strutturale, loggiato nord ed adiacenti baldresche sul lato destro.....	191
Figura 117 Arco in angolo est del loggiato sul lato nord del cortile minore in corrispondenza dell'intersezione con l'arco delle baldresche con evidenti segni di deformazione; il confronto fra la situazione deformata e la possibile conformazione iniziale indeformata è di notevole importanza per la determinazione dell'evolversi del quadro degli stati tensionali, dei quadri fessurativi e di deterioramento e conseguentemente per meglio proporre gli eventuali interventi di consolidamento.....	195
Figura 118 Arconi delle baldresche in una fotografia del 1924, i già presenti problemi di stabilità del fronte ne avevano imposto un puntellamento di sicurezza fino agli interventi del 1924. ....	196
Figura 119 Individuazione delle due baldresche e le tre arcate superiori ricostruite nell'intervento del 1924: l'arco piano terreno a nord (sinistra della foto) e l'arco piano terreno a sud (destra delle foto) agiscono puntualmente a circa $\frac{1}{2}$ dall'imposta degli archi ortogonali dei rispettivi fronti nord e sud. ....	197
Figura 133 Misura con la squadra.....	238
Figura 134 Sistema del "bastone di Giacobbe".....	238
Figura 135 Il "baculo" o "giacobeo". ....	239
Figura 136 Il quadrato geometrico in una delle forme diffuse nel 1500, a sinistra, e una raffigurazione del suo utilizzo (a destra). ....	240
Figura 137 La misura "col tamburo", antesignano della "tavoletta".E' il classico problema dell'intersezione in avanti. ....	240

Figura 138 Il "quadrante geometrico" o "quadrato", descritto dal Bartoli.....	241
Figura 139 Strumento topografico descritto dal Bartoli nel 1589, usato per rilevamenti di grandi estensioni di terreno.....	241
Figura 140 Il Polimetrum, strumento del secolo XVI da un'incisione in legno del 1512.....	242
Figura 141 L'universale di Reichenbach (1804).....	245
Figura 142 il grande Teodolite di Ramsden costruito nel 1784. ....	245
Figura 143 Disegno originale di uno dei "Cleps" di Porro (1860).....	246
Figura 144 Odometro di Erone.....	248
Figura 145 Odometro di Vitruvio. ....	248
Figura 146 Asta di misura.....	249
Figura 147 Asta d'ombra. ....	249
Figura 148 Misure con l'asta d'ombra.....	250
Figura 149 Misura di distanze col bastone di Giacobbe o baculo.....	250
Figura 150 Misura di altezza col baculo. ....	251
Figura 151 L'autoriduttore di Perini.....	253
Figura 152 Il "Chorobates". ....	259
Figura 153 Una ricostruzione della "Lychnia". ....	260
Figura 154 Livello di Picard.....	261
Figura 155 Livello di Huygens.....	261
Figura 156 Il livello di Chézy. ....	262
Figura 157 Squadri del XVI secolo. ....	264
Figura 158 Squadro "a cubo" con cerchio graduato. ....	264

## **7 Appendice**

## 7.1 Della storia degli strumenti per la misura topografica

### 7.1.1 Premessa

In questa fine del XX secolo che vede la tecnica in genere e le tecnologie informatiche in particolare fare progressi che nessuno avrebbe potuto prevedere anche solo un trentennio fa, sembra significativo volgere uno sguardo al passato per fermare nel tempo immagini e momenti importanti del percorso strumentale che l'uomo ha ideato e costruito per misurare l'ambiente che lo circonda. La storia della misura è di per sé assai affascinante; scrive infatti Mariano Cunietti sull'operazione di misura:

*"... Ma quale elemento della natura ha suggerito all'uomo la misura? Niente. La misura è tutta quanta opera dell'uomo, non l'ha rubata a nessuno, non è un'operazione mimetica. Non esiste una operazione naturale che ci porti ad un numero; il numero è frutto dell'intervento umano".*

E più oltre:

*"Questo... serve a puntualizzare un elemento fondamentale della misura: la sua nascita e la sua vita interamante umane; essa serve all'uomo per trasferire le sue conoscenze scientifiche nelle sue produzioni tecniche: una volta adempiuto questo compito, i numeri, quindi le misure, scompaiono, restano solo gli oggetti portatori dell'impronta dell'uomo".*

Fra i mezzi per misurare, certamente un posto di privilegio va riservato a quelli che hanno permesso all'uomo di ricostruire l'immagine metrica della Terra: gli strumenti per la geodesia, per la topografia (va ancora una volta ricordato, che da noi si indica con "Topografia" - almeno a partire dalla seconda metà del secolo scorso - quella parte della Geodesia che altri, ad esempio i popoli di lingua tedesca, chiamano "inferiore". Sebbene la dizione "strumenti geodetici" possa far pensare a gravimetri o a teodoliti

universali, in buona parte d'Europa tale locuzione ben si adatta a quelli che in Italia sono meglio conosciuti come strumenti topografici), per l'agrimensura. Questo articolo vuol essere un sottile filo conduttore che leghi nell'ambito di due millenni, il pensiero e l'abilità umana, i nomi di inventori spesso dimenticati o al più citati in modo meccanico senza collocazione storica, a quegli strumenti che i topografi giornalmente utilizzano e conservano. Per ragioni espositive, gli strumenti sono stati ripartiti in tre categorie, anche se certo fra esse vi sono notevoli intersezioni e correlazioni: la prima riguarda la misura delle direzioni angolari, la seconda quella delle distanze, la terza infine quella dei dislivelli. Non saranno dimenticati strumenti accessori e misti, cui si dedicherà qualche breve nota.

### 7.1.2 La misura angolare

Probabilmente si deve agli arabi il vocabolo che designa ancora oggi lo strumento universale per la misura degli angoli. In piena "età di mezzo" per l'Europa, nelle pianure di Bagdad, la città delle "Mille e una notte", ai tempi del califfo Arun er Rascid venne eseguita per la prima volta (dopo l'episodio di Eratòstene) la misura di un arco meridiano. Non si sa nulla degli strumenti usati; è però quasi certo che fossero provvisti di un mezzo collimatore e di un indice ("al idat", in arabo: qualcuno trascrive "al idadah").

Il termine in arabo passò più tardi in Inghilterra, divenendo "the alidat". In un teso ivi pubblicato nel 1552, Leonard Digges parla di "... *an instrument called theodolitus*"; più tardi il sostantivo diviene "theodolite". Tenendo conto della pronuncia inglese, effettivamente "the alidat" e "theodolite" suonano quasi uguali. Vi è un cenno (ad esempio su "la Filotecnica" vol. 1 anno 1, 1931, in una notarella di D. Argentieri) su altra possibile etimologia del termine teodolite. Questa si farebbe discendere dalle altre tre parole greche: "thea-hodos-lithos", cioè "vedere-via-pietra"; L'Argentieri dà poco credito a tale etimo, anche se pare che gli antenati del teodolite avessero basamento di pietra (?). Non è possibile invece pensare ad un accenno alla "pietra" da cui proviene il vetro delle ottiche di collimazione, perché i primi teodoliti avevano solo delle diottrici, essendo precedenti all'invenzione del cannocchiale.

Qualche dato ora sulla evoluzione storica del teodolite. Le prime misure angolari indirette nell'antichità, sono fatte attraverso l'ombra dello "gnomone" o con metodi simili: si pensi alla nota misura di Erastòtene, prima accennata. La determinazione della *direzione* - quindi misura angolare - per fissare il cardine ("cardo"), veniva fatta in età romana con gnomone e cerchio tracciato sul terreno circostante. Dall'asta semplice, detta anche "asta d'ombra", si passò in seguito al "regolo di mira" che era costituito da un'asta inclinata per travedere la sommità di un oggetto, e fornita alle due estremità di fili a piombo. Il passo successivo fu un regolo costituito da due aste collegate fra loro ad angolo retto (fig. 1) che probabilmente originò il "baculo" (fig. 2).

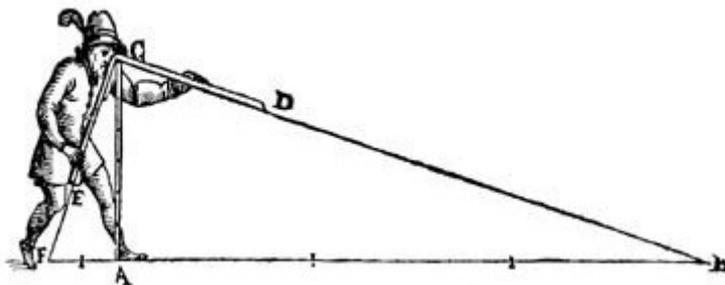


Figura 133 Misura con la squadra.

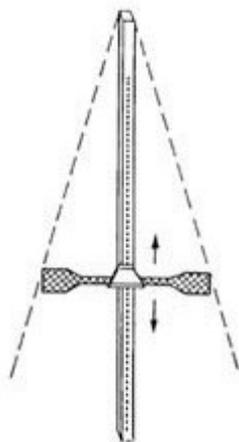


Figura 134 Sistema del "bastone di Giacobbe"

Dice Cosimo Bartoli nell'opera citata in bibliografia:

"Per fare il baculo, apparecchisi un regolo quadro per tutti versi di legno durissimo e atto a non torcere, o pigliasi di ottone lungo quanto ci piace;... dividasi poi detto regolo in alcune parti uguali fra loro dieci otto sei... e si chiami questo regolo AB. Facciasi di poi un altro regolo simile: ma lungo solamente quanto una delle parti: in le quali dividesti il primo regolo AB.....e chiamasi questo regolo minore CD come si può vedere nel disegno..." (fig. 3)

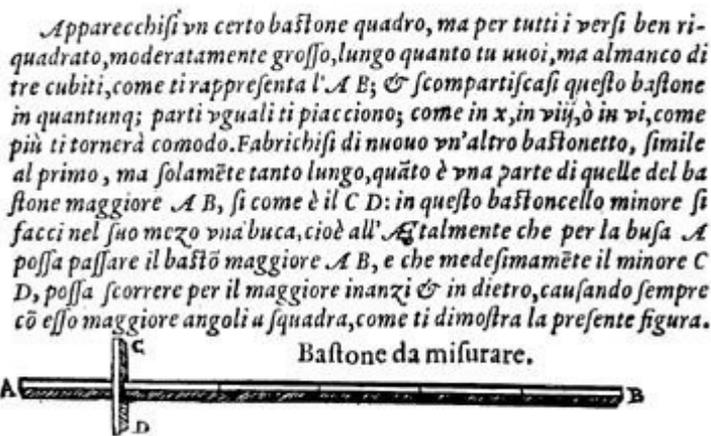


Figura 135 Il "baculo" o "giacobeo".

Il baculo veniva impiegato per misurare la distanza fra punti inaccessibili, non direttamente angoli: ma è chiaro che la misura era basata su un angolo parallattico, variabile in funzione della distanza. Vere misure angolari sono invece eseguite con il "quadrato geometrico", di cui molti trattatisti medievali parlano sotto i nomi di "quadratum mediclinorum", "instrumentum gnomonicum", eccetera. Sembra che il "quadrato" compaia addirittura verso l'anno 100 a.C.: era costituito da quattro aste a telaio o da una tavoletta quadrata (fig. 4) e da una riga (dioptra, alidada - termine arabo, come s'è visto - regula, mediclinium) disposta secondo una diagonale e girevole su di un vertice del quadrato, permetteva le collimazioni (fig. 5).

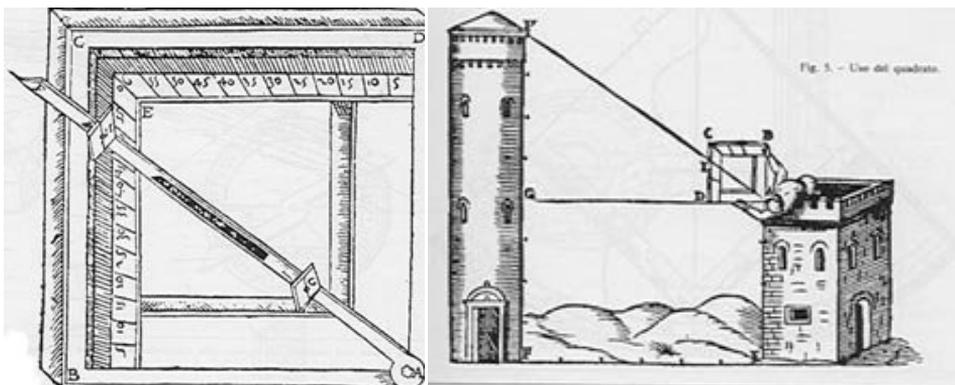


Figura 136 Il quadrato geometrico in una delle forme diffuse nel 1500, a sinistra, e una raffigurazione del suo utilizzo (a destra).

Notizie particolareggiate sull'uso del quadrato geometrico vengono date da S. Belli, in *"Libro da misurar con la vista"*, Venezia, 1569. Al Belli viene ascritta l'antenata della "Tavoletta pretoriana" (v. par. 5) che l'autore avrebbe mutuata appunto da un quadrato geometrico; nell'opera del Belli vi è infatti la "misura col tamburo" (fig. 6) e certamente tale arnese militare è già qui "in nuce" un fondamento di tavoletta.

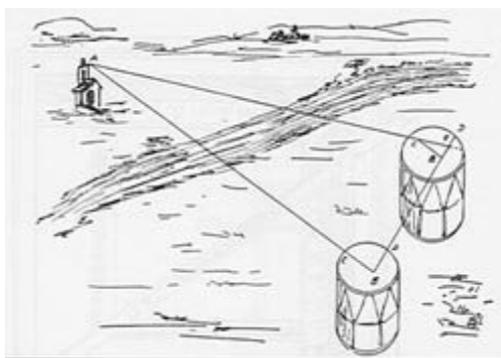
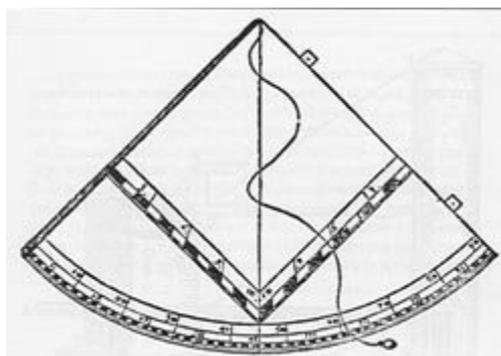
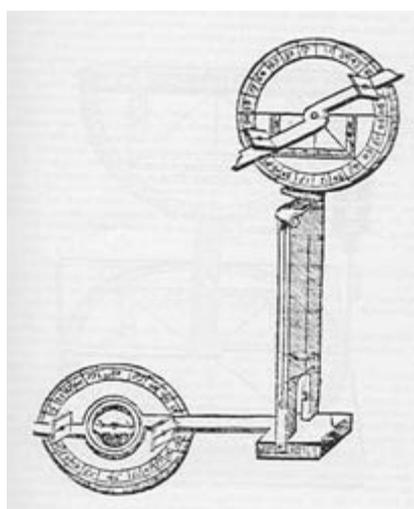


Figura 137 La misura "col tamburo", antesignano della "tavoletta".E' il classico problema dell'intersezione in avanti.

Altro tipo di "quadrato" viene descritto da Cosimo Bartoli, in *"Del modo di misurare le distanze, ecc."*, Venezia 1589. Questo è sicuramente un goniometro (fig. 7) capace tra l'altro di misurare angoli di altezza; a lui fa seguito altro predecessore del teodolite in grado di esser disposto su un supporto piano e provvisto di bussola (fig. 8). Non è però storicamente il primo goniometro completo.



*Figura 138 Il "quadrante geometrico" o "quadrato", descritto dal Bartoli.*



*Figura 139 Strumento topografico descritto dal Bartoli nel 1589, usato per rilevamenti di grandi estensioni di terreno.*

Il primo strumento capace di misurare angoli orizzontali e verticali è infatti il "Polimetrum" (fig. 9) costruito nel 1512 da Martin Waldsemüller, topografo e cartografo renano. Lo strumento era anche provvisto di bussola e il suo costruttore rilevò con esso la carta della Renania Superiore (1513, Strassburg) Waldseemüller descrive lo strumento in appendice alla "Margarita Philosophica" di Gregor Reisch. Questo goniometro venne subito utilizzato da altri topografi, ad esempio da Walter Lud e da Martin Ringmann, per il rilevamento della carta della Lorena.

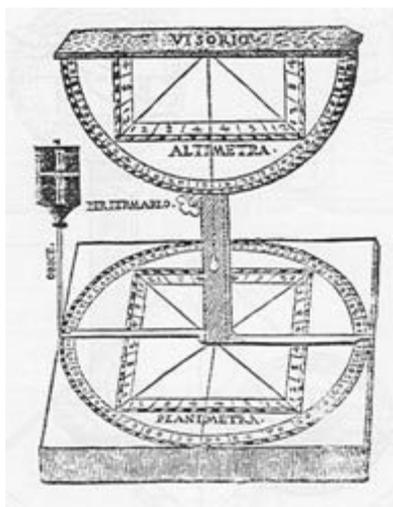


Figura 140 Il Polimetrum, strumento del secolo XVI da un'incisione in legno del 1512

Come collimatore il "Polimetrum" aveva un lungo tubo con due fessure alle estremità, che poteva essere disposto anche in posizione orizzontale e ivi fissato tramite apposita vite. Come detto all'inizio, è Leonard Digges ad usare per la prima volta nella storia il nome "theodolitus"; egli ed il fratello Thomas erano matematici e costruttori di strumenti, ed insegnavano "Pantometria" (Topografia) a Londra. Forse lo strumento che più assomigli ad un vero teodolite è però quello costruito da Joshua Habermel in Germania nel 1576, completo di bussola e treppiede. Legati allo sviluppo del teodolite sono due importanti elementi costitutivi, se pur non indispensabili come organi fondamentali: il cannocchiale (da sostituire alla semplice diottra) e il mezzo per frazionare i piccoli intervalli della graduazione dei cerchi. Del 1542 è il dispositivo del portoghese Pedro Nunez (1492-1577); si trattava di 46 cerchi concentrici, ognuno dei quali suddiviso in  $(n - 1)$  intervalli rispetto al precedente. Dal nome dell'inventore è derivato il noto termine "nonio" che ha dominato la scena dei frazionatori di intervallo fino ai giorni nostri, del tutto erroneamente. Solo i francesi hanno sempre usato il termine corretto: verniero. E' infatti Pierre Vernier (meglio, Peter Werner olandese, 1580-1637) a costruire nel 1631 e diffondere poi l'uso del dispositivo nella forma conosciuta (una scala divisa in  $n$  parti, affacciata su intervalli di graduazione di  $n - 1$  elementi). Ma l'invenzione è di parecchio anteriore, dovendosi ascrivere al matematico Clavius (1593), che ne fece uso per il tracciamento (non per la misura) di angoli sulla carta. Circa l'invenzione del cannocchiale per usi

astronomici, le cose sono note. Il primo strumento è certamente quello del fiammingo Hans Lipperhey (1560-1619), vetraio ed ottico, che compare nei Paesi Bassi nel 1608. Il nostro Galileo ne ha notizia e nel 1609 realizza la nota versione, usabile praticamente, che inizia la storia delle osservazioni celesti. Di Johannes Kepler (1571-1630) è l'altra versione detta appunto "astronomica", costruita dal gesuita Christoph Scheiner nel 1611, seguita nello stesso anno dalla versione "terrestre" a immagine dritta, sempre di Kepler.

Ma è l'italiano Generini a usare la prima volta, nel 1630, il cannocchiale kepleriano per "collimare", cioè con oculare a reticolo. L'inglese William Gascoigne nel 1640 usa il cannocchiale collimatore per il suo "quadrante". Sarà seguito nel 1670 dal francese Picard (1620-1682) e da qui l'uso si diffonde anche nel settore della topografia. Gascoigne va menzionato anche per un terzo organo accessorio: è infatti lui l'inventore della vite micrometrica. Per tutto il XVII secolo l'ingrandimento del cannocchiale è assai modesto ( $9 \div 20 \times$ ) e le immagini sono affette da aberrazioni assai vistose. Tutto cambia nel "secolo dei lumi"; infatti l'inglese Moore Hall (1704-1771) inventa nel 1729 l'obbiettivo acromatico, costruito più tardi nel 1785 da John Dollond. Non sarà male a questo punto ricordare che per oltre un secolo, con il conforto del parere di Newton corredato da una dimostrazione del tutto errata del grande scienziato, nessun costruttore aveva nemmeno tentato di fabbricare obbiettivi di questo tipo perché la correzione dell'aberrazione di cromatismo era stata dichiarata impossibile. In verità Dollond era stato preceduto almeno nella confutazione matematica dell'errore newtoniano da Eulero, che scriveva nel 1769, riferendosi però a circa quindici anni prima:

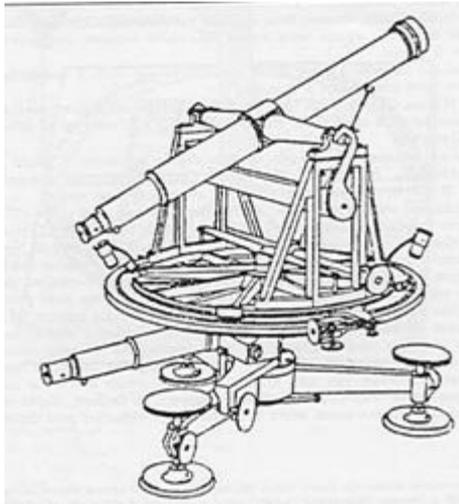
*"Quod ergo incommodum a diversa radiorum natura oriundum adeo grave vel summo Neutono est visum, instrumenta dioptrica nullo modo ab hanc causam non opus sit ad telescopicam Catoptrica confugere.*

(Quell'inconveniente dovuto alla diversa natura dei raggi che anche al sommo Newton sembrò così grave da giudicare impossibile il liberarne gli strumenti diottrici, ormai è certo che si può facilmente eliminare, almeno per

quanto riguarda il margine iridato, a cui specialmente Newton si riferiva; cosicchè almeno per questa causa non vi è più ragione di ricorrere a telescopi catadiottrici.

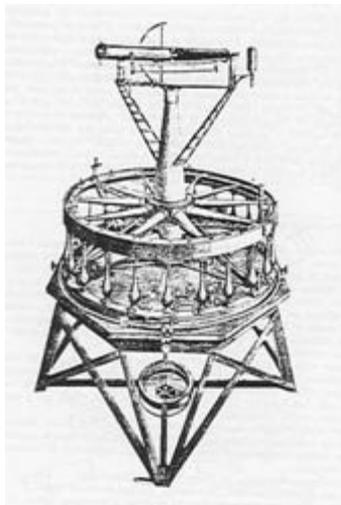
E Dolland, dodici anni prima di questa nota su "Dioptricae" aveva infatti realizzato i suoi obbiettivi privi dell'aberrazione di cromatismo. Gli studi sulla tecnica produttiva del vetro ottico, dovuti a Josef Fraunhofer (1787-1826) conducono alla disponibilità di vetri per lenti che permettono un vero progresso nella costruzione di cannocchiali collimatori per strumenti topografici: questi si diffondono così nelle forme sostanzialmente ancora oggi adottate. John Sisson, inglese, realizza nel 1730 uno dei primi teodoliti "moderni"; i tempi sono maturi e il progresso si fa avanti veloce. Nel 1783 Jesse Ramsden (1735-1800) inventa l'oculare dallo stesso nome e un anno più tardi il microscopio a vite nicrometrica; vent'anni prima (1763) egli aveva già prodotto la "macchina a dividere". Di qualche anno precedente è quella di Hidley costruita a New York. Il metodo meccanico di divisione dei cerchi è però ancora precedente, ascrivendosi al noto fisico Hooke nel 1684. Circa gli oculari, prima di Ramsden va menzionato quello dell'olandese Christian Huygens (1629-1695) nel 1684, cioè nello stesso anno in cui Hooke insegna a dividere correttamente le scale.

Nel 1803, Georg Von Reichenbach (1771-1826) costruisce la macchina a dividere con copia da un cerchio fondamentale, che ispirerà i lavori successivi del nostro Ignazio Porro. Il francese J.C. Borda, ben noto astronomo (1733-1799) studia il cerchio "ripetitore" con i relativi assi: tale cerchio verrà poi messo a punto da altro noto meccanico francese, Etienne Lenoir (1744-1832), di cui si parlerà ancora a proposito dei livelli. Il cerchio avrà un diametro di 33 cm; altro cerchio sarà costruito nel 1804 da Reichenbach (fig.10) e poi altro ancora da Repsold di Amburgo (ma sarà già il 1830)



*Figura 141 L'universale di Reichenbach (1804).*

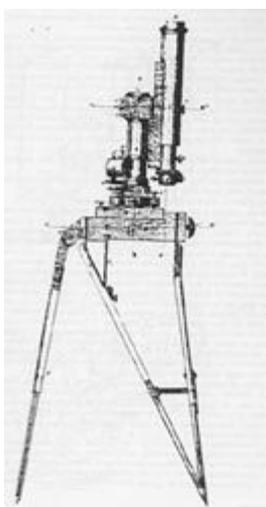
Nel 1784 Ramsden prepara un teodolite con il cerchio di ben una iarda di diametro (fig. 11), con precisione di 1" su osservazioni a punti distanti almeno 10 miglia e tre microscopi di lettura.



*Figura 142 il grande Teodolite di Ramsden costruito nel 1784.*

Siamo ormai alla produzione rigorosamente scientifica dei teodoliti. Il "centramento forzato" è del tedesco Breithaupt (1840); ma questo sistema diverrà d'uso pratico solo ottant'anni più tardi coi lavori di H. Wild presso la Carl Zeiss di Jena. Si arriva così al nostro Ignazio Porro (1801-1875), cui si devono non poche e sostanziali novità. Il teodolite diventa per sua opera

"tacheometro" anzi "cleps": si passa dai grossi cerchi in metallo, con graduazione su bordo d'argento, a cerchi di piccolo diametro in vetro ottico "racchiusi" in scatole metalliche, sì da essere al riparo da ingiurie meccaniche ed atmosferiche. Nasce il microscopio a stima, il cannocchiale di forte ingrandimento e soprattutto "centralmente anallattico". Lo strumento è ora adatto non solo all'astronomo o al geodeta ma anche al comune topografo, che potrà abbandonare il triplometro e tavoletta (fig. 12). E' una prima, vera rivoluzione: la seconda scatterà dopo quasi un secolo, per opera di Heinrich Wild (1877 - 1951) con la media per via ottica delle letture a lembi opposti al cerchio e il cannocchiale di lunghezza costante. Il secondo dopoguerra porterà solo progressi minori, a parte le nuove ottiche trattate secondo il processo di Smakula e già usate nel 1937/38: saranno le letture "semidigitali" dei cerchi, i compensatori per le letture zenitali, i cerchi a doppia graduazione. Tutto sommato poca cosa a fronte della terza, forse definitiva, rivoluzione incombente già alla fine degli anni Sessanta: la misura elettronica delle direzioni. Ma questa non è più storia, bensì cronaca.



*Figura 143 Disegno originale di uno dei "Cleps" di Porro (1860).*

### **7.1.3 La misura delle distanze**

La misura diretta delle grandezze afferenti alla classe delle lunghezze è stata certamente la prima nella storia dell'uomo. I vari "campioni" di lunghezza furono dapprima elementi o porzioni di arti di colui che misurava: braccio (cubitus per i romani), dito, palmo, spanna, piede. E poi vennero unità

maggiori, come il passo (semplice o doppio), la tesa (distanza fra le punte del dito medio a braccia spalancate); ad esse si affiancano misure d'altro genere, come il versus (lunghezza del solco che un bue fa in un solo tratto, pari per i romani a 120 e per i greci a 100 piedi), e il famoso stadion che tanto fece discutere a proposito della misura di Erathostenes Pentathlos. Pare si riferisse al tratto di distanza che un uomo robusto poteva fare di corsa, ritenuto di 1000 piedi (circa 300 m). Da queste unità di misura naturali, certamente non precise per via delle differenze fra persona e persona, sorsero con il divenire dei tempi altre unità convenzionali, costituite da regoli di legno o metallo. Queste si stabilizzarono con gli anni, e Vitruvio ne parla nel libro III del suo "De Architectura". I nuovi campioni erano rigidi, come aste o canne, o flessibili e pieghevoli come catene, nastri, funi.

Funi per misura vennero usate dai Babilonesi, Egizi, Ebrei, Greci, Romani, Arabi. Erone indica quale sia l'uso corretto delle funi; egli afferma che per evitare le variazioni di lunghezza è opportuno tendere ripetutamente le funi fra due pali, lasciandole in tensione e strofinandole con cera e resina. La catena venne impiegata da Ebrei, Greci, Arabi, Cinesi. Il suo uso fu però sporadico; il materiale era generalmente ferro. I nastri vennero assai più tardi, allorché si pensò di avvolgere le funi sui rulli. Tipica è la "cassetta metallica" di Joseph Furtenbach (1644), antesignana delle odierne rotelle metriche. La necessità di impiegare elementi autoregistratori fu sentita sicuramente al tempo di Roma; Erone e Vitruvio parlano di ciò nei loro scritti. Dice il primo nel suo "Della Diottra":

*"... I nostri predecessori discussero su alcuni metodi, secondo i quali è possibile sostituire la cattiva e lenta misura della distanza per mezzo di funi e catene col far girare una ruota ...".*

Non si sa bene quando e da chi furono costruiti i primi odometri: le più antiche descrizioni conosciute sono dei due autori sopra citati. L'odometro di Erone (fig. 13) differisce da quello di Vitruvio (fig. 14) per forma, non per sostanza. Giulio Capitolino, nell'inventario dei beni

dell'imperatore romano Marco Aurelio Commodo (192 d.C.) cita "carri per misurare percorsi".

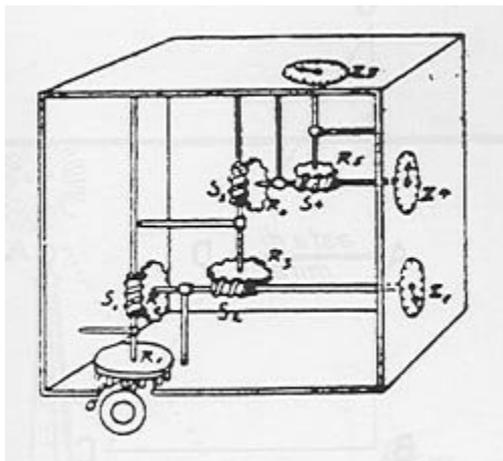


Figura 144 Odometro di Erone.

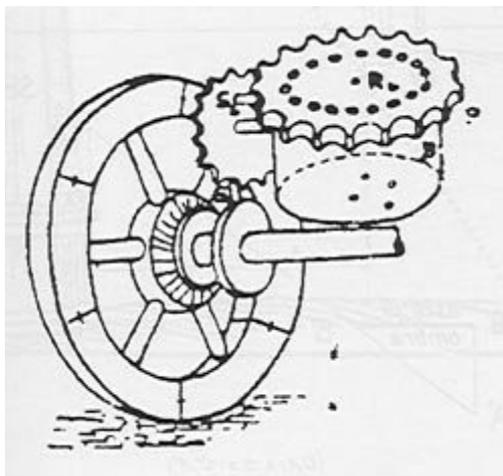


Figura 145 Odometro di Vitruvio.

Solo però con Leonardo Da Vinci (1452-1529) ricompaiono gli odometri e i contapassi per uomo e cavallo. Dal VXI secolo in poi, apparecchi autoregistratori si diffondono soprattutto in Europa Centrale, a scopo cartografico. I primi rilevamenti infatti furono eseguiti misurando le distanze con gli odometri, le direzioni con la bussola. Rodolfo II concede nel 1583 un privilegio di dieci anni a Christopher Schissler per il rilevamento e la cartografia dell'intero paese; così viene fatto anche il rilievo della Sassonia (1712-1731).

La misura diretta è lunga, costosa, richiede si percorra con un campione il tratto da misurare; la misura indiretta è più complessa, almeno concettualmente: sconosciuta nell'antichità classica, appare come primo barlume negli scritti del monaco Gerberto di Aurillac (circa 930-1003), poi Papa Silvestro II. Nella sua geometria tratta fra l'altro del modo di misurare le altezze, le lunghezze, le larghezze e le profondità usando l'astrolabio, lo specchio, l'asta pitagorica. In verità, metodi che si possono ritenere indiretti erano stati applicati anche nell'età classica, con la cosiddetta asta di mira e con l'asta d'ombra. Con riferimento alle figg. 15, 16, 17 si può vedere come queste fossero regoli di legno e le misure basate sulla similitudine di triangoli

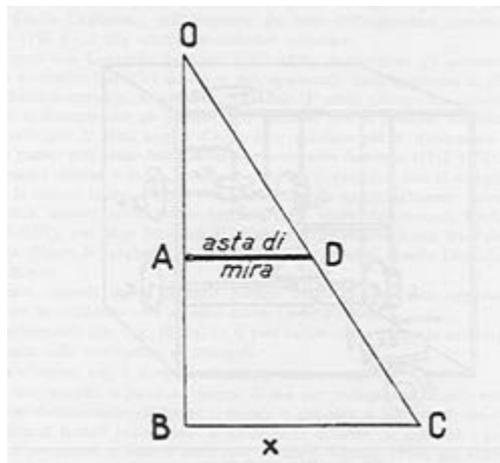


Figura 146 Asta di misura.

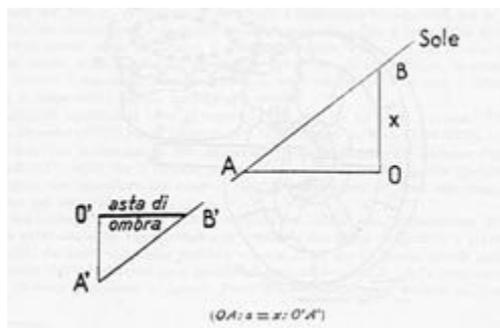


Figura 147 Asta d'ombra.

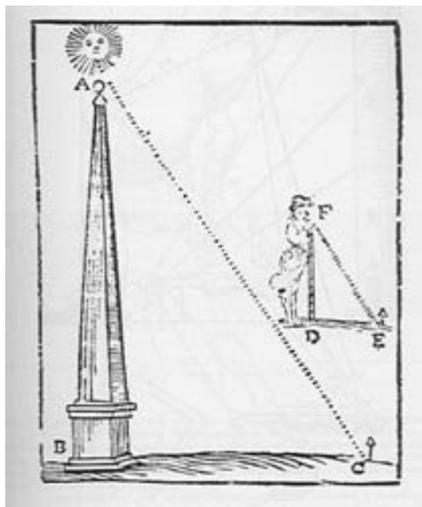


Figura 148 Misure con l'asta d'ombra.

L'asta d'ombra non è altro che il già citato gnomone. Dalle aste semplici si passò all'insieme di due aste collegate ad angolo retto; fra queste va citato, come distanziometro indiretto il baculo o giacobea o bastone di Giacobbe (fig. 2). Ne parla il Bartoli ("Del modo di misurare le distanze: le superfici, i corpi, le piante, le province, le prospettive e tutte le altre cose terrene", Venezia 1564), già citato in precedenza. L'uso del baculo è illustrato in centinaia di figure su trattati italiani e stranieri dei secoli XVI e XVII (figg. 18 e 19).

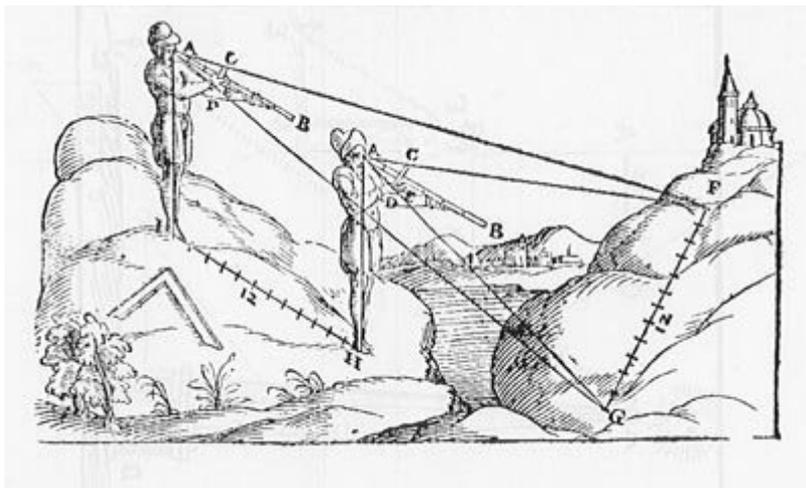
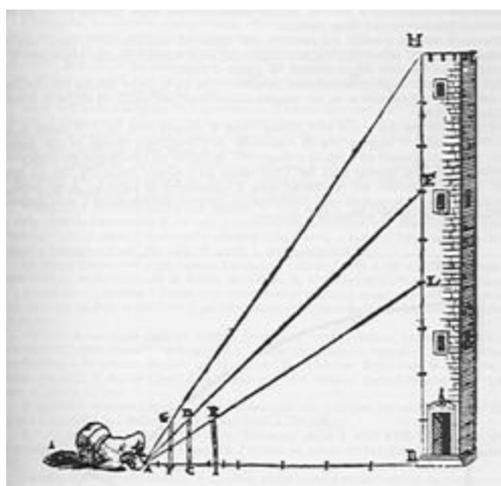


Figura 149 Misura di distanze col bastone di Giacobbe o baculo.



*Figura 150 Misura di altezza col baculo.*

E dopo questo venne la misura ottica, allorché furono disponibili i cannocchiali. E' infatti solo dopo la comparsa del cannocchiale kepleriano che si incominciano a precisare i metodi che poi, variamente realizzati ed interpretati, si dilateranno fino ad oggi metodi basati sulla formazione di un angolo parallatico (costante o variabile, ma più spesso del primo tipo, per la semplicità dei calcoli connessi), di un angolo cioè che fosse capace di legare insieme distanza incognita e campione noto di lunghezza. Il primo a costruire, nella seconda metà del '600, un dispositivo di tal genere è Geminiano Montanari (Astronomo della Repubblica Veneta, che nel 1674 descrisse la sua "livella diottrica", dotata di cannocchiale con oculare positivo e di molte coppie di fili distanziometrici da usare con stadia verticale a scopi), ma la realizzazione pratica che storicamente è accertato sia stata usata per prima e largamente applicata al rilevamento di terreni anche accidentali, è quella dell'inglese William Green. Costui costruì e brevettò un secolo dopo quello del Montanari, nel 1778, un cannocchiale distanziometrico munito di reticolo a due tratti, incisi su lastrine di vetro rettificabili. Con esso si doveva usare una stadia a scopi mobili, tenuta normale alla visuale.

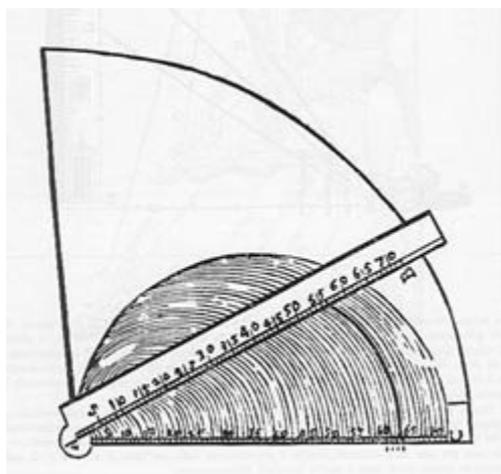
All'incirca di uguale data sono gli esperimenti di M. De La Hire, francese (1774) e del tedesco A. Brander (1764), cui si aggiunge nel 1774 l'inglese J. Watt. Ma è solo con la costruzione del cannocchiale distanziometrico del bavarese Georg Von Reichenbach (1771-1827) che il metodo, seppure fra incertezze, ostilità, grandi speranze, entusiasmi peraltro

non giustificati dai modesti risultati ottenuti con le prime esperienze, entrerà nella pratica del topografo. Von Reichenbac costruì nel 1810, valendosi tra l'altro della cooperazione di J. Von Fraunhofer (1787-1827), un cannocchiale con reticolo a due punte rettificabili, a grande angolo parallattico, da usarsi con stadia graduata e senza scopi: questa fu una grande innovazione pratica, seguita dall'introduzione (non giustificata teoricamente dal R.) della costante additiva. Il genio e la lunga esperienza di Ignazio Porro consentiranno pochi decenni più avanti non solo la giustificazione teorica della "formula" di Reichenbach, ma anche la costruzione, da parte dello stesso Porro, dapprima del cannocchiale da lui detto stereogonico, in cui il vertice dell'angolo parallattico coincide con il punto nodale esterno dell'obbiettivo del cannocchiale, e subito dopo del cannocchiale centralmente anallattico, in cui tale vertice coincide rigorosamente con il centro del cannocchiale, eliminando così la costante additiva e rendendo monomiale la formula della distanza desunta indirettamente.

Dovrà passare ancora quasi un secolo prima che H. Wild costruisca il cannocchiale di lunghezza costante praticamente anallattico, nel quale cioè il vertice dell'angolo parallattico oscilla di pochi millimetri intorno al centro dello strumento, per cui la costante additiva è nulla solo per una data distanza, mentre è praticamente nulla per tutte le altre al di là delle distanze di alcuni metri, che è inutile misurare indirettamente. Nell'intervallo di quasi un secolo fra i lavori del Porro e quelli di Wild s'era manifestata la necessità, grazie anche allo sviluppo enorme assunto dalla topografia celerimetrica, cioè numerica, rispetto ai vecchi metodi di rilevamento diretto del terreno, di disporre di formule semplicemente moltiplicative e prive di funzioni trigonometriche anche quando la visuale del cannocchiale distanziometrico fosse inclinata. Il primo a pensare a questo e a realizzare uno strumento "autoriduttore", capace cioè in ogni caso di fornire il valore della distanza orizzontale senza eseguire prodotti trigonometrici e soprattutto senza misurare angoli verticali, fu ancora il Porro.

Egli costruì allo scopo il cannocchiale stenallattico, in cui la focale variava con l'inclinazione dell'asse di collimazione sì da far rimanere indipendente dall'angolo di altezza la costante distanziometrica. Lo

strumento del Porro non ebbe fortuna; tutta la seconda metà del XIX secolo fu un fiorire di invenzioni e proposte per la costruzione di autoriduttori fondati su due metodi distinti: le scale tangenziali ed i reticoli a diagrammi. In verità, un antesignano dei "riduttori" venne ideato già nella seconda metà del XVIII secolo da Lodovico Perini (fig. 20). Lo strumento, di legno o metallo era strutturato come il "diagramma di Orlandi" di un secolo e mezzo dopo; aveva serie di semicerchi concentrici (di diametro corrispondente a varie distanze) ed un'asta collimatrice (di inclinazione variabile).



*Figura 151 L'autoriduttore di Perini*

L'uso è intuitivo, dato che l'intersezione fra un semicerchio e la riga obliqua permette di leggere sulla proiezione a tal punto, nella parte dei diametri comuni, la distanza ridotta. Capostipite dei moderni distanziometri riduttori (non totalmente autoriduttori, richiedenti cioè alcune operazioni manuali) è lo strumento proposto nel 1866 dal francese E. Sanguet. Si tratta in realtà di un clisimetro con scala tangenziale verticale: fatte due letture alla stadia con due diverse inclinazioni del cannocchiale, sì che per esempio la differenza delle pendenze sia di  $1/100$ , la distanza viene data dal prodotto dell'intervallo di stadia per l'inverso di tale differenza, cioè nel caso esemplificato per 100.

Segue nell'anno successivo lo strumento di Wagner, costruito dalla casa tedesca Fennel; nel 1889 il riduttore di Charnot con scala orizzontale; nel 1898 quello di Vogler, costruito da Hildebrandt a Freiberg; nel 1900 altro strumento di Doergens, poi infine nel 1912 quello del francese Balu, prodotto

dalla Kern di Aarau. Solo in Sanguet ha successo, soprattutto nel paese d'origine, e viene prodotto in migliaia di esemplari: esso ispirerà ancora nel secondo dopoguerra, il TARI della Salmoiraghi, anche se qui la scala tangenziale è disposta sul cerchio verticale. I riduttori e gli autoriduttori con reticolo di varia foggia, per fare in modo che il prodotto della costante strumentale  $K$  per  $\cos^2 \alpha$  possa rimanere costante con l'elevazione del cannocchiale ( $K = f/r$ : o varia  $f$ , come nello strumento del Porro, o varia  $r$ , distanza fra i tratti del reticolo) nascono un po' più tardi di quelli a scala tangenziale. La prima proposta è degli italiani Roncagli e Urbani (1890) a fili mobili (soluzione che verrà adottata molto più tardi da Kern). Su questo, R. Von Hammer (1858-1925) - professore a Stoccarda - progetta il primo vero autoriduttore di questa classe che avrà gran successo; sarà costruito da Fennel nel 1900 e gli verrà applicato il cannocchiale centralmente anallattico del Porro. Nel 1919 il norvegese Dahl ne studia e propone un miglioramento; per oscuri motivi però solo nel 1932 viene costruito un prototipo e la serie, essa pure di successo e dotata del nuovo cannocchiale a lunghezza costante progettato da H. Wild per Zeiss, vede la luce con gran ritardo nel 1942. Il Dahlta (Dahl Tachymeter) non avrà tuttavia forte diffusione, per via dello stato di guerra in atto.

Il geometra svizzero Leemann nel 1930 brevetta una variante dell'autoriduttore a fili, su cui Kern costruirà nel 1929 il DKR e nel 1946 il DKRM. Su tale brevetto, con varianti modeste, è fondato anche il Wild RDS nel 1951, il TA-D1 della ungherese MOM (1959), il russo TA-2 (1959) ed infine l'RTa4 Zeiss di Oberkochen del 1967. La misura ottica delle distanze è possibile anche usando stadia orizzontale e cannocchiale con reticolo a tratti distanziometrici verticali; una variante che prescinde dal reticolo a tratti, è quella con cuneo prismatico. L'idea della "doppia immagine" dovuta al cuneo, risale allo statunitense Richards, nel 1894, rimasta però senza applicazione pratica. L'idea era stata già in precedenza applicata a un telemetro, in altra versione, dagli inglesi A. Barr e W. Stroud, precisamente nel 1888.

Nel 1922, il topografo svizzero R. Bosshardt (1884-1967) ottiene il brevetto per un dispositivo capace di autoridurre le distanze inclinate, mediante letture su stadia orizzontale. È del 1924 il prototipo Redta (Reduktions Tachymeter) Bosshardt-Zeiss. Per diffondere anche presso i vari

organismi pubblici del centro-Europa la propria invenzione, Bosshardt pubblica nel 1930 un volumetto e addirittura Otto Von Gruber ne fa oggetto di minuziose ricerche. La precisione del nuovo autoriduttore a diasporometro è stupefacente per i tempi. Nasceranno poi, sull'onda del successo del Redta Zeiss e con le solite varianti il DK-RT Kern (1947) e l'RDH Wild (1950). Poche parole sui telemetri. E' Brander, nel 1781, a proporre un telemetro a specchi, seguito nel 1790 da Ramsden con telemetro a prismi e semimmagini.

Solo nel 1888 i già citati Barr e Stroud realizzano uno strumento adatto all'uso topografico; ma è Carl Pulfrich, il padre dello stereoscopio (1858-1927), a produrre nel 1900 alla Carl Zeiss di Jena il primo telemetro stereoscopico che tanta diffusione avrà per scopi militari, mentre saranno modeste le sue applicazioni in campo topografico. Va ricordato che Pulfrich lavorò su un brevetto del francese Grousillier del 1893. La misura delle basi geodetiche, introdotta da W. Snell, Snellius (1591-1926) richiedeva l'uso di longimetri diretti di precisione ben superiore alle catene, ai nastri, alle ruote dentate. Snellius usò a Leiden nel 1615 delle pertiche di legno appoggiate al suolo; altrettanto fecero Norwood nel 1633 per la misura della base fra Londra e York e poi Pichard nel 1669. Era allora ignorata l'influenza della temperatura e dell'umidità e i risultati furono modesti. Solo all'inizio del XVIII secolo Cassini usò aste metalliche, misurando la temperatura e quindi tenendo conto delle variazioni di lunghezza: gli errori furono però ancora rilevanti per il consueto appoggio sul terreno delle aste, dato che i supporti erano allora ignorati. Questi furono introdotti da R.G. Boskovic (1711-1787) e dal suo confratello G.B. Beccaria: il primo per la misura della base dell'Appia, il secondo per quella di Rivoli. Le pertiche sono di legno, disposte su cavalletti e rese orizzontali con cunei di legno, nonché allineate con teodolite. La misura delle basi diventa "scientifica" però solo con Reggio, Oriani e De Cesaris, i tre astronomi di Brera che nel 1788 usarono pertiche di ferro a T su travi di legno per la misura della base di Somma lungo il corso del Ticino; tutti gli accorgimenti noti sono qui utilizzati ed infatti le successive misure della base, l'ultima nel 1878 per opera dell'IGMI, ne confermano la bontà originaria. Sarà F.W. Bessel (1784-1846) ad usare le aste bimetalliche, ideate peraltro da Borda, impiegando cunei di vetro e

sfruttando così le diverse dilatazioni di ferro e zinco come termometro interno.

Le aste a tratti, proposte dal Porro con i suoi telescopi panfocali sono usate dall'americano Hassler; è infine il professore svedese M. Eduard Jäderin dell'Università di Stoccolma a proporre come basimetri, nel 1878, fili o nastri di acciaio in tensione, con piastrine terminali e indici su treppiede. L'apparato verrà perfezionato quando, nel 1900, Benoit e Guillaume introdurranno la lega di ferro e nichelio detta invar, con coefficiente di dilatazione lineare pari a circa  $1/10$  di quello dell'acciaio. Passerà ancora mezzo secolo e si giungerà finalmente alla misura elettronica delle distanze, sia lunghe che corte, sia di precisione tecnica che geodetica. Certo la possibilità di misurare le distanze con la luce fu per diversi secoli il sogno degli studiosi. Il primo a tentare contemporaneamente la misura della velocità della luce, e nota questa, la misura per via ottica della distanza, fu Galileo nel 1648. Egli dispose due lampade a 6 e a 3 miglia di distanza, tentando una modulazione della luce con il rapido passaggio delle mani (dei suoi collaboratori) davanti alle sorgenti; ma il tentativo cadde perché allora si ignorava che, a quelle distanze, il tempo necessario per passare le mani e così ottenere la successione buio-luce, era enormemente grande rispetto a quello che in realtà sarebbe stato necessario. Infatti, mentre il suono viaggia nell'aria a circa 350 m/s ed a 3 e 6 miglia di distanza una variazione di emissione di suoni sarebbe facilmente avvertibile, la luce (ma Galileo, appunto, non lo sapeva) corre circa 900.000 volte più in fretta! Se ne rese conto però, trent'anni più tardi, Roemer, che nel 1676 misurò con metodo astronomico tale velocità utilizzando i satelliti di Giove, sia pure con un errore del 25%. Bradley ne ottenne all'incirca il corretto valore nel 1725, finché si giunse alla nota esperienza di Fizeau, che nel 1849, con un modulatore a ruota dentata (e cioè stavolta con metodo terrestre) trovò un valore scostantesi di circa il 5% da quello che noi oggi conosciamo. Il metodo di Fizeau può a ragione ritenersi come il primo sistema adatto alla misura della distanza con luce modulata. Fra gli esperimenti per misurare la velocità della luce si ricordano ancora quello di Foucault (1862) e, sessant'anni più tardi, quello di Michelson in California: Foucault usò uno specchio ruotante, Michelson una prisma. Ad ogni modo, il primo distanziometro elettro-ottico

del mondo fu costruito sperimentalmente in Unione Sovietica da Lebedev, Balakoff e Wafiadi, però su brevetto (datato 1933) di un altro studioso russo, Trofimuk.

Altri brevetti ottennero il francese Toulon nel 1937 e lo statunitense Wolff nel 1939. Gustav Förstner e Karl Cantz, sperimentarono un distanziometro a impulsi poco prima della seconda guerra mondiale; nel 1938 misurarono la distanza fra terra e un aereo, a circa 100 km, con incertezza di 1 km, ridotta dopo altre esperienze a 50 metri. La Lutwaffe (l'arma aerea del Reich) impedì ulteriori sviluppi civili dello strumento, ritenendo sufficiente a scopi bellici la precisione raggiunta. Sempre Förstner, con Walther Brucklacher, costruisce il FuG 103, capace di misurare elettronicamente dislivelli con precisione di 2 m. Occorre però arrivare fino al secondo dopoguerra perché, su lavori pubblicati nel 1940 negli "Annali della Fisica" a Berlino, lo svedese Erik Bergstrand possa costruire il primo distanziometro elettronico utilizzabile commercialmente chiamato Geodimeter, contrazione della frase Geodetic Distance Meter.

Il prototipo del geodimetro, non ancora industrializzato, misurò nel 1950 sino a 30 km (di notte, con lampade a vapori di mercurio). Nel 1953, il primo strumento commerciale, pesante 110 kg e atto a fornire la misura in 40 minuti, venne acquistato dal Dipartimento della Difesa degli USA. Il più grosso difetto era costituito allora dal sistema riflettore, uno specchio piano. Per caso, un impiegato della casa produttrice, la AGA di Lidingö, ricordò che pochi anni prima la marina svedese aveva usato come riflettori dei prismi di Porro modificati, in grado di riflettere il raggio ottico parallelamente alla direzione di incidenza entro un range di circa 20°. Ne nacque così il "Corner Cube", oggi ben conosciuto. Nel 1955 appare il geodimetro modello 2° e l'anno seguente il 3°. Il geodimetro 4° del 1958, pesa "solo" 34 kg, misura in dieci minuti, ha una portata di 1 km alla luce solare; portata che quattro anni più tardi diventa di ben 20 km. Ormai il progresso dell'elettronica incalza; nel 1965 la versione 6 è transistorizzata e nel 1967 il mod. 8 ha portante laser e distanze utili di 130 km. Al geodimetro degli anni '50 segue nel 1959, uno strumento a microonde, capace quindi di attraversare con la portante foschie, piogge, ostacoli leggeri (come fogliame), ma con lo svantaggio di richiedere all'altro estremo della distanza una ricetrasmittente anziché un semplice riflettore

passivo, come nel caso dello strumento ad onde portanti luminose. L'apparato, del sudafricano Wadley, prese il nome di Tellurometer. Si noti che sia il nome dello strumento di Bergstand che quello di Wadley contengano la radice della parola terra: il primo con derivazione dal greco (ge), il secondo dal latino (tellus).

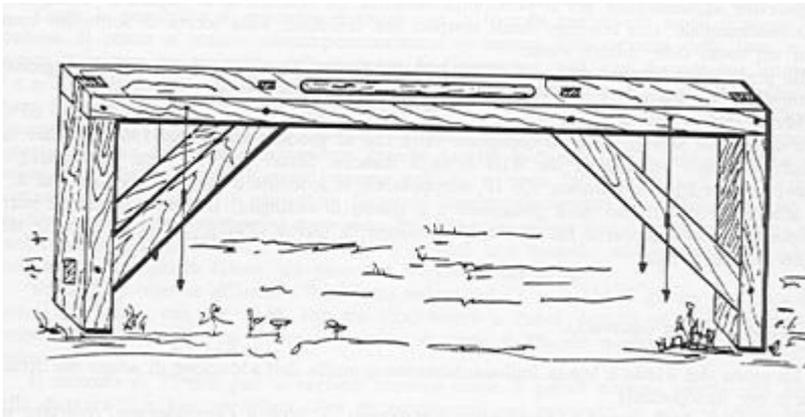
I primi strumenti dei due tipi erano dunque ingombranti e pesanti, richiedendo inoltre una notevole alimentazione per il loro funzionamento. Le operazioni di misura avvenivano in modo semimanuale, con conteggi finali semplici ma fastidiosi, sulla scorta di formulari completati nel corso delle misure stesse. In pratica tali strumenti erano utilizzabili solo dalle organizzazioni statali o regionali addette al rilevamento delle grandi reti di appoggio. Ma il rapido progresso fa sì che già nel 1960 i geodimetri risultino semplificati ed in grado di rendere servizi anche al topografo oltre che al geodeta. Infine nel 1968 compare sul mercato, costruito in tandem da Wild e dalla francese Sércel (per la parte elettronica), il primo pratico e leggero Distomat DI 10, accoppiabile al teodolite e con portata massima di 1 km, adatto al rilevamento delle poligonali e a quello di dettaglio. La sua costruzione verrà resa possibile dalla scoperta del diodo all'arseniuro di Gallio (1967), che apre le porte alla strumentazione attuale.

#### **7.1.4 La misura dei dislivelli**

La storia del livello è legata indissolubilmente a quella dell'adduzione di acqua per irrigazione e per uso potabile. Si ricordano ad esempio l'acquedotto sotterraneo di Siloè a Gerusalemme, costruito nel 700 a.C., lungo circa 510 m, con dislivello di 10 m e pianta a S; il tunnel di Samo 525 c.C. ed infine gli innumerevoli acquedotti romani sparsi per tutto l'impero, dall'Africa, all'Asia, alla Britannia. Tutte queste opere presupponevano la misura di dislivelli con buona precisione.

Vitruvio, nel suo "Dell'architettura", capo VI, libro VIII, dice (nella traduzione del cardinale D. Barbaro, Venezia 1567): "...il livello... (intendendo qui la livellazione, n.d.A.) si suol fare con tali strumenti, con il traguardo, con il livello ad acqua e con quello strumento che si chiamava corobate, e con questo più diligentemente e sicuramente si livella, perché il traguardo e il livello ad acqua fallano. Il corobate è una asta lunga piedi 20, la quale ha le

braccia piegate...". Il chorobates era quindi un'asta di legno di circa 6 m di lunghezza (fig. 21) con una faccia piana nella quale si realizzava un incavo a canaletto, che andava riempito d'acqua. Agli estremi dell'asta, due bracci ortogonali configurano nell'insieme una specie di panca, alla quale erano sospesi due fili a piombo per parte, come traguardi. Questi servivano a rendere verticali i fianchi dell'asta e quindi orizzontale la canaletta per l'acqua (ammesso che i due bracci fossero sufficientemente ortogonali all'asta).



*Figura 152 Il "Chorobates".*

Il corobate è quindi il livello preferito dai romani, che però usavano anche il livello ad acqua (non si sa in quale forma, ma comunque questo doveva prevedere i due classici bicchieri all'estremità di un tubo di collegamento) ed il "traguardo", detto anche "Lychnia" o "Lampada", probabilmente per la forma (fig. 22).

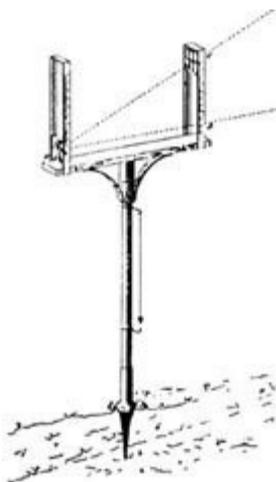


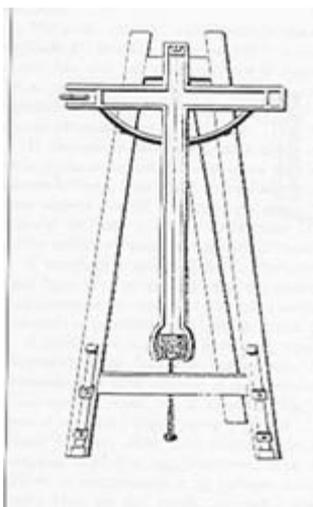
Figura 153 Una ricostruzione della "Lychnia".

Il corobate era però il livello più sensibile e più preciso; la cosa più interessante (e poco conosciuta) è che Vitruvio, parlandone, dice quanto segue:

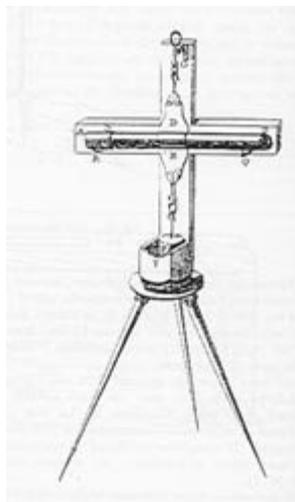
*"...Ma chi leggerà i libri di Archimede forse dirà che non si può direttamente livellare con l'acqua, perciocchè a lui piace che l'acqua non sia piana, ma di figura sferica; e ivi avrà il centro suo, dove il mondo ha il suo, ma questo è vero sia l'acqua piana o sferica..."*

E' sorprendente non tanto che Archimede abbia pensato e scritto della terra sferica e dell'acqua (in quiete) disposta secondo quella che oggi chiamiamo superficie equipotenziale, bensì che, oltre duecento anni dopo la sua morte cruenta, Vitruvio si rammentasse e ne parlasse a sua volta. Ciò significa che il dibattito scientifico era rimasto vivo nei due secoli trascorsi e che i Romani non erano quella gente pratica che la tradizione ci ha rimandato, ma un popolo capace anche di riflessioni e di osservazioni non solo empiriche. Riflessioni che però scompariranno, almeno nel settore della scienza, per oltre un millennio: quello dei "secoli bui". Si tramanda solo il ricordo e giusto l'uso del livello ad acqua, del quale nel 1660 il Padre Riccioli fa un'attenta descrizione fornendo anche le precisioni raggiungibili nelle

livellazioni sino a circa 10 km: nemmeno trascurabile, essendo indicata in 10 cm. Nel 1629 , G. Branca aveva inventato il livello idrostatico, usato ancora oggi dai "solini" per la posa dei pavimenti. Ed ecco nascere, in concomitanza con i grandi lavori geodetici, nuovi livelli che si possono definire automatici, dato che sono asserviti ad una massa pesante. Sono tali quelli di J. Picard (1620-1682), Huyghens, De La Hire (figg. 23-24).



*Figura 154 Livello di Picard.*



*Figura 155 Livello di Huygens.*

Come si vede, sono sostanzialmente aste con peso all'estremità, collegate con una diottra a traguardi. Il "pendolo" di Picard in particolare è

lungo circa 1.3 m (anticipa così la pari lunghezza, anche se "virtuale", dei moderni compensatori meccanici, ad esempio del livello Zeiss Ni 1). E' per primo Alain Malesson Mallet (1630-1706) ad unire un cannocchiale collimatore (nel 1702) ad un livello a bolla. A questo proposito, benché la cosa non sia certa, la livella a bolla entro fiala torica si ascrive nel 1662 al meccanico parigino J. Thévenot che forse è anche il primo costruttore del livello detto appunto "a bolla". Thévenot scrive infatti nel 1666 sul "Journal des savants", di una "... *machine nouvelle pour conduite des eaux, pour les batiments, pour la navigation et pour la plupart des autres arts*". La livella a bolla sferica è del meccanico Johann Mayer di Gottinga (1770). La livella torica descritta e costruita da Thèvenot, per decenni di incerta fattura e di grosse dimensioni, acquista forma accettabile solo alla fine del '700, allorché viene costruito il primo livello a bolla definibile "moderno". Esso è opera di Antoine Chézy (1718-1798) ed è del 1770 circa (fig. 25).

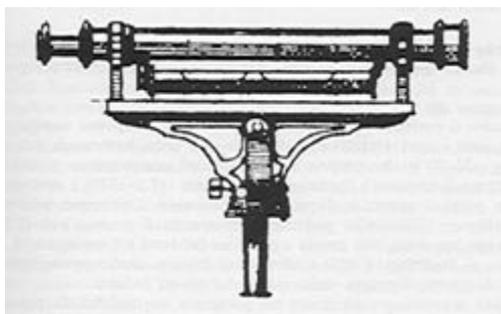
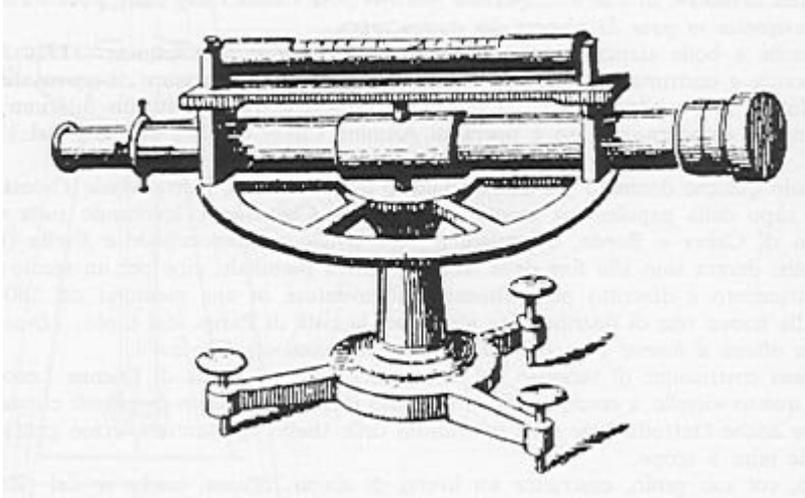


Figura 156 Il livello di Chézy.

Ma solo qualche decennio più tardi, all'inizio dell'Ottocento, Pierre Marie Thomas Egault, ingegnere capo della napoleonica scuola di "ponts et Chaussées", lavorando sulla scia delle indicazioni di Chézy e Borda, costruisce il vero livello a cannocchiale a livella (fissa alla traversa) che durerà sino alla fine della seconda guerra mondiale, cioè per un secolo e mezzo. Lo strumento è descritto puntualmente dall'inventore in una memoria del 1806, che si riferisce alla nuova rete di distribuzione idrica per la città di Parigi, dal titolo: "*Description et usage d'un niveau à lunette et a bulle d'air qui donne toujours l'horizon*". L'ultima costruzione di successo nel settore dei livelli, è quella di Etienne Lenoir (1744-1832); di questo "livello a cerchio" (fig. 26) fa uso intenso il servizio di "Ponti e massicciate", cui si deve anche l'introduzione nelle livellazioni delle stadiie "parlanti" - cioè graduate - al

posto delle mire a scopo. Porro, col suo genio, costruisce un livello di scarsa fortuna, anche se del tutto nuovo rispetto a Egault e Chézy.



*Figura 157 Il livello di Lenoir.*

Occorrerà però attendere i lavori di Wild presso la Car Zeiss, per vedere novità nel settore dei livelli: lo strumento a livella fissa al cannocchiale (che è di lunghezza costante) e che durerà sino ai giorni nostri, per essere soppiantato (a partire dal 1950) dai livelli a orizzontamento automatico, fra i cui precursori possono essere citati quelli di Picard e di Huyghens e, in epoca più vicina, quello di Goulier a pendolo. Poche cose aggiuntive: la livella a bolla reversibile è di Amsler (1857), la vite di elevazione è di Sickler, meccanico di Karlsruhe (fine settecento). Di modesta importanza i molti livelli realizzati fra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo: livelli a doppia curvatura, a bolla reversibile, a visuale reciproca; tentativi più che altro per ottenere risultati più rapidi e precisi, magari a prezzo di modalità operative anche complesse. Ma le differenze di quota si possono determinare anche con il teodolite: l'idea di utilizzare distanze zenitali a questo fine risale a Picard, che l'applicò nel corso di lavori di livellazione sulla Senna. Egli eseguì una "livellazione trigonometrica" a visuali reciproche fra la torre Sud di Notre-Dame ed il chiostro dei cappuccini di Sévres. E' invece J. Cassini a fare osservazioni di pressione e temperatura per stabilire le quote dei monti della Linguadoca, dei Pirenei, dell'Auvergne, introducendo così la "livellazione barometrica".

### 7.1.5 Gli strumenti minori

Queste poche righe illustrative sono nulla, in confronto alle congerie di strumenti, dispositivi, accessori che il topografo ha - specie nell'ultimo secolo - utilizzato per la misura e il rilevamento. Si ricorderanno qui solo i principali. Dello squadro si potrebbe scrivere a lungo, partendo dalla *groma* romana con tutte le sue trasformazioni, sino a quei "bussoli" o "bossoli" che tanta importanza assunsero nel Setto-Ottocento (figg. 27-28) e che proprio in questi secoli cominciarono a trovare concorrenti ottici.

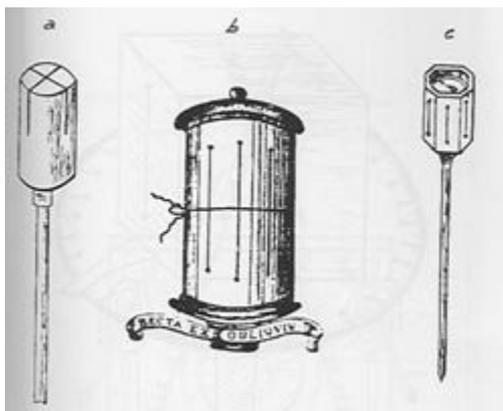


Figura 158 Squadri del XVI secolo.

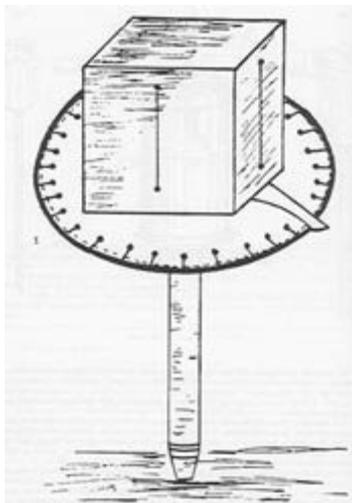


Figura 159 Squadro "a cubo" con cerchio graduato.

E' per primo il meccanico londinese John Adams (1720-1773) a costruire lo squadro a specchi che ne porta il nome: la doppia riflessione ne è

il principio informatore. Il fisico inglese H. Wollastone (1766-1828) preferisce agli specchi il prisma ; nel 1812 costruisce lo squadro omonimo ben noto, che ancora oggi viene prodotto ed impiegato. E poi verranno i prismi di Porro, di Bauerfeind (1851) a Monaco di Baviera, quello pentagonale di Prandtl del 1890, le croci di prismi, il prisma "universale" del nostro Jadanza. Il "quadrato geometrico", già citato nel paragrafo sui teodoliti, fa pensare che il Belli, che lo descrive nel "Libro del misurare colla vista" (Venezia, 1569) sia forse l'inventore della "tavoletta", così come già si disse al punto 2. In realtà, il goniografo così celebre, che ancora oggi qualche azienda produce, viene descritto per la prima volta da Gemma Frisius (1508-1555) nelle sue lezioni all'università di Lovanio nel 1553. Sicuramente l'astronomo olandese ne avrà costruito un esemplare; del resto anche Abel Foullon aveva usato nel 1551 il suo "holométre" (fig. 29) come elemento per il rilievo in campagna.