

DOTTORATO DI RICERCA FORME E STRUTTURE DELL'ARCHITETTURA
XXI ciclo
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA - DIPARTIMENTO INGEGNERIA CIVILE, DELL'AMBIENTE, DEL TERRITORIO E ARCHITETTURA

Stefano Alfieri

***IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI
STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA***

Collegio dei docenti:
prof. Bruno Adorni,
prof. Carlo Blasi,
prof. Celestina Cotti,
prof. Eva Coisson,
prof. Paolo Giandebiaggi,
prof. Ivo Iori,
prof. Alberto Mambriani,
prof. Gianni Royer Carfagni,
prof. Michela Rossi,
prof. Chiara Vernizzi,
prof. Michele Zazzi,
Prof. Andrea Zerbi.
Relatore:
Prof. Arch. Carlo Blasi

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA
DIPARTIMENTO INGEGNERIA CIVILE,
DELL'AMBIENTE, DEL TERRITORIO E ARCHITETTURA
DOTTORATO DI RICERCA
FORME E STRUTTURE DELL'ARCHITETTURA
XXI ciclo
(ICAR 08 - ICAR 09 - ICAR 14 - ICAR17 - ICAR 18 - ICAR 19 - MAT05 – MAT02)**



Coordinatore:
prof. Aldo De Poli
Collegio docenti:
prof. Bruno Adorni,
prof. Carlo Blasi,
prof. Celestina Cotti,
prof. Eva Coisson,
prof. Paolo Giandebiaggi,
prof. Ivo Iori,
prof. Alberto Mambriani,
prof. Gianni Royer Carfagni,
prof. Michela Rossi,
prof. Chiara Vernizzi,
Prof. Michele Zazzi.

TITOLO DELLA TESI:

***IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA***

DOTTORANDO:
Stefano Alfieri

RELATORE:
Prof. Carlo Blasi

SOMMARIO

PREMESSA

FINALITÀ E ARTICOLAZIONE DELLA RICERCA pag.1

INTRODUZIONE

LE CONOSCENZE COSTRUTTIVE AL TEMPO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA. CENNI ALLE PRASSI, ALLE TEORIE E AGLI SVILUPPI pag.4

PARTE PRIMA

LE CRITICITÀ DELLE COSTRUZIONI IN MURATURA: PROBLEMI OGGETTO DI RICERCA IN ALCUNI CASI SIGNIFICATIVI

Il crollo della Torre di Pavia

1 Analisi delle criticità. Pag 18

Alcuni esempi correlati

2 Il caso della Cattedrale di Noto: lo studio del quadro fessurativo. Pag. 33

3 Il caso della Cattedrale Metropolitana di Città del Messico: i rapporti tra preesistenze e fondazioni. Pag. 35

4 Il caso della “Torre restituita” a Pisa. Pag. 42

5 Il caso del campanile della chiesa dei Frari a Venezia: un esempio di monitoraggio in itinere. Pag. 54

PARTE SECONDA

IL CASO DI MODENA: RAPPORTO TRA SUOLO E STRUTTURE IN UNA PROSPETTIVA MULTIDISCIPLINARE

I contesti di riferimento

1 Evoluzioni del contesto storico territoriale ed urbano. Pag.62

1.1 L'analisi delle preesistenze. Pag. 70

1.2 Le fondazioni di Torre e Duomo. Le indagini. Pag.83

1.3 La questione geologica : dati storici ed ultimi aggiornamenti. Pag. 96

Lo studio dei monumenti di Piazza Grande

2 Il Duomo:analisi del costruito e dei dissesti. Pag. 115

3 La Torre della Ghirlandina: analisi del costruito e dei dissesti. Pag.144

PARTE TERZA

NUOVI CONTRIBUTI ALLA RELAZIONE TRA TORRE E DUOMO DI MODENA

I riferimenti dell'oggetto di studio

1 Il Rapporto tra Torre e Duomo. Pag. 181

2 Forme strutture e dissesti del Duomo. Pag. 197

3 L'analisi dello stato fessurativo della Torre. Pag. 229

4 L'ipotesi dei cedimenti e la modellazione agli elementi finiti. Pag. 243

5 L'analisi dei dati del sistema di monitoraggio di Torre e Duomo. Pag. 292

PARTE QUARTA

ALTRI PUNTI DI PARTENZA PER IL FUTURO

Conclusioni Pag.311

Questioni aperte. Pag. 314

BIBLIOGRAFIA RAGIONATA

Repertorio delle fonti bibliografiche e iconografiche Pag. 316

PREMESSA

FINALITÀ E ARTICOLAZIONE DELLA RICERCA

Da qualche anno e in modo sempre più crescente, molte risorse vengono impiegate nell'ambito dell'architettura storico monumentale, con un' attività di ricerca interessata principalmente ai problemi della conservazione delle strutture e della memoria che queste rappresentano.

Nella volontà, non sempre affermata, di salvaguardare i beni storici architettonici, il ruolo del consolidamento statico diventa di primaria importanza, in particolare per gli effetti della combinazione tempo-resistenza in edifici realizzati con tecniche costruttive non sempre note e materiali specifici del tempo.

Riconoscere le cause dei dissesti che coinvolgono i monumenti e ricostruirle in modo cronologico, può diventare particolarmente utile per arrivare ad una visione organica del problema, indispensabile premessa per poi passare all'azione del restauro.

La tesi in oggetto, svolta nell'ambito del Dottorato di Ricerca "Forme e Strutture dell'Architettura", si prefigge di affrontare con approccio multidisciplinare applicato al restauro e alla conservazione, il caso particolare delle fabbriche del Duomo e del Campanile di Modena, verificandone le cause e i meccanismi del dissesto strutturale.

Ipotesi generali

La ricerca parte dal presupposto che le strutture monumentali come le vediamo oggi sono il risultato di molteplici cambiamenti legati a condizioni di contesto. In tal senso vanno considerati i contesti urbani geologici e territoriali in cui sorgono gli edifici, e le modalità della presenza umana in termini di vita e di lavoro.

L'ipotesi di partenza è che le strutture monumentali in muratura di grande mole manifestino i cambiamenti del rapporto suolo di fondazione – struttura in elevato attraverso precisi segni e segnali. Inoltre, per la natura stessa delle forme delle costruzioni tradizionali e delle tecnologie costruttive antiche, è plausibile sostenere che i segnali sulle strutture siano ripetitivi e possano condurre per via deduttiva alle cause che li hanno determinati.

Materiali e metodi

La tesi è stata strettamente orientata alla definizione di un metodo multidisciplinare per trattare il problema specifico del rapporto suolo-struttura negli edifici monumentali, con particolare attenzione a quelli di Modena. Partendo quindi dall'analisi di questioni teoriche che coinvolgono lo studio dei monumenti, si sono cercate di chiarire alcune questioni strutturali che coinvolgono oggi gli edifici con tecnologie costruttive antiche e i metodi d'indagine che consentono di ottenere le maggiori informazioni utili ai fini del restauro, in rapporto alle conoscenze tecnologico-costruttive disponibili in epoca medioevale.

La tesi si è così sviluppata in tre parti, di cui la prima introduttiva.

Nell'introduzione si cerca di sottolineare l'importanza, ai fini del restauro, dell'identificazione del rapporto tra forma, struttura ed equilibrio, ovvero fra la forma originaria e quella deformata dai processi evolutivi storici, per comprenderne il comportamento e i rischi di dissesto.

Nella prima parte si ripercorrono le esperienze e gli studi sulla stabilità degli edifici in muratura, concentrandosi in particolare su quelli di origine medievale. La ricerca storica muove dal crollo della Torre civica di Pavia del 1989 e si sviluppa su altri significativi eventi che hanno interessato la Cattedrale di Noto, la Cattedrale Metropolitana di Città del Messico e la chiesa dei Frari a Venezia.

Lo studio della variazioni di resistenza delle murature nel tempo, lo studio del rapporto suolo struttura e l'importanza del monitoraggio, della diagnostica e lo studio del comportamento dinamico delle strutture, costituiscono filoni di studio di ricerca ricorrenti sia pure con diversa intensità in tutti i casi considerati.

Nella seconda parte della ricerca, sulla base delle considerazioni emerse dalla ricerca storica, si approfondisce un caso esemplare: la torre civica della Ghirlandina a Modena e il suo rapporto con l'intero complesso monumentale del Duomo¹.

Le ipotesi di lavoro sono finalizzate a ricercare:

- la possibile influenza del substrato archeologico nella sequenza dei cedimenti differenziali;
- la continuità dei fenomeni di cedimento nel tempo;
- l'influenza reciproca dei monumenti in superficie e a livello fondale;

I due monumenti contigui, intimamente connessi da un punto di vista storico, stilistico e statico, sono stati analizzati secondo un approccio multidisciplinare.

Il metodo dell'approccio multidisciplinare si è sviluppato nel seguente percorso di ricerca:

- Studio dell'effetto della subsidenza sugli edifici e la natura del terreno di fondazione;
- Individuazione dei parametri meccanici attraverso un'analisi numerica;
- Realizzazione (per la prima volta) di rilievi livellometrici sul Duomo, allo scopo di comprendere le deformazioni subite dalla fabbrica dal momento della sua costruzione ad oggi e gli effetti delle preesistenze su tali dissesti;
- Interpretazione degli stati fessurativi della Torre, e del Duomo;
- Analisi della sequenza di misurazioni eseguite dal sistema di monitoraggio per capire i movimenti in atto delle due fabbriche;
- Ricostruzione al calcolatore di tutti gli eventi statici che hanno caratterizzato la storia dei monumenti mettendo in evidenza le correlazioni costruttive e strutturali tra Duomo, Torre ed edifici limitrofi;

¹ Il complesso monumentale di Modena, costituito dalla piazza, dalla Torre, dal Duomo, e alcuni edifici adiacenti, è patrimonio dell'UNESCO.

INTRODUZIONE

LE CONOSCENZE COSTRUTTIVE AL TEMPO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA. CENNI ALLE PRASSI ALLE TEORIE E AGLI SVILUPPI.

L'aspetto esteriore delle costruzioni è, molto spesso, il risultato di un lungo processo storico di alterazioni urbanistiche estetiche e strutturali: cambiamenti di forma del suolo, mutamenti delle condizioni tensionali nelle strutture, successive demolizioni e ricostruzioni di parti di porzioni di fabbricati.

“Non si deve infatti credere che un opera muraria sia un qualcosa di inerte, immobile, le cui condizioni si mantengono inalterate per tempi indefiniti.”²

Anche i mutamenti sociali incidono sugli edifici e sui loro comportamenti. Il modo di vivere i luoghi e gli spazi pubblici, di spostarsi e di lavorare, di limitare o accrescere la densità abitativa, inoltre le azioni che si attivano a seguito di eventi catastrofici naturali ed antropici modificano il territorio e si riflettono sul suolo dove sorgono le costruzioni.

Se è vero che queste modificazioni si avvertono soprattutto negli aggregati urbani dove si concentrano le attività del vivere e del produrre, è anche vero che le tendenze espansive e globalizzanti modificano continuamente i confini storici di riferimento.

“Ieri la città era un mondo, oggi il mondo e' diventato una città”³.

Ovviamente non si tratta di un processo sempre speculare e ripetitivo nelle modalità, nei tempi, nelle fasi, nelle caratteristiche, nella complessità. Al contrario, il processo di modificazione del rapporto tra suolo e territorio, pur ineluttabile, assume sempre una propria specificità ed una propria storicità, nel senso che non può mai dirsi definitivamente concluso.

Per questa ragione se alcuni effetti legati alla presenza umana sul territorio, si possono avvertire anche nel breve periodo (costruzioni di quartieri, infrastrutture...), diventa più complesso leggere le trasformazioni del suolo e l'influenza di queste sul costruito soprattutto se la lettura deve abbracciare un periodo di tempo che attraversa i secoli.

² Pierluigi Nervi, *Scienza o arte del costruire? caratteristiche possibilità del cemento armato*, UTET Torino, 1997

³ Lewis Mumford, *The City in History. Its Origins, its Transformations and its prospects*, New York 1961, ed. it. *La città nella Storia*, Edizioni di Comunità, Milano 1963 (Etas Kompass, Milano 1967; Bompiani, Milano 1981)

Allo stesso modo se i segnali dei cambiamenti del suolo si percepiscono con più facilità osservando gli effetti che provocano sulle strutture in elevato (formazione di lesioni, piuttosto che abbassamenti o inclinazioni non omogenee), non sempre questa evidenza è manifesta indipendentemente dalle metodologie costruttive di un edificio.

Gli eventi naturali e sociali dunque, ancorché fondamentali nella ricostruzione del rapporto tra suolo e territorio e del comportamento degli edifici, devono essere letti alla luce di un terzo elemento fondamentale: lo stato dell'arte nelle conoscenze costruttive ed i livelli applicativi di tali conoscenze sullo specifico edificio oggetto di analisi .

Da qui l'importanza della conoscenza del tracciato originale, e della giusta geometria con cui sono stati concepiti gli edifici. Un compito che, se per strutture moderne può risultare relativamente semplice, diventa particolarmente complicato per quanto concerne le strutture antiche, costituite da grossi ammassi murari, forme e tecniche lontane dalla prassi corrente e la cui rintracciabilità è spesso problematica.

In ogni caso, soprattutto quando la ricerca puntuale e quella deduttiva forniscono una documentazione parzialmente significativa, è fondamentale il ricorso, oltre che alle analogie costruttive temporali e tipologiche, anche il ricorso alle teorie di riferimento su cui si fondavano le conoscenze dei costruttori.

Teorie intese in senso lato: dalle motivazioni delle forme originarie degli edifici ai criteri della progettazione, dagli usi e dalle consuetudini alle prassi più generalizzate, dalle conoscenze scientifiche di riferimento alla loro traduzione empirica nell'intendere il rapporto tra suolo e struttura.

Il corpo umano sembra costituire il punto di partenza della prassi progettuale tramandata dai primi trattatisti nell'antichità⁴. In quanto creato ad immagine e somiglianza degli dei, il corpo dell'uomo era un riferimento obbligato, un modello da cui attingere regole e concetti⁵.

Da questo modello si potevano trarre soprattutto regole costruttive basate sulla ricerca della simmetria e della giusta proporzione tra le parti.

⁴ Questo modo di interpretare l'architettura e la costruzione si protrae fino al 1600 con Galileo Galilei

⁵ Salvatore di Pasquale, *L'arte del costruire, tra conoscenza e scienza*, Marsilio Editore, Venezia 1996, pp.19-184

La scelta della figura umana come modello di riferimento per la determinazione delle giuste proporzioni, diventa una regola generale da osservare, e i numeri che la governano spesso hanno significati provenienti da principi universali come per esempio il 6 e il 12 ovvero 1/6 e 1/12. Il 12 simbolo dello scorrere del tempo, misura il ciclo delle lune e dell'ovulo umano, viene adottato in architettura, insieme al 6 quale numero perfetto garante di stabilità⁶. Tale è stata l'importanza di questi numeri che a 1/6 viene accostato il termine "geometria" o forma corretta o regolare posizione⁷. Da questo numero derivano i termini a tutto sesto, a sesto acuto (legati alla forma degli archi), assestare (stabilizzare) e dissestato (fuori dalla giusta geometria).⁸

Ed è da questo punto di partenza che si sviluppano progressivamente tutte le esigenze costruttive in qualche modo collegate alla progettazione. A partire dalla matematica per i supporti necessari ai calcoli, ai costi e alle simmetrie .

Regole e rapporti costituiscono la prima necessità evolutiva del concetto delle giuste proporzioni. Queste ultime cioè, pur rappresentando una costante della progettazione, sono ben presto declinate con le relazioni tra i diversi elementi che vanno a costituire sul campo i problemi costruttivi.

Tali problemi si intrecciano in un crescendo di sperimentazioni, insegnamenti e scelte empiriche, deduzioni e controdeduzioni finalizzate ad una prima ricerca di regole e rapporti da codificare.

Gli esempi sono numerosi. Inizialmente i materiali disponibili influenzano inevitabilmente non tanto le dimensioni delle opere quanto piuttosto le forme di queste. Così come la garanzia di stabilità è ricercata nella perfetta simmetria che consente un giusto equilibrio nella disposizione dei carichi, nella scelta del terreno di fondazione e nella qualità dei materiali.

⁶ Sant'Agostino d'Ippona in *La Città di Dio* "Sei è un numero perfetto di per sé, e non perché Dio ha creato il mondo in sei giorni; piuttosto è vero il contrario. Dio ha creato il mondo in sei giorni perché questo numero è perfetto, e rimarrebbe perfetto anche se l'opera dei sei giorni non fosse esistita"

⁷ Diverse sono le derivazioni da sesto, sestante come moneta romana emessa durante il periodo della Repubblica valeva un sesto dell'asse o sestante come strumento di navigazione

⁸ Carlo Blasi, Eva Coisson, *Sesti e dissesti*, in *le forme dell'architettura nella tradizione, esperienze a confronto*, a cura di, Paolo Bertozzi, Agnese Ghini, Luca Guardigli, ed Franco Angeli s.r.l., Milano 2005, pp 235-252

Per arrivare a concludere che le regole costruttive dettate dalla ricerca delle giuste proporzioni, come si può leggere in Vitruvio⁹ non sono più sufficienti a garantire la stabilità. Infatti, il concetto di *firmitas* sembra sia per l'autore legato soprattutto alla solidità del terreno di fondazione e alla scelta accurata dei materiali¹⁰.

"...allora le fondamenta delle mura e delle torri si dovranno fare così. Si scavi giù fino al solido, se può trovarsi, e nel sodo (in quanto si creda essere ciò richiesto dalla grandezza dell'opera) la larghezza sia più ampia che non è quella delle pareti, che si faran sopra terra: dopo di che si riempia il fosso di solidissimi materiali.¹¹"

Dunque si può affermare in prima istanza che è assai difficile ritrovare modelli speculari di progettazione anche nell'ambito di periodi storici delimitati, pur nella sostanziale ripetitività di forme e modelli costruttivi.

E' assai più verosimile invece una molteplicità di situazioni, condizionate in proporzioni diverse da conoscenze empiriche, esperienze ripetute e utilizzazione di conoscenze teoriche, che si sommano e si integrano in un intreccio continuo.

La resistenza dei materiali da costruzione è stata, ad esempio, per lungo tempo un problema non affrontato dal punto di vista teorico. Il primo ad occuparsene in modo scientifico è Galileo Galilei nel '600.

Infatti i materiali e le tecnologie a disposizione fino alla fine del '700 consentivano la realizzazione di manufatti particolarmente resistenti a carichi gravitazionali ma meno a quelli orizzontali. Per esempio si doveva proporzionare lo spessore delle murature affinché, in caso di spinta orizzontale (per esempio la spinta della terra), il manufatto non si ribaltasse.

⁹ Il *De architectura* è un trattato di Marco Vitruvio Pollione l'unico giuntoci dall'antichità sull'architettura(sono in tutto 10 libri). L'edizione dell'opera avvenne negli anni in cui Augusto progettava un rinnovamento generale dell'edilizia pubblica (23-24 a.C.). Tale trattato, riscoperto e tradotto in epoca rinascimentale (1414) da Poggio Bracciolini per primo è stato il fondamento dell'architettura occidentale fino alla fine del XIX Secolo.

Libro I: formazione dell'architetto e scelta del luogo

Libro II: tecniche edificatorie, origine e sviluppo

Libro III: edifici sacri

Libro IV: fine della trattazione sui tempi

Libro V: edifici pubblici

Libro VI e VII: edifici privati (luogo, tipologia, intonaci, pavimenti)

Libro VIII: Idraulica

Libro IX: orologi solari, digressione astronomica e astrologica

Libro X: *Meccanica* (costruzione di gru, macchine idrauliche e belliche)

¹⁰ Salvatore di Pasquale, *L'arte del costruire, tra conoscenza e scienza*, Marsilio Editore, Venezia 1996, pp.19-184

¹¹ Vitruvio *De fundamentis theatrorum* (Lib. V, Cap. III.), Vitruvio *De firmitate in fundamentis aedificiorum* (Lib, VI, Cap. XI.)

Quindi la peculiarità delle costruzioni storiche in muratura è che la stabilità fosse garantita più dall'equilibrio che dalla resistenza dei materiali; e l'equilibrio si otteneva attraverso la ricerca delle giuste proporzioni.

Queste caratteristiche hanno portato alla realizzazione di strutture con tecnologie e forme ripetitive definite e sperimentate nei secoli. Di conseguenza anche i meccanismi di collasso per ogni forma strutturale sono diventati sempre più noti.

La geometria originale, in sé, e per l'analisi comparata con le condizioni della costruzione ad un certo tempo, è acquisizione oggi importantissima. Essa infatti consente l'individuazione di deformazioni o cinematismi che si sono manifestati nel tempo.

Dalla conoscenza della geometria originaria di un edificio (profilo storico , unità di misura ecc.) è possibile determinarne le irregolarità (deformazioni), e quindi dedurne le “patologie”. Così lo stato fessurativo che descrive i cedimenti e consente di distinguere quelli propri delle fondazioni e quelli riferibili a fenomeni di collasso localizzati.

Per esempio ora sappiamo che in una cupola emisferica ci si aspetta lesioni radiali più larghe all'imposta e più strette in sommità, in un arco ci si aspettano sistemi fessurativi in chiave piuttosto che alle *reni*¹².

Inoltre se si hanno variazioni differenziali della quota d'imposta delle fondazioni o dei muri si potranno leggere delle deformazioni nella curvatura degli archi, la formazione di lesioni per distacco di porzioni di edifici. Queste conoscenze non erano ancora codificate e disponibili in epoca medioevale.

La stessa rintracciabilità della geometria originale è spesso problematica; dunque rimane per certi versi non risolto il problema non tanto della complessiva tenuta costruttiva della gran parte degli edifici, quanto quello dei criteri progettuali di riferimento.

Rapporto suolo- struttura.

¹² Carlo Blasi, Eva Coisson, Sesti e dissesti, in *le forme dell'architettura nella tradizione, esperienze a confronto*, a cura di, Paolo Bertozzi, Agnese Ghini, Luca Guardigli, ed Franco Angeli s.r.l., Milano 2005, pp 235-252

Se è noto che il trattato di Vitruvio, riconosce l'importanza della scelta del suolo, dando indicazioni pratiche utili alla realizzazione dell'opera fondate su esperienze dirette come trovare il luogo adatto per realizzare una costruzione e come realizzare le fondazioni, non è altrettanto noto quanto di questi concetti facesse parte del bagaglio culturale degli architetti nel Medioevo, ovvero quanto le conoscenze provenissero da criteri empirici o da leggi teoriche precise.

Nell'opera di Isidoro da Siviglia (*Etymologiae* 560-636 d.C.) in cui si definiscono le parti dell'edificio (*dispositivo, constructio, venustas*), non c'è riferimento al trattato Vitruviano quanto piuttosto alle enciclopedie romane, utilizzate dallo stesso Vitruvio, di Marco Terenzio Varrone. Ciò che appare verosimile è che per tutto il periodo medievale le procedure costruttive erano tramandate in modo esperienziale all'interno delle comunità di appartenenza. Ogni membro della comunità era in grado di provvedere in modo autonomo alla realizzazione e alla manutenzione della propria abitazione attraverso le nozioni maturate all'interno della comunità. Le conoscenze tecniche, che si conservavano nella memoria collettiva tramandata in forma esperienziale tra generazioni e comunità diverse¹³, spesso potevano essere arricchite grazie ad una condivisione di tecniche sviluppate in altre comunità.

La realizzazione di edifici pubblici, a differenza delle semplici abitazioni, richiedeva spesso la presenza di manodopera specializzate e tecniche particolari. Soprattutto nell'Italia settentrionale, si formarono infatti gruppi di maestranze il cui nome spesso derivava dalle stesse comunità di appartenenza e specializzati su diverse tecniche di lavorazione. Questa maturazione specialistica, avveniva grazie al contesto in cui viveva la comunità e al suo grado di apertura intellettuale verso l'apprendimento di tecniche e materiali con altre comunità. La trasmissione delle informazioni sui processi costruttivi tra il gruppo di maestranze specializzate e membri delle comunità in cui lavoravano, non sempre prevedeva uno scambio esperienziale. Le occasioni in cui avveniva uno scambio sulle conoscenze tecniche, la base di partenza era comune e le interpretazioni diverse a seconda delle situazioni. I gruppi di

¹³ La sequenza di trasmissione avveniva seguendo una serie di passaggi ben precisi che andavano dall'osservatore del processo, rappresentativo della *prototestimonianza* o *testimonianza iniziale*, alla successiva catena di trasmissione costituita da tante testimonianze che ne rappresentavano gli anelli, sino all'informatore finale per arrivare in alcuni casi a colui che fissava la testimonianza per scritto per la prima volta. Per una descrizione dei vari passaggi della catena di trasmissione dei saperi si veda VANSINA-1977, p.63.

maestranze si attenevano non tanto a conoscenze teoriche quanto piuttosto a modelli pratici e sequenze operative sedimentate dall'esperienza¹⁴.

Le fondazioni

Nell'ipotesi che il trattato a cui hanno attinto gli Architetti di epoca Medievale è quello vitruviano, le nozioni si limitano alla scelta del sito dove edificare e alle modalità di esecuzione delle fondazioni:

"...allora le fondamenta delle mura e delle torri si dovranno fare così. Si scavi giù fino al solido, se può trovarsi, e nel sodo (in quanto si creda essere ciò richiesto dalla grandezza dell'opera) la larghezza sia più ampia che non è quella delle pareti, che si faran sopra terra: dopo di che si riempia il fosso di solidissimi materiali".(Vitruvio De fundamentis templorum, Lib. III, Cap. III.)

Ed inoltre

"Sopra terra si costruiscano i muriccioli sotto le colonne una metà più grossi di quello che sieno per essere le stesse; affinché le parti inferiori sieno più ferme delle superiori; i quali muriccioli sono detti stereobati, stante che sostengono i pesi. Gli sporti delle basi non escano fuori del sodo. Parimente devesi conservare la stessa grossezza dei muri al di sopra: gl'intervalli poi devono costruirsi a volta, o di ben calcato terreno, affinché sieno fermi e sicuri. Che se non si trovasse il sodo, e il luogo fosse di fondo aggrumolato o palustre, allora bisogna scavare e votare; poi conficcar pali d'olmo, d'olivo, di rovere abbrustoliti, e questi, quanto si possono più spessi, cacciar giù colle macchine, riempiendo di carboni i vuoti che rimanesser fra loro, e finalmente con saldissima costruzione riempire le fondamenta. Costruite per tal modo le fondamenta, si collochino i piedestalli a livello, e sopra i piedestalli si dispongano le colonne a norma di quanto fu insegnato di sopra." (Vitruvio De fundamentis theatrorum Lib. V, Cap. III.)

Da quanto letto quindi i criteri empirici e l'esperienza sembrano costituire in buona parte i riferimenti maggiori dei costruttori medioevali.

¹⁴ Giovanna Bianchi, *trasmissione dei saperi tecnici e analisi dei procedimenti costruttivi di età medievale.*

La composizione formale di una struttura e il suo modo di sostenere le sollecitazioni statiche costituisce ancora oggi una delle questioni più difficili da leggere e da interpretare nell'ambito dello studio delle grandi cattedrali romaniche dell'anno 1000. E' certo che quella progettazione non sembra prevalentemente richiamarsi alle correnti teorie sulla statica, non utilizza le nascenti nozioni di geometria e ignora l'uso del calcestruzzo.

“... molti dispositivi usati dai costruttori medioevali per risolvere i problemi di statica delle grandi chiese furono completamente originali. E' impossibile stabilire in qual misura si servissero di criteri puramente empirici e quanto fossero in grado di utilizzare l'apporto delle opere teoriche di statica. Ma è significativo che dalla fine del XII secolo, proprio quando la costruzione delle grandi cattedrali poneva problemi difficilissimi dal punto di vista statico, Giordano Nemorario e altri si occupassero, recando contributi importanti, di statica teorica; e che almeno un architetto del XIII secolo, Villard de Hounecourt, dimostrò di conoscere la geometria ... Gli sviluppi originari dell'architettura gotica nacquero dai problemi ai quali si andò incontro quando si trattò di coprire con un tetto di pietra le sottili mura della navata centrale della basilica, che era il tipo comune di chiesa cristiana sin dai tempi di Roma. I Romani non avevano mai dovuto affrontare i problemi che si posero i muratori medievali, poiché costruivano le volte a botte o a costole sulle loro terme in calcestruzzo, e le volte a cupola, come quella dei Pantheon, in mattoni con malta, disposti in file orizzontali; quando il calcestruzzo o la malta si erano solidificati; la spinta sulla parete era minima. Non così era per gli edifici medievali, in cui non si usavano né calcestruzzo né malta”¹⁵

La stabilità degli edifici costituisce una materia strettamente connessa alla tipologia costruttiva e dunque non vi è una teoria generale di riferimento ma un insieme di regole da osservare ponendo in rapporto il suolo, le fondamenta e l'articolazione interna della costruzione .

"Se gli edifici che si stabiliscono a piè piano avranno le fondamenta fatte come quelle di cui si trattò da noi nei primi libri parlando dei muri e dei teatri, dureranno senza dubbio per lunghissima antichità. Che se vi si formeranno ipogei o concamerazioni, i fondamenti si facciano più grossi che non saranno i muri degli edifici positivi sopra; e le loro pareti, i pilastri e le colonne si collochino nel mezzo a perpendicolo delle strutture inferiori, affinché

¹⁵ Alistar. C. Crombie, *Da S. Agostino a Galileo*, trad.it., p. 153-154, Milano, 1970.

corrispondano al solido; che se le pareti e le colonne peseranno in pendio, non potranno avere fermezza durevole. Oltre a questo, se fra le soglie a seconda dei pilastri e delle ante si opporranno le imposte, saran vantaggiose: perché quando le soglie e le travi sono troppo caricate dalle strutture, cedendo nel mezzo, frangono colla loro dissoluzione la fabbrica; ma quando si sottopongono a foggia di conio le imposte non permettono che le travi collo sforzare offendano le costruzioni. Parimente si dee operare in modo, che le arcate sollevino il peso delle pareti colle divisioni dei coni, e che le loro con chiusure corrispondano al centro. Perché se al di fuor delle travi o ai capi delle soglie gli archi saranno rinchiusi dai coni, primieramente la materia sollevata non cederà dal peso; poscia se avrà acquistato qualche difetto di vecchiaia, facilmente vi si rimedierà senza manifattura di puntelli. Così negli edifizî che si fabbricano a pilastri, le volte dei quali si serrano nelle divisioni de' coni colle connessioni corrispondenti al centro, devono farsi i pilastri estremi più larghi, affinché possano aver forza da resistere ai coni, che spinti dal peso dei muri, premendosi per le connessioni al centro, caccerebbero fuori le imposte. Onde se i pilastri angolari saranno assai larghi rattenendo i coni daranno fermezza all'opera. Quando si avrà posto attenzione di adoperare in queste cose la massima diligenza, si dovrà non meno osservare, che tutte le strutture vadano a perpendicolo, e che non abbiano in alcuna parte proclinazioni. Somma poi deve essere la cura delle sustruzione; perché in queste la congestione della terra suol produrre danni infiniti. La terra non può infatti essere sempre dello stesso peso che suol essere nell'estate; ma nella stagione invernale ricevendo dalle piogge gran copia d'acqua, crescendo di peso e di volume dirrompe e scompone le connessioni del fabbricato. Onde per rimediare a questo difetto si dovrà prima fare in guisa, che giusta il volume della congestione sia determinata la grossezza della struttura: secondariamente insieme con le fronti si costruiscano le anteridi ossia le erisme e queste sieno in tanta distanza fra loro quanta dev'essere l'altezza della sustruzione ed abbiano la grossezza della medesima sustruzione. Procedano esse dalla parte inferiore per cui fu stabilita la grossezza della sustruzione, poi si restringano gradatamente finché alla sommità abbiano tanto di prominenza, quanto è la grossezza dell'opera. Inoltre al di dentro verso il terreno si costruiscano unitamente al muro certi denti a forma di sega, e ciascheduno di questi denti si discosti tanto dal muro, quanta dev'essere l'altezza della costruzione. La struttura dei denti sia della stessa grossezza di quella del muro. Parimente negli angoli estremi, quando ci saremo scostati dall'angolo interno per tanto spazio, quant'è l'altezza della costruzione, "si farà un segno d'ambe le

parti: da questi segni si collocherà una struttura diagonale, e dalla metà di quella un'altra congiunta con l'angolo del muro. Così i denti e le strutture diagonali impediranno che tutta la forza della congestione preme sul muro, ma rattenendola ne dissiperanno l'impeto. Vitruvio De firmitate in fundamentis aedificiorum (Lib, VI, Cap. XI.)

Mentre le teorie maturate in epoca Romana divennero un patrimonio culturale di riferimento per i trattatisti di epoche successive al Medioevo, grazie alla traduzione rinascimentale di Poggio Bracciolini (1414), non è dato da sapersi se e quanto la pratica costruttiva medievale abbia influito sulle teorie architettoniche. La teoria di Vitruvio approfondita in epoca rinascimentale, non forniva indicazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali o sui modi i determinare la capacità portante del terreno ma solo indicazioni di tipo empirico di come operare nella realizzazione degli edifici¹⁶.

Nonostante le incertezze scientifiche, le indicazioni empiriche provenienti dal mondo arcaico, hanno attraversato i secoli, hanno influenzato il modo di concepire l'architettura, le strutture e le fondazioni in autori importanti come Leon Battista Alberti 1450¹⁷, Vincenzo Scamozzi nel 1538¹⁸, Filibert Delorme¹⁹, regolando la costruzione dei maggiori edifici monumentali italiani.

I principi di Vitruvio sulla questione delle fondazioni, in epoca rinascimentale, si arricchiscono nel trattato di Leon Battista Alberti di indicazioni legate alla scelta del giusto tipo di tecnologia e forma strutturale in funzione del tipo di terreno, come le fondazioni su pali e discontinue utili a trasmettere il carico agli strati più solidi. Il concetto che lega la stabilità di un edificio alla solidità del terreno di fondazione venne accolto da diversi trattatisti dopo l'Alberti in particolare nel settecento epoca in cui gli studi che portarono alla formulazioni delle teorie della moderna scienza delle costruzioni subirono una certa accelerazione, Jean Rondelet²⁰, nel suo trattato sottolinea come la scelta di un terreno

¹⁶ Marco Vitruvio Pollione, De fundamentis murorum et turrium (Lib. I. Cap. V.), Vitruvio De fundamentis templorum (Lib. III, Cap. III.), Vitruvio De fundamentis theatrorum (Lib. V, Cap. III.), Vitruvio De firmitate in fundamentis aedificiorum (Lib. VI, Cap. XI.) in *De architectura*, pubblica (23-24 a.C.), tradotto in epoca rinascimentale (1414) da Poggio Bracciolini.

¹⁷ Leon Battista Alberti, *De Re Aedificatoria, Parte Prima*, 1450

¹⁸ Vincenzo Scamozzi, *L'idea dell'architettura Universale*, a cura di Stefano Tigozzi e Luigi Masieri, tipografia Borroni e Scotti, Milano 1538

¹⁹ La questione della conoscenza della natura dei materiali e della resistenza delle strutture inizia a diventare fondamentale per il delinearsi di una nuova cultura architettonica soltanto a partire dalle esperienze condotte con metodo scientifico da Leonardo, negli ultimi due decenni del Quattrocento, e da De l'Orme, alla metà del Cinquecento.

²⁰ Jean Rondelet, *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare, Libro IX teoria delle costruzioni, Sezione Terza-Fondamenti degli edifici*

sbagliato possa diventare un problema di rovina di un edificio, e quindi sottolinea importanza di un'analisi approfondita sulla morfologia dello stesso.

“Dalla maniera con cui essi sono stabiliti dipende principalmente la solidità; gli errori o le negligenze commesse nell'eseguirli sono sovente irreparabili, e possono produrre la ruina di un edificio, o cagionare accidenti gravi che trascinano sempre a grandi spese. La prima operazione da farsi prima di costruire un edificio, sarà dunque di cercar di conoscere la natura del terreno sul quale debbono essere stabiliti i fondamenti. Così quando si è presso il sito ove si vuol edificare qualche edificio dello stesso genere dei già costruiti, fa d'uopo esaminare il modo onde sono stati fondati, lo stato in cui si trovano, per giudicare se convengano i processi impiegati, e cercar di evitare gl'inconvenienti che possono essere risultati da qualche omissione o negligenza, e sfuggire le opere superflue. Oltre queste cognizioni bisogna anche assicurarsi se il suolo su cui devesi stabilire sia della stessa natura in tutta la sua estensione, perchè esso muta sovente a pochissima distanza, o per essere stato smosso o per altre circostanze. Converrà scandagliare il terreno per conoscere gli strati diversi ond'è composto parallelamente alla superficie del suolo; la densità e lo spessore di essi che variano e li rendono suscettibili di comprimersi più o meno sotto il peso”.

Jean Rondelet dedica poi un'intera sezione ai *Fondamenti degli edifici*

“Nell'arte di edificare si devono considerare i fondamenti come la parte più essenziale d'un edificio, perchè è quella che serve di base a tutte le altre. Dalla maniera con cui essi sono stabiliti dipende principalmente la solidità; gli errori o le negligenze commesse nell'eseguirli sono sovente irreparabili, e possono produrre la ruina di un edificio, o cagionare accidenti gravi che trascinano sempre a grandi spese. La prima operazione da farsi prima di costruire un edificio, sarà dunque di cercar di conoscere la natura del terreno sul quale debbono essere stabiliti i fondamenti. Così quando si è presso il sito ove si vuol edificare qualche edificio dello stesso genere dei già costruiti, fa d'uopo esaminare il modo onde sono stati fondati, lo stato in cui si trovano, per giudicare se convengano i processi impiegati, e cercar di evitare gl'inconvenienti che possono essere risultati da qualche omissione o negligenza, e sfuggire le opere superflue. Oltre queste cognizioni bisogna anche assicurarsi se il suolo su cui devesi stabilire sia della stessa natura in tutta la sua estensione, perché esso muta sovente a pochissima distanza, o per essere stato smosso o per altre circostanze. Converrà scandagliare il terreno per conoscere gli strati diversi ond'è composto parallelamente alla

superficie del suolo; la densità e lo spessore di essi che variano e li rendono suscettibili di comprimersi più o meno sotto il peso. Gli strati formanti il fondo più solido sono quelli che non sono suscettibili di compressione; tali sono le rocce, le masse di pietre che non sono state scavate per di sotto; quindi la ghiaia, i terreni pietrosi, la grossa sabbia mista a terra; il tufo e le terre franche e compatte che non sono state smosse. I cattivi terreni sono suscettibili di un abbassamento considerevole, come le terre leggiere e porose, quelle che sono state scavate; le terre paludose, limacciose, torbose, bituminose; i terreni argillosi; le sabbie mobili, e quelle a traverso delle quali l'acqua gorgoglia. E' essenzialissimo notare che siccome gli strati buoni e cattivi si trovano ad ogni specie di distanza dal suolo, non è già la maggiore profondità delle fondazioni quella che dà la maggiore solidità.... Rapporto all'abbassamento che può risultare dalle differenti specie di terreni o dei suoli sui quali devono essere stabiliti i fondamenti degli edifici, esso dipende dal loro grado di compressibilità; perchè suoli non suscettibili di compressione, come quelli formati dalle rocce o dalle masse di cava, non proverebbero nessun abbassamento. Nei suoli compressibili, è meno pericoloso l'abbassamento che la ineguaglianza, perchè questa produce rotture e disunioni che possono cagionare la ruina d'un edificio. Per evitare questo inconveniente, fa d'uopo che la superficie dei fondamenti dei muri o dei punti d'appoggio aumenti in ragione del loro carico. La maggior parte degli accidenti che avvengono ai grandi edifici, e ai fabbricati comuni, procedono da ciò che i fondamenti dei punti d'appoggio portano spesso carichi doppi o tripli di quelli delle parti circostanti, occupando talvolta delle superficie minori, il che li rende suscettibili d'un abbassamento più considerabile”

Rondelet, spiega con un linguaggio scientifico-sperimentale, che il maggior problema derivante dalle lesioni dei muri, sia dovuto ai cedimenti, in particolare quelli differenziali, e fornisce una serie di soluzioni, studiate sperimentalmente, per il costipamento dei terreni. Questo modo scientifico d'operare, iniziato per la prima volta da *Galileo Galilei*²¹ e arricchito in questo trattato da Rondelet dall'uso del sistema metrico, mostra come l'approccio metodologico nei confronti delle fondazioni si sia adeguato all'evoluzione delle teorie

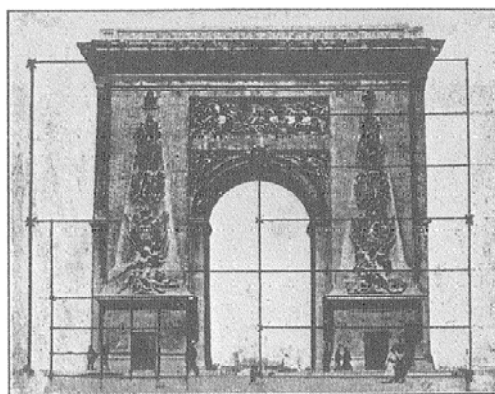
²¹ Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attenenti alla Meccanica e movimenti Locali

scientifiche e come abbia però mantenuto un aspetto di primaria importanza nell'edificazione degli edifici²².

²² Jean Rondelet, *Trattato teorico e pratico dell'arte di edificare*, Capo Primo, *Delle Fondazioni In Cattivo Terreno-Articolo I- Sperienze sulla forza dell'urto dei corpi relativamente al consolidamento dei terreni compressibili*

INTRODUZIONE

Le conoscenze costruttive al tempo della Ghirlandina e del Duomo di Modena. Cenni alle prassi alle teorie e agli sviluppi.



PORTA SAINI DENIS (Blon del)

I TRACCIATI REGOLATORI

FIG 1. Le Corbusier- Verso una architettura- I tracciati regolatori

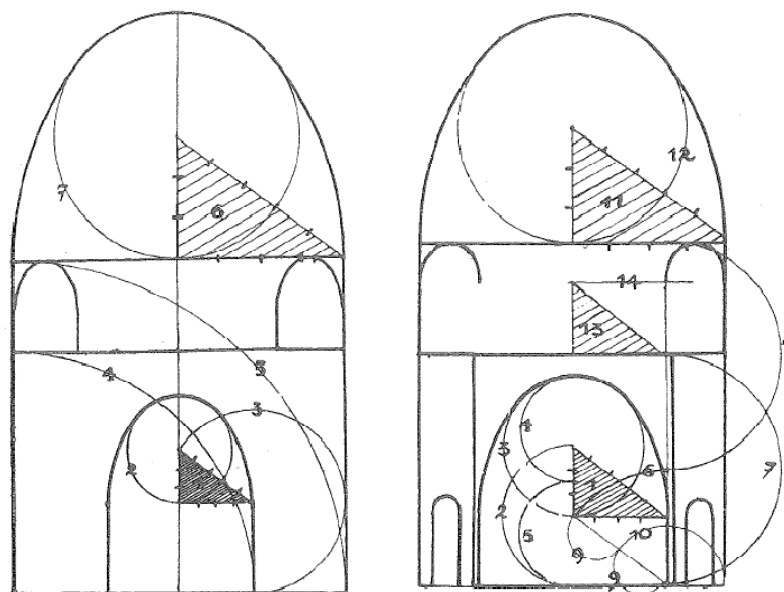


FIG.2- Le Corbusier- Verso una architettura- Tracciato delle cupole achemenidi

PARTE PRIMA

LE CRITICITÀ DELLE COSTRUZIONI IN MURATURA: ALCUNI CASI SIGNIFICATIVI E I PROBLEMI OGGETTO DI RICERCA

Il crollo della Torre di Pavia

Analisi delle criticità

Il crollo della Torre civica di Pavia (alle 8.30 17 Marzo 1989) (fig.19,...,23), pone all'attenzione dell'opinione pubblica nazionale sullo stato di conservazione del patrimonio monumentale.

Per studiare l'evento e determinarne le cause vengono subito istituite tre commissioni d'inchiesta indipendenti, una del Comune di Pavia, una del Ministero dei Lavori Pubblici, e l'altra promossa dalla Magistratura inquirente.

I risultati delle tre commissioni portarono a tre giustificazioni differenti sul crollo ma ad un'unica conclusione (che fece assolvere in tribunale gli amministratori comunali responsabili al momento del crollo) ovvero che la catastrofe non fosse prevedibile.

Nonostante l'evidente compattezza del corpo delle fondazioni osservata dall'analisi delle macerie, la prima commissione dichiarò che la causa del disastro era imputabile ad un possibile collasso del terreno determinato dalla presenza di un'antica rete fognaria di matrice romana.

La seconda commissione realizzò una complessa simulazione numerica del comportamento della torre e dichiarò che la causa del crollo era dovuta al progressivo deterioramento del materiale causato dall'azione dinamica del vento. L'ultima commissione che si occupò di studiare il materiale di cui era costituita la torre stabilì che il crollo era dovuto esclusivamente al peso proprio ed al progressivo deterioramento dei materiali causato dal loro invecchiamentoⁱ.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

Da questo evento l'approccio metodologico allo studio degli antichi edifici in muratura intraprese strade diverse ma tra loro convergenti sull'obiettivo della conservazione dei monumenti. Alcune procedure di lavoro fino ad allora utilizzate ma non diffuse come lo studio dinamico e geotecnico vennero sistematizzate mentre altri metodi di valutazione legati allo studio della resistenza dei materiali nel lungo periodo vennero intrapresi per la prima volta¹.

Il Dipartimento di Ingegneria Strutturale di Milano iniziò un lungo percorso di approfondimento per determinare le cause del disastro aprendo il dibattito ancora attuale sullo studio degli antichi edifici in muratura. La ricerca si è concentrata sulla comprensione degli effetti dei carichi permanenti sulle murature nel lungo periodo, e sulla possibilità di prevedere situazioni di pericolo per prevenire eventuali crolli. Lo studio, iniziato con la torre di Pavia, è successivamente proseguito con il reclutamento sul territorio italiano di strutture utili ad approfondire il problema². La ricerca, che si è corredata di esperienze di laboratorio ed *in situ* si è indirizzata anche verso aspetti di sicurezza, ovvero, la prevenzione dei collassi attraverso l'osservazione dello stato fessurativo. In questo studio sono stati inclusi alcuni importanti monumenti come il campanile del Duomo di Monza, il Torrazzo di Cremona, e il Duomo di Noto (crollato nel 1999)³.

Diverse sono le considerazioni emerse dallo studio.

Il fenomeno indagato del comportamento viscoso della muratura (*creep*) generato per effetto di sollecitazioni di compressione legate al peso proprio, ha mostrato come le azioni permanenti possano portare la struttura al collasso in tempi molto lunghi. I quadri fessurativi che manifestano questo fenomeno sono quelli tipici delle rotture per compressione

¹ Il caso di Pavia purtroppo non è isolato; infatti si possono rilevare altri crolli analoghi di famosi monumenti, sia antecedenti sia successivi al 1989, come quello di inizio secolo del campanile di piazza S. Marco a Venezia (1902), il campanile della chiesa di S. Magdalena a Goch in Germania, la Cattedrale di Noto nel 1999 o più recentemente il campanile dei Meldert e la torre di Maagdentoren a Zichem in Belgio (2006).

² Sono state analizzate circa sessanta torri

³ Il gruppo di Milano costituito da Luigia Binda, Antonella Saisi, A. Anzani, Mirabella e Roberti, rimane il primo ad occuparsi in modo sistematico di questo problema prima di loro solo pochi lavori sono stati condotti nel campo delle murature da altri ricercatori (Ienczner, Shrive, Anand) e solo ultimamente con loro si è aperta una collaborazione con ricercatori italiani e stranieri (Modena C., Laurenci P., Roca P.).

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

caratterizzati da una serie di lesioni verticali. Questi quadri fessurativi presenti nelle torri e nei pilastri di certe chiese non sono giustificati da sovraccarichi particolari se non dal peso stesso della struttura. Le murature di torri e chiese di grande mole sono spesso realizzate con la tecnologia a *sacco*, ovvero con due paramenti murari di facciata e un riempimento di conglomerato incoerente, e per questo soggette a grandi sollecitazioni di compressione. Questi sforzi, unitamente alle sollecitazioni ambientali naturali e antropiche che possono causare concentrazioni di tensioni, diventano subito la causa dello stato fessurativo e nel lungo periodo del possibile crollo delle strutture.

Le indagini sui quadri fessurativi dovuti a danni da compressione, condotte su un campione di sessanta torri, hanno mostrato come il danno da sollecitazione da peso proprio permanente sia messo in evidenza da un quadro fessurativo che in molti casi, specie per gli edifici a torre, risulta ripetitivo. Il quadro dello stato di danno presenta lesioni con andamento sub-verticale che interessano spesso gli spigoli dell'edificio e partendo da una certa altezza dalla base arrivano fino ai 2/3 dello sviluppo verticale.

Dal crollo del 1989, l'aspetto della prevenzione risultò di importanza primaria e con esso il tema della diagnostica strutturale. Ed in particolare l'approccio multidisciplinare⁴, in grado di individuare i dissesti, le cause, e i rimedi assume una forte connotazione in termini di metodo.

A corredo di questo metodo, si sono sviluppate le tecniche e le strumentazioni di analisi al fine di poter realizzare diagnosi sempre più accurate.

Sebbene il mondo del restauro fosse già a conoscenza dei metodi di monitoraggio permanenti applicabili sia alle strutture che al terreno, negli ultimi venti anni anche grazie ad una accelerazione dello sviluppo tecnologico, è stato possibile mettere a disposizione del restauro strumenti di precisione in grado di realizzare letture coordinate e simultanee sullo stesso edificio, fornendo così importanti informazioni sulle deformazioni della struttura nel suo complesso.

Le tipologie di strumenti sono molte, ognuna specifica per analizzare un dato problema, sia applicabili in modo permanente sulle strutture, sia trasportabili, da impiegare in situazioni

⁴ Già inserito nella carta di Atene realizzata nel 1931

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

diverse. I primi sistemi di monitoraggio a misurazione continua vennero sviluppati per le dighe negli anni '60, successivamente si trova una delle prime applicazioni ai monumenti fu Santa Maria del Fiore a Firenze nel 1983, dove gli strumenti impiegati erano deformometri e livellometri. In precedenza era già stato installato un sistema di monitoraggio utile per valutare l'apertura e la chiusura stagionale delle lesioni della cupola del Brunelleschi attraverso letture *in situ*. Attualmente, la telemetria consente di ottenere una registrazione dei dati e la trasmissione degli stessi per mezzo di impianti gsm. Tra gli strumenti più diffusi, si possono ricordare gli estensimetri, i deformometri, assestimetri, inclinometri, pendoli, termometri, misuratori di vento. Interfacciando i dati ricavati è possibile eseguire letture sul comportamento dei monumenti e, accumulando dati nel lungo periodo, si riescono anche a fare delle proiezioni per il futuro⁵.

In ambito geotecnico, dal 1989 si comincia ad indagare in modo sistematico, dove ritenuto necessario, il rapporto suolo-struttura. L'influenza degli spostamenti del terreno sulle strutture è resa evidente in diverse occasioni, come a Pisa e a Città del Messico, ma molti altri casi sono stati indagati come la torre dei Frari a Venezia, la Cattedrale di Noto prima della sua ricostruzione, oppure quella di Dresda o ancora la chiesa di Outerio in Portogallo o la Golden Tower a Siviglia, o ancora la Torre Garisenda e degli Asinelli e la Torre civica di Ravenna. Questi studi, che per ragioni diverse hanno dovuto affrontare la questione rapporto suolo-struttura, si sono avvalsi sia di prove *in situ* sia di test in laboratorio comprendendo l'analisi stratigrafica del terreno, lo studio della morfologia delle fondazioni, l'approfondimento archeologico per l'individuazione delle preesistenze, nonché le prove di laboratorio che consentono di determinare le caratteristiche meccaniche delle terre, e la natura mineralogica. Grazie al confronto di queste informazioni è possibile, con opportuni algoritmi che descrivono le reali caratteristiche meccaniche del terreno, simularne il comportamento. Le informazioni sul terreno possono però anche essere dedotte dall'osservazione delle strutture in elevazione. Infatti, differenti quote d'imposta di archi o di basi dei pilastri, possono indicare differenti resistenze del terreno o problemi di subsidenza, e i fuori-piombo possono dare indicazioni su

⁵ Queste strumentazioni, attualmente molto diffuse, sono state largamente utilizzate a Pisa in occasione degli studi sulla torre agli inizi degli anni '90.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

fenomeni di consolidamento o collasso dei terreni prima ancora di compiere indagini dirette. Inoltre, è possibile, sempre attraverso i parametri accennati sopra, determinare l'efficacia degli interventi di consolidamento eseguiti.

1.1 Lo studio della resistenza dei materiali a lungo termine

Lo studio relativo alle cause del collasso della torre di Pavia è iniziato con una ricerca documentaria, finalizzata a ricostruire le vicende storiche della torre e a comprenderne la geometria, ed è poi proseguito con prove in situ e in laboratorio sui materiali e calcoli strutturali.

La torre di Pavia di base quadrata (12.3x12.3), alta sessanta metri, fu costruita come torre campanaria della cattedrale di S. Stefano. Esternamente i prospetti erano scanditi da cinque ordini arricchiti, per i primi quattro livelli, con lesene e nella parte sommitale con archetti pensili. Internamente, una scala ricavata nello spessore del muro collegava il piano terra con la cella campanaria; mentre ad interromperne la continuità, vi erano due solai lignei posti a 11 e 23 m di altezza e due cupole poste fra il quarto e il quinto ordine e alla base della cella campanaria (in granito), che a sua volta terminava con un'ulteriore cupola e una copertura a quattro falde.

La ricostruzione delle fasi di realizzazione del monumento ha datato l'inizio dei lavori tra 1060 e il 1100 d.C. poi protratti per circa quattro secoli. Le prime fasi di sopraelevazione riferibili al II e III ordine sembra siano state realizzate tra XII e XIII secolo, e a conferma della permanenza del cantiere vale la testimonianza scritta dell'allora parroco Opicino de Canistris che nel 1330 descrisse le opere di consolidamento a seguito di un incendio che compromise la parte sommitale della torre. Il ripristino della cella campanaria avvenne ad opera di Pellegrino Tibaldi⁶ che tra il 1583-1598 progettò e realizzò la sopraelevazione della torre.

Le dimensioni geometriche dell'edificio non sono state ricavate dai pochi documenti d'archivio disponibili ma da raddrizzamenti fotografici rilievi topografici delle parti

⁶ Architetto e Pittore (1527-1596)

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

rimanenti. La morfologia della muratura è stata ricavata dall'osservazione in situ delle macerie, ovvero della tessitura muraria, dalla dimensione dei mattoni e dal colore della lavorazione del paramento esterno⁷. La tessitura muraria e la malta di allettamento cambiavano salendo tra primo, secondo e terzo ordine, a testimonianza di periodi di realizzazione successivi.

Prima dell'analisi strutturale sono state eseguite prove in situ e in laboratorio per determinarne le caratteristiche del terreno, prove chimico fisiche sui materiali per determinare eventuali degradi dovuti ad agenti inquinanti e prove meccaniche sui materiali. Le prove sul terreno hanno permesso di escludere una sua partecipazione nelle cause del collasso sia per la capacità portante rilevata, sia per i pochi cedimenti indotti da fenomeni di subsidenza. Le analisi chimico-fisiche hanno mostrato che le malte, costituite da legante aereo, calce aerea spenta e da aggregati silicei con buona distribuzione granulometrica, erano di buona fattura e ben carbonatate, anche se la porosità del legante aveva indotto la formazione di uno strato più rigido in superficie, per questo più vulnerabile e sollecitazioni di gelo e disgelo. La quantità degli agenti inquinanti (solfati) è risultata accettabile, escludendo la possibilità di un deterioramento grave del materiale, caratterizzato da distacchi superficiali dei mattoni e delle pietre, decoesione degli intonaci e dei giunti di malta. Quindi si è potuto escludere che la perdita di resistenza della muratura fosse dovuta a ragioni chimico fisiche.

1.2 Le prove di creep e lo studio del size effect

Escludendo il terreno e il degrado chimico, le indagini sono proseguite nella direzione dell'analisi delle proprietà meccaniche dei materiali. Il calcolo del valore delle tensioni di compressione alla base, in esercizio, è risultato pari a 1.1 MPa mentre nel vano scala si sono raggiunti valori di 2 MPa, non trascurabili nelle murature. Le prove meccaniche monotono⁸ di compressione per la determinazione delle resistenze sono state realizzate su sette prismi di

⁷ L'apparecchiatura muraria era costituita da due paramenti di 20 cm di spessore in mattoni pieni e un riempimento di 240 cm costituito da un'alternanza eterogenea di strati di mattone e calce. In corrispondenza della scala la muratura era tripartita, ovvero paramento esterno da 20 cm primo riempimento da 100 cm e paramento da 20 cm, dopodiché la scala larga 80 cm e un secondo muro interno a sacco di spessore 60 cm.

⁸ Questo genere di prove vengono condotte attraverso l'uso di una pressa strumentata che consente di aumentare il carico e di portare a rottura il provino in un breve lasso di tempo.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

dimensione 40x70x60: i valori ricavati hanno mostrato resistenze variabili da 2,0 a 4,1 MPa con valori medi di 2,7 MPa e moduli elastici calcolati tra il 20 e il 40 % del carico di rottura variabili tra 719 e 1802 MPa. Cinque prismi sono poi stati portati a rottura con cicli di carico e scarico, riportando una resistenza variabile e tra 1.8 e 3.3 MPa, con valori medi di 2.3 MPa. Per valutare l'effetto del vento, sono poi state realizzate prove a fatica, a partire da valori di sforzo prefissato pari al peso proprio, incrementato in step successivi di 0.2 MPa per un numero di cicli oltre i 3000, ma il danno prodotto dai cicli di carico e scarico portava solo ad un aumento di deformazione quando i valori degli sforzi di partenza erano elevati. Questi risultati ancora una volta non conducevano a conclusioni certe.

L'ultima ipotesi presa in considerazione era quella che la muratura sottoposta a carichi costanti a lungo termine si deformasse fino a danneggiarsi e a collassare, con valori di sforzo inferiori a quelli di resistenza misurati. Alcuni prismi sono stati così sottoposti ad una serie di prove meccaniche a compressione, realizzate per incrementi successivi che si ripetevano con una scansione temporale costante di 15 minuti e con un valore di 0.14 MPa. La velocità di deformazione, per i primi incrementi, tendeva a diminuire o a mantenersi stazionaria mentre aumentava in modo sensibile durante gli ultimi passi vicini ai valori di rottura. Le fessure verticali cominciavano a comparire quando la struttura era a circa il 60-70% del carico di rottura, non aumentavano di ampiezza fino all'ultimo passo vicino al collasso: le fessure non comparivano nelle zone di contatto tra paramento esterno ed interno, a dimostrazione della distribuzione degli sforzi⁹. Successivamente alle indagini di laboratorio è stato studiato il comportamento viscoso delle murature indagando le diverse fasi di deformazione su un gruppo di otto prismi di dimensioni 30x30x51cm, individuando i valori tensionali di soglia che dividono una fase di deformazione dall'altra. In particolare si sono distinte tre fasi:

- Fase di viscosità primaria: corrisponde al ramo visco-elastico con una velocità decrescente e una deformazione reversibile (stabile e sicuro) con valore di soglia delle tensioni pari al 41% (ovvero il passaggio avviene quando il materiale ha raggiunto una tensione pari al 41% della tensione resistente finale).

⁹ Luigia Binda, Gianfelice Gatti, Guido Mangano, Carlo Poggi, Giannantonio Sacchi Landriani, *Studio su imateriali e sulla struttura della torre civica di Pavia*, in TeMa, *Tecniche e Materiali*, vol1 1993

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

- Fase di viscosità secondaria: la branca visco-plastica con velocità di deformazione costante (da informazioni sulla vita residua) il cui valore soglia è 70%
- Fase di viscosità terziaria: ramo instabile con velocità crescente, che termina con il cedimento del campione di muratura (pericoloso)

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

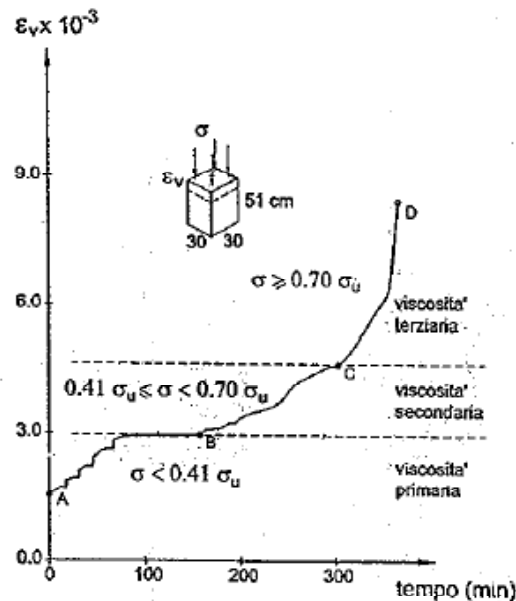


Fig. 11 - Legame tra la deformazione verticale ϵ_v ed il tempo: viscosità primaria (A-B), secondaria (B-C), terziaria (C-D).

FIG 1-Grafico delle prove di creep. Legame tra la deformazione verticale ϵ_v ed il tempo: viscosità primaria (A-B), secondaria (B-C), terziaria (C-D)

L'approfondimento della fase primaria, dove si sono determinate le quantità di accrescimento dell'entità della deformazione verticale, ha permesso la deduzione di un modulo elastico ridotto $E_r(t_0, t_\infty)$ utile per l'analisi degli effetti della viscosità al tempo t attraverso semplici calcoli elastici. Altra importante osservazione derivata da questo lavoro è stata che la torre di Pavia era soggetta ad uno stato tensionale che risulta rimanere nella fase di creep primaria (1.1MPa). Pertanto per ricercare le ragioni del crollo, i ricercatori si sono concentrati su due questioni principalmente, la resistenza ultima a compressione di monotono istantaneo e la fase primaria di viscosità in grado di ridurre il modulo elastico longitudinale inizialmente valutato

1500 MPa e poi ridotto a 750 MPa che consente di eseguire l'analisi elastica con la messa in conto della viscosità¹⁰.

Le prove di creep hanno trovato un significativo completamento con gli studi sul size effect.

Tali studi sono stati attivati proprio per una più approfondita analisi del crollo di Pavia ed hanno offerto un significativo contributo alla ricerca sulla comprensione della resistenza delle murature¹¹.

Attraverso gli esperimenti di laboratorio effettuati le teorie di meccanica della frattura sviluppate è iniziata una sperimentazione che tiene conto dell'energia di frattura, delle dimensioni del provino e della tensione di rottura.

Dai risultati emerge che facendo aumentare l'altezza dei provini e la larghezza, a parità di energia di frattura, le tensioni ultime erano superiori al 1.1 MPa di esercizio della torre, e che aumentando l'energia di frattura le tensioni ultime crescevano.

Mantenendo invece l'h costante e variando la larghezza e il tempo t_0 , le tensioni di rottura diminuiscono drasticamente all'aumentare delle dimensioni, dimostrando l'effetto prodotto dalla viscosità della torre nel tempo. Le situazioni intermedie alle curve di carico tra t_0 e t_∞ sono risultate critiche. Questi risultati sono evidenziati nel grafico seguente (fig. 2).

¹⁰ Anna Anzani, Luigia Binda, G. Melchiorri, *Time dependent damage of rubble masonry walls*, in 4th International Masonry Conference, 1995, London

¹¹ La ricerca del Size effect è stata attivata da un gruppo di ricercatori dell'Università di Parma, Torino e Bologna.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

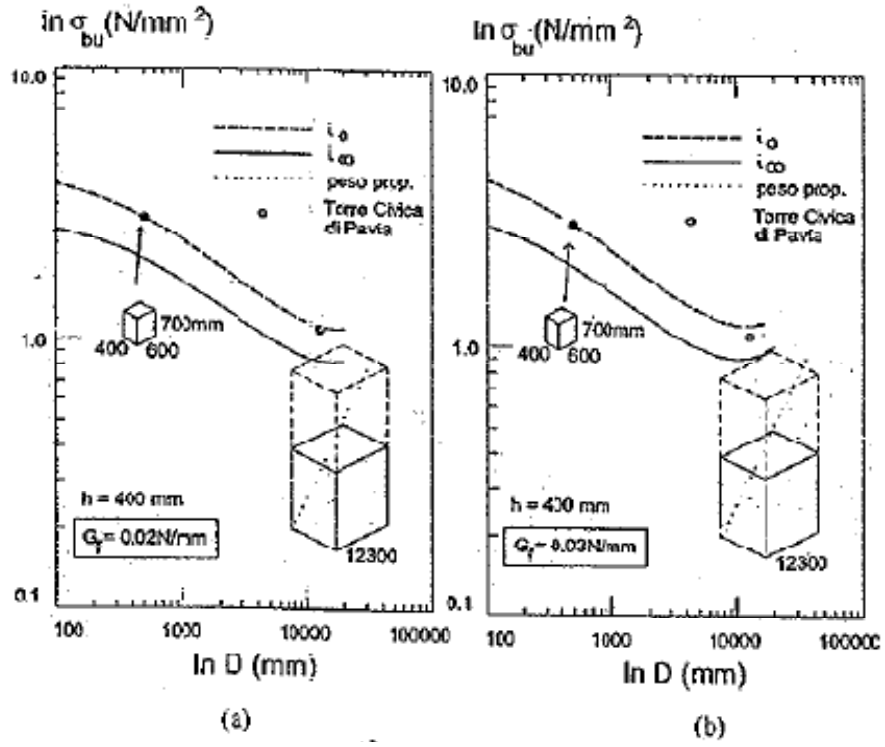


FIG. 2 Legame σ_{bu} - D (tensione Ultima- dimensione della base), ai tempi t_0 , t_∞ , per un elemento strutturale compresso: (a) $G_f = 0.02$ N/mm; (b) $G_f = 0.03$ N/mm

1.3 Il fenomeno di traslazione delle tensioni

Contribuiscono alla comprensione del comportamento delle murature multistrato nel lungo periodo gli studi sul fenomeno di trasferimento del carico dal nucleo ai bordi¹².

Questi studi sono fortemente correlati alle osservazioni di Jean Rondelet nel '700 durante la realizzazione del Pantheon di Parigi¹³.

Rondelet rileva tutte le lesioni dei pilastri e realizza dei fori esplorativi nella muratura per capire le cause di queste rotture. Le osservazioni mettono in evidenza una differente finitura delle pietre che, lungo lo spessore, per i primi centimetri sono regolari e poi grossolanamente sbazzate. Questa differenza crea dei letti di malte di spessore differente tra interno ed esterno e quindi differente deformabilità.

Infatti all'esterno la struttura, con giunti di malta quasi inesistenti, la muratura risulta molto più rigida e meno deformabile che all'interno e ciò comporta una concentrazione di tensione sui bordi determinando le lesioni come si osserva nella figura 3.

¹² Due paramenti di pietra sbazzata o regolarmente squadrate (o di mattoni disposti in modo regolare) possono contenere un riempimento di conglomerato di pietre irregolari o mattoni spezzati legati da una malta; tale è frequentemente la struttura di massicci muri, torri, piloni di costruzioni antiche, medioevali e rinascimentali. Si può quindi parlare in questi casi di muratura a tre strati. In altri casi ci si trova in presenza di muratura costituita sostanzialmente da soli due paramenti aderenti (senza riempimento), debolmente interconnessi. Questa situazione è piuttosto frequente negli edifici con muratura in pietra, su buona parte del territorio italiano. La regola dell'arte vorrebbe che la costruzione di tali muri avvenisse con frequenti elementi di collegamento trasversale fra i due paramenti, costituiti da blocchi in pietra di sufficiente lunghezza da coprire la quasi totalità dello spessore del muro. L'assenza di tali elementi di collegamento trasforma la parete in un muro a doppio strato o "a doppia cortina" (Giuffrè, 1993), in cui l'unico debole collegamento fra i due paramenti risulta essere dato dall'eventuale ingranamento dei blocchi dei due paramenti. Sia nel caso di muri a tre che a due strati il comportamento meccanico è complesso e di difficile modellazione. Considerando la muratura a tre strati, in molti casi i paramenti sono di pietra eccellente, rigida, ben lavorata, cosicché portano gran parte del carico, mentre il riempimento è debole e molto deformabile.

¹³ Jean Rondelet, *Traité théorique et pratique de l'Art de Bâtir*, chez l'Auteur, enclos du Panthéon, Paris, 1802-1817, trad. it. *Trattato teorico e pratico sull'arte di costruire*, a cura di Basilio Soresina, Tip. Caranenti, Mantova, 1831-1835

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

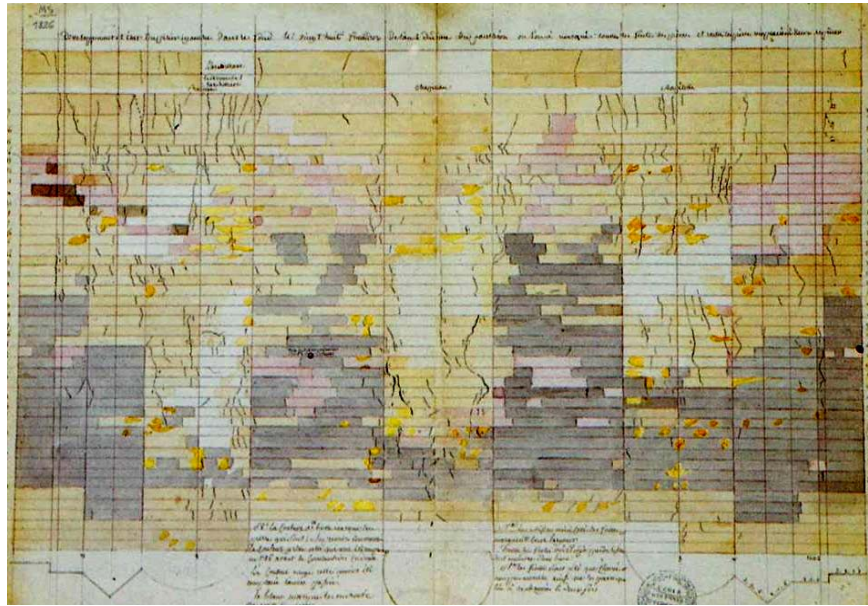


FIG. 2 Rilievo delle lesioni dei pilastri del Pantheon di Parigi

Questo fenomeno di trasferimento delle tensioni dalle zone più deformabili a quelle più rigide, osservato da Rondelet, è lo stesso che causa le lesioni verticali dei paramenti esterni delle murature multistrato.

Nella tavola seguente sono evidenti i risultati dei sondaggi eseguiti da Rondelet sui pilastri del Pantheon.

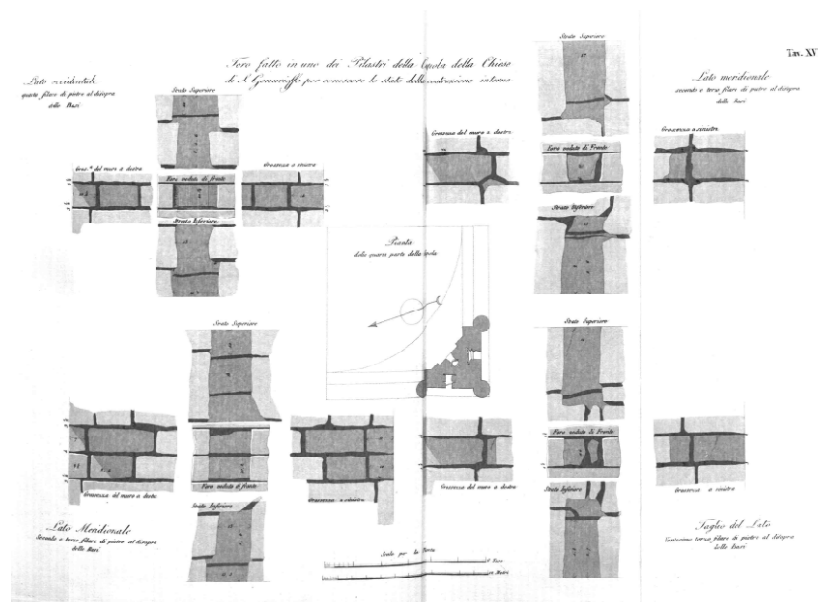


FIG 2

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

I pilastri del Pantheon alla fine del dibattito che coinvolse la struttura vennero aumentati di dimensione pensando che la causa dello stato fessurativo fosse la sezione ridotta. Grazie agli ultimi studi¹⁴ sulla stabilità del monumento francese si è riusciti a valutare l'effetto dell'aumento delle dimensioni sulla stabilità complessiva e a confermare in forma sperimentale quelle che erano state le intuizioni di Rondelet.

Questo ultimo aggiornamento è evidente nella tavola che segue

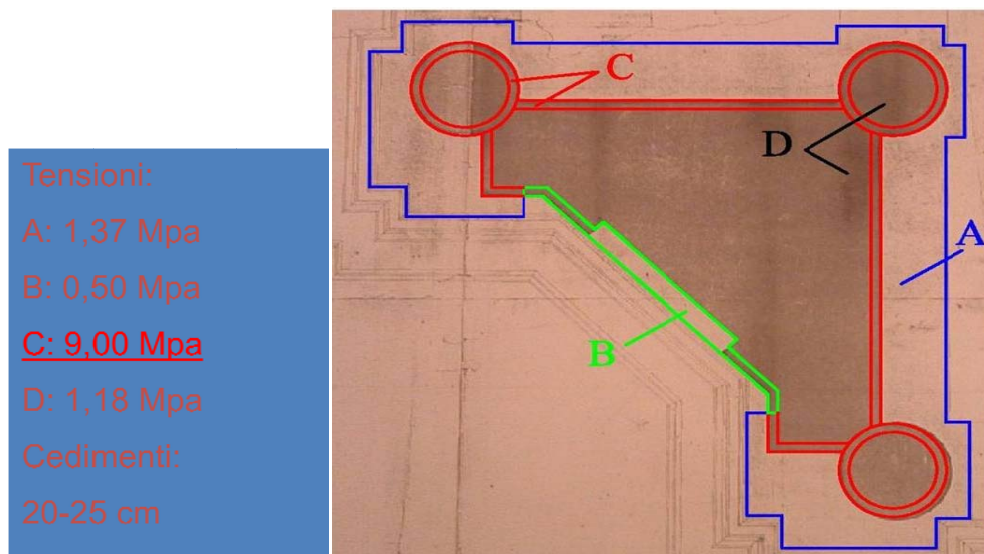


FIG 3 I risultati delle prove ai martinetti piatti che mostrano come le zone più rigide continuino ad assorbire la maggior parte del carico

¹⁴ Lavoro eseguito dall'equipe del prof. Blasi del Dipartimento di Ingegneria Civile del Territorio dell'Ambiente e Architettura di Parma

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

L'interpretazione fisica che aiuti la comprensione del comportamento di queste murature multistrato è ad oggi ancora al vaglio dei ricercatori, alcuni studi si sono orientati sulla comprensione degli effetti dell'umidità all'interno dei muri che allunga i tempi di carbonatazione delle malte del nucleo creando zone più rigide all'interno e più deformabili all'interno¹⁵.

Altri si sono occupati di capire come avviene la trasmissione della tensione attraverso prove sperimentali di creep e simulazioni numeriche con campioni di muri multistrato caratterizzati da superfici di contatto realizzate con tecniche diverse¹⁶.

¹⁵ Daniele Ferretti, Zdenek P. Bazant, *Stability of ancient masonry towers: Moisture diffusion, carbonation and size effect*, Science Direct, 2006

Il problema della diffusione dell'umidità nelle antiche murature realizzate con tecnologie a sacco, influenza la carbonatazione, restringimento, creep e microfratture. Questi fenomeni modificano il comportamento meccanico della muratura nel tempo producendo una ridistribuzione delle tensioni dal nucleo di cemento ai paramenti esterni probabile causa del danno delle antiche torri. Con queste motivazioni è stata modellata l'interazione tra la diffusione dell'umidità, del diossido di carbonio e carbonatazione. A causa dell'assenza di dati sulla malta è stato usato uno dei modelli semplici proposto per il cemento portland. I risultati numerici hanno confermato i tempi del fenomeno diffusione-reazione sono compatibili con il tempo in cui alcune delle torri hanno avuto dei problemi. La scala dei tempi dipende dalle dimensioni delle mura, quindi mura di differente spessore mostrano risposte diverse. Sebbene basati su parametri tipici per il cemento di portland i risultati ottenuti sembrano realistici. Il problema è chiarito introducendo un'approccio matematico in un argomento in cui il disaccordo era largamente legato alla natura qualitativa degli studi precedenti. Una volta ottenuto un data base sperimentale il modello può essere migliorato e ricalibrato.

¹⁶ Luigia Binda, J. Pina-Henriques, Anna Anzani, A. Fontana, Paolo B. Lourenco, *A contribution for the understanding of load transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and modelling*, Science Direct, 2006

Alcuni esempi correlati

2 Il caso della Cattedrale di Noto: lo studio del quadro fessurativo

Dopo i drammatici eventi di Pavia anche in Sicilia, nella provincia di Siracusa avviene il crollo parziale di un edificio monumentale, la Cattedrale di Noto (fig. 4).

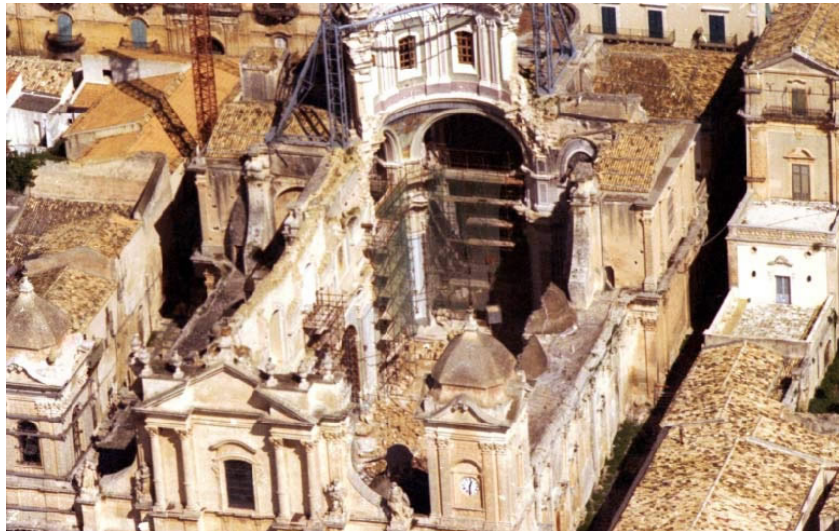


FIG.-4Ripresa aerea del crollo parziale della Cattedrale di Noto

Le indagini per determinare le cause del disastro si allargano anche allo studio di chiese contemporanee alla cattedrale e realizzate con medesime tecnologie, la chiesa del SS.Crocifisso¹⁷ e SS. Annunziata ad Ispica¹⁸.

La cattedrale di Noto sorta i primi anni del '700, subisce nel 1990 le conseguenze di un terremoto che impone la chiusura temporanea e la messa in sicurezza con sistemi provvisori.

L'inaspettato crollo a sei anni dal sisma pone una serie di quesiti agli studiosi degli edifici in muratura. Le indagini che coinvolgono la chiesa iniziano con lo studio del terreno e del rapporto suolo struttura proseguendo con l'analisi dello stato di conservazione delle murature.

¹⁷ La chiesa si trova a Noto e viene completata nel 1715, le forme armoniose dell'interno nascondono pilastri piuttosto snelli realizzate con materiali e tecnologie identiche a quelle della Cattedrale.

¹⁸ La chiesa viene realizzata apartre dal 1703 ha una pianta a croce latina sormontata da una cupola sorretta da quattro grandi pilastri, nei secoli la chiesa è stata più volte rimaneggiata a causa dei danni subiti da terremoti, in particolare negli anni 70 viene rifatta la copertura con tecnologia a umido in laterocemento.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

Per indagare la morfologia muraria viene realizzata una specifica analisi sulle macerie individuando la composizione delle murature dei pilastri e dei muri perimetrali. Le macerie rilevano delle apparecchiature murarie a sacco con variazione del paramento lapideo e del riempimento in senso verticale. Nella zona vicina alle basi il paramento esterno era costituito da pietre più resistenti (calcarenite), mentre sulla sommità pietre più porose e meno resistenti a compressione (travertino)¹⁹.

Il riempimento è realizzato in ciottoli di fiume misto malta nelle zone basse e si arricchisce salendo di elementi non omogenei di calcarenite e travertino alternati a strati di malta scadente. In sezione il riempimento, si presenta in percentuali diverse nelle murature e nei pilastri, rispettivamente al 55% e al 58%.

Per comprendere meglio lo stato di conservazione antecedente al crollo sono analizzate le parti non collassate. In particolare eliminando l'intonaco realizzato negli anni '60 è possibile individuare uno stato fessurativo diffuso, determinato da rotture per compressione, con lesioni stuccate e riaperte con materiali identici a quelli dell'intonaco.

Per questo è possibile asserire che lo stato di danno delle murature era già presente prima del terremoto, e che il sisma ha solo aggravato una situazione critica.

Questo importante rinvenimento induce i ricercatori ad approfondire lo stato di conservazione delle chiese di SS.Crocifisso e SS. Annunziata. In entrambi i casi in modo diverso, una volta scrostati gli intonaci si sono rilevati importanti quadri fessurativi che a lungo termine avrebbero portato a situazioni di parziali collassi come a Noto.

Alla luce della scoperta, al momento del progetto di restauro, si decide di ripristinare anche i pilastri non crollati. A questo crollo sono succedute una serie di indagini che hanno coinvolto altre chiese siciliane, anch'esse sollecitate dal sisma, allo scopo di prevenire eventuali collassi strutturali²⁰.

¹⁹ Calcarenite resistenza a compressione di 17 MPa, travertino resistenza a compressione di 4-6 MPa

²⁰ Analoghi casi di collasso improvviso si sono verificati anche all'estero in particolare in Belgio la chiesa di Kerksken nel 1990 la torre Maagdentoren a Zichem del 13 Secolo crollata improvvisamente nel giugno del 2006 e la torre campanaria della chiesa di S. Willibrordus a Meldert collassata improvvisamente nel luglio del 2006. Questi casi di collasso, recentemente indagati dal punto di vista del comportamento delle murature a lungo termine, sono stati il frutto di una assenza di controlli periodici che avrebbero permesso la realizzazione di interventi tempestivi evitando danni. (Els Verstringe, Sven Ignoul, Luc Schuremans, Dyonis Van Gemert, *Damage accumulation in masonry under persistent loading evaluated by acoustic emission technique*, Gemert, Dionys Van; Schueremans, Luc; Verstrynghe, Els; Figeys Wine Pre-and post collapse emergency interventions an historic load bearing structures - case studies in Belgium, Seiten:493-512 2008 WTA-Almanach 2008. Bauinstandsetzen und Bauphysik)

3 Il caso della cattedrale metropolitana di Città del Messico: i rapporti tra preesistenze e fondazioni

La Cattedrale Metropolitana di Città del Messico è un esempio che dimostra, in modo combinato, alcune concause di origine naturale ed antropica possano, nel corso dei secoli determinare lo stato deformativo delle strutture.

La natura del terreno, le preesistenze archeologiche e l'attività antropica di captazione dalle falde acquifere hanno influenzato il terreno di fondazione e la stabilità stessa della fabbrica. La storia della cattedrale è legata al periodo della colonizzazione spagnola che nel '500 interessò l'antico territorio degli Aztechi.

Città del Messico nasce sui resti dell'antica capitale Azteca Tenochtilan²¹ fondata nel 1325 in un'isola in mezzo al lago Texcoco²², e interamente demolita nel 1521 ad opera degli Spagnoli. L'antica capitale che ospitava abitazioni, templi e piramidi, era collegata alla terraferma per mezzo di ponti e terrapieni²³ (fig 5).

²¹ Capitale del mondo Azteco che sorse nel 1325 e venne demolita nel 1527

²² Il lago di Texcoco faceva parte di un sistema di laghi, attualmente in via di estinzione, localizzati al sudest della valle del Messico, nel centro della Repubblica messicana. La storia che ha portato all'estinzione di buona parte della superficie dei corpi d'acqua che costituivano il sistema cominciò in epoca precolombiana. In quell'epoca, gli indigeni costruirono isole artificiali nei punti bassi della laguna, con il proposito di guadagnare terra da coltivare, o, nel caso di Tenochtilan, per costruire paesi.

²³ La storia della costruzione della cattedrale messicana, seppur con una differenza temporale di circa 400 anni risulta per molti aspetti simile a quella Modenese

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca



FIG. 5 Ricostruzione di Città del Messico al tempo degli Aztechi

Le caratteristiche dei terreni a forte compressibilità sono testimoniate dai rinvenimenti archeologici in cui si sono potute leggere le fasi di assestamento delle grandi piramidi.

Gli spagnoli demoliscono interamente la capitale e rifondano una città su questa, utilizzando tecniche per stabilizzare le fondazioni di origine locale, come i pali infissi a teste di pietra piane e tecniche importate dall'Europa.

Interessante è vedere come quasi tutti gli edifici eretti nel XVI secolo subiscano dei processi di cedimento fino ad essere inghiottiti nella terra.

Per mitigare i problemi di cedimenti differenziali legati al peso proprio e per mitigare gli effetti dei terremoti, l'allora governatore della città, obbliga la realizzazione di edifici a soli due piani. La cancellazione del sistema di canalizzazione per l'allontanamento delle acque del lago Texcoco determinò un periodico allagamento della città. Inoltre come si evince da testimonianze di viaggiatori del 1596, si potevano vedere fenomeni di affondamento o di perdita di verticalità degli edifici legati alla grande compressibilità del terreno.

Le scarse conoscenze delle tecniche di realizzazione delle fondazioni basate molte volte su criteri incerti, si manifestava con cedimenti visibili soprattutto per le abitazioni dei cittadini normali mentre per gli edifici pubblici, chiese e abitazioni di nobili, venivano ricercati migliori tecnici e impiegati materiali di qualità superiore.

Le grandi strutture erano soggette a ricorrenti interventi di manutenzione per correggere i cedimenti differenziali causati dal proprio peso. In molti casi le fondazioni delle chiese e dei conventi, deformate dai cedimenti differenziali, venivano consolidate attraverso un sistema di palificazioni.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

I problemi delle costruzioni causati dai cedimenti differenziali non si sono mai arrestati; in particolare sono stati aggravati anche dallo sfruttamento delle falde acquifere superficiali nella seconda metà del '900. La captazione idrica, non uniforme, determinò un evidente fenomeno di subsidenza causa dei fenomeni di cedimento e danni irreversibili nelle strutture in elevazione²⁴.

A Città del Messico, risulta importante il complesso stratigrafico delle costruzioni che nell'arco dei secoli si sono succedute (fig. 5).



FIG.6 Schema ricostruttivo delle preesistenze archeologiche, in tratteggiato il luogo dove sorge la Cattedrale. Lancellotta (2001)

²⁴I fenomeni studiati nella Cattedrale metropolitana di città del Messico, si sono potuti avvertire anche in edifici limitrofi come l'edificio del *National Monte de Pietad*, e la cappella dell'anima (*capilla de las animaz*), realizzata nella porzione nord est della Cattedrale e comunicante con essa.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

Una prima Cattedrale, viene realizzata e poi demolita in un breve arco di tempo tra il 1524/28 e demolita nel 1625²⁵. Il sedime di questa prima fabbrica, molto più piccolo, rispetto alla planimetria dell'attuale, risulta essere nella zona del prospetto principale. La chiesa si compone di tre navate fiancheggiate da due corpi da cappelle, la cupola è sostenuta da quattro colonne e le navate laterali e quella centrali sono coperte da un sistema voltato. Inoltre sulla facciata spiccano due imponenti campanili di circa 65 m di altezza.

Il processo costruttivo della nuova Cattedrale avviene per stralci iniziando dalla costruzione dall'abside nel 1573 per poi procedere con le navate concluse nel 1667 e per concludersi con la facciata (1672) e le torri (1792). Il sacrario viene aggiunto tra il 1749 e il 1792.

Il fenomeno dei cedimenti differenziali causati dalle differenti sovra consolidazioni determinato dal sub strato archeologico, è iniziato già all'epoca della realizzazione; infatti si possono notare le correzioni geometriche legate alle differenti altezze assegnate a colonne e muri portanti per compensare i dislivelli creatisi tra il 1573 e 1667. Inoltre per correggere le inclinazioni vennero impiegati materiali lapidei di giunti di malta di differente spessore (fig. 7).

²⁵ La prima cattedrale voluta da Hernan Cortez aveva l'ingresso a oriente mentre l'attuale è rivolta a meridione probabilmente a causa delle preesistenze azteche.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

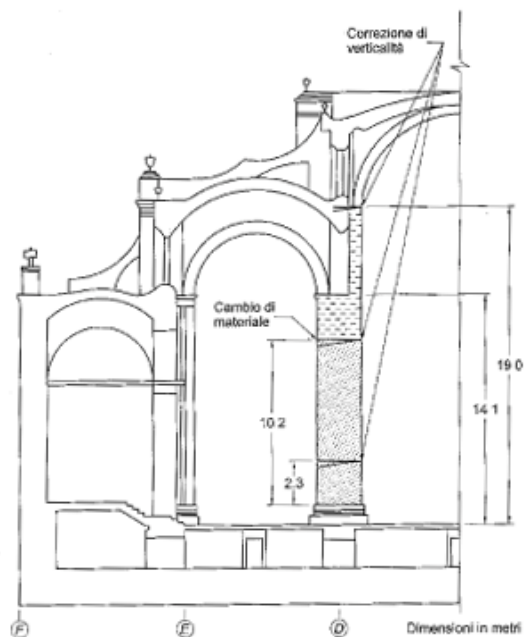


FIG. 7 Sezione trasversale della Cattedrale Metropolitana di Città del Messico, sono evidenziate le modifiche in corso d'opera per ovviare ai cedimenti fondali

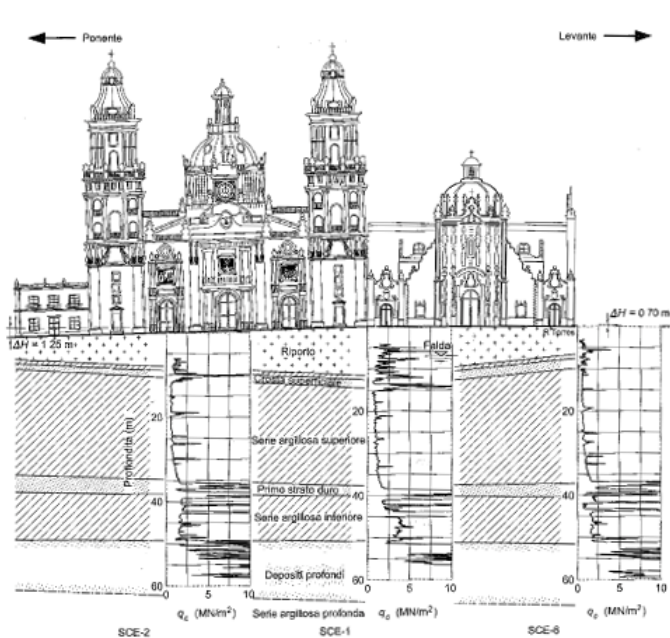


FIG. 8 Sezione trasversale del terreno su cui sorge la Cattedrale Metropolitana di Città del Messico, sono evidenziate le stratigrafie e l'inclinazione delle torri

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

L'ordine di grandezza dei cedimenti, agli inizi del Novecento, tra l'abside e la torre di ponente, risulta di 1.60 m, mentre alla fine degli anni ottanta raggiunge i 2.42m. Nel 1989 preoccupanti risultano i cedimenti tra le torri (1.25m) e i fuori-piombo dei pilastri del transetto (fig. 8).

L'incremento così importante dei cedimenti è stato indotto dal fenomeno di subsidenza manifestatosi a Città del Messico a partire dagli anni quaranta quando cominciano a manifestarsi i primi danni alle strutture della metropoli prodotti dai cedimenti differenziali. Nel 1949 la velocità di "subsidenza" ha un valore di 350 mm/anno, mentre negli anni 70 raggiunge valori assoluti di abbassamento pari a 2650 mm. Gli effetti di questo fenomeno a Città del Messico, hanno avuto sulla Cattedrale un rapido incremento della velocità di cedimento differenziale che se nel 1927 era di 0.80 mm /mese, nel 1967 diventa di 2.60 mm/mese.

La progressiva chiusura dei pozzi superficiali, maggior causa del fenomeno di subsidenza, riportò i valori di subsidenza a 0.80 mm al mese.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

Le fondazioni della cattedrale erano state realizzate secondo la tecnica costruttiva azteca della palificazione. Per costipare il terreno ricco d'acqua e altamente compressibile vengono piantati, ad interasse di 60 cm, 25000 pali di lunghezza e diametro variabile (l 220-230 cm, dn 20-25 cm). La tecnica inoltre prevedeva la protezione delle teste dei pali per mezzo di carbone naturale e una malta costituita da sabbia e calce. Al di sopra dei pali venne realizzata una platea di sabbia, frammenti di roccia basaltica legati con calce di spessore variabile tra i 90 e i 200 cm al di sopra della quale venne disposto un reticolo di travi. Questa fondazione doveva trasferire al terreno l'imponente massa muraria costituita da muri e pilastri della cattedrale.

A partire dagli anni '70 vengono poi realizzati una serie di studi allo scopo di risolvere i problemi di instabilità generati nel corso dei secoli dai fenomeni di cedimento. Nel 1972 viene realizzata una stima sul peso complessivo del monumento (75.160 t+ 36.130 t di fondazione) e vie il carico sui pilastri (il più sollecitato aveva un carico pari a 2.700 t) subito dopo questo studio si decise di trasferire il carico allo staro duro di terreno presente tra i 38 e 40 m di profondità.

A questo scopo vennero realizzati 371 pali per la Cattedrale e 129 per il Sacratio. In realtà a causa dei problemi di cantiere solo il 27% di questi pali raggiunse lo strato duro senza raggiungere la stabilità auspicata tanto che nel 1989 la velocità di cedimento differenziale tra l'abside e la torre di ponente era di 2.7 mm/mese. Negli anni '90 il fenomeno, non ancora arrestato diventa oggetto di un nuovo studio e di nuovi interventi.

Tra cui un intervento di sottoescavazione delle zone meno consolidate per eliminare i difetti geometrici garantendo maggior equilibrio e stabilità alla struttura in elevazione²⁶.

Il lavoro, iniziato nel 1991, ha visto l'escavazione (a mano) di 30 pozzi di diametro 3.4 m di profondità variabili tra i 14 e i 26 m. Da questi pozzi, per mezzo di apposite macchine sono state eseguite perforazioni sub-orizzontali in grado di estrarre carote di 10 cm di diametro per indurre l'abbassamento. L'escavazione raggiunge volumi variabili di 11 a 334 mc di terreno e nel 1999 il livello di cedimento indotto aveva raggiunto un valore di 80 cm.

²⁶ Questo intervento sperimentato preliminarmente nella chiesa di S. Antonio Abad tra il 1990-91, fa riferimento ad uno studio del 1960 dell'Ing. Terracina per la Torre di Pisa

4 Il caso della “Torre restituita” a Pisa

L'attenzione dell'opinione pubblica sui possibili problemi statici della torre di Pisa, derivanti dalla sua inclinazione, si è accesa una prima volta dopo il crollo della torre di S. Marco a Venezia (1902) e successivamente con il crollo della torre civica di Pavia (1989).

La preoccupazione generale era rivolta al possibile collasso legato alla rottura fragile delle murature.

Gli studi legati alla torre di Pisa²⁷ e alla sua inclinazione, rappresentano la massima espressione delle indagini e degli studi esprimibili in un cantiere di restauro. Infatti il problema Pisa, viene affrontato da un gruppo di ricercatori eterogeneo per specializzazioni e nazionalità. Le informazioni tratte dai diversi argomenti affrontati per la comprensione dello stato di dissesto che vanno dalla geotecnica alla storia alla sicurezza strutturale statica e dinamica alla chimica, sono state interpretate, confrontate e ancora riviste per avere chiarezza sulle patologie e per determinare i corretti sistemi di intervento.

La torre di Pisa, con la sua inclinazione, rappresenta un esempio in cui il rapporto terreno-struttura ha avuto un ruolo importante sull'aspetto finale del monumento. L'importante monumento oltre per pregio architettonico è diventato nel corso dei secoli anche un simbolo nazionale proprio a causa della stranezza legata alla sua inclinazione. Proprio per questa sua popolarità e per la sua importanza storico architettonica è stata oggetto di numerosi studi e ricerche. Gli improvvisi crolli delle torri di Venezia (1902) e Pavia (1989), fanno convergere l'attenzione dell'opinione pubblica anche sulla torre di Pisa.

Un primo provvedimento è la chiusura della Torre nel 1990 voluta dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici per consentire da un lato a scongiurare potenziali disastri²⁸ e dall'altro a

²⁷ AA.VV. *La Torre Restituita. Gli studi e gli interventi che hanno consentito la stabilizzazione della Torre di Pisa*, a cura di Salvatore Settis, Istituto Poligrafico Roma, 2006;

²⁸ Negli anni Novanta l'inclinazione della torre raggiunge i 4.7 m di fuori-piombo

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

realizzare un sistematico studio scientifico del monumento. Il lavoro scientifico condotto dalla commissione nominata nel gennaio del 1990 dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, attiva un vero e proprio approccio interdisciplinare²⁹. Accanto ad ingegneri strutturalisti, geotecnici, architetti, che hanno studiato la Torre dal punto di vista materico strutturale si sono affiancati anche gli storici che hanno consentito di comprendere meglio il processo storico costruttivo e i chimici che hanno permesso di comprendere meglio le patologie materiche.

Lo studio, che in fase preliminare, è iniziato con una inevitabile raccolta documentaria, ha subito affrontato la questione del sottosuolo e del rapporto torre - suolo di fondazione. Il lavoro degli esperti geotecnici si è intrecciato con quello degli storici e degli archeologi per poter dimostrare l'indissolubile legame che ha avuto la storia della torre con quella degli edifici limitrofi.

La piazza come appare oggi è infatti il risultato di un complesso processo di trasformazioni urbanistiche, conclusosi nel XI secolo, geologiche e idrogeologiche.

Gli studi sul terreno condotti dal prof. Ing. Viggiani hanno permesso sia di ricostruire l'origine dei terreni e la loro composizione stratigrafica³⁰, sia di individuare, tramite il confronto con le notizie storiche, i paleoalvei del fiume Auser e la posizione dei canali navigabili che attraversavano la piazza.

Contemporaneamente la ricerca archeologica, condotta dal gruppo della prof.ssa Bonamici, ha ricostruito le vicende storiche, l'andamento e la conformazione del suolo antico, la successione stratigrafica antropica e geologica e le funzioni della piazza dal punto di vista urbanistico³¹.

²⁹ A partire dalla carta di Atene del 1931, comincia a farsi largo il concetto di collaborazione internazionale e di multidisciplinarietà per lo studio dei monumenti

³⁰ Il complesso stratigrafico al di sotto della torre viene analizzato e scomposto in funzione delle specificità di ogni strato in tre parti: complesso A (0;-7m) , terreno di riporto sabbie e limi superficiali e sabbie grigie, complesso B (-10m;-37m) argille superiori e intermedie inferiori e sabbie intermedie, complesso C di sotto dei <37 m sabbie inferiori

³¹ La ricostruzione storica ha permesso di individuare sei periodi storici stratificati sotto alla piazza, il primo riferito ad un'età precedente a quella arcaica (1400 a.C.), il secondo corrispondente alla fase arcaica (VIII-VI secolo a.C.), il terzo compreso tra il V e il IV secolo a.C. detto fase classica, il quarto fase alto ellenistica (IV e III secolo a.C.), il quinto fase alto ellenistica (III e I secolo a.C.), il sesto la fase Imperiale da Augusto al III

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

Nonostante l'importante documentazione relativa alle caratteristiche del profilo stratigrafico raccolte tra il 1907 e il 1970, la Commissione ha ritenuto opportuno eseguire altre perforazioni per poter caratterizzare in modo meccanico il terreno. La stratigrafia viene idealmente divisa in tre complessi. L'attenzione maggiore viene riposta nel complesso A (tra -3 m e -5/-10 m sotto al piano campagna) certamente il più influente sul comportamento della Torre.

Nei primi tre metri il terreno è caratterizzato da numerosi reperti archeologici risalenti al periodo compreso tra VIII secolo a.C. e il V secolo d.C. Al di sotto di questo sono presenti limi e argille tipiche di una zona di depositi di tipo lagunare.

La stratificazione del complesso B è invece caratterizzata da quattro stratigrafie di matrice prevalentemente argillosa, mentre il complesso C che si spinge fino a 40 m di profondità è costituito da sabbie eoliche tipiche delle zone costiere.

Oltre alla caratterizzazione meccanica in laboratorio e in situ delle proprietà del terreno³², è stata rivolta una particolare attenzione sulla posizione altimetrica delle falde e sul loro movimento stagionale attraverso la lettura dei piezometri.

Uno dei risultati più interessanti è stata la determinazione di una depressione nello strato di pancone al di sotto della Torre dalla parte dell'inclinazione misurata di circa 2.3 m. Da qui è stato dedotto che la Torre a causa del cedimento medio dello strato di pancone e alla sua compressibilità sia sprofondata di circa 2.8-3 m. Questo cedimento è stato anche confermato dalle informazioni raccolte negli anni '70 che hanno misurato il cedimento della Torre rispetto agli altri monumenti della piazza³³.

Il gruppo ricercatori per una maggiore comprensione del comportamento del rapporto terreno struttura, ha ritenuto fosse indispensabile realizzare una ricostruzione storica del processo di inclinazione della Torre (fig.9).

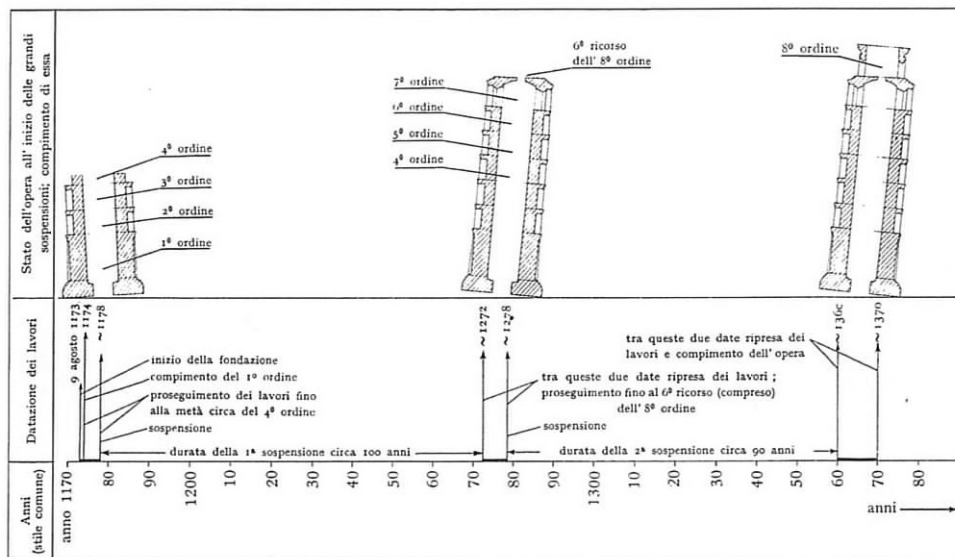
secolo d.C., il settimo fase altomedievale(VI-VIII secolo d.C.) e l'ottavo fase medievale moderna (IX-XIX secolo d.C.)

³² Sono state realizzate prove penetrometriche statiche ed edometriche per definire la storia tensionale del terreno, le caratteristiche di deformabilità e la sua resistenza a taglio, nonché tutta la composizione minarologica.

³³ In quell'occasione Noccioli aveva valutato un differenza relativa di 2.2-2.3 m che sommata al cedimento complessivo dei monumenti porterebbe ai valori determinati.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca



2.1 – STORIA DELLA COSTRUZIONE DELLA TORRE
History of the construction of the Tower

FIG 9. Storia della costruzione della torre

In assenza di documenti riguardanti i dati sull'inclinazione gli esperti hanno studiato le fasi di costruzione in funzione delle correzioni geometriche apportate alla Torre nel corso dei secoli, partendo dal presupposto che l'inclinazione fosse cresciuta nell'arco del tempo e che i costruttori, ad ogni aggiunta, lavorassero in direzione verticale su piani ortogonali a quello di lavoro.

Per riuscire nell'intento è stato indispensabile un rilievo geometrico di precisione, che ha permesso di determinare ogni minima variazione nello spessore dei ricorsi e nell'inclinazione dell'asse. Dall'analisi dello spessore dei ricorsi delle pietre che fanno parte dell'apparato murario è emerso che la correzione tramite l'impiego di corsi a spessore non costante avvengono alla fine di ogni ordine, e che la variazione di inclinazione più rilevante corrisponde al quarto periodo in cui la costruzione della Torre si è fermata per circa cento anni.

La storia dell'inclinazione è quindi racchiusa nei ricorsi murari e la sua conoscenza dipende da quella delle tecniche di costruzione del tempo.

Non avendo assolute certezze sui modi di operare sulle modalità costruttive dell'epoca, sono state formulate diverse ipotesi sulla rotazione delle fondazioni rispetto alla verticale.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

La prima ipotesi è quella di un lavoro costruttivo su piani orizzontali³⁴. La seconda ipotesi, introdotta dal Comitato è che i costruttori abbiano operassero il centro del nuovo ordine da costruire sulla verticale per il centro delle fondazioni.

Per determinare la rotazione delle fondazioni, si è operato schematizzando la Torre in conci di forma rettangolare disposti come nella realtà (fig. 10-11-12)³⁵.

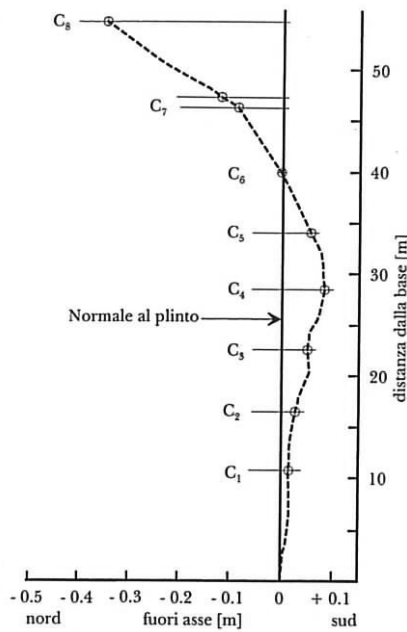


FIG 10. Forma rilevata dell'asse della Torre (Viggiani 2006)

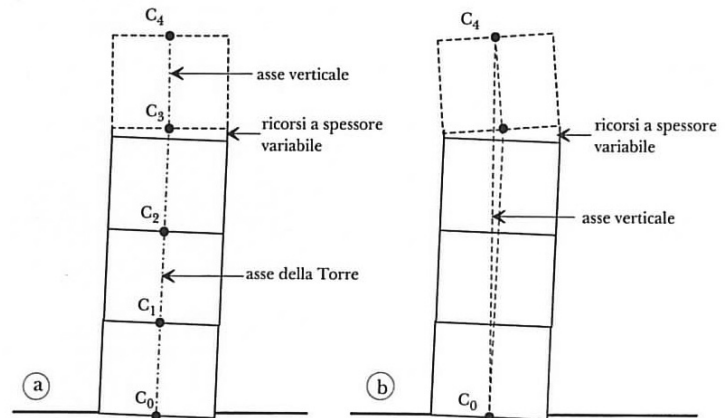


FIG 11-Ipotesi sui criteri di costruzione (Viggiani 2006)

³⁴ Questa ipotesi è stata abbracciata in precedenza sia da Sanpaolesi nel 1956 che dalla commissione Polvani nel 1971

³⁵ Per ognuno di questi rettangoli sono stati individuati dei centri (C_i) individuati su piani nominati ψ_i , in questo modo conoscendo le coordinate dei punti C_i , fissato il punto C_0 corrispondente al piano delle fondazioni ψ_0 , e conoscendo l'inclinazione dei singoli ricorsi rispetto al piano ψ_0 ³⁵, la rotazione della fondazione in corrispondenza del completamento di un livello i -esimo si ottiene ruotando il piano ψ_0 intorno al centro C_0 in modo da riportare il punto C_i della costruenda Torre sulla verticale. Seguendo questo criterio grafico è stato possibile dedurre una anche analitico determinando l'inclinazione della fondazione quando l'ordine i -esimo era già stato completato e quello successivo era in fase di composizione.

$$\theta_i = \tan^{-1} \left[\frac{x_i + (y_{i+1} - y_i) \cdot \tan \mu}{y_{i+1}} \right]$$

Dove con i si indica l'ordine costruito e $i+1$ quello da costruire e μ l'inclinazione relativa media tra i ricorsi di ordine $i+1$ e il piano superiore che delimita l'ordine i .

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

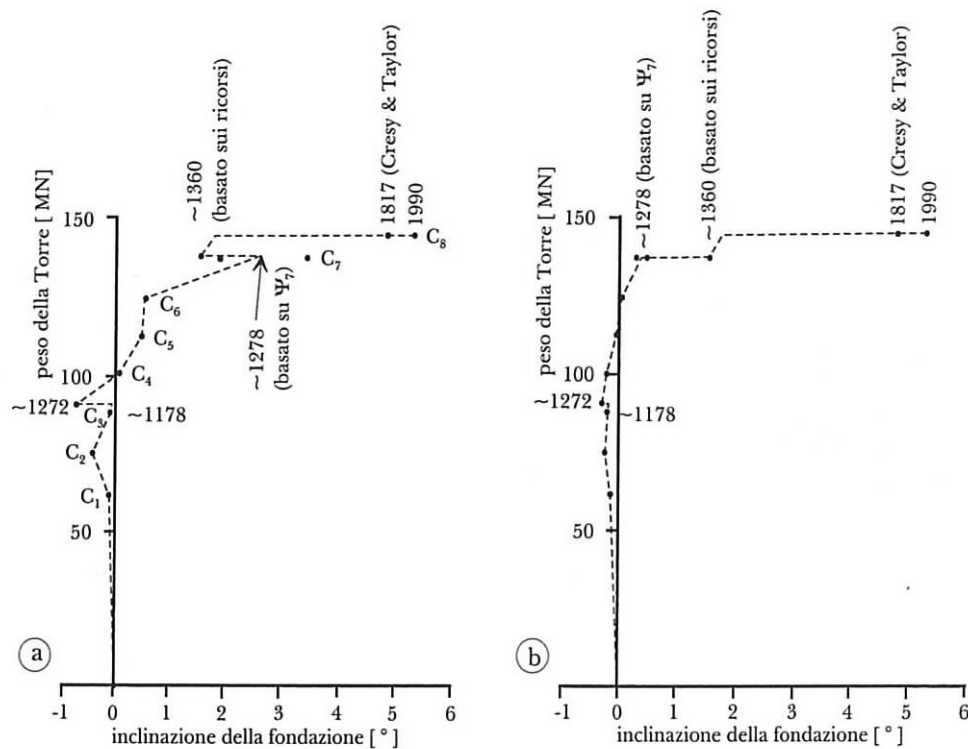


FIG 12-Storia dell'inclinazione della torre ricostruita nelle due ipotesi (Viggiani 2006)

La ricostruzione dell'inclinazione della torre diagrammata da Burland e Viggiani nel 1994 seguendo le due ipotesi, ha mostrato la validità del metodo introdotto dal Comitato.

La Torre inizialmente inclina verso nord raggiungendo i 0.2° nel 1272 quando la struttura viene interrotta. Dopodiché l'inclinazione cambia direzione verso sud in modo sempre più crescente. Nel 1278 alla seconda interruzione raggiunta la settima cornice era di 0.6° e alla ripresa dei lavori di 1.6° . Dopo il completamento della cella campanaria nel 1370 l'inclinazione continua ad aumentare a carico costante. Dopo circa quattrocento cinquanta'anni, nel 1817, due architetti inglesi, Cresy e Taylor, rilevano una pendenza di circa 4° . Questo incremento seppur evidente risulta poco significativo rispetto a quello avvenuto nei successivi cento anni in cui la pendenza è cresciuta di un grado. L'incremento della velocità di inclinazione viene attribuita allo scavo del catino del 1838.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

L'analisi della misura dell'inclinazione della Torre, realizzata regolarmente a partire dal 1911³⁶, ha consentito di determinare un complessivo incremento dell'inclinazione della Torre, fino al 1992 e contemporaneamente un andamento ciclico dei rilevamenti. Questo andamento ciclico annuale, tipico nelle misurazioni di così lunga durata è stato studiato con maggior attenzione.

In particolare è stato studiato il comportamento giornaliero. Grazie ad un approfondito studio di Noccioli nel 1971, si è compreso che l'insolazione gioca un ruolo decisivo sul comportamento del monumento. Infatti la parte esposta ai raggi solari si dilata maggiormente imprimendo alla Torre una deformazione quasi volesse allontanarsi dal sole: “durante una giornata, mentre il sole percorre la sua grande traiettoria celeste, l'estremità superiore della torre percorre in opposizione una piccolissima traiettoria avente andamento ellittico”(Noccioli 1971) (fig. 13).

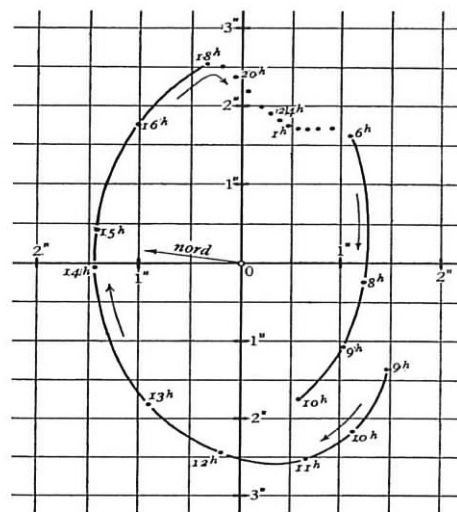


FIG 13 Variazioni dell'inclinazione della torre nell'arco di una giornata. (Noccioli 1971)

³⁶ Con un teodolite posizionato sempre nel medesimo punto vengono misurati gli angoli dal punto stazione ad un punto di riferimento considerato fisso e due punti materializzati sulla prima cornice e la settima cornice. La differenza degli angoli consente di calcolare il fuori piombo tra la prima e la settima cornice e quindi l'inclinazione della torre. Dal 1928 sono poi iniziate delle campagne di livellazione che hanno coinvolto tutta la piazza e dal 1934 è stato messo un inclinometro a pendolo

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

Il comportamento ciclico giornaliero dimostrato dal Noccioli spinge il comitato a cercare di comprendere se il movimento ciclico interessasse solo la parte esterna della Torre o anche quella in fondazione.

Per riuscire a realizzare osservazioni utili a questo scopo si sono raccolti i dati antecedenti al 1992 (periodo nel quale viene installato un importante sistema di monitoraggio) relativi alla livellazione eseguita su quindici punti posti alla base delle colonne esterne e a quelli ricavati dalle misurazioni dell'impianto di monitoraggio installato nel 1992.

Il confronto di questi dati e quelli raccolti nel corso di 24 ore in misurazione continua dal nuovo impianto di monitoraggio ha consentito di capire che i movimenti ascrivibili a rotazione della fondazione si limitano al 30% di quelli totali.

Pertanto i terreni di fondazione sono soggetti a cicli di tensione e deformazione giornaliera di ampiezza modesta ma ripetuti diverse volte. Per quanto si possa dire del comportamento dei terreni sotto effetti ciclici sembra ragionevole affermare che questo è uno dei principali fattori all'origine del progressivo incremento della pendenza della Torre. I dati derivanti dalla livellazione hanno anche consentito di confermare il comportamento rigido della fondazione. L'attenzione degli studi si è poi concentrata sulla comprensione del movimento della Torre nel lungo periodo per capire le variazioni dell'inclinazione della sua inclinazione e il conseguente comportamento cinematico.

Questo ha consentito anche di valutare gli effetti degli interventi di consolidamento effettuati prima del 1992.

Per determinare il cinematismo di un punto della Torre è stato necessario descrivere, oltre alla rotazione, il movimento di più punti lungo le tre direzioni ortogonali sul piano di massima pendenza. Le difficoltà maggiori si sono avute nel reperimento dei dati nel periodo antecedente al 1992 e alla lettura delle traslazioni verticali assolute viziate dal fenomeno di subsidenza complessivo della piazza analizzato solo a partire dal 1965. Nonostante le difficoltà nel reperimento di dati utili si sono comunque potuti individuare tre periodi di tempo con comportamenti cinematici legati agli eventi di disturbo antropici eseguiti sulle fondazioni: 1° il moto stazionario; 2° le iniezioni degli anni 30 nel blocco di fondazione nei terreni limitrofi al catino, 3° gli effetti del pompaggio di acqua nelle sabbie profonde nei primi anni '70.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

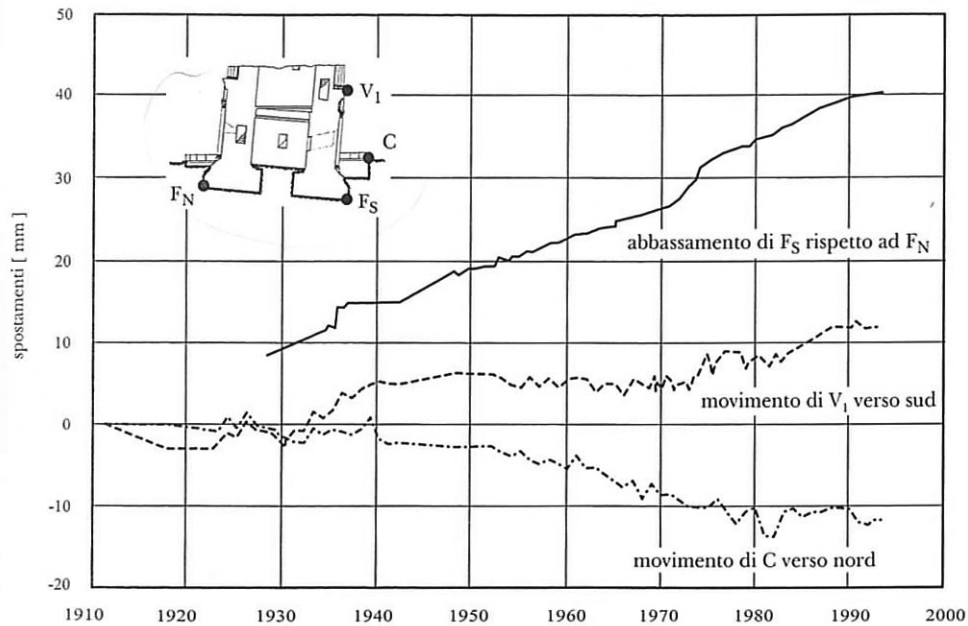


FIG. 14 Spostamenti di alcuni punti caratteristici della Torre (Viggiani 2006)

Questi tre periodi sono stati individuati dopo aver materializzato tre punti sulla torre chiamati F_n (posto sulla fondazione a nord), F_s (posto sulla fondazione a sud), C (posto sul catino), V_1 (posto sulla cornice a sud), ψ_c (posto al centro della canna della torre).

Durante la fase stazionaria il comportamento della torre è stato quello di rotazione attorno al punto ψ_c . Il periodo delle iniezioni degli anni '30 è stato caratterizzato da una traslazione verticale e orizzontale del punto V_1 e da uno spostamento verticale nullo del punto ψ_c . L'ultimo periodo studiato corrispondente ai pompaggi degli anni '70 ha mostrato importanti movimenti verticali dei punti F_n e F_s con una ridotta componente verso nord.

La conclusione dello studio ha consentito di valutare come l'azione antropica fosse incisiva nei confronti dei movimenti rigidi della fondazione e come questi movimenti potessero essere associati solo agli strati di terreno superficiali, creando una zona di concentrazione delle deformazioni distorsionali.

I dati raccolti fino al 1992 sono poi stati arricchiti con quelli del complesso sistema di monitoraggio realizzato tra il 1992 e 1993 costituito da 97 strumenti tra cui livellometri, inclinometri biassiali, inclinometri monoassiali, deformometri, termometri, estensimetri, sensori meteo, sismometri.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

Il sistema di monitoraggio così complesso e anche sovradimensionato per numero è stato concepito per sopperire alla eventuale mancata acquisizione dei dati strumentali dovuti a guasti. Tutti gli strumenti in particolare quelli installati sulla base hanno confermato il comportamento termico ciclico della Torre. In aggiunta al sistema di monitoraggio si è poi realizzata una complessa rete topografica di controllo su tutta la piazza e si sono installati dei piezometri per tenere sottocontrollo l'andamento della falda.

Una volta monitorato il comportamento della Torre si sono cercate le cause dei movimenti per determinare una soluzione definitiva. La ricostruzione dell'inclinazione ha messo in evidenza che i valori massimi di incremento del fuori-piombo si sono determinati quando la Torre aveva raggiunto una certa altezza. Il fenomeno è noto in letteratura come *leaning instability* connesso alla rigidità del terreno piuttosto che alla resistenza³⁷. Per capire questo fenomeno si deve far ricorso ad una semplificazione formale del figura del pendolo inverso, ovvero un asta verticale di altezza h con una massa concentrata w in sommità e collegata da una cerniera elastica ad un'estremità capace di contrapporre con un momento stabilizzante M_s a un momento sollecitante $M_r = W \cdot h \cdot \sin \alpha$.

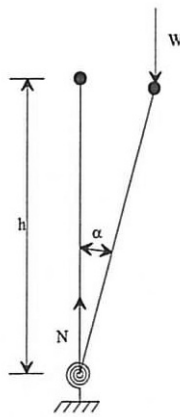


FIG. 15 Schematizzazione del pendolo inverso. (Viggiani 2006)

³⁷ Gorbunov-Posadov, Serebrany, 1961; Habib, Puyo, 1970; Schultze 1973; Hambly 1985; Lancellotta 1993; Desideri, Viggiani, 1994; Desideri Et Alii 1997; Potts, Burland 2000

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

Ovviamente con l'asta verticale si ha equilibrio, e questo rimane finché il momento stabilizzante non supera quello ribaltante, nel caso opposto si ha il collasso e nel caso di equivalenza si ha indifferenza. La stabilità può essere caratterizzata da un coefficiente di sicurezza che FS se >1 è stabile se <1 è instabile.

Questa schematizzazione è facilmente trasferibile alla Torre, fissando h l'altezza del baricentro della torre e W la massa, sostituendo alla cerniera elastica una fondazione, circolare di diametro D , che appoggia su di un terreno elastico omogeneo isotropo di costanti E , ν ³⁸. Sempre con lo stesso modello il cedimento può esprimersi con $\rho=W(1-\nu^2)/ED$. Questa espressione consente, noto l'abbassamento di 3 m e il carico W pari a 142MN di valutare un valore medio equivalente del termine $E/(1-\nu^2)$ per il sottosuolo della torre pari a 2.85 MN/m². Se $D=19.5$ m e $h=22$ m ho che $FS=1.1$.

Questo metodo estremamente semplificato ha consentito di determinare lo stato di equilibrio indifferente al momento degli interventi stabilizzanti. L'accumulo delle piccole deformazioni plastiche indotte dai carichi ciclici dovuto all'equilibrio indifferente della struttura è una spiegazione del continuo progredire dell'inclinazione. Le analisi numeriche sulla Torre di Pisa che hanno studiato in modo approfondito le cause dei cedimenti e la validità delle soluzioni di stabilizzazione pensate, si sono basate sulla simulazione precisa del terreno con un modello costitutivo lineare elastico, plastico incrudente basato sulla teoria dello stato critico.

I programmi utilizzati consentono di accoppiare lo scheletro solido alla fase fluida del terreno in modo da simulare in modo corretto la falda acquifera.

La conclusione del complesso processo di analisi e valutazioni sperimentali con simulazioni in laboratorio, ha portato il Comitato Scientifico ad adottare la tecnica di stabilizzazione geotecnica di sottoescavazione sul lato nord in modo da ridurre l'inclinazione di mezzo grado³⁹. Gli effetti voluti sono stati principalmente due:

- la riduzione dell'inclinazione

³⁸ L'espressione del coefficiente di sicurezza diventa $FS=(E/6(1-\nu^2))*D^3/W*h$ (Desideri 1997)

³⁹ Questa tecnica è stata già proposta nel 1962 da Terracina. Alcuni precedenti storici relativi ad interventi simili su ciminiere o campanili in pendenza realizzati in Inghilterra in Germania e in Olanda nel 1800 sono riportati da Johnston e Burland nel 2001 Barends 2002. Il metodo è stato impiegato più di recente in Messico (Tamez 1989, Santoyo 1989) ed a Tamez nel 1995 per mitigare i cedimenti differenziali della cattedrale metropolitana di Città del Messico.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

- la riduzione dello stato tensionale delle parti sottopendenza.

La sottoescavazione della Torre è iniziata con una fase preliminare per capirne gli effetti reali sulla struttura. Con dodici trivelle inclinate rispetto all'orizzontale di 25 ° si sono estratti 1 mc di terreno principalmente sul lato sud e in piccola percentuale sotto alla fondazione. La trivellazione è avvenuta togliendo piccole porzioni di terreno (tratti di 50 cm), estendendo la carotatrice per la medesima lunghezza e lasciando uno strumento per la verifica della chiusura del foro.

Questo primo approccio ha confermato la validità della scelta esecutiva ed ha portato alla sottoescavazione definitiva dove sono stati estratti 38 mc di terreno di cui 305 sotto alla fondazione.

Questa operazione ha riportato la torre alla situazione d'inclinazione e dell'aspetto estetico dell'800.

5 Il caso del campanile della chiesa dei Frari a Venezia: un esempio di monitoraggio in itinere

Recentemente un gruppo di ricerca formato da studiosi dell'arte, ingegneri geotecnici e strutturisti si è occupato del campanile della Basilica dei Francescani a Venezia (fig.16).



FIG.16- Basilica e campanile dei Frari: dettaglio dalla visita di Venezia del '500 di Jacopo de' Barbari. Sulla destra del campanile la cappella di S. Pietro.

Il lavoro che si è concluso con la realizzazione di un intervento di consolidamento ha seguito un iter di accertamenti storici, geologici, e strutturali che ha consentito di determinare con precisione la patologia della struttura e la soluzione esecutiva più adeguata.

La Basilica dei Frari (Francescani) sorge a Venezia tra il XIV e il XV Secolo. Il campanile, contemporaneo alla Basilica, viene terminato nel 1396 dopo un cantiere durato trentacinque anni.

A base pressoché quadrata (9,4 m x 9,2m) si erge con una struttura a doppia canna, una più piccola che contiene il corpo della scala e una centrale più ampia raggiungendo un'altezza di sessantacinque metri, seconda solo al campanile di S. Marco. Anche se inizialmente viene concepito come elemento strutturale autonomo, al momento della riedificazione e ampliamento della Basilica viene collegato alla navata laterale. Nel 1432 viene realizzata una cappella in adiacenza al campanile ma indipendente dallo stesso.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

Dalla consultazione dei documenti d'archivio si è potuto vedere che i primi segni di cedimento segnalati dai frati risalgono al 1592, ma i primi studi documentati risalgono agli interventi di consolidamento avvenuti tra l'800 e il '900 (fig.17).



FIG.17 Immagine dell'intervento di consolidamento delle fondazioni del campanile del 1904

Il cedimento differenziale sembra fosse di 40 cm rispetto alla Basilica mentre il fuori-piombo misurato ad un'altezza di 42.5 m aveva raggiunto i 75 cm.

I consolidamenti consistettero principalmente in un collegamento sia a livello fondale che in elevazione con la cappella di S. Pietro; inoltre si aggiunsero lavori di ripristino delle volte lesionate della navata. Dopo il crollo del campanile di Venezia del 1902 iniziarono una serie di monitoraggi su tutte le strutture campanarie della città. In particolare il campanile dei Frari dopo gli interventi di fine '800 presentava ancora i segni di cedimento.

Si decise di intervenire nuovamente sulle fondazioni, realizzando un allargamento della base in cemento armato, collegata saldamente a quella in muratura per mezzo di sagomature a coda di rondine e un costipamento del terreno per mezzo di infissione di pali in legno di larice, e si rinforzarono i collegamenti tra Torre e cappella di S. Pietro.

Il progetto che correttamente prevedeva un allargamento uniforme su tutta la base venne realizzato solo sul lato sottopendenza. Per questo motivo, nonostante la campagna di indagini diagnostiche e di monitoraggio realizzata nel 1990 rivelasse una sostanziale stabilità del campanile, nel 2000 apparvero alcuni segni di deterioramento strutturale.

Le nuove lesioni e la caduta di materiali dalle volte costrinse alla realizzazione di una serie di interventi di messa in sicurezza della struttura.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

I risultati di una nuova livellazione confrontati con quelli di inizio novecento hanno mostrato che in realtà il fenomeno di abbassamento non si era mai fermato, in particolare confrontando gli abbassamenti della chiesa (tra i 10 e 20 mm) e quelli del campanile dello stesso periodo (49.8 mm 92.3 mm) si poté stimare un velocità di incremento del cedimento differenziale tra la chiesa e il campanile di 0.5-1.0 mm all'anno. Inoltre si era accertato come nell'ultimo secolo il campanile avesse invertito la rotazione verso la Basilica e aumentato lo sprofondamento.

Unitamente ad un importante sistema di monitoraggio applicato al campanile sono iniziate le indagini geologiche. Grazie ai carotaggi e agli scavi di ispezione, si sono potuti individuare sia la stratigrafia del terreno sia la conformazione delle fondazioni. La struttura fondale è risultata realizzata con blocchi di pietra d'Istria appoggiati su un tavolato di legno (di spessore 40-50 cm) sovrastante una palificazione fitta di profondità 1.5 2 m, insufficiente a raggiungere lo strato di sabbie addensate (fig.18).

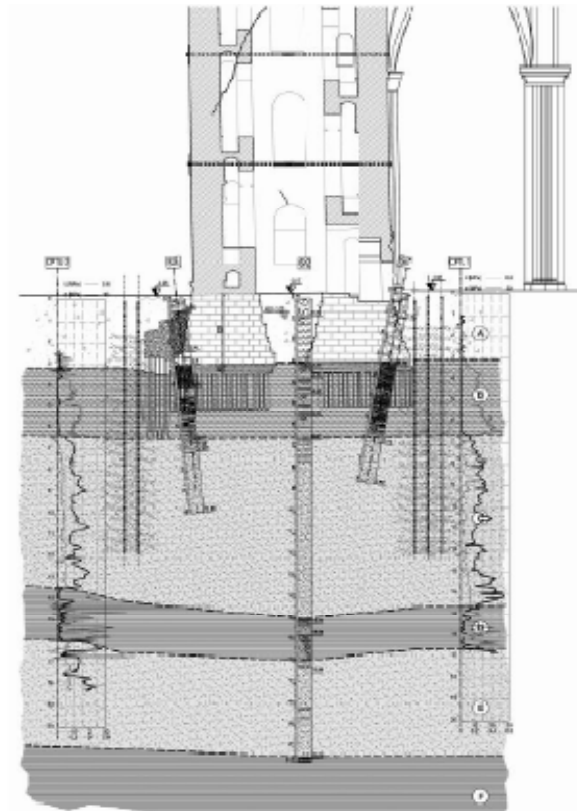


FIG.18 Sezione stratigrafica A-A'. Si riconoscono le indagini in sito, le fondazioni, l'intervento del 1904 e le canne valvolate di iniezione del nuovo intervento

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

Dai rilievi in sito e dallo studio dei movimenti della Torre si sono stimati abbassamenti di 60 cm già al momento della sua costruzione a fronte di un peso complessivo di 57 MN.

L'attuale velocità di abbassamento dopo più di sei secoli dall'edificazione, sembra sia legata a fenomeni plastici locali nello strato di terreno compreso tra la fine dei pali e lo strato di sabbia sottostante. Queste indagini sul suolo, unitamente ad un attento studio geometrico delle deformazioni avvenute nella storia della torre e ad una modellazione numerica che si è occupata di simulare le varie fasi costruttive, hanno confermato la necessità in grado di che evitare il progredire del cedimento e dell'inclinazione.

L'intervento di consolidamento è stato progettato in modo da poterne valutare l'efficacia durante le fasi di lavorazione, attraverso un monitoraggio strumentale costituito da estensimetri (per la misura verticale delle deformazioni), inclinometri biassiali (per la misura degli spostamenti orizzontali e verticali) piezometriche (per la valutazione di un eventuale movimento della falda) (fig.19).

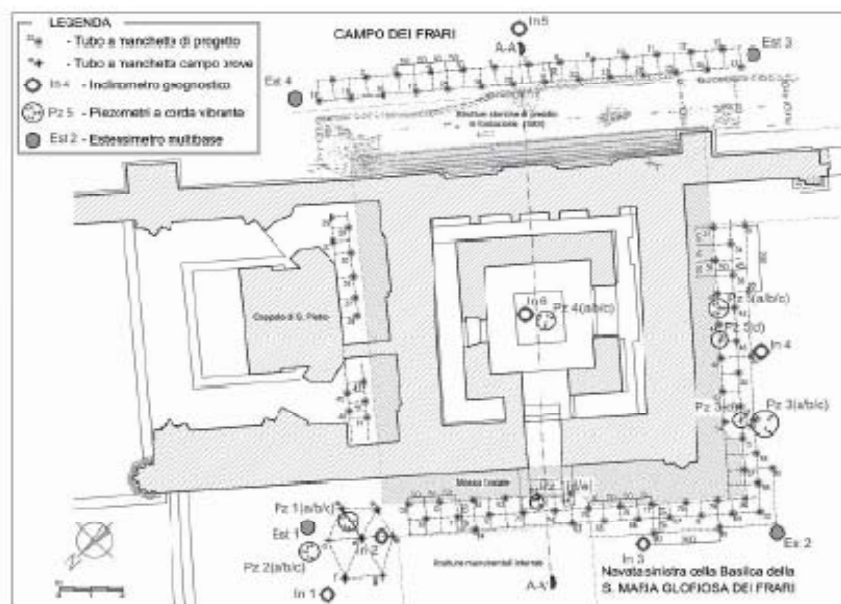


FIG.19- Planimetria con ubicazione dei punti di iniezione e della strumentazione di monitoraggio geotecnico

A corredo di questo importante apparato è stata realizzata una livellazione prima e dopo l'intervento e una serie di carotaggi e prove in situ per valutare gli incrementi delle proprietà meccaniche del terreno. Inoltre la finalità è stata quella di rendere confrontabili gli

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca

spostamenti della Basilica e del campanile, per evitare fenomeni differenziali, salvaguardare l'integrità delle fondazioni originali e mantenere inalterata la distribuzione delle tensioni nel sottosuolo.

La soluzione individuata è stata quella di migliorare le caratteristiche meccaniche del terreno argilloso attorno al masso fondale attraverso delle iniezioni a pressione controllata di malta cementizia.

Sebbene il rapporto tra l'intensità del trattamento e la risposta della struttura non fosse lineare per i primi cicli, verso la fine del consolidamento si sono registrati gli incrementi più consistenti.

Il monitoraggio continuo degli spostamenti del campanile indotti dall'intervento ha consentito di calibrare le iniezioni al fine di ridurre i cedimenti differenziali tra torre e basilica.

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca



FIG. 20-Foto Chiesa Cattedrale di Pavia prima del crollo della torre



FIG. 21-Foto Chiesa Cattedrale di Pavia dopo il crollo della torre

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca



FIG. 21-Foto Chiesa Cattedrale di Pavia dopo il crollo della torre



FIG. 22-Foto Chiesa Cattedrale di Pavia dopo il crollo della torre

PARTE PRIMA-

Le criticità delle costruzioni in muratura: alcuni casi significativi e i problemi oggetto di ricerca



FIG. 23-Foto Chiesa Cattedrale di Pavia dopo il crollo della torre

PARTE SECONDA

IL CASO DI MODENA: RAPPORTO TRA SUOLO E STRUTTURE IN UNA PROSPETTIVA MULTIDISCIPLINARE

I contesti di riferimento

1. Evoluzioni del contesto storico territoriale ed urbano.

La storia del territorio di Modena tra XI e XII fu fortemente influenzata dalla presenza di importanti centri di potere, quali il monastero di S. Silvestro di Nonantola (di importanza europea sia dal punto di vista culturale che economico) la nobile dinastia dei Canossa (molto influente in tutto il Nord Italia), ed infine la chiesa Cattedrale di Modena¹.

In un contesto politico globale complesso ricco di conflitti armati, che vedono contrapposti i poteri ecclesiali a quelli laici, cominciano ad emergere le figure dei vescovi, guide spirituali che col tempo, per concessioni imperiali, acquisiscono ruoli e privilegi. In particolare a Modena in assenza di figure politiche laiche fino al periodo di istituzione del Comune, il Vescovo assunse il ruolo di difensore della città e dei suoi abitanti, vantando su questi e sul territorio diritti fiscali e di proprietà. Per comprendere meglio il contesto urbano in cui viene fondata la Cattedrale (1099) è opportuno analizzare gli importanti processi di trasformazione avvenuti sul territorio.

Sebbene la città di *Mutina* (Modena) fosse nota al mondo etrusco nel VII Secolo a.C. si può far corrispondere la sua origine alla fondazione della colonia romana chiamata Mutina (183 a.C.). Inoltre, come testimoniano alcuni passi degli storici Polibio e Livio, già a partire dal 218 a.C. Mutina rappresenta un importante centro economico sulla via Emilia. La forma urbana della colonia romana, caratterizzata da un intreccio viario perpendicolare, non comprendeva Piazza Grande dove sorgono Duomo e Campanile. La fondazione del nuovo centro avvenne in una area extraurbana, vicino ad un cimitero dove si trovava la tomba di S. Geminiano² intorno al VII Secolo. Le motivazioni di questa traslazione risiedono nella travagliata storia della città

¹ Giordana Trovabene, Gloria Serrazanetti, *Il Duomo nel tessuto urbanistico*, in, Lanfranco e Wiligemo, *il Duomo di Modena*, ed Panini, Modena, 1985

² Morto il 31 gennaio del 397 d.C.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

caratterizzata da successive invasioni barbariche (tra il IV e VI Secolo) ed eventi naturali catastrofici che la portarono ad una decadenza economica e strutturale.

La città nel 600 fu al centro di una contesa tra Bizantini e Longobardi, che ebbero la meglio e la occuparono. Contemporaneamente all'occupazione longobarda, in una zona cimiteriale, esterna al castro romano, in corrispondenza della Cattedrale edificata nel IV dedicata a S. Geminiano, si fondò la sede del potere ecclesiastico.

La sede del potere laico del duca longobardo, separata da quella ecclesiastica, era ad ovest (Cittanova) in una posizione strategica sia dal punto di vista difensivo che da quello commerciale. I cambiamenti dal punto di vista della gestione del territorio avvennero durante il periodo di governo dei Franchi di Carlo Magno che nel 774 d.C. sconfissero i Longobardi sostituendosi nel governo del Regno Italico.

Nel periodo del regno Carolingio i vescovi assunsero sempre più privilegi e poteri. In particolare a Modena si insediò il Vescovo Leodoino tra l'871-892 in corrispondenza della crisi del potere carolingio. L'abilità politica e il potere di questo Vescovo sono testimoniate da un documento risalente all'891 firmato da Guido di Spoleto³, in cui vengono affidati al vescovo Leodoino i diritti sui luoghi ed edifici appartenenti alla Chiesa. I poteri concessi a Leodoino gli consentivano di agire liberamente nel concedere terre edificabili, di modificare l'assetto urbano ed erigere fortificazioni. Il Vescovo, sembra infatti che avesse realizzato una cinta muraria, dentro la quale, per questioni di sicurezza, iniziò spontaneamente a traslare il nucleo abitativo altomedievale⁴. Questo centro diventò il *castrum civitatis* ovvero la zona della città fortificata. Nonostante l'impossibilità di trovare documenti antecedenti al XII Secolo che descrivono l'organizzazione urbana della città di Modena, la formazione dell'aggregato urbano sembra avviata già dall' VIII Secolo. La motivazione che giustifica l'assenza di considerazione nei confronti dell'abitato comune, e agli elementi di piano urbano, è con tutta probabilità legata al fatto che gli edifici ad uso abitativo non erano realizzati in mattoni e pietre ma prevalentemente in legno, tanto che nella

³ Il sistema ormai in crisi dell'impero carolingio nel IX secolo, minacciato dai Vichinghi a nord dai Saraceni a sud e dagli Ungari a est, il vuoto di potere lasciato dalla deposizione di Carlo il Grosso nell'887 causarono l'inizio di una corsa al titolo imperiale da parte dei grandi feudatari. Le figure di spicco furono Guido Marchese di Spoleto e Berengario marchese del Friuli. Guido che sconfisse Berengario durante la corsa al titolo imperiale nell'890 fu sempre sostenuto dal Vescovo Leodoino, che venne premiato con proprietà, benefici fiscali e diritti decisionali sul territorio estendendone i confini di un miglio.

⁴ Vicini 1928,p23, raffigurazione pittorica della *Tabula Pentigeniana*, Milles, 1962,IV,4

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

terminologia dell'XI Secolo si distingueva la *domus*, realizzata in materiale lapideo, dalla *casa* realizzata con materiali più poveri.

Le carte anteriori al 891 d.C. non evidenziano la presenza di strutture urbane ad esclusione della Cattedrale, anche se la presenza dei Canonici (887 d.C.), menzionata nel diploma di Guido da Spoleto, potrebbe far pensare ad un luogo che li ospitasse. Il primo documento che riferisce in modo certo di un edificio (*claustra canonicorum*) ad uso dei Canonici risale al 1110, mentre l'esistenza dell'edificio vescovile è confermata in una carta del 1068⁵, anche se non si può escluderne l'esistenza anche in passato. Una delle poche descrizioni riguardante il tessuto urbano, con la descrizione sistema dei canali che attraversa la città, viene fornita da una concessione rilasciata per la realizzazione del monastero di S.Pietro nel 996 D.C. sorto a fianco dell'omonima chiesa al di fuori delle mura⁶. Per tutto il X Secolo scarseggiano documenti che forniscano notizie sulla composizione del tessuto urbano; rimangono invece testimonianze dell'esercizio dei poteri del Vescovo sul potere edificatorio dei terreni soprattutto quelli del suburbio più lontani dal centro.

Nell' XI Secolo il probabile incremento delle dimensioni del tessuto urbano è testimoniato anche dal diploma dell'Imperatore Corrado (1026) in cui vengono estesi i poteri del vescovo a tre miglia, a cui seguì un possibile allargamento delle mura nel 1092. Il documento che testimonia questo possibile allargamento mostra una rinnovata sensibilizzazione del Vescovo verso l'attuazione di un programma edilizio che mirava all'ingrandimento e miglioramento della città. Questa dinamicità della morfologia urbana può essere legata alla ripresa demografica ed economica testimoniata da un'importante presenza di botteghe artigiane. Per assistere al rilancio del rapporto tra impianto urbanistico e strutture edilizie si dovrà attendere il XII secolo quando si iniziò a porre più attenzione alla cultura edilizia.

⁵ In loco *Mutina in pal. ep.*(I,n 255)

⁶ A.S.Mo, Fondo di S.Pietro,I,7

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Alla luce dell'importante momento di incremento demografico e benessere economico testimoniato anche dall'allargamento delle mura cittadine 1092 si giustifica la decisione di costruire la Cattedrale voluta essenzialmente dal clero e dal popolo⁷.

L'agglomerato urbano, grazie alla presenza della Cattedrale, crebbe ancora. Infatti oltre all'edificio principale del culto nacquero edifici ecclesiastici e civili. Su alcuni documenti del 1135 e 1142 si possono desumere le forme degli edifici dei Canonici e la loro dislocazione vicino al vescovado⁸. La conferma della presenza del palazzo vescovile è del XI Secolo, mentre la prima menzione di organismi comunali cittadini si ha solo nel 1135 a cui nel 1172 venne riservato un edificio⁹. Contemporaneamente all'edificazione del palazzo comunale (confermata da scritti risalenti al 1194) avviene anche la traslazione della vita civica alla piazza antistante la Cattedrale dove sorgono palazzi strutture abitative e spazi ortivi¹⁰.

Gli ampliamenti descritti già nel 1188¹¹ d.C. mettevano in evidenza un perimetro delle mura che seguiva i corsi dei principali canali, inglobando un'ampia fascia extraurbana verso est e di edifici di culto (parrocchie) ubicati in corrispondenza delle porte.

A testimonianza di questo sviluppo risulta la costruzione di diverse chiese all'interno delle mura e la presenza consolidata di artigiani e mercanti i cui nomi compaiono in diversi atti notarili. Nascono però anche alcune criticità. La presenza di diversi canali navigabili in città fa sì che nascano una serie di problematiche legate all'edificazione sulle rive, alla salubrità dei quartieri e alla realizzazione di ponti. Verso la metà del secolo, per rispondere alla crescente domanda di lotti edificabili, alla necessità di creare un ordine all'interno della matrice urbana e di incrementare la resa degli affitti, il Vescovo decise di ordinare il territorio attraverso la creazione di lotti modulari stretti e lunghi disposti a pettine sulla su canali o vie di transito.

⁷ ...*non tantum ordo clericorum sed et universo quoque eiusdem ecclesie populus...* BETONI 1907, pag 88.

⁸ I, nn. 384, 418

⁹ Tiraboschi 1793-1795, solo nel 1194 si fa un preciso riferimento all'edificazione di un palazzo comunale (Vischi, Sandonnini, Raselli 1888, p. 21. cronaca di G. Da Bazzano)

¹⁰ La piazza compare nei documenti nel 1156 con il nome di *platea publica* o *Platea S. Geminiani* nel 1168 (I, n. 462, II, n. 763)

¹¹ Vischi, Sandonnini, Raselli 1888, pp. 19-20, Cronaca di B. Morano)

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Mentre, al tempo dell'edificazione della Cattedrale, si conosce l'aspetto del territorio extraurbano caratterizzato da foreste paludi e aree coltivate, risulta più complessa ricostruire l'esatta conformazione dell'aggregato urbano nelle immediate vicinanze della Cattedrale.

Gli edifici che interagiscono direttamente con la Cattedrale sono la Torre il palazzo del Vescovo e le Canoniche, di questi si hanno notizie certe a partire dal 1200 quando la Cattedrale era già stata terminata. Come si evince da alcuni documenti iconografici, si può pensare che alla fine dell'edificazione del Duomo (1188), le canoniche erano addossate alla parete nord, e la sagrestia era collegata attraverso il passaggio ancora oggi conservato.

Giovanni Battista Parenti in un'immagine del 1495, mostra il rapporto della Cattedrale con gli edifici limitrofi, il collegamento con l'edificio vescovile e il non ancora certo collegamento con le canoniche¹². Da alcune immagini successive si vede invece come già a partire dal XVIII Secolo la cattedrale fosse collegata agli edifici limitrofi (fig 1,2).

¹² Giovanni Battista Parenti, *San Geminiano salva modena dalle acque*, xilografia in *Vita Sancti Geminiani*, Ed Domenico Rocciolo, 1495

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

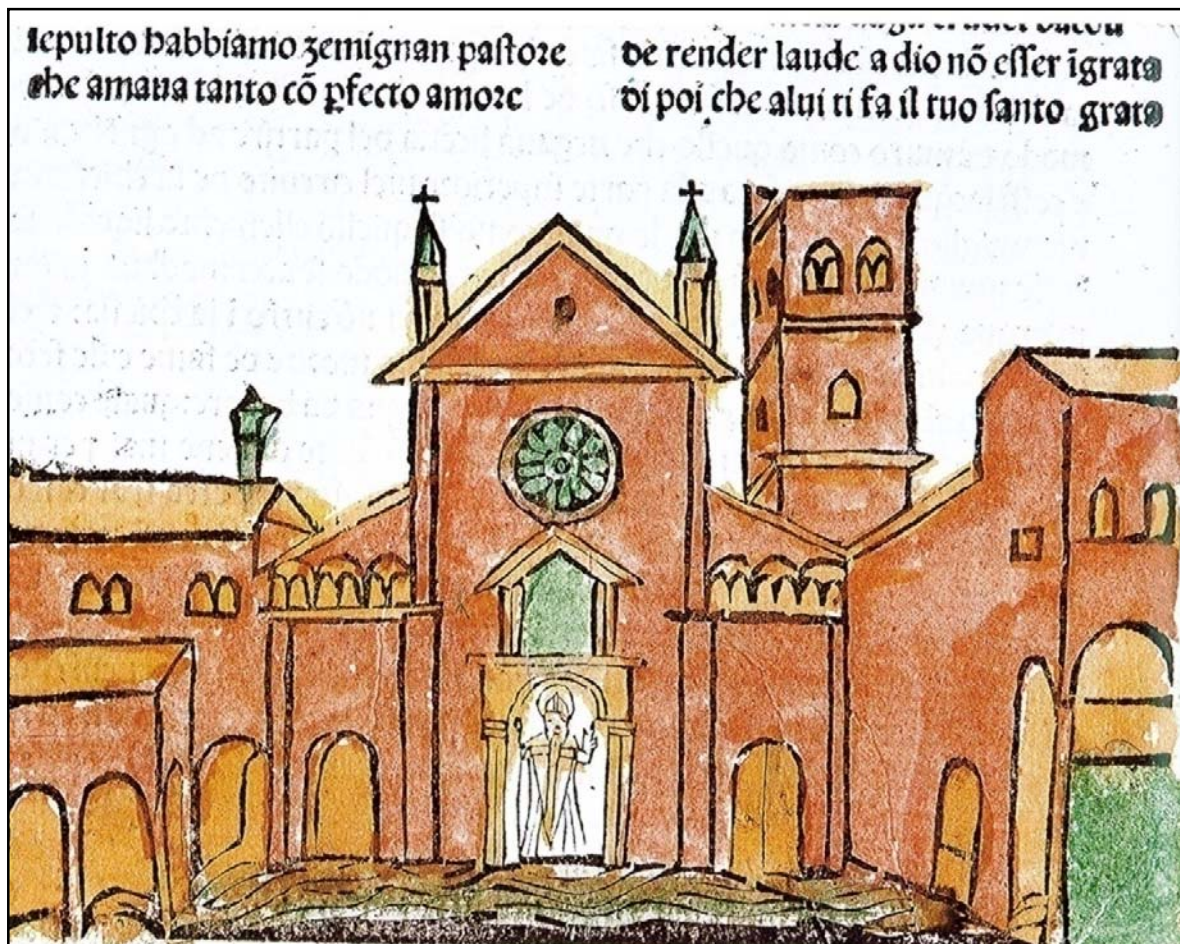


FIG 1. Giovanni Battista Parenti, immagine stampata capovolta, si vede dalla posizione del palazzo a destra l'assenza di un collegamento con le canoniche.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

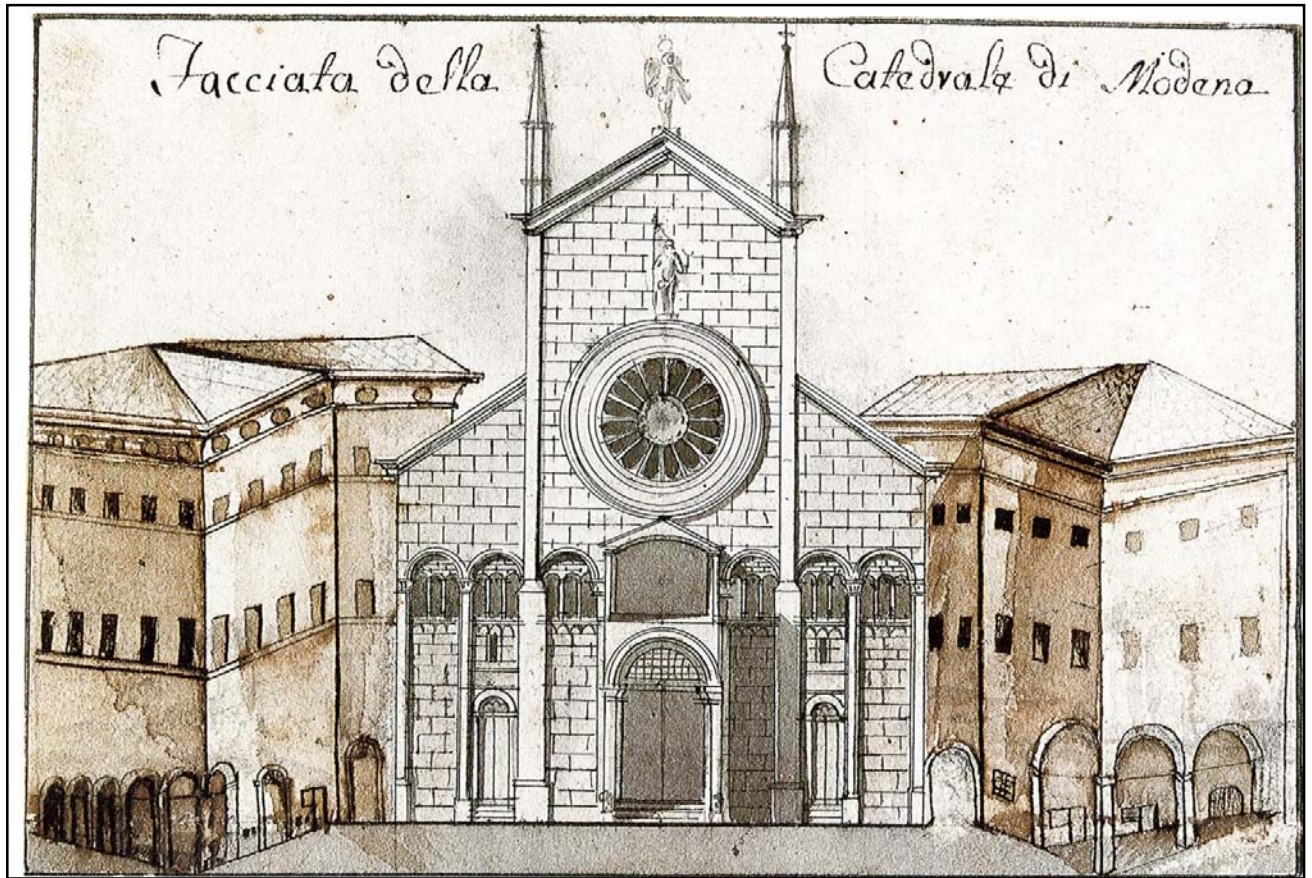


FIG 2- Fronte ovest del Duomo con gli edifici limitrofi XVIII secolo. Reggio Emilia, Archivio Arcivescovile, Nonantola, f.18

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

La pianta realizzata nel 1840 ad opera di D. Urtoller e G. Ferrari, mostra il rapporto tra il Duomo e gli edifici limitrofi che si è mantenuto fino alla fine dell'ottocento (fig.3).

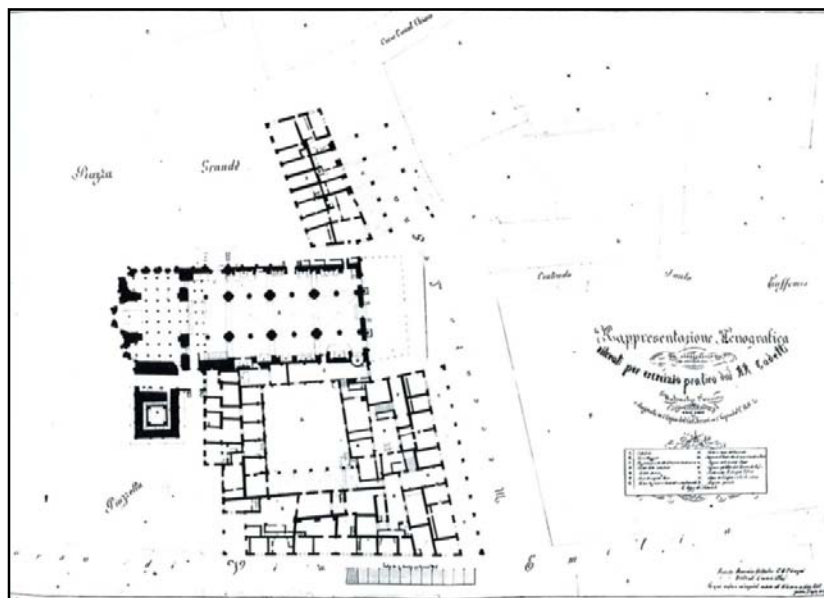


FIG. 3- D. Urtoller e G. Ferrari, planimetria del Duomo e dei fabbricati adiacenti, 1840 ASMo.

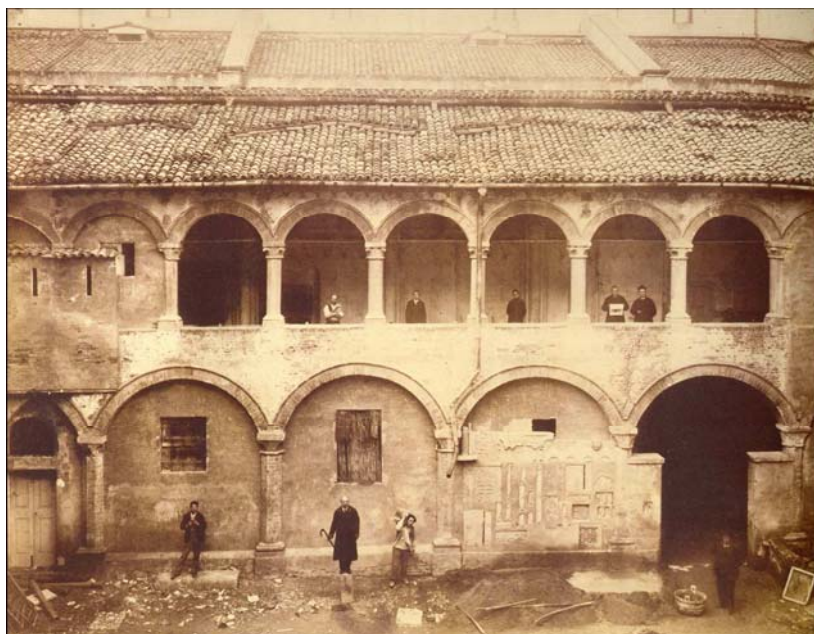


FIG.4 Particolare della canoniche addossate al lato settentrionale. Fotografia dal chiostro dell'ala sud del porticato, da C. Acidini Luchinat, L. Serchia, S. Piconi, *I restauri del Duomo di Modena, 1875-1984*, Modena 1984

1.1 L'analisi delle preesistenze

La necessità di un'analisi delle preesistenze archeologiche nasce dalla volontà di comprendere sia le quote dei livelli antichi necessari ad individuare i piani originali di fondazione dei monumenti e sia per comprendere la consistenza dei manufatti antecedenti.

Come è noto la presenza di importanti substrati archeologici può creare situazioni di consolidamento del terreno differenti e quindi influenzare il rapporto tra costruito e terreno. Sono ricorrenti nella storia dei monumenti processi costruttivi su preesistenze archeologiche, tali da rendere disomogenea la resistenza del suolo di fondazione¹³.

Pur nella certezza che sia sempre la consistenza del terreno di fondazione a creare problemi di cedimenti strutturali, in certi casi è ipotizzabile che alcune differenze di abbassamento siano influenzate da strutture antiche nel sottosuolo di cui si ignora l'esistenza.

I primi scavi che hanno avuto risvolti di tipo archeologico nelle vicinanze del Duomo avvennero nei primi anni del '900 in occasione del rifacimento della pavimentazione della cattedrale (fig. 5).



FIG. 5- Immagine che mostra gli scavi del 1913. Foto Orlandini tratta da Lanfranco e Wiligelmo e Il Duomo di Modena

¹³ Si veda parte 1 Il caso della Cattedrale Metropolitana di Città del Messico: i rapporti tra preesistenze e fondazioni

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

La volontà di trovare la pavimentazione antica spinse i responsabili del restauro a scavare fino a livello dell'estradosso delle fondazioni. I ritrovamenti effettuati nel 1913 mostrarono diversi resti di cui un antico muro trasversale alle navate all'altezza della porta dei Principi, appartenente probabilmente ad un basilica *ad corpus* del V Secolo, ed i resti della Cattedrale che precedeva l'attuale, orientata in senso divergente verso nord.

Questo ritrovamento consente quindi di ipotizzare che, prima della attuale Cattedrale, nello stesso luogo, si fossero succedute due strutture basilicali di cui rimangono solo tracce delle fondazioni. La prima risalente al IV o V Secolo contenuta nel perimetro dell'attuale cattedrale, posizionata tra il presbiterio e la porta dei principi, la seconda del VII o VIII orientata con asse divergente verso settentrione e in vita fino al XI Secolo (fig. 6,7,8,9,10)

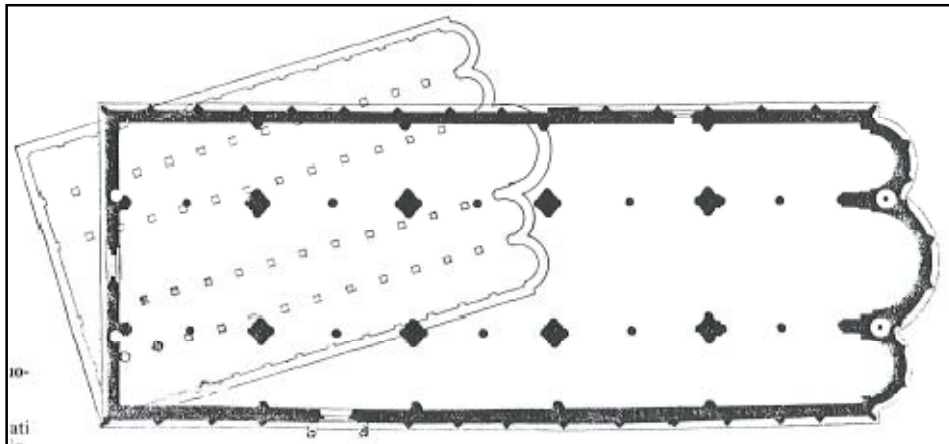


FIG. 6-Immagine di sovrapposizione degli impianti precedenti, in rosso quello del IV secolo e in tratteggiato quello dell'XI secolo, Ipotesi ricostruttiva della posizione dell'antica cattedrale di Frankl (1927) in rosso la posizione della Chiesa del IV secolo.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

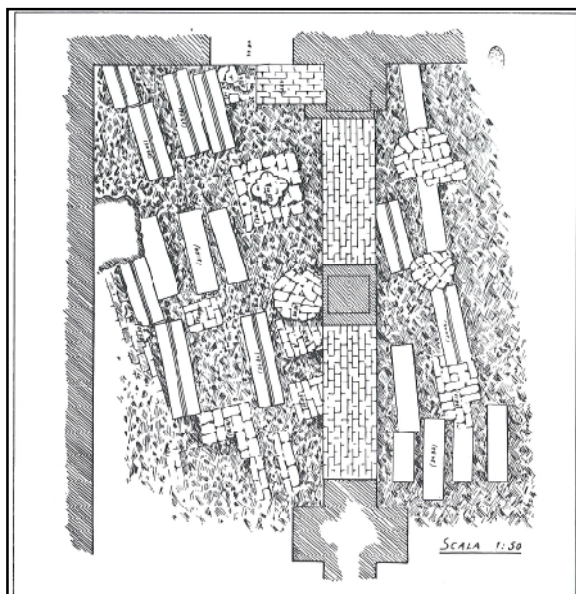


FIG 7- Rilievi degli scavi e disegno dell'ipotetico reticolo di pilastri dell'antica cattedrale

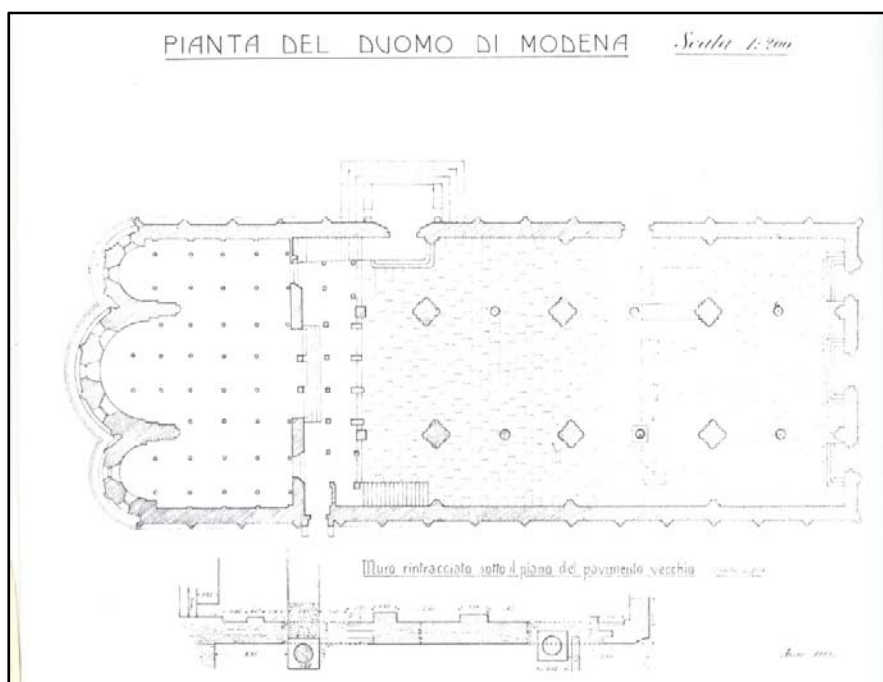


FIG. 8 Domenico Barbanti, 1913 pianta del Duomo di Modena con la nuova pavimentazione e i resti di un antico muro di fondazione probabilmente parte di un basilica ad corpus del V secolo ASBAEE

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

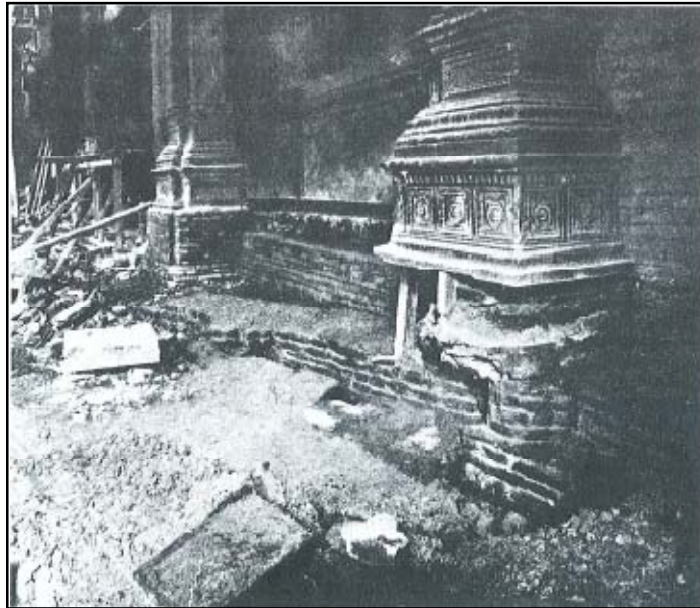


FIG. 9 Immagine degli scavi del 1913, lato sud, si nota la divergenza del muro della cattedrale precedente e l'interferenza con le nuove strutture



FIG. 10 Immagine degli scavi del 1913, si nota forma quadrilobata dei pilastri forti della precedente cattedrale

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

È interessante rileggere brevemente alcuni passi della Cronaca dei restauri del Duomo di Modena¹⁴ per capire come solo in epoca relativamente recente siano state con sorpresa individuate e scoperti resti archeologici:

Modena, 25 agosto 1913

E' venuto a Modena il prof. Nigrisoli dell'Ufficio Scavi e monumenti di Bologna per visitare le vecchie tombe scoperte,... Egli le ritiene tombe cristiane scavate in chiesa preesistente al Duomo o nel Duomo otturate durante la sua prima costruzione. .. si è scoperto avanzi interessantissimi di una chiesa precedente e perfettamente orientata: c'è la parete di mezzogiorno e le pilastrate che dividevano la prima navata dalla maggiore con pilastri in cotto in fascio. Le sepolture trovate sono certamente cristiane ed appartenenti al tempo della chiesa preesistente al Duomo attuale. Questi avanzi, si trovano nell'angolo sud-ovest interno, s'inoltrano dove si trovava la scaletta che andava in vescovado e pare s'introducano sotto il muro del Duomo e si inoltrino nel selciato esterno....I lavori proseguono adagio. I resti della vecchia chiesa si vanno sempre più scoprendo; sembrerebbero cinque navate strette, però conviene credere che si trattasse di chiesa larga, ma poco profonda (agosto 1913

Si è trovato il fondamento di un muro antico largo circa un metro che corre in linea retta dalla porta dei Principi all'altare che vi è di rimpetto, che ha a uguali distanze delle pilastrate. È precedente al Duomo, perché è tagliato al punto dove passano i fondamenti su cui posano le colonne della navata del Duomo attuale. Lungo il muro nel massiccio corre in linea retta una specie di condotto. È muro di materiale frammentario e di costruzione assai mediocre. Che sia la piccola cinta di Leodoino, fatta per fortificare Modena, 4 settembre

A conferma della preesistente basilica del V secolo vi è ritrovamento, di muro curvo centrato rispetto ai pilastri della zona presbiterale che poteva essere l'abside dell'antica preesistenza.

...si è raggiunta una notevole scoperta: al di là dei due pilastri si sviluppa un grosso muro a linea curva a guisa di un abside come nello schizzo (21 luglio 1919):

¹⁴ Tommaso Sandonnini, Cronaca dei restauri del Duomo di Modena tra il 1897-1925, a cura di Orianna Baracchi Giovanardi, Aedes Muratoriana, Modena, 1983

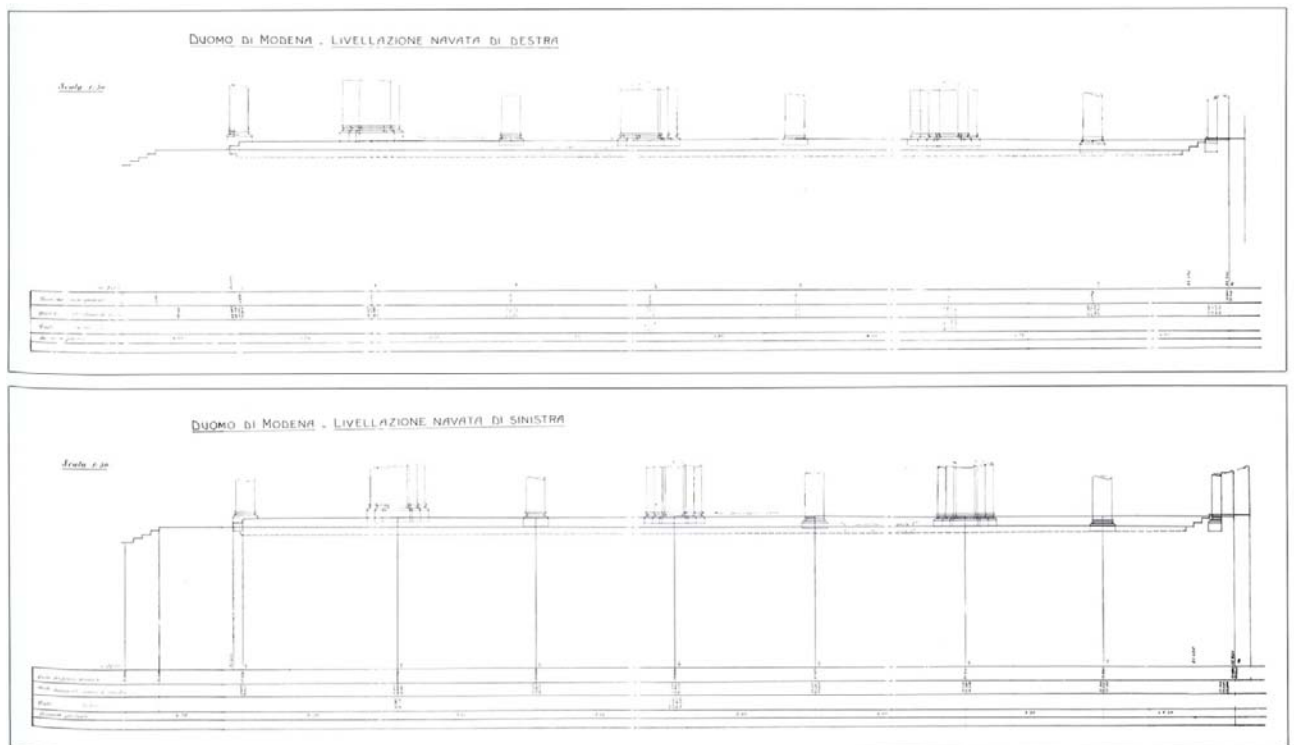
PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare



FIG. 11-immagine allaegata al testo. Sandonnini 1919

Confrontando la livellazione eseguita sui basamenti dei pilastri del lato sud e quelli del lato nord (navata di sinistra), si può notare come quelli a nord risultano, rispetto ad un'ipotetica linea di riferimento, più bassi di quelli a sud.



¹⁵ Domenico Barbanti, *Livellazione navata di destra e Livellazione navata di sinistra* ASBAEE, 1913

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Durante gli anni '80 vennero realizzati degli scavi in occasione del rifacimento del sistema di smaltimento delle acque attorno al Duomo e del suo convogliamento nel sistema fognario. Vennero condotti scavi a sud a nord e a ovest della Cattedrale dando la possibilità di realizzare valutazioni di carattere archeologico sui substrati individuati a partire dal V secolo. La sequenza stratigrafica individuata negli scavi del 1984, dall'alto verso il basso, è stata suddivisa in nove fasi all'interno delle quali si sono riconosciute diverse unità stratigrafiche (US) (fig. 13,14,15) ¹⁶.

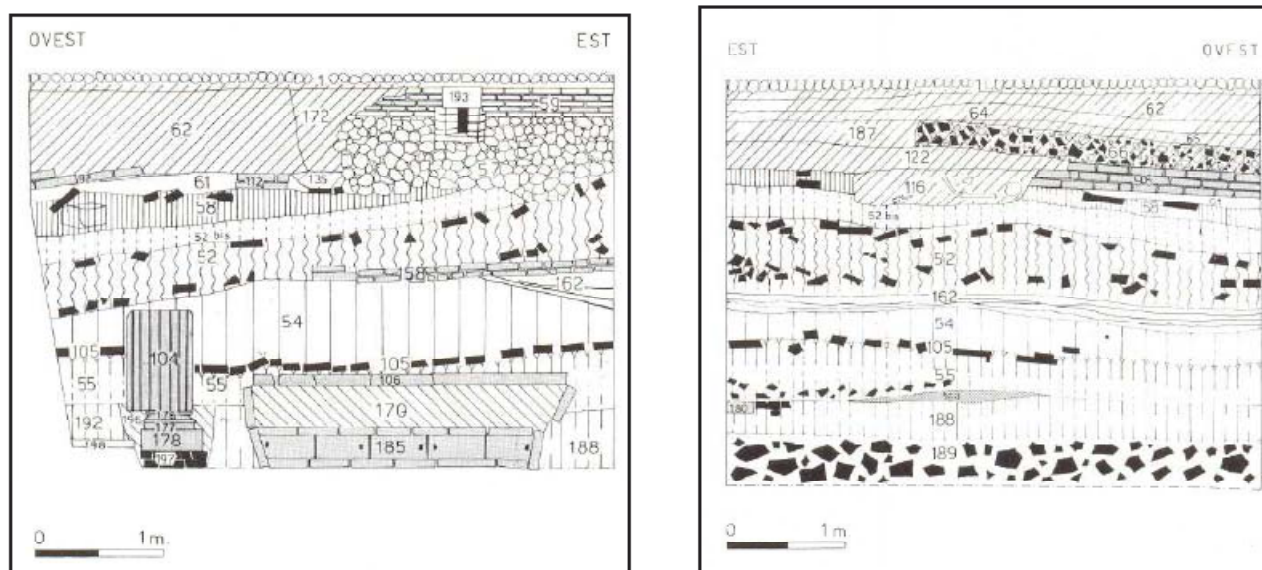


FIG 13-14 Modena, saggi pareti nord e sud

¹⁶ Studi tratti da AA.VV., *Modena dalle origini all'anno mille. Studi di archeologia e storia*, Modena, 1989, Vol.I-II.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

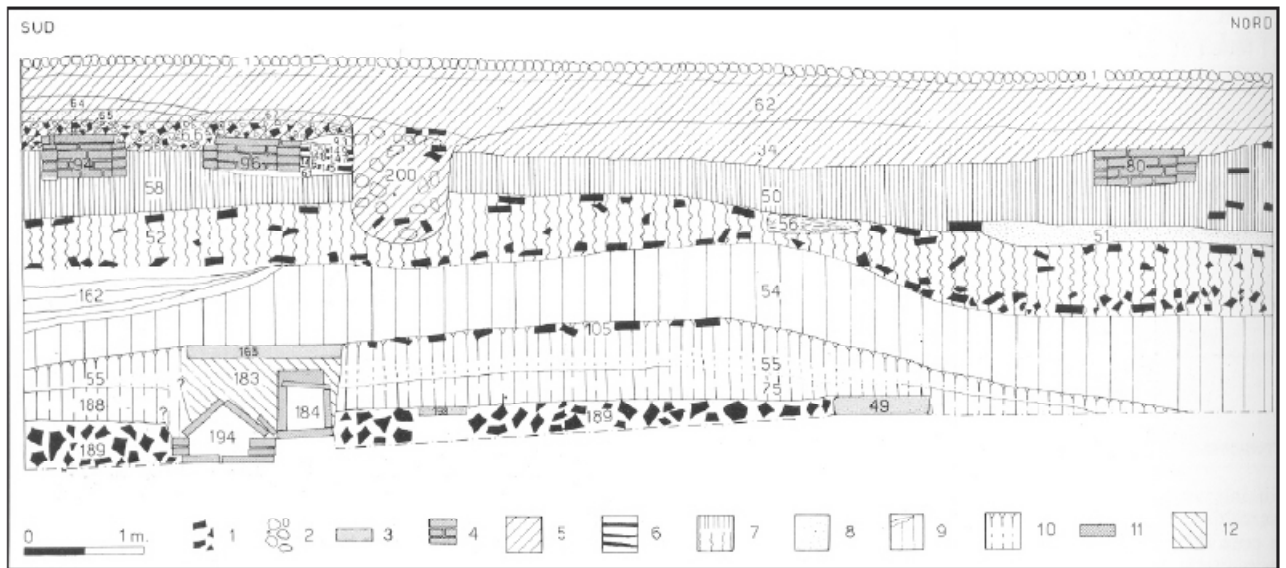


FIG. 15 Modena, saggio parete ovest

Legenda 1. Frammenti laterizi; 2. Pietre; 3. Lastre calcaree; 4. Strutture in laterizi; 5. Riempimenti moderni e livelli pavimentali; 6. Livelli pavimentali basso medievali; 7. Black Earth a forte e media componente organica; 8. Coltri sabbiose di riporto; 9. Alluvioni; 10. Depositi pedogenizzati ricchi di sostanza organica; 11. Pavimento di calce 12. Riempimenti di fosse sepolcrali;

In particolare nella fase più superficiale si sono trovati riempimenti moderni che comprendono la sottofondazione (US 62) per l'attuale pavimentazione della Piazza (US 1), una fossa (US 200) che taglia gran parte dei sottostanti livelli medioevali, una fondazione pertinente ad una struttura a base poligonale (US 57, 59, 172) e una canaletta fognaria (US 193). A questi risultati si sono aggiunti quelli del 1987 che hanno permesso di distinguere quattro periodi principali stratificati sotto la superficie della piazza (*Periodo I* dal V secolo alla fine dell'XI secolo, *Periodo II* dalla fine dell'XI secolo agli inizi del XIV secolo, *Periodo III* dagli inizi del XIV secolo agli inizi dell'ottocento, *Periodo IV* dagli inizi dell'ottocento ai nostri giorni).

Di particolare interesse sono stati gli studi del II periodo, la fase romanica, per comprendere la stratigrafia nel periodo della costruzione di Duomo e Torre indagata nella zona interposta tra i due edifici.

Il tracciato di via Lanfranco coincide con quello più antico della via delle Pelliccerie dove probabilmente si trovavano anche le botteghe degli operai che lavoravano sui monumenti. I saggi hanno scoperto più punti delle fondamenta della cattedrale (fig. 16).

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

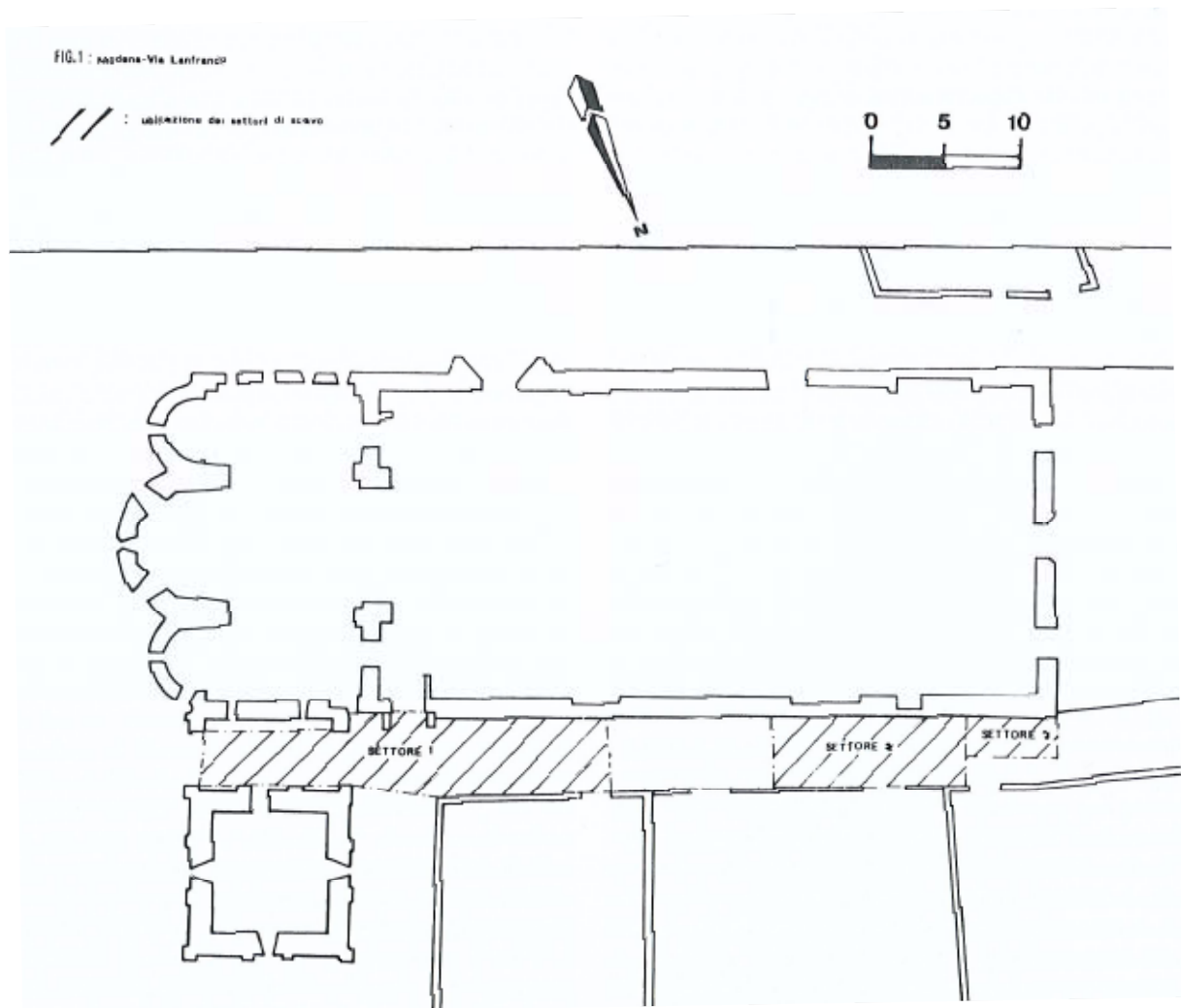


FIG. 16.- Mappatura scavi in via Lanfranco scavi del 1987

Nel settore 2 in prossimità della porta che univa le canoniche alla Cattedrale in prossimità della facciata, sono stati eseguiti scavi ad una profondità di 3.2 m al fine di verificare lo spessore e lo stato di conservazione delle fondazioni per un tratto di 11 m. L'osservazione dello scavo ha mostrato una struttura composta da materiali differenti. In particolare le semicolonne sono appoggiate su un duplice corso di blocchi di pietra di dimensioni irregolari insieme ad alcuni elementi di reimpiego per uno spessore di circa 50 cm (fig. 17)

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

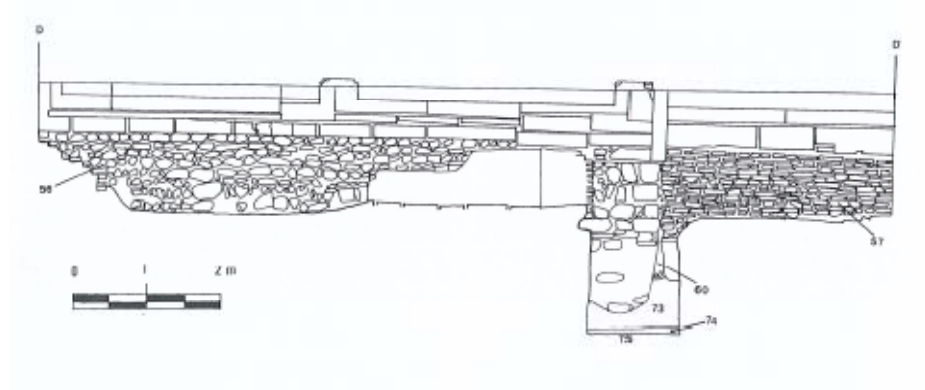


FIG. 17 Rilievo delle fondazione lato settentrionale del Duomo. Prospetto. Scavo settore 2

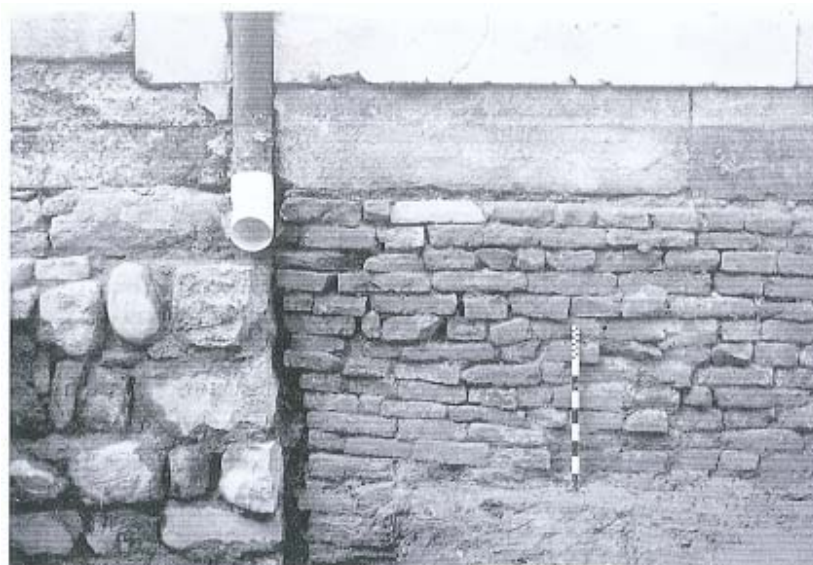


FIG. 18 particolare fotografico del rilievo di cui sopra tra US60 e US73

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Al disotto di questi strati da E verso W si trova una grossolana matrice muraria costituita da ciottoli di fiume legati da abbondante malta di colore grigiastro (US 56) per circa 6,5 m di lunghezza. In prossimità della porta ci sono blocchi di pietra legati dallo stesso tipo di malta per un'estensione di 1 m a un'altezza di 2,62 m avviene un'interruzione del muro in ciottoli. Nell'ultimo tratto si nota una discontinuità verticale con spessore variabile da 2 a 18 cm (US60). Proseguendo verso W la fondazione, al di sotto delle lastre di pietra, mette in evidenza letti di laterizio legati da mala giallastra. Questa stessa muratura si è trovata nei settori 1 e 3. Nell'estremità occidentale del settore 1 è stata trovata una costruzione di ciottoli simile a quella del settore 2 (US56).

Gli scavi tra 1984 e il 1987 localizzati lungo i lati est e nord del Duomo, hanno consentito nuovi approfondimenti¹⁷.

In particolare mettendo alla luce la necropoli riferibile al primo periodo, antecedente alla costruzione del Duomo e della Torre, gli scavi hanno evidenziato le fondazioni del lato settentrionale del Duomo e mostrato la stratigrafia riferibile al periodo romano e rinascimentale.

Sulla base dei rinvenimenti si è potuto determinare il piano campagna di età basso medievale dal quale si è impiantato il cantiere per la costruzione del duomo e della Ghirlandina.

La quota è stata fissata pari a 0.50 m in prossimità delle absidi e 0.85 m in prossimità della torre. Valutazioni che fanno desumere l'abbassamento della torre sul lato sud, tenendo come riferimento la quota dell'antica porta d'ingresso pari a 1.10 m rispetto all'antico piano di campagna¹⁸.

Gli studi conseguenti agli scavi archeologici hanno altresì messo in evidenza un'ulteriore relazione tra il substrato archeologico e il costruito.

In particolare è risultato evidente come il piano di posa delle fondazioni non fosse alla quota dei reperti romani ma a circa 3.80 m dalla quota dell'antico p.c., fermandosi così a pochi centimetri della via consolare che si sovrapponeva solo per una metà alle fondazioni della Torre.

¹⁷ La ricerca condotta dal Dott. Donato Labate nell'ambito dell'attività del comitato scientifico del Comune di Modena

¹⁸ Questa ipotesi in seguito ripresa corrisponde alla valutazione fatta dal Prf. Renato Lancellotta.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Inoltre, a fianco della massicciata dell'antica via Emilia, si suppone ci fosse un depressione, probabilmente determinata da un fossato a lato della strada, che rimarrebbe sottostante il lato meridionale delle fondazioni della torre (fig.19). In questo modo si sarebbe generata una rigidità differente del terreno a sud e a nord della Torre, determinando abbassamenti differenziali, più significativi a sud.

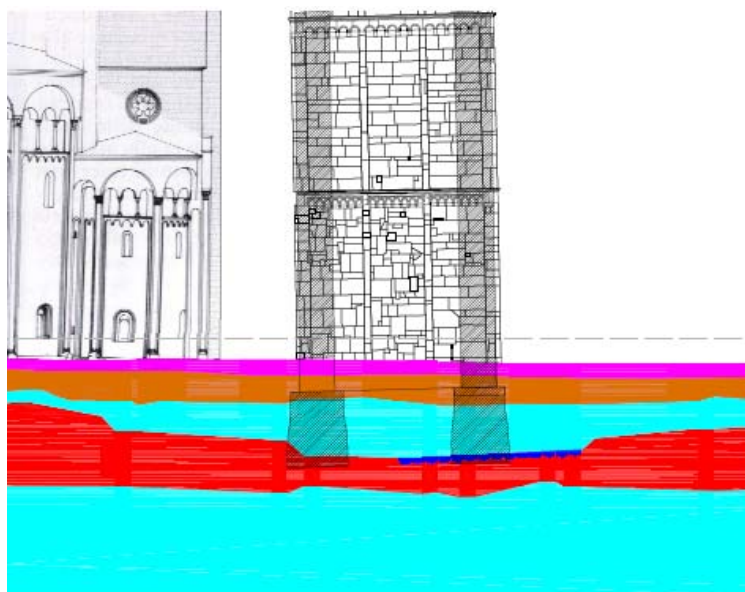


FIG. 19 - Schema descrittivo della posizione dell'antica via Emilia rispetto alle fondazioni della torre

1.2 Le fondazioni di Torre e Duomo. Le indagini

A partire dai primi anni dell'800 si osserva in Europa e principalmente in Francia un crescente interesse per la salvaguardia dei monumenti con la creazione di scuole di restauro che inevitabilmente influenzeranno anche l'Italia. A Modena l'interesse nei confronti della conservazione dei monumenti si manifestò nello stesso periodo, ma il momento in cui organicamente si iniziò a lavorare sulle fabbriche antiche della piazza Grande corrisponde all'anno in cui il Ministero dei Beni Culturali decise di estendere a tutte le provincie italiane (1874) l'obbligo di formare le commissioni conservatrici di belle arti (*Commissione Consultiva Conservatrice di Belle Arti*)¹⁹. Anche se il fermento culturale²⁰ e l'evento sismico del 1832²¹ obbligano ad approfondire, in modo anticipato, le conoscenze sulla staticità delle strutture da parte dei medesimi membri della commissione, il primo sopralluogo ufficiale avvenne nel 1875. Da questa data si susseguirono progetti e interventi : nel 1832²² successivamente al terremoto, nel 1876 per i lavori di convogliamento delle acque reflue e nel 1913 per lavori di rifacimento della pavimentazione interna²³.

Nella nuova Cattedrale l'analisi dei saggi eseguiti in prossimità delle fondazioni hanno mostrato una struttura fondale non sempre omogenea.

In generale i muri perimetrali, sono sostenuti da un sistema di fondazioni nastriformi caratterizzate da una stratigrafia variabile: i primi due strati sono costituiti da corsi sovrapposti di

¹⁹ La prima commissione a Modena fu costituita da tre membri, Adeodato Malatesta, Ing. Cesare Costa, Ferdinando Ascoli, il primo, insegnante in accademia e artista di corte presso gli Estensi, il secondo ormai alla fine di una lunga carriera divisa tra professione e insegnamento, il terzo massimo esperto di arte medievale a Modena.

²⁰ Gli stimoli culturali ad un'azione sistematica di restauro sulle strutture storiche non sono mai mancati a partire dalla visita di Papa PIO IX a Modena che commenta lo stato di abbandono degli edifici, il terremoto del 1832 che preoccupa i canonici sulla stabilità delle fabbriche e lo stesso Comune che nel 1871 comunica ai canonici l'obbligo di risolvere il problema dell'allontanamento delle acque reflue.

²¹ Terremoto con epicentro il territorio di Reggio Emilia magnitudo 7.5 *Alcune notizie sui terremoti compilate da P.T.S.* Biblioteca della società Napoletana di Storia patria di Napoli

²² Indagini condotte dall'Ing. Costa Membro prima del comitato sui lavori del Duomo insieme a Adeodato Malatesta, Ing. Cesare Costa, Ferdinando Ascoli e poi della *Commissione Consultiva Conservatrice di Belle Arti* istituita a Modena nel 1874

²³ Tommaso Sandonnini, Modena, 5 aprile 1913, "oggi e ieri hanno fatto nuovi assaggi attorno alle colonne della navata dell'interno per scoprirne le basi e per vedere se si trovano tracce di selciato precedente. Finora nulla, sotto le attuali lastre si trova un selciato detto matto, composto da mattoni in cotto che forse era l'antico selciato quando le basi delle colonne erano scoperte...Finora sotto i lastroni non si trova che terriccio sabbioso e non pigiato con pochi frammenti di mattoni...", in Cronaca dei restauri del duomo di Modena (1897-1925) a cura di Orianna Baracchi Giovanardi, Aedes Muratoriana, Modena 1983, pp 282

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

pietre²⁴, mentre i successivi sono di muratura in laterizio o ciottoli di fiume fino a raggiungere una profondità di circa 4 braccia (circa 3 m) (fig.20-21).

I rilievi realizzati in occasione del rifacimento del basamento sul lato meridionale realizzati da Costa nel 1875, mostrano una differenza delle fondazioni da ovest a est sia per fattura che per tecnologia: vicino alla porta dei principi c'è ancora l'impianto descritto sopra, mentre ai lati della porta regia, scompaiono le pietre, lasciando solo conci lapidei di piccole dimensioni.

Più coerenti risultano le fondazioni del lato nord, scoperte durante gli scavi archeologici del 1987²⁵, in cui si possono riconoscere le successioni stratigrafiche descritte sopra, osservando però che al di sotto dei corsi lapidei ci sono tratti di murature in laterizio alternate a murature in pietra.

I pilastri delle navate appoggiano su una basamento modanato in pietra che a sua volta trasferisce il peso su una fondazione continua in muratura di laterizio. Interessante è osservare che le colonne appoggiano la loro base interamente sulla trave di fondazione, al contrario dei pilastri. Infatti in corrispondenza dei lobi trasversali, la fondazione segue il perimetro del pilastro allargandosi puntualmente.

In occasione degli scavi del 1913, si riuscì a descrivere la forma e la consistenza delle fondazioni dei pilastri inoltre venne realizzato un rilievo altimetrico che consentì di dedurre i dislivelli tra le basi delle colonne e dei pilastri.

²⁴ Le dimensioni erano l = 3 braccia h 2 e alti 10 once ovvero 156 cm x 104 cm x 43 cm

²⁵ Vedi paragrafo *L'analisi delle preesistenze*

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

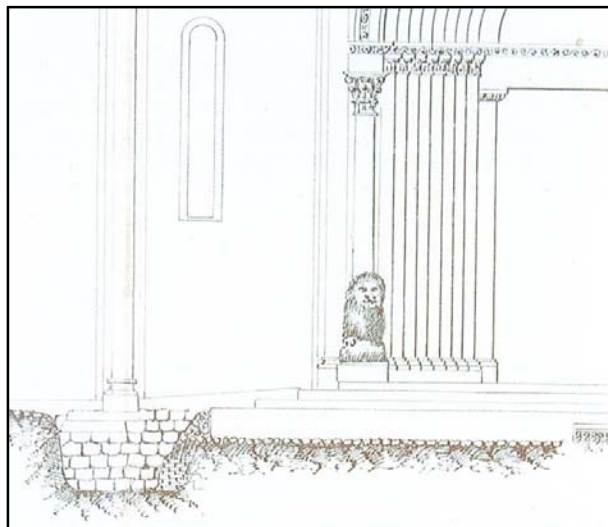


FIG. 20- Carlo Barberi, dettaglio del disegno del fianco meridionale del Duomo 1875-1876, Biblioteca Poletti ASMo, Geno Civile, f.24 bis. Saggio durante gli scavi per il rifacimento del cordolo (1882-1886) Il livello della piazza, e le fondazioni a fianco della porta Regia.

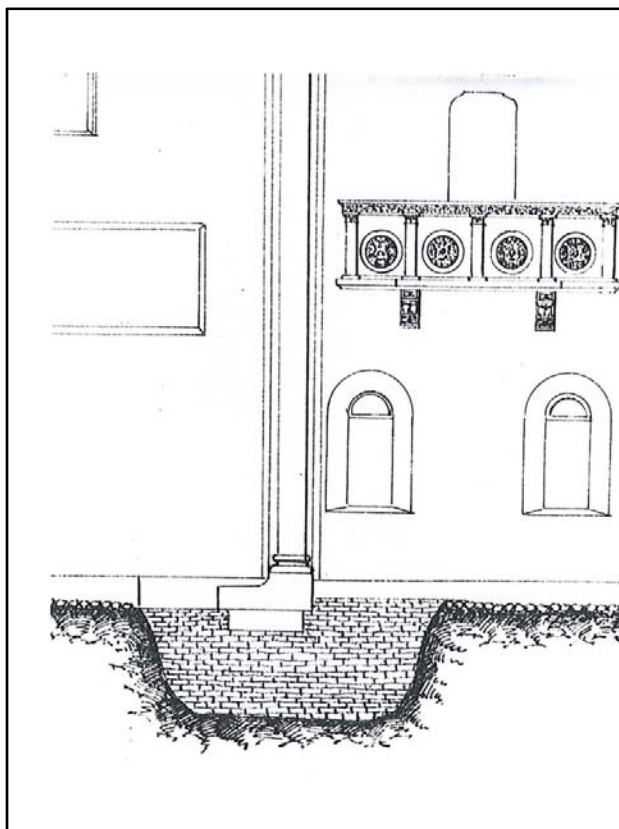


FIG. 21 - Carlo Barberi, dettaglio del disegno del fianco meridionale del Duomo 1875-1876, Biblioteca Poletti ASMo, Geno Civile, f.24 bis., Dettaglio con zoccolo e sezione di scavo

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Per conoscere la struttura fondale della torre si deve aspettare il 1898 quando, nell'ambito degli studi sull'inclinazione e sulla stabilità della torre vengono eseguiti scavi esplorativi sia all'interno del seminterrato, sia lungo il lato meridionale sia lungo il lato settentrionale²⁶. Sulle cronache dei lavori di restauro redatte dal Tommaso Sandonnini²⁷ si legge:

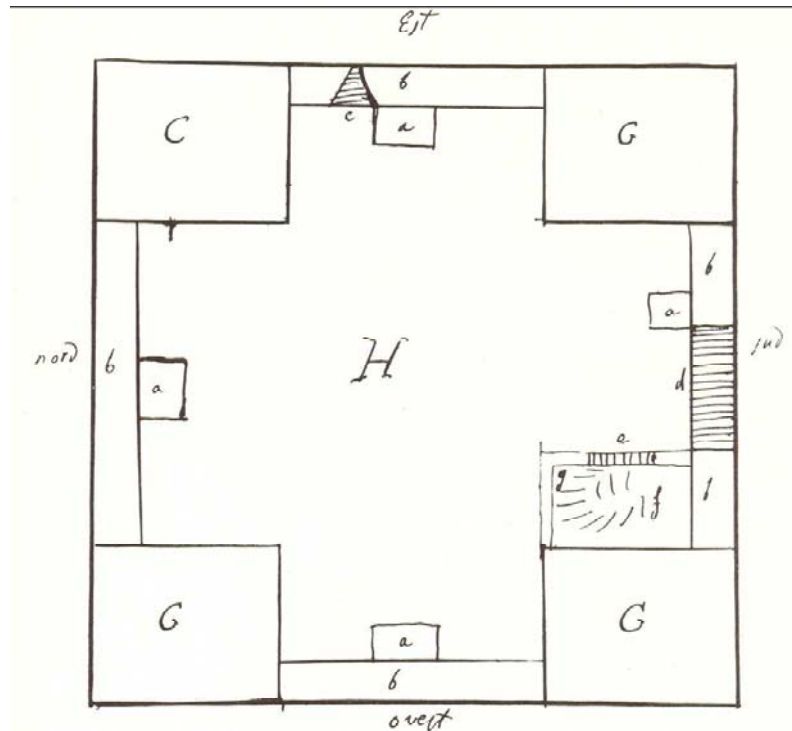
“...le fondamenta del nuovo muro della sagrestia sono già a fior di terra ... il Comune fa calcolare lo strapiombo della Ghirlandina e in questa occasione ha fatto fare alcuni scavi nel fondo della torre all'interno. Nella parte che guarda il palazzo comunale si è trovato un'architrave in marmo, segno di porta o finestra. Fatti gli opportuni saggi si è visto che era una feritoia che dava luce al sotterraneo, un tempo corrispondente al livello stradale attuale. Nella parte verso il duomo si trova un altro architrave, si è veduto che era quello della porta che dava accesso alla torre; l'architrave è formato da tanti lastroni in marmi, quanto è lo spessore del muro della torre; in un lastrone vi sono alcune lettere belle grandi ... sull'intonaco del muro che chiudeva l'antica porta ... erano scritte le seguenti parole: <adì 2 giugno forni' il menia di fare impire la tore da basse dal 1607>. Questo riempimento ed alzamento del fondo della torre fu fatto dal Menia per difenderlo dalle acque nascenti. La porta è larga m. 1.25, sopravanza dal fondo attuale m 1.35, ai quali aggiungendo m 0.90, la distanza che corre fra l'antico piano e l'attuale, si ha l'altezza della porta in metri 2.25 circa. ...” Modena, 26 novembre 1898.

²⁶ Tra il 1899 e il 1901 si svolsero una serie di accertamenti sulla torre affidati per la parte statica al prof. Silvio Canevazzi, e per la parte sulla pendenza a Francesco Cavani dell'Ateneo di Bologna. Sotto il controllo dell'Ufficio Regionale, il Comune ordinò degli scavi esplorativi sulle fondamenta della parte settentrionale.

²⁷ Tommaso Sandonnini è stato il segretario del Comitato per i restauri del duomo che si costituisce nell'estate del 1895. Il comitato riesce in poco tempo a raccogliere i favori della cittadinanza rimediando la somma necessaria per i lavori che iniziano dal progetto, già approvato dal Ministero, di riduzione dell'abside settentrionale, per poi estendersi a tutto il Duomo.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare



H – sotterraneo della torre

C – pilastri che vanno fino a tutta l'altezza del quadro della torre

a – pilastro su cui poggia la volta a crociera del sotterraneo

b – muro perimetrale della torre

c – finestra feritoia

d – antica porta d'accesso alla torre

e – porta d'accesso alla chiocciola otturata che metteva al piano sopra il sotterraneo

f – chiocciola

g – polla d'acqua

Disegno Trattato dal registro dei lavori di Tommaso Sandonnini

FIG. 22- Rilievo dell'interrato della Torre. Sandonnini 1898

Gli scavi all'interno vennero sospesi a causa della presenza di acqua e un anno dopo vennero realizzati nuovi scavi, all'esterno dell'edificio, lungo il lato meridionale, come si evince dalle cronache del Sandonnini²⁸.

²⁸ Tommaso. Sandonnini, Cronaca dei restauri della Cattedrale di Modena 1897-1913 (vol.I), 1914-1925 (vol.II), a cura di Orianna Baracchi, Aedes Muratoriana, Modena 1983

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

“... da una settimana si è dato principio ad uno scavo al piede della torre dalla parte del mezzogiorno e cioè sotto il voltone fra torre e duomo. In mezzo a questa parete si è scoperta l'antica porta che serviva d'ingresso, la sommità della quale è al livello dell'attuale piano stradale; il pietrone enorme che serve di architrave è quindi sopra da terra. La soglia della porta è a m 1.80 circa di profondità ed è sul banchettone che girava attorno alla torre a guisa di base, somigliante a quello del Duomo. La porta è larga m 1.2 alta 1.80; l'architrave è di un asola pietra lungo m.... ed alta m 0.70 . La base su cui poggia la torre sporge dal muro della torre per m 0.50 è di macigno con l'orlo arrotondato, come si vede da un pezzo dello stesso, staccatosi per colpi dei muratori. Dunque due metri della torre sono interrati, ...”. Modena, 11 settembre 1899,

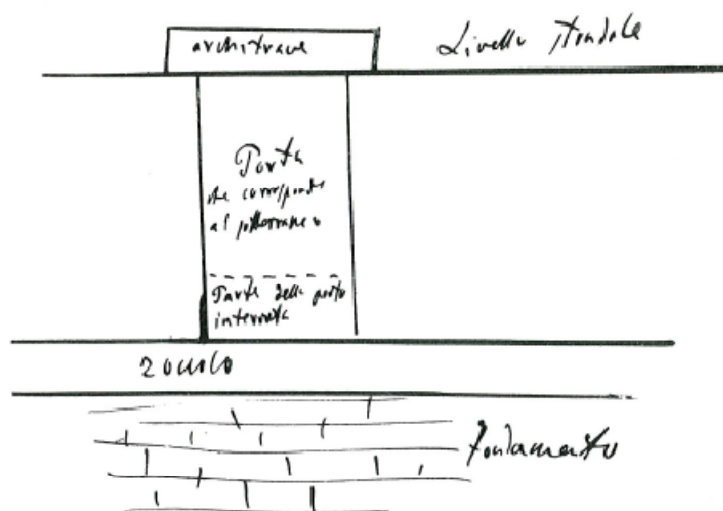


FIG. 23 Disegno allegato al testo di Tommaso Sandonnini, 11 settembre 1899, il ritrovamento dell'antico ingresso

Gli scavi esplorativi, che proseguono sugli altri lati della torre mettono in evidenza una nuova situazione relativa alle basi su cui poggiano le fondazioni della Torre.

Lo scavo fatto attorno alla torre è già stato chiuso, a cagione delle acque che sorgevano da ogni parte. Se ne è fatto un altro dal lato sulla piazzetta Tassoni verso l'angolo nord-est. Levati i lastroni a piano inclinato che circondano la torre si è trovato una specie di selciato composto di

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

blocchi di marmo o macigno, diviso in tre ordini che indicherebbe il successivo alzarsi del terreno. Al dissotto c'è lo zoccolo sporgente, formato da un blocco di macigno, sotto il quale in linea si trova un muro in cotto uguale a quello dell'altra parte. Proseguito lo scavo fin oltre tre metri la muraglia in cotto cessa di essere regolare e prende le forme di vero fondamento. Il muro però prosegue quasi a piombo e vi è appena traccia di scarpa di riseghe: una piccolissima dove cessa il muro regolare, dopo la quale comincia il muro irregolare che quasi insensibilmente prosegue a scarpa. Cadono quindi tutte le ciarle e la supposizione che davano misure favolose alle fondamenta della torre, che doveva posare sopra una immensa piattaforma. Tutto ciò conferma l'opinione che l'attuale torre sia stata fabbricata sugli avanzi di una precedente ed a questa si riferisca l'antica iscrizione che il vescovo Manzoli asseriva che si trovava nell'abitazione del torreggiano e cioè « Opus Constrlxit tempore domini Desideri regis per inditionem XII ». La parte del muro regolare sarebbe un avanzo della parte della torre sopra il suolo, l'altro le fondamenta. Modena 10 ottobre 1899 (fig. 24)

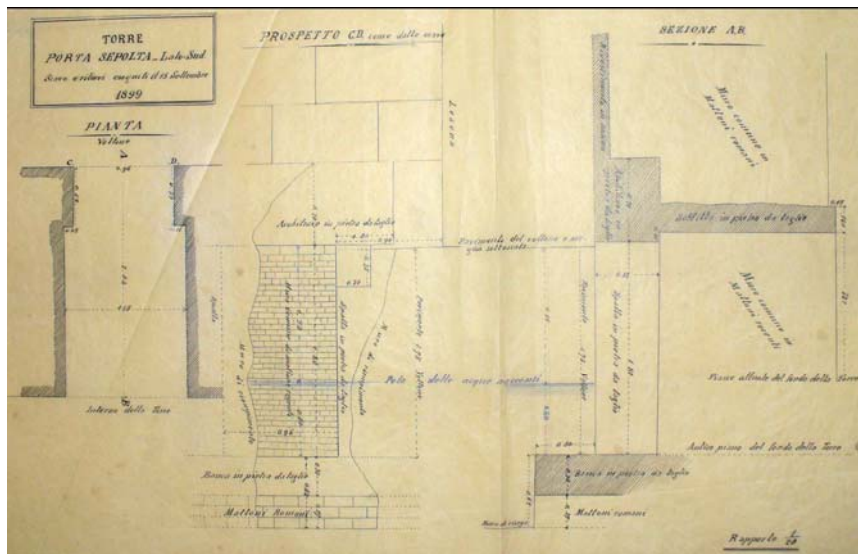


FIG. 24 Ufficio Tecnico Comune di Modena, pianta prospetto sezione della primitiva porta della Torre, 1899 ASCMo, cartella 7 bis

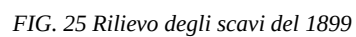
PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

In riferimento agli scavi condotti all'angolo nord est si decise di approfondirli fino a scoprire tutto l'ammasso fondale.

Lo scavo attorno alla torre è stato assunto dal comitato dei restauri del Duomo. Si è allargato assai lo scavo per avere mezzo di approfondirsi con le sponde a scarpa, onde non frani il terreno. Alla profondità di m. 4,90 si è trovato un selciato romano della via Emilia formato con lastroni di macigno informi su cui si scorge ancora il solco prodotto dall'attrito delle ruote; al di sotto del piano romano 60 o 70 cm. finiscono le fondamenta della torre, sopra un terreno limaccioso indurito dalla enorme compressione. La meraviglia è stata grande: si credeva di trovare una immensa piattaforma ed invece si è trovato un fondamento che va giù quasi a perpendicolo per soli 6 metri appena. L'ingegner Tosi dell'ufficio Regionale e l'ing. Marchi dell'ufficio Tecnico Municipale hanno fatto il rilievo con le misure esatte. Si vede che arrivati al selciato romano su di questo si posero le fondamenta della torre, che forse fu quella fatta ai tempi di re Desiderio. Dopo sui ruderi di essi si costruì l'attuale Ghirlandina. La torre poi si approfondì per oltre 70 cm. Di fatto, il selciato romano è in pendenza verso la torre, il che indica che questa si è sprofondata. Modena, 30 ottobre 1899

Queste indagini da un lato consentirono di comprendere la fattura del complesso delle fondazioni, e dall'altro scoprire aperture sotto il manto stradale, indice di uno sprofondamento della struttura. Inoltre vennero avvalorate alcune ipotesi sulla possibile preesistenza di una torre di origini romane (fig. 25).



PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Grazie agli attenti rilievi eseguiti a seguito di questa indagine si riuscì a stimare lo sprofondamento della torre attraverso lo studio dei livelli individuati. Il primo dato interessante che emerge dallo scavo è la presenza di una banchina interrata²⁹ a circa 1.36 m dal p.c. del tempo e a circa 4.02 m dalla quota fissata dall'istituto Geografico Militare (IGM). Il secondo dato riguarda la forma scalare delle fondazioni, infatti 2.79 metri sotto la linea di livellazione si allarga di 5 cm e di altri 14 cm a 4.45 m. Quindi in totale la fondazione sporge dal profilo della torre di circa 0.72m. Il terzo dato è la presenza di un basolato probabilmente appartenente all'antica via Emilia ad una profondità di 4.90 m. Oltre a questo si è potuto stabilire l'assenza dei pali di fondazione³⁰. Le informazioni raccolte da questa campagna di indagini, unitamente a valutazioni sulla staticità della fabbrica hanno portato alla conclusione i tecnici che la torre fosse affondata in modo non uniforme di circa un metro, questa disomogeneità per i tecnici dimostrava la differente inclinazione della torre nelle diverse direzioni.

Nello stesso periodo Silvio Canevazzi, tecnico incaricato per valutare la stabilità della Torre realizzò una stima sul carico a terra che esercitava la torre a costruzione terminata. Stimando un peso variabile della torre compreso tra i 7433 t a 9325 t dividendolo per la superficie della fondazione pensata come se fosse a platea gli veniva un carico a terra di circa 6 Kg/cm² che poteva crescere considerando sollecitazioni dovute al vento fino a 11 Kg/cm². Il Canevazzi commentando questi risultati disse *“se per un motivo dovessero cambiare le condizioni del terreno stesso sarebbe a temere seriamente delle condizioni di stabilità di quella torre”*.³¹ Sempre secondo il Canevazzi la fase di sprofondamento maggiore sarebbe avvenuta al momento della sopraelevazione della torre realizzata tra il 1261 e il 1319 che avrebbe incrementato in percentuale rispetto al peso totale il carico di circa 14%³².

²⁹ Faccioli 1901 p52 *“di altezza 0.42 e sporgente 0,48m”*

³⁰ La certezza dell'assenza dei pali di fondazione si è avuta solo nel 2007 durante i sondaggi guidati dal prf. Lancellotta

³¹ Francesco Cavani, *Pendenza, stabilità e movimenti delle torri la Grisenda di Bologna e la Ghirlandina di Modena*, Bologna 1903, p.44

³² Secondo il Canevazzi il peso dell'ultimo livello della parte quadrata della Torre è di 500t e quello della parte ottagonale e la guglia di 850 t in tutto 1350 t

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Gli studi sull'ammasso fondale di Torre e Duomo sono stati recentemente arricchiti da due contributi forniti dagli studiosi del Comitato scientifico che si occupa della Torre Ghirlandina.

Nel settembre del 2007 sono state condotte altre indagini sulle fondazioni della Torre per cercare di indagare le ragioni dell'abbassamento e dell'inclinazione; contemporaneamente sono stati condotti degli studi sulle preesistenze archeologiche e sui livelli antichi. I due approcci sono stati seguiti dal Prof. Renato Lancellotta che si è basato su indagini geotecniche e dal Dott. Donato Labate che ha studiato gli scavi archeologici condotti attorno alla Torre e al Duomo.

I sondaggi geologici realizzati nel settembre 2007, confrontati con quelli del 1899 hanno consentito agli studiosi di formulare delle ipotesi che descrivessero la consistenza dello sprofondamento (fig.26)

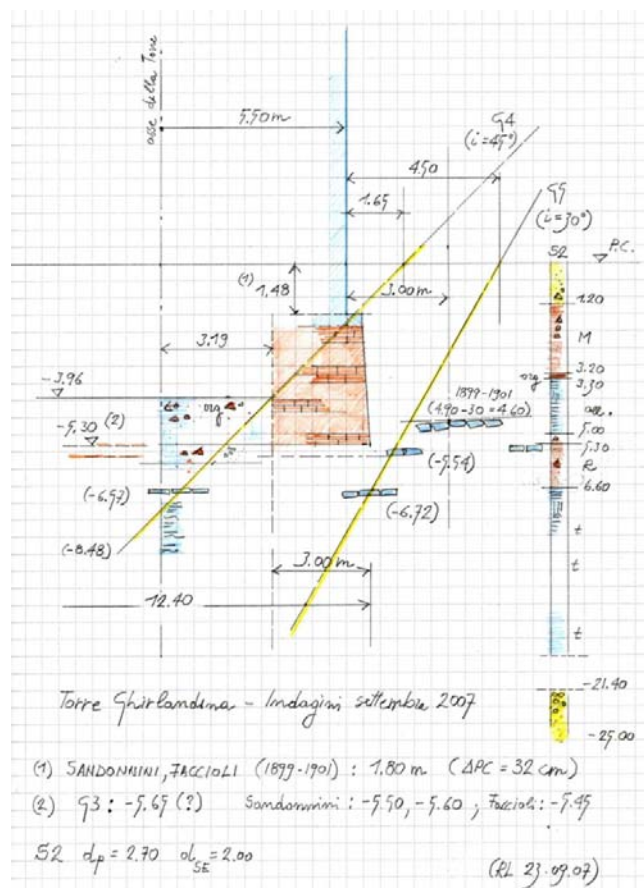


FIG. 26– Disegno riassuntivo dei risultati dei sondaggi del 2007. Lancellotta 2007

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Il sondaggi più significativi qui decritti sono il G4 e il G5 collocati lungo il fronte nord; il primo realizzato ad 1.65 m dalla Torre ed inclinato di 45° rispetto alla verticale; il secondo eseguito a 4.50 m dalla Torre inclinato di 30° dalla verticale.

Il sondaggio G4 ha permesso di individuare

- La banchina di bordo della Torre ad una quota di 1.48 m dal p.c.
- La forma cava e non a platea della fondazione
- Lo spessore del muro di fondazione valutato pari a 3 m
- L'assenza di pali di fondazione grazie al raggiungimento a 8.48 m di profondità del sondaggio
- La presenza del basolato della via Emilia a 6.57 m e riporti antropici romani fino a 7.42 m
- La stratigrafia tra 3.96 -5.79 m costituita da riporti antropici medievali depositati su sedimenti alluvionali medievali

Il sondaggio G5 ha permesso di individuare:

- La via Emilia a ridosso della fondazione a 5.45 m
- La via Emilia al di sotto della fondazione a 6.75 m

In riferimento ai saggi del 1899, se si considera la quota della via Emilia corrispondente a quella originale e assumendo come piano di riferimento l'estradosso del cordolo lapideo che corre attorno alla Torre, si può determinare una distanza di riferimento confrontabile con i risultati del 2007.

La distanza del basolato dall'estradosso risulta nel 1899 pari a 3.54 m (4.90 m-1.36 m) la stessa differenza fatta con i risultati più recenti risulterebbe 5.27 m (6.75 m-1.48 m), e questo vorrebbe dire che la parete nord avrebbe subito un cedimento pari a $5.27-3.54 = 1.73$ m . Inoltre immaginando di riportare la banchina al livello di p.c. grazie ad un traslazione di 1.48 m si può pensare ad un cedimento in atto già al momento della realizzazione delle fondazioni pari a $1.73-1.48 = 0.25$ m. In questo modo la quota d'imposta della fondazione sarebbe a 3.80 m (3.54+0.25). Con queste ipotesi si avrebbe che il cedimento calcolato di 1.73 m.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Vien comunque da considerare che, secondo Lancellotta, se osserviamo la quota della via Emilia determinata nel 1899 che poteva essere influenzata dall'interazione con la Torre, e utilizzando i risultati di un altro sondaggio chiamato E2 (sul lato nord più distante da G4 e G5) che trova la via consolare a 4.80 dall'attuale p.c., si può dedurre: un cedimento della parete nord di 1.95 (6.75-4.80), un corrispondente cedimento della parete sud pari a 2.19 m e quindi un cedimento medio pari a 2.07.

In questa seconda ipotesi il cedimento iniziale risulterebbe di 0.47 m e il piano di posa delle fondazioni si collocherebbe a circa 3.70 m dall'attuale p.c.

Infine osservando i risultati del sondaggio S5 eseguito vicino a 3 m di distanza dall'abside sud inclinato di 45° rispetto alla verticale si osserva un piano di posa di circa 3.68 m; questo potrebbe significare una medesima quota d'imposta delle fondazioni.

Questi sondaggi oltre alle evidenze stratigrafiche hanno consentito di verificare l'assenza di una torre preesistente e di pali di fondazione.

1.3 La questione geologica : dati storici ed ultimi aggiornamenti

La ricerca documentaria più aggiornata ed esaustiva che fa riferimento al sottosuolo modenese è stata redatta nel 1988 dall'Amministrazione Comunale. Il documento è incentrato sullo studio della subsidenza del territorio modenese ma contemporaneamente fornisce anche utili informazioni per quanto concerne la caratterizzazione geotecnica del suolo del comune di Modena e in particolare di Piazza Grande.

Lo studio iniziato nel 1988, realizzato in collaborazione con il prof. Russo dell'Ateneo di Bologna, con il prof. Cancelli del Politecnico di Milano, il CNR di Venezia e l'Agip di Milano, oltre a raccogliere la bibliografia disponibile sugli studi geologici compiuti sul territorio modenese, ha dato inizio ad una ricerca, ancora oggi in corso, sui fenomeni di abbassamento del terreno di Modena; concentrandosi sulla piazza centrale della città dove sorgono gli edifici monumentali. Tra le diverse tecnologie messe in campo per lo studio delle trasformazioni del suolo il Comune ha provveduto all'istallazione di una rete di livellazione topografica, alla revisione di quella esistente e alla creazione di una "sottorete" presente nella piazza nonché all'allestimento di strumentazioni interrato per il controllo della falda acquifera e dei cedimenti differenziali degli strati di terreno.

Il fenomeno della subsidenza come è noto corrisponde ad un lento e progressivo abbassamento della terra dovuto al compattamento dei materiali che può avere due origini: la prima, naturale, legata allo schiacciamento degli strati più porosi sottoposti a carichi; la seconda, antropica, legata alla captazione di acqua o gas naturali per scopi industriali e civili.

Per ricostruire i fenomeni di subsidenza naturali sono stati presi in considerazione sia i dati forniti dagli studi del prof. Colombetti del 1984 relativamente all'area pedecollinare della Pianura padana, sia le informazioni ricavate dai sondaggi realizzati in Piazza Grande nello stesso anno. Queste perforazioni hanno consentito da un lato la datazione degli strati di terreno dei livelli più porosi al C14, dall'altro hanno permesso di compiere alcune ipotesi e considerazioni sui cambiamenti delle quote altimetriche dei livelli di terreno³³.

Lo studio dei cambiamenti altimetrici del terreno ha compreso la raccolta dei dati a partire dalla livellazione realizzata dall'Istituto Geografico Militare (I.G.M. 1887-89) fino a

³³ Gli strati tra 11.5 , e 12. 3 m dal piano campagna hanno un'età che oscilla tra i 4580, 4610 anni, e tra i 41 e 48 metri un'età di 30.000 anni

successive misurazioni degli anni '50-'60, epoca in cui si pensa che il fenomeno della subsidenza non fosse influenzato dalle attività umane. Il complesso lavoro di elaborazione dei dati raccolti, ha portato alla conclusione che per fenomeni di subsidenza naturali il terreno ha subito abbassamenti di circa 2,5 mm all'anno.

I risultati ottenuti dalle campagne di rilievo nel quinquennio '81-'85, grazie all'istallazione di una nuova rete di livellazione topografica, dopo alcune operazioni di omogeneizzazione con i dati raccolti nel passato, hanno consentito di ampliare la conoscenza del comportamento del suolo nel tempo e quindi di leggere l'andamento altimetrico in una finestra temporale più ampia.

Mettendo a confronto i due intervalli temporali tra gli anni '50 e '80, sono stati osservati degli andamenti oscillatori del terreno, di molto maggiore rispetto a quelli dovuti a fenomeni naturali, che hanno fornito una prospettiva esatta dell'influenza dell'attività umana sul fenomeno della subsidenza. In particolare si è potuto vedere che i valori di depressione riscontrati tra gli anni '60-'70 raggiungevano circa 0,80 m in zone dove si concentrano attività industriali idroesigenti (stazione)³⁴. La ricostruzione grafica, attraverso curve di depressione che uniscono punti ad uguale gradiente altimetrico, ha mostrato un massimo abbassamento nella zona della stazione e una progressiva decrescita verso Piazza Grande.

La nuova rete topografica del Comune, ha fornito sia un disegno preciso dell'abbassamento del suolo sul territorio extraurbano sia un maggior dettaglio del comportamento del terreno nel centro storico, grazie all'installazione di 30 capisaldi attorno Torre e Duomo.

Le informazioni raccolte e elaborate dal 1984 al 1988 sono state restituite in forma grafica con curve che uniscono i punti di eguale movimento differenziale³⁵. La visualizzazione grafica mostra come i movimenti differenziali nel complesso siano risultati uniformi salvo nella zona tra Torre e Duomo. La torre infatti presenta dei movimenti differenziali crescenti verso il

³⁴ Nel territorio circostante Modena si sono riscontrate zone in cui non sembra essere innescato il fenomeno di subsidenza antropico, sia per ragioni di una inferiore presenza di attività industriale sia per la natura stessa del terreno. Volendo comprendere in modo qualitativo il comportamento del terreno, si può immaginare di dividere il territorio del Comune Modena in tre porzioni, in cui la zona centrale che va da SW a NE, presenta un abbassamento uniforme nei quattro anni esaminati pari a 0.03m e funge da linea di divisione. A nord di questo confine gli abbassamenti medi sono di circa 0.04 m con punte di 0.06-0.07 m, mentre a sud si è registrata una situazione stabile.

³⁵ I rilievi sulla rete del centro storico vengono eseguiti nel dicembre del 1984, luglio 1985, dicembre 1985, settembre 1986, febbraio 1988 a cura dell'Assessorato Ambiente e Risorse del Comune di Modena. L'elaborazione dei dati raccolti (compensazione della livellazione) viene eseguita dall'università di Bologna fino al 1988.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

duomo, ovvero i capisaldi della Torre che sono a sud in direzione del Duomo hanno misurato un abbassamento sensibilmente maggiore rispetto a quelli a nord(-9, -3mm) (fig. 27).

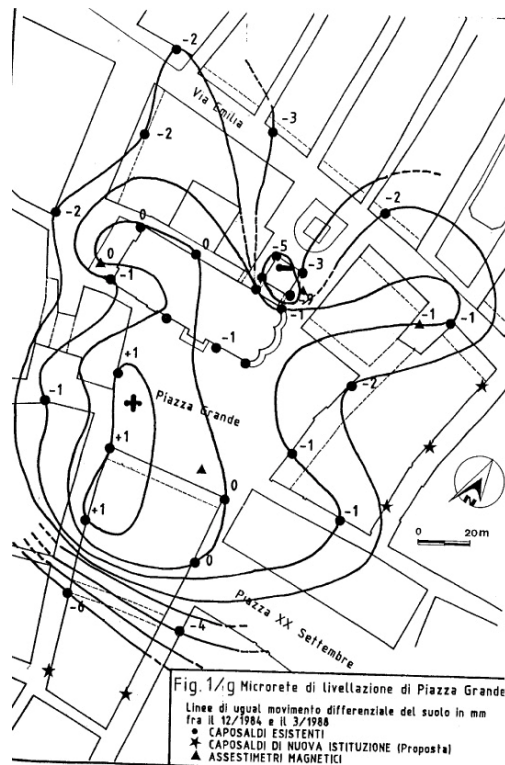


FIG 27 - Rete di livellazione di Piazza Grande, si vede come gli abbassamenti maggiori si hanno in zona della torre e Nord e ovest del Duomo

Nell'inverno del 2007 l'Amministrazione Comunale, decide di realizzare una nuova livellazione sulla rete topografica installata negli anni '80, finalizzata ad aggiornare i dati altimetrici della piazza legati al fenomeno della subsidenza. Le due campagne di rilievo, realizzate dal dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Modena e Reggio Emilia che si sono svolte a novembre 2007 e ad Aprile 2008, hanno consegnato alcune informazioni significative.

La zona interessata dallo studio è stata quella di Piazza Grande, la rete di livellazione utilizzata è la medesima installata negli anni ottanta e questo ha permesso di confrontare i nuovi dati con quelli del passato. I capisaldi della rete sono distribuiti in modo uniforme lungo

planimetria

99

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

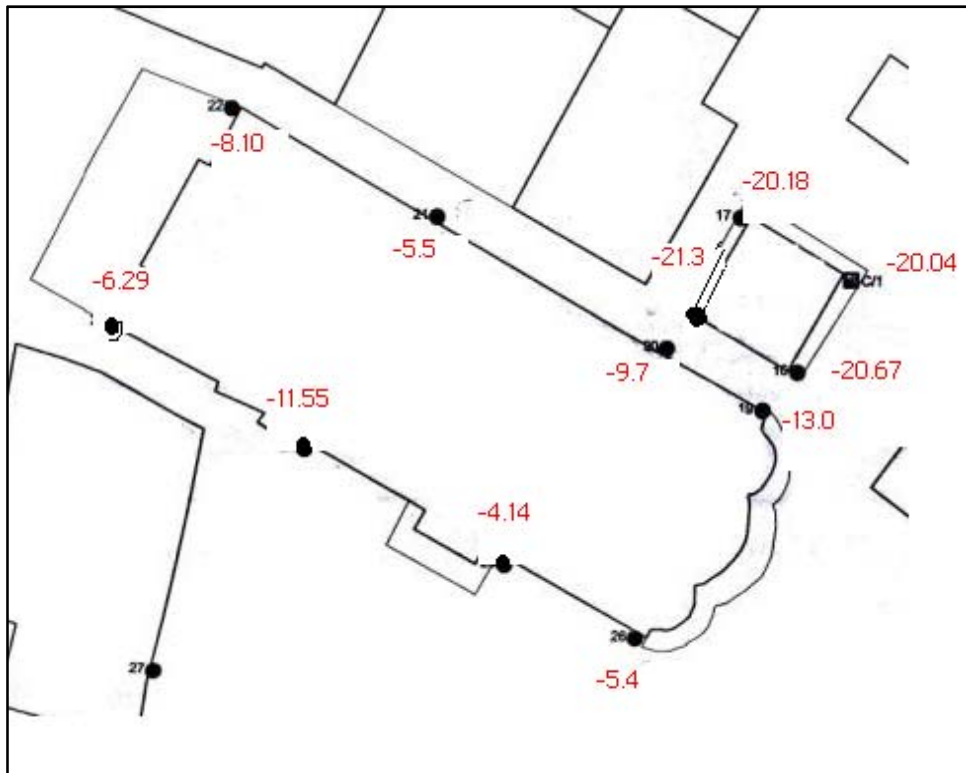


FIG. 29- Schematizzazione dei movimenti verticali (mm) dei capisaldi altimetrici del Duomo e della Ghirlandina. Confronto Dicembre 1991- Dicembre 2007

In generale si è potuto vedere come il fenomeno della subsidenza non si sia ancora arrestato, infatti tutti i capisaldi hanno registrato un abbassamento rispetto alle misurazioni degli anni '80.

I valori degli abbassamenti dei capisaldi simmetrici rispetto all'asse longitudinale e all'asse trasversale della Cattedrale, hanno mostrato un diverso comportamento.

I capisaldi in facciata n°22 e 23 hanno registrato un abbassamento abbastanza omogeneo con un differenza di circa 1,81 mm. I punti 21 e 24 hanno mostrato un maggiore abbassamento dal lato della piazza, il 24 infatti ha registrato dal 1984 un abbassamento di 11.55 mm mentre il 21 di 5.5 mm. Il comportamento dei punti 20 e 25, 19 e 26 hanno invece mostrato un andamento omogeneo opposto rispetto ai punti 21 e 24, infatti l'abbassamento maggiore risulta quello dei capisaldi a nord verso la Torre. I cedimenti della Cattedrale risultano essere quindi disomogenei lungo l'asse longitudinale e non simmetrici rispetto all'asse trasversale, quasi a mostrare la formazione di un giunto (cerniera torsionale) in corrispondenza della Porta dei Principi.

Osservando il comportamento dei capisaldi della Torre si nota subito che l'ordine di grandezza degli abbassamenti risulta doppio rispetto a quelli del Duomo (circa 20 mm). I capisaldi a sud della Torre n°18 (angolo sw), e n°16 (angolo se) hanno registrato abbassamenti maggiori rispetto a quelli del lato settentrionale.

Questi valori confermano sia le registrazioni degli estensimetri installati alla base della Torre e del Duomo, sia la tendenza della Torre a muoversi verso il Duomo; inoltre si è potuto vedere che tra il 2007 e il 2008 il caposaldo 16 si è abbassato meno (-1.80mm) del punto 18(- 2.49 mm) a conferma anche della tendenza della torre a piegarsi in direzione sud ovest. Questi valori misurati in breve arco temporale, pur non consentendo una stima esatta sulla direzione e velocità di inclinazione future, mettono l'accento sul fatto che la Torre si stia lentamente muovendo verso il Duomo e che quindi il fenomeno di cedimento non si è ancora esaurito. I capisaldi presenti sulla parete nord del Duomo, in corrispondenza di quelli della torre, hanno mostrato un movimento meno evidente ma comunque in essere, in particolare più accentuato nella zona vicino all'abside. I punti n°19 (vicino all'abside) e n°20 (vicino alla porta della pescheria) corrispettivi del n°16 e del n°18, hanno mostrato differenze assolute tra il 1984 e il 2007 di -13 mm e -9.7 mm, mentre tra il 2007 e il 2008 -0.72mm e -0.42 mm (fig. 30).

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

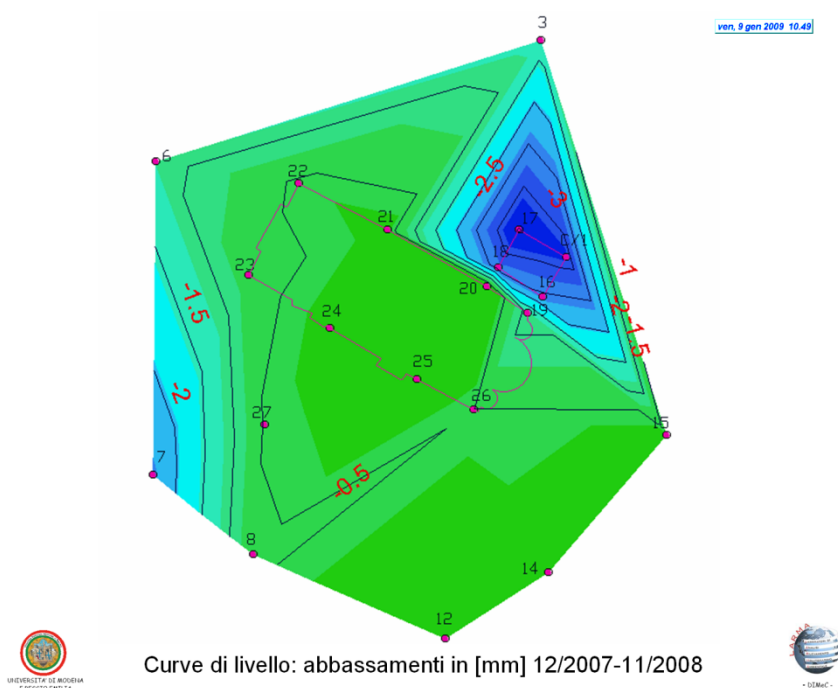
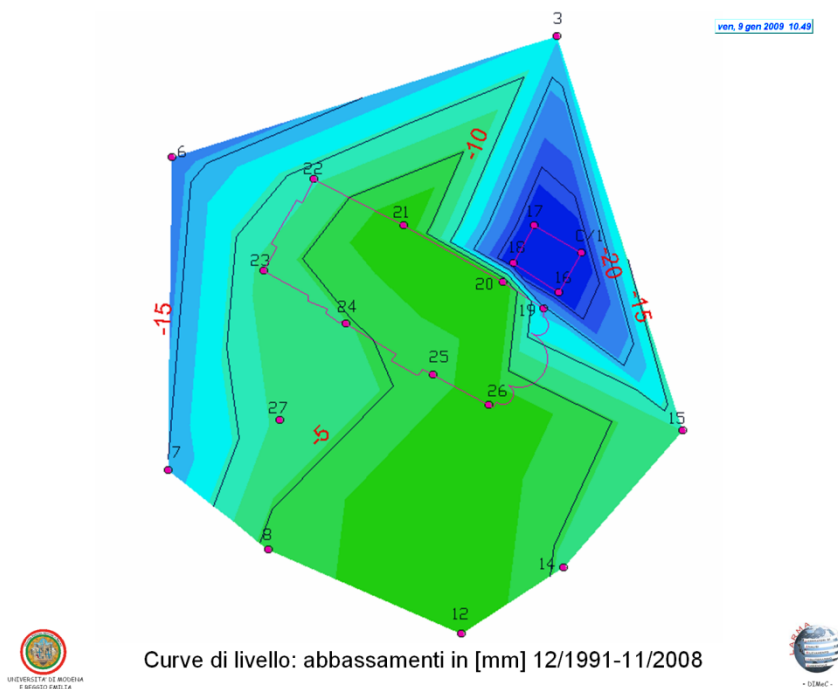


FIG.30 - Curve di livello che descrivono gli abbassamenti a partire da letture del 1991. Immagini e dati a cura del Prof. Ing Alessandro Capra

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Per quanto attiene l'inquadramento geologico i primi studi risalgono alla campagne di ricerca degli idrocarburi condotta dall'AGIP nel 1972.

Volendo descrivere la costituzione di questi terreni si può dire che la stratigrafia sia costituita da formazioni geologiche di periodi differenti: gli strati più recenti sono considerati gli alluvionali alla base dei quali si trovano *formazioni argillose marine franche e sabbioso conglomeratiche di ambiente di traslazione*, per uno spessore complessivo variabile fra i 2000 e i 3000 m che mostrano al tetto un'età ascrivibile al *Pleistocene Medio*³⁶. A Nord di Modena lo spessore dei sedimenti *Plio Pleistocenici*, è di 6000 m, e questo consente di credere che ci sia stato un più stabilizzato fenomeno di subsidenza naturale a partire dall'Oligocene³⁷ mantenutosi costante fino all'attuale. Infine le diverse operazioni di scavo per la captazione dell'acqua dai pozzi ha messo in evidenza una stratigrafia estremamente variabile sia in senso orizzontale che verticale con una successione granulometrica alternata fine e grossolana (fig.31)³⁸.

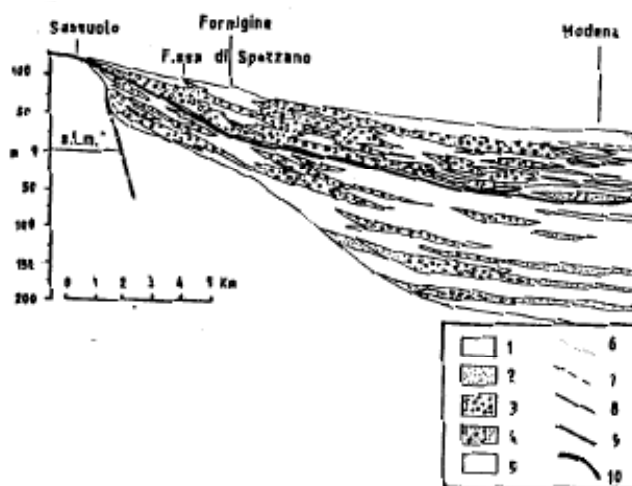


FIG. 31- Sezione litostratigrafica dei depositi alluvionali della conoide del fiume Secchia (pleistocene medio-superiore - olocene) (Cancelli 1985)

legenda: 1) argille e limi : 2) sabbie: 3) ghiaie e conglomerati: 4) ghiaie con matrice sabbiosa: 5) substrato: formazioni marine del pleistocene inferiore:

limiti della conoide: 6) attuale. 7) recente, 8) antica: 9) limite fra depositi continentali e formazioni marine;10)limite della ricostruzione geometrica della conoide.,

³⁶ Il Pleistocene è un'epoca geologica che ha inizio 1,8 milioni di anni fa e termina 11.000 anni fa, il Pleistocene Medio corrisponde ad un periodo, a seconda delle glaciazioni che varia tra i 700.000 e i 120.000 anni fa.

³⁷ L'Oligocene è un'epoca geologica che si estende da circa 34 milioni a circa 23 milioni di anni fa.

³⁸ Pellegrini e Zavatti,1980;Colombettiet alii,1980

Per quanto attiene l'assetto idrogeologico della città di Modena, si deve fare riferimento ad una lente di detriti di circa 250 m a sud e 350 m a nord depositati dal fiume Secchia nel periodo fra il Pleistocene medio superiore e l'attuale.

L'area di detriti che si estende per circa 70 Km² costituisce una porzione del sistema acquifero della pianura padana. Il sistema dei flussi sotterranei risulta essere nullo; rimangono infiltrazioni delle acque di ruscellamento superficiale lungo il margine del rilievo appenninico.

L'alveo del fiume è connesso con il sistema acquifero e risulta infiltrante fino a circa 60 m. Appare comunque difficoltoso un corretto bilancio idrogeologico del territorio modenese a causa della scarsità di dati quantitativi legati alle precipitazioni e ai dati di infiltrazione subalvee.

A differenza di questo, l'inquadramento idrogeologico del centro storico, grazie alla presenza di un numero maggiore di piezometri su superficie e a successive campagne geotecniche, è stato studiato con più precisione.

In particolare i sondaggi realizzati nel 1984 hanno mostrato tre distinti livelli di falda, un primo a pochi metri di profondità, un secondo con acqua in pressione all'interno di uno strato ghiaioso ad una profondità compresa tra i 19 e 35 m dal piano campagna, ed un terzo orizzontale saturo, pure sede di una falda in pressione tra i 52 e 60 m di profondità.

L'andamento della falda è stato poi monitorato da un piezometro a partire dal 1975 in prossimità dell'Accademia che ha consentito di vedere un abbassamento da 12 m a 3-4 m nel 1988. Conseguenza delle variazioni di falda così accentuate, la subsidenza negli anni 70 (periodo di massima captazione idrica delle industrie) ha inevitabilmente causato problemi alle infrastrutture³⁹ e ha causato cedimenti differenziali ad alcuni edifici storici come quello dell'Accademia (fig. 32)⁴⁰

³⁹ In alcuni casi le tubazioni delle fogne sono state lesionate, inoltre gli argini del fiume Secchia sono stati sopraelevati per lunghi tratti.

⁴⁰ Croci 1980, Martinotti 1981

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

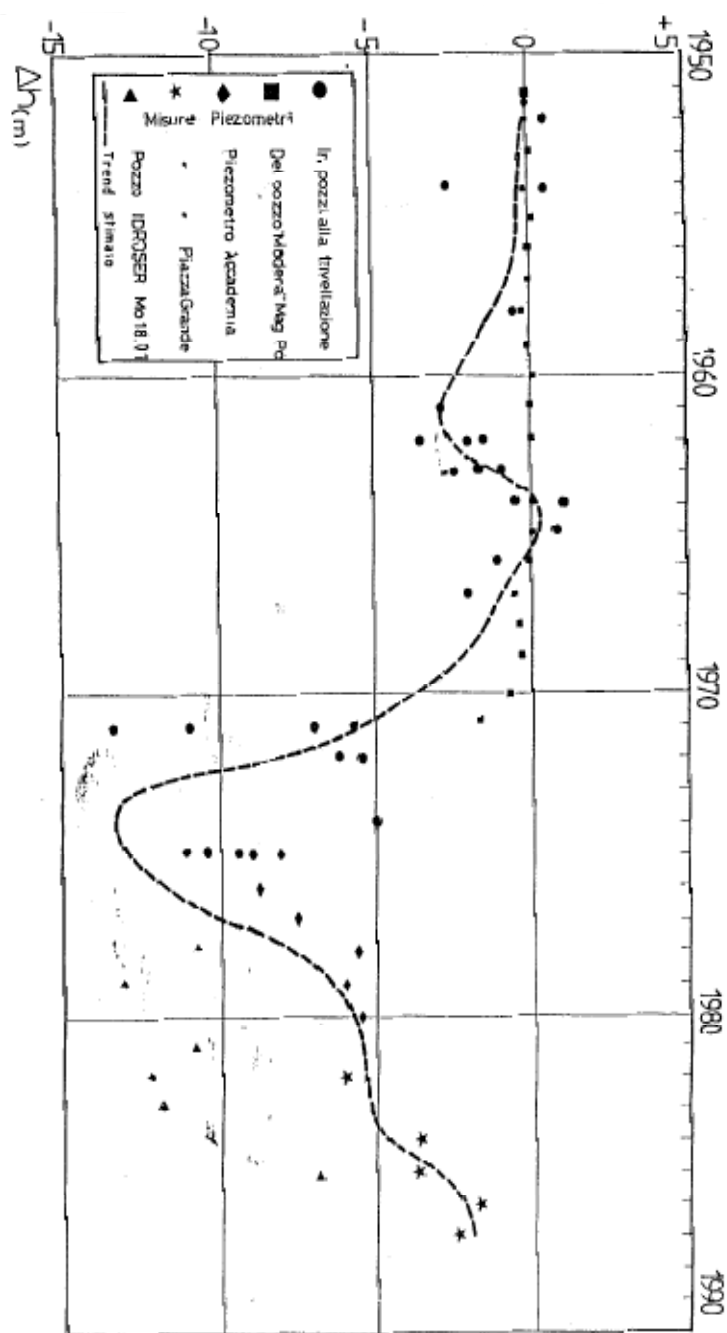


FIG. 32 - Andamento della depressione piezometrica misurata in pozzi situati nel Comune di Modena relativamente tra il 1951 e il 1990 (Cancelli 1985)

Le informazioni più importanti sulle caratteristiche del terreno sono state raccolte dalle pubblicazioni dei risultati delle prove realizzate a scopi di Idificazione, in particolare sono stati ben indagati i primi metri fino agli strati ghiaiosi che si trovano a circa 17 m a sud e 40 m a nord dal p.c. Nonostante la validità locale dei dati raccolti, legata soprattutto alla natura delle indagini e alla variabilità del terreno, i risultati delle prove CPT (prove penetrometriche statiche) hanno consentito la realizzazione di considerazioni di carattere generale. In particolare nel terreno urbano, prendendo in considerazione i singoli intervalli di profondità, si possono trovare fino a 10 m resistenze di 10 Kg/cm² e, anche se a sud della città si raggiungono i 20 Kg/cm², questi valori sono legati alla sovra consolidazione avvenuta per essiccazione degli strati argillosi prima del loro ricoprimento da strati alluvionali. All'aumentare della profondità verso gli strati ghiaiosi la resistenza tende a crescere fino a 25 Kg/cm² in relazione al maggior carico litostatico.

Per quanto riguarda i valori di resistenza al taglio determinati da prove triassiali non consolidate-non drenate o in alternativa di prove di compressione ad espansione laterale libera si sono misurati valori della coesione non drenata C_u variabili tra 20 e 100 KPa. I valori massimi sono nei primi 10 /15 m di spessore e quelli minimi tra i 15 e 20 m. Le prove edometriche su campioni indisturbati prelevati sull'intero territorio hanno mostrato la presenza di strati sovra consolidati fra 0 e 10/15 m con $OCR=2-4$; a profondità superiori ai 10-15 m e fino al primo banco ghiaioso si incontrano strati normalmente consolidati o debolmente sovra consolidati ($OCR \leq 2$).

I valori dell'indice di compressione vergine R_c oscillano fra 0.09 e 0.35 con una media di 0.2 i valori più elevati sono nell'intervallo tra 8/16 m, l'indice di ricomprensione per i terreni sovra consolidati oscilla 0.03 e 0.06 mentre il coefficiente di compressibilità secondaria α varia da 0.5 e 1.1% e si mantiene basso rispetto ai dati precedenti a testimonianza di uno scarso contributo del cedimento secondario al fenomeno di subsidenza. Il coefficiente di consolidazione C_v si attesta attorno a $0.5-2 \times 10^{-4}$ cm²/sec.

I terreni nei primi 180 m di profondità risultano essere costituiti da depositi alluvionali a composizione prevalente argillosa e limosa inorganica con intercalazioni grossolane sabbiose ghiaiose che si assottigliano verso nord, per uno spessore complessivo di 20-40%. Rarissime lenti di materiale torboso organico

Sotto i 180 m la percentuale grossolana è <5% del totale. I limiti di Atterberg hanno fornito un ampio intervallo di valori

Wl= 25-90%(con tendenza a decrescere nei terreni più superficiali)

IP= 10-60% (con tendenza a diminuire nei terreni più superficiali e recenti)

Il contenuto in minerali argillosi è medio alto CF= 15-60% con massimi fino a 80%

Per quanto attiene gli studi geotecnici del sottosuolo di Piazza Grande, vi è da sottolineare come il fenomeno della subsidenza degli anni 70-80 abbia indotto l'Amministrazione Comunale a realizzare una serie di studi. Lo studio geotecnico viene affidato al prof. Cancelli del Dipartimento di Ingegneria Strutturale del Politecnico di Milano. Il progetto di ricerca prevede il prelievo di campioni ed il riconoscimento geotecnico del sottosuolo, un rilievo di precisione per monitorare gli spostamenti verticali, il controllo dei fenomeni di assestamento nei diversi strati compressibili (attraverso l'uso di assestimetri multipli lungo alcune verticali), la misura dei livelli piezometrici delle falde presenti, superficiali, profonde, e il confronto finale tra proprietà geotecniche dei terreni, e gli assestamenti nel tempo.

L'area presa in esame è quella di Piazza Grande, dove vengono svolte diverse indagini in situ tra cui sondaggi profondi per la posa di piezometri (tipo Casagrande) entro i primi due banchi di ghiaia, per controllare le variazioni di livelli di falda, quattro sondaggi profondi 40 m per il prelievo di campioni indisturbati, la posa di assestimetri multipli a punti magnetici⁴¹ posti all'interno dei primi banchi di ghiaia per determinare gli assestamenti relativi dei vari strati, infine quattro gruppi di sondaggi spinti fino a 20-25 m per la posa di celle piezometriche

⁴¹ L'assestimetro più comunemente impiegato consiste in una serie di punti magnetizzati ad alette sporgenti, ancorati a diverse quote nel terreno di cui si vuole seguire l'assestamento e calzati attorno ad una colonna verticale. L'assestimetro a punti magnetizzati può essere installato entro un foro di sondaggio o in un foro apposito, purché rivestito con tubazione provvisoria. Consta di due tubi tra loro coassiali, di cui quello interno è metallico e cavo onde consentire l'inserimento di una apposita sondina di misura; il tubo esterno, di solito un corrugato flessibile in PVC, serve invece per assorbire gli attriti del terreno, svincolando in tal modo il tubo interno. Questo andrà sospeso, a colonna ultimata, sull'apposita testa da posizionare in superficie. L'installazione prevede il collegamento dei primi spezzoni dei due tubi con una punta metallica d'appoggio, che andrà posta a fondo foro. Segue quindi il montaggio completo di tutti gli spezzoni di doppio tubo fino in superficie. A questo punto si procede al riempimento dell'intercapedine da fondo foro fino alla quota di posizionamento dell'anello magnetizzato più profondo, estraendo contemporaneamente i rivestimenti. La quota va controllata con idonei sistemi di misura. I materiali di riempimento consigliati sono palline di bentonite e, in alternativa, sabbia; al fondo, in corrispondenza della punta, anche ghiaietto. Quindi viene calato il primo punto magnetizzato, spingendolo verso il basso mediante un attrezzo apposito in modo da vincere l'attrito delle alette sui rivestimenti, fino a farlo appoggiare sul riempimento in posto. Ora l'anello va ricoperto di altro materiale di riempimento, procedendo di seguito all'estrazione dei rivestimenti. Non trovando più contenimento laterale, le alette del punto magnetico si espanderanno di conseguenza fino ad ancorarsi nel terreno indisturbato. Si proceda poi come descritto fino a completamento della colonna assestimetrica. Al solito, particolare attenzione va posta sia nelle fasi di riempimento che nell'estrazione delle tubazioni provvisorie. L'allestimento magnetico viene ultimato posizionando la testa di protezione e sospensione del tubo interno, munita di chiusura

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

elettropneumatiche⁴² a diverse profondità entro il primo banco argilloso per determinare la variazione di pressione dell'acqua e prove penetrometriche statiche spinte fino al primo banco di ghiaia.

La strumentazione in oggetto è operativa da giugno 1984 con una periodicità di misurazioni mensile e bimestrali. A queste strumentazioni si sono aggiunte altre tre nel 1987 in occasione della realizzazione di un parcheggio sotterraneo.

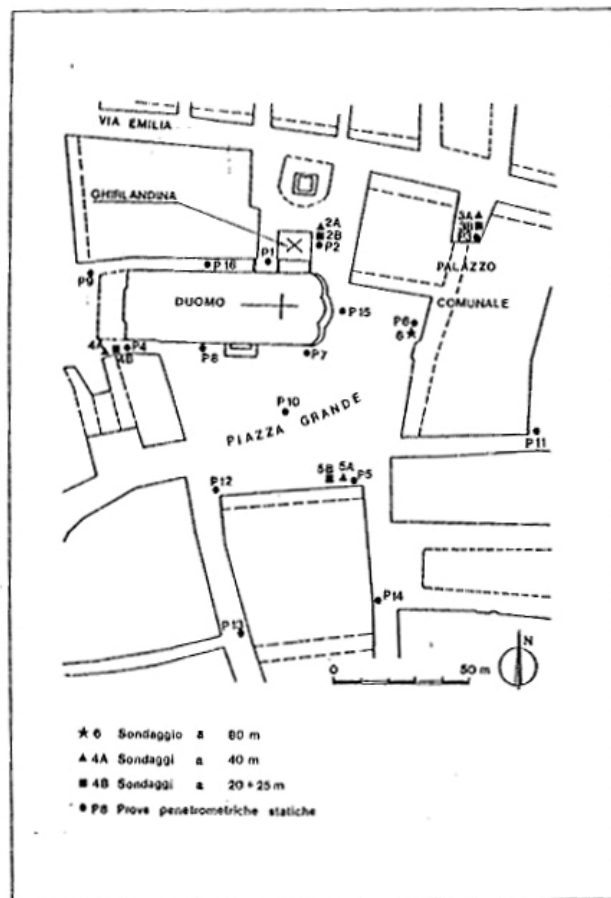


FIG. 33 Posizione sondaggi in Piazza Grande (Cancelli 1985)

Le indagini in situ (fig. 33) si sono concentrate fino al primo banco di ghiaia, e hanno mostrato una buona omogeneità stratigrafica sia orizzontalmente che verticalmente. Un sondaggio si è spinto fino a 40 m e un altro si è spinto oltre gli 80 m di profondità in virtù dell'idea che gli strati profondi siano ancora sede di fenomeni di consolidazione.

⁴² Piezometri elettropneumatici vengono utilizzati in terreni di varia natura e granulometria e quando c'è bisogno di una risposta immediata delle variazioni delle pressioni neutre del terreno, di solito viene impiegato in terreni con media e bassa permeabilità. $K < 10^{-4}$ cm/sec. Per un miglior funzionamento il foro di sondaggio viene rivestito con tubi di protezione, nonostante questo i guasti sono frequenti.

Un primo inquadramento stratigrafico è stato così determinato:

0,-2 m terreno di riporto con frammenti di laterizi

-2,-7 m orizzonte archeologico costituito da limi argillosi talvolta sabbiosi con torba e frammenti di laterizi di età romana s.l. (il piano archeologico varia da i 2 agli 8 metri di profondità)

-7,-21 m limi argillosi;

-21,-33 m ghiaie e sabbie con intercalazioni lentiformi limoso sabbiose

-33 a-51 m argille con sottili intercalazioni limoso sabbiose

-51 a-63m ghiaia e sabbia

-63° -77 m argille e limi con intercalazioni sabbiose lentiformi

-77-80m sabbie fini, limose.

I risultati relativi all'analisi dei campioni prelevati in materiali fini coesivi hanno mostrato un carattere argilloso dei campioni dove la parte con granulometria $<0,002\text{mm}$ raggiunge 70-80% mentre quella $<0.06\text{ mm}$ è sempre maggiore del 95%. Le figure qui di seguito riportano i risultati della composizione granulometrica, contenuto naturale di acqua, limiti di Atterberg, e composizione mineralogica (oggetto di una tesi di laurea presso l'Ateneo di Bologna) (fig.34).

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

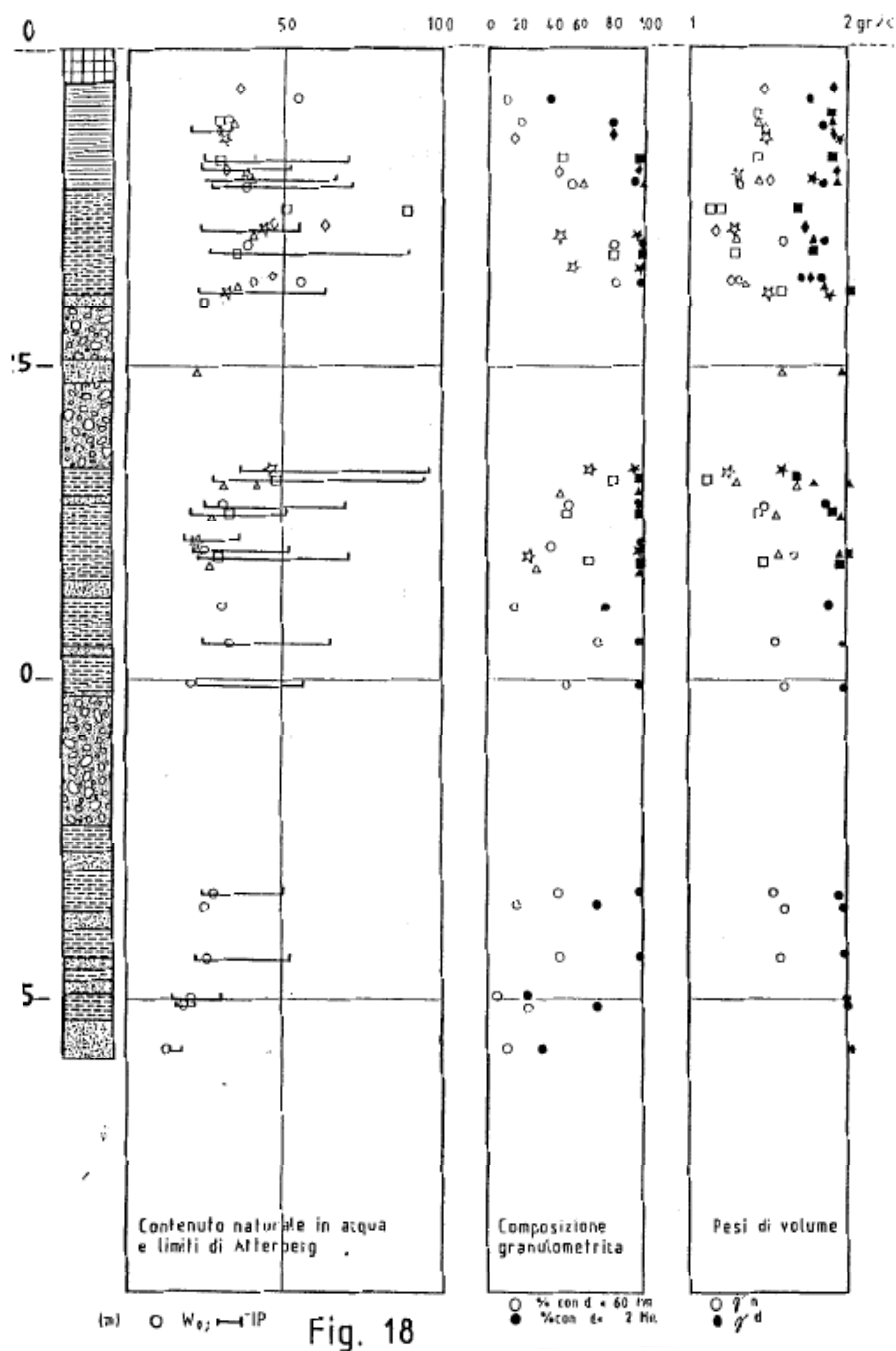


FIG 34- Prove di laboratorio sui campioni di Piazza Grande (Cancelli 1985)

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

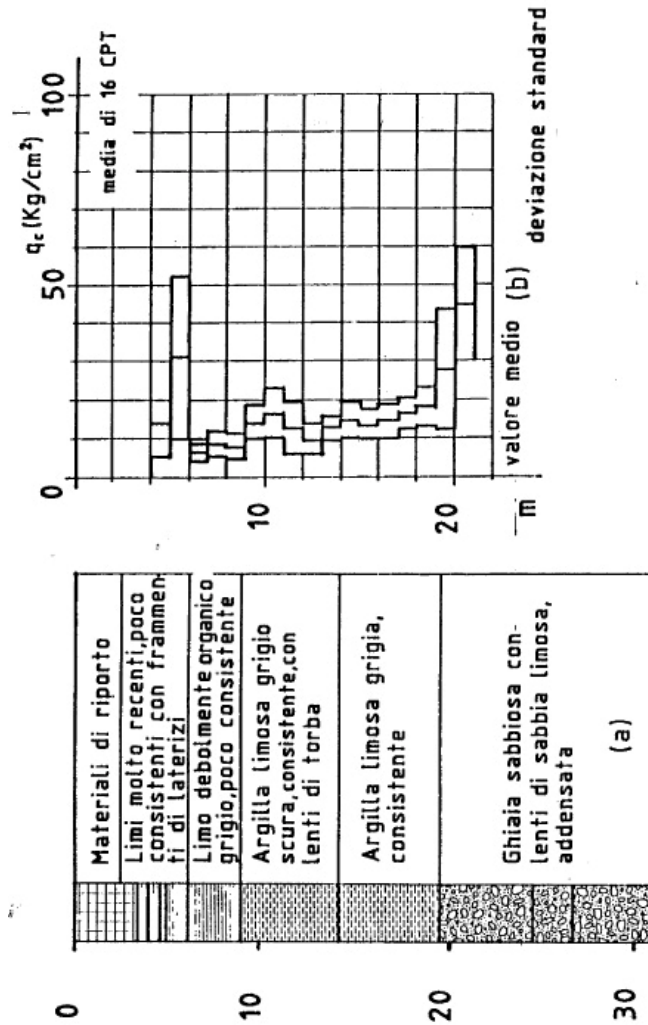


FIG 35-Stratigrafia e resistenze penetrometriche per il primo banco argilloso(Cancelli 1985)

Le prove penetrometriche statiche consentono una prima visione dello stato di preconsolidazione dei depositi. In particolare si nota come tra i 9 e i 12 metri ci sia uno strato sovraconsolidato limitato superiormente e inferiormente da strati normal-consolidati.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

La resistenza non drenata è deducibile dal grafico sottostante dove sono messi in relazione i valori della coesione non drenata C_u determinati con prove di laboratorio con quelli ottenuti con la formula empirica di Skempton ($c_u = 0.11 + 0.0037IP$) P'c. Questi ultimi dovrebbero rimanere allineati fra le rette tratteggiate corrispondenti agli estremi 35/70 di IP alcuni dei valori misurati sono più elevati rispetto a quelli ottenuti con la formula di Skempton, indicando così una probabile sovra consolidazione (fig. 32).

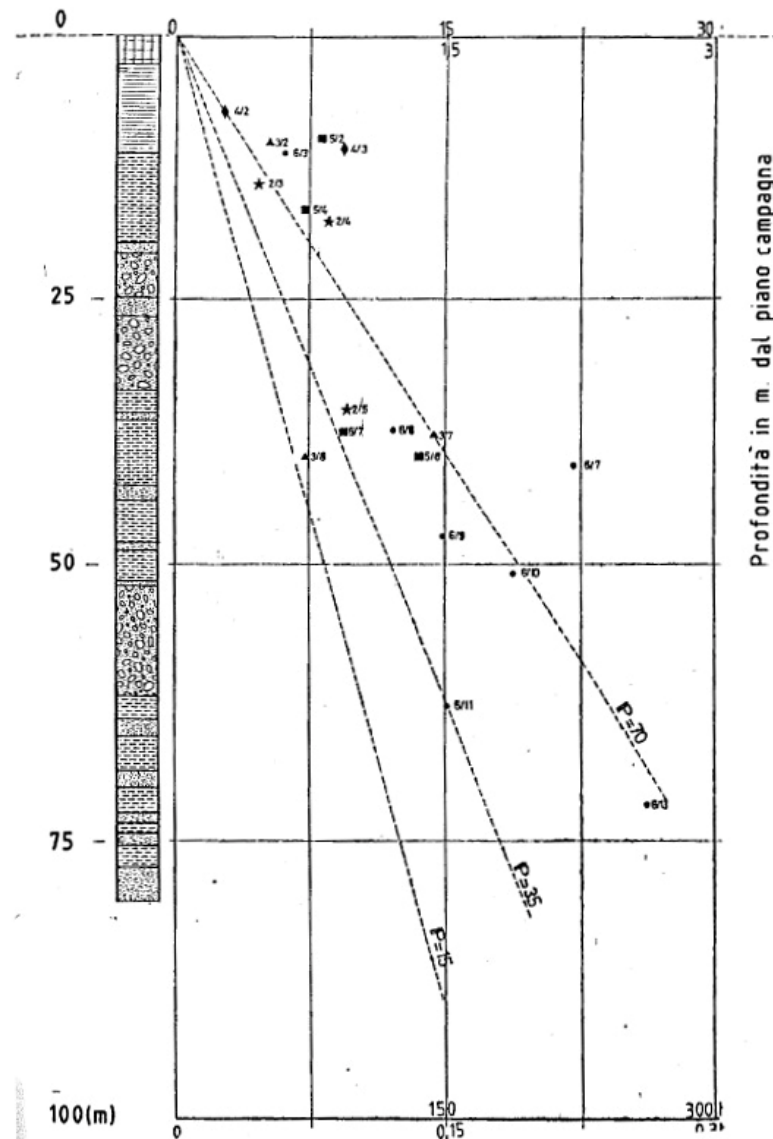


FIG.36 - Relazione fra la C_u ricavata dalle prove triassiali e quella ricavata dalla formula di Skempton dei campioni prelevati in piazza Grande (Cancelli 1985)

Legenda :6/Numero di sondaggio;/9 Numero del campione

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Le pressioni di consolidazione ricavate dalle prove edometriche mostrano che i terreni fino a 12 metri sono sovra-consolidati a causa dell'essiccazione stessa dei terreni per l'esposizione all'aria prima dei successivi depositi alluvionali, tra i 12 e 16 m si trovano livelli attualmente sottoconsolidati che prima dell'abbassamento della falda erano in equilibrio con la pressione litostatica, altri livelli sottoconsolidati si trovano anche a 37/40 m e 75 m a conferma della partecipazione attiva anche degli strati più profondi al fenomeno della subsidenza. Campioni sovra consolidati si trovano anche a 40/75 m da p.c. (fig. 33)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0-2	10.C.	10.4	10.15	10.15	10.138*	10.138*	10.06*	10.017	10.017		
2-7	10.C.	10.6	10.75	10.352*	10.426*	10.06*	10.106	10.128			
7-12	10.C.	11.1	10.75	10.226*	10.281*	10.06*	10.068	10.084			
12-16	U.C.	11.4	10.75	10.186	10.234	10.2	10.149	10.187			
16-21	N.C.	11.75	10.75	10.155	10.196	10.2	10.155	10.196			
21-33	U.C.	13.9	10.70	10.072	10.099	10.22	10.111	10.153			
33-40	N.C.	14.5	10.70	10.063	10.087	10.2	10.076	10.105			
40-46	U.C.	14.9	10.70	10.058*	10.081*	10.06*	10.018	10.024			
46-51	U.C.	17.1	10.70	10.041*	10.057*	10.06*	10.017	10.024			
51-70	U.C.	17.8	10.70	10.037	10.052	10.2	10.052	10.073			
TOTALE ABBASSAMENTO										10.769	10.991

1. Profondità (m) -
2. Spessore H_0 (m) -
3. Grado di consolidamento - (U.C. = sottocons. N.C. normalcons;
O.C. = sovracons.)
4. Pressione litostatica P_0 (Kg/cmq) -
5. Pressione di consolidamento P (Kg/cmq) -
6. Variazione di pressione 1951 - 1988 dP (kg/cmq) -
7. Variazione di pressione 1951 - 1980 dP (Kg/cmq) -
8. $\log P / P_0$ * oppure $\log (P_0 + dP) / P_0$ (1951 - 1988) -
9. $\log P / P_0$ * oppure $\log (P_0 + dP) / P_0$ (1951 - 1980) -
10. Indice di compressione media e di ricomprensione: R_{cm} oppure * =
11. Variazione di spessore (STIMA 1951 - 1988) (m) -
12. Variazione di spessore (STIMA 1951 - 1980) (m).

FIG. 37-riassunto prove edometriche. Previsione dell'abbassamento del suolo di Piazza Grande nei primi '80 m di profondità in base alle caratteristiche geotecniche dei terreni coesivi del sondaggio 6(Cancelli 1985)

La misura delle pressioni neutre è stata determinata tramite l'uso da piezometri diversi inseriti a quote differenti. All'interno dei banchi ghiaiosi sono stati messi piezometri di Casagrande, ciascuno con doppia tubazione per il miglior controllo dei livelli di falda utili per la determinazione delle quote piezometriche all'interno dei singoli orizzonti permeabili saturi. I piezometri elettropneumatici consentono il rilievo delle sovrappressioni interstiziali. I rilievi realizzati tra il 1984 e 1987 mostrano un comportamento delle 4 stazioni del tutto simile, e dopo il periodo di tre mesi considerato di assestamento, le differenze delle quote piezometriche a 18 m che si registravano inizialmente si sono annullate, indicando questo per dire che a questi livelli i fenomeni di consolidamento si dovrebbero essere arrestati.

Allo scopo di determinare le variazioni relative di spessore dei singoli strati e le variazioni di quota di questi rispetto al piano campagna vengono installati tra l'84-87 quattro assestimetri magnetici.

Lo spessore del terreno indagato è di 40 m.

Gli strumenti vengono installati in quattro punti distinti: Ghirlandina, Duomo, Piazzale Ova, Cassa di Risparmio.

Le misurazioni ottenute con gli assestimetri hanno dato risultati significativi solo nell'arco del triennio tra 1984 e 1987. Infatti le problematiche tecniche legate alla lettura dei dati non hanno consentito una precisione di lettura superiore al millimetro e quindi considerazioni significative in brevi periodi di misurazione. Grazie alle letture strumentali nel triennio '84-87 hanno riscontrato che nei primi sette metri il terreno risente in modo maggiore i fenomeni di rigonfiamento e abbassamento legati alla variazione delle quote piezometriche. Fino al 1985 le misurazioni sono coerenti con l'andamento della falda, in seguito si è avvertito un periodo di rigonfiamento causato dall'innalzamento della falda tra 1985 e 1986 viceversa un depressione nel 1987. Nei banchi più profondi si è riuscito a misurare variazioni relative di rigonfiamenti tra i 4 e gli 8 mm. Infine si può dire che gli assestimetri, negli anni indagati, hanno evidenziato due aspetti fondamentali nello studio dei cedimenti dei primi 40 metri di terreno, il primo che questo strato ha inciso in percentuale bassa sull'abbassamento complessivo del terreno secondo che la stazione Ghirlandina ha dato risultati anomali rispetto al comportamento registrato dagli altri.

Lo studio dei monumenti di Piazza Grande

2 Il Duomo: analisi del costruito e dei dissesti

La costruzione della Cattedrale di Modena ebbe inizio nel 1099, ad opera dell'architetto Lanfranco.

Ancora oggi non è chiarita la provenienza del progettista. Il suo nome compare per la prima volta nell'unico documento testimone della costruzione del Duomo: la *Relatio*⁴². Nel documento si mette in evidenza lo stato di fatiscenza ed inadeguatezza della precedente cattedrale che conteneva le spoglie di S. Geminiano.

Pare che questo sia l'elemento che abbia indotto l'idea di riedificare la Cattedrale con un nuovo e più ampio edificio⁴³.

Anche sulla scelta di Lanfranco non vi sono notizie certe. Si sa che nell'arco di pochi mesi in vista dello scavo delle fondazioni (23 maggio 1099) riuscì a presentare un modello e un programma dei lavori che comprendeva contemporaneamente la demolizione della precedente Cattedrale e l'erezione della nuova.

Ad arricchire il testo della *Relatio* sono alcune miniature che descrivono alcune fasi della lavorazione e dello scoprimento delle spoglie di S. Geminiano ad opera di Lanfranco e di Bonsignore, allora Vescovo di Reggio Emilia.

Un'altra fonte documentaria cita Lanfranco. È un atto del 1137 in cui il *magistrae Lanfrancus* risulta testimone. Anche in questo caso non è possibile avere la certezza che non fosse un omonimo, ma il luogo dove viene stipulato l'atto ovvero l'archivio capitolare e i contraenti rendono possibile l'ipotesi che si tratti della stessa persona⁴⁴.

L'architetto progettista della chiesa si portò con sé maestranze specializzate come i lapicidi provenienti da Como detti *Comacini*; anche se fu Wiligelmo ad ideare e realizzare gran parte dell'apparato scultoreo che adorna il perimetro esterno della Cattedrale. Una possibile

⁴² L'attribuzione ancora oggi non è del tutto certa. *Relatio, sive descriptio de innovazione ecclesie Sancti Geminiani Mutinensis presulis ac de translatione vel revelatione seu etiam consecratione eius beatissimi corporis a domino Paschali sancte Romane sedis summo pontefice diligenter celebrata* redatto da un dotto ecclesiastico testimone dell'epoca il Magiscola Aimone.

⁴³ Con tutta probabilità la volontà di riedificare la chiesa nacque proprio dalla società civile costituita dalla media borghesia, i nobili locali e dal capitolo cittadino

⁴⁴ Emilio Paolo Vicini, *Regesto della Chiesa cattedrale di Modena*, 1931 p.323, n.393

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

ricostruzione delle fasi di realizzazione della Cattedrale è stata fornita da Giancarlo Palazzi che nel 1984 si occupò del rilievo dell'edificio⁴⁵.

L'ipotesi formulata dal Palazzi, confermata da alcuni passi della *Relatio*, consiste nell'immaginare l'inizio dei lavori in concomitanza con la demolizione dell'antica cattedrale che occupava parte della superficie dove sarebbe dovuta sorgere la nuova fabbrica. L'ipotesi quindi è quella che la prima parte della cattedrale costruita oggi fosse la cripta, e la zona absidale, e solo successivamente, una volta terminata la demolizione della chiesa preesistente, si sarebbe iniziato ad edificare la facciata.

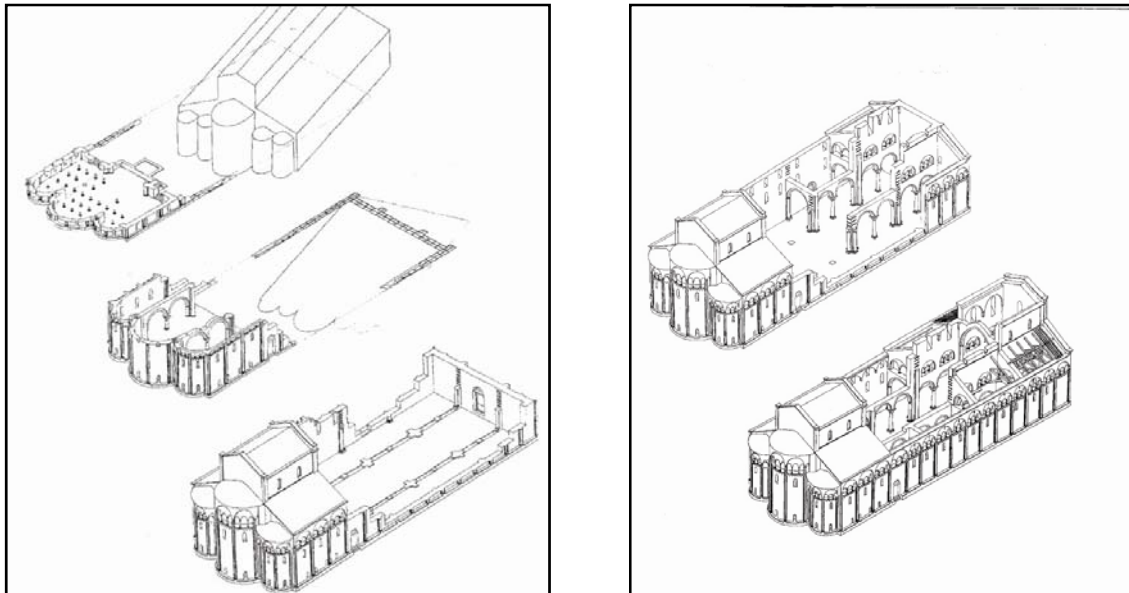


FIG. 38- Ricostruzione grafica delle fasi costruttive del Duomo Palazzi (1984)

⁴⁵ Giancarlo Palazzi, *Il Duomo d Modena, Atlante Grafico*, Edizione Panini, 1989

Nel 1106, come descrive la *Relatio*, Lanfranco fece trasferire le spoglie di S. Geminiano dall'antica cattedrale alla cripta della nuova in modo da poter proseguire i lavori.

Una volta terminata la demolizione dell'antica cattedrale i lavori proseguirono in modo separato dalla facciata verso l'abside e viceversa. Quindi con tutta probabilità non si riuscì, come dice la *Relatio*, a realizzare in un unico momento il tracciato e la costruzione di tutte le fondazioni, di conseguenza anche la struttura in elevazioni venne realizzata in tempi di versi.

Questa contemporaneità di lavori e il modo di procedere con punti di partenza opposti probabilmente è una causa delle irregolarità geometriche rilevate dal Palazzi, sia a livello planimetrico sia a livello del paramento lapideo.

L'aspetto della chiesa, al momento della sua inaugurazione 1184, era quello di un edificio a tre navate con coperture lignee a doppia falda nella zona centrale e a falda singola sui lati, senza cupole, che terminava con tre absidi, la cripta e un presbiterio sopraelevato.

La facciata era priva di rosone ed aveva un solo ingresso. Le sue imponenti dimensioni ne facevano la più grande cattedrale del territorio emiliano dopo quella di Parma⁴⁶ e la torre che sorgeva al suo fianco aveva già raggiunto considerevoli altezze.

Successivamente all'inaugurazione intorno al 1200 intervennero alcune maestranze specializzate provenienti da Campione d'Italia, per questo detti *Campionesi*, che portarono diverse modifiche all'aspetto estetico della cattedrale che ancora oggi si possono vedere.

I *Campionesi* (attivi a Modena a partire dal 1090)⁴⁷, operarono soprattutto nella zona presbiterale, in facciata e completarono la costruzione della torre. Diversi furono gli interventi sia all'interno che all'esterno della chiesa. In facciata realizzarono il rosone e i due accessi secondari a fianco di quello centrale, in zona presbiterale sopraelevarono il coro di 80 cm circa, dilatarono e alzarono la copertura in modo da produrre un finto transetto per poter avere maggiore luce. In occasione del

⁴⁶ Attualmente il Duomo di Modena risulta essere tra le cattedrali romaniche emiliane costruite tra il 1000 e 1200 in Emilia la terza per dimensioni dopo Parma e Piacenza. A seguire Ferrara, Nonatola, Pomosa

⁴⁷ Renzo Grandi, I Campionesi a Modena, in Lanfranco e Wiligelmo, il Duomo di Modena, ed Panini, Modena 1984, pp545

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

rifacimento del solaio del presbiterio innalzarono anche la quota del pavimento della cripta (fig. 39).



FIG 39 Immagine che riprende il sistema dei capitelli lungo il lato settentrionale della cripta. Le quote diverse d'imposta delle volte sono dovute al sopralzo avvenuto in epoca campionesa.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

La testimonianza di questa modifica si nota nel sistema di aperture originali poste più basse rispetto a quelle nuove e la posizione di un antico capitello sul lato nord, che risulta visibilmente più basso confrontato con quelli più recenti.

Queste variazioni di quote sono riscontrabili anche percorrendo le scale a chiocciola ricavate nei pilastri della zona absidale che mettevano in comunicazione diretta il presbiterio con la cripta⁴⁸. La motivazione concreta dell'innalzamento del pavimento della cripta non è sicura, una delle cause potrebbe essere stata la presenza di infiltrazioni d'acqua anche se non si conosce la quota della falda acquifera.

Un importante intervento che riguardò da vicino sia la torre che il Duomo avvenne nel 1338 con la costruzione degli archi di collegamento tra i due edifici (fig. 40).



FIG.40- Immagine dei tre archi che collegano il Duomo agli edifici limitrofi

Questo collegamento fisico si rese necessario a causa della sempre più rilevante pendenza che la torre aveva verso il Duomo.

Un altro collegamento venne realizzato nel '400 tra l'angolo sud est e la casa del Vescovo.

Un'altra modifica sostanziale che cambiò la percezione degli spazi interni oltre a quelle duecentesche fu l'aggiunta nel '400 delle volte a crociera che sovrastano le navate.

⁴⁸ Adriano Peroni, *L'architetto Lanfranco e la struttura del Duomo*, in, *Lanfranco e Wiligemo, il Duomo di Modena*, ed Panini, Modena, 1985

Dopo questo ultimo cantiere non vi furono modifiche importanti sulle architetture fino alla metà dell'800. Alcune piccoli lavori vennero svolti successivamente al concilio di Trento del 1593 in cui venne modificato il presbiterio per adeguarlo alle nuove esigenze liturgiche. Nel 1651 l'abside minore settentrionale venne sopraelevata per ospitare reliquie e nel 1820 l'ultima aggiunta, il monumento funebre del Duca Ercole III d'Este. Da cui si accedeva dalla zona presbiterale nord, ma ricavato in uno spazio esterno al perimetro del Duomo al di sopra dell'accesso lungo la navata nord denominato Porta della Pescheria.

I successivi interventi eseguiti sulla cattedrale si riferiscono ai restauri che a partire dalla metà dell'800 interessarono sia la fabbrica del duomo che quella della torre.

Nel 1859 una pubblicazione redatta dal parroco Pietro Cavedoni, che trattava intitolata le diverse trasformazioni avvenute sull'edificio nell'arco della storia aprì un dibattito sulla possibilità di restituire al monumento l'aspetto originario, isolato dagli edifici limitrofi⁴⁹.

Il Cavedoni affrontando l'argomento e caricandolo di significato polemico parlò di sventura, riferendosi ai molti edifici addossati che facevano perdere la visione dell' *isola perfetta*, e scrive: *“Questa nostra Basilica ai tempi della sua fondazione era perfettamente staccata dalle altre fabbriche, non eccettuata la Torre maggiore, e perciò isolata ll'intorno”*

Oltre agli addossati, Cavedoni criticò nel suo scritto tutte le forme architettoniche non riconducibili direttamente all'idea del progetto originale lanfranchiano, come per esempio la porta Regia, e il sistema di collegamenti tra il Duomo e la torre che nel corso dei secoli avevano subito diverse modificazioni ed aggiunte. Il dibattito lanciato dal Cavedoni, le parole del Papa che visitò Modena nel 1859 che richiamando la cittadinanza intera a prendersi cura del monumento e la concomitanza dell'estensione a tutte le provincie delle *Commissioni Consultive Conservatrici delle Belle Arti* da parte del Ministero della Pubblica Istruzione, diedero il via alle operazioni preliminari agli interventi di restauro.

Con un fondamentale obiettivo: l'isolamento della Cattedrale.

La prima ispezione del 1875 iniziò la fase delle indagini preliminari mirate alla valutazione dello stato conservativo dell'architettura. Il lavoro che si avvale del rilievo del Duomo del 1840⁵⁰

⁴⁹ Pietro Cavedoni *Sventure del Duomo di Modena*

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

iniziò con la realizzazione di scavi ispettivi lungo il perimetro della fabbrica per individuare la fattezze delle fondazioni e il rilievo del basamento meridionale che con il tempo, a causa di un innalzamento della piazza, si era parzialmente interrato soprattutto in zona est⁵¹.

Per attendere un programma dei restauri si aspettarono diversi anni a causa della mancanza di fondi, fu a partire dal 1876 che, prima il Capitolo Metropolitano con l'ing. Carlo Barberi, poi la Commissione con il coinvolgimento del Genio Civile, si iniziò a progettare in modo sistematico gli interventi da realizzare sul Duomo. A partire dal rifacimento della zoccolatura meridionale, alla realizzazione di un fossato e di un nuovo sistema di smaltimento delle acque piovane, al restauro della copertura, alla riduzione delle finestre settecentesche, alla demolizione della sopraelevazione dell'abside settentrionale, alla riduzione degli addossati accogliendo e al restauro della facciata accogliendo in gran parte tutte le istanze del Cavedoni.

Sebbene il lavoro condotto fosse ricco di approfondimenti e proposte progettuali, a causa della mancanza di fondi si procedeva a piccoli passi.

La svolta decisiva si ebbe nel 1896 con la fondazione del *Comitato promotore per i restauri del Duomo* organizzato e promosso dall'avv. Tommaso Sandonnini che, grazie ad un'azione di sensibilizzazione verso la cittadinanza cominciò a raccogliere i fondi per i lavori⁵².

Il primo lavoro successivo alla formazione del comitato fu quello della riduzione della *Cappella delle Reliquie* realizzata nel '600⁵³. L'intervento che si basava su un lavoro di rilievi e processi decisionali iniziati a partire dal 1878 ebbe luogo nel 1897. Un primo obiettivo fu quello di restituire l'originale aspetto dell'abside minore settentrionale demolendo la parte aggiunta nel '600, in modo da ripristinare "l'originale simmetria".

Ma l'intervento più importante condotto sulla Cattedrale e promosso dal *Comitato* fu senza dubbio l'isolamento del Duomo⁵⁴.

⁵⁰ D. Urtoller e G. Ferrari, planimetria del Duomo e dei fabbricati adiacenti, 1840, ASMo

⁵¹ Cristina Acidini Luchinat, Luciano Serchia, Sergio Piconi, *La commissione provinciale e i programmi dei restauri*, in *I restauri del Duomo di Modena 1875-1984*, Edizioni Panni, Modena 1984, pp31-40

⁵² Cristina Acidini Luchinat, Luciano Serchia, Sergio Piconi, *Il Comitato promotore: una svolta nei restauri*, in *I restauri del Duomo di Modena 1875-1984*, Edizioni Panni, Modena 1984, pp105; rif. Canonico Antonio Dondi, *Notizie storiche ed artistiche*

⁵³ Per una lettura più approfondita si rimanda a Cristina Acidini Luchinat, Luciano Serchia, Sergio Piconi, *La Cappella delle Reliquie trasformazione barocca dell'abside settentrionale*, Edizioni Panni, Modena 1984, pp105

⁵⁴ Per una lettura più approfondita si rimanda a Cristina Acidini Luchinat, Luciano Serchia, Sergio Piconi, *L'isolamento*, Edizioni Panni, Modena 1984, pp119-167

Mentre il lato meridionale del Duomo si affacciava sulla Piazza e (a parte la connessione aerea con il palazzo del Vescovo) risultava libero, quello settentrionale era quasi completamente oscurato da collegamenti ed edifici addossati.

A partire dalla fine del XIII secolo erano stati infatti costruiti una serie di strutture di proprietà del capitolo in aggiunta a quelle esistenti.

L'addossato più importante risultava essere il cosiddetto edificio delle canoniche organizzato in quattro corpi di fabbrica disposti a chiostro, appoggiati lungo il lato meridionale alla navata nord del Duomo. Ad oriente erano i magazzini e le botteghe che si affacciavano sulla via che consentiva l'accesso alla Porta delle Pescherie.

Di fronte all'ingresso settentrionale della Cattedrale c'era un protiro collegato per mezzo di una muratura sia alla torre che alle canoniche, lo spazio solaiato che si formava di profondità pari a circa 4.50 m ospitava il monumento funebre di Ercole III.

La torre infine era collegata per mezzo di due archi che consentivano il passaggio dalla Porta delle Pescherie alla piazza dietro alle absidi.

Al di sopra del voltone che copriva il passaggio c'era l'antica canonica realizzata nel 1338 al momento della costruzione degli archi di collegamento tra torre e Duomo; da queste stanze modificate e rovinate dopo un terremoto avvenuto nel 1501 si poteva accedere al primo piano della Torre.

Mentre era impossibile percepire l'aspetto della parete settentrionale del Duomo, la facciata libera sul suo fronte risultava stretta tra due casamenti costituiti dalle canoniche e dal passaggio sopraelevato con il Vescovado a sud. La parete esterna settentrionale della chiesa oltre a fungere da sostegno per il lato meridionale delle canoniche, venne nei secoli manomessa a causa della formazione di sfondamenti e passaggi.

I lavori di isolamento promossi dal *Comitato* iniziarono nel 1897 con l'esecuzione di alcuni rilievi e saggi al fine di procedere con sicurezza nelle demolizioni. Il progetto e la direzione lavori, su insistenza del *Comitato*, furono affidati all'Ufficio Regionale per la conservazione dei monumenti (soprintendenza).

Il progetto, completato nel 1898, comprendeva la formazione di uno stradello parallelo alla parete settentrionale del Duomo di circa 5 m, il riallineamento delle sporgenze del muro corrispondenti

all'altare del Crocifisso fra la seconda e la terza arcata, la cappella Fontana e il fonte battesimale. Inoltre preoccupazione dell'ing. Tosi (dell'Ufficio Regionale) era di garantire l'integrità statica e formale del monumento. I lavori che procedettero con una certa continuità si conclusero nel 1900 con lo spostamento del cantiere verso la Torre della Ghirlandina.

In questa occasione si accese il dibattito sull'effettiva funzione dei muri trasversali nel quadro dell'equilibrio statico di Torre e Duomo.

In un primo momento l'ing Tosi osservando il mancato ammorsamento dei muri alle pareti del Duomo disse che non erano stati realizzati allo scopo di contrastare l'inclinazione della torre verso il Duomo. Contemporaneamente il *Comitato* nominò una commissione tecnica presieduta dal Sandonnini al fine di studiare l'opportunità di demolire i due muri trasversali rimandando alla Commissione provinciale le valutazioni statiche.

La risposta fu formulata in poco tempo; la constatazione dello stato di degrado dei muri trasversali che presentavano ampie lesioni e distacchi dalle pareti dei due monumenti, legate ai movimenti strapiombanti reciproci di Torre e Duomo, suggerì di ripristinare e conservare il collegamento tra i due edifici. Insieme a queste vennero avanzate altre proposte per migliorare la stabilità della torre e per modificare il sistema di accessi.

Contemporaneamente ai lavori di isolamento del lato settentrionale del Duomo procedevano quelli del lato meridionale.

Il progetto di demolizione dei collegamenti con il palazzo vescovile non fu affrontato con particolare attenzione come quello del lato nord. I lavori iniziarono a partire dal 1901. Il Faccioli direttore dell' Ufficio Regionale rispondendo al presidente del *Comitato* sulla possibilità di mantenere un collegamento scrisse: *Questo Ufficio compilò il progetto di isolamento, studiò se era conveniente lasciare tra i due fabbricati un cavalcavia ma dovette abbandonare tale idea perché esso non potendo essere costruito che presso la facciata principale del tempio avrebbe nociuto all'effetto estetico ed artistico della facciata stessa ...*⁵⁵. La percezione della fabbrica all'esterno, alla fine dei lavori di isolamento è la medesima che si percepisce oggi; sul lato

⁵⁵ Lettera datata 15 febbraio 1901 ASBAAE

settentrionale sono rimasti i collegamenti con la torre e con la canonica, mentre a sud sono stati del tutto eliminati.

Dopo soli cinque anni dalla fine dei lavori di isolamento iniziarono gli interventi di restauro sulla facciata meridionale e nel 1913, all'interno, quelli di rifacimento della pavimentazione e di ripristino del pontile campioneso.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

La ricostruzione planimetrica del Duomo mostra elementi di grand interesse, in parte originali ed in parte ricollegabili alle tipologie tipiche del periodo.

È noto che le tipologie costruttive sacre dell'alto medioevo erano caratterizzate da forme costruttive paleocristiane, opportunamente semplificate, assieme a caratteri formali di influenza bizantina⁵⁶.

I primi esempi in Italia di architettura romanica sono riferibili al IX secolo ad Algiate in Brianza nell'875 (fig. 41). La struttura di questa chiesa evidenzia come si nota nella tavola seguente una forte analogia con quella del Duomo di Modena.

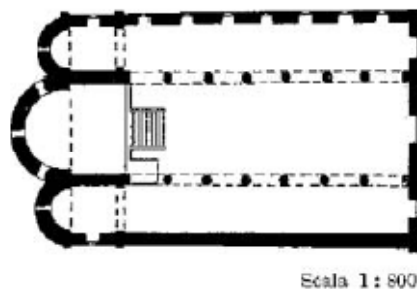


FIG. 41- Planimetria Chiesa di Algiate

L'impostazione planimetrica è quella della basilica paleocristiana, con tre absidi parzialmente compenetranti di derivazione bizantina. L'aspetto originale rimane nel sistema voltato dell'ultima campata, costituito da volta a botte per quella centrale e a crociera per quelle laterali.

Il collegamento di questi primi accenni di architettura romanica, con la formazione delle scuole romaniche e con le varie zone geografiche di sviluppo non è semplice⁵⁷.

Confrontando la pianta della chiesa di Algiate con la pianta di un'altra chiesa, quella di S. Ambrogio a Milano (fig.42), (rimaneggiata e ricostruita tra il XI secol e il XII secolo), si notano altre forti analogie.

⁵⁶ L'area geografica individuata dagli studiosi come zona di formazione dell'architettura romanica, comprende la Catalogna, la Francia meridionale e l'Italia del nord..

⁵⁷ l'architettura romanica che si è sviluppata in Italia trova riferimenti importanti in Lombardia e in Germania.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

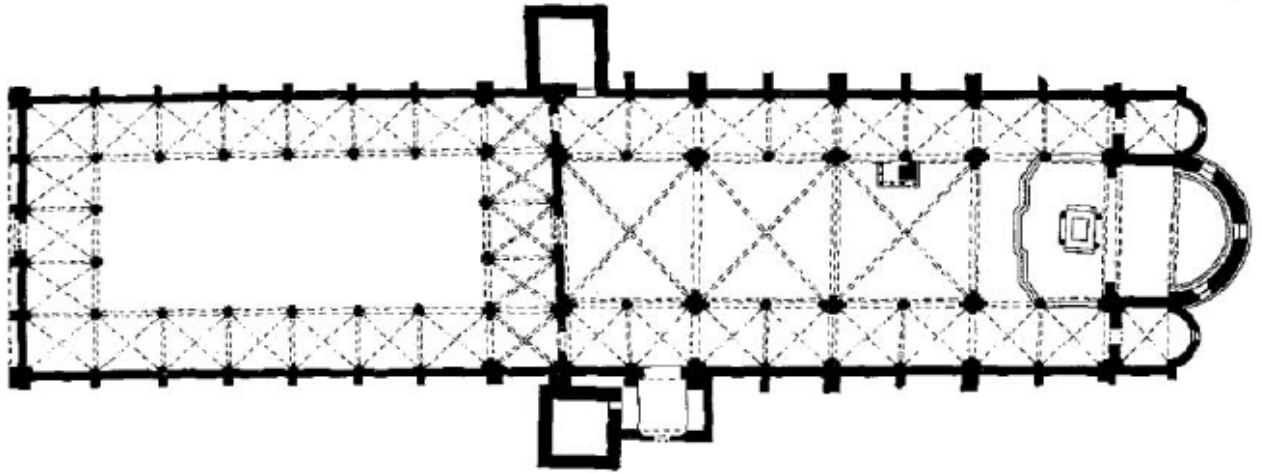


FIG. 42- Planimetria Chiesa S. Ambrogio (Milano)

Il presbiterio risulta impostato in modo analogo con la volta a botte per la navata centrale e a crociera per quelle laterali. La planimetria, priva di transetto, termina come ad Alghiate con tre absidi ma al contrario di altre tipologie le navate sono tutte coperte con volte a crociera.

L'impostazione del sistema voltato, derivato dalla necessità di coprire campate con piante prossime al quadrato e di lunghezza disuguale, fa corrispondere una campata della navata centrale a due delle laterali (più basse e sormontate da logge).

La sequenza delle volte a crociera della navata centrale, caratterizzate da nervature ben evidenti che conducono il carico sui pilastri, termina sopra all'altare maggiore con un tiburio a padiglione ottagonale, sorretto da due ordini di trombe.

A sottolineare il sistema strutturale vi è un gioco di cromatismi che mette in evidenza l'alternanza tra la cortina di laterizi e la pietra da taglio.

L'analisi degli impianti basilicali di Alghiate e Milano conduce all'impostazione planimetrica della Cattedrale di Modena, esempio di interpretazione del modello lombardo, più alleggerito

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

senza tiburio ma con la parte della copertura nella zona presbiterale sopraelevata rispetto a quelle delle navate⁵⁸.

Risulta dunque evidente la continuità formale del disegno architettonico planimetrico tra le citate esperienze lombarde e la Cattedrale di Modena (fig. 43), la cui pianta si presenta nei termini seguenti.

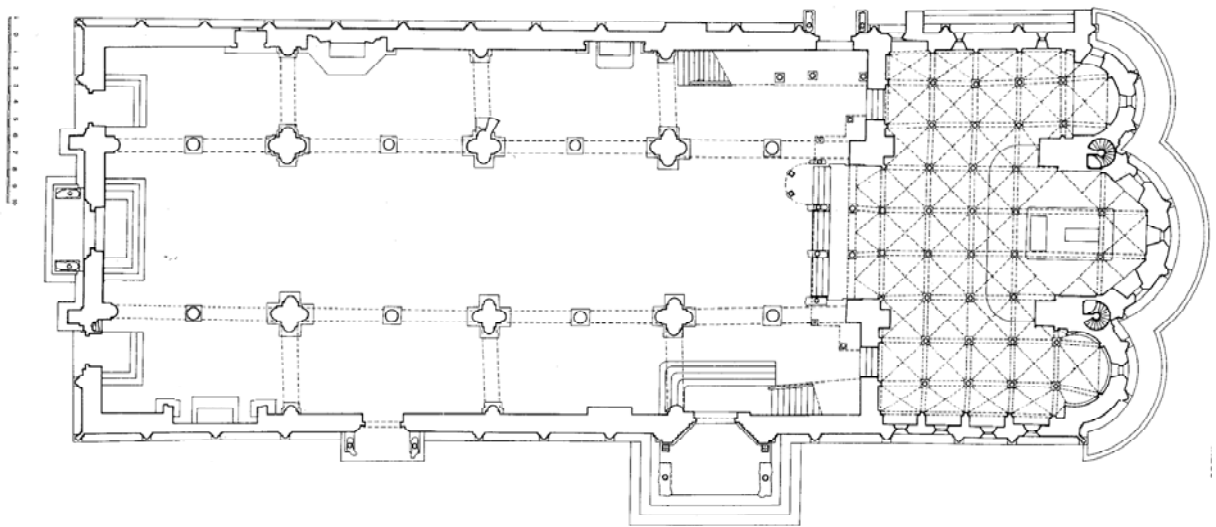


FIG. 43- Pianta a quota +1 m dal pavimento . Tavola 5 (Palazzi 1984)

La fabbrica del Duomo di Modena oggi è il frutto di diverse modificazioni avvenute nel corso dei secoli.

Rimane comunque fondamentale, nelle modificazioni, l'intervento dei Campionesi⁵⁹ attivi per molti decenni nel cantiere del Duomo.

⁵⁸ Giovanni Carbonara, *L'architettura Romanica*, in *Atlante del restauro*, Torino : UTET, 2004. - 2 v. (XIV, 1014 p. compless.) : ill. ; 29 cm.

⁵⁹ Gli eventi più rilevanti connessi con il processo costruttivo del Duomo sono i seguenti: 1099 23 maggio , scavo delle fondazioni; 1099 9 giugno, posa della prima pietra; 1106, 30 aprile traslazione delle reliquie di S.Geminiano dalla vecchia cattedrale alla nuova; 1106, 8 ottobre consacrazione dell'altare del santo; 1117 3 gennaio terremoto; 1137, 13 aprile *Magister Lanfracus* sottoscrive come testimone un atto del Vescovo di Modena (Emilio Paolo Vicini, *Regesto della Chiesa cattedrale di Modena*, 1931 p.323, n.393); 1184 , 12 luglio , solenne consacrazione del Duomo; 1190 presenza dei maestri camionesi a Modena e modifiche della zona presbiterale; 1231 in un documento risulta già esistente la porta regia, Dondi 1896; 1208-1225 Bozzalino, "massaro del Santo" il suo nome risulta nell'iscrizione absidale; 1209 Il Maestro Anselmo da Campione è citato come testimone in un atto (Dondi 1896);

La Cattedrale, plani metricamente, si presenta come un edificio sviluppato lungo l'asse est ovest. L'impianto basilicale, di matrice paleocristiana, costituito da tre navate termina con tre absidi parzialmente compenetranti, senza transetto come Milano ed Alghiate. Gli accessi alla chiesa sono distribuiti lungo il perimetro in modo non uniforme. In facciata sono presenti tre ingressi⁶⁰, sul lato sud due (porta dei Principi e la porta Regia), sul lato nord uno (Porta della Pescheria).

La zona del presbiterio risulta particolarmente articolata: il coro e il presbiterio, sopraelevati, sono collegati alla canonica tramite un percorso in quota, mentre alle navate tramite un sistema di scale. Alzando lo sguardo dal presbiterio verso l'ingresso si nota il grande rosone centrale di facciata e un finto matroneo (loggiate) al di sopra degli archi della navata centrale sormontato da un sistema di finestre che illuminano la chiesa.

Le volte a crociera in muratura che coprono le tre navate sono di dimensioni raddoppiate nella zona centrale rispetto a quelle laterali come a Milano.

Le strutture che sorreggono l'imponente monumento sono costituite da un muro perimetrale e un sistema *alternato* di pilastri, forti e deboli che sorreggono la parte centrale. Ai pilastri *forti* il compito di reggere i contrafforti e la copertura, a quelli *deboli* il compito di ridurre le luci di carico. La copertura esternamente risulta a falda semplice e complanare fino al presbiterio dove si articola in modo da creare un falso transetto e si alza per dare più luce all'interno. La cripta, raggiungibile superando un piccolo dislivello, è costituita da un soffitto voltato sorretto da una fitta trama di colonne lapidee con capitelli finemente scolpiti.

All'interno delle tre nicchie delle absidi sono posti altari votivi: quello centrale, il più importante contiene le spoglie di S. Geminiano.

Pur riconoscendo l'importanza di tutto l'apparato scultoreo che incornicia la cattedrale modenese, (si rimanda a letture specifiche per un suo approfondimento) sono gli aspetti statico strutturali quelli sui quali occorre produrre alcune riflessioni.

1404 Un rogito del 4 maggio dice ancora esistente il soffitto ligneo; 1453-1455 costruzione delle volte; 1501 Terremoto; 1832 Terremoto

⁶⁰ Originariamente era presente solo l'ingresso principale, le modifiche dei campionesi portarono all'aggiunta di altri due ingressi minori posti ai lati.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Per consentire una comprensione dell'impianto nel suo complesso risulta utile accennare agli elementi verticali agli orizzontamenti e alla copertura.

Per comprendere meglio la forma e la composizione della struttura verticale che sorregge la Cattedrale può essere immaginata scomposta in due parti fondamentali: la murature perimetrale e il sistema di pilastri e archi delle navate.

Le murature, di spessore pressoché costante (1.15 m) disegnano il perimetro della chiesa e sorreggono il primo livello della copertura. Ogni lato dell'edificio è decorato con un paramento lapideo di circa 0.25 m di spessore. In facciata, la muratura, originariamente poco traforata, è stata arricchita in periodo *Campionesese* dal rosone e dai due ingressi laterali, ed è caratterizzata dalla presenza di due setti verticali che ne scandiscono la geometria e che ne irrigidiscono la struttura (fig.44).

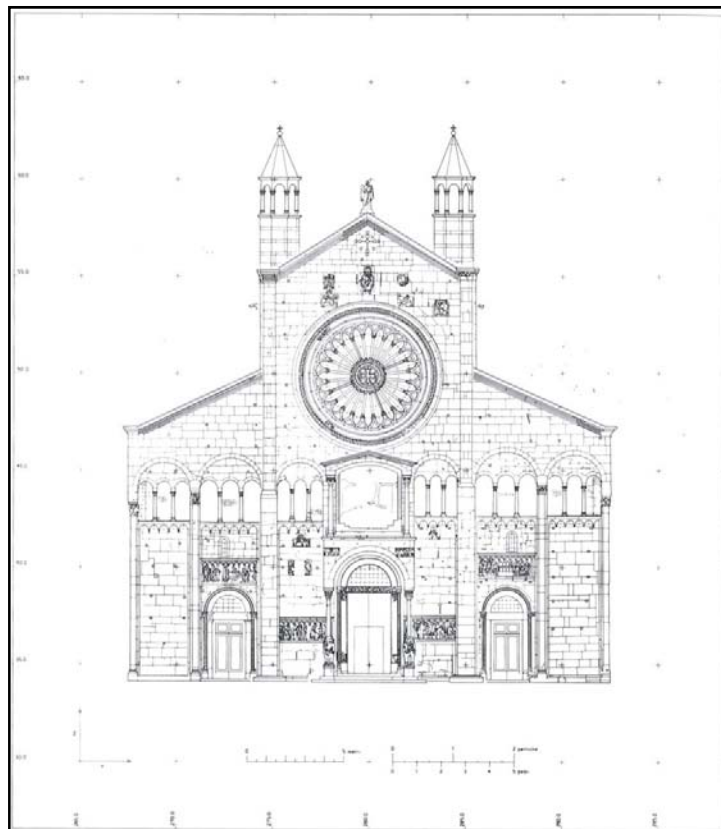


FIG. 44- Immagine tratta dal rilievo fotogrammetrico (Palazzi1984)

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

I fronti sud e nord, appaiono regolarmente scanditi da un sistema di archi addossati in pietra, ripetizione dei motivi absidali (fig. 35).



FIG. 45- Immagine del Duomo, lato sud, vista dai portici del Comune, si notano le modanature del paramento lapideo che partono dalle absidi e si ripetono lungo il perimetro, inoltre è evidente la modifica campionesse del finto transetto.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Il lato nord risulta, ad un piano superiore, collegato con le canoniche e la torre della Ghirlandina grazie ad un sistema di archi-passaggi.



FIG. 46- Duomo, Lato nord, immagine da ponteggio, si notano il collegamento con canoniche. E' ben visibile anche una irregolarità nell'andamento lineare della cornice.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare



FIG. 47- Duomo, lato nord, vista dalla torre verso la facciata, liberata dai ponteggi dopo l'ultimo restauro.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

La zona absidale, costituita da tre nicchie realizzate con una muratura ad apparecchiatura curvilinea di matrice bizantina, chiude l'estremità est della cattedrale.

All'interno delle murature che dividono l'abside centrale da quelle laterali, sono contenute delle scale, non più agibili, che permettevano di raggiungere la cripta direttamente dal coro.

L'apparato lapideo a decorazione delle absidi, realizzato cronologicamente prima rispetto a quello degli altri lati è con tutta probabilità la matrice decorativa di base poi sfruttata nel resto del perimetro.

Il sistema delle navate ne vede una centrale più ampia e due laterali, su cui si affacciano le cappelle, più strette. Il sistema centrale dei sostegni strutturali passa da continuo a puntuale. Il sistema *alternato*, è caratterizzato da imponenti pilastri in muratura “detti forti” che sostengono trasversalmente archi ogivali al centro e archi a tutto sesto ai lati, che a loro volta scaricano su colonne addossate alla muratura perimetrale (fig. 38).



FIG. 48-Navata centrale del Duomo

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Al di sopra degli archi, nascono murature che sostengono la copertura. Tra un pilastro forte e l'altro, ci sono colonne più basse che sostengono archi a tutto sesto posti in direzione longitudinale che scaricano il loro peso in parte sui pilastri forti in parte sui pilastri *deboli*.

Tutto il sistema di elementi verticali puntuali appoggia su basamenti lapidei diversamente decorati.

Le dimensioni in pianta dei pilastri in termini di sezione resistente corrispondono a 2.91 mq mentre quelli deboli a 0.36 mq; le murature al di sopra di questi sono di circa 0.90 m di spessore. Ad alleggerire i carichi sui pilastri sono i vuoti nella muratura: costituiti da un loggiato in direzione trasversale, tra la navata centrale e quelle laterali, e in direzione longitudinale a formare un finto matroneo. Inoltre si evidenzia il sistema di finestre, al di sopra del finto matroneo, rispetto agli archi sorretti dai pilastri *deboli*. Il sistema alternato si interrompe in corrispondenza del presbiterio coperto da un'unica campata realizzata con archi a tutto sesto che si reggono sia su pilastri in muratura che sprofondano fino alla cripta, sia sulla muratura dell'abside centrale.

Tutto il presbiterio, sopraelevato rispetto alla quota delle navate, è sorretto da un sistema di volte a crociera e colonne in pietra di sezione 0.064m e altezza 2 m circa. Il sistema di finestre nella zona della cripta risulta non omogeneo, a causa della stratificazione di interventi che si sono succeduti nel tempo, in particolare dell'aumento della quota del pavimento rispetto all'originale.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

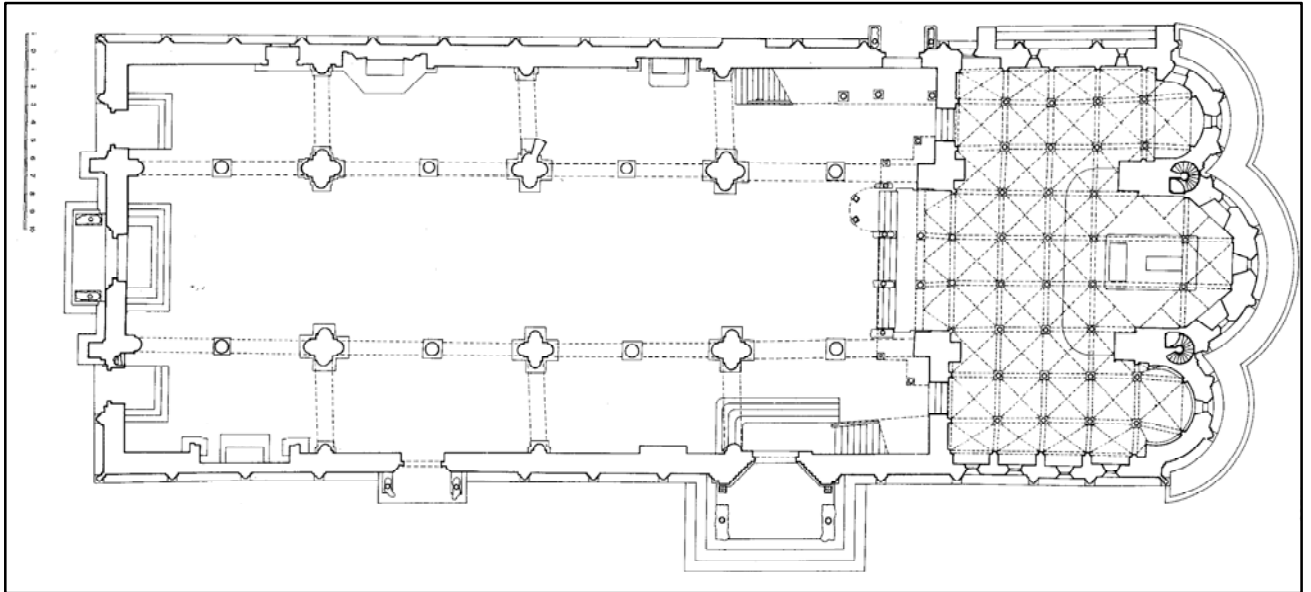


FIG. 49- Pianta livello pavimento navate, si nota , l'ordine alternato, e la rete di pilastri della cripta (Palazzi 1984)

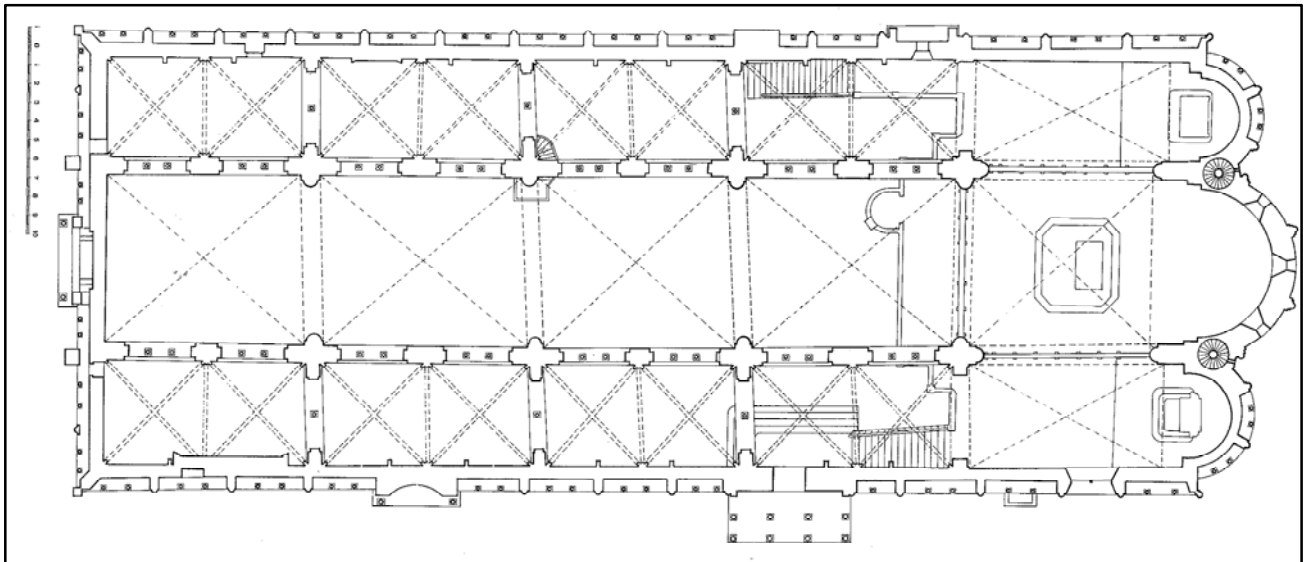


FIG. 50- Pianta livello finti matronei (Palazzi 1984)

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

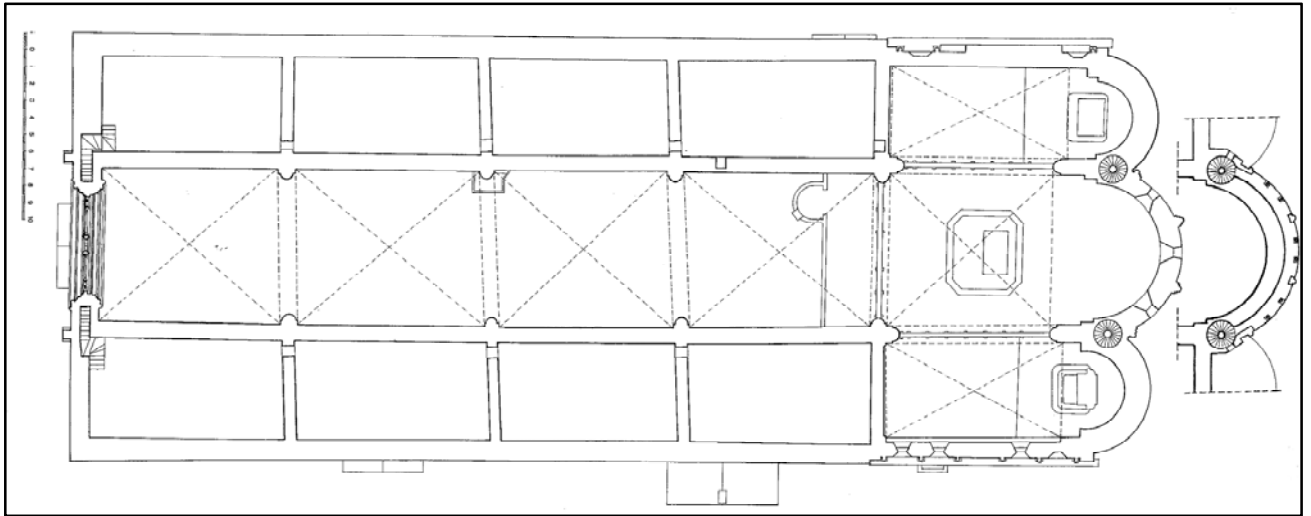


FIG. 51-Pinta sottotetto navate laterali. (Palazzi 1984)

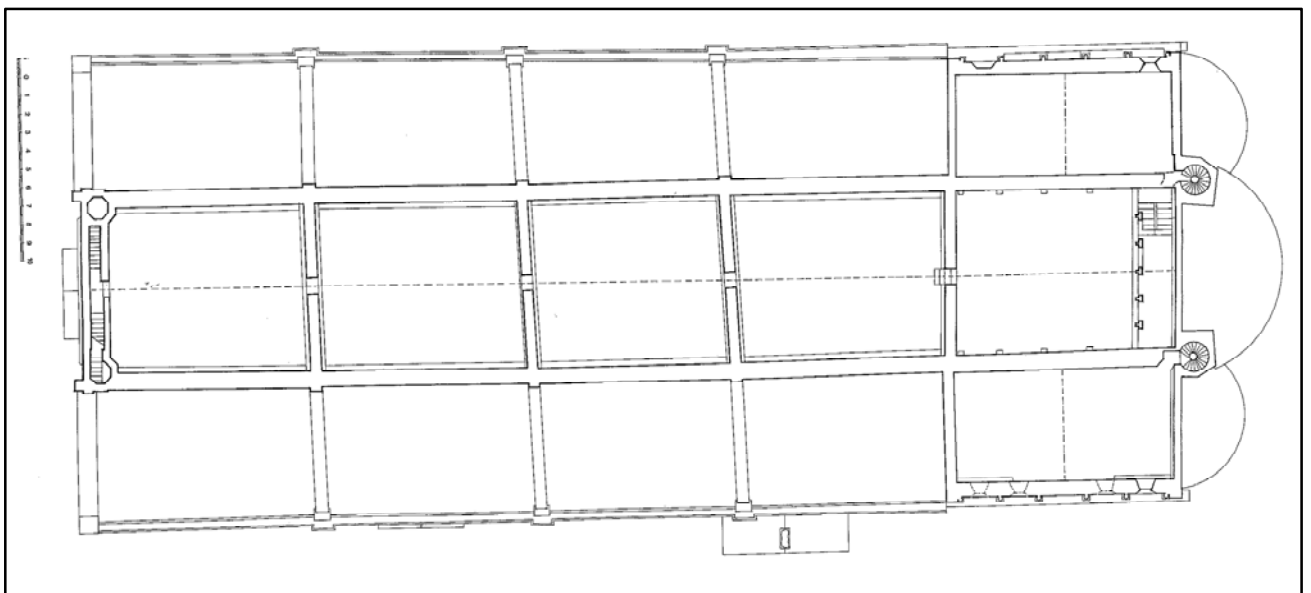


FIG. 52- Pianta sottotetto navata centrale (Palazzi 1984)

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

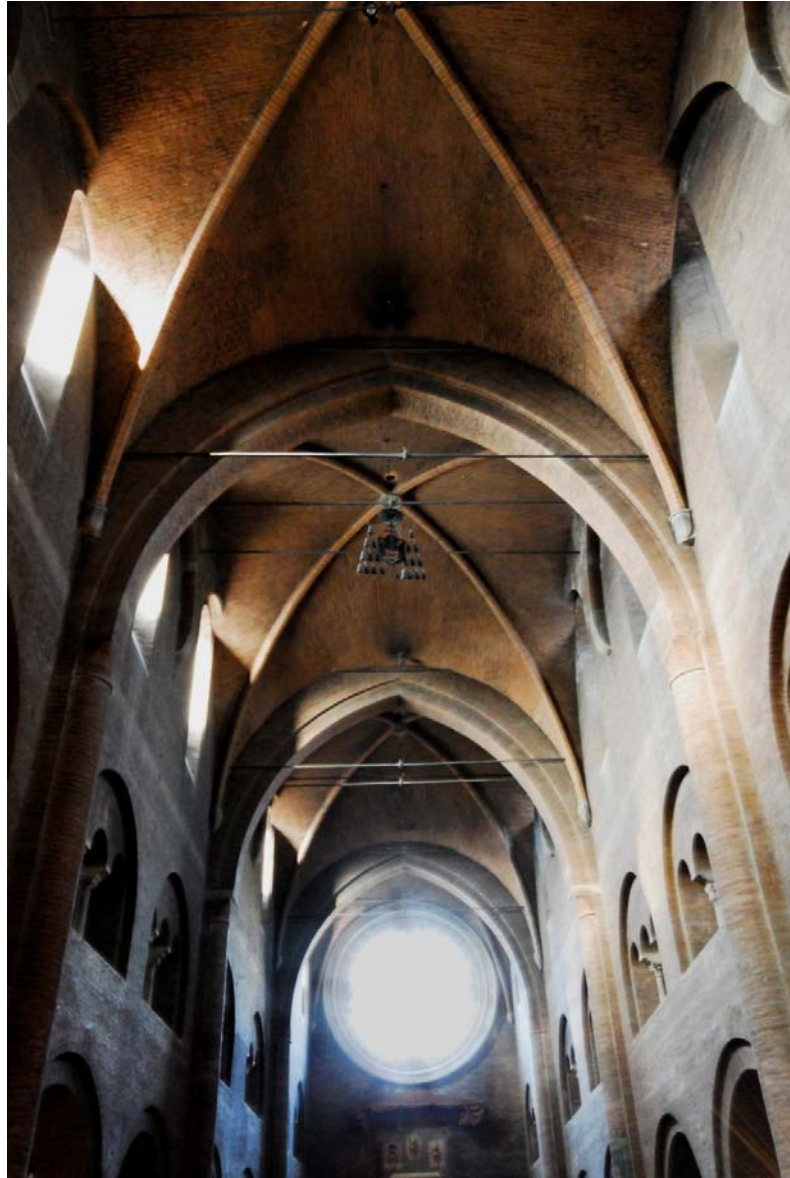


FIG. 53- Inquadratura da est a ovest. Le volte navata centrale

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

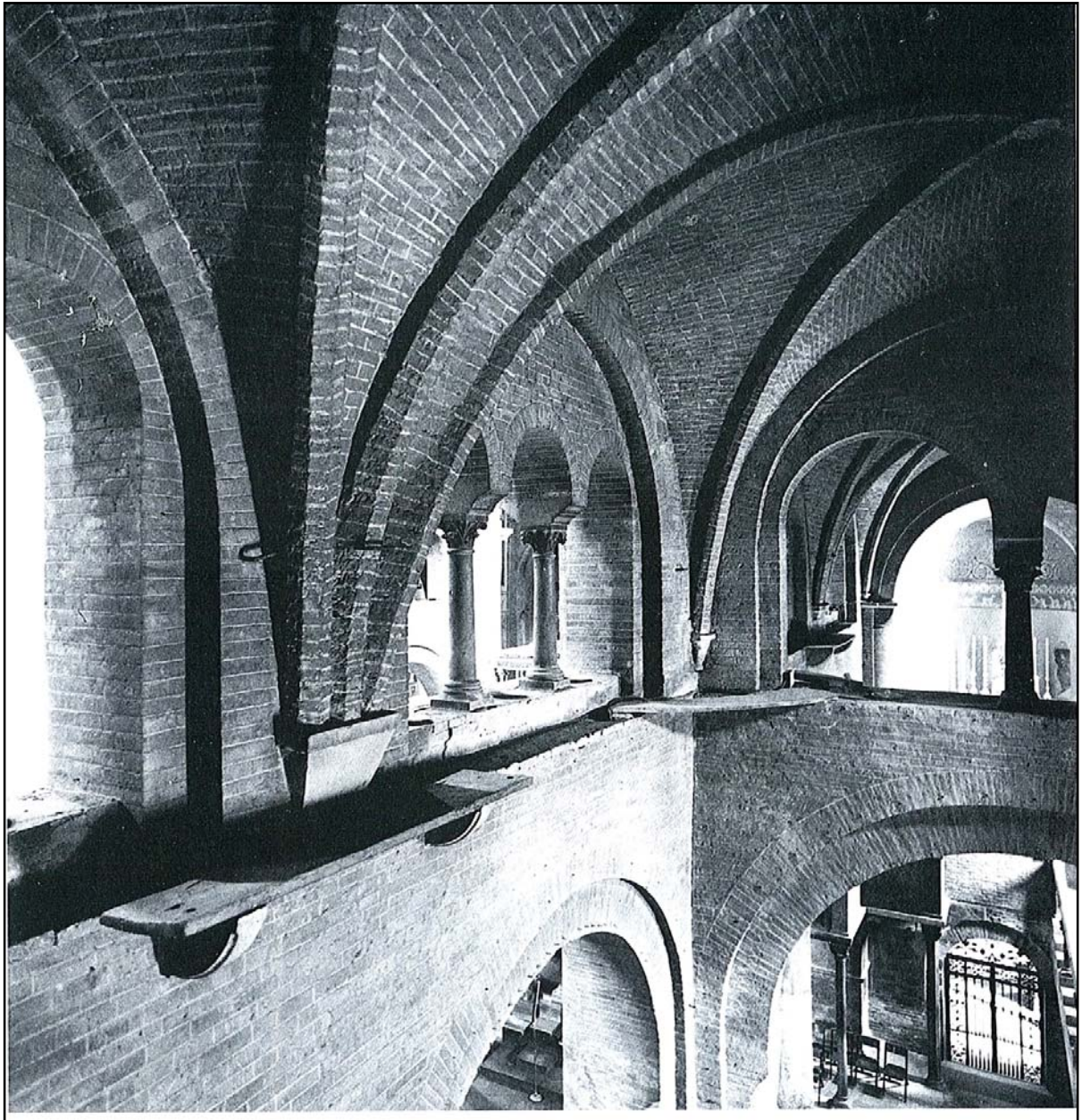


FIG. 54- Immagine in cui si vede il finto matroneo.(Lanfranco e Wiligelmo, Il Duomo di Modena)

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

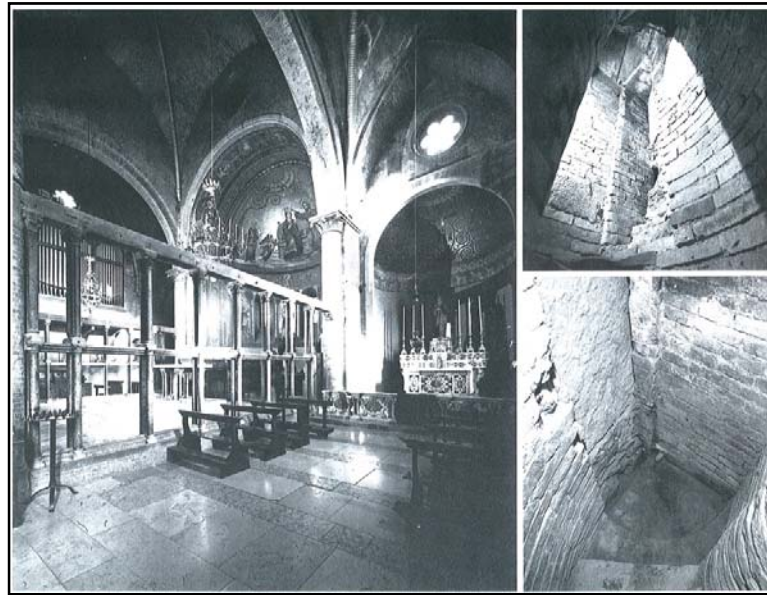


FIG. 55- Il presbiterio, e il sistema di scale a chiocciola che lo collega con la zona della cripta. (Lanfranco e Wiligelmo, Il Duomo di Modena)

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Per quanto riguarda gli orizzontamenti le volte e la copertura sono evidenti talune continuità e talune discontinuità con lo sviluppo verticale.

Le volte che coprono le capriate sono in muratura e presentano nervature che confluendo in nodi consentono di intuire il percorso di scarico del peso proprio. Le volte che si differenziano per dimensione si distinguono tra il presbiterio e le navate, in particolare quelle della navata centrale coprono una luce che è circa il doppio di quelle laterali.

Questa differenza sta nel fatto che le volte della navata centrale, impostate ad una quota maggiore rispetto a quelle laterali (al disopra delle finestre), hanno come appoggi i pilastri forti, mentre quelle delle navate laterali, più basse impostate sopra al finto matroneo, hanno una luce che va da pilastro *debole* a pilastro *forte*, che risulta essere circa la metà di quelle centrali.

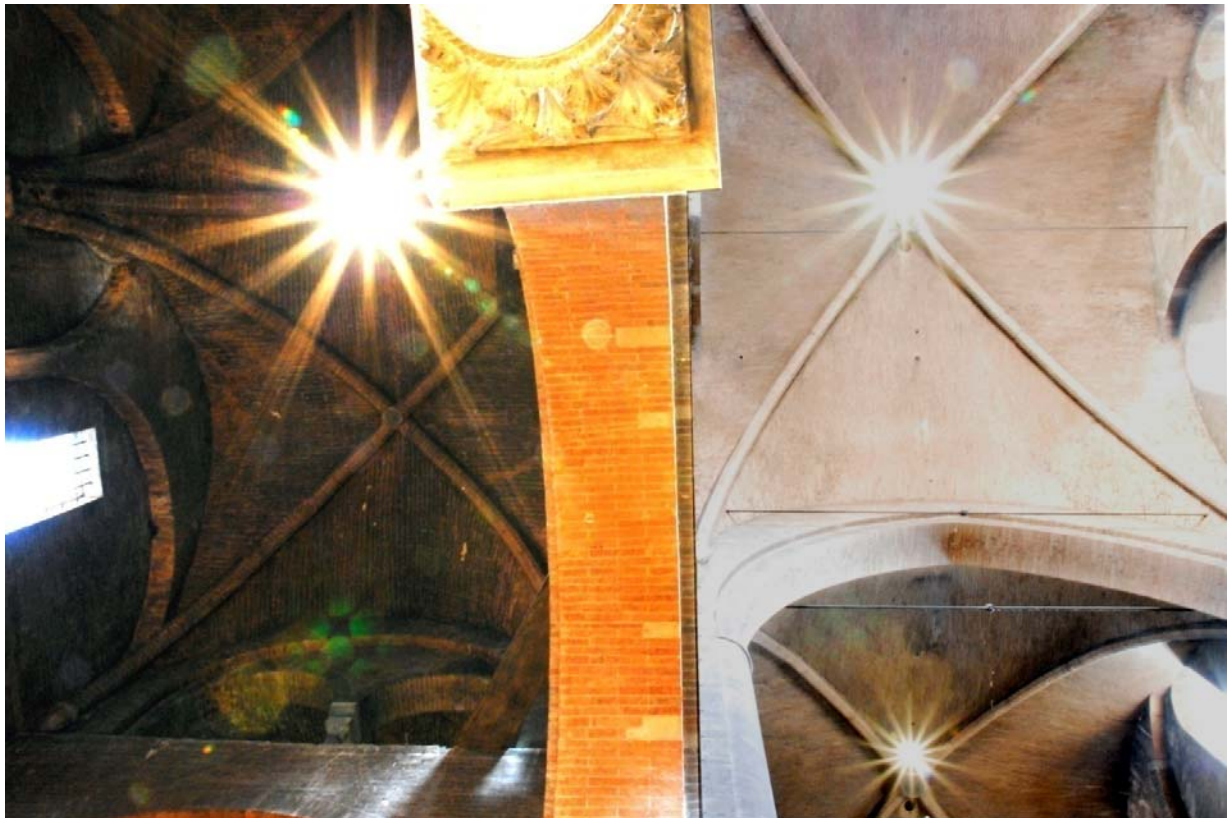


FIG. 56- Immagine che mostra il rapporto dimensionale tra le volte della navata centrale e quelle laterali, si notano le nervature, il sistema di finestre e i tiranti

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare



FIG. 57- Volte e loggiato trasversale navata laterale sud

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

La zona del presbiterio è coperta da volte a crociera di uguale fattura ma dimensioni differenti rispetto a quelle laterali. La quota d'imposta risulta più alta di circa un metro e la luce più corta. Il sistema voltato cela al visitatore la struttura lignea della copertura, non più fedele all'originale a causa dei lavori di restauro successivi al terremoto del 1832. Il progetto di restauro realizzato nel 1840 prevedeva di sostituire le travature longitudinali che premevano sugli estradossi dei solai, con un sistema di elementi lignei collegato tramite fasce di ferro (fig. 47).

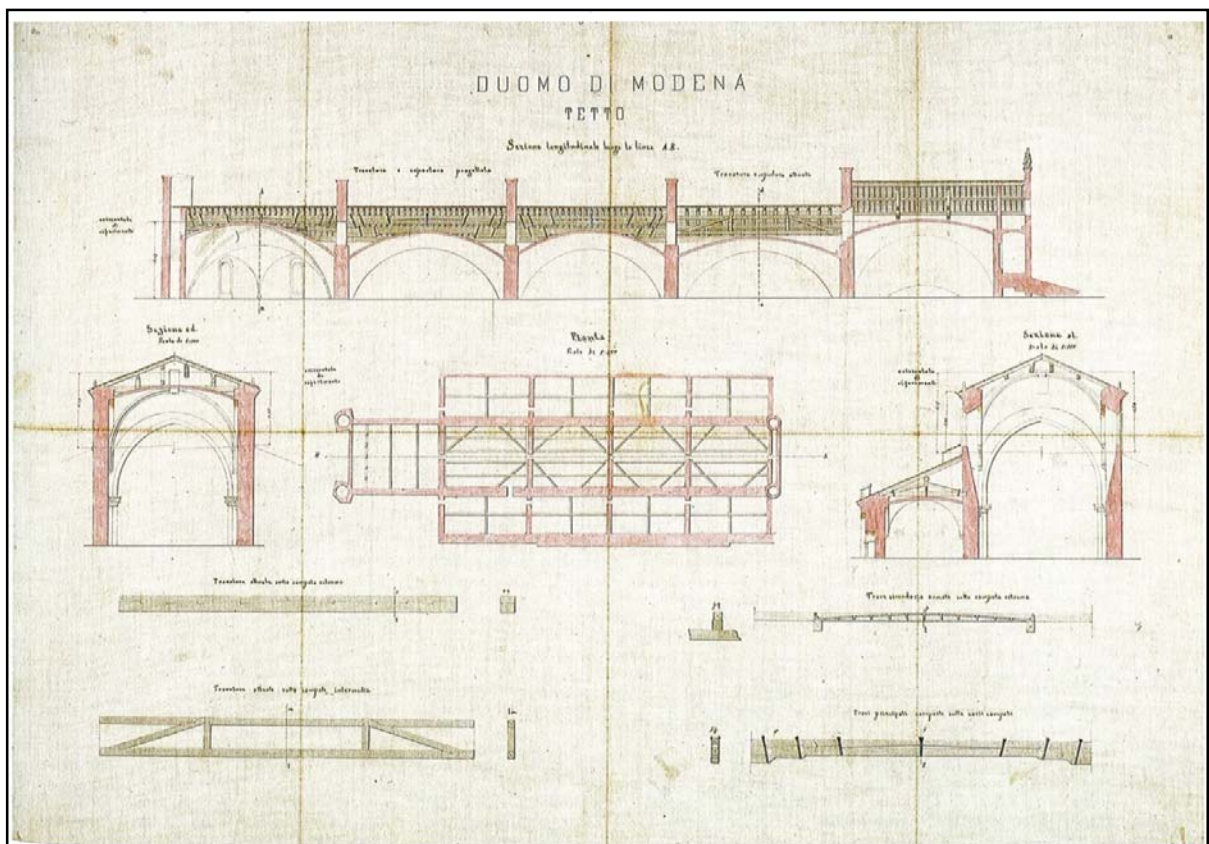


FIG. 58- Immagine che raffigura il progetto di consolidamento della coperturaIngegneri Bossanisco e Cavazzuti, Tavola con progetto di consolidamento del tetto del Duomo, 1878 ASMO, Archivio di Stato, Genio Civile, f.24 bis

La struttura originaria della copertura della cattedrale era con tutta probabilità a falde sostenute da capriate trasversali. A far supporre questo, oltre alla tradizione delle chiese dell'epoca, il ritrovamento durante le fasi di restauro del 1840 delle mensole che sostenevano le strutture

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

lignee. La modifica quattrocentesca delle volte costrinse poi a modificare l'orditura principale della copertura che da trasversale passò a longitudinale.

Al di sotto della copertura delle capriate c'era con tutta probabilità un controsoffitto ligneo, a testimonianza di questo i buchi ravvicinati nella muratura per alloggiare le teste delle travi (fig. 59).



FIG. 59- Immagine tratta dal volume Lanfranco e Wiligemo, *il Duomo di Modena*

3 La Torre della Ghirlandina: analisi del costruito e dei dissesti

L'analisi delle vicende storiche che riguardano la torre civica di Modena è particolarmente complessa. Soprattutto per la mancanza di descrizioni precise sulla costruzione e sulla difficile interpretazione di importanti aspetti che ne riguardano le diverse fasi.

Grazie al contributo del comitato scientifico del comune di Modena, è stato comunque possibile realizzare approfondimenti storici e ipotesi che consentono, con buona approssimazione di fissare gli elementi evolutivi del cantiere.

Il lavoro si è avvalso dai dati provenienti da una revisione completa dei documenti d'archivio disponibili curata, dalla Dott.ssa Dieghi, dai rilievi geometrici condotti dalla facoltà di Architettura di Parma, dai dati di carattere stilistico architettonico prodotti dalla Dott.ssa Piccinini, e dagli geologici e geotecnici realizzati dai prof.ri Lugli e Lancellotta.

Gli studi saranno arricchiti ulteriormente da un rilievo tridimensionale condotto dal prof. Capra dell'ateneo modenese che completerà le conoscenze ormai consolidate sulla Torre.

L'obiettivo di questo studio è quello di un approfondimento storico in grado di evidenziare le ragioni e i rapporti tra diverse ipotesi e di permettere con buona approssimazione la ricomposizione degli aspetti evolutivi salienti del cantiere.

La Torre Civica di Modena detta della Ghirlandina, per dimensioni, risulta essere una delle strutture più imponenti del panorama delle costruzioni snelle di epoca medioevale dell' Emilia Romagna, seconda solo alla torre degli Asinelli di Bologna eretta nel 1109 (l'altezza di circa 97,2 m con uno strapiombo di 2,2 m) e, allargando lo sguardo al resto del Paese, non molto più piccola del Torrazzo di Cremona (costruito a partire dal 754 d.C.), che ha il primato di torre in muratura medioevale più alta d'Italia con 110 m di sviluppo verticale.

La Torre sorge lungo il lato nord della Cattedrale, arretrata rispetto alla facciata nella zona absidale, misura un perimetro di circa 44 m e un'altezza complessiva dalla punta della croce, posta in sommità, di circa 90 m.

Percorrendo con lo sguardo lo sviluppo verticale della Torre, esternamente, si possono distinguere tre parti fondamentali, la prima di sezione pressoché quadrata, la seconda ottagonale e la terza piramidale.

Di queste la prima è quella più importante ed arriva ad una quota da terra di circa 47 m, la seconda a 57 m la terza, ad esclusione della croce, a 87 m.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Tutta la torre è rivestita, come il Duomo, di lastre di pietra che disegnano, nella parte quadrangolare, delle lesene che dividono in tre spazi i prospetti; la verticalità risulta interrotta solo da sei cornicioni posti a distanza pressoché regolare.

Le ultime due parti sebbene arricchite come quella sottostante con un paramento lapideo, sono state alleggerite con diverse forature e geometrie più snelle.

La struttura massiccia è quasi completamente chiusa verso l'esterno fino al secondo piano (circa 16 m dal p.c.), salvo alcune feritoie lungo i lati poste sia al centro che a margine dei quattro prospetti. A partire dal terzo piano a circa 24 m di quota si trova una prima apertura verso l'esterno (monofora), posta al centro della parete e simmetrica sui quattro lati, che si trova duplicata al terzo piano (bifore) e triplicata al quarto e quinto piano (trifore con colonne binate nel senso dello spessore).

Nella parte quadrangolare addossati alla facciata sud si trovano l'ingresso realizzato alla fine dell'800 e i due archi di connessione con la fabbrica del Duomo anch'essi frutto di un rifacimento di inizi '900.

La parte ottagonale è impostata a circa 47 m ed è alta circa 10 m; estremamente traforata presenta aperture simmetriche su gli otto lati che si dividono verticalmente in due tipi: nella parte bassa bifore in quella più alta trifore. Le bifore hanno colonne binate nel senso dello spessore, mentre le trifore colonne singole.

In passato, (come si può vedere da un dipinto del 1540 *L'adorazione dei Magi* di Nicolò Abati) la parte ottagonale era arricchita con motivi di carattere gotico costituiti da edicole e pinnacoli.

Al di sopra della zona ottagonale trova spazio una prima balconata che fa da cornice alla base della parte piramidale (che si sviluppa per circa 26 m) interrotta verso la sommità da una seconda balconata (dopo 19 del suo sviluppo). Ognuno di questi spazi viene denominato "Ghirlandina" da cui deriva il nome della torre.

Nel complesso l'accostamento della Torre al Duomo risulta visibilmente sproporzionato con una netta prevalenza delle dimensioni della Ghirlandina rispetto a quelle della Cattedrale (Fig. 60).

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

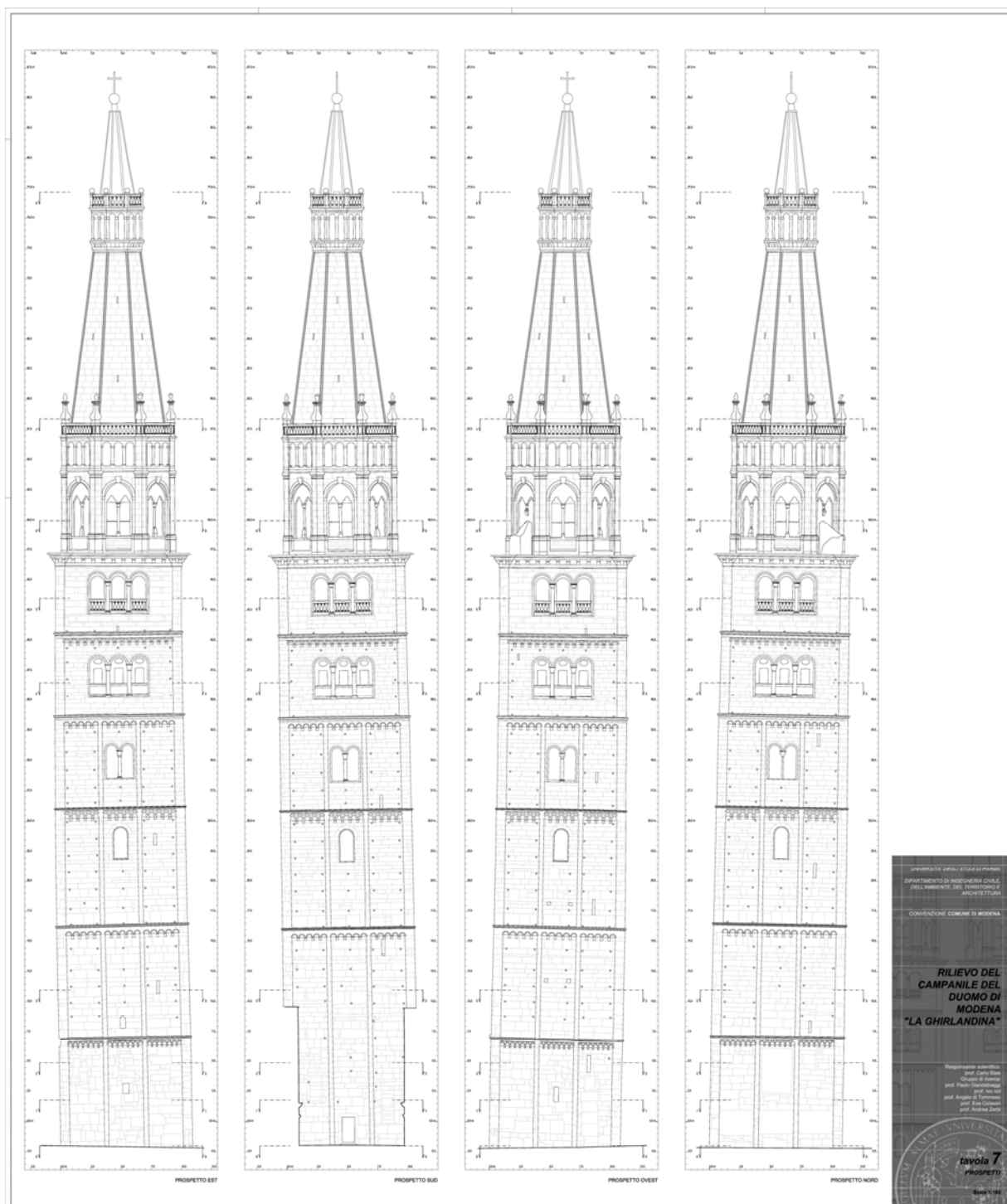


FIG.6 -Prospetti-Rilevo a cura del Dipartimento di Ingeria Civile dell'Ambiente del Territorio e Architettura dell'Università degli Studi di Parma

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Entrando dall'unico accesso disponibile a sud della Torre è possibile vedere la struttura interna, caratterizzata da murature in laterizio portanti che al crescere della quota si snelliscono sempre più fino a concentrare la propria funzione in quattro pilastri d'angolo.

Questi quattro pilastri, presenti dalla base della torre sporgono dalla muratura perimetrale (spessa circa 1,95 m compreso il rivestimento) circa di 1.60 m e partendo pieni, diventano cavi nel quarto piano. Superati i 9 m di quota i muri perimetrali diminuiscono di spessore e compaiono quattro grossi pilastrini muratura. La canna della torre risulta libera per un'altezza di 25 m e la scala si snoda lungo il perimetro. Dalla quota di 34 m i pilastri scompaiono, il perimetro si apre con ampie logge e la scala prosegue a chiocciola all'interno dei pilastri fino all'inizio dell'alta guglia ottagonale, inizialmente prismatica e finestrata e poi conica (Fig. 61).

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

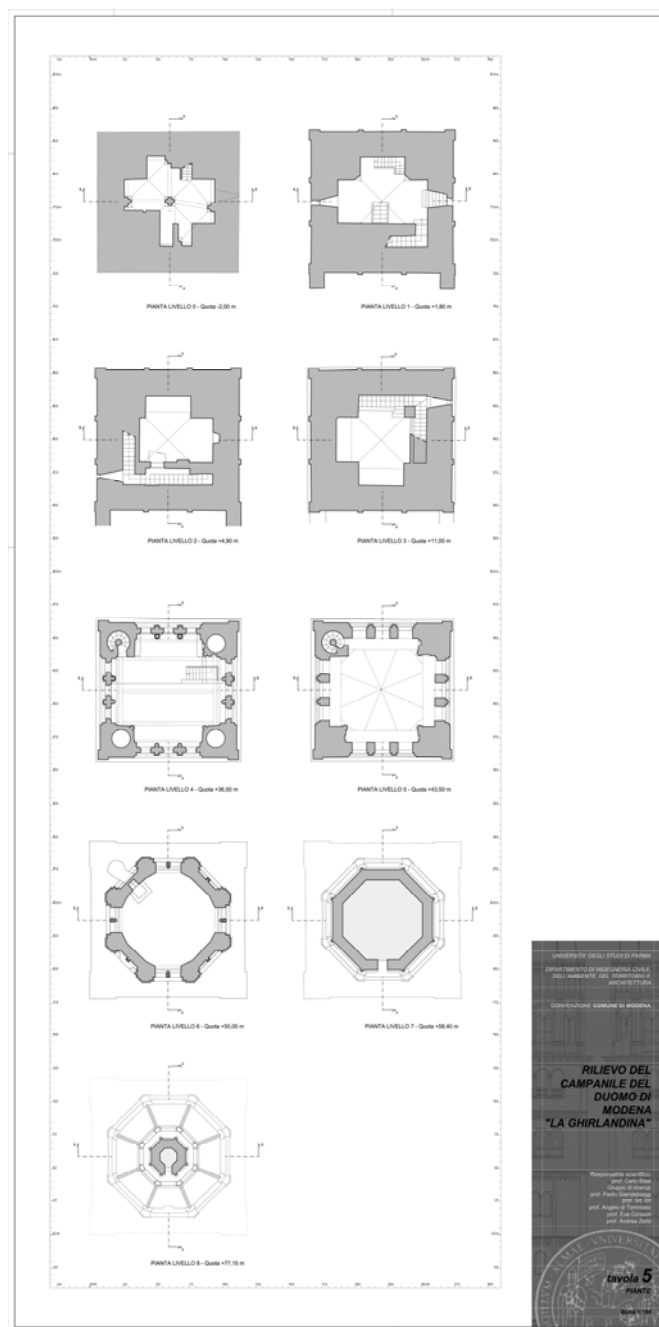


FIG.61 -Piante-Rilevo a cura del Dipartimento di Ingeria Civile dell'Ambiente del Territorio e Architettura dell'Università degli Studi di Parma

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

La struttura portante nella parte ottagonale, alleggerita da importanti forature, appoggia solo parzialmente sulla muratura del piano inferiore lasciando alcune parti in falso; a causa della forma dei setti di muratura lo spessore della parte portante risulta variabile da 0.7 m a 1.5 m nelle parti con lesene.

Per ovviare a questa irregolarità costruttiva, come ricorda Vincenzo Maestri in *L'architettura del Duomo di Modena e della Torre Ghirlandina*⁶¹, si dovette realizzare un sistema di archi nel piano delle campane sorretto da colonne in marmo, che a loro volta appoggiavano sui pilastri del piano inferiore. La struttura ottagonale a circa 57 m di quota diventa la base d'imposta della piramide caratterizzata da una muratura di spessore variabile, da 0.8 m a 0.6 m nella parte più alta.

Una successione di solai garantisce la scansione verticale all'interno della torre dividendo lo spazio interno in sette parti.

A partire dalla volta del seminterrato, che funge da pavimento per il primo piano, grazie ad un sistema di scale in muratura, si può accedere alla stanza detta della Secchia⁶². Superando circa 25 m di dislivello all'interno della canna del campanile si accede alla stanza dei Torresani ad una quota di circa 35 m per poi arrivare alla cella campanaria (circa 42 m) ed infine alla base della piramide (circa 49 m) (Fig.3).

Le scale che partono dal piano terreno, sono in muratura e percorrono il perimetro del campanile forando dove necessario i quattro pilastri d'angolo. Questo sistema di scale in muratura, distribuito sui quattro lati della torre, una volta raggiunta la stanza dei Torresani, si concentra in un unico pilastro a nord ovest fino alla base della piramide dove diventa un scala in legno che percorre a spirale il perimetro della piramide per giungere al pinnacolo (fig. 62).

⁶¹ V. MAESTRI, *L'architettura del Duomo di Modena e della Torre Ghirlandina*, aggiuntovi in appendice il Tesoro del Duomo, ms. XX sec. Con inserti a stampa, Modena 1905-1907

⁶² dove veniva custodito un trofeo di guerra vinto durante il conflitto tra Guelfi e Ghibellini di Modena e Bologna (la battaglia di Zappolino) avvenuto il 15 novembre del 1325 raccontato nel poema di Alessandro Tassoni "La secchia rapita"

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

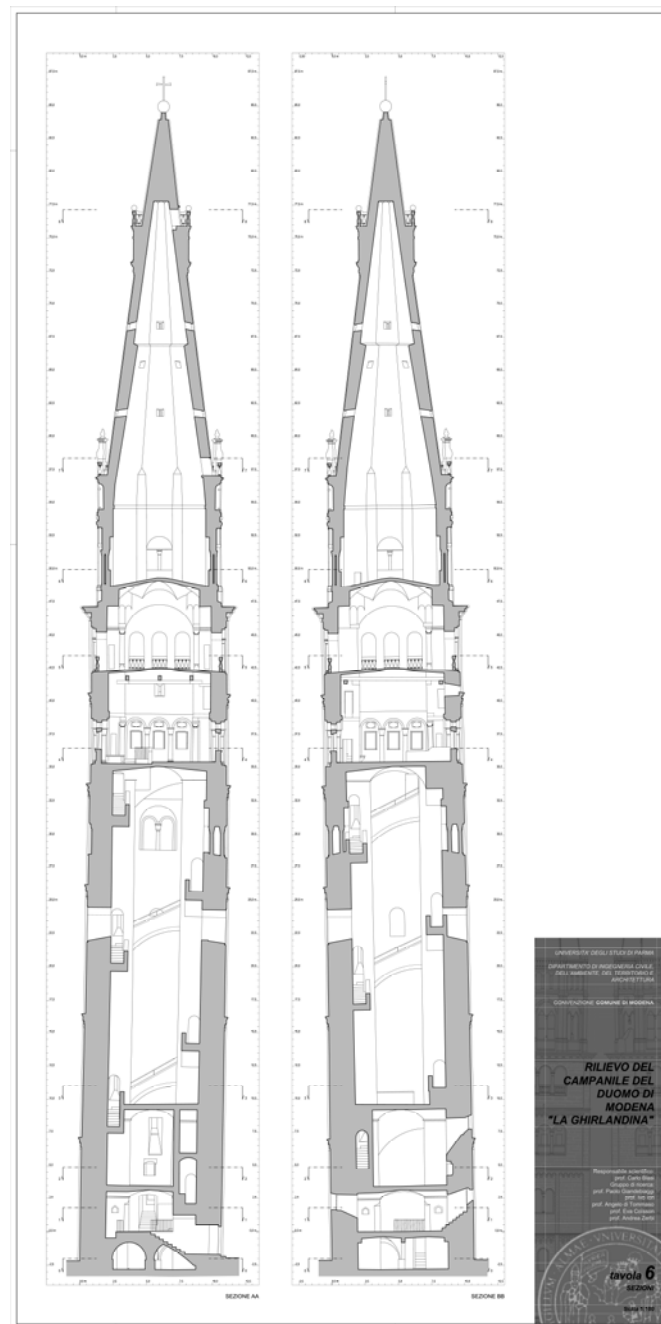


FIG.62 -Sezioni-Rilevo a cura del Dipartimento di Ingeria Civile dell'Ambiente del Territorio e Architettura dell'Università degli Studi di Parma

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

La muratura portante della Torre è del tipo multistrato. La parte più esterna, è costituita da un rivestimento lapideo composto nel complesso da 18000 pietre che (come è stato possibile vedere dalle indagini soniche condotte nel novembre del 2007) almeno nella zona delle prove, sembrano staccate dalla muratura in laterizio che a sua volta presenta irregolarità nel suo interno, quasi a far pensare ad una tipologia a sacco⁶³. A conferma del distacco del paramento lapideo sono le immagini dei restauri degli anni '70 in cui durante la sostituzione di alcune pietre si sono mostrati i distacchi tra paramento esterno e muratura (fig. 63).



FIG. 63-Sequenza di immagini dei restauri del 1970. Si può notare come il paramento lapideo sia staccato dalla muratura

La distribuzione litologica del paramento esterno ricostruita dal prof. Lugli ha mostrato:

- I piani: Pietra d'Istria, pietra di Vicenza e Ammonitico Veronese di sostituzione, con minori quantità di trachite, arenaria e marmo. Le forme delle lastre, alte e strette si distinguono da quelle degli altri piani.

⁶³ La tipologia muraria lapidea della torre non è ancora stata identificata, l'ipotesi è che sia del tipo a sacco.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

- II piano: presenta una massiccia quantità di ammonitico veronese, minore quantità di Pietra d'Istria e trachite.
- III piano: presenta una prevalenza di pietra d'istria, tranne alcune zone ben definite in cui è attestata la pietra di Vicenza e in minore quantità ammonitico veronese e pietra d'Istria.
- IV piano: presenta una distribuzione litologica omogenea con preponderanza assoluta di pietra d'Istria e rara presenza di ammonitico Veronese.
- V piano: mostra un'abbondante uso di pietra d'istria e in minore quantità trachite e ammonitico veronese.
- VI piano: costituito da ottagono e prisma è costituito prevalentemente da ammonitico Veronese.

Il mosaico litologico che compone il paramento lapideo è stato come per il Duomo realizzato grazie all'uso di lastre di reimpiego provenienti da necropoli romane⁶⁴. Le immagini della mappatura litologica mostrano come si siano succeduti interventi di ripristino delle pietre e quali tipi di pietre siano state impiegate (fig.64).

⁶⁴ Per un maggiore approfondimento si rimanda alla lettura del testo a cura di Fernando Rebecchi, *Reimpiego dei materiali romani*, in *Lanfranco e Wiligermo il Duomo di Modena*, Modena 1984

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

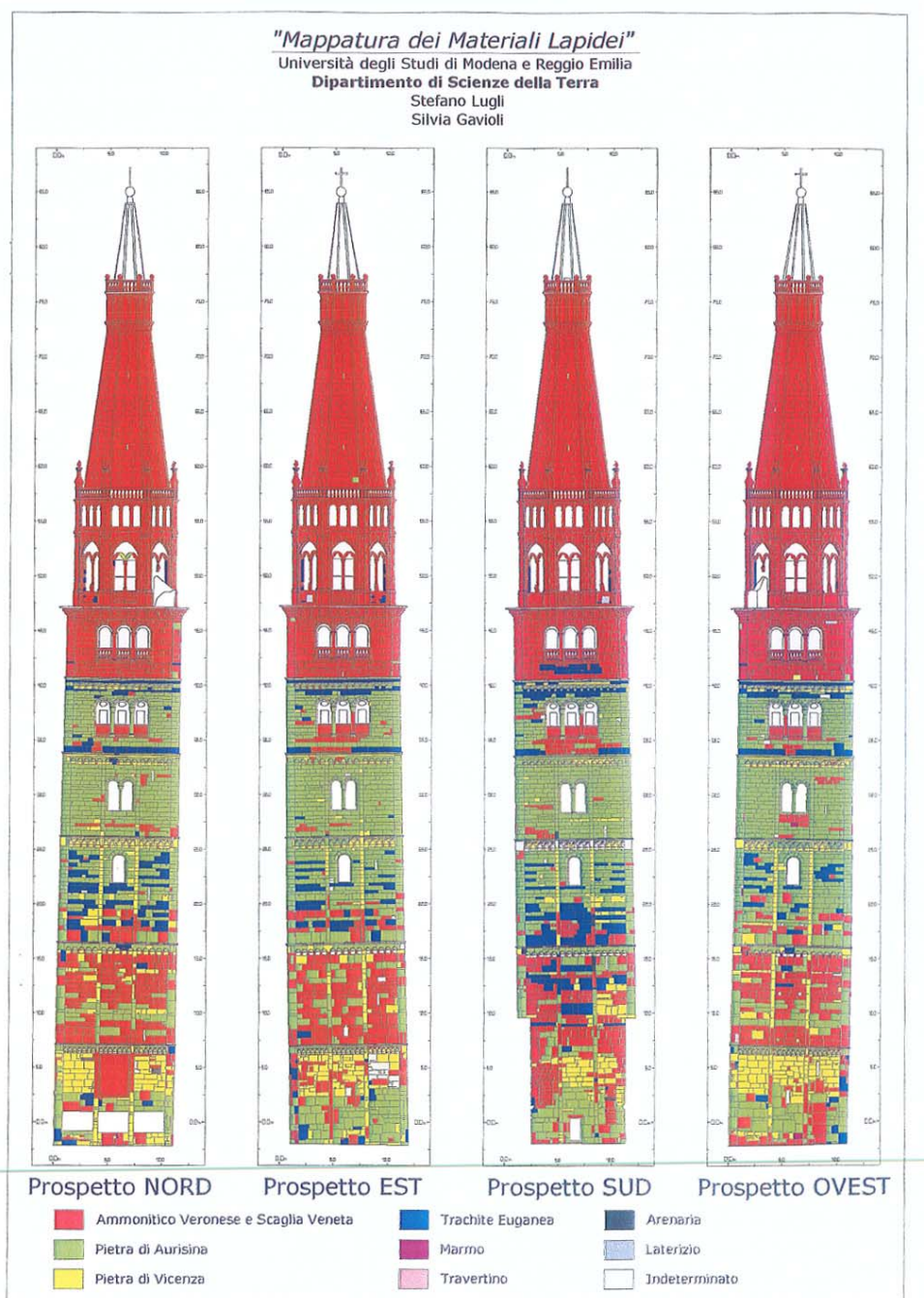


FIG.64-Mappatura dei materiali lapidei a cura del Prof. Stefano Lugli

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

La muratura di mattoni in laterizio, visibile dall'interno, risulta costituita da mattoni di circa 0.06 m di spessore, 0.30 m di lunghezza e 0.20 m di larghezza posati con letti di malta sottili.

L'assenza di carotaggi non consente di descrivere con precisione la stratigrafia della muratura.

Gli studiosi nell'arco dei secoli hanno formulato diverse ipotesi sulla successione delle fasi costruttive della Torre, anche per la mancanza di una documentazione in grado di accertare l'inizio e lo svolgimento del cantiere.

La disputa ha riguardato principalmente due aspetti:

1 l'epoca di fondazione; ovvero la possibilità che esistesse una torre o resti di una torre di epoca romana su cui venne riedificata o riadattata l'attuale torre;

2 La successione delle fasi costruttive.

Il primo a realizzare un'ipotesi sull'epoca di fondazione della torre fu Francesco Panini alla fine del '500. La sua tesi era che la torre fosse stata edificata contemporaneamente al Duomo almeno fino alla fine della parte quadrata⁶⁵.

Insieme al Panini Carlo Borghi, verso la metà dell'800, osservando le diverse inclinazioni della torre, intuì che la pendenza fosse dovuta a fenomeni anteriori alla data di ultimazione dei lavori (1319) e quindi ritenne Duomo e Torre edifici contemporanei⁶⁶.

Di diversa opinione il Barbieri⁶⁷ nel 1569 e il Vedriani nel 1662, che datarono la realizzazione della torre sfalsata rispetto a quella del Duomo. In particolare il primo studiando il *Libro della Cronica*⁶⁸, manoscritto di duecento carte che descrive sia la realizzazione del Duomo che quella del campanile ipotizzò che la torre esistesse già ai tempi del Duomo, e che fosse di origine Romana. Il secondo invece, riferendosi ad una presunta lapide posta nella stanza dei Torresani, ipotizzò che la parte quadrata fosse del VIII secolo⁶⁹.

⁶⁵ Francesco Panini, *Cronica della città di Modona*, a cura di R. Bussi e R. Montagnani, Modena 1978. ASCMo, Miscellanea Cose varie, F. I, fasc. 2. Il Panini attribuisce l'epoca di costruzione contemporanea a quella della torre degli Asinelli (finita nel 1908) di Bologna e alla torre della chiesa di S. Prospero a Reggio Emilia.

⁶⁶ Carlo Borghi, *Il Duomo ossia cenni storici e descrittivi della Cattedrale di Modena*, Modena 1845, pp.155-156, nota c.

⁶⁷ Barbieri, cancelliere perpetuo della comunità, Relazione, ASCMo, Miscellanea Cose varie, F. I, fasc. 2.

⁶⁸ Relazione, ASCMo, Miscellanea Cose varie, F. I, fasc. 2.

⁶⁹ L. Vedriani, *Historia dell'antichissima città di Modena*, Modena 1667

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

In epoca più recente Tommaso Sandonnini⁷⁰, segretario del *Comitato per i restauri del Duomo*, durante lo studio degli scavi condotti a fine '800 attorno alla torre ipotizzò che le fondazioni di Torre e Duomo fossero contemporanee, senza però escludere la possibilità che la Torre sorgesse sui resti di un antecedente manufatto di epoca romana.

Successivamente l'attenzione si pose non tanto sull'epoca di fondazione quanto piuttosto sul riconoscimento delle fasi di cantiere.

Il canonico Antonio Dondi⁷¹ attraverso la lettura di un'iscrizione posta su un bassorilievo posto sul lato est sotto la seconda cornice fissò il termine della prima fase di costruzione al 1159⁷² e le successive 1261 e 1319 basandosi su fonti d'archivio. Arturo Carlo Quintavalle⁷³ nel 1965 attraverso uno studio comparato dei paramenti lapidei di torre e Duomo trovò una correlazione tra il rapporto modulare della parte quadrata della torre e il Duomo che gli fecero ipotizzare un progetto originale limitato ai primi quattro piani conclusi nel 1130, mentre il quinto piano sarebbe stato realizzato tra il 1160 e il 1170 e la parte sommitale in epoca Campionese (fig. 65).

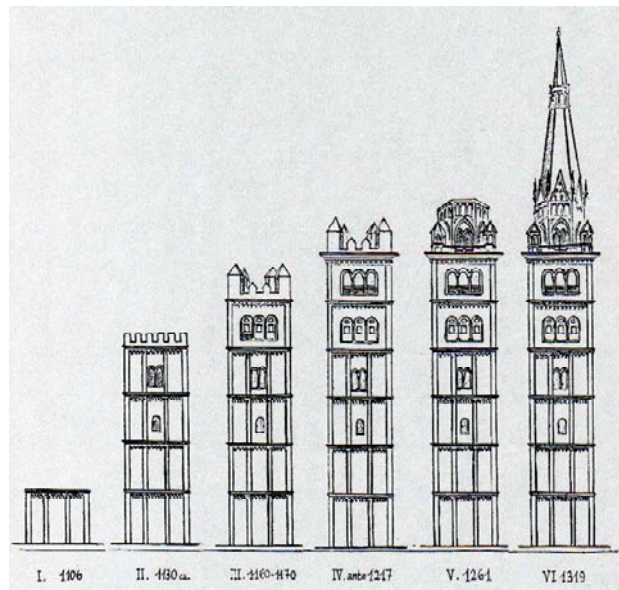


FIG.65 -Descrizione delle campagne costruttive secondo il C.A. Quintavalle

⁷⁰ Tommaso Sandonnini, *Cronaca dei restauri del Duomo di Modena (1897-1925)*, a cura di Orianna Baracchi Giovanardi, Modena 1983

⁷¹ A. Dondi, *Notizie storiche ed artistiche del Duomo di Modena raccolte e ordinate del Can. A. D. coll'elenco dei codici capitolari in appendice*, Modena 1896

⁷² Lettura di un'iscrizione in un bassorilievo posto al secondo piano del lato est

⁷³ Arturo Carlo QUINTAVALLE, *La cattedrale di Modena: problemi di Romanico emiliano*, voll. 2, Modena 1964-65

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

L'interpretazione del Salvini, successiva a quella di Quintavalle, e di poco discorde, si basò su un decreto di autorizzazione di estrazione delle pietre per i lavori della torre emesso nel 1161⁷⁴, mentre nel 1971 Gandolfo datò la realizzazione della torre addirittura postuma di trent'anni rispetto a quella del Duomo. Basando le sue deduzioni sulla misurazione delle altezze dei piani, notò che i primi quattro avevano altezze pari alla larghezza del quadrato di base mentre il quinto no e questo gli fece ipotizzare che i maestri Campionesi avessero lavorato su una torre esistente, e che la parte sommitale (compreso il sesto piano) fosse il risultato di un'unica campagna iniziata nel 1261⁷⁵.

Nel 1976 Montorsi formulò una nuova ipotesi costruttiva partendo dall'iscrizione a cui fece riferimento il canonico Dondi "1169 il quinto piano di questa torre fu costruito ed ornato".

Da qui un articolazione in tre fasi costruttive fondamentali: i primi quattro piani terminati nel 1106, il quinto (che comprendeva la realizzazione di una piccola guglia e quattro edicole ornamentali), terminato nel 1169 e i rimanenti sesto, parte ottagonale e piramidale iniziati nel 1261 conclusi nel 1319⁷⁶ (fig.7).

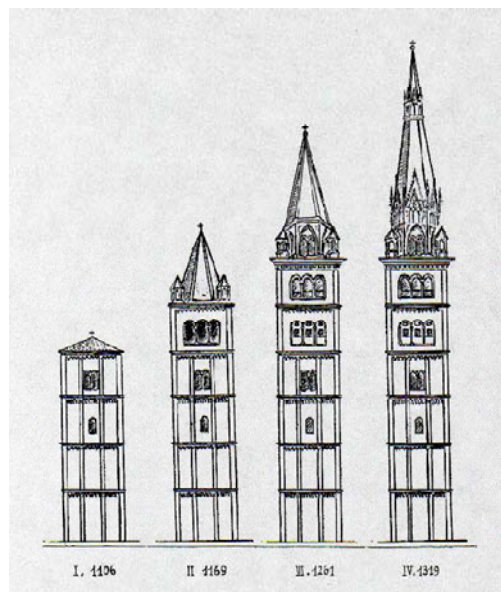


FIG.66 - Interpretazione delle fasi costruttive del Montorsi

⁷⁴ R. SALVINI, *Il duomo di Modena e il romanico nel modenese*, Modena 1966. L'ipotesi del Salvini è che la parte quadrata della torre quadrata fino al quinto piano fosse stata terminata tra il 1161 e 1179, 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. Successivamente nel 1261 fu soprallevata di un altro livello e coronata con quattro torrette cuspidate, poi distrutte. La parte ottagonale sarebbe opera di Enrico da Campione nel sec. XIV.

⁷⁵ F. Gandolfo, *Problemi della cattedrale di Modena*, in *Commentari*, N.S. X XII, 1971, il gandolfo basa le sue osservazioni sulla costruzione della parte sommitale sulla somiglianza dei capitelli

⁷⁶ W. Montorsi, *La torre della Ghirlandina. Comacini e Campionesi a Modena*, Modena 1976

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Nel 1984, la Pezzini⁷⁷ fece due ipotesi sull'origine della torre entrambe legate alla possibile preesistenza o di fondamenta di origine romane o di una vera e propria costruzione a torre su cui lavorarono successivamente i Campionesi, mentre nel 1988 la Baracchi ipotizzò, alla luce della relazione del Barbieri, riferendosi alla posizione nelle vicinanze dell'antica via consolare, che la torre fosse di epoca romana⁷⁸ e inizialmente concepita per scopi difensivi.

Inoltre la tesi della Baracchi era che la torre all'epoca dell'edificazione del Duomo doveva già esistere in quanto mai citata dalle cronache delle costruzioni e che quindi l'orientamento della cattedrale fosse stato adeguato a quello della via Emilia antica e alla torre. La Baracchi motivò l'interramento riferendosi ad una alluvione del VI secolo e l'inclinazione dovuta ad un innalzamento cinquecentesco di sette metri⁷⁹.

Gli ultimi contributi all'interpretazione dell'epoca costruttiva e delle fasi di cantiere che si sono succedute nella Ghirlandina, sono stati forniti dal Comitato scientifico del Comune di Modena.

Il lavoro ricomprende una complessa analisi sistematica di tutta la cronaca⁸⁰ risalente all'epoca di costruzione del Duomo, di una documentazione archivistica superstite riguardante le vicende conservative e le trasformazioni apportate all'edificio a partire dalla fine del secolo XV fino ai giorni nostri.

La conclusione del lavoro ipotizza l'inizio del cantiere della Torre contemporaneo a quello della Cattedrale tra il 1099 e il 1106 (ed il completamento da Enrico da Campione nel 1319).

Rilevanti sono stati anche i lavori di rilievo geometrico condotti nel 2006 che hanno integrato il regesto storico archivistico sono stati.

Studiando i rilievi condotti, e analizzando l'inclinazione della torre, gli studi evidenziano che lungo la direzione nord- sud i piani della torre hanno inclinazioni diverse. E questo può essere motivato da correzioni dell'inclinazione avvenute in fasi costruttive successive. In particolare:

- Il primo livello della torre presenta un'inclinazione diversa rispetto agli altri, quindi è possibile che sia stato realizzato in una prima fase a cui si susseguirono i tre livelli successivi.
- L'iscrizione sulla cornice del quinto piano consente datare l'ultimazione di questo tra il 1169 e il 1179 periodo in cui vi iniziarono a lavorare i maestri Campionesi.

⁷⁷ AA. VV., *Lanfranco e Wiligelmo. Il duomo di Modena*, Modena 1984

⁷⁸ Sulle *Cronache* si cita una torre di 18 braccia di lato (9.5 m circa) che potrebbe essere la Ghirlandina senza i rivestimenti

⁷⁹ O. Baracchi, G. Giovannini, *Il duomo e la torre di Modena*, Modena 1988

⁸⁰ Dal punto di vista l'analisi dei documenti e la storia degli ultimi lavori sono stati quelli coordinati dalla dott.ssa Piccinini con la collaborazione della dott.ssa Dieghi.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

- Infine gli ultimi piani: il sesto tra il 1261 e il 1265 e la parte ottagonale e la guglia concluse il 28 settembre del 1319.

Alcuni dubbi avvolgono la conclusione dei lavori dell'ultima parte della Torre. Infatti Orianna Baracchi ricorda che nel 1587 durante alcuni lavori di restauro della parte sommitale ci fu una soprelevazione di ulteriori 7 m, giustificata da un'inclinazione completamente differente rispetto al resto della Torre.

Queste considerazioni sono state affiancate da quelle del Prof. Lugli sulla mappatura delle pietre della Torre e del lato nord del Duomo (fig. 67).

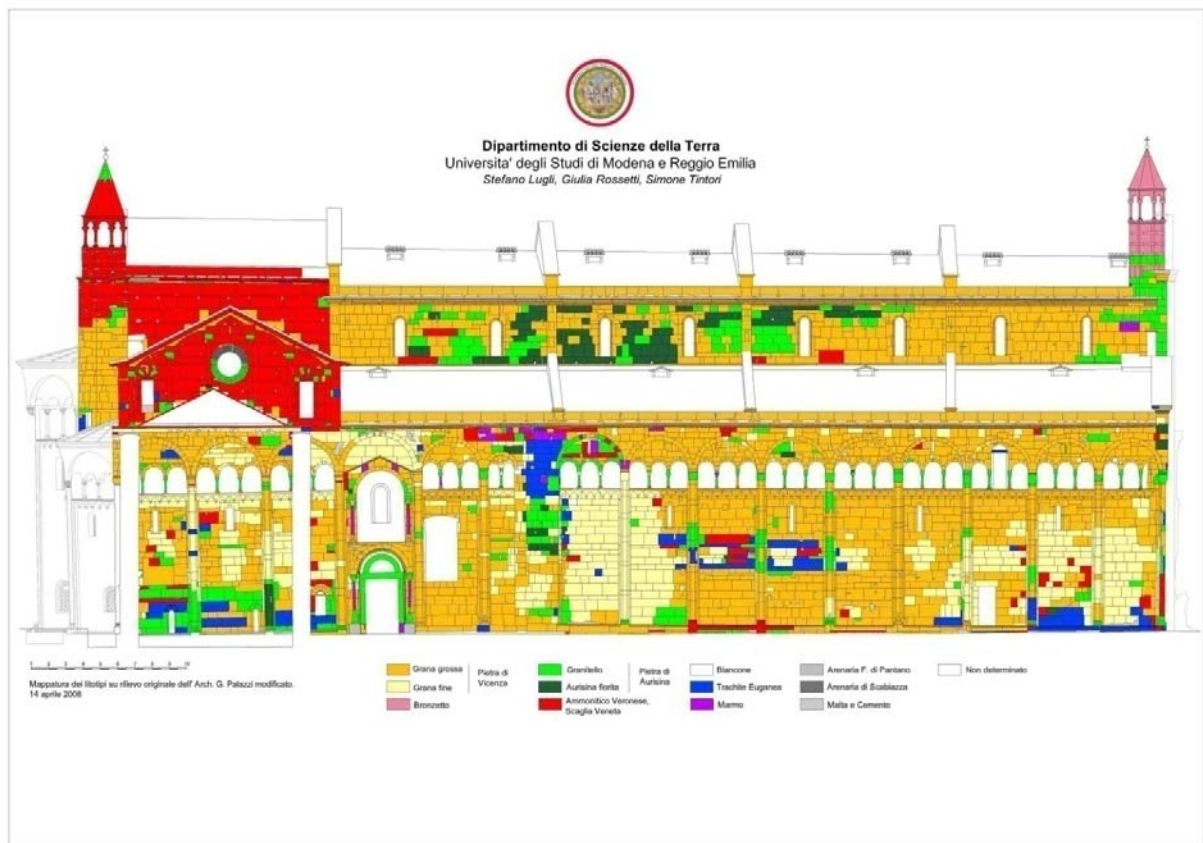


FIG. 67-Immagine che ricostruisce l'apparato lapideo del lato nord del Duomo. A cura del Prof. Stefano Lugli

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Contemporaneamente è stata realizzata dal prof. Lugli una catalogazione dei litotipi usati dai Romani attraverso i manufatti presenti nelle collezioni modenesi e di quelli recentemente rinvenuti in piazza Roma e nelle aree funerarie lungo la via Emilia.

Lo scopo era quello di confrontare le facies lapidee importate dai romani con i materiali ricavati dalle spoliazioni di epoca tardoantica e medioevale.

Nel complesso i monumenti presentano nove tipi di versi di rocce rappresentate da pietra di Aurisina (Aurisina fiorita e granitello) dal triestino e forse dall'Istria, pietra di Vicenza dai Colli Berici, trachite dai Colli Euganei, ammonitico e Scaglia veneta dal veronese e, in quantità nettamente inferiore, marmo, arenaria, branzetto e travertino (gli ultimi due posti in opera durante i restauri del secolo scorso).

L'analisi dei reperti ha mostrato che tutti i litotipi individuati erano di uso di epoca romana ad eccezione dell'ammonitico veronese e dell'arenaria.

Questo dimostra come fino al sesto piano la Torre fu rivestita utilizzando materiali di spoliatura di antichi edifici e aree funerarie romane, dal sesto piano dove appare un unico litotipo le pietre erano acquistate direttamente dalla cava.

Anche nel Duomo l'ammonitico e l'arenaria sono materiali esclusivi delle ultime fasi costruttive *campionesi* nel pseudo-transetto, nel rosone e nella Porta Regia.

Il confronto tra i due edifici mostra come la pietra di Vicenza fosse destinata, forse per questioni di omogeneità del paramento, prevalentemente alla Cattedrale.

L'uso della pietra Aurisina, presente solo nella fascia medio alta e nella sommità del Duomo del lato Nord e in modo prevalente nel quarto e quinto piano della Torre, fa ipotizzare che il cantiere fosse fornito da materiale frutto di una spoliatura di un edificio di grandi dimensioni, perché gli scavi eseguiti non mostrano sia nelle necropoli che nelle aree archeologiche romane una prevalenza di tale pietra.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

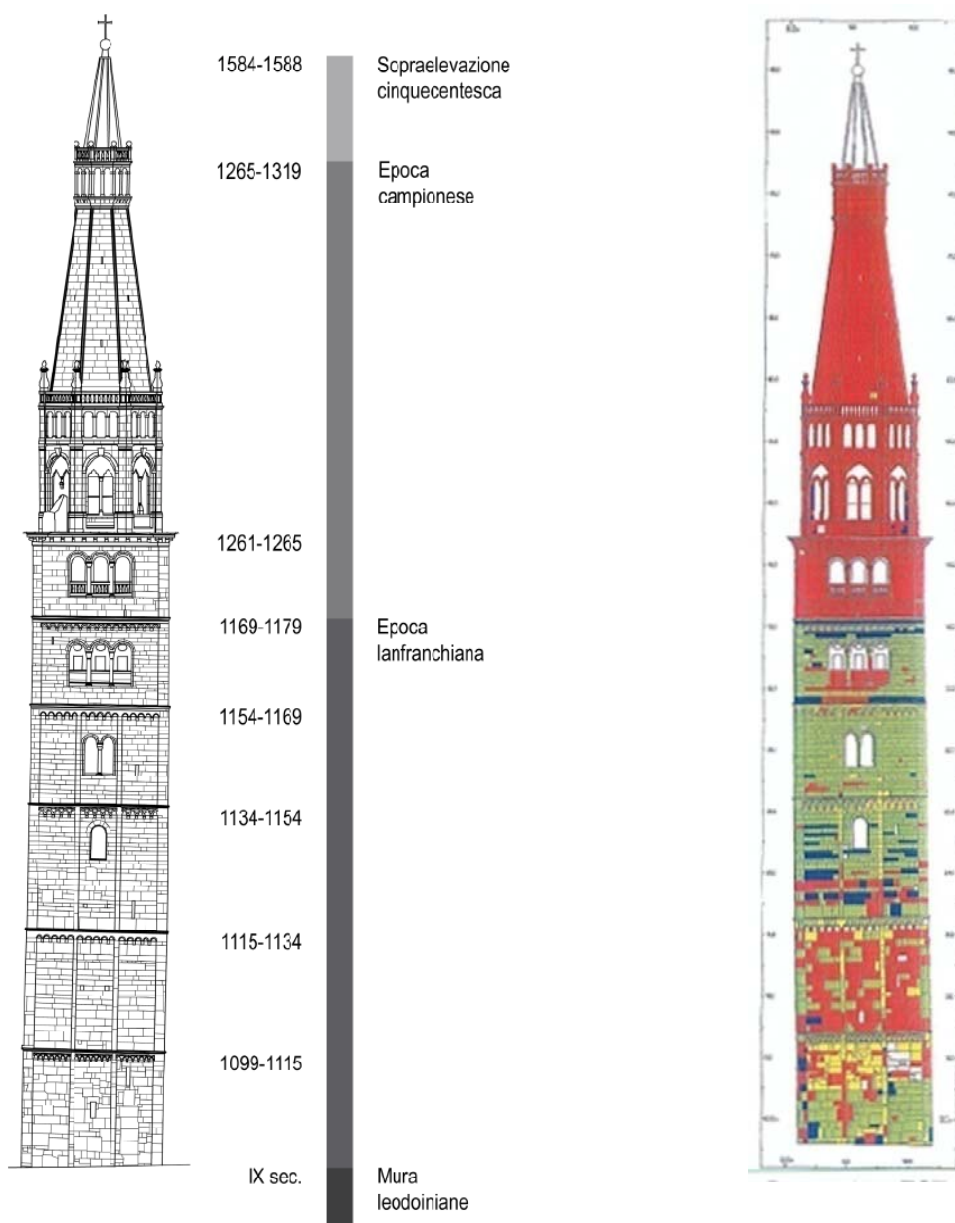


FIG. 68- Confronto tra le epoche desunte dallo studio delle inclinazioni e la mappatura delle pietre lungo il prospetto est. Si può notare come la parte della cella campanaria, ottagono e piramide siano state eseguite con lo stesso materiale e si potizza quindi contemporaneamente.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Tra XV e XIX vennero realizzati interventi di manutenzione in modo abbastanza continuativo e a breve distanza temporale.

La principale problematica riscontrata nella Torre era data dalle infiltrazioni d'acqua che dalla sommità piramidale creavano problemi a tutta la parte sottostante, in particolare per quanto concerneva la conservazione degli interni lignei, e la formazione processi erosivi progressivi e lesioni nei materiali lapidei per l'effetto gelo disgelo determinando la caduta di porzioni di rivestimento.

Nei primi anni dell'800 il metodo di costipazione con il piombo, inadeguato per l'impossibilità di aderire alla pietra, fortemente criticato, venne abbandonato e sostituito con metodi alternativi che comunque non diedero mai risultati soddisfacenti.

L'ultimo intervento di restauro di carattere puramente conservativo risale agli anni '70, durante il quale venne revisionato il paramento lapideo e trattato nuovamente il problema delle infiltrazioni⁸¹.

I primi importanti restauri documentati sulla torre avvennero successivamente al terremoto del 1501. Scrive il canonico Dondi: *Il terremoto del 1501 apportò non pochi guasti nelle rose delle finestre, e negli ornati collocati sopra il quadrato e la parte maggiore dell'ottagono soprastante. Le finestre dovettero fortificarsi con catene di ferro, e le opere di riparazione continuarono durante gli anni 1502, 1503, e 1504.*⁸².

Ancora il Faccioli nel 1901 riporta alcune testimonianze dell'epoca : *“Pirro Ligorio ci narra che la Torre del Duomo fu vista piegare, quasi minacciasse di cadere”*.

E ancora Jacopo Lancillotti nella sua cronaca il 5 giugno descrisse *“un terremoto grande e meraviglioso e di grande smarrimento”* a cui seguirono danni e crolli in numerose chiese compreso la torre della Ghirlandina e il Duomo dove si lesionarono le volte, crollarono i fabbricati delle canoniche e la nuova sagrestia. Per questo tra 1547 il 1566 iniziarono una serie di lavori sul paramento lapideo fino alla prima Ghirlandina al fine di fissare con zanche di ferro le pietre per scongiurare eventuali cadute.

Alla fine del '500 per ovviare ai problemi di infiltrazione vennero sostituite le pietre della piramide e contemporaneamente si realizzò una nuova muratura addossata alla precedente a cui si applicò il rivestimento di marmo veronese.

In questo intervento, testimoniato da alcuni documenti che riferiscono delle spese comunali per la torre dal 1574 al 1587, sembra che si sia soprelevata di circa sette metri la quota della precedente guglia , portandola da 155 braccia (80,60 m) a 169 braccia (87,9 m circa), ed eliminato i timpani e le guglie

⁸¹ Intervento dott.ssa Dieghi, in *Atti del congresso La torre racconta*, Modena 16 maggio, 2008

⁸² A. Dondi. *Notizie storiche e drastiche del Duomo di Modena*

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

danneggiate dai fulmini e dai terremoti. In questa occasione si realizzarono probabilmente le cerchiature e i tiranti trovati nei restauri ottocenteschi⁸³.

Nel '600 avvennero altri importanti restauri alle strutture della torre al fine di migliorarne la stabilità. Il primo ad occuparsene è stato l'architetto Raffaele Rinaldi detto il "Menia" che osservando i problemi di cedimento differenziale iniziò il consolidamento delle fondazioni. Suggerisce poi l'intervento di consolidamento dei pilastri al sesto piano (che dovevano sostenere la struttura ottagonale posta in falso rispetto a quella sottostante) e la realizzazione delle coperture per mezzo di fogli di piombo delle cornici⁸⁴. Come ricorda il Sandonnini⁸⁵ durante i lavori del 1899 trovarono un'iscrizione che riportava un lavoro di riempimento della torre per ovviare il problema della presenza dell'acqua, causa, secondo il Menia, dei problemi di cedimento differenziali della Torre. Nel 1606 veniva rifatta sotto la direzione lavori del Menia la scala in legno che conduce alla sommità della Torre⁸⁶, mentre nel 1609 vengono realizzati consolidamenti dei pilastri del sesto piano. L'intervento sui pilastri, originariamente cavi ed ispezionabili del sesto piano, ad esclusione di quello dove è presente la scala a chiocciola, avvenne attraverso un ispessimento della muratura dall'interno.

I lavori più recenti, che interessarono le strutture della Torre, risalgono alla seconda metà dell'800, quando nel 1866 si realizzarono nuovi inefficaci interventi per ovviare alle infiltrazioni di acqua dalla parte sommitale. Il Comune decise di preparare un nuovo progetto di risanamento che fosse risolutivo, per riuscire a metterlo in atto fu necessario formare una commissione che vigilasse sui metodi di restauro. La commissione⁸⁷ oltre a controllare le metodologie di lavoro aveva il compito di fornire direttive procedurali.

I temi affrontati furono, oltre al problema delle infiltrazioni, la necessità di realizzare una serie di consolidamenti al castello delle campane e ad una rampa di scale che raggiungeva il sesto piano, e realizzare una serie di incatenamenti che consentissero di limitare l'apertura delle molteplici lesioni dei paramenti interni.

Partendo dalla guglia superiore grazie ad un sistema di impalcature si iniziò a stendere le lastre di piombo evitando di lasciare discontinuità come nel passato, quando la pioggia passando attraverso la sfera posta in sommità si infiltrava sotto le lastre di piombo (fig.69).

⁸³ ASCMo, F. 179, a. 1891, fasc. Monumenti, pos. 2.

⁸⁴ Dalla relazione del perito comunale Raffaele Rinaldi datata 27 aprile 1609. ASCMo, F. 179, a. 1891, fasc. Monumenti, pos. 2.

⁸⁵ Tommaso Sandonnini, *scritto Modena 26 novembre 1898 in Cronaca dei restauri del Duomo di Modena*, a cura di Orianni Baracchi Givanardi, AEDES MURATORIANA, Modena, 1983

⁸⁶ Memoria di un'archivista comunale Raselli, 23 ottobre 1889, ASCMo, Filza n. 179

⁸⁷ La commissione speciale voluta dal Ministero della Pubblica Istruzione era formata da ing. Vincenzo Maestri assessore delegato del Comune, Raffaele Faccioli e Cesare Razzaboni, membri della Commissione provinciale conservatrice dei monumenti.

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Attraverso il montaggio di apposite impalcature vennero poi realizzati una serie di saggi esplorativi all'interno che consentirono di individuare nella parte piramidale una muratura multistrato, il cui paramento interno era malamente ammorsato a quello esterno più antico frutto dei consolidamenti avvenuti tra il 1574 e il 1587. In seguito all'apertura di alcuni fori nella muratura, all'interno dell'incamiciatura, si trovarono cinque cerchiature sovrapposte collegate tra loro da tiranti. Di queste cerchiature quelle corrose vennero consolidate, e il paramento di muratura all'interno venne risarcito e ricucito dove necessario.

Nel 1890 vennero terminati i consolidamenti della parte quadrata della torre, in particolare nella stanza dei torresani e nella cella campanaria. Al quinto piano (stanza dei torresani) vennero risarcite le lesioni presenti nel paramento interno soprattutto nella parete settentrionale e vennero inoltre inseriti tre ordini di cerchiature per limitarne l'eventuale apertura⁸⁸; infine venne inserita una catena nella parete settentrionale e si demolirono i tramezzi.

All'interno della cella campanaria vennero rifatte l'*ingiocatura* delle campane e il solaio di sostegno. Si intervenne inoltre sui parapetti delle scale, rotti a causa dei cedimenti degli archi che le sostenevano e si eliminarono i tramezzi e i soppalchi presenti nella stanza dei torresani.

Dopo questi primi interventi, a causa di alcune divergenze con il Ministero dei Lavori Pubblici relative al modo di operare si attesero due anni prima di riprendere i lavori.

Il problema era di evitare un rinnovamento massiccio del paramento lapideo della parte piramidale. Alcuni membri della Commissione provinciale incaricati dal Comune illustrarono la gravità della situazione al Ministero e l'urgenza di intervenire. Sostenevano che la torre fosse in pericolo dal punto di vista statico.

Nella zona piramidale infatti i costoloni degli angoli avendo perso aderenza con la parte interna risultavano divergenti tra loro seguendo linee concave e convesse; inoltre alcuni blocchi con sconnessioni di circa 0.20 m minacciavano il crollo.

Per questo il Comune e l'Ufficio Regionale condivisero e misero in atto un progetto di rifacimento complessivo di tutto il paramento lapideo.

⁸⁸ Dalla "Relazione sui restauri della Torre Ghirlandina eseguiti nell'anno 1890", ASCMo, F. 179, a. 1891, fasc. Monumenti, pos. 2., Tali accerchiature sono state formate con poutrelles dell'altezza di 16 cm imperniate a robusti bolzoni ed impostate per 30 cm nelle murature interne. *"Aperte poi tutte le fenditure e levati i mattoni spezzati si sono fatte le ricostruzioni con ogni cura d'arte e così dicasi nei volti delle scale e dei finestrioni, e i nei parapetti. E siccome di questa parte della Torre la murazione interna è tutta in mattoni romani a faccivista, così nei restauri si è scrupolosamente usato lo stesso materiale, o congenere, limitando al puramente necessario le parti nuove*

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

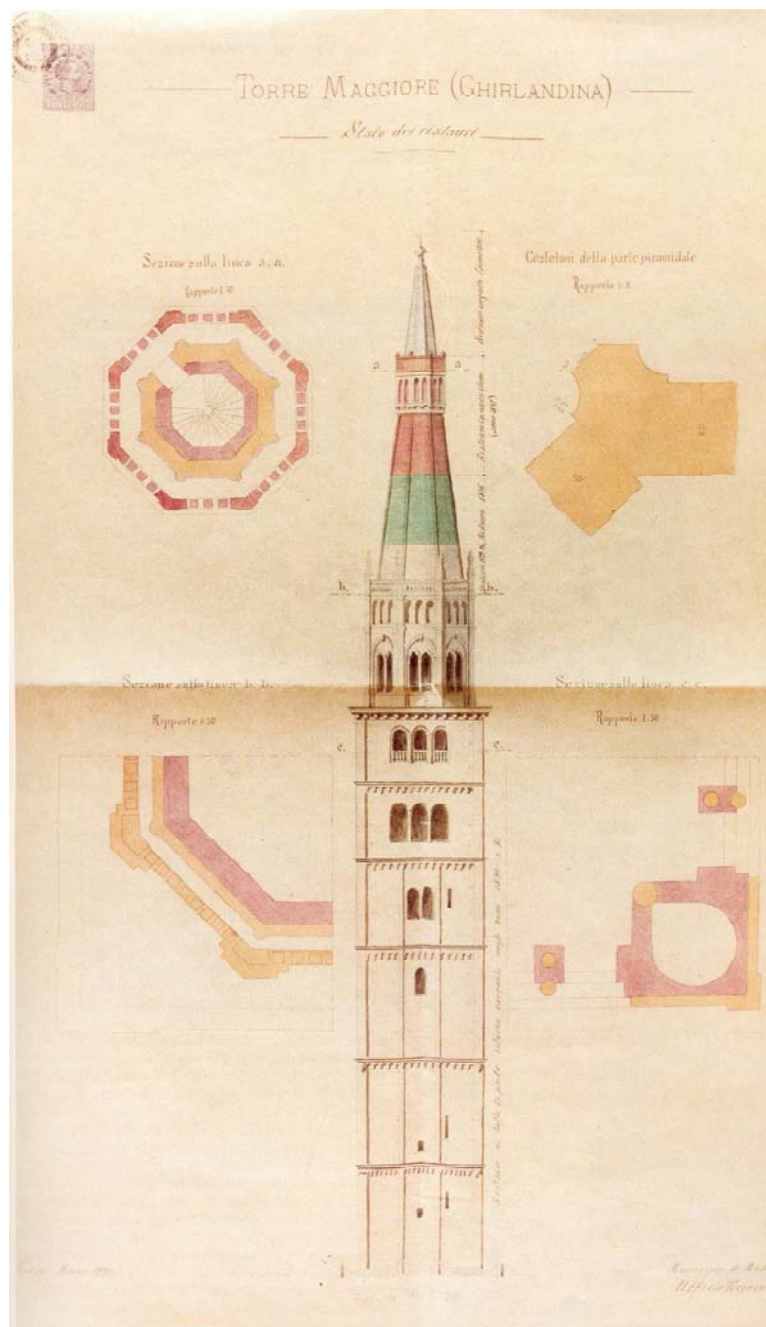


FIG 69. Progetto di Restauro secondo la commissisone Maestri, Faccioli, Razzaboni realizzato tra il 1890 e il 1897. Ufficio Tecnico del Comune di Modena, "Torre Maggiore" 1897, ASC Roma, MMPPII, Direzione generale delle Belle Arti, Terzo versamento, Parte II, Modena città (1898-1907), Busta 541

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Importanti sono anche gli studi sulla stabilità e l'inclinazione della Torre. In occasione dei lavori di isolamento del Duomo, avvenuti a partire dalla fine dell'800, venne realizzata una campagna di studi preliminari all'intervento in grado di consentire un controllo preventivo alle demolizioni delle canoniche sul lato nord.

In particolare, quando si dovette affrontare il tema della demolizione degli archi d'unione tra torre e Duomo, si diede inizio ad una serie di verifiche sulla stabilità della torre che comprese lo studio dell'inclinazione, al fine di comprendere l'opportunità di eliminare i collegamenti.

Questa necessità scaturiva dall'osservazione dell'ing. Tosi direttore dei restauri, del mancato ammorsamento di questi muri con il Duomo. Grazie però al lavoro della Commissione provinciale che aveva intuito l'importanza di questi collegamenti si decise per il ripristino. Gli studi condotti sulla stabilità della Torre, che avevano compreso degli scavi attorno alla stessa, consentirono di realizzare diverse osservazioni sulla conformazione delle fondazioni e sulla consistenza del terreno,

Inoltre estendendosi anche all'interno, nel sotterraneo, consentirono di individuare l'antico piano di calpestio della Torre fatto coprire dal Menia (con uno strato di circa 60 cm) per ovviare al problema di risalita dell'acqua.

La richiesta del Faccioli avanzata alla commissione di riempire la base della torre nell'interrato fu accolta e venne attuata nel 1901. Lo scopo perseguito era da un lato quello di eliminare la persistente umidità, dall'altro quello di migliorare la stabilità della Torre. Inoltre gli scavi condotti all'esterno permisero di individuare l'antica porta di accesso che consentì al Faccioli di presentare un progetto di ricollocazione della porta d'ingresso sopra a quella antica (fig. 70).

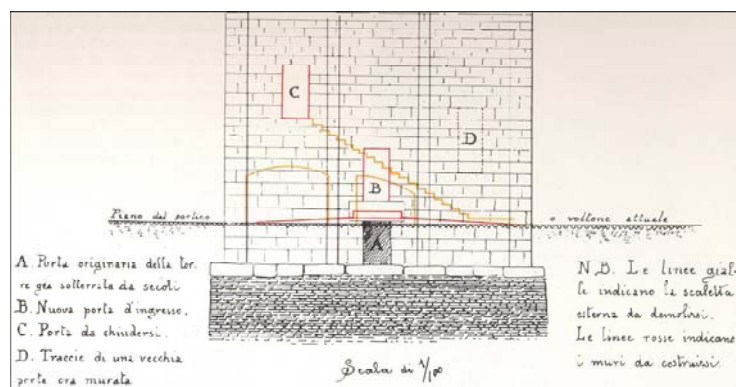


FIG-70- Proposta di realizzazione del nuovo ingresso della Torre. (Faccioli)

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Come si osserva (Fig. 70) si distinguono una serie di quattro aperture contraddistinte con le lettere A,B,C,D. La prima (A) è quella antica rinvenuta durante gli scavi, la seconda (B) è quella progettata, la terza (C) la porta che consentiva l'accesso alla torre per mezzo di una scala, e la quarta D indica una porta di circa 1.5 m da terra. Il progetto del Faccioli, direttore dell'Ufficio Regionale, contestato dal Barberi che sosteneva la possibilità di riaprire la porta D venne approvato e annunciato al Ministero dei Lavori Pubblici, nonostante la consapevolezza di dover demolire parte della volta del seminterrato.

Nel 1902 la morte dell'Ing. Tosi e le dimissioni del Faccioli rallentarono i lavori fino alla nomina dell'Ing. Alfonso Modenesi dell'ufficio tecnico comunale che demolì nel 1903 uno dei due collegamenti tra la Torre e il Duomo in quanto non convinto della loro effettiva utilità statica.

Per avvalorare la tesi del ripristino Barberi, membro della Commissione fece fare degli scavi per vedere le condizioni delle fondazioni dei piedritti degli archi. Queste fondazioni proseguivano fino ad una profondità di circa 3.40 m con una larghezza di 1.40 m; il primo tratto era costituito da una muratura in laterizio, il secondo di ciottoli di fiume. Nel 1902 il Modenesi approfondì questi scavi presentando una serie di opere di consolidamento sotto al manto stradale tra cui la sistemazione di una rete di scolo delle acque⁸⁹ e la ricostruzione degli appoggi degli archi.

A causa dell'acceso dibattito che si era generato attorno all'impossibilità di completare l'isolamento complessivo del Duomo Prima passarono circa due anni prima di intervenire sul ripristino degli archi.

Tra il 1899 e il 1901 sulla Torre si svolsero una serie di accertamenti statici e geometrici affidati al prof. Silvio Canevazzi e al prof. Francesco Cavani dell'ateneo di Bologna. Questi studi dovevano comprendere analisi statiche, valutazioni sulla pendenza e comprensione della conformazione delle fondazioni.

Contemporaneamente agli studi sulla stabilità si svolgevano quelli sull'analisi delle pendenze. I primi rilievi furono condotti dall'ing. Marchi nel 1898 dell'Ufficio Tecnico Comunale e dall'Ing. Francesco Cavani nel 1901. Il metodo seguito dal Marchi si limitava alla misurazione tramite l'uso del filo a piombo dello scostamento dalla verticale dell'asse della Torre. I risultati ricostruiti nell'immagine seguente (fig.71), hanno mostrato una rotazione dell'asse verso ovest di 1.20 m circa e verso sud di circa un metro.

⁸⁹ Lettera del Modenesi al Faccioli del 18 novembre 1902, ASBAAE. *“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”.*

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

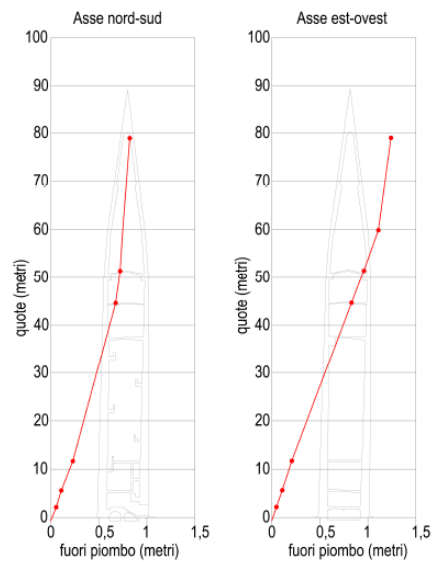


FIG 71-Immagine elaborata dagli architetti Silvia Tosini, Matteo Bonini dove vengono ricostruiti i risultati dei rilievi del Marchi

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Il Cavani condusse un rilievo topografico solo della parte quadrangolare della Torre (fig.13-14-15). Attraverso l'uso di cinque stazioni topografiche, riuscì con un teodolite, a valutare l'inclinazione dei quattro spigoli della Torre.

Ricostruendo poi la posizione spaziale dei punti fisici della Torre rispetto ad un sistema di riferimento ortogonale fu possibile determinare lo scostamento dell'asse verticale misurando una pendenza lungo la direttrice sud nord di circa 2,16 % ovvero uno strapiombo di 1.05 m su un'altezza di 48.80 m. Gli spigoli avevano un andamento che li differenziava a causa dei movimenti progressivi della torre dovuti agli sprofondamenti. Ogni spigolo risultava così variamente inclinato, secondo una spezzata individuata dai vertici dei sei ripiani della Torre quadrata. Così come studi recenti hanno confermato⁹⁰ il segmento più inclinato della spezzata si registrava a livello del secondo tronco, mentre quello meno inclinato a livello del piano delle campane (fig. 72-75).

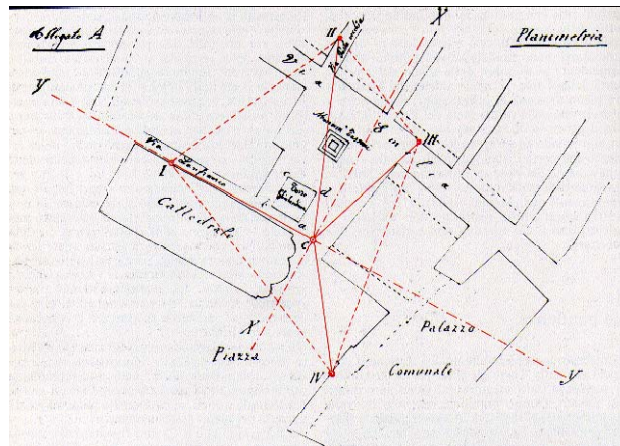


FIG. 72 Scema delle triangolazioni e posizione delle stazioni Allegato A relazione del Cavani, 1901. ASMo, Cassetta Duomo, F6, fasc 1, 17/02/1901

⁹⁰ Silvia Tosini, Matteo Bonini, tesi di laurea *La Torre Ghirlandina di Modena*

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Dati planimetrici ed altimetrici

Triangolo	Angoli	Lati	Quote altimetriche
I	60° 20' 45"	66 ^m , 850	+ 0,083
II	49.55.58,5	58, 870	- 0,136
C	69.43.16,7	72, 157	0,000
II	43.39.16,9	46, 650	—
III	98.25.29,5	66, 850	- 0,155
C'	37.55.21,6	11, 583	—
III	23.3.2,7	14, 870	—
IV	28.13.3,1	46, 650	+ 0,550
C	124.13.54,2	81, 084	—
IV	39.57.5,9	58, 870	—
I	22.23.26,6	44, 870	—
C	127.38.27,5	23, 296	—

FIG. 73- Dati planimetrici e altimetrici-Allegato A relazione del Cavani, 1901. ASMo, Cassetta Duomo, F6, fasc 1, 17/02/1901

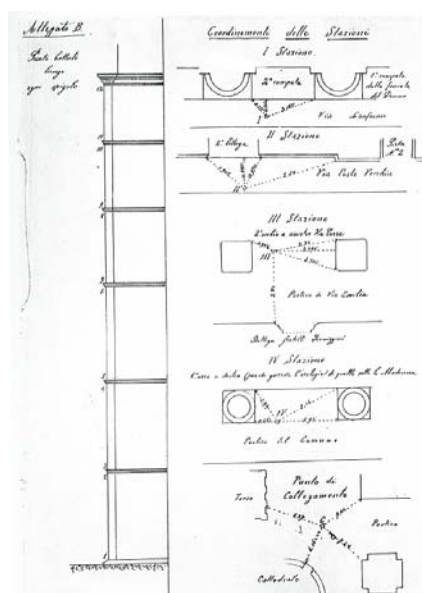


FIG. 74 Punti rilevati lungo lo spigolo della torre. Allegato B relazione del Cavani, 1901. ASMo, Cassetta Duomo, F6, fasc 1

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Punti sugli spigoli	Coordinate dei punti di ogni spigolo											
	Nord-Est			Sud-Est			Nord-Ovest			Sud-Ovest		
	x metri	y metri	z metri	x metri	y metri	z metri	x metri	y metri	z metri	x metri	y metri	z metri
1	13.35	5.48	0.16	2.42	5.93	0.163	13.68	16.60	0.148	2.30	16.93	0.129
2	13.26	5.62	9.00	—	—	—	13.59	16.65	8.88	—	—	—
3	13.23	5.66	10.25	—	—	—	13.57	16.65	9.98	—	—	—
4	13.02	5.83	18.34	2.14	6.21	18.16	13.38	16.75	17.09	2.52	17.16	17.90
5	12.94	5.89	19.59	2.12	6.24	19.76	13.31	16.79	19.34	—	—	—
6	12.79	6.06	28.17	2.05	6.41	27.10	13.17	16.91	27.93	2.41	17.27	26.93
7	12.76	6.12	29.13	2.06	6.47	28.54	13.15	16.89	28.57	2.42	17.26	28.38
8	12.64	6.26	35.55	2.02	6.61	34.93	13.04	16.99	35.43	2.39	17.36	34.48
9	12.61	6.34	36.49	2.06	6.68	36.35	12.98	16.95	36.29	2.42	17.35	36.17
10	12.53	6.49	42.34	2.05	6.86	42.47	12.91	17.04	42.12	2.40	17.41	41.69
11	12.51	6.54	43.33	2.08	6.91	43.30	12.88	17.04	43.19	2.44	17.41	43.15
12	12.52	6.62	48.18	2.09	7.06	48.22	12.89	17.11	47.95	2.41	17.47	48.03

FIG. 75-Tabella con le coordinate dei punti d'ogni spigolo, da F. CAVANI, *Pendenza, stabilità e movimento delle torri la Garisenda di Bologna e la Ghirlandina di Modena, Bologna 1903*

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

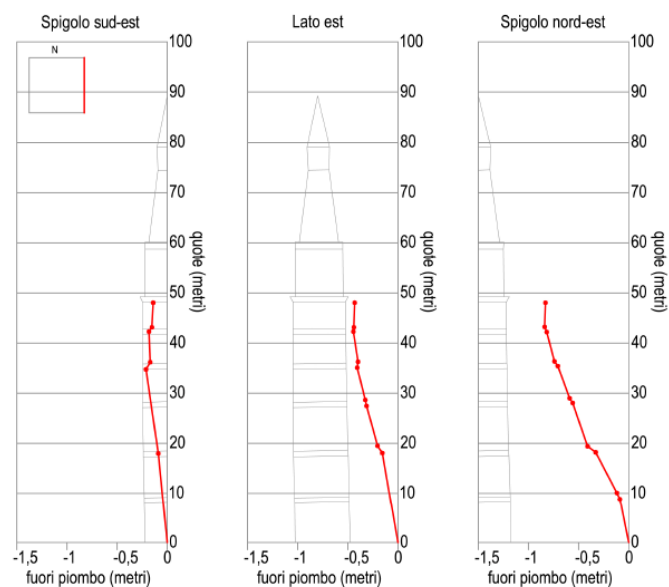


FIG. 76-Grafici delle pendenze del fronte est e relativi spigoli a partire dai dati della tabella (FIG.16) a cura di e Arch. Silvia Tosini, Matteo Bonini

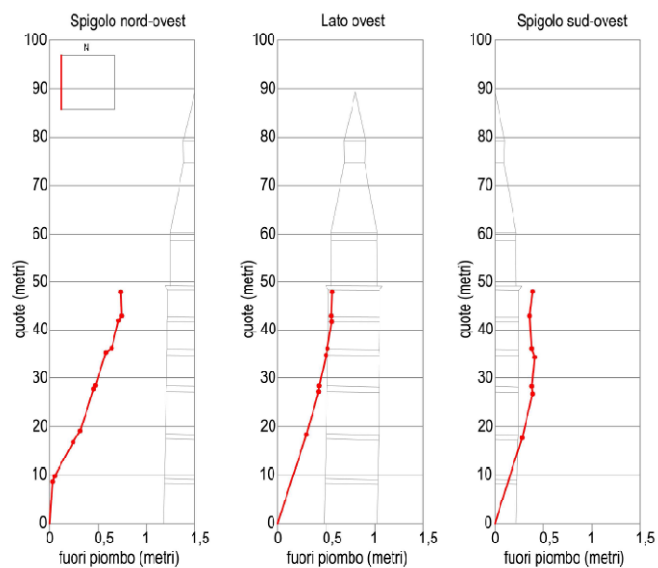


FIG. 77-Grafici delle pendenze del fronte ovest e relativi spigoli a partire dai dati della tabella (FIG.15) a cura di e Arch. Silvia Tosini, Matteo Bonini

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

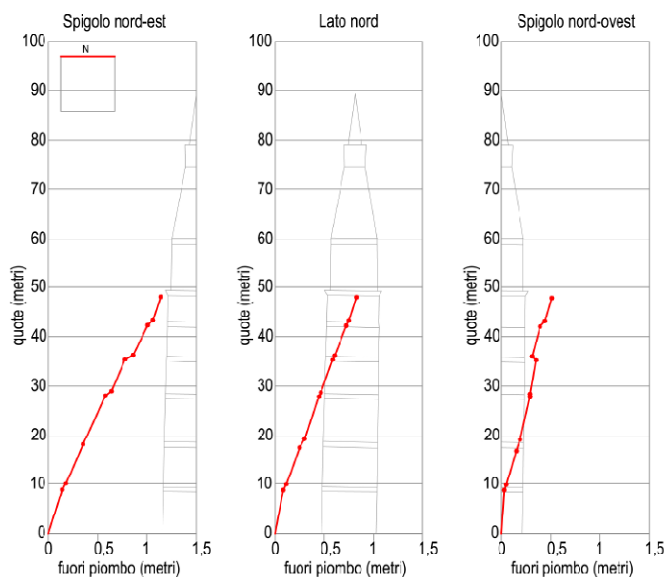


FIG. 78-Grafici delle pendenze del fronte nord e relativi spigoli a partire dai dati della tabella (FIG.16) a cura di e Arch. Silvia Tosini, Matteo Bonini

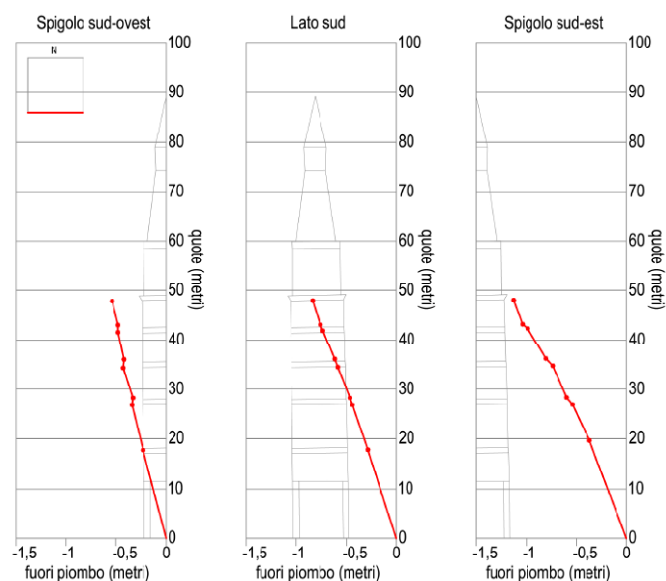


FIG. 79-Grafici delle pendenze del fronte sud e relativi spigoli a partire dai dati della tabella (FIG.16) a cura di e Arch. Silvia Tosini, Matteo Bonini

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

I risultati dei rilievi del Cavani hanno messo in evidenza un andamento delle inclinazioni che in direzione est-ovest sono uniformi verso Ovest, mentre in direzione nord sud sono evidenti le correzioni alla pendenza eseguite nelle fasi costruttive. A testimonianza che l'inclinazione verso sud è con tutta probabilità iniziata già in fase di realizzazione della Torre, mentre verso ovest solo dopo la fine della costruzione anche questi risultati hanno trovato conferma in studi successivi (fig. 76,...,80).

	RISULTATI	OSSERVAZIONI
Pendenza dell'asse	1°14'16"	Verso sud-ovest
Pendenza dello spigolo nord-ovest	1°12'57"	Verso sud-ovest
Pendenza dello spigolo sud-ovest	0°49'25"	Verso sud-ovest
Pendenza dello spigolo nord-est	1°38'54"	Verso sud-ovest
Pendenza dello spigolo sud-est	1°19'59"	Verso sud-ovest
Pendenza della fronte ovest	0°39'43"	Verso ovest
Pendenza della fronte est	1°15'44"	Verso ovest
Pendenza della fronte nord	1°02'08"	Verso sud
Pendenza della fronte sud	0°28'09"	Verso sud
Angolo del piano d'inclinazione dell'asse con la linea di base della fronte	37°54'45"	Fronte nord
Inclinazione di due fronti opposte dovuta alla rastremazione	0°36'04"	
Inclinazione di due spigoli opposti dovuta alla rastremazione	0°51'00"	
Angolo di contorsione della fronte fra la linea di base e quella superiore	0°19'13"	Fronte nord
Pendenza massima		A 1/3 dell'altezza
Strapiombo dell'asse al piano terra	m 1.05	
Strapiombo dello spigolo nord-ovest	m 1.03	
Strapiombo dello spigolo sud-ovest	m 0.70	
Strapiombo dello spigolo nord-est	m 1.40	
Strapiombo dello spigolo sud-est	m 1.14	
Pendenza percentuale dell'asse	2.160	
Pendenza percentuale dello spigolo nord-ovest	2.120	
Pendenza percentuale dello spigolo sud-ovest	1.440	
Pendenza percentuale dello spigolo nord-est	2.880	
Pendenza percentuale dello spigolo sud-est	2.330	

FIG. 80- Sintesi dei risultati ottenuti dai rilievi dell'Ing. Cavani. Tutti i dati sono riferiti alla sola parte quadrangolare, fino alla quota di circa 50m a cura di Arch. Silvia Tosini, Matteo Bonini

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

I rilievi condotti dal Cavani sono stati oggetto di valutazione attraverso rilievi fotogrammetrici eseguiti nel 2006⁹¹. La valutazione ha messo in evidenza il processo evolutivo dell'inclinazione negli ultimi cento anni e di realizzare ipotesi utili alla determinazione delle varie fasi costruttive, nonché di stimare la velocità e la direzione di inclinazione.

Il rilievo evidenzia una struttura con un asse non solo inclinato nel suo complesso, ma anche dall'andamento segmentato.

Quest'ultimo fenomeno potrebbe supportare l'ipotesi di un processo costruttivo più volte interrotto e ripreso; per permettere periodi di sosta lunghi in attesa della cessazione di fenomeni di cedimento e per riattivare processi costruttivi capaci di ripristinare la verticalità dell'asse.

Ulteriori conferme dello studio ai rilievi del Cavani si riferiscono al processo delle inclinazioni differenziate⁹².

Risulta evidente che l'inclinazione lungo la direzione nord sud sia iniziata fin dalle prime fasi del cantiere rallentando dopo la realizzazione del sesto piano e l'inclinazione verso ovest invece sembra essere iniziata solo dopo la fine della costruzione.

Analizzando specificatamente l'andamento dei singoli piani è possibile tracciare un quadro il quadro delle inclinazioni sulla base dei rilievi effettuati (fig. 81):

- I primi nove metri (basamento) probabilmente realizzati in una prima fase hanno subito una leggera inclinazione verso nord-est, opposta a quella prevalente attuale;
- I successivi 36 m (fusto) invece hanno subito con il passare degli anni notevole inclinazione: dapprima in direzione sud e poi in direzione ovest; infatti le correzioni sono maggiori lungo il piano nord-sud;
- Le inclinazioni diverse del quinto e del sesto piano (logge) dimostrano una realizzazione avvenuta in momenti distinti;
- Le inclinazioni oltre le logge (guglia) mostrano comportamenti anomali sia verso sud che verso ovest. Forse a causa dei restauri ottocenteschi o spostamenti accidentali o più probabilmente da un difetto costruttivo originario dato dalla complessità costruttiva di una guglia a base ottagonale.

Infine il rilievo ha consentito di fare delle valutazioni sull'effetto e l'efficacia dei collegamenti della torre con il Duomo e le canoniche.

⁹¹ I rilievi sono stati condotti dalla Facoltà di Architettura di Parma in collaborazione con lo studio FOART di Parma

⁹² Il fenomeno è noto anche come andamento a "banana"

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

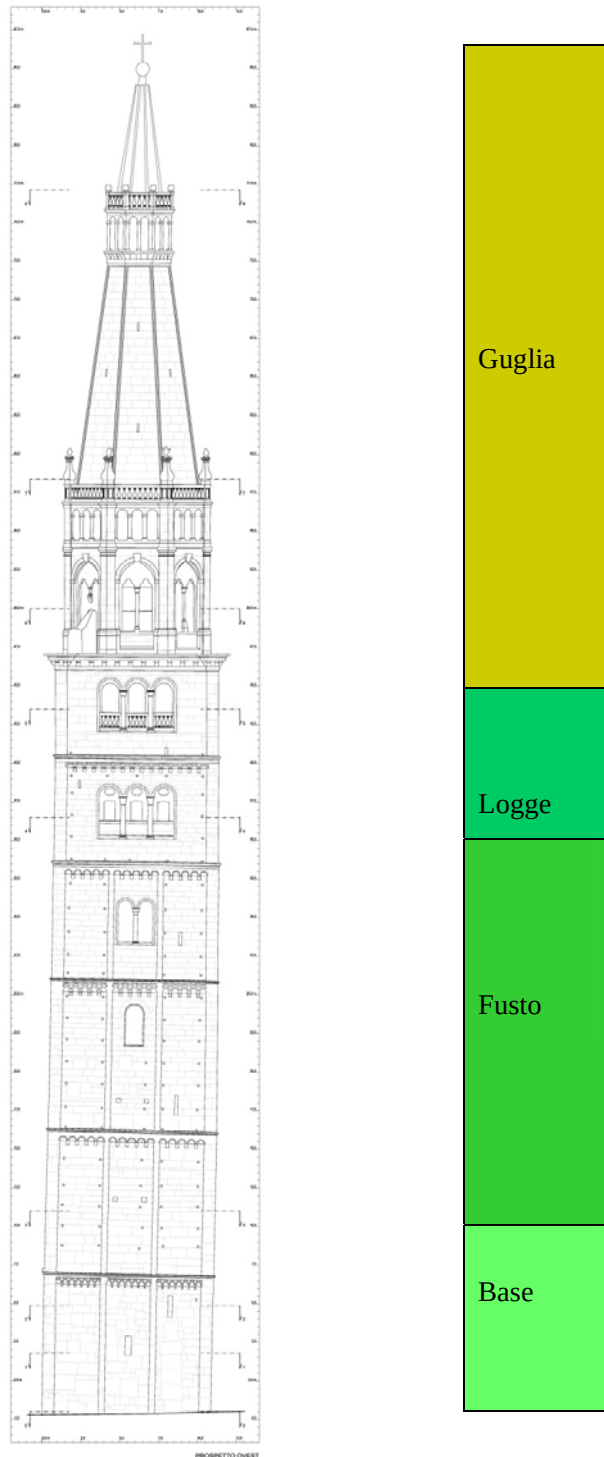


FIG. 81 Schematizzazione zone torre

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Dallo studio di questi dati si può ipotizzare che l'inclinazione verso sud, iniziata con la fondazione della Torre, si sia stabilizzata dopo la realizzazione degli archi tra Torre e Duomo a partire dal 1338.

Mentre la presenza dei collegamenti verso le canoniche (presenti già a partire dal 1200) non sembra abbiano influito con il comportamento delle inclinazioni; infatti già dai rilievi del Cavani non si nota un influenza di tali collegamenti con l'andamento dell'inclinazione, quanto piuttosto un andamento uniforme.

A questa interpretazione si sottraggono due zone, il basamento e la Guglia. Il basamento risulta meno inclinato in entrambe le direzioni rispetto ai piani soprastanti: in direzione parallela al Duomo (est-ovest) è giustificabile dall'iniziale inclinazione verso est, in direzione ortogonale al Duomo l'inclinazione è minore a causa della presenza degli archi.

A queste interpretazioni si possono aggiungere gli effetti dei possibili lavori di manutenzione sul manto lapideo che avrebbero potuto falsare le inclinazioni reali (fig.82,...,85).

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

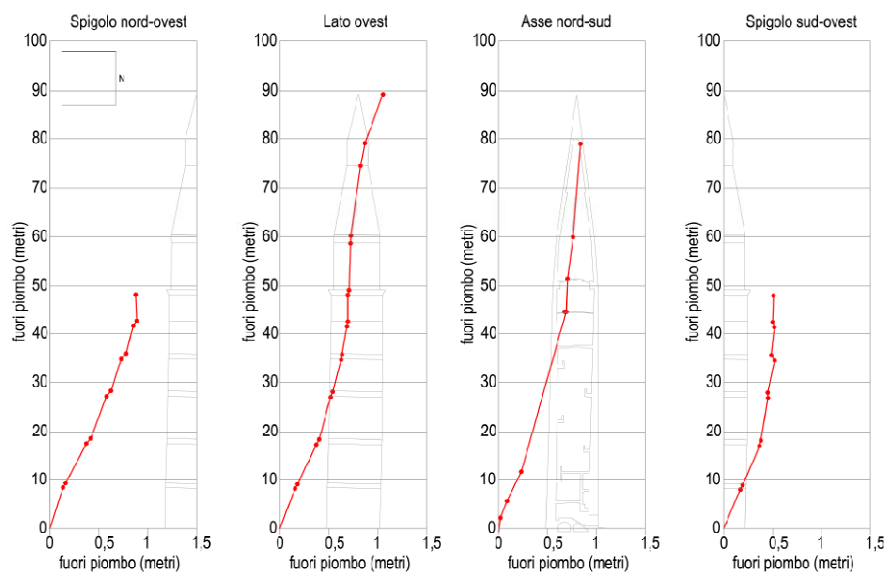


FIG. 82-Grafici delle pendenze dello spigolo nord-ovest, lato ovest, asse nord sud, spigolo sud ovest a cura di e Arch. Silvia Tosini, Matteo Bonini

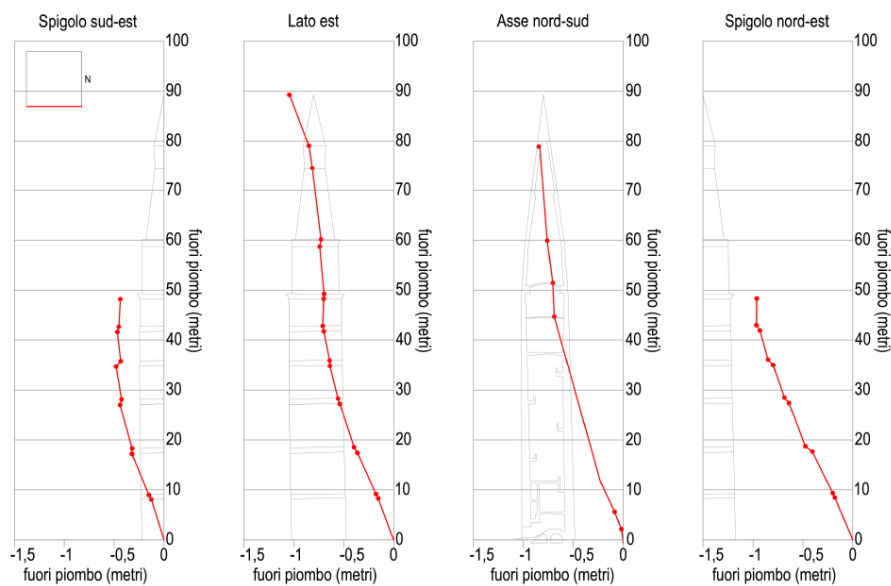


FIG. 83-Grafici delle pendenze dello spigolo sud-est, lato est, asse nord sud, spigolo nord-est a cura di e Arch. Silvia Tosini, Matteo Bonini

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

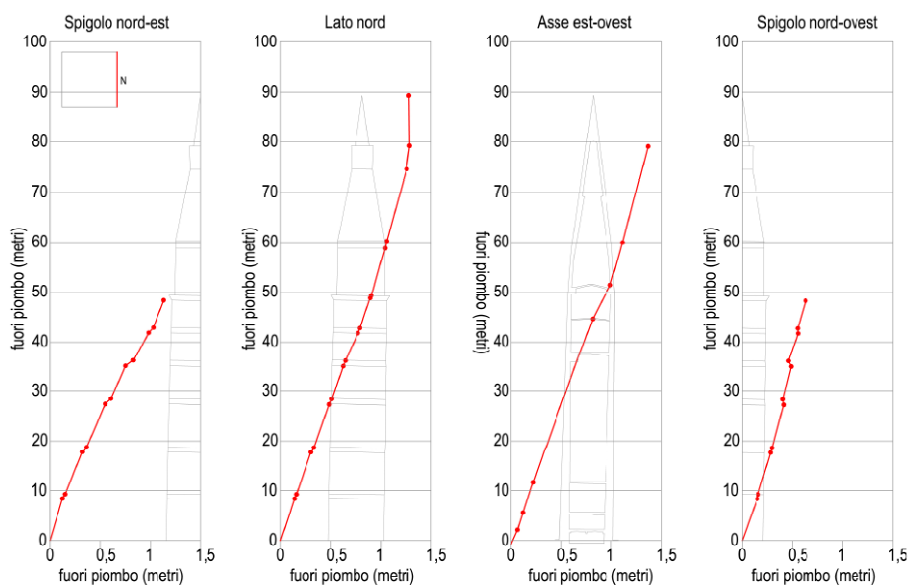


FIG. 84-Grafici delle pendenze dello spigolo nord-est, lato nord, asse est-ovest, spigolo nord-ovest a cura di e Arch. Silvia Tosini, Matteo Bonini

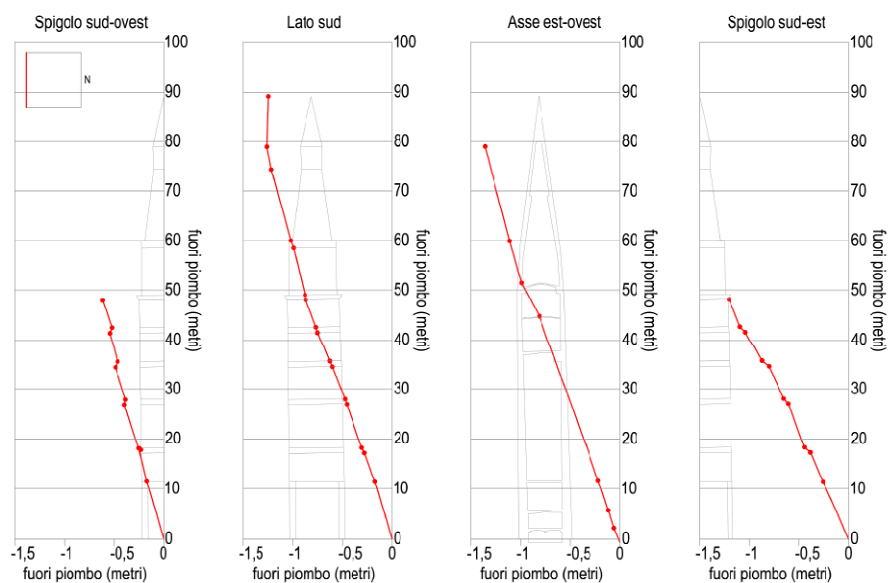


FIG. 85-Grafici delle pendenze dello spigolo sud-ovest, lato sud, asse est-ovest, spigolo sud-est a cura di e Arch. Silvia Tosini, Matteo Bonini

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

	1901	2006	OSSERVAZIONI	INCREMENTI
Pendenza dell'asse	1°14'16"	1°19'16"	Verso sud-ovv. s:	0°05'00"
Pendenza dello spigolo nord-ovest	1°12'51"	1°17'03"	Verso sud-ovest:	0°04'06"
Pendenza dello spigolo sud-ovest	0°49'25"	0°55'34"	Verso sud-ovest:	0°06'09"
Pendenza dello spigolo nord-est	1°38'54"	1°46'03"	Verso sud-ovest:	0°07'09"
Pendenza dello spigolo sud-est	1°19'58"	1°34'24"	Verso sud-ovest:	0°14'25"
Pendenza della fronte ovest	0°59'43"	0°45'11"	Verso ovest	0°15'28"
Pendenza della fronte est	1°15'44"	1°26'14"	Verso ovest	0°10'30"
Pendenza della fronte nord	1°02'06"	1°06'28"	Verso sud	0°04'20"
Pendenza della fronte sud	0°28'09"	0°36'21"	Verso sud	0°08'12"
Angolo del piano d'inclinazione dell'asse con la linea di base della fronte	3°/54'43"	3°28'41"	Fronte nord	1°55'58"
Angolo di contorcimento della fronte fra la linea di base e quella superiore	0°19'13"	0°07'45"	Fronte nord	0°11'28"
Pendenza massima			Al 2° livello	
Srapiombo dell'asse su piano terra	m 1.05	m 1.10		m 0.13
Srapiombo dello spigolo nord-ovest	m 1.03	m 1.60		m 0.65
Srapiombo dello spigolo sud-ovest	m 0.79	m 0.79		m 0.09
Srapiombo dello spigolo nord-est	m 1.40	m 1.48		m 0.08
Srapiombo dello spigolo sud-est	m 1.14	m 1.28		m 0.14
Pendenza percentuale dell'asse	2.160	2.360		0.200
Pendenza percentuale dello spigolo nord-ovest	2.120	2.250		0.130
Pendenza percentuale dello spigolo sud-ovest	1.440	1.648		0.208
Pendenza percentuale dello spigolo nord-est	2.080	3.003		0.203
Pendenza percentuale dello spigolo sud-est	2.330	2.687		0.337

FIG. 86-Confronto dei rilievi di inizio '900 e quelli del 2006 si notano in particolare gli incrementi dell'inclinazione del lato est (verso il Duomo)e del lato sud (verso le canoniche) immagine a cura di Arch. Silvia Tosini, Matteo Bonini

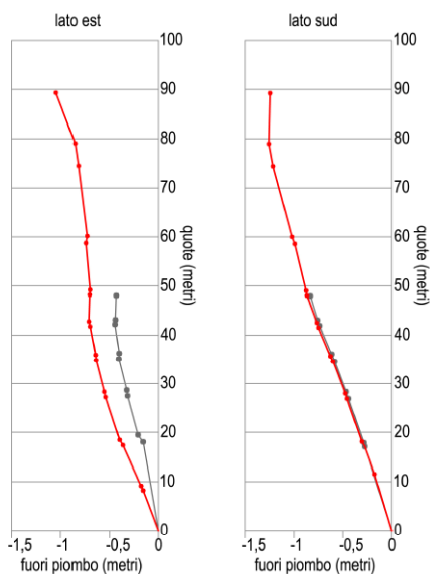


FIG. 87-Confronto dei rilievi di inizio '900 (in grigio) e quelli del 2006 (in rosso) si notano in particolare gli incrementi dell'inclinazione del lato est (verso il Duomo)e del lato sud (verso le canoniche) immagine a cura di Arch. Silvia Tosini, Matteo Bonini

PARTE SECONDA

Il caso di Modena: rapporto tra suolo e strutture in una prospettiva multidisciplinare

Infine è pure significativo il confronto tra il rilievo eseguito dal Cavani e quelli desunti dagli studi del 2006. Si nota come circa in un secolo l'incremento della pendenza dell'asse della Torre in direzione sud sia stato di 103 mm(fig 86-87).

PARTE TERZA

NUOVI CONTRIBUTI ALLA RELAZIONE TRA TORRE E DUOMO DI MODENA

I riferimenti dell'oggetto di studio

1 Il rapporto tra Torre e Duomo

Chiunque si fermasse in prossimità dell'abside del Duomo, con lo sguardo rivolto in direzione ovest, verso la facciata della Cattedrale, noterebbe l'evidente convergenza dei profili verticali meridionale e settentrionale di Duomo e Torre.

Sebbene questa anomalia sia evidente ad occhio nudo, più difficile risulta comprendere motivazioni, origini e cause di questo fenomeno. In questa sede ci si pone l'obiettivo di una lettura contestuale degli studi e delle ricerche più significative sulla questione e di evidenziarne una chiave di lettura.

L'analisi è partita dalla ricostruzione originaria delle relazioni tra i due monumenti e da tutti i dati a disposizione riguardanti i processi costruttivi dei due edifici, dai cambiamenti che questi hanno subito nell'arco della storia, dal comportamento di influenza reciproca a livello fondale e dalle variazioni altimetriche dovute a fenomeni geologici (subsidenza).

Su questa base conoscitiva sono stati realizzati rilievi geometrici di precisione finalizzati alla comprensione dei movimenti che potrebbe aver subito il Duomo dalle origini ad oggi e confrontare i risultati con le informazioni sugli studi della pendenza della Torre.

Attraverso questa metodologia di indagine si è cercato di individuare ed evidenziare i principali cinematismi a cui sono stati sottoposti i monumenti, a comprenderne la evoluzione storica e a formulare una ipotesi interpretativa.



FIG. 1- Immagine della zona absidale del duomo in cui si vede l'arco di collegamento tra Torre e Duomo

Gli archi di collegamento tra Torre e Duomo che vediamo oggi sono in realtà un rifacimento risalente ai primi anni del Novecento di strutture realizzate a partire dal 1338.

La presenza di questi archi verso la metà del XIV secolo si deve probabilmente ad una duplice necessità, statica e funzionale; infatti tra le due strutture venne creato uno spazio dedicato sia a sagrestia sia a passaggio diretto verso la torre ad uso esclusivo del clero. Questo percorso aveva accesso diretto dalla zona presbiterale, soprelevata 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.

Come si può infatti notare nel disegno sottostante , realizzato da Tommaso Sandonnini, segretario del Comitato per i restauri del Duomo, vennero individuate due tracce di porte indicate con le lettere A e B a quote differenti.

...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, vòlto che costrinse anche a spezzare la cornice del muraglione... Modena 25 Giugno 1900

.

PARTE TERZA

Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo



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
costrutto su quello in mattoni preesistente

F - spessore del muraglione

G - idem

FIG. 2 Schizzo a mano che mostra la serie di aperture individuate. (Sandonnini 1900)

Dei due accessi A- B indicati nel disegno, 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.

Il ruolo statico di queste strutture venne ampiamente dibattuto agli inizi del 1900 al momento della 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, inoltre si eseguirono dei saggi sulle fondazioni dei piedritti degli archi (fig.3).

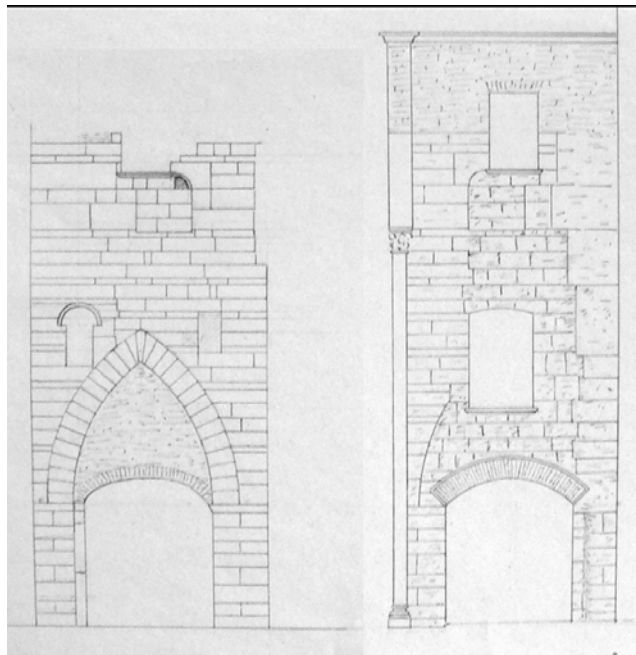


FIG 3-Giovanni Tosi, rilievo dei muri trasversali tra il Duomo e la Ghirlandina, 1898. ASCMo, Cartografia, Cartella VII ter.

L'ing. Tosi direttore dei restauri, durante la demolizione degli archi tra Torre e Duomo, verificò il mancato ammorsamento delle murature con quelle del Duomo, e questo venne interpretato come un segno dell'inefficacia del collegamento e dell'inutilità dello stesso.



FIG. 4 - La facciata interna del muro occidentale. Fotografia Orlandini precedente il 1902.(Lanfranco e Wiligelmo, il Duomo di Modena)

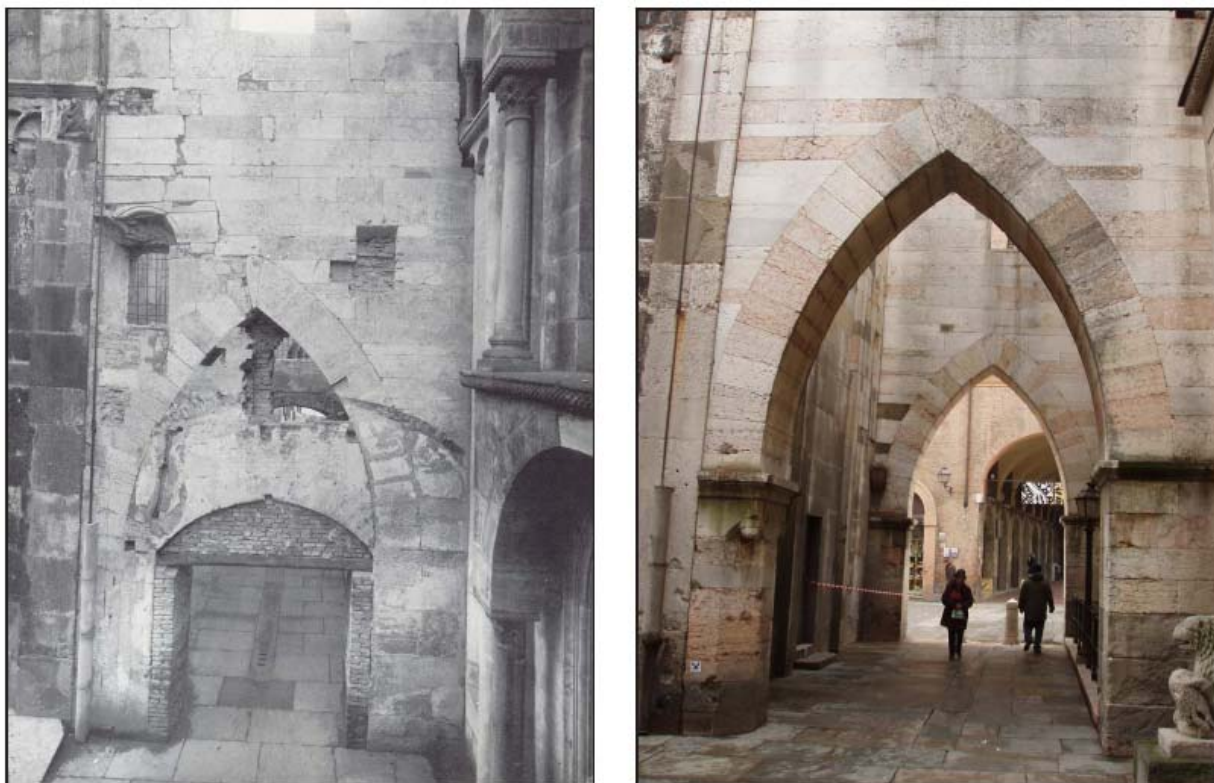


FIG. 5 Confronto tra il muro ovest visto dalla porta della pescheria in un immagine del 1902 e il muro oggi

In realtà 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.

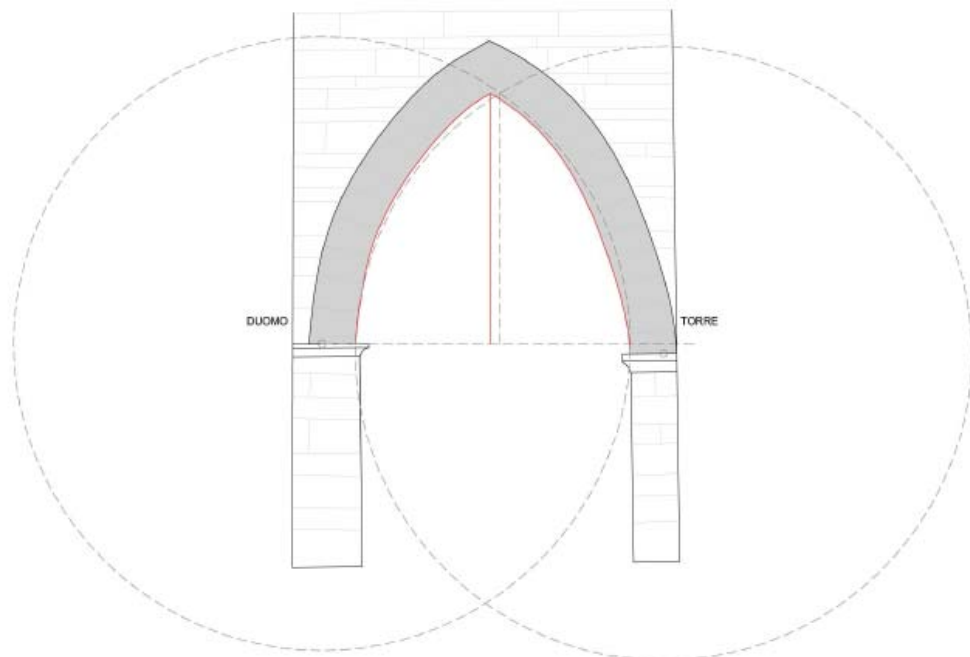
Per comprendere oggi se il fenomeno di inclinazione della torre avesse finito il suo decorso, è stato condotto un rilievo geometrico ed una analisi dello stato fessurativo degli archi.

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.

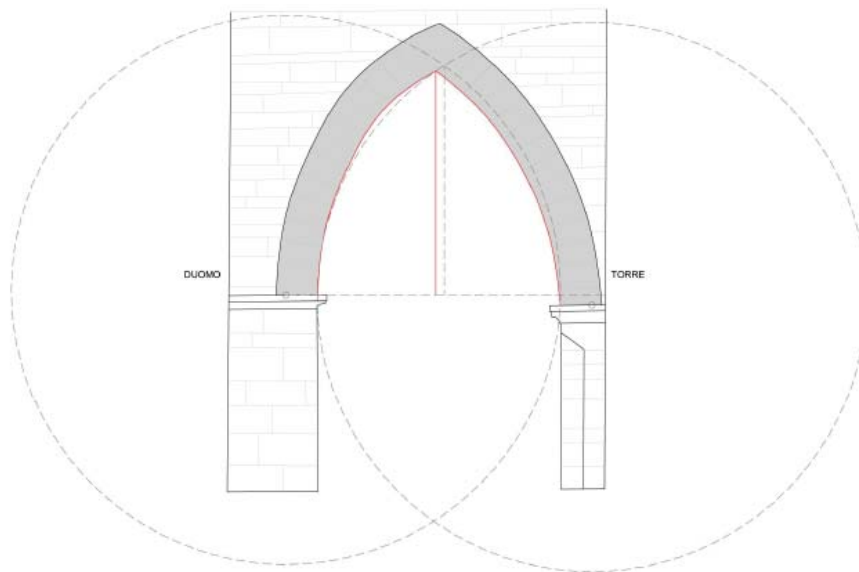
Da questo rilievo si può desumere che gli archi abbiano svolto un ruolo attivo nella statica del complesso Torre-Duomo. In particolare quello di rallentare il processo di avvicinamento reciproco dei due edifici.

PARTE TERZA

Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo



Sud -est



Sud-ovest

FIG. 6- Immagini dei rilievi eseguiti sugli archi di collegamento tra torre e Duomo, in rosso il profili deformati in tratteggiato grigio le geometrie corrette

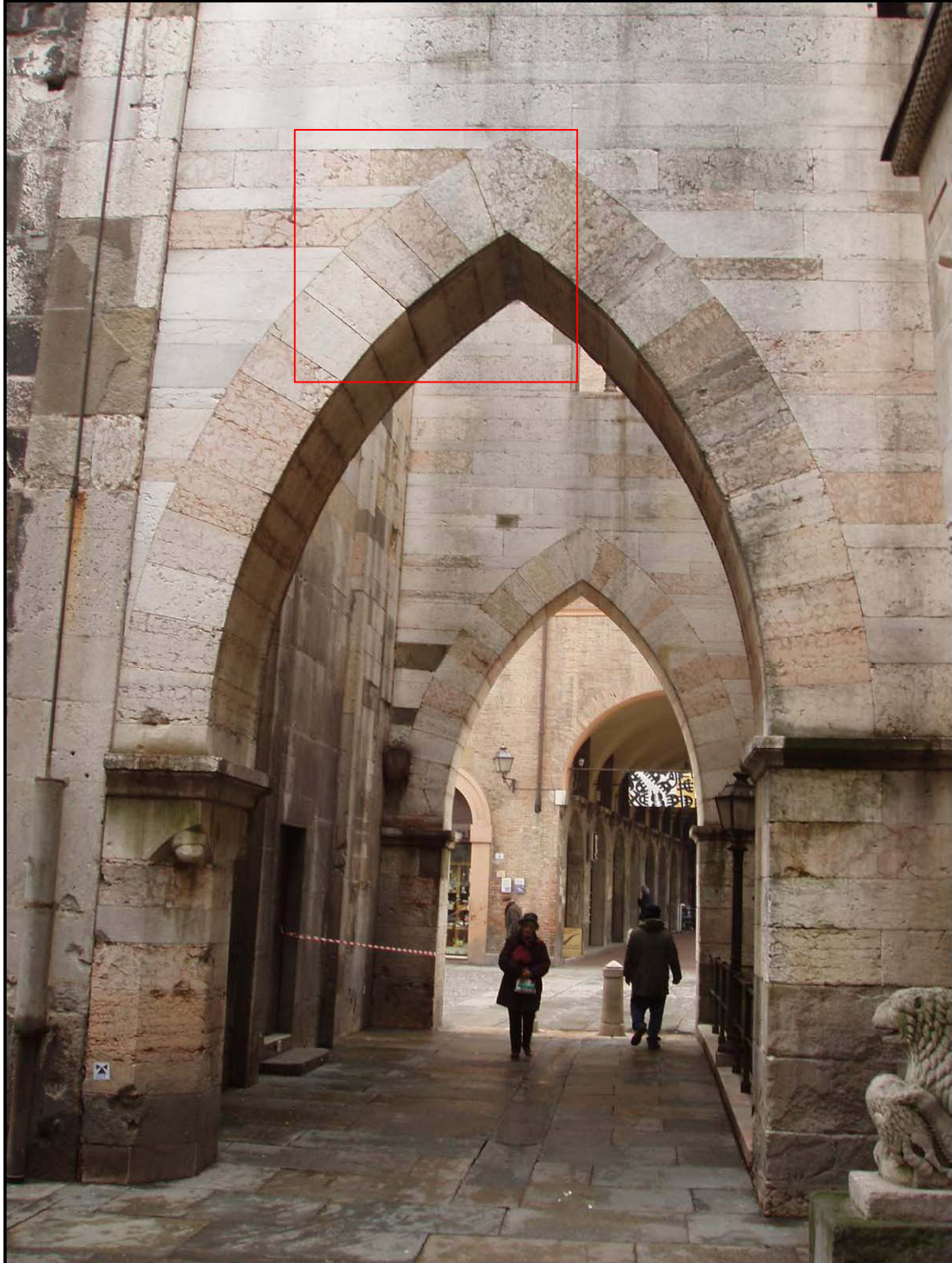


FIG.7 Foto che mostra un'anovva rottura nell'arco orientale



FIG. 8,9 Particolare arco ovest, lesione a in prossimità della chiave dell'arco

PARTE TERZA

Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

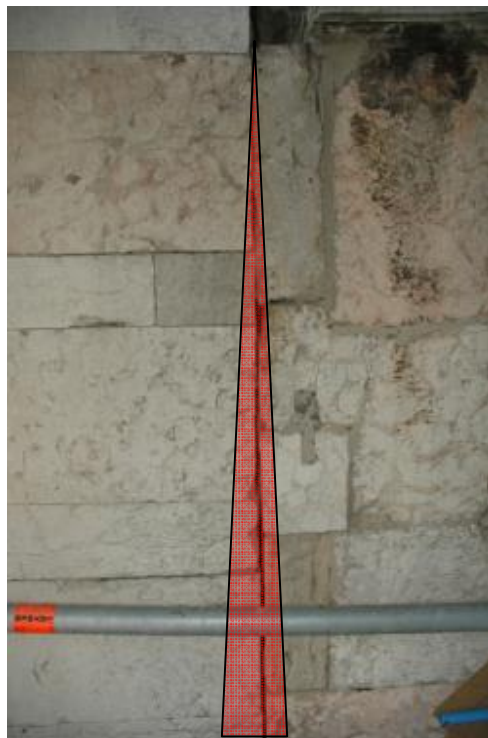
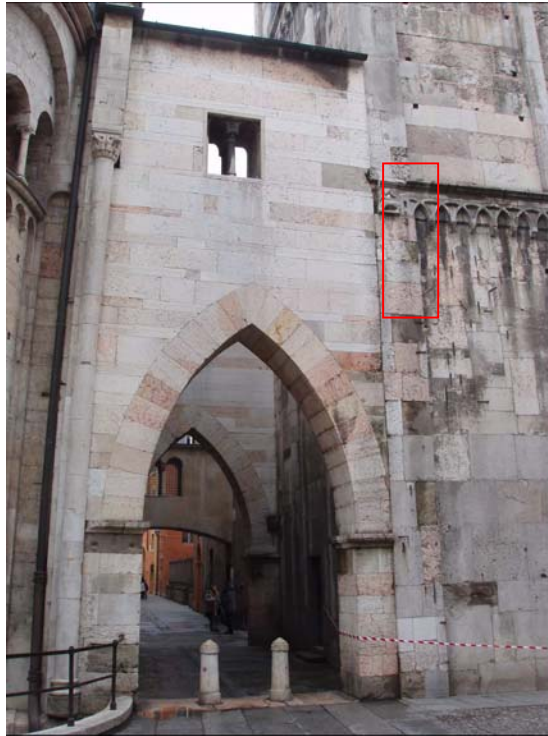


FIG. 10- Arco est, attacco con la torre, si vede l'apertura verso il basso della lesione

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.

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.

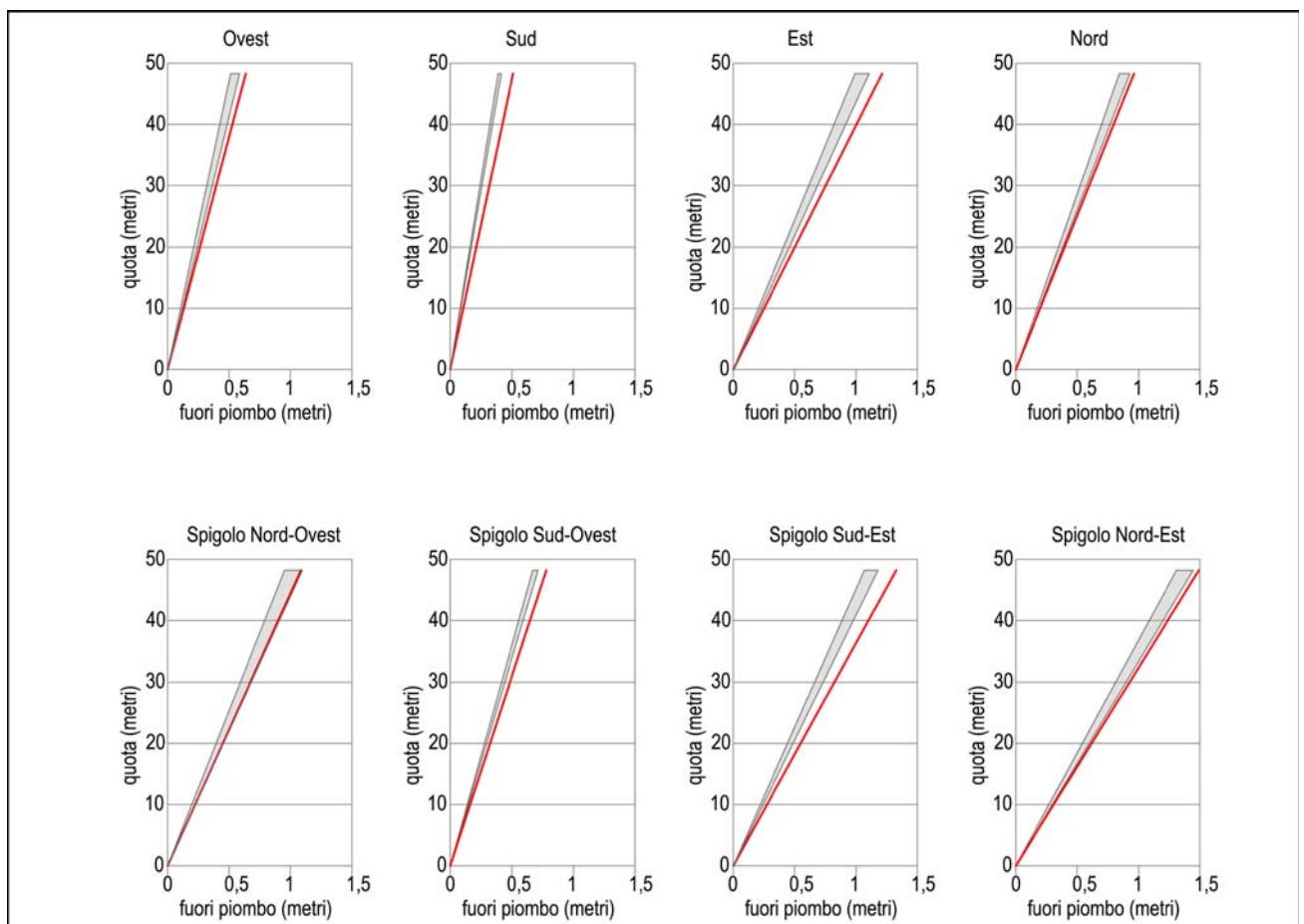


FIG. 11-Grafici dove si mettono a confronto le inclinazioni misurate nel 2006 (rosso) con quelle minime e massime misurate nel 1901 a cura Architetti Silvia Tosini, Matteo Bonini.

Il risultato del confronto evidenzia in maniera significativa l' incremento delle inclinazioni verso il Duomo . Particolarmente accentuati in direzione ovest.

Gli effetti sul Duomo di questo movimento progressivo sono stati rilevati nei prospetti interni settentrionali della Cattedrale. Si possono vedere infatti delle lesioni nelle posizioni in cui gli archi si appoggiano al Duomo. In particolare l'arco est, quello corrispondente all'angolo sud ovest della Torre, è causa di un'importante lesione con rotture delle pareti fuori dal piano che prosegue anche in cripta.



FIG. 12- Lesione dovuta alla spinta dell'arco di collegamento con la torre



FIG. 13- Lesione dovuta ad una combinazione di spinta degli archi unita ad un cedimento fondale in zona absidale in prossimità del collegamento con le canoniche

Gli effetti della spinta dell'arco della Torre non sono gli unici ad agire sul Duomo. Infatti agiscono anche quelli legati al passaggio creato per il clero di accesso diretto dalle sagrestie alla zona presbiterale.

La sagrestia, che venne fortemente ridimensionata in occasione dei restauri novecenteschi sul Duomo, dalla metà del 1200 fino al 1900, ha gravato sul fronte settentrionale della Cattedrale; inoltre come la Torre, subisce un'inclinazione verso il Duomo.

Per questo gli effetti della spinta dell'arco delle canoniche ha effetti del tutto simili a quelli del Torre.



FIG. 14 - L'immagine mostra una lesione in prossimità della linea d'unione tra le canoniche e gli edifici retrostanti, caratterizzata da un'apertura divergente verso l'alto, indice di una rotazione complessiva verso il Duomo. Immagine a cura di architetti Silvia Tosini, Matteo Bonini.

Sebbene in modo indiretto, si può pensare che Torre e Duomo abbiano un rapporto anche a livello delle fondazioni.

L'analisi dei dati degli strumenti di monitoraggio posti alla base della Torre e nella zona absidale del Duomo, hanno mostrato da quando sono stati installati, cedimenti differenziali tra il prospetto sud della Torre e quello nord e tra il lato nord del Duomo e quello sud.

Gli abbassamenti registrati a partire dal 2003 hanno avuto un andamento tendenzialmente continuo, e i valori maggiori registrati si sono letti negli strumenti collocati tra Duomo e Torre.

Oltre ai dati del monitoraggio, a conferma di questo maggiore abbassamento nel corridoio tra i due monumenti, sono state le livellazioni di precisione realizzate durante lo studio della subsidenza, e i risultati del rilievo di precisione eseguito sul Duomo in zona absidale che hanno mostrato dall'inizio un abbassamento delle absidi verso la Torre di circa sessanta centimetri.

Questi dati altimetrici e numerici hanno avuto ulteriore conferma nello studio dello stato fessurativo del Duomo e della Cripta, dove le lesioni delle volte e delle colonne mostrano un chiaro abbassamento verso la Torre.

Nel complesso si può evidenziare in prima istanza che esiste una importante relazione di reciprocità tra Torre e Duomo e che da tale reciprocità non è possibile prescindere .

In secondo luogo è del tutto evidente che tale reciprocità ha indotto e continua ad indurre comportamenti di sostanziale convergenza tra i due monumenti .

In terzo luogo , proprio perché sono le questioni geotecniche quelle chiamate in causa fondamentalmente nella relazione tra Torre e Duomo è su queste che occorre concentrare ulteriormente lo studio e la ricerca.

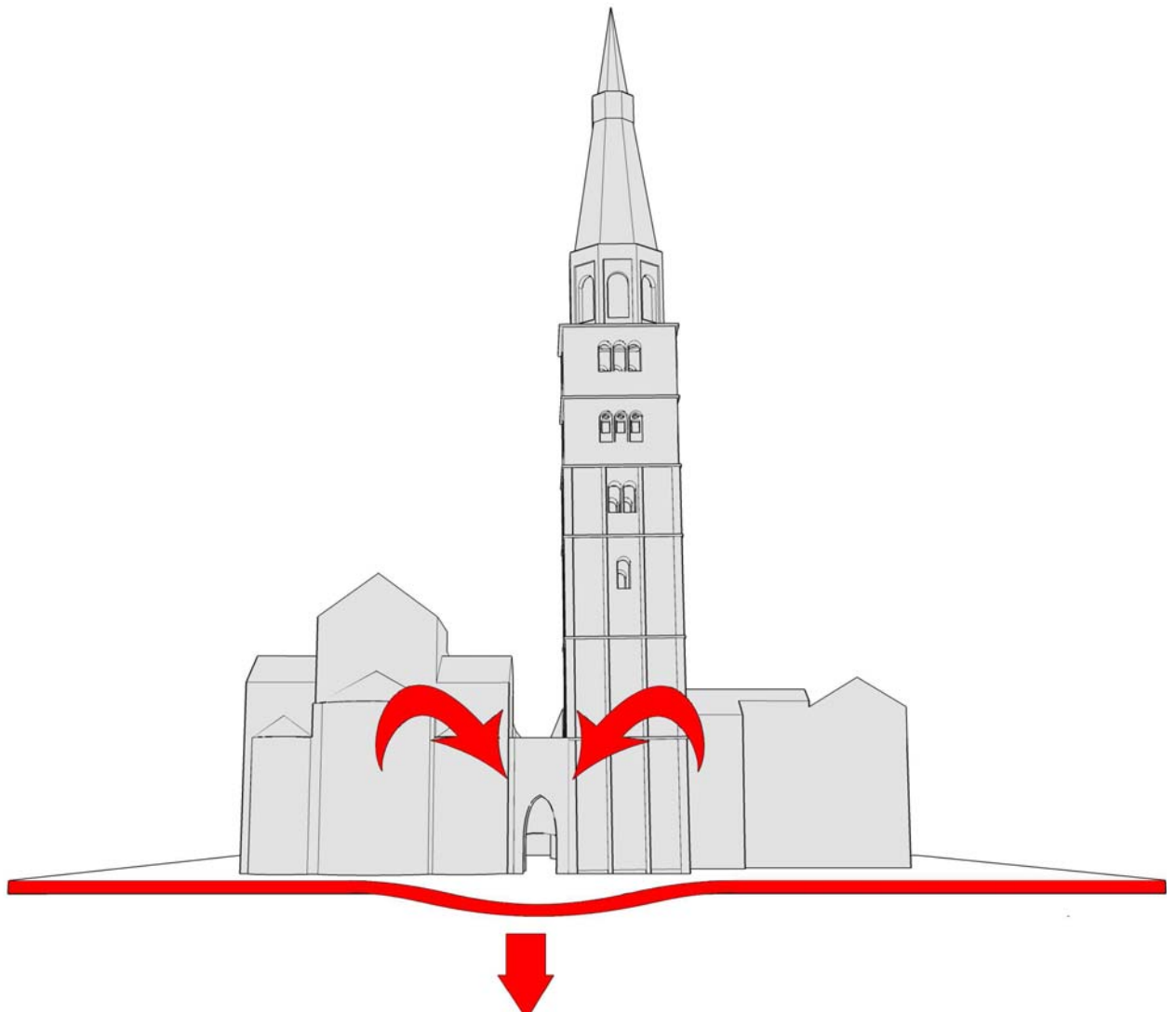


FIG. 14- Schema interpretativo del comportamento di reciproca influenza di Torre e Duomo

2 Forme strutture e dissesti del Duomo

L'analisi dei dissesti della cattedrale viene qui trattato per la prima volta. I meccanismi di collasso fino ad ora non sono mai stati rilevati ad esclusione delle osservazioni successive al terremoto del 1832 relativamente alle lesioni manifestatesi sulle volte delle navate.

Per individuare i meccanismi di collasso, si è resa necessaria una approfondita ricognizione delle strutture al fine di individuare lesioni in grado di descrivere la presenza di cinematismi strutturali.

Inoltre è stato necessario condurre un livellazione geometrica per individuare eventuali disomogeneità altimetriche.

Le prime osservazioni sul complesso delle strutture muovono in realtà dall'osservazione delle geometrie attraverso lo studio realizzato nel 1984.

Grazie a questi rilievi, pubblicati nel 1988¹, è stato possibile individuare, a livello planimetrico alcune irregolarità geometriche sia nei tracciati che negli alzati, legate con tutta probabilità al processo costruttivo aprendo un ampio dibattito sull'interpretazione delle geometrie costruttive e sulle fasi di realizzazione del Duomo.

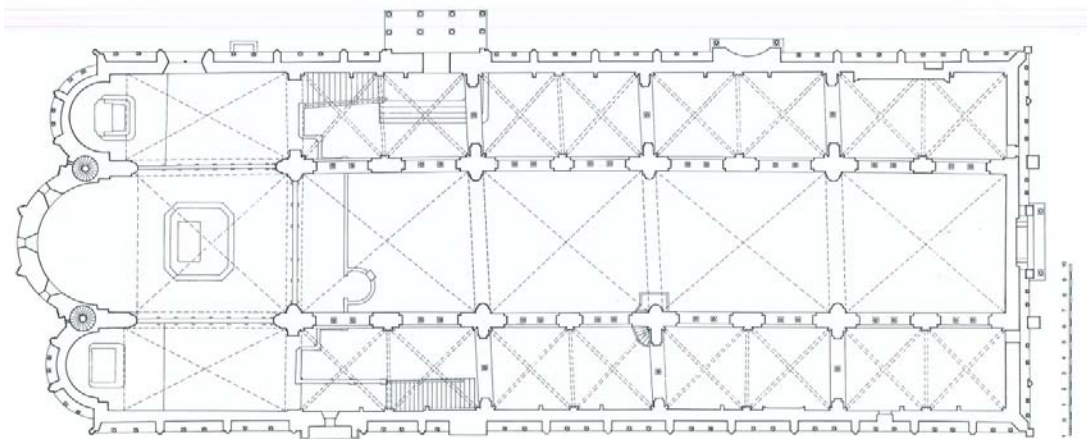


FIG.15- Planimetria della Cattedrale, si evidenziano i disallineamenti dei pilastri in direzione nord sud (Atlante grafico, tav 6 pianta a più 10 m Palazzi 1984)

¹Giancarlo Palazzi, Lamberto Ippolito, *Il Duomo di Modena, Atlante grafico*, a cura di Adriano Peroni, Edizioni Panini, Modena 1988

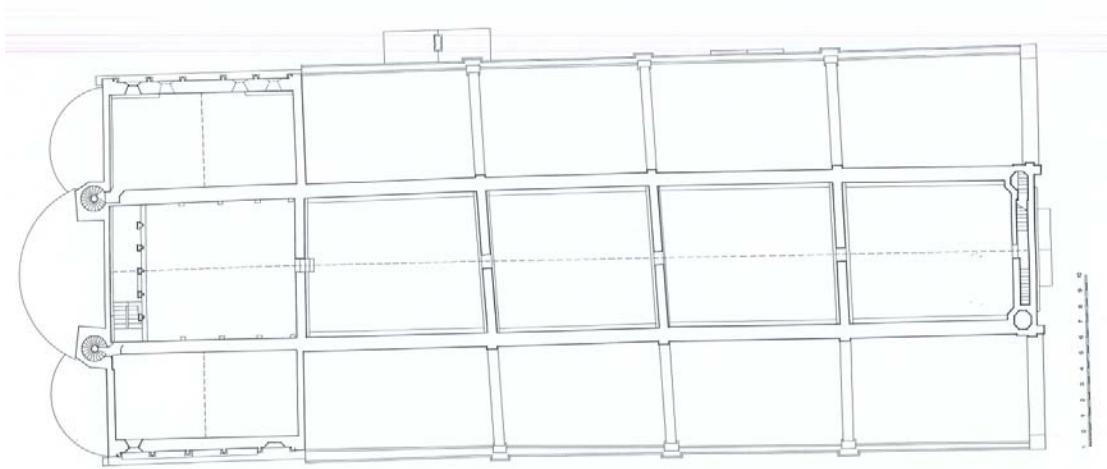


FIG.16 Immagine che mostra i disallineamenti dei muri trasversali.(tav. 8 pianta sottotetto navate laterali Palazzi 1984)

I rilievi planimetrici presentano nei tracciati alcune importanti irregolarità.

Il tracciato presenta lungo gli allineamenti orizzontali est ovest un disallineamento lungo la direttrice verticale nord sud del sistema dei pilastri che sorregge le navate.

Questa irregolarità delle strutture, più evidente nelle campate interne, si minimizza in facciata e in prossimità del presbiterio.

Difficile determinare le cause di tale difformità planimetrica. Si possono avanzare alcune ipotesi che muovono dai dati sul processo costruttivo.

Il primo cantiere iniziato dalla parte absidale, è proseguito fino alla fine della demolizione di quella antica che occupava in parte il sedime dell'attuale. Il secondo cantiere è risultato quello della facciata. In entrambe i casi i fronti risultano paralleli le murature allineate in senso verticale.

Le maggiori irregolarità sono state registrate nelle campate intermedie. La geometria del complesso monumento è stata oggetto di un'interpretazione per l'individuazione dei tracciati originali. Lo studioso, Ettore Casari², successivamente al rilievo del 1984, per comprendere su quali regole proporzionali l'architetto progettista si fosse basato per disegnare la pianta della

² Ettore Casari, *Osservazioni sulla planimetria del Duomo di Modena. Lanfranco i quadrati le diagonali*, in *Il Duomo di Modena*, Atlante grafico, a cura di Adriano Peroni, Edizioni Panini, Modena 1988

Cattedrale, decide di eseguire un'analisi delle grandezze che regolano le proporzioni della costruzione. L'analisi del Cesari parte dall'osservazione che *il rapporto fra la media delle misure dello zoccolo di facciata è circa 2,41... ossia $1 + \sqrt{2}$* , questo numero sembra per lo studioso ricorrente nelle misurazioni disponibili della cattedrale e quindi possibile base interpretativa dello schema progettuale. Ad avvalorare l'ipotesi sono le parole del trattato di Vitruvio che nel Libro VI, descrive come determinare le dimensioni degli atri rettangolari *Invero le larghezze e le lunghezze degli atri si compongono in tre modi. E il primo..., il terzo è che si determini la larghezza in base a un quadrilatero di lati uguali e in quel quadrato si conduca la linea diagonale e quanto spazio avrà avuto quella linea della diagonale, altrettanta lunghezza si dia all'ario*".

Cesari mostra che i valori numerici desunti dai rilievi, per quanto concerne il rettangolo formato dalle navate e dal presbiterio ad esclusione delle absidi, poteva essere stato realizzato secondo il principio di Vitruvio. Dopo aver trasformato le unità metriche misurate e quelle utilizzate nell'anno di costruzione del Duomo (braccia modenese) attraverso la chiave interpretativa vitruviana, Cesari mostra che le misure attese dell'impianto rettangolare differiscono di poco da quelle misurate. Questa lettura che prosegue poi nella comprensione della suddivisione degli spazi interni, navate e presbiterio, trova riscontri positivi anche nella lettura della ripartizione delle navate data dai pilastri forti solo attraverso il confronto di misure medie non inficiate dal reale disassamento dei pilastri³.

³ L'ipotesi è quella di poter suddividere la larghezza in quattro parti uguali (denominate P) in modo da ottenere quattro fasce longitudinali di cui quelle centrali destinate alla navata principale e quelle laterali alle navate minori. Inoltre ipotizza che queste quattro unità P siano suddivisibili ulteriormente in 12 parti uguali b. In questo modo la lunghezza complessiva risulta pari a $L = 4P + 4P\sqrt{2} = 48b + 48b\sqrt{2}$, sapendo che $\sqrt{2}$ è approssimabile con il rapporto 17/12 e ipotizzando che P sia pari ad un b (braccio da muro modenese) si ha che $L = 48b + 68b$. L'area presbiterale, ad esclusione delle absidi, risulta essere formata da una larghezza pari a quella della navata centrale 2P e altezza pari alla somma delle quattro fasce longitudinali 4P. In questo modo la lunghezza complessiva risulta $L = 4P + 4P\sqrt{2} - 2P = 2P + 4P\sqrt{2}$, ovvero $24b + 68b = 92b$. Le ultime osservazioni di carattere generale sul dimensionamento dell'interno della chiesa il Cesari le compie considerando lo spazio occupato dagli spessori delle strutture. Per rispettare le ipotesi condotte le distanze tra gli allineamenti longitudinali, al lordo dello spessore delle colonne devono essere pari a 2P (circa 24 braccia modenese) mentre le distanze tra gli allineamenti verticali della facciata e del presbiterio devono essere pari a 92 braccia. Confrontando quindi le misure attese con quelle reali si è visto nel primo caso una differenza di circa 0,09 m nel secondo caso di circa 0,18 m dando al Cesari conferma della sua chiave interpretativa.

Maggiore attenzione è stata poi posta dal Cesari all'area delle navate ad esclusione del presbiterio, in particolare nello studio della ripartizione spaziale data dalla successione dei pilastri forti. La lunghezza del rettangolo considerato è pari a $L = 4P + 4P\sqrt{2} - 2P = 2P + 4P\sqrt{2}$ ovvero alla luce delle unità di misura modenese se si interpreta $\sqrt{2}$ pari a 17/12³, L risulta pari a 2 volte 12b (braccia) più quattro volte 17b (braccia). Volendo quindi ripartire il rettangolo, considerando gli spessori dei pilastri, in quattro aree uguali delimitate da cinque fasce verticali ho che le fasce sarebbero di dimensione pari a (5+5+5+5+4)b e le larghezze delle aree pari a 17b (braccia) di lato in questo modo si avrebbe un'alternanza regolare di (5+17+5+17+5+17+5+17+4)b. Se si suppone

PARTE TERZA

Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

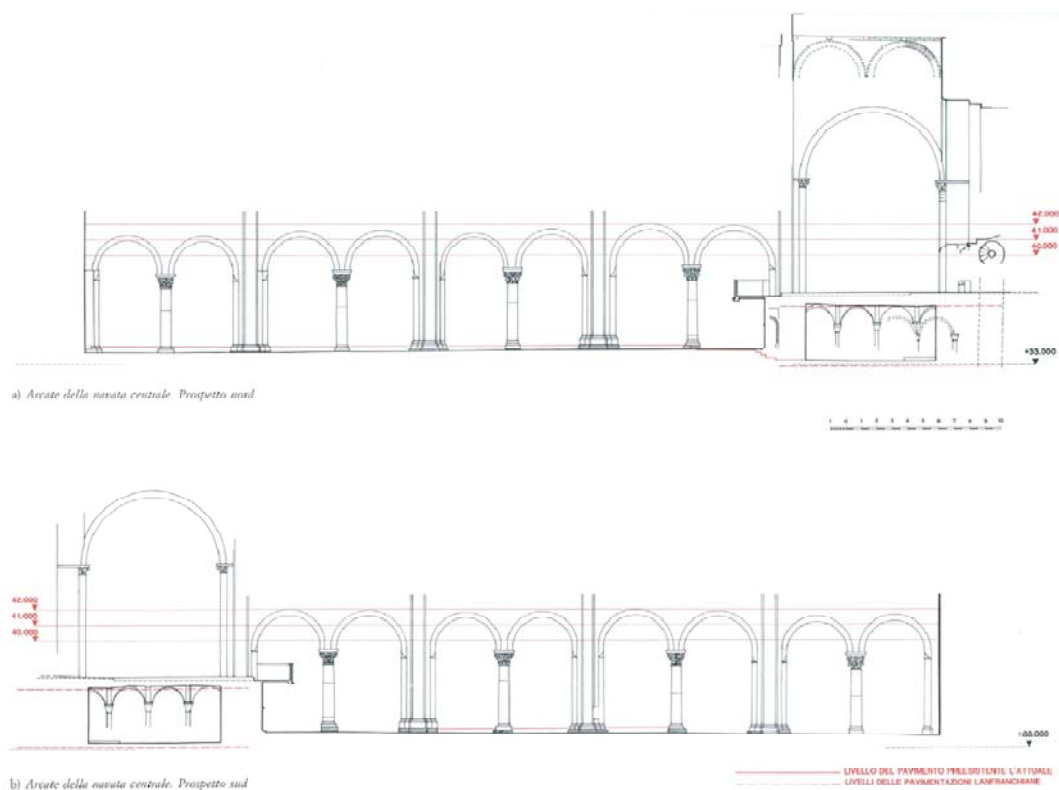


FIG. 17 Sezioni laterali e quote di livellamento (Il Duomo di Modena, Atlante grafico, Palazzi 1984)

Le irregolarità geometriche in pianta legate alle diverse distanze tra i pilastri si rispecchiano poi negli alzati (fig.17), in particolare nei profili degli archi a tutto sesto lungo i prospetti nord e sud della navata centrale. Fissando una linea di riferimento orizzontale alla quota della chiave di volta di un arco a tutto sesto , non è possibile intersecare altri archi nella parte sommitale in quanto irregolari.

inoltre che i basamenti abbiano dimensioni longitudinali pari a quelle trasversali si ottiene un reticolo regolare che fornisce, confrontato con le misure reali, alcuni dati interessanti. La larghezza media dei basamenti dei pilastri risulta essere poco diversa da quella attesa (2619,6 mm misurata contro 2615 mm attesa) quindi si potrebbero confermare le 5 braccia di dimensione per i basamenti dei pilastri forti, inoltre il valore medio delle distanze tra i quattro pilastri (8839 mm) è di poco diverso da quello atteso (8892 mm ovvero uno scarto di 53 mm). Gli scarti individuali però rispetto al valor medio nel caso delle distanze tra i pilastri forti hanno valori che vanno da 0.021 m nella prima campata a nord e 0.64 m nella prima distanza a sud a testimonianza dell'importante disassamento dei pilastri. Che considerato tra l'allineamento a nord e quello a sud ha un valore medio pari a 0,6 m.

Le irregolarità strutturali si sono inoltre determinate a livello fondale dove nella livellazione descritta nel capitolo 3 (parte seconda) è stato possibile riscontrare quote d'imposta diverse e quote altimetriche differenti tra il lato sud e quello nord.

Con le scarse informazioni a disposizione si è resa necessaria una campagna di rilievi altimetrici sia all'interno che all'esterno.

L'analisi geometrica condotta a completamento dei dati già assunti, ha riguardato lo studio delle altimetrie di profili strutturali considerati originali, ovvero mai modificati dalla loro realizzazione.

Il lavoro si è svolto grazie ad una campagna di misurazioni indirette ottenute grazie ad uno strumento topografico d'alta precisione (stazione totale trimble 5500) che consente di determinare un punto su una superficie senza l'ausilio di specchi riflettori.

Il rilievo, che per ragioni di impedimenti fisici dovuti alla presenza dei ponteggi per il restauro del Duomo, ha comunque permesso di ottenere risultati interessanti.

Lo scopo prefissato è stato quello di comprendere i movimenti altimetrici della cattedrale dal momento della sua edificazione.

Per riuscir nell'intento sono stati rilevati diversi punti della Cattedrale. In estero sono stati individuati e rilevati degli allineamenti (cornici) lungo i lati sud ed est con particolare attenzione ai fuori-piombo della zona absidale, mentre internamente sono stati rilevati i basamenti dei pilastri, i capitelli, e il profilo delineato dal davanzale dei finti matronei.

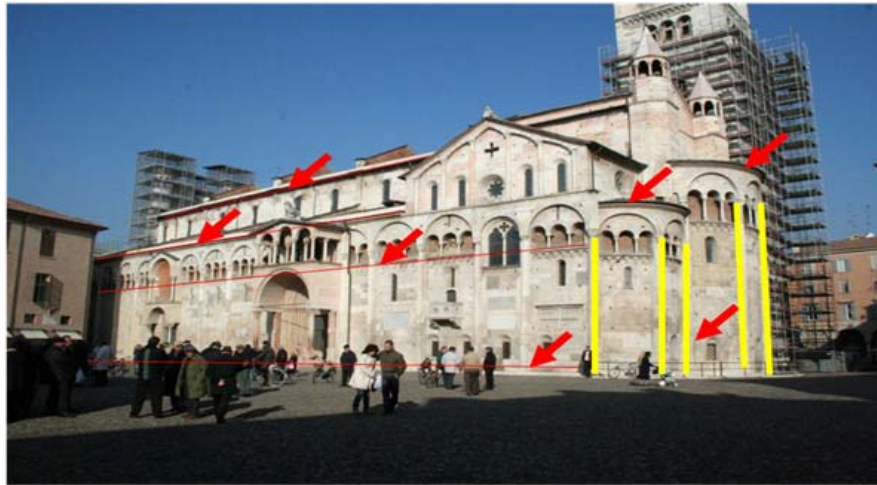


FIG. 18 -Nell'immagine vengono evidenziati gli allineamenti oggetti del rilievo altimetrico dei lati sud e ovest.

Diversi ed articolati sono stati i risultati del rilievo. I dati osservati hanno permesso di formulare nuove ipotesi sui cedimenti mai discusse prima.

L'andamento altimetrico egli allineamenti collimati in esterno come all'interno, hanno fornito dei dati del tutto inaspettati.

In generale risulta che le cornici collimate hanno un andamento crescente dalla facciata fino alla porta Regia oltre la quale comincia degradare verso la zona absidale.

La prima cornice che si trova a circa 9 m di altezza dal piano della piazza risulta essere crescente fino oltre la porta regia, si mantiene costante per circa 10 m poi diminuisce repentinamente nell'ultima parte verso le absidi. In fase crescente il dislivello dalla facciata fino al limite massimo di crescita risulta essere di circa 30 cm poi degrada da quella quota di altri 34 cm (fig. 19).

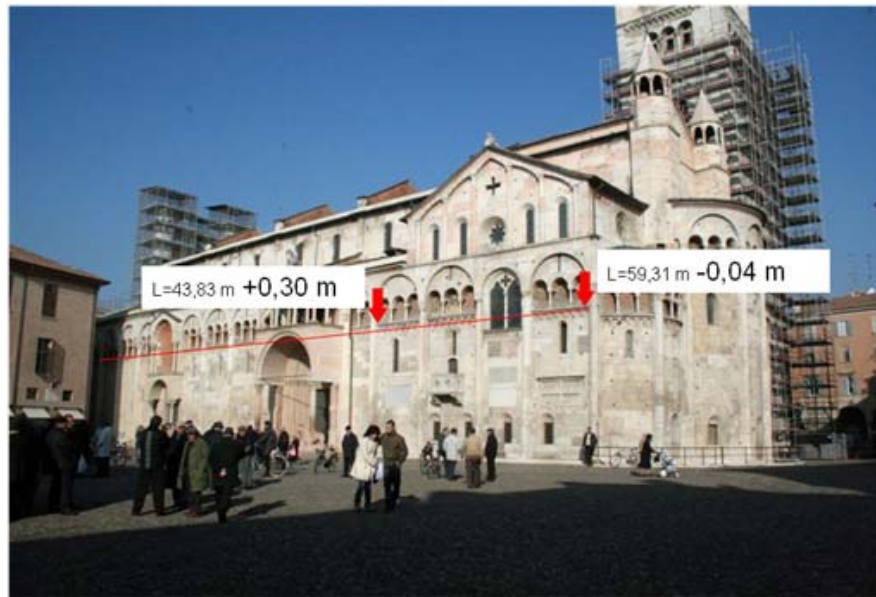


FIG. 19- Allineamento a quota + 9 m da p.c.. Particolare dei dislivelli più significativi

Diverso il comportamento della cornice posta a circa 12 m di quota dal piano della piazza.

I valori rilevati, mostrano un andamento comunque crescente a partire dalla quota di facciata rilevata ma con dislivelli meno accentuati (circa 10 cm). Il punto di massima quota si è registrato comunque in allineamento con la porta Regia dalla quale avviene poi una graduale decrescita verso la zona absidale di circa 10 cm.

L'ultima cornice rilevata a circa 19 m dal piano di calpestio della piazza mantiene un andamento quasi orizzontale, almeno fino al finto transetto. questa cornice, modificata in epoca duecentesca al momento dell'intervento delle maestranze Campionesi, presenta come quella a 12 m di quota un dislivello positivo di circa 10 cm.

Da questi primi risultati è possibile formulare alcune ipotesi.

La prima è che la chiesa sia stata fondata, realizzata e concepita su di un piano orizzontale in quanto i dislivelli misurati mostrano valori discrepanti tra gli allineamenti bassi e quelli più alti. Questo fatto fa pensare ad un fenomeno di cedimento avvenuto in tempi di versi e certamente non ricercato.

Il comportamento generale del prospetto lato sud è quello di un duplice abbassamento a ovest e a est. Il fatto che si siano registrati dislivelli più importanti alle quote basse (9 m) può significare

che i primi importanti cedimenti si siano registrati già in fase di realizzazione a cantiere aperto prima ancora che venisse ultimata la cortina muraria bassa della navata sud.

I dislivelli coerenti e meno evidenti delle cornici superiori testimoniano il comportamento a lavori quasi ultimati o addirittura a cantiere concluso.

Eseguendo infine una semplice sottrazione tra i dislivelli misurati nelle zone basse e quelle alte si riesce a risalire alla correzione occorsa per ripristinare i livelli della muratura orizzontali individuando il dislivello iniziale sia della facciata che della zona absidale.

Sottraendo ai 30 cm di depressione accumulati dalla cornice posta a 9 m di quota ai 20 cm di quella posta a 12 si ha che in fase costruttiva con tutta probabilità deve esserci stato un abbassamento della facciata lato sud di circa 10 cm.

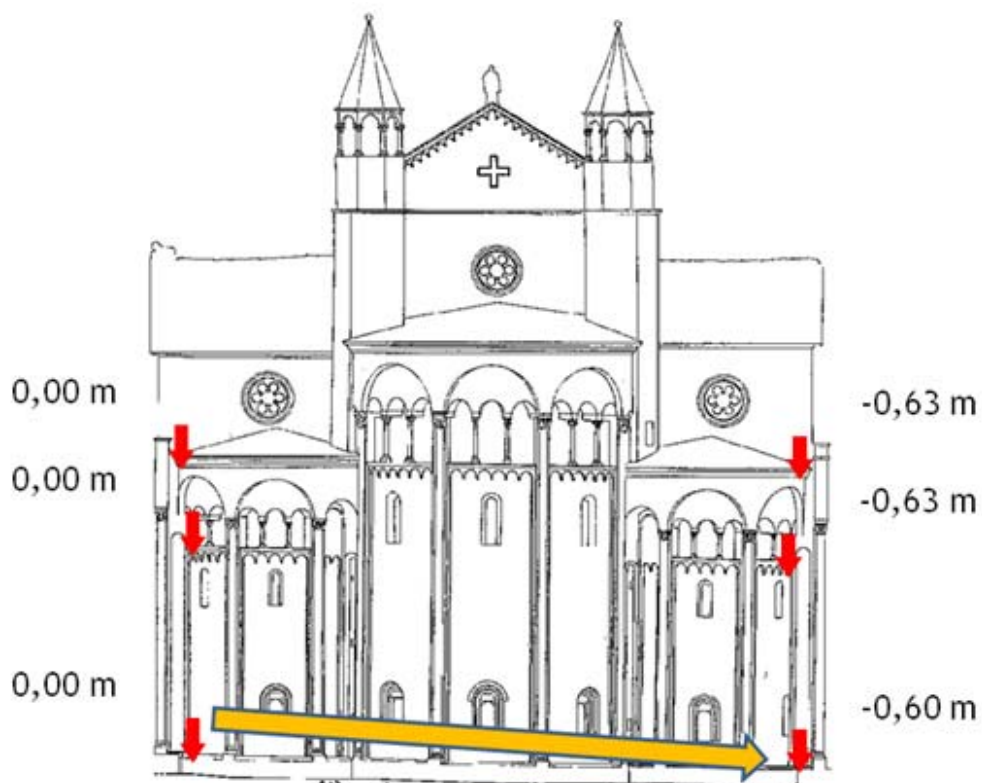


FIG. 20- Risultato dei rilievi altimetrici lungo il lato orientale. Particolare dei dislivelli più significativi

L'analisi dei risultati del rilievo del lato est (zona absidale) hanno consentito di quantificare gli abbassamenti verso la Ghirlandina (nord) già evidenti ad occhio nudo.

I punti rilevati si riferiscono a tre allineamenti posti a quote differenti, il primo costituito dal cordolo basso, il secondo a circa 8.50 m e il terzo a 11.5 m.

In tutti e tre i casi si sono registrati in modo coerente degli abbassamenti di circa 60 cm in direzione nord ovvero verso la Torre (fig. 20).

Per comprendere quale fosse il dislivello complessivo tra la facciata e la zona absidale sono state confrontate le quote di due pietre che fanno parte del cordolo in trachite ritenute posate alla stessa quota che hanno mostrato un dislivello complessivo accumulato di circa 40 cm dalla facciata.

La coerenza delle misurazioni lungo gli allineamenti del paramento absidale fa pensare ad un cedimento avvenuto successivamente alla conclusione delle absidi (1106).

Sempre in zona est si è voluto indagare sui fenomeni di fuori-piombo già evidenziati dal rilievo del Palazzi del 1984 ma di cui non si avevano valori numerici precisi.

I punti collimati sono stati materializzati lungo le semicolonne lapidee addossate alle absidi. Considerando quindi un sistema di riferimento ortogonale con direzione positiva delle ascisse lungo l'allineamento ovest-est e delle ordinate lungo l'allineamento sud-nord, si è visto che la parte sommitale delle absidi nel complesso si sono spostate rispetto alla base in modo crescente da 10-20 cm verso est e 17-27 cm verso nord. Con valori più accentuati misurati lungo le semicolonne verso il lato della torre. Ancora una volta la coerenza degli spostamenti mostra un cedimento che nel complesso può essere avvenuto al termine della realizzazione delle absidi (fig. 21).

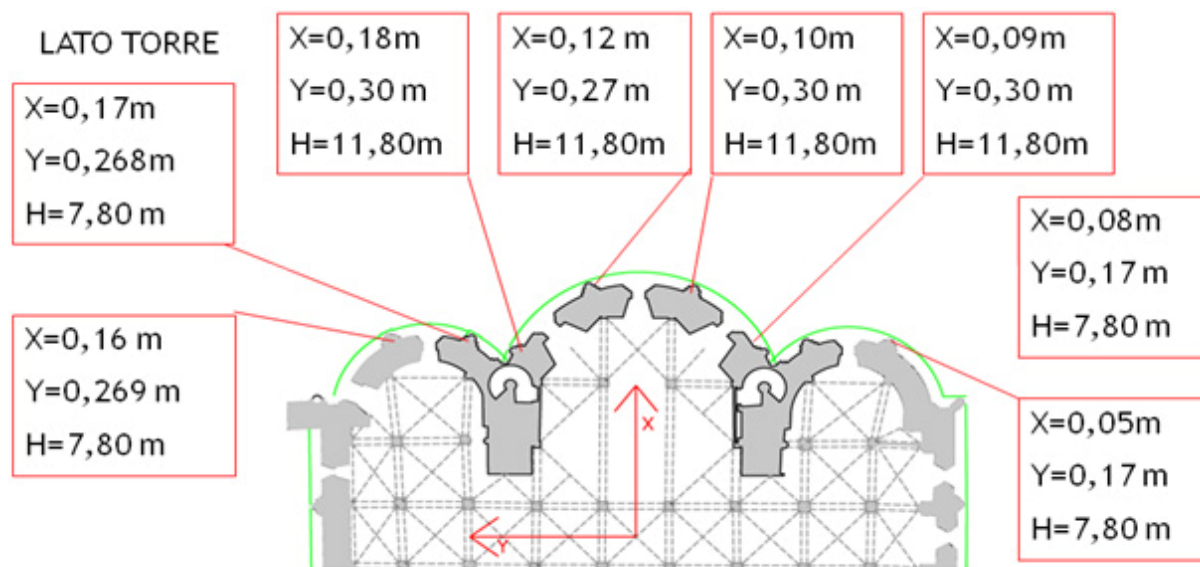


FIG. 21 Valori rilevati dei fuori-piombo in zona absidale

In riferimento ai dati storici forniti dalla *Relatio* si sa che nel 1106, data in cui vengono traslate le spoglie di S. Geminiano dall'antica Cattedrale alla nuova, la cripta e la zona absidale erano state ultimate inoltre dalle informazioni legate alle recenti ricerche sulla torre si sa che contemporaneamente veniva ultimata la prima parte del campanile la cui presenza potrebbe aver dato inizio ai primi cedimenti fondali.

La comprensione delle anomalie altimetriche esterna ha indotto ad approfondire anche eventuali implicazioni delle geometrie all'interno della cattedrale.

Il rilievo condotto all'interno della chiesa ha riguardato in modo particolare la navata centrale. In particolare gli allineamenti dei pilastri che scandiscono gli spazi all'interno della chiesa.

Il rilievo, partendo dal basso ha riguardato le quote dei basamenti dei pilastri *deboli*, e poi quelli *forti*, per poi passare al rilievo dei capitelli e dei matronei. Inoltre sono stati rilevati alcuni punti sui basamenti delle semicolonne addossate ai muri sud e nord.



FIG. 22- Nelle immagini sono evidenziati I punti rilevati dei basamenti dei pilastri “forti e deboli”



FIG. 23-Nell'immagine vengono evidenziati gli allineamenti oggetti del rilievo altimetrico all'interno della navata centrale.

La lettura dei risultati è avvenuta in senso longitudinale est ovest e successivamente in senso trasversale sud-nord.

Partendo dal lato nord si è potuto misurare un dislivello dell'estradosso dei basamenti delle colonne a partire dalla facciata, per arrivare alla zona presbiterale di circa 36 cm, e dei pilastri di circa 56 cm, mentre i capitelli delle colonne di circa 50 cm e quelli dei pilastri di circa 25 cm.

Sul lato sud il dislivello, comunque crescente, da ovest a est dei basamenti delle colonne risulta di circa 60 cm dei pilastri di circa 42 cm mentre i capitelli delle colonne hanno un dislivello positivo di circa 33 cm e i pilastri di circa 37 cm.

Diverso il comportamento dei matronei che hanno un andamento simile a quello rilevato all'esterno, ovvero una prima parte crescente (fino alla porta regia) e poi una decrescente con dislivelli complessivi tra ovest e est misurati a nord di circa +25 cm e a sud di pochi cm.

Studiando i dati con maggiore attenzione si è potuto vedere che sia le colonne sia i pilastri a partire dalla base hanno un andamento crescente, diverso in quantità per gli allineamenti nord e sud e che questo viene parzialmente compensato a livello dei matronei.

Ulteriore ed interessante dato emerge dal confronto lungo le quote della direttrice nord sud.

I punti collimati, lungo l'allineamento dei pilastri nord rispetto a quello sud, si abbassano di circa 20-25 cm coerente con i rilievi fatti sulle navate laterali che mostrano una depressione da sud a nord di circa 30 cm.

Conoscendo le livellazioni eseguite nel 1913, eseguite in occasione del rifacimento del pavimento, alla luce della posizione dell'estradosso della trave di fondazione, si può notare come sul lato nord la base d'imposta delle colonne e dei pilastri risulta crescente da ovest a est, analogamente accade a sud.

Questo dato risulta coerente anche con i dati sopraesposti. Le differenze di quota che si mantengono anche nei capitelli obbligano quote d'imposta degli archi differenti, questa

discontinuità viene mascherata nei pilastri forti che presentano ad ovest e ad est quote d'imposta degli archi a tutto sesto differenti.

Nell'ipotesi che le colonne e i pilastri siano stati fatti appositamente in modo crescente verso il presbiterio abbiamo comunque una differente curva di crescita dei basamenti e dei capitelli a sud e a nord.

Sull'allineamento meridionale infatti in corrispondenza del terzo e il quarto capitello delle colonne il trend di crescita stimato a nord non si mantiene, questo potrebbe testimoniare una correzione in corso d'opera che non ha rispettato il progetto originale (fig. 25).

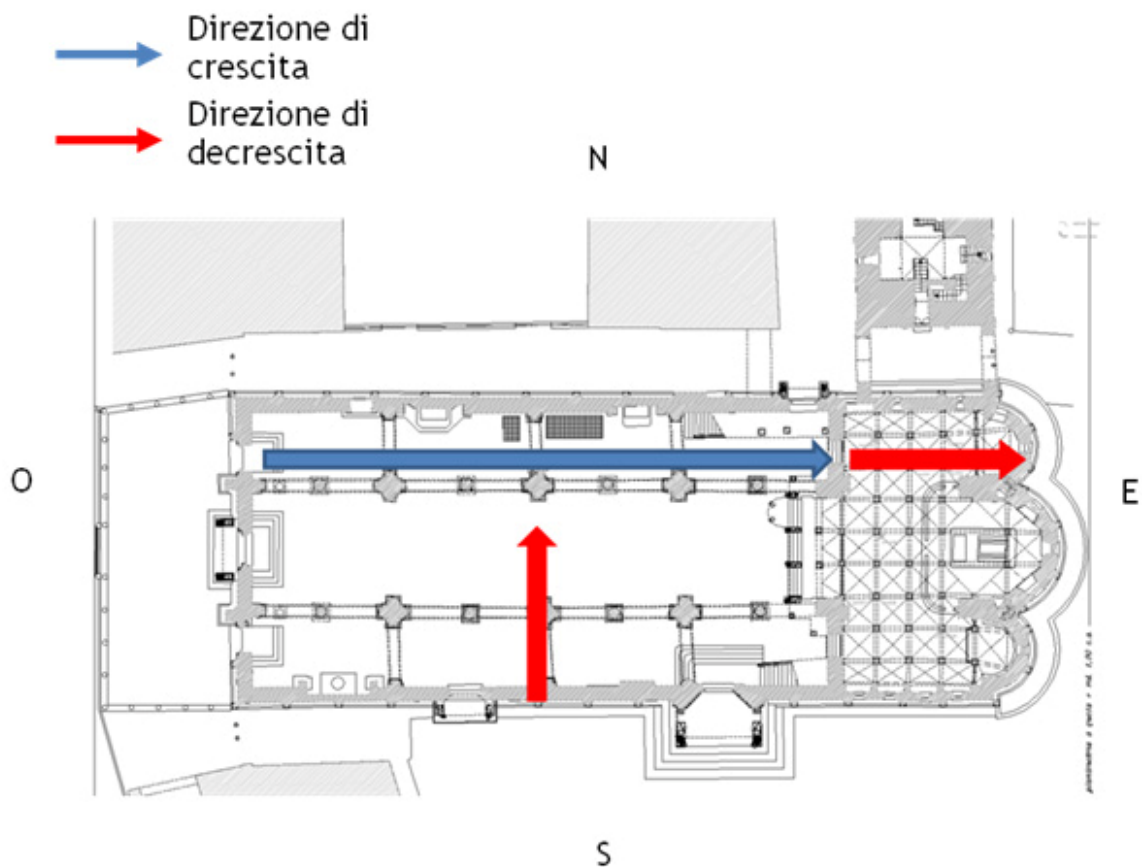


FIG. 25- Schema interpretativo qualitativo dell'andamento altimetrico degli allineamenti dei pilastri rilevati.

Un risultato interessante si è rilevato a livello dei finti matronei. Gli allineamenti mostrano a livello planimetrico allineamenti curvilinei concavi verso l'esterno. Sebbene alcune anomalie

sono state rilevate lungo i paramenti esterni nel 1984 dal Palazzi, qui per la prima volta vengono osservate quelle interne (fig. 26).

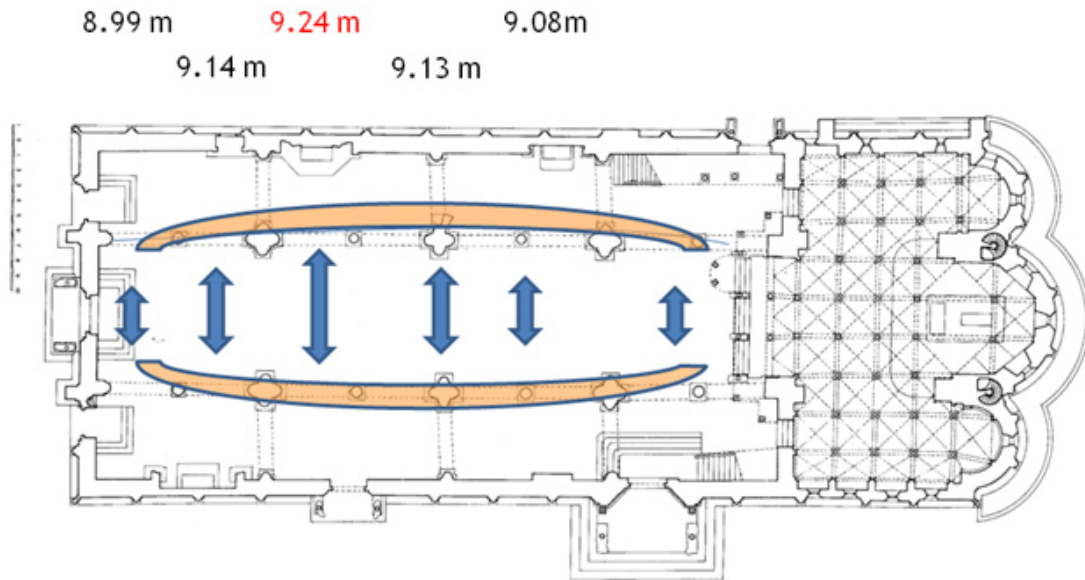


FIG. 26- Immagine che descrive i risultati del rilievo eseguito lungo gli allineamenti del finto matroneo.

Oltre al rilievo di precisione è stato poi condotta una ricognizione in tutta la chiesa per individuare lo stato delle lesioni a partire dalla cripta.

La cripta, come si è potuto leggere nei paragrafi precedenti, è frutto di un rifacimento duecentesco; quindi le lesioni individuate si presume siano legate a fenomeni di successivi alla riedificazione.

Nel complesso sono state individuate lesioni per schiacciamento nelle colonne che sorreggono le volte della cripta, e lesioni dovute a cedimenti fondali.

Questo particolare tipo di lesioni si manifesta in corrispondenza dei punti di discontinuità tra colonna monolitica in pietra e capitello (fig.27). Le colonne, fisse al terreno, soggette ad una rotazione dovuta alla traslazione orizzontale della parte sommitale, in corrispondenza delle basi e dei capitelli che rimangono verticali, subiscono una concentrazione di tensioni che determina il distacco di porzioni di pietra all'esterno con simmetria rispetto alla linea mediana della colonna.

Attraverso l'osservazione di queste lesioni è stato possibile comprendere meglio le direzioni di movimento della struttura.

In prossimità del lato nord c'è un movimento evidente verso la torre, mentre a sud questo movimento è meno accentuato a conferma dei rilievi dei fuori-piombo eseguiti all'esterno. L'osservazione della rottura delle volte e della distribuzione delle lesioni ha confermato ulteriormente gli abbassamenti verso nord mostrando però anche cedimenti lungo la zona sud dell'abside.



FIG.27- Immagine di rottura per compressione di recente formazione di colonna all'interno della Cripta.



FIG. 28- Lesione visibile lungo il lato settentrionale della cripta. La rottura attraversa tutte le volte a sinistra della chiave a testimonianza di un abbassamento del lato nord.



FIG. 29- Immagine del prospetto est del Duomo. Si nota come il sistema delle absidi sia più inclinato rispetto ai finti transetti realizzati epoca campionesse.



FIG. 30- Immagine di semicolonna in laterizio addossata al prospetto settentrionale interno. La muratura nei primi metri di sviluppo presenta i letti di posa inclinati verso l'esterno, segno di un iniziale cedimento corretto in prossimità del capitello

Il rilievo delle lesioni lungo le navate ha messo in evidenza il cedimento verso ovest e verso est confermando le misurazioni strumentali effettuate (fig.29).



FIG. 31- Lesioni visibili dalla zona presbiterale lato nord, situate negli archi e nella muratura della navata centrale. Le lesioni mostrano un cedimento verso est. Lo stesso sistema di lesioni si trova simmetricamente sul lato sud.



FIG. 32- Lesione visibile lungo il prospetto sud della navata centrale, in prossimità del prospetto principale, dovuta ad meccanismo di ribaltamento del fronte ovest.



FIG. 33- Lesione visibile lungo il prospetto nord della navata centrale, in prossimità del prospetto principale, dovuta ad meccanismo di ribaltamento del fronte ovest.



FIG. 34 Immagine della facciata del Duomo parzialmente coperta dai ponteggi

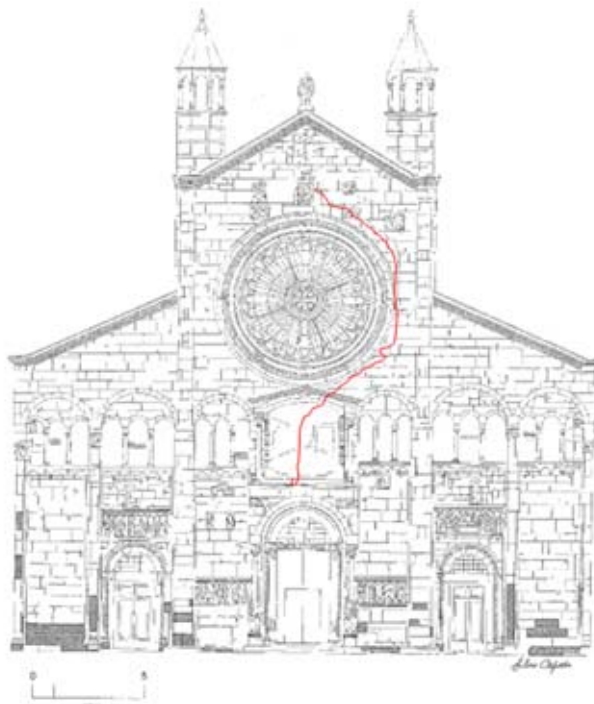


FIG. 35 Immagine della facciata del Duomo dove si indica un'alesione pressoché verticale mediana che attraversa tutta la facciata

PARTE TERZA

Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo



FIG. 36 Immagine della facciata del Duomo , particolare dove si vede la lesione pressoché verticale mediana che attraversa tutta la facciata

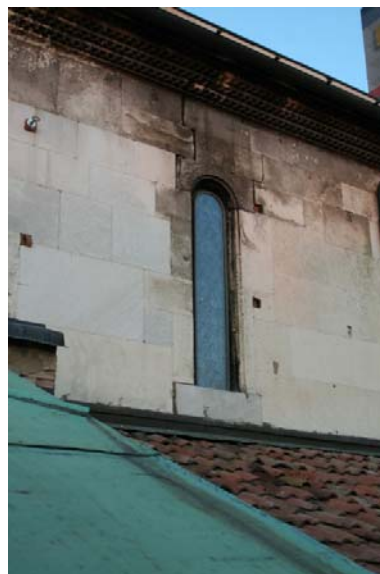


FIG. 37 Immagine del lato sud in prossimità della facciata. Lesione quasi verticale dovuta al meccanismo di ribaltamento del fronte ovest.



FIG. 38-Lesioni visibili sul lato sud interno della navata centrale (terza campata). Una più alta parte dalla finestra, la seconda più bassa dal finto matroneo. Queste lesioni mostrano un cedimento della zon costituita dalle prime tre camapate.



FIG. 39-Lesione visibile lungo il lato nord interno della navata centrale all'altezza della terza campata. Il sistema di lesioni inizia a partire dalla finestra per scendere in corrispondenza del finto matroneo e dell'arco sottostante.

Infine particolare attenzione è stata posta alle lesione dovute all'interazione duomo – edifici limitrofi concentrate in zona presbiterale. Di queste si è vista la rottura fuori piano dovuta alla spinta degli archi della torre e del passaggio della canonica.

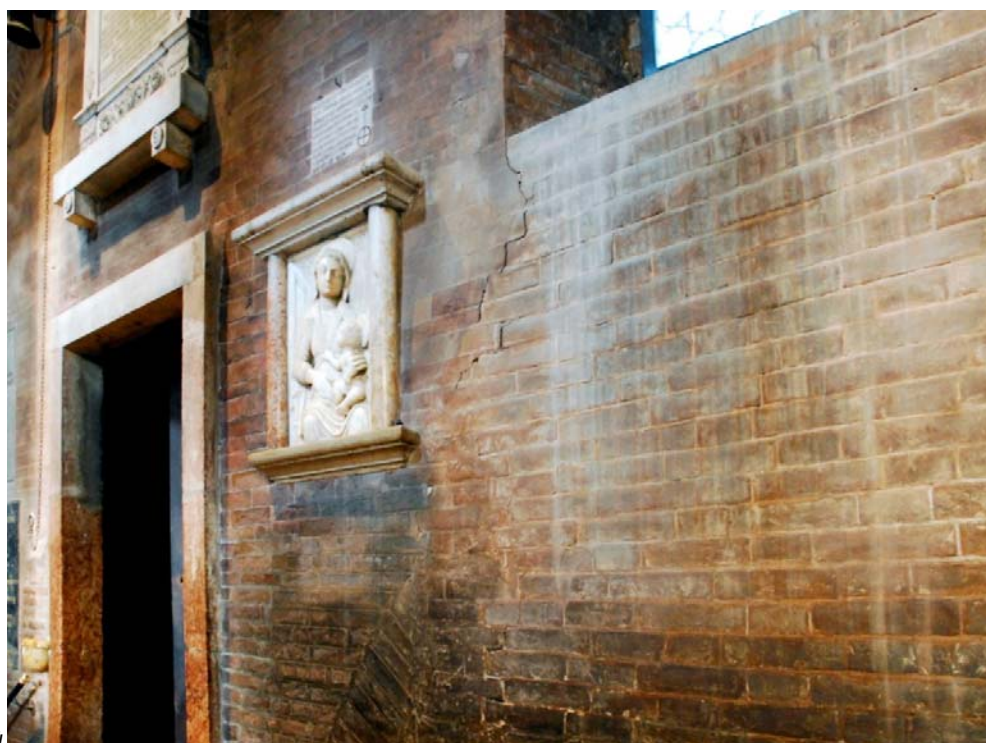


FIG. 40-Lesione visibile dalla zona presbiterale situata lungo il lato settentrionale dovuta all'azione combinata di spinta della torre, delle canoniche e di cedimento della parte absidale.

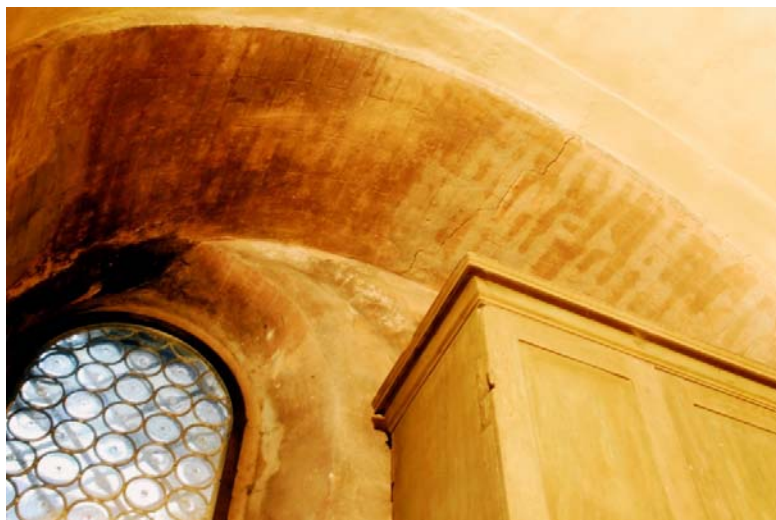


FIG. 41- Lesione visibile dalla cripta situata lungo il lato settentrionale dovuta all'azione combinata di spinta della torre delle canoniche e di cedimento della parte absidale.

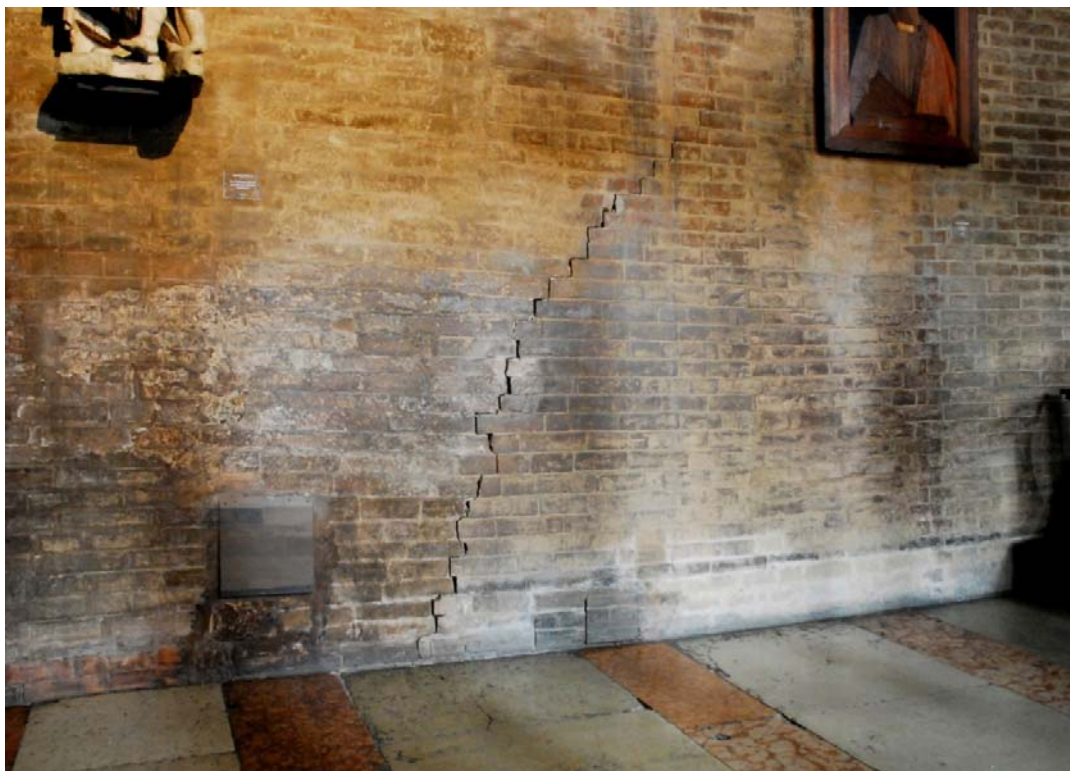


FIG. 42 Lesione visibile dalla zona presbiterale situata lungo il lato settentrionale dovuta all'azione combinata di spinta della torre e di cedimento della parte absidale.



FIG. 43- Lesione visibile dalla navata settentrionale in prossimità dell'ingresso della cripta dovuta d un cedimento del lato nord.

Le ultime importanti lesioni individuate sono in prossimità della porta della Pescheria sul lato nord dove l'architrave risulta spezzato, in corrispondenza del lato sud nel paramento murario alto dove è presente una lesione che motiva una possibile tendenza a ribaltamento della facciata, e una lesione centrale in facciata.



FIG. 44- Immagine che riprende la Porta della Pescheria lungo il lato settentrionale del Duomo. Si nota la netta inclinazione verso est causata dai cedimenti in atto di Torre e Duomo.



FIG. 45 Ingrandimento dell'architrave della Porta della Pescheria. Si nota la rottura dovuta ai fenomeni di cedimento in atto del Duomo

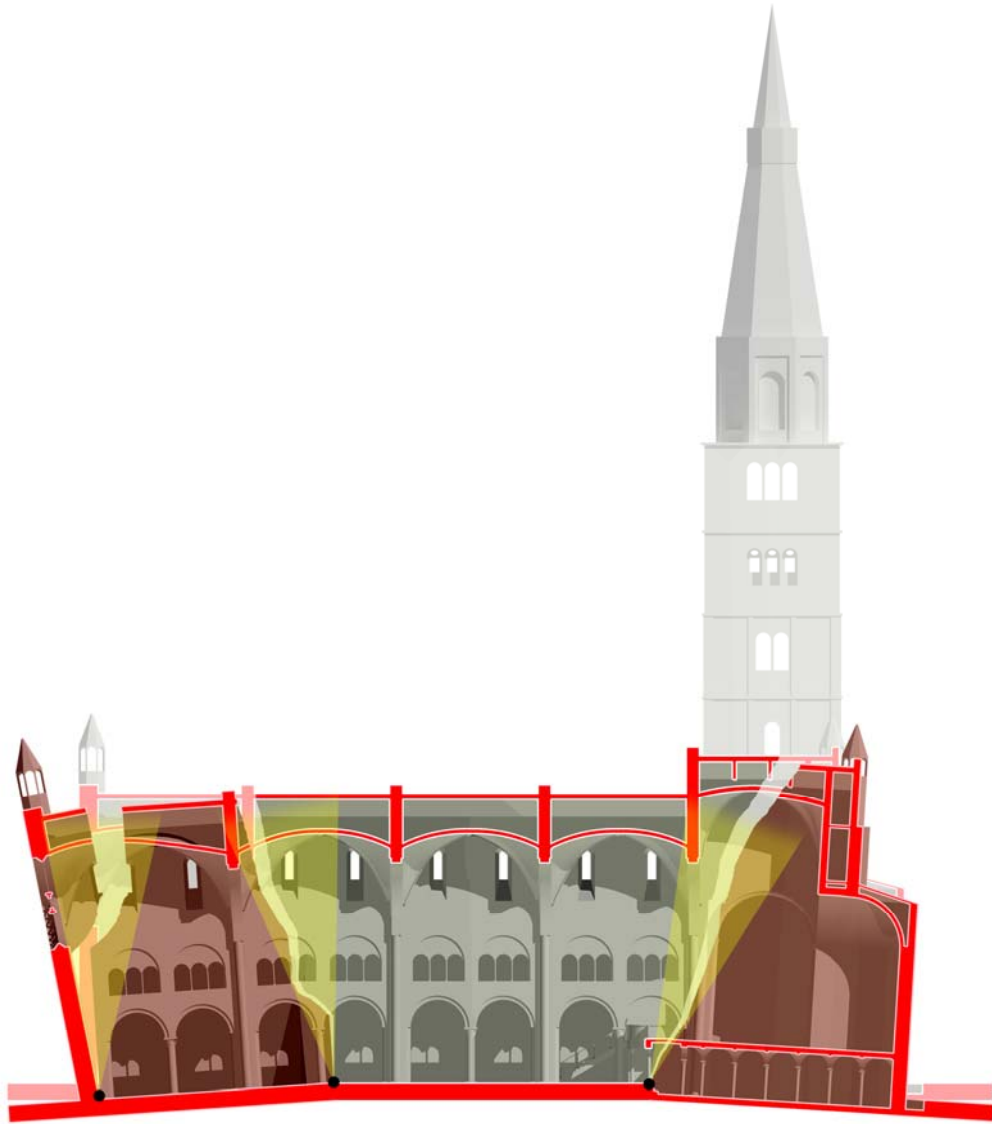


FIG. 46-Interpretazione dei meccanismi di collasso del Duomo

PARTE TERZA

Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

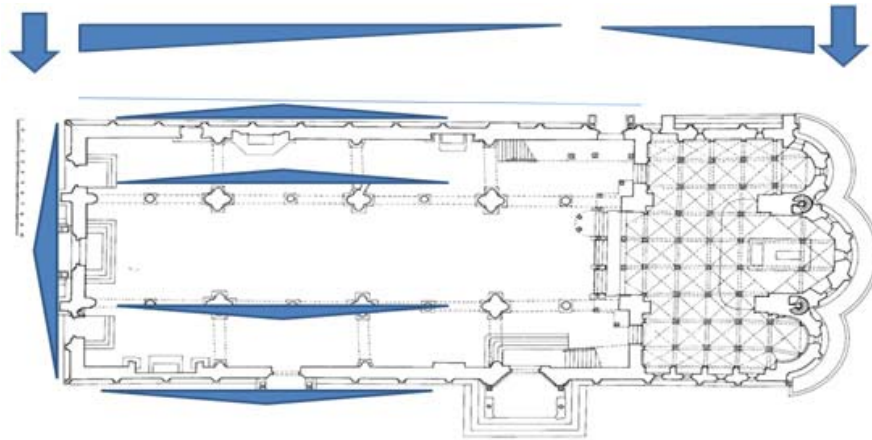


FIG. 47-Interpretazione dei meccanismi di collasso, gli abbassamenti della zona absidal, della zona della facciata e le deformazioni longitudinali dovute ai meccanismi di ribaltamento.

3 L'analisi dello stato fessurativo della Torre

Diversi sono gli esempi di crolli improvvisi e inaspettati che hanno posto l'attenzione dell'opinione pubblica nazionale sulla necessità di monitorare costantemente gli edifici monumentali.

Alcuni esempi eccellenti di crolli come quello del Campanile di Venezia del 1902 e quello della Torre civica di Pavia o la Cattedrale di Noto nel 1989, hanno posto l'accento sulla necessità di garantire la sicurezza delle strutture monumentali.

Dopo i crolli di Pavia e Noto la ricerca scientifica inizia un percorso mirato all'individuazione delle cause dei crolli e alla possibilità di prevenirli.

Una metodologia individuata dai ricercatori che si sono occupati di Noto e Pavia, per prevenire eventuali collassi, è stata l'analisi dello stato fessurativo. Infatti conoscendo le cause che determinano certi tipi di lesioni si riesce a capire quali possano essere i fenomeni di collasso in atto nelle murature.

Il crollo parziale di Noto, ha consentito, tra le altre cose, di comprendere, tramite l'analisi delle parti di muratura ancora integre, quale fosse lo stato fessurativo delle strutture antecedente al crollo.

Le lesioni rilevate erano verticali, parallele e strette, determinate dalla perdita di resistenza a compressione del materiale.

Essendo le murature del tipo multistrato con riempimento sacco, per effetto di un fenomeno di traslazione delle tensioni, dal nucleo interno (meno resistente) le tensioni di compressione nel tempo si sono spostate nei paramenti esterni (più rigidi).

Nel tempo le capacità di resistenza a compressione della muratura sono diminuite, manifestando inizialmente lesioni superficiali verticali e parallele e successivamente crollando.

La conoscenza delle tecnologie costruttive antiche, delle proprietà dei materiali, delle forme strutturali e del loro comportamento, se sollecitate da certi tipi di carichi, consente di interpretare i quadri fessurativi delle strutture, permettendo di individuarne le cause.

L'indispensabile lettura dei quadri fessurativi, è comunque da correlare ad altre informazioni provenienti dalla lettura dei sistemi di monitoraggio applicati alle strutture e dalla conoscenza degli eventi eccezionali naturali e antropici a cui sono state sottoposte le strutture nella storia.

Per questo l'analisi del quadro fessurativo della Torre Ghirlandina non può prescindere dalla conoscenza della tecnologia costruttiva con cui è stata concepita, e dai fenomeni di collasso in atto e passati che l'anno coinvolta.

Le patologie riscontrabili in una struttura snella, come di un campanile in muratura, possono ricondursi a due cause fondamentali: quella di instabilità locale del tessuto murario, e quella dell'instabilità globale dell'intera struttura. I fenomeni di instabilità globale sono riconducibili alla forma geometrica che induce uno stato tensionale molto elevato nel terreno, causandone la plasticizzazione ed eventuali cedimenti non uniformi.

Una volta innescato un cedimento fondale, spesso non omogeneo, possono generarsi delle rotazioni rigide dell'asse di simmetria verticale causa di un decentramento del carico, immaginato baricentrico, rispetto al centro delle fondazioni.

Come nel caso della Torre Pavia. Le instabilità locali dipendono fondamentalmente da fenomeni legati alla diminuzione di resistenza della muratura sottoposta a sollecitazioni statiche nel lungo periodo (fenomeni di creep), e fenomeni di rottura locale dovuti all'esposizione degli agenti atmosferici.

Oltre a queste patologie proprie delle strutture snelle, l'analisi dei problemi deve comprendere le patologie dovute a fenomeni accidentali come la caduta di fulmini, sismi e vento. Nel caso di folgorazione si possono determinare due effetti sulle murature: aumenti di temperatura nell'acqua infiltrata nella muratura tali da determinare delle vere e proprie esplosioni e spostamenti d'aria tali da muovere pietre di diversi chili, mentre i sismi e il vento inducono sollecitazioni orizzontali in strutture di natura più propense per resistere a carichi verticali.

I primi dati che ricordano uno stato fessurativo importante e diffuso sono quelli relativi alla descrizione dei lavori di restauro avvenuti successivamente al terremoto del 1501, in cui il canonico Dondi riportò : *Il terremoto del 1501 apportò non pochi guasti nelle rose delle finestre, e negli ornati collocati sopra il quadrato e la parte maggiore dell'ottagono soprastante. Le finestre dovettero fortificarsi con catene di ferro, e le opere di riparazione continuarono durante gli anni 1502, 1503, e 1504* . Il sisma del 1501 creò diversi danni anche alla Cattedrale. Successivamente le notizie più recenti arrivano dai rapporti dei lavori ottocenteschi avvenuti sia nella parte piramidale che in quella quadrata. Dalla Relazione sui *restauri della Torre Ghirlandina eseguiti nell'anno 1890*, i rapporti dei lavori di denunciavano lesioni diffuse nel paramento murario interno, in particolare nella cella campanaria e nella stanza dei torresani (quinto e sesto piano) tali da dover prevedere l'uso di cerchiature e incatenamenti lungo il perimetro. *“Aperte poi tutte le fenditure e levati i mattoni spezzati si sono fatte le ricostruzioni con ogni cura d'arte e così dicasi nei volti delle scale e dei finestrone e dei prospetti. E siccome di questa parte della Torre la murazione interna è tutta in mattoni romani a faccia a vista, così nei restauri si è scrupolosamente usato lo stesso materiale, o*

*congenere, limitando al puramente necessario le parti nuove”*⁴. Il lato più danneggiato sembra fosse quello settentrionale che aveva ampie fenditure verticali. Altre lesioni sono state trovate nei parapetti delle scale a causa di abbassamenti degli archi che le sostengono. Durante i lavori della parte piramidale inoltre si trovarono anche una serie di cinque cerchiature poste nell'incamiciatura dei paramenti murari collegate tra loro da catene; introdotte probabilmente nella campagna di restauri avvenuta tra il 1574-87. Più recentemente i lavori di restauro si sono concentrati solo sul paramento esterno e sono avvenuti negli anni '70, dove tra gli altri interventi vennero sostituite lastre di pietra ammalorate.

Le ultime osservazioni sullo stato delle lesioni sono iniziate nel 2006 per le murature interne e sono poi proseguite nel 2008 sui prospetti esterni grazie alla presenza dei ponteggi montati in occasione dei futuri lavori di restauro. Concentrando l'attenzione su patologie di tipo strutturale trascurando quelle legate a fenomeni di degrado delle superfici, i rilievi hanno evidenziato sia lesioni antiche, riconoscibili dalla presenza di depositi superficiali, sia lesioni più recenti stuccate e poi riaperte.

All'interno della Torre la muratura in mattoni appare compatta e di buona fattura, senza presentare un quadro fessurativo allarmante. Le lesioni rilevate, per lo più verticali (come nell'800), sono presenti soprattutto tra i 30 e i 50 m di quota. Queste rotture sono riconducibili ad antichi traumi o fenomeni locali come la spinta degli archi rampanti delle scale accentuata dalle azioni dinamiche del vento e dei sismi transitati nel territorio modenese. Il rilievo ha messo in evidenza però una distribuzione disomogenea a seconda dell'orientamento delle pareti.

La muratura più lesionata è a sud (fig. 48 e 57). Anche ad ovest e ad est sono presenti delle lesioni di tipo verticali ma meno estese di quelle a sud. Sebbene la parete meno lesionata sembra quella a nord dove le fessure si limitano alla stanza dei torresani, è noto dai documenti storici sopracitati che prima del restauro del 1890 risultava decisamente deteriorata.

Analizzando piano per piano ad esclusione della parte ottagonale e piramidale, si possono trovare le prime lesioni nella zona cella campanaria. La presenza del castello che sorregge le campane non ha permesso di individuare forse tutte le fessure, comunque si sono evidenziate lesioni di un certo rilievo nel vano scale. Queste probabilmente dovute a un sistema di catene con capo-chiave non fissati all'interno della muratura dei pilastri.; Allo stesso piano uno dei quattro pilastri, aggiunti per sostenere la struttura ottagonale, è stato cerchiato. Scendendo nella torre a livello della stanza che ospitava i torresani si trovano tre lesioni

⁴ ASCMo, filza n.179

verticali sul lato est di cui una centrale pressoché verticale e due simmetriche di lato con andamento convergente verso l'alto.

Sul lato nord si trovano una lesione verticale sulla finestra di sinistra e una lungo il muro che chiude il vano scala.

Ad ovest le lesioni sono vicino allo spigolo di nord ovest e a sud sopra ad una finestra. Inoltre due lesioni sono presenti vicino al lato sud in un architrave.

A sud sono presenti tre lesioni verticali ed una colonna lesionata e successivamente cerchiata. Delle tre lesioni quella centrale prosegue anche nei piani inferiori fino ad una quota di 30 m, sempre alla medesima quota sono state riscontrate lesioni verticali centrate rispetto al prospetto interno (fig.48).

Nel complesso all'interno, le lesioni che si trovano in corrispondenza dei pilastri cavi nella stanza dei torresani sono legate sono dovute ai consolidamenti del piano superiori avvenuti per mezzo di riempimento, mentre le lesioni nel vano scala nella cella campanaria sono di certo legate alla presenza dei capo-chiave delle catene e al fatto che questo dei quattro pilastri, a causa della presenza della scala è stato l'unico a non essere consolidato nel '500.

PARTE TERZA

Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

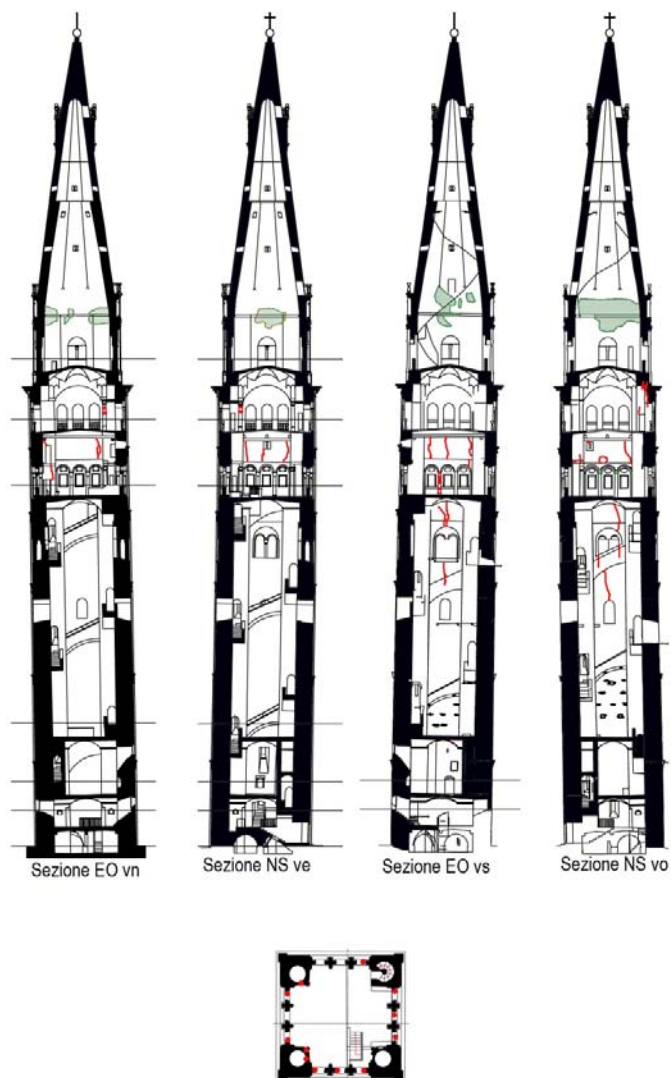


FIG. 48-Rilievo lesioni interne prospetti nord,est,sud,ovest

L'esamina dei prospetti esterni caratterizzati da un paramento lapideo ha messo in evidenza due tipi rotture: la prima dovuta a fenomeni sismici, che descrive alcuni meccanismi di collasso (fig.50, 51), la seconda dovuta all'azione combinata di eventi atmosferici, tipologia del materiale e concentrazioni di tensioni (fig.49).

Inoltre tra la seconda e la quinta cornice, sono state rilevate in corrispondenza degli angoli del paramento murario rotture a compressione con espulsioni di materiale caratterizzati dalla classica forma a clessidra. Alcune lesioni più antiche già restaurate (fig. 52), altre di formazione recente. Inoltre sono stati trovati antichi distacchi nei basamenti delle colonne addossate alle finestre.

La natura di queste rotture, in particolare quelle locali dovute a concentrazioni di tensioni di compressione sono riconducibili al fenomeno di traslazione delle tensioni dalla muratura al paramento esterno, dove i letti di malta più sottili rendono la muratura lapidea più rigida rispetto a quella interna in laterizio.

Le lesioni esterne che indicano alcuni movimenti della struttura, probabilmente dovute all'azione combinata della spinta della zona piramidale e delle azioni sismiche, sono state confrontate con quelle dei paramenti interni per comprendere meglio il comportamento complessivo della Torre.

Il confronto tra il rilievo interno (fig. 48) ed esterno (fig. 55,..., 58) ha consentito di comprendere quali delle lesioni fossero ricollegabili a fessurazioni interne, quali invece meno profonde interessano solo il paramento esterno.

La lettura si è svolta per osservazione diretta individuando le direzioni di propagazione e i sensi di apertura delle fessure. Inoltre sono state fotografate tutte le lesioni e di queste si è cercato di capirne età e cause di formazione.

Partendo dal piano della cella campanaria a scendere sono state rilevate tutte le lesioni trasferite su supporto informatico. Una volta ricostruito il quadro fessurativo nel suo complesso, è stato possibile dare un'interpretazione dei possibili cinatismi.

L'osservazioni delle murature, lungo il perimetro, all'interno della cella campanaria, non ha messo alla luce importanti lesioni.

All'esterno del piano delle campane, nel prospetto nord sono presenti due lesioni simmetriche rispetto all'asse della facciata, prossime agli spigoli, dovute a fenomeni di schiacciamento.

Scendendo nella stanza dei torresani, i prospetti interni ed esterni presentano molteplici lesioni. Il lato sud ha tre lesioni verticali di cui quella più vicina al fronte trova un riscontro anche verso l'esterno.

Questa lesione continua anche nei piani inferiori spostandosi orizzontalmente da ovest ad est verso il centro del prospetto sud e verticalmente fino al secondo piano.

Altre corrispondenze tra lesioni interne ed esterne si trovano lungo la parete Ovest, dove internamente, a partire dalla cella campanaria a scendere, sono presenti rotture che dallo spigolo sud tendono a centrarsi rispetto al prospetto, ed esternamente seguono un andamento del tutto simile.

Il lato est presenta tre lesioni a livello della stanza dei torresani che trovano riscontro anche all'esterno, orizzontalmente hanno un andamento convergente verso il centro della facciata e verticalmente si estendono fino al quarto piano.



FIG. 49-Lesioni dovute all'azione combinata di gelo - disgelo e alla compressione delle pietre.



FIG. 50-Lesioni dovute a movimenti della struttura



FIG. 51 Lesioni stuccate e riaperte dovute a movimenti della struttura.



FIG.52 Lesione a clessidra con distacco antico. Si notano le incrostazioni sulla superficie della pietra dove è avvenuto il distacco



FIG. 53-Lesione a clessidra con distacco antico stuccato e riaperto.



FIG. 54-Distacco alla base di una semicolonna addossata al paramento lapideo.

Il confronto tra il rilievo interno (fig. 48) ed esterno (fig. 55,..., 58) ha consentito di comprendere quali delle lesioni legate a probabili meccanismi di collasso fossero passanti o comunque collegate a fessurazioni interne, dando la possibilità di interpretare eventuali meccanismi attivi. La lettura si è svolta per osservazione diretta individuando le direzioni di propagazione e i sensi di apertura delle fessure. Inoltre sono state fotografate tutte le lesioni e di queste si è cercato di capirne età e cause di formazione. Partendo dal piano della cella campanaria a scendere sono stati analizzati tutti i piani e reso graficamente su supporto informatico. Una volta ricostruito il quadro complessivo, è stato possibile dare un'interpretazione dei meccanismi attivi.

L'osservazione delle murature, lungo il perimetro, all'interno della cella campanaria, non ha messo alla luce importanti lesioni.

All'esterno del piano delle campane, nel prospetto nord sono presenti due lesioni simmetriche rispetto all'asse della facciata, prossime agli spigoli, dovute a fenomeni di schiacciamento.

Scendendo nella stanza dei torresani, i prospetti interni ed esterni presentano molteplici lesioni. Il lato sud ha tre lesioni verticali di cui quella più vicina al fronte trova un riscontro anche verso l'esterno.

Questa lesione continua anche nei piani inferiori spostandosi orizzontalmente da ovest ad est verso il centro del prospetto sud e verticalmente fino al secondo piano.

Altre corrispondenze tra lesioni interne ed esterne si trovano lungo la parete Ovest, dove internamente, a partire dalla cella campanaria a scendere, sono presenti lesioni che dallo spigolo sud tendono a centrarsi rispetto al prospetto, ed esternamente seguono un andamento del tutto simile. Il lato est presenta tre lesioni a livello della stanza dei torresani che trovano riscontro anche all'esterno, orizzontalmente hanno un andamento convergente verso il centro della facciata e verticalmente si estendono fino al quarto piano.

L'interpretazione possibile del quadro fessurativo è che ci sia una tendenza alla rottura lungo i piani sud-nord e ovest est. Il meccanismo di collasso appare più evidente nello spigolo sud-ovest incrementato a causa dalla pendenza; mentre risulta meno accentuato sui prospetti nord ed est.

PARTE TERZA

Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

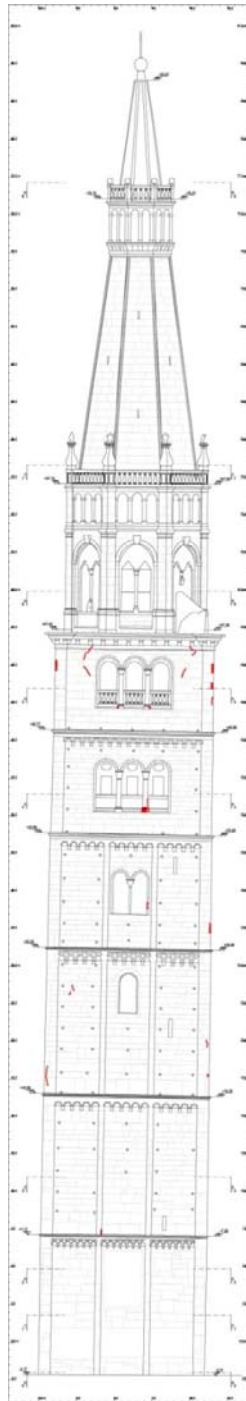


FIG.55 Lesioni prospetto nord

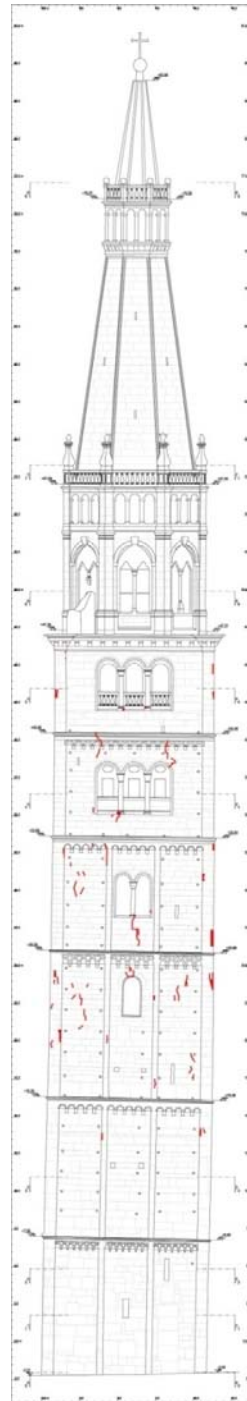


FIG.56 Lesioni prospetto ovest

PARTE TERZA

Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

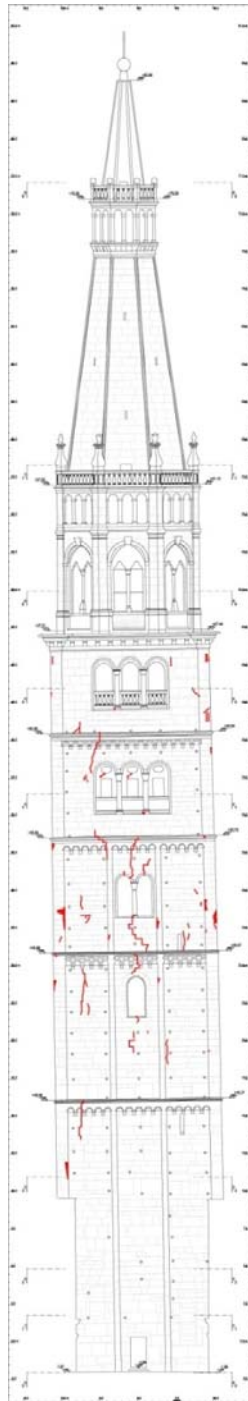


FIG.57 Lesioni prospetto sud

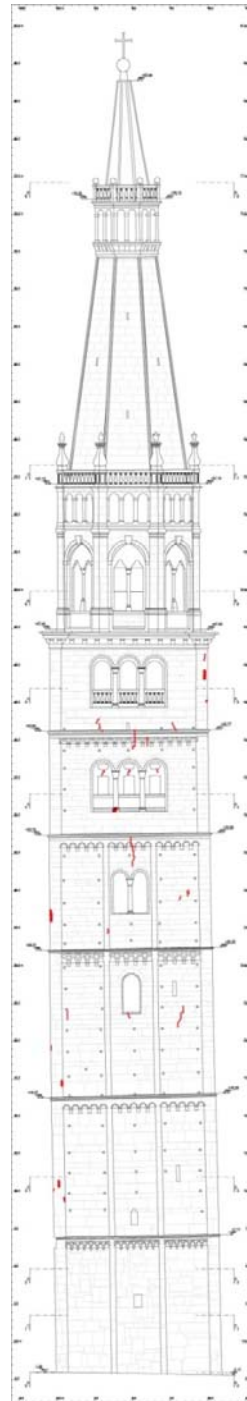


FIG.58 Lesioni prospettoest

PARTE TERZA

Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

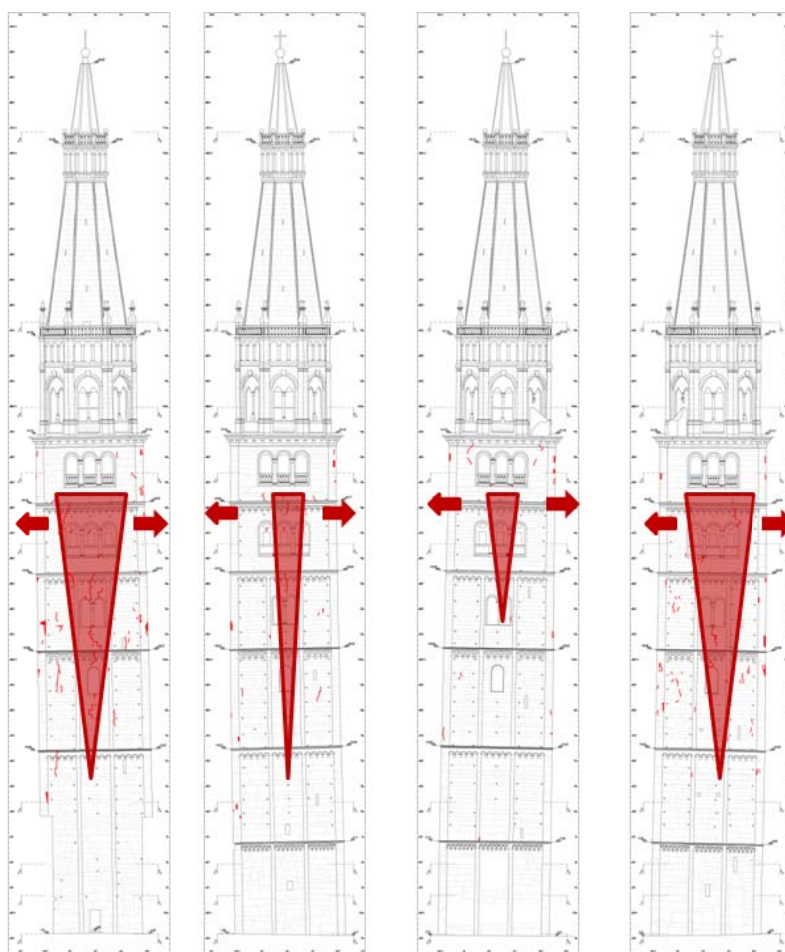


FIG. 59 Schema generale dei meccanismi di collasso

4 L'ipotesi dei cedimenti e la modellazione agli elementi finiti

L'analisi dell'interazione terreno-struttura potrebbe apparire, a prima vista, un problema di non difficile soluzione, sia per la semplicità formale delle strutture sia per la natura dell'analisi stessa, ovvero quella di un corpo che si appoggia su un terreno.

In realtà, nonostante gli innovativi sistemi di calcolo, che sempre più tendono a simulare il comportamento delle strutture e gli algoritmi di sempre maggiore completezza che, nel caso del terreno, arrivano considerare l'effetto del tempo, il comportamento non lineare e le variazioni di rigidità durante la costruzione, le capacità di analisi sono fortemente limitate dalla conoscenza del reale comportamento sia del terreno di fondazione sia della struttura in elevazione⁵. Il progetto di un'opera di ingegneria è basato su un procedimento che sostituisce alla realtà fisica un modello semplificato retto da leggi che consentano l'analisi definitiva e quindi il progetto. Il passaggio dalla realtà fisica al modello passa inevitabilmente attraverso una mediazione di tipo empirico. Nel caso del terreno e delle strutture monumentali, la componente empirica gioca un ruolo rilevante. La procedura di lavoro deve, in questo tipo di studio, considerare le caratteristiche dei materiali, la sequenza effettiva di costruzione nello spazio e nel tempo, l'influenza degli elementi non portanti sulle fondazioni, la distribuzione del carico, le caratteristiche di interfaccia tra i diversi materiali. Le difficoltà che si incontrano risiedono nella misura dei parametri e nella scelta dei loro valori rappresentativi, nella casualità di alcuni fattori e nella valutazione dei danni e del loro significato⁶.

Lo studio del rapporto terreno-struttura negli edifici a torre diventa un'eccezione sia per come viene gestita la distribuzione dei carichi sul terreno, sia per la forma degli edifici stessi che spesso causa instabilità e conseguenti inclinazioni. Una struttura pesante su una fondazione di limitate dimensioni, ovvero con scarse capacità distributive del carico, è in modo intuibile più a rischio di cedimenti rispetto ad un edificio con uno sviluppo più ampio della superficie di fondazione.

Inoltre, la posizione relativamente alta del baricentro della struttura può determinare, unitamente al cedimento della fondazione, che in alcuni casi può non essere omogeneo, una rotazione della

⁵ Larnach, Wood 1974; Fraser, Wardle, 1976; Majid, Cunneil 1976; Chiarugi, Merli 1977

⁶ Carlo Viggiani, *Fondazioni*, ed. CUEN, Napoli, 1996

torre rispetto all'asse verticale. La rotazione porta a diverse conseguenze sia di tipo meccanico, sia di tipo tensionale. La prima è quella di generare a livello della fondazione un momento ribaltante dato dal disassamento tra il peso, pensato applicato nel baricentro, e il centro geometrico delle fondazioni, a cui il sistema fondazioni-terreno dovrà rispondere con un momento uguale e contrario detto stabilizzante; la seconda conseguenza, in caso la struttura non collassi, è una ridistribuzione delle tensioni che diventeranno particolarmente concentrate nelle zone sottopendenza. La ridistribuzione delle tensioni potrebbe creare situazioni di instabilità locale e conseguenti collassi per superamento della resistenza del materiale. Quindi lo studio in questi casi deve essere condotto sia sotto il punto di vista geotecnico sia sotto il punto di vista strutturale. Il comportamento del terreno dipende da molteplici aspetti quali il percorso tensionale a cui è stato sottoposto nei secoli, le capacità deformative e la variazione del contenuto di acqua.

Nel caso di studi su edifici esistenti il metodo che si deve seguire è inevitabilmente quello multidisciplinare, in modo da poter raccogliere, in modo critico, il maggior numero di informazioni possibile, sia dal punto di vista storico che dal punto di storico-tensionale.

Torre della Ghirlandina e Duomo, per vicinanza e per il carico trasmesso al terreno di fondazione esercitano indubbiamente una mutua influenza sui cedimenti complessivi che non può essere esclusa dall'analisi del problema suolostruttura. Per questo, volendo riprendere gli studi sul fenomeno degli abbassamenti della Torre Ghirlandina, si è deciso di includere il Duomo nell'analisi. Le informazioni raccolte, che derivano dall'analisi dei documenti descritti nei paragrafi precedenti, hanno permesso di comprendere la forma e le specificità delle fondazioni, in particolare, riferendosi al caso della Torre, è stato possibile vedere come gli studi di inizi '900 e quelli più recenti del 2007 abbiano consentito sia di valutare lo sprofondamento della Torre sia di verificare l'assenza di strutture di sottofondazione.

I lavori di inizi '900 condotti da Canevazzi ed esposti nei capitoli precedenti, hanno inoltre sottolineato come il progressivo innalzamento della Torre degli ultimi piani avesse potuto influire in modo negativo sullo sprofondamento progressivo della struttura. In particolare la combinazione dell'aumento di carico e la progressiva inclinazione osservate dallo stesso Canevazzi portarono ad una stima delle tensioni nel terreno variabili tra 6.37 Kg/cm^2 e 11.37

Kg/cm^2 “*tali che se per un motivo qualsiasi dovessero cambiare le condizioni del terreno stesso, sarebbe a temere seriamente delle condizioni di stabilità di quella torre*”⁷.

Il presente studio ha voluto solo aggiungere un tassello, attraverso un metodo differente rispetto a quello deduttivo legato all'analisi della stratigrafia determinata dalle indagini, alla complessa analisi che si sta conducendo sui monumenti, senza pretese di esaustività.

L'ipotesi di partenza è che l'interazione tra Torre e Duomo fosse iniziata già al momento della realizzazione delle fondazioni e che la Torre avesse seguito una sequenza costruttiva per stralci, secondo l'interpretazione dedotta dall'analisi delle pendenze e descritta nei capitoli precedenti.

Lo studio, che si è basato sulla raccolta dei dati realizzato da Cancelli nel 1985, relativo alle prove meccaniche eseguite durante la campagna di indagini nell'ambito della ricerca sulla subsidenza modenese⁸, si è svolto in fasi successive, vagliando forme diverse di cedimento: un primo cedimento di tipo elastico, legato alla compressibilità dello strato più superficiale del terreno di fondazione, che può essere considerato immediatamente successivo rispetto all'applicazione del carico; ed un secondo cedimento differito nel tempo, legato a processi di consolidazione degli strati compressibili sia superficiali che profondi. La sequenza operativa è riassumibile in una serie di passaggi analitici:

- Analisi dei carichi di Torre e Duomo
- Calcolo del modulo elastico E_u , in condizioni non drenate, basato su dati di letteratura e su dati sperimentali;
- Confronto tra E_u calcolato ed E_u ricavato dall'analisi numerica;
- Valutazione del cedimento elastico attraverso l'analisi numerica;
- Valutazione dei cedimenti di consolidazione nel tempo;
- Valutazione della possibilità di cedimento per rottura del terreno.

Analisi dei carichi

⁷ F. CAVANI, Pendenza, stabilità e movimento delle torri la Garisenda di Bologna e la Ghirlandina di Modena, Bologna, 1903

⁸ Vedi paragrafi precedenti

La valutazione dei pesi in gioco, senza pretese di esattezza ed esaustività, è iniziata con lo studio della geometria dei due monumenti. Nel caso della Torre il materiale a disposizione ha consentito eseguire una valutazione dei volumi in gioco, mentre nel caso del Duomo, il calcolo dei carichi in gioco è stato obbligatoriamente più approssimato a causa dell'assenza di materiale che consentisse con assoluta certezza la valutazione dei volumi. Oltre alla Torre e al Duomo sono stati stimati anche i contributi dovuti agli edifici addossati ora demoliti e quelli legati alle modifiche dell'abside settentrionale. In entrambi i casi, trattandosi di strutture demolite, sono state condotte valutazioni approssimative per analogie con strutture simili.

La valutazione analitica per parti strutturali dei carichi in gioco ha consentito, in fase di analisi, di assegnare alle strutture i carichi in modo separato, al fine di poter valutare gli effetti della loro sovrapposizione in modo separato.

Il peso della Torre è stato valutato pari a 8280 t, valore che si interpone tra quelli stimati da Canevazzi (1700 t-1900 t). Il peso del Duomo è stato stimato pari a 16.065 t; il peso della zona absidale, costruita e poi demolita, è stato valutato attorno a 55 t, mentre il carico delle canoniche è stato stimato considerando che sul lato sud appoggiavano una copertura e un solaio al primo piano (in tutto circa 100 Kg/m² per la copertura e 200 Kg/m² per il solaio).

Il passo successivo è stato quello di raccogliere le informazioni sui risultati delle indagini condotti in Piazza Grande da Cancelli negli anni '80 (fig.60).

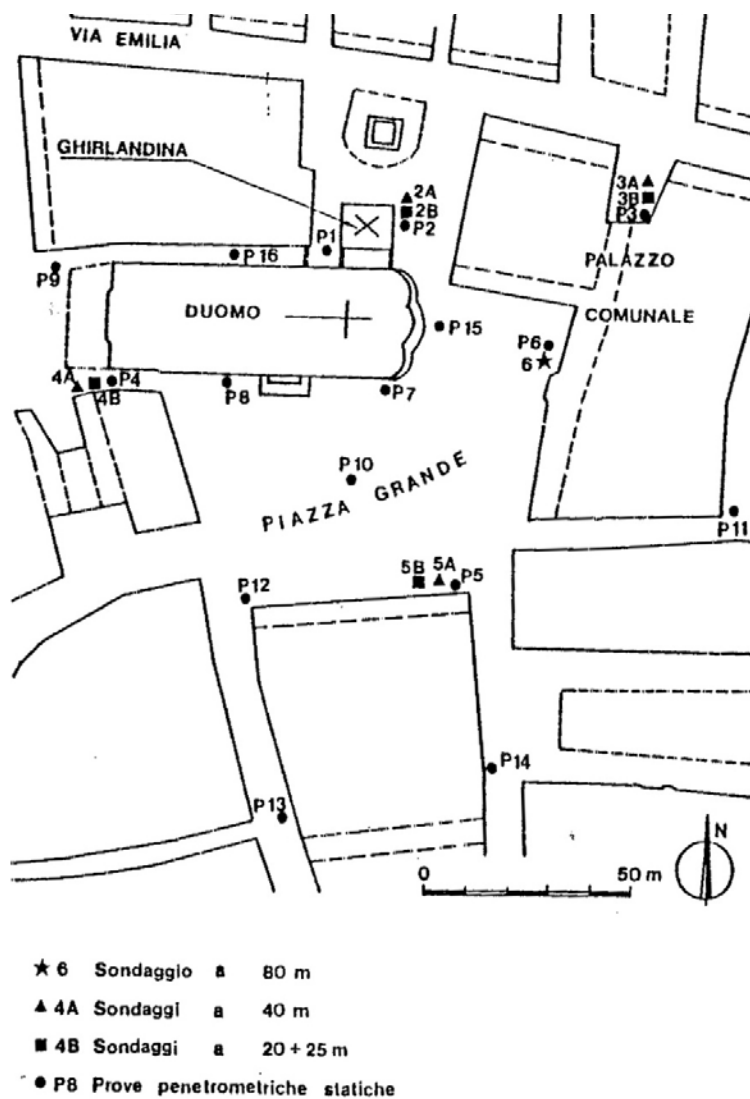


FIG.60-Posizione delle indagini condotte in Piazza Grande nel 1985(Cancelli, 1985)

Le analisi condotte, che rientravano nel più complesso studio sulla subsidenza nel centro storico di Modena, espone nei paragrafi precedenti, hanno fatto riferimento alle prove edometriche eseguite sui campioni del sondaggio 6, e alle valutazioni sull'andamento della falda determinate dalla strumentazione presente nella piazza (Fig.61).

0-2 m	Riporto
2-7 m	Argilla
7-12 m	Limo argilloso
12-16 m	Argilla
16-21 m	Argilla
21-33 m	Ghiaia e sabbia
33-40 m	Argilla
40-46 m	Argilla
46-51 m	Argilla
Oltre 51 m	Ghiaia e sabbia

TAB 1-Stratigrafia emersa dal sondaggio 6

strato			grado di consolidazione	OCR	Rr	Rc	γ_{sat} KN/m ³	γ' KN/m ³
1	0-2 m	riporto						
2	2-7 m	argilla	OC	3	0.06	0.2		
3	07-12 m	limi argillosi	OC	2	0.06	0.2	19	9
4	12-16 m	Argille	NC	1		0.2	19	9
5	16-21 m	Ghiaie+ sabbie	NC	1		0.2	20	10
6	33-40 m	Argille	NC	1		0.22	21	11
7	40-46 m	Argille	NC	1		0.2	21	11
8	46-51 m	Argille	OC	1.6	0.06		21	11
9	Oltre 51 m	Ghiaie e sabbie						

TAB 2-Riassunto dei risultati ottenuti dai campioni estratti nel sondaggio 6

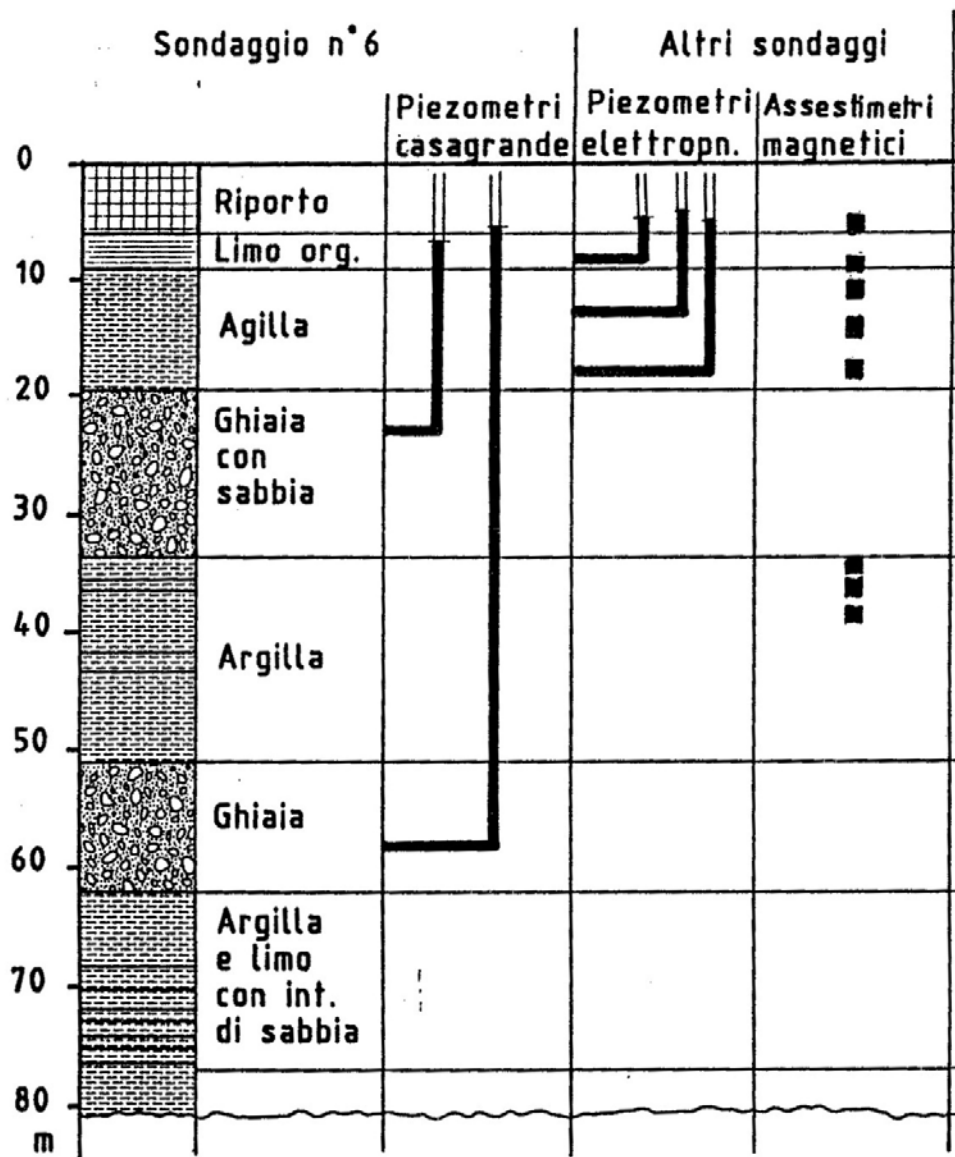


FIG.61-Schema della disposizione della strumentazione necessaria alla misura del livello di falda nel sottosuolo di Piazza Grande (Cancelli, 1986)

La falda è stata posta ad un livello medio di circa 7 m di profondità rispetto al p.c.. I risultati delle prove meccaniche condotte da Cancelli (1986) hanno consentito di stimare, per lo strato di argilla più superficiale, un angolo di resistenza al taglio pari a 23° (fig.62). Inoltre sono stati individuati i limiti di Atterberg⁹, le composizioni granulometriche ed i pesi per unità di volume relativi a campioni di terreno prelevati a varie profondità (fig.63).

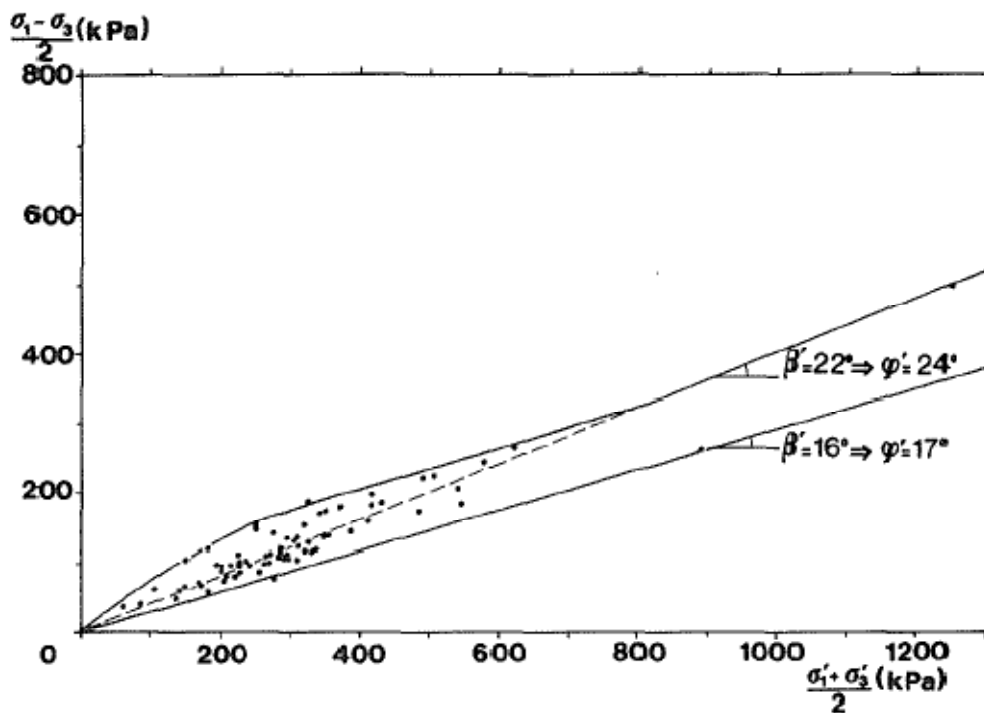


FIG-62 Intervallo di sforzi effettivi ottenuto dalle prove triassiali, Cancelli 1986

⁹ A. Cancelli, Geotechnical properties of modena subsoil: a preliminary report, in atti del congresso Land Subsidence, Proceedings of the 3rd International Symposium and Land Subsidence held at Venice, Marzo 1984, a cura di A.I. Johnson, Laura Carbognin e LUbertini, International Association of Hydrological Sciences (IAHS), 1986

PARTE TERZA

Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

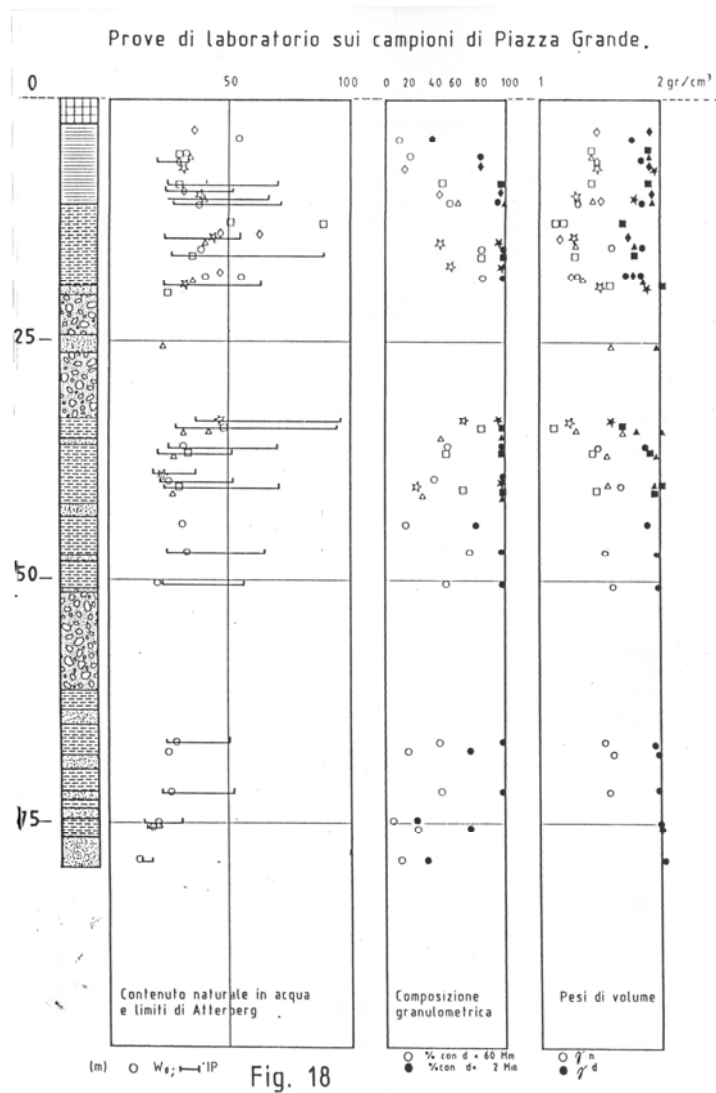


FIG-63 Contenuto in acqua e limiti di Atterberg, Composizione granulometrica, Pesi per unità di volume. (Cancelli 1986)

In fase preliminare è stato determinato un valore di E_u sulla base delle informazioni raccolte e attraverso l'applicazione di correlazioni empiriche presenti in letteratura.

Per la determinazione della coesione non drenata C_u relativa allo strato argilloso più superficiale, è stata considerata la tensione totale valutata in un punto rappresentativo dello strato stesso e quindi la correlazione empirica indicata da Lancellotta¹⁰:

$$\sigma_{v0}(10\text{ m}) = 18 * 7 + 19 * 1 = 145\text{ KPa}$$

$$C_u = 0,22 * \sigma_{v0} * OCR^{0,8} = 0,22 * 145 * 2^{0,8} = 55\text{ kPa}$$

Per la determinazione del modulo elastico E_u è stata utilizzata la correlazione empirica riportata in (fig. 64).

OCR	E_u/C_u		
	$I_p < 0,3$	$0,3 < I_p < 0,5$	$I_p > 0,5$
< 3	800	400	200
$3 \div 5$	500	300	150
> 5	300	200	100

FIG. 64-Valori di E_u su C_u , Viggiani.(1996)

$$\frac{E_u}{C_u} = 150 \text{ (fig 5)}$$

$$E_u = 150 * 55\text{ KPa} = 8250\text{ KPa} = 8\text{ MPa (condizioni non drenate)}$$

Il valore del modulo
La necessità di realizzare una modellazione numerica è nata dalla volontà di riprodurre l'evoluzione del cedimento della Torre nelle varie fasi costruttive e di indagare sulle possibili cause della sua inclinazione, cercando di comprendere in particolare i meccanismi di interazione tra Torre e Duomo.

La modellazione realizzata vuole essere solo un primo passo per la comprensione del sistema delle strutture di Piazza Grande senza pretese di esaustività, in quanto le indagini compiute e i

¹⁰ geotecnica

dati disponibili non sono sufficienti per simulare in modo coerente il reale comportamento delle strutture e del terreno.

Il metodo di simulazione definito come “*equivalent material approach*” utilizza al meglio la procedura ad elementi finiti. Con questo metodo si considera il materiale omogeneo senza descrivere la posizione di ogni singolo mattone, ma considerando il muro e il terreno come un continuo rappresentato da una mesh, ovvero un insieme di elementi tridimensionali che, oltre a ricostruirne la geometria, consentono di analizzare il comportamento delle strutture sottoposte a sollecitazioni, sulla base dei legami costitutivi tipici dei materiali modellati.

Il singolo elemento tridimensionale fornisce dati che sono in realtà il frutto di una media dei comportamenti degli elementi che costituiscono le strutture. La soluzione quindi sarà tanto più precisa quanto migliore sarà la descrizione del comportamento dell'insieme. Questo metodo, pur non considerando le reali proprietà fisiche della struttura, può fornire risultati che qualitativamente simulano in modo corretto il comportamento generale, ma che diventano imprecisi se si volesse determinare il comportamento del singolo concio.

Il primo passo è stato quello di definire un modello geometrico semplificato del terreno di fondazione della Torre e del Duomo (fig. 65,...,70), inserendo in modo separato i dati relativi ad ogni singolo strato in un codice di calcolo agli elementi finiti (Abaqus). Una volta importate le geometrie è stato possibile implementare i dati relativi alle caratteristiche dei terreni e delle murature. Per tutti gli strati di terreno è stato assunto un modello costitutivo lineare elastico, pur nella consapevolezza dei limiti di tale ipotesi, soprattutto considerando la tipologia di problema che si intendeva modellare. I parametri meccanici delle costruzioni, influenti in questo tipo di analisi, sono stati presi da letteratura, mentre l'assenza di prove sui terreni che potessero fornire i dati sperimentali del terreno (moduli di resistenza) ha costretto a procedere per via parametrica. Conoscendo lo stato di deformazione attuale delle fabbriche (cedimento e inclinazione), sono stati fatti variare i parametri meccanici del terreno fino all'ottenimento dello stato modificato attuale. In particolare i moduli di resistenza su cui si è agito sono quelli delle ghiaie e delle argille.

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

PARTE TERZA
Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

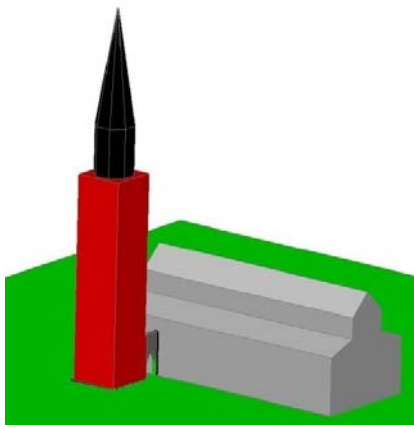


FIG.65

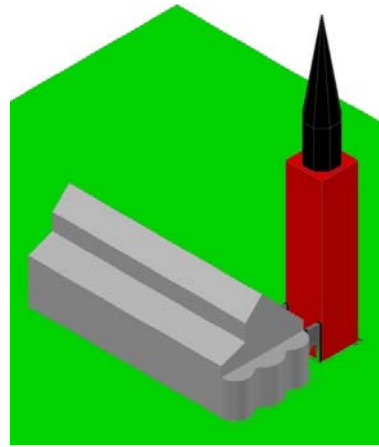


FIG.66

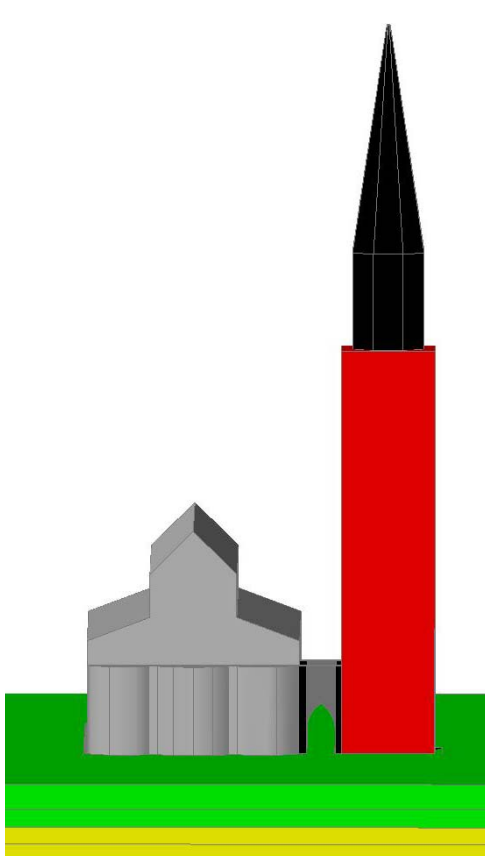


FIG.67

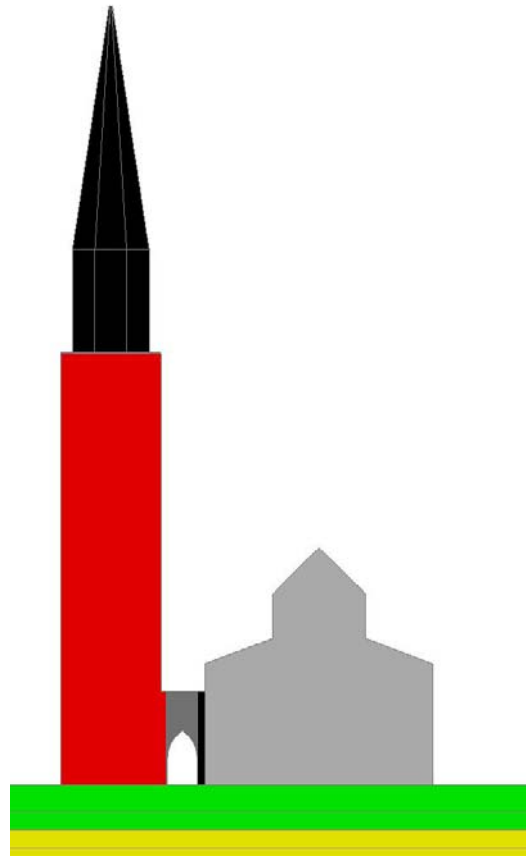


FIG.68

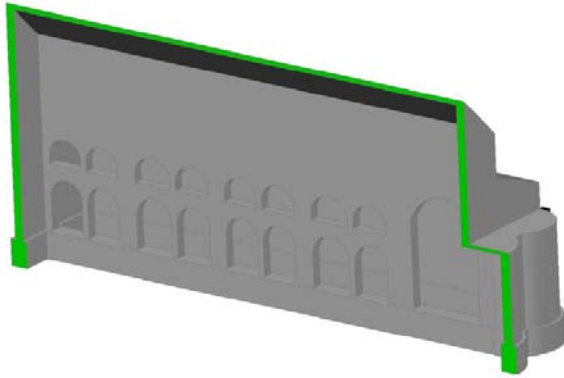


FIG. 69



FIG. 70

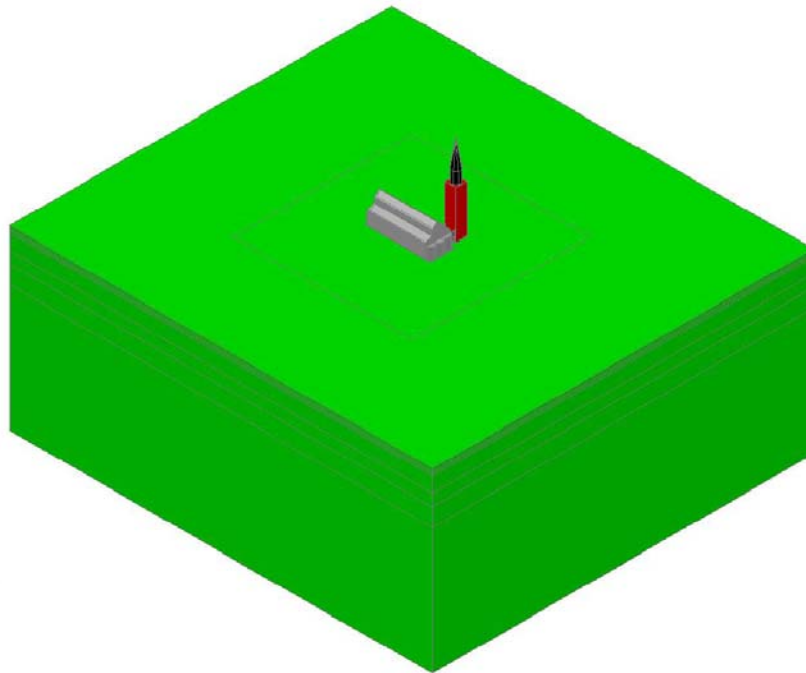


FIG. 71-Disegno 3D del terreno suddiviso nelle varie stratigrafie del terreno

Dal momento che erano noti i cedimenti della fabbrica del Duomo (circa 0.40 m) nella zona absidale, è stata eseguita un'analisi parametrica sul modulo elastico del terreno di fondazione superficiale in modo tale da ottenere un cedimento paragonabile a quello medio.

Il modello estremamente semplificato (fig.72,73) ha considerato come carichi imposti solo quelli dovuti al Duomo. Per raggiungere un cedimento di circa 0.4 m si è utilizzato un modulo elastico E_u pari a 7 MPa, un valore paragonabile a quello già determinato (fig. 74-75). considerando i dati sperimentali sopra esposti.

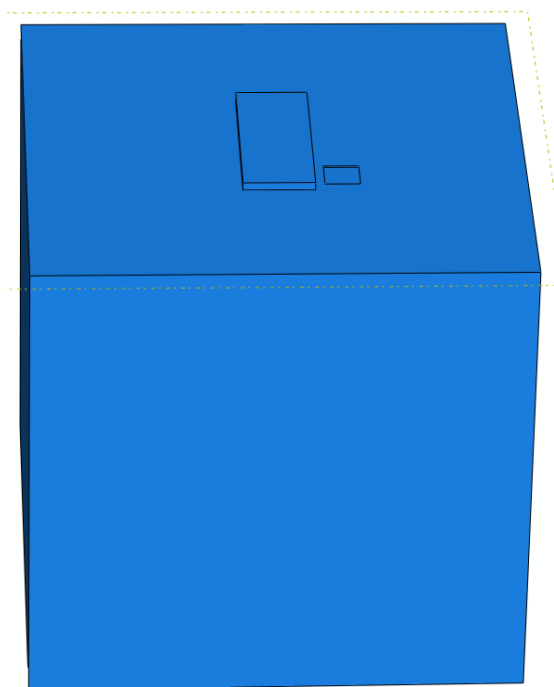


FIG. 72

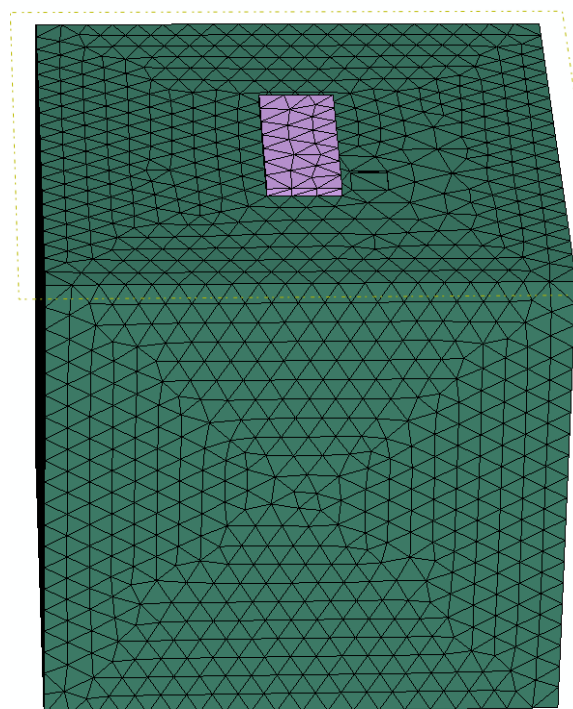


FIG. 73

PARTE TERZA

Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

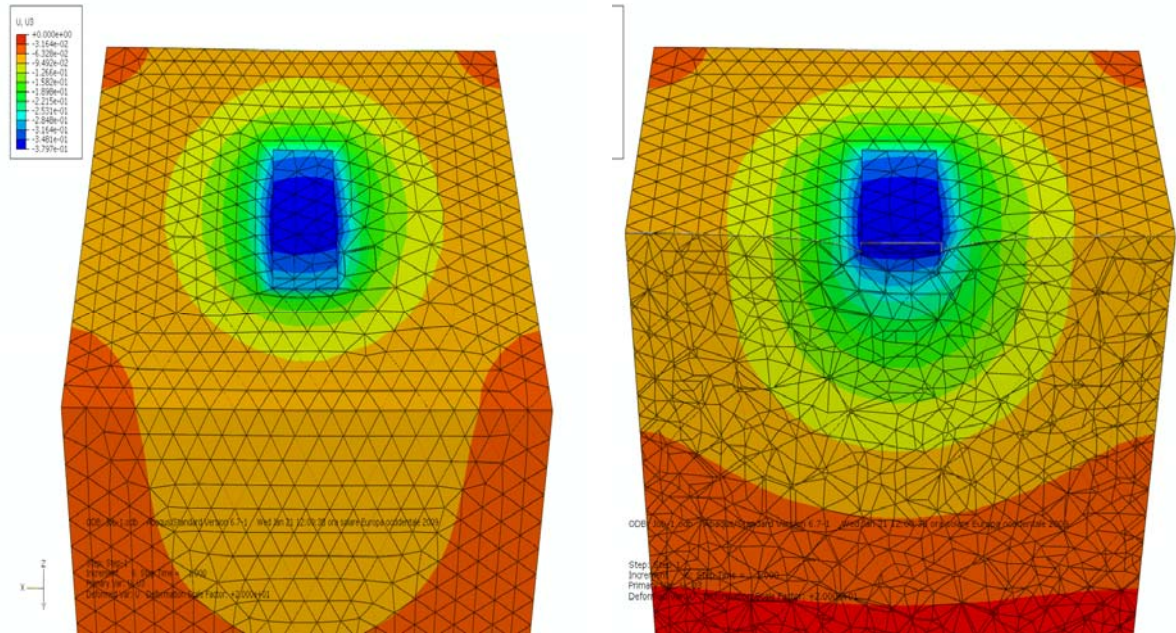
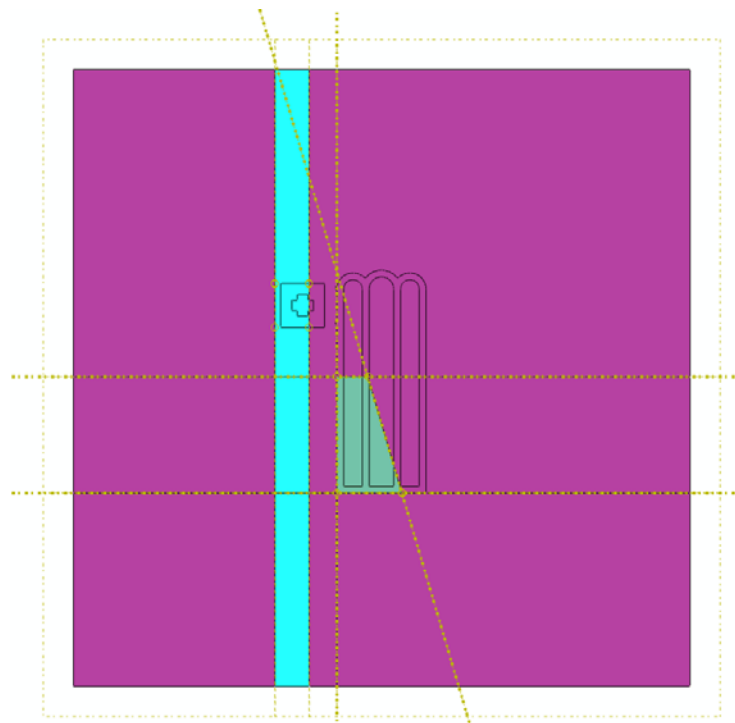


FIG. 74-75 Immagini tratte da Abaqus. Nelle prime due figure si vedono risultati dell'analisi numerica del modello del terreno con il Duomo. In particolare si vede il " bulbo" delle tensioni dovuto alla pressione esercitata dalla Cattedrale.

Il passo successivo è stato quello di valutare i cedimenti elastici attraverso la simulazione del terreno con la presenza simultanea di Torre e Duomo e l'introduzione, in step successivi, dei carichi dovuti alle fasi costruttive avvenute nel tempo. Grazie a questa simulazione, solo in modo qualitativo, è stato possibile valutare:

1. l' inclinazione e il cedimento della torre per ogni fase costruttiva;
2. l'utilità dei collegamenti tra la Torre e il Duomo;
3. l'influenza dell'interazione sulle pareti della Cattedrale.

Nel modello numerico si è ritenuto opportuno considerare un volume di terreno di dimensioni 426m x 385m x 180 m per evitare l'influenza di alcuni effetti al contorno che avrebbero potuto distorcere i risultati dell'analisi. L'intero volume di terreno è stato caratterizzato in ogni strato con i parametri meccanici trovati nella fase precedente; inoltre sono state simulate le preesistenze (fig. 76) archeologiche, trovate nel sottosuolo in corrispondenza del Duomo e della Torre, come strati resistenti caratterizzati da una maggiore rigidità.



258

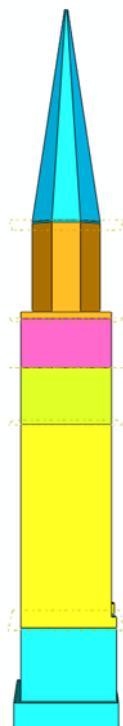


FIG-77- Immagine tratta da Abaqus. Ad ogni colore corrisponde un peso per unità di volume di materiale.

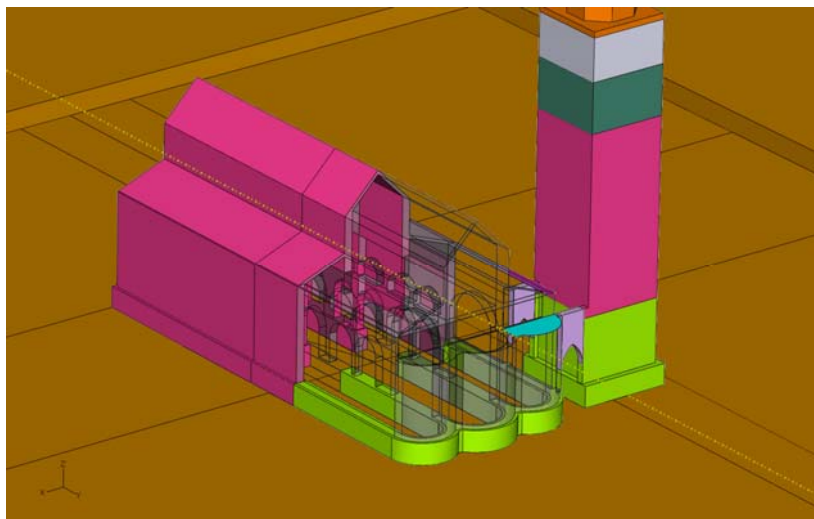


FIG-78- Immagini tratte da Abaqus, Per colorazioni diverse si sono evidenziati i carichi introdotti per step successivi
La procedura per step successivi (fig.78) implementata nel programma ha considerato le fasi costruttive dei due monumenti note dalle fonti storiche e dallo studio delle inclinazioni.

La prima fase di realizzazione è stata ipotizzata contemporanea tra quella del lato orientale delle absidi e dei primi 9 metri di costruzione della Torre, ovvero 2 m interrati, 7m fuori terra fino alla prima cornice e le fondazioni. Il secondo step ha introdotto la sopraelevazione della Torre fino a circa 41 m di altezza e della parte occidentale della Cattedrale. Dal quinto al settimo step sono stati aggiunti per piani le varie porzioni della Torre. Altre fasi sono state previste contemporanee o successive alla costruzione del Duomo e della Torre, come, ad esempio, l'inserimento e la demolizione delle Canoniche e la realizzazione degli archi di collegamento tra i due edifici.

Fasi costruttive	step	Initial	(Initial)
	1	TERRENO	Geostatic
I	2	DUOMO1CAMP9	Static, General
II	3	DUOMO2CAMP34	Static, General
II	4	CAMP41	Static, General
III	5	CAMP47	Static, General
IV	6	CAMP52	Static, General
IV	7	CAMPEND	Static, General
	8	CANONICHE	Static, General
	9	ARCHI	Static, General
	10	ABSIDE	Static, General

TAB 3- tabella riassuntiva degli step successivi implementati

L'analisi numerica ha permesso di individuare per ogni fase della costruzione della Torre sia i cedimenti che gli spostamenti.

Per quanto concerne i cedimenti, la modellazione numerica ha fornito un valore di circa 10 cm relativo alla prima fase di costruzione, mentre i cedimenti maggiori, pari a circa 24 cm, sono stati registrati tra il secondo e terzo step; infine, in seguito alla simulazione dell'ultima fase di costruzione, la modellazione ha fornito un cedimento complessivo di circa 70 cm (fig. 80). Sulla base di un confronto quantitativo con i cedimenti medi stimati da Lancellotta, descritti nei capitoli precedenti, date le caratteristiche della stratigrafia, si è ritenuto plausibile ipotizzare un processo di consolidazione protrattosi nel tempo a partire dalla fine della costruzione della Torre.

E' stata perciò svolta una valutazione del cedimento di tipo edometrico, . Questa valutazione, di cui se ne descrivono i passaggi in appendice, ha fornito un valore di cedimento complessivo pari a 1.09 m.

STRATO	PROFONDITA'	OCR	P (m)
1	2-7	3	0.26
2	7-12	2	0.38
3	12-16	1	0.24
4	16-21	1	0.15
5	21-33	1	0.045
6	33-40	1	0.013
7	40-50	1	0.003

TAB 4-Tabella riassuntiva dei dati e dei risultati utilizzati per l'avalutazione del cedimento per consolidazione

Se tale cedimento di tipo edometrico venisse sommato a quello determinato mediante l'utilizzo del modello numerico, che può essere ritenuto "immediato" rispetto all'applicazione del carico, si otterrebbe un cedimento complessivo pari a circa 1.70 m sul lato nord e pari a 1.79 m sul lato sud (tab 4-5 fig. 20-21).

Fasi costruttive		Initial	(Initial)	cedimento N (m)	cedimento s (m)
	1	TERRENO	Geostatic	0	0
I	2	DUOMO1CAMP49	Static, General	0.14	0.16
II	3	DUOMO2CAMP434	Static, General	0.34	
II	4	CAMP441	Static, General	0.49	0.54
III	5	CAMP447	Static, General	0.50	0.54
IV	6	CAMP452	Static, General		
IV	7	CAMP4END	Static, General	0.63	0.70

TAB 5- Tabelle riassuntive dei risultati determinati dall'analisi numerica riguardanti gli sprofondamenti tra l'inizio della costruzione (1099) e la sua fine (1319)

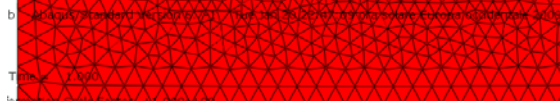


FIG.79 - Immagine tratta da Abaqus. Le colorazioni diverse, come curve di livello mostrano le zone a maggior sprofondamento (blu) e quelle a sprofondamento nullo (rosso)



FIG. 80- Immagine tratta da Abaqus. Vista prospettica dello sprofondamento di torre e Duomo. Fattore di deformazione 10.

Sotto questo aspetto i risultati delle analisi svolte non confermano le ipotesi di Lancellotta e sembrerebbero sottostimare l'entità del cedimento. Vi è però da notare che sussiste una differenza tale da giustificare questa discordanza: la simulazione adottata nello studio considera il terreno come un mezzo elastico e perciò non descrive compiutamente le sue caratteristiche reali; la risposta del terreno alle sollecitazioni in gioco sarebbe probabilmente modellata in modo più appropriato mediante un modello costitutivo elasto-plastico.

Un approccio alternativo per la comprensione dei meccanismi di cedimento risiede nell'ipotesi che la deformazione globale della Torre sia dovuta ad un fenomeno di rottura del terreno di fondazione in seguito al raggiungimento del suo valore limite di capacità portante. Sulla base dei parametri di resistenza meccanica determinati come descritto sopra e sulla base dei dati geotecnici di Cancelli (1986), è stata valutata la capacità portante del terreno di fondazione sia in condizioni non drenate che in condizioni drenate, come riportato in appendice. Con riferimento al carico di esercizio relativo al peso che la torre ha via via assunto durante le varie fasi di costruzione, è stato valutato il fattore di sicurezza.

H (m)	Peso (t)	Fs (coefficiente di sicurezza)
40	4590	1.26
47	5106	1.12
Alla fine della parte ottagonale (in condizioni non drenate)	5758	0.96
Alla fine della parte ottagonale (in condizioni drenate)	5758	2.41

TAB 6--Tabella riassuntiva dei coefficienti di sicurezza in rapporto alla realizzazione dei vari piani.

Questo approccio, che da un lato permette di verificare le affermazioni di Canevazzi, mostra valori del coefficiente di sicurezza tali da giustificare un collasso per plasticizzazione del terreno di fondazione (tab. 6). Il metodo applicato, tuttavia, che considera le condizioni non drenate per il terreno, ipotizza un fenomeno di rottura a volume costante e perciò se da un lato i numeri potrebbero rendere conto di un collasso improvviso dall'altro lo stesso fenomeno può ritenersi abbastanza improbabile.

Oltre alla valutazione dei cedimenti è stato interessante analizzare i risultati della simulazione numerica prendendo in considerazione gli spostamenti della Torre nelle varie fasi costruttive, le tensioni impresse dalla Torre sul terreno, e l'effetto che il peso del Duomo esercita sulla Torre.

Fasi costruttive		Initial	(Initial)	spostamento verso il duomo (m)
	1	TERRENO	Geostatic	0
I	2	DUOMO1CAMPA9	Static, General	0.11
II	3	DUOMO2CAMPA34	Static, General	
II	4	CAMPA41	Static, General	0.37
III	5	CAMPA47	Static, General	0.38
IV	6	CAMPA52	Static, General	0.39
IV	7	CAMPAEND	Static, General	0.51

TAB 7--Tabella riassuntiva dei risultati determinati dall'analisi numerica riguardanti gli spostamenti della punta della torre in direzione del Duomo che si sono formate nel periodo tra l'inizio della costruzione (1099) e la sua fine (1319)

Gli spostamenti della cuspide in direzione del Duomo dovuti all'inclinazione della Torre risulta si siano formati soprattutto tra: la fine della prima fase e la fine della seconda, tra la fine della terza e la fine della quarta.

L'analisi dei risultati dello spostamento della torre ha mostrato anche un comportamento del Duomo disomogeneo per quanto concerne gli spostamenti verso nord. Infatti le zone vicine alla Torre si spostano mediamente circa del 50 % in più rispetto a quelle nella zona della facciata, questo perché nella zona della facciata l'influenza combinata di edifici meno importanti della Torre e probabilmente anche delle preesistenze impediscono un movimento uniforme.

Dopo lo studio delle deformazioni sono state valutate le tensioni di compressione esercitate sul terreno e in modo qualitativo le tensioni determinate dalla spinta della torre sul duomo e le tensioni taglianti sugli archi.

Per quanto concerne le tensioni esercitate dalla torre e dal duomo sul terreno i valori determinati risultano decrescenti e concentrati nella zona dei due edifici. Il gradiente varia da $6-7 \text{ Kg/cm}^2$ per le zone nei pressi della torre a 0.9 Kg/cm^2 negli strati più profondi.

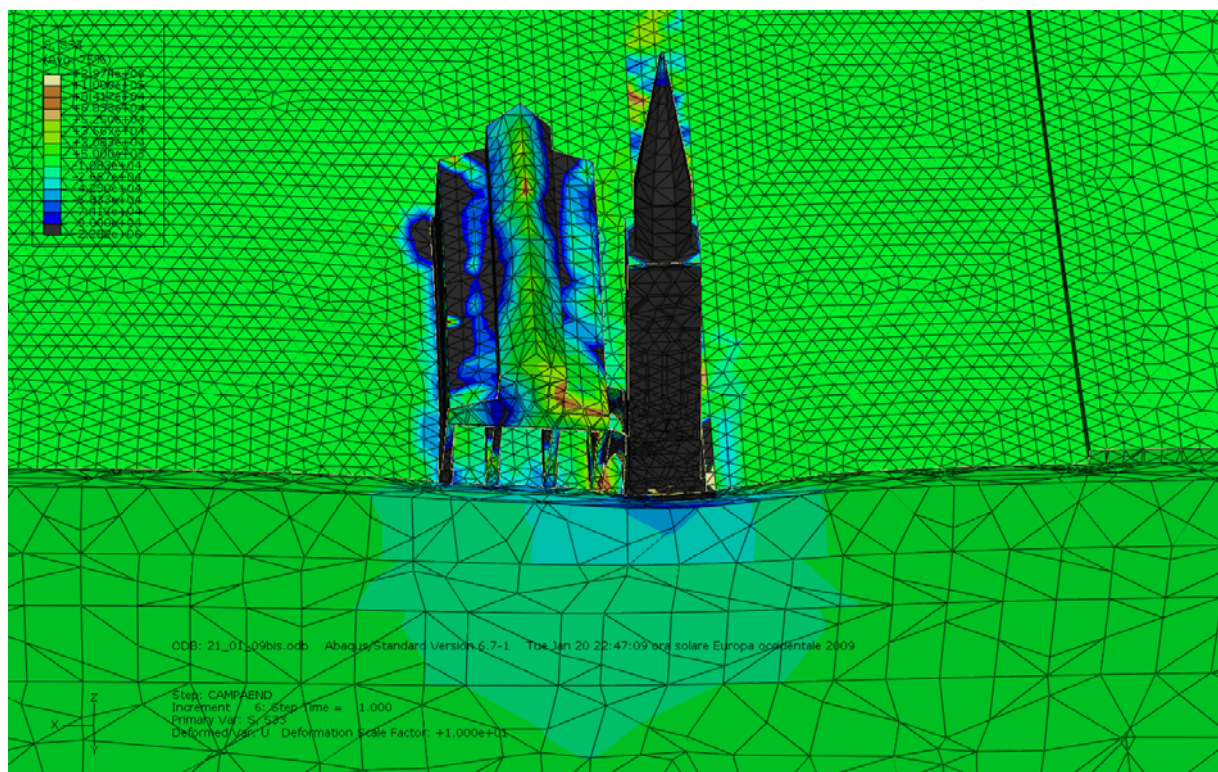


FIG. 81- Immagine tratta da Abaqus. Distribuzioni delle tensioni nel terreno

Per comprendere l'effetto della presenza del Duomo sul comportamento della Torre, è stato realizzato un modello semplificato del terreno ridotto per dimensioni vincolato agli spostamenti laterali e incastrato alla base.

	E [Kg/cm ²]	v
Torre	100000	0.2
Terreno	70	0.15

TAB. 8-Parametri elastici

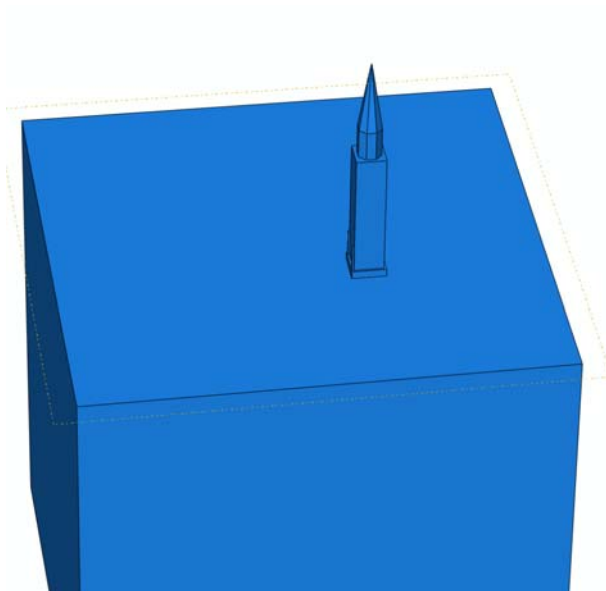


FIG. 82 Modello geometrico implementato

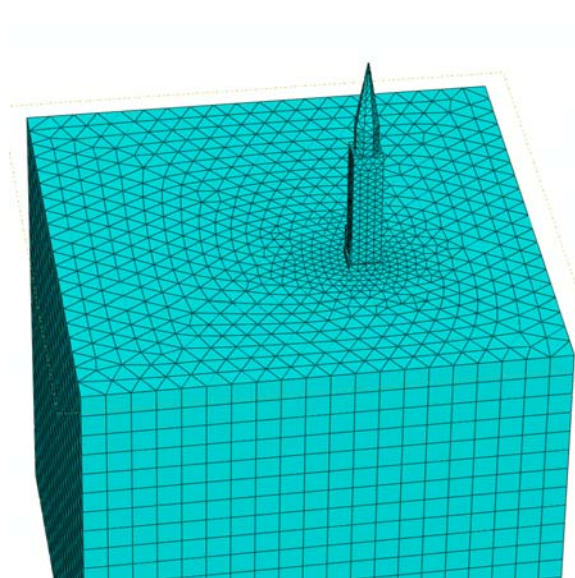


FIG. 83- Simulazione FEM

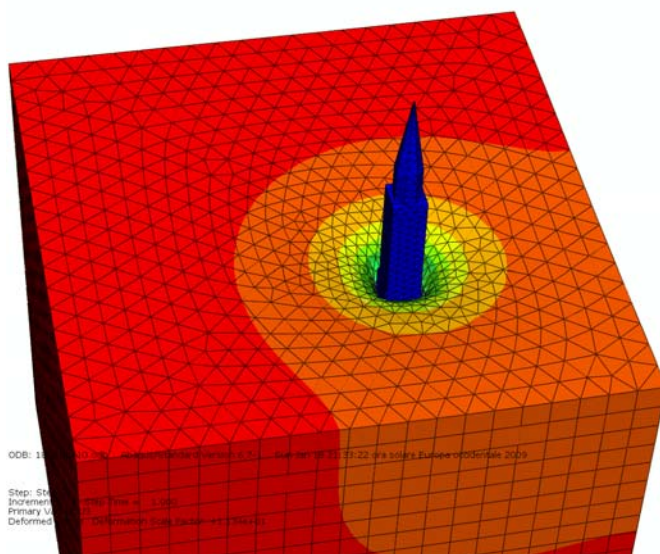


FIG. 84-Risultati analisi statica. Gli spostamenti

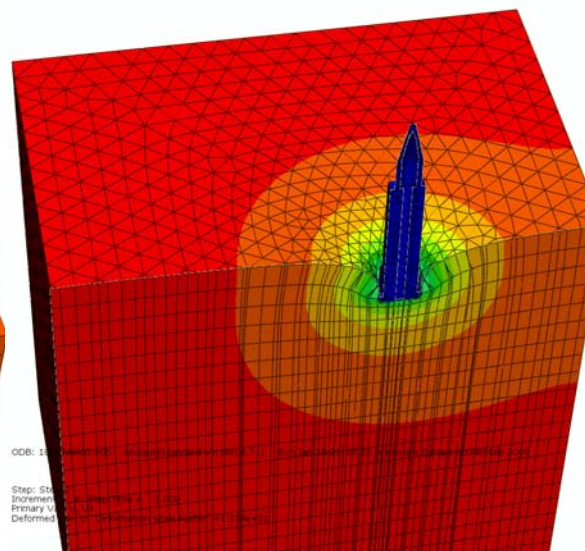


FIG. 85 Risultati analisi statica. Sezione. Gli spostamenti

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

PARTE TERZA
Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

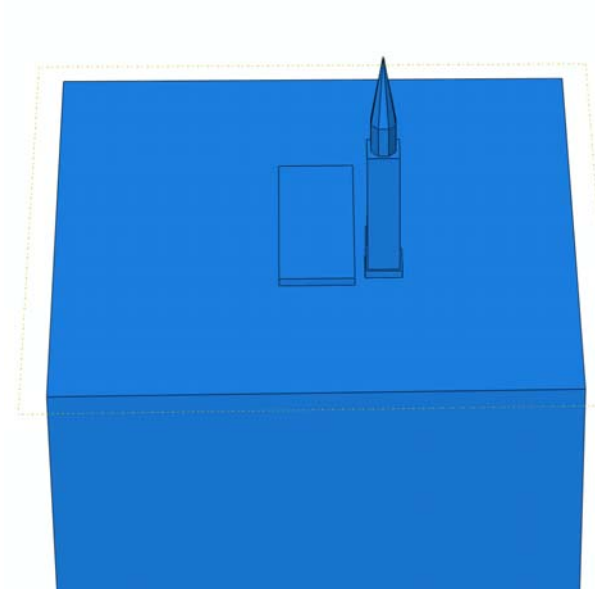


FIG.86

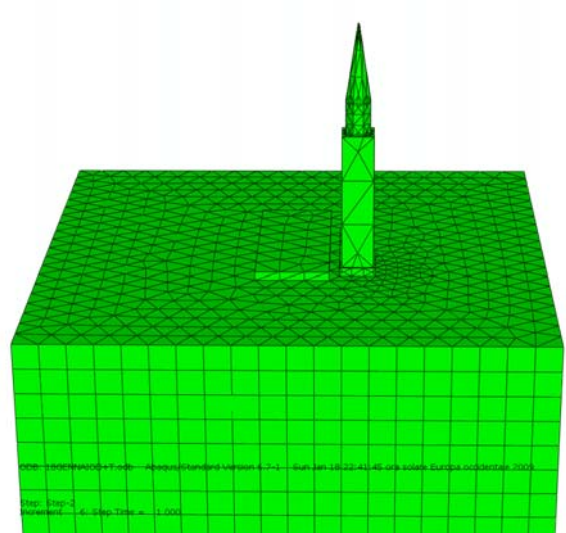


FIG.87

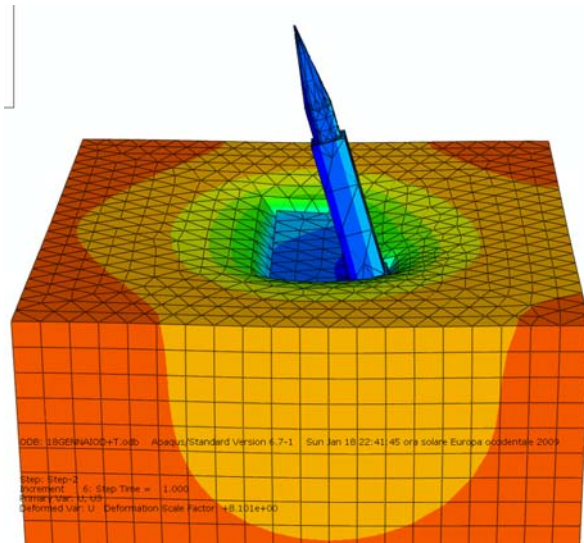


FIG.88

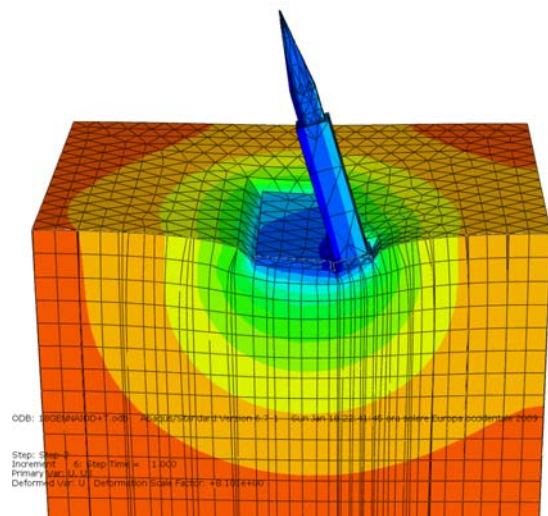


FIG.89

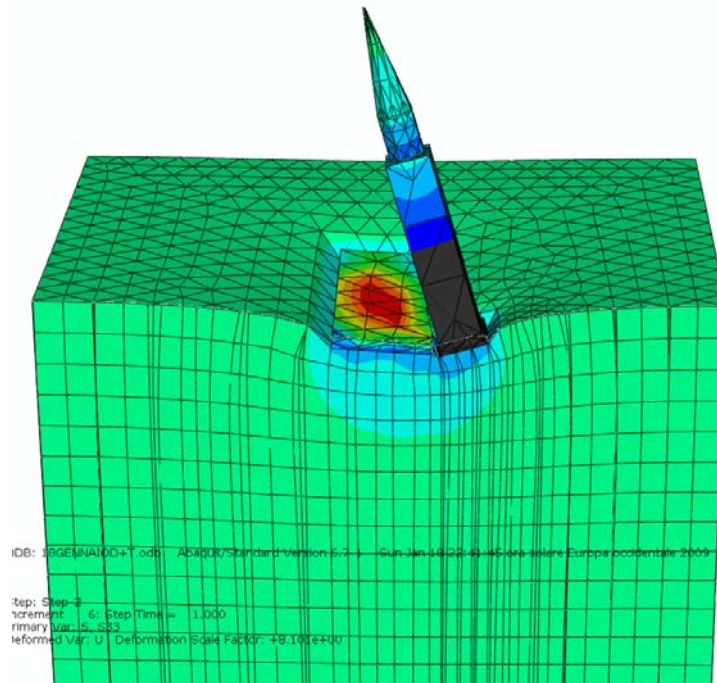


Fig.90 Le immagini tratte dal programma Abaqus (82,...,89) Si può vedere come la presenza del Duomo influenzi l'inclinazione della torre e come a livello fondale ci sia una concentrazione di tensioni tra le due strutture

Considerando in prima fase, sul terreno di fondazione la unicamente la Presenza dei dati, con i valori di resistenza descritti sopra in ambito elastico lineare, si è potuto vedere che lo sprofondamento della Torre avviene in modo pressoché verticale.

Aggiungendo il carico del Duomo, simulato come una piattaforma uniforme corrispondente all'impronta del Duomo si è potuto vedere che: la Torre non sprofonda più verticalmente ma assume un'angola direzione di inclinazione verso il Duomo.

La direzione di inclinazione della Torre si deve quindi ad una relazione tra le fondazioni dei due edifici.

Questo fatto mostra che le cause dell'inclinazione non possono essere imputabili solamente alle preesistenze archeologiche (antica via Emilia) (fig.82,...,89).

PARTE TERZA

Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

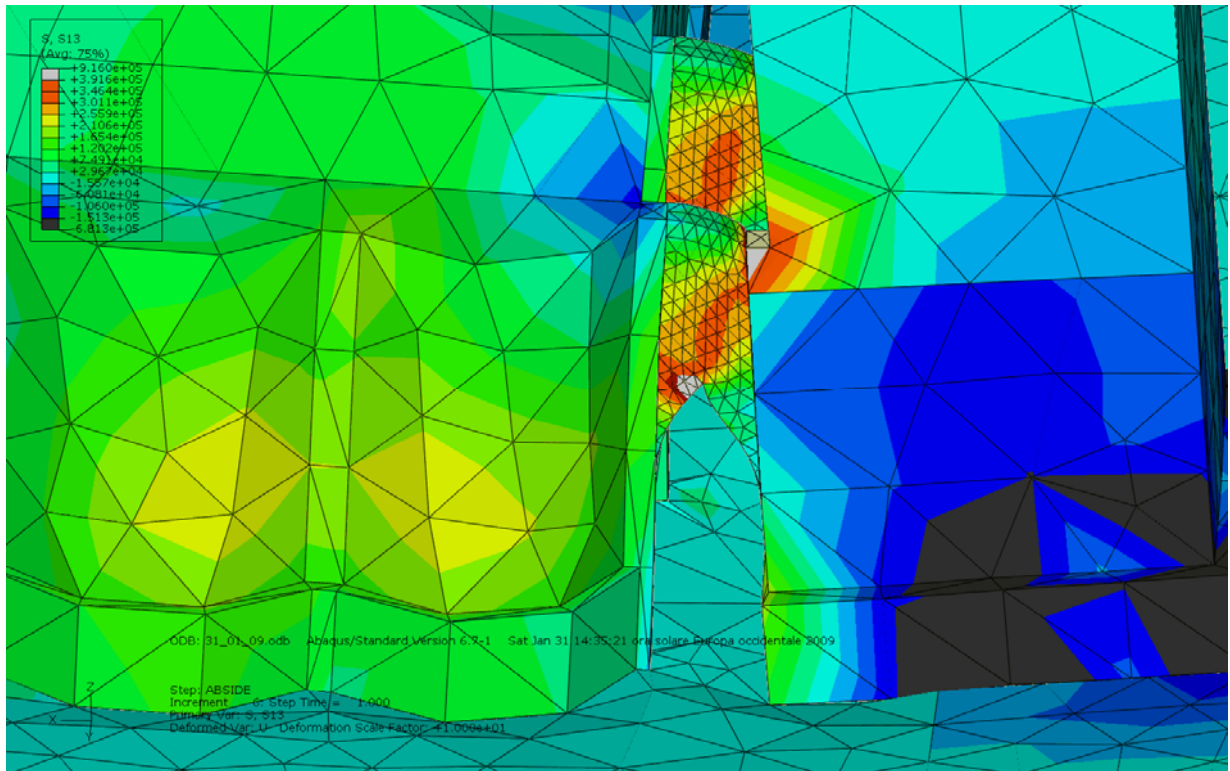


Fig.90 Immagine tratta da Abaqus. Tensioni taglienti generate all'interno degli archi.

L'inclinazione della Torre come si può intuire ha effetti anche sulle strutture ad essa collegate. Come si è visto nei capitoli precedenti i primi a subire la presenza della Torre sono gli archi di collegamento. Le lesioni trovate alla fine dell'800 e quelle determinate nei rilievi trattati nei capitoli precedenti, sono qui giustificate. La presenza di tensioni taglienti anche di bassa intensità ma con un'azione continua e progressivamente crescente possono determinare rotture significative (fig. 90).

Inoltre gli archi esercitano una compressione all'interno dei muri del Duomo come si può vedere (fig. 91).

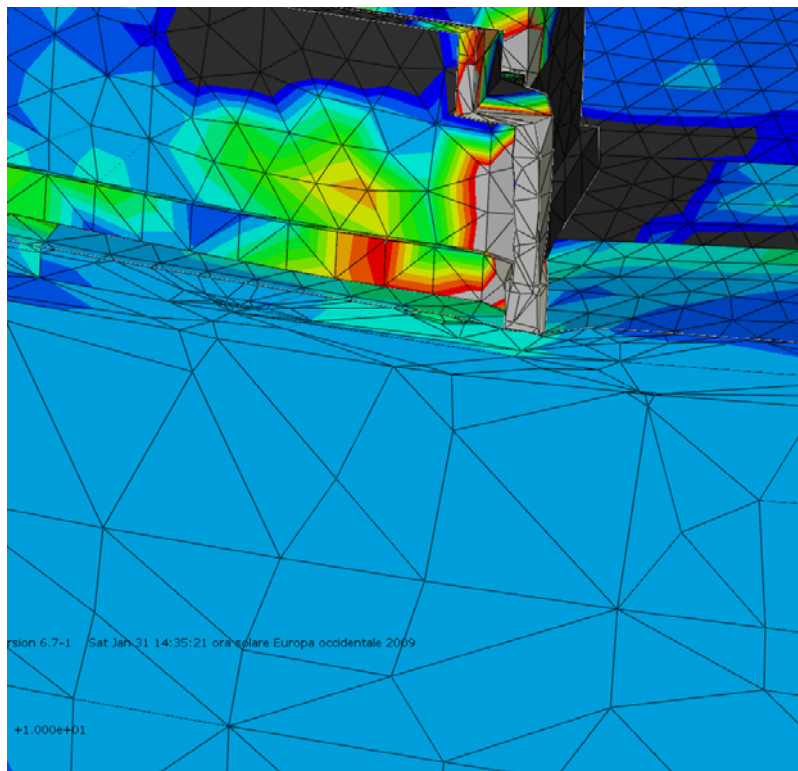


Fig.91 Immagine tratta da Abaqus Concentrazione delle teansioni di compressione in corrispondenza dell'attacco degli archi ai muri de Duomo

La modellazione numerica, pur contenendo tutte le difficoltà che risiedono in una simulazione del vero, ha fornito comunque informazioni utili per la comprensione del comportamento del terreno sollecitato dai carichi della Torre e del Duomo sottolineando l'influenza reciproca dei due monumenti. Il calcolo del cedimento dovuto ad un presunto processo di consolidazione, ha permesso di stimare il cedimento della Torre dalla fine della sua edificazione ad oggi contribuendo alle conoscenze sul comportamento globale della torre.

APPENDICE AL PARAGRAFO

1 ANALISI DEI CARICHI

ANALISI DEI CARICHI TORRE GHIRLANDINA				
	Carichi elementari			γ
	<i>Pietre di rivestimento</i>			Kg/mc
1	Pietra Ammonitico Veronese			2700
2	Pietra D'istria			2700
3	Trachite			2500
4	Pietra di vicenza			1930
	Muratura			1800
0	<i>Fondazioni</i>			
	altezza [m]	3.00		
	sviluppo muratura [mq]	115.00		
	Peso struttura [Kg]	621000.00		
1	<i>Struttura interrata primi 2 m</i>			
	altezza [m]	2.00		
	rivestimento (n°)	1-4		2315
	sviluppo rivestimento [mq]	9.24		
	sviluppo muratura [mq]	75.00		
	Peso struttura [Kg]	312781.20		
2	<i>Struttura primi 7 m fuoriterra</i>			
	altezza [m]	9.38		
	rivestimento (n°)	1-4		2315
	sviluppo rivestimento [mq]	9.24		
	sviluppo muratura [mq]	75.00		
	Peso struttura [Kg]	1466943.83		

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

PARTE TERZA
Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

3	<i>Struttura da 7-16 m fuoriterza</i>				
	altezza [m]	9.33			
	rivestimento (n°)	1-4			2315
	sviluppo rivestimento [mq]	9.24			
	sviluppo muratura [mq]	75.00			
	Peso struttura [Kg]	1459124.30			
4	<i>Struttura da 16-26 m fuoriterza</i>				
	altezza [m]	9.71			
	rivestimento (n°)	1-4			2600
	sviluppo rivestimento [mq]	9.24			
	sviluppo muratura [mq]	75.00			
	Massa struttura [Kg]	1544123.04			
	<i>a desumere vuoto monofore n°4</i>				
	pietra [mc]	0.55			
	muratura [mc]	2.75			
	Massa da togliere [Kg]	25520.00			
	Massa totale [Kg]	1518603.040			
	<i>Struttura da 26-33 m fuoriterza</i>				
	altezza [m]	7.60			
	rivestimento (n°)	1			2700
	sviluppo rivestimento pilastri [mq]	4.48			
	sviluppo muratura pilastri [mq]	26.72			
	Massa struttura [Kg]	457459.20			

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

PARTE TERZA
Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

	<i>da aggiungere sotto bifore n°4</i>				
	pietra [mc]	1.13			
	muratura [mc]	11.30			
	Massa da aggiungere [Kg]	93564.00			
	<i>da aggiungere sopra bifore n°4</i>				
	pietra [mc]	1.35			
	muratura [mc]	11.30			
	Massa da aggiungere [Kg]	95940.00			
	<i>da aggiungere parapetti bifore n°4</i>				
	muratura [mc]	2.54			
	Massa da aggiungere [Kg]	4576.50			
	<i>da aggiungere colonne bifore n°4</i>				
	pietra [mc]	3.69			
	Massa da aggiungere [Kg]	9970.13			
	Massa totale [Kg]	661509.828			
	<i>Struttura da 33-40 m fuoriterza</i>				
	altezza [m]	6.88			
	rivestimento (n°)	1			2700
	sviluppo rivestimento pilastri [mq]	4.48			
	sviluppo muratura pilastri [mq]	26.72			
	Massa struttura [Kg]	414120.96			
	<i>da aggiungere sotto trifore n°4</i>				
	pietra [mc]	1.39			
	muratura [mc]	13.92			
	Massa da aggiungere [Kg]	115257.60			

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

PARTE TERZA
Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

	<i>da aggiungere sopra trifore n°4</i>				
	pietra [mc]	1.95			
	muratura [mc]	19.54			
	Massa da aggiungere [Kg]	161791.20			
	<i>da aggiungere parapetti trifore n°4</i>				
	muratura [mc]	2.42			
	Massa da aggiungere [Kg]	17431.20			
	<i>da aggiungere colonne trifore n°8</i>				
	pietra [mc]	0.36			
	Massa da aggiungere [Kg]	7741.44			
	Massa totale [Kg]	716342.40			
	<i>Struttura da 40-47 m fuoriterza</i>				
	altezza [m]	5.42			
	rivestimento (n°)	1			2700
	sviluppo rivestimento pilastri [mq]	4.48			
	sviluppo muratura pilastri [mq]	26.72			
	Massa struttura [Kg]	326240.64			
	<i>da aggiungere sotto trifore n°4</i>				
	pietra [mc]	1.53			
	muratura [mc]	15.26			
	Massa da aggiungere [Kg]	126352.80			
	<i>da aggiungere sopra trifore n°4</i>				
	pietra [mc]	1.67			

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

PARTE TERZA
Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

	muratura [mc]	16.66			
	Massa da aggiungere [Kg]	17992.80			
	<i>da aggiungere parapetti trifore n°4</i>				
	muratura [mc]	2.42			
	Massa da aggiungere [Kg]	17431.20			
	<i>da aggiungere colonne trifore n°8</i>				
	pietra [mc]	0.36			
	Massa da aggiungere [Kg]	7741.44			
	Massa totale [Kg]	495758.880			
	<i>Struttura ottagonale da 47-57 m</i>				
	altezza [m]	9.71			
	rivestimento (n°)	1			2700
	sviluppo rivestimento pilastri [mq]	5.60			
	sviluppo muratura pilastri [mq]	13.60			
	Massa struttura [Kg]	384516.00			
	<i>da aggiungere sotto bifore n°4</i>				
	pietra [mc]	0.79			
	muratura [mc]	1.69			
	Massa da aggiungere [Kg]	20723.76			
	<i>da aggiungere tamponamenti bifore n°4</i>				
	muratura sotto [mc]	0.92			
	muratura sopra [mc]	1.59			
	Massa da aggiungere [Kg]	18091.44			

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

PARTE TERZA
Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

	<i>da aggiungere sopra bifore n°4</i>				
	pietra [mc]	0.75			
	muratura [mc]	3.55			
	Massa da aggiungere [Kg]	43758.00			
	<i>da aggiungere sotto trifore n°4</i>				
	pietra [mc]	0.22			
	muratura [mc]	3.55			
	Massa da aggiungere [Kg]	39956.40			
	<i>da aggiungere tamponamenti trifore n°4</i>				
	muratura [mc]	4.62			
	Massa da aggiungere [Kg]	33269.04			
	<i>da aggiungere sopra trifore n°4</i>				
	pietra [mc]	0.43			
	muratura [mc]	2.21			
	Massa da aggiungere [Kg]	26966.52			
	<i>da aggiungere colonne trifore n°12</i>				
	pietra [mc]	0.05			
	Massa da aggiungere [Kg]	1542.24			
	<i>da aggiungere colonne bifore n°8</i>				
	pietra [mc]	0.10			

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

PARTE TERZA
Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

	Massa da aggiungere [Kg]	3194.64			
	Massa totale [Kg]	572018.04			
	<i>Struttura piramidale</i>				
	rivestimento (n°)	1			2700
	pietra [mc]	8.53			
	muratura [mc]	15.23			
	Massa totale [Kg]	403620.48			
	<i>Balconi</i>				
	<i>Colonnotti primo balcone n°56</i>				
	pietra [mc]	0.03			
	Massa totale [Kg]	4656.96			
	<i>Mantavola primo balcone °8+8</i>				
	pietra [mc]	0.24			
	Massa totale [Kg]	10195.20			
	<i>Vasi primo balcone n°8</i>				
	pietra [mc]	0.70			
	Massa totale [Kg]	15091.40			
	<i>Basamento secondo balcone</i>				
	pietra [mc]	12.50			
	muratura [mc]	9.41			
	Massa totale [Kg]	405490.32			
	<i>Sfere secondo balcone n°8</i>				

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

PARTE TERZA
Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

	pietra [mc]	0.03			
	Massa totale [Kg]	723.46			
	<i>Colonnotti secondo balcone n°32</i>				
	pietra [mc]	0.03			
	Massa totale [Kg]	2661.12			
	<i>Mantavola secondo balcone °8+8</i>				
	pietra [mc]	0.10			
	Massa totale [Kg]	4389.12			
	Masa totale balconi e vasi	443207.58			
	<i>Solai</i>				
	pp Kg/mc				1800
	ottagono muratura [mc]	28.16			
	42 m muratura [mc]	10.76			
	35 m muratura [mc]	25.66			
	9.62 m muratura [mc]	17.82			
	3.44 m muratura [mc]	18.90			
	0.00 m muratura [mc]	25.23			
	Massa totale [Kg]	227761.20			
	Massa totale torre [Kg]	8277670.77			
	Massa totale torre [T]	8277.67			
		115.00	7.1979746		7.2
					634

Tabella riassuntiva analisi dei carichi riferita alla sola Torre della Ghirlandina

ANALISI DEI CARICHI DUOMO		
Facciata	943010	Kg
Muri perimetrali	2499800	Kg
Copertura	110400	Kg
Absidi	844588	Kg
Finto transetto	1019891	Kg
Pilastri forti e contrafforti	3484800	Kg
Finto matroneo e muri superiori	2052000	Kg
Cripta	297075	Kg
Archi del coro	208800	Kg
Volte	725400	Kg
Scalinate e pontile	131160	Kg
Fondazioni	3658200	Kg
Modifiche		
sopralzo	90000	Kg
Totale	16.065.124	Kg

Tabella riassuntiva analisi dei carichi riferita al Duomo

L'analisi della torre si è poi concentrata nella suddivisione dei carichi in funzione delle ipotetiche fasi costruttive per riuscire ad implementare i dati corretti nel modello numerico. Interessante è stato vedere che la parte sommitale costituita dal piano delle campane, la zona ottagonale e la parte piramidale rappresentino il 23% del peso di tutta la torre.

	Kg per parti di Torre		Kg per fase costruttiva	Kg complessivi
<i>fondazioni</i>	621000			
<i>Struttura interrata primi 2 m</i>	312781.2			
<i>solaio 3.44 m</i>	79434			
<i>Struttura primi 7 m fuoriterza</i>	1466944			
<i>solaio 9 m</i>	32076		1891235	
<i>Struttura da 7-16 m fuoriterza</i>	1459124			
<i>Struttura da 16-26 m fuoriterza</i>	1518603			
<i>Struttura da 26-33 m fuoriterza</i>	661510		3639237	
<i>Struttura da 33-40 m fuoriterza</i>	716342.4			
<i>solaio 35 m</i>	46188		762530.4	
<i>Struttura da 40-47 m fuoriterza</i>	495759			
<i>solaio 42 m</i>	19368		515127	
<i>Struttura ottagonale da 47-57 m</i>	572018			
<i>solaio</i>	50688			
<i>balastrta</i>	29943.5		652649.54	
<i>Struttura piramidale</i>	403620			
<i>balcone</i>	413263.7		816883.7	
<i>totale</i>				8277663

Tabella riassuntiva analisi dei carichi riferita alla Torre della Ghirlandina divisa per piani

2. CALCOLO DEL CEDIAMENTO

L'analisi dei cedimenti di una struttura si può descrivere secondo alcuni passi fondamentali

1 Definizione del profilo di progetto, ovvero descrivere la successione stratigrafica per mezzo di sondaggi e la posizione della falda.

- Quantificare la storia tensionale: σ'_p, σ'_{v0}
- La scelta dei parametri meccanici che caratterizzano la risposta delle varie formazioni

4 Determinazione dello stato di sforzo indotto dalla

5 Calcolo dei cedimenti con procedimenti convalidati dall'esperienza. In questo caso si è deciso di procedere con il metodo introdotto da Terzaghi nel 1943

I passi salienti del metodo di Terzaghi si possono riassumere così:

- Suddividere il banco di terreno comprimibile in un numero conveniente di strati aventi spessore H_i ;
- In corrispondenza del piano medio di ogni strato calcolare la tensione efficace geostatica σ'_{v0} e definire sulla scorta dei risultati di prove edometriche, la tensione di preconsolidazione σ'_p ;
- In corrispondenza della mezzeria di ogni strato si calcola l'incremento $\Delta \sigma'_z$ prodotto dall'applicazione del carico unitario $q_N = q - \gamma D$ dove γ è il peso specifico e D è la quota dal p.c. (con questa stima si assume che il carico sia uniformemente ripartito e si trascura la rigidità della fondazione);
- Si calcola il cedimento di ogni strato ipotizzando le deformazioni monodimensionali. Da qui se si indica con H_s l'altezza relativa alla fase solida e con $H_0 \times (H_s + e_0 H_s) = (H_s + e_0)$ l'altezza iniziale dell'elemento di volume, trascurando la compressibilità delle particelle, il cedimento è dovuto solo alla variazione dell'indice dei vuoti.

$$\Delta H = -(H_f - H_0) = -H_s(e_f - e_0) = -H_s \Delta e$$

La variazione dell'indice dei vuoti si determina tramite la seguente relazione

PARTE TERZA

Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

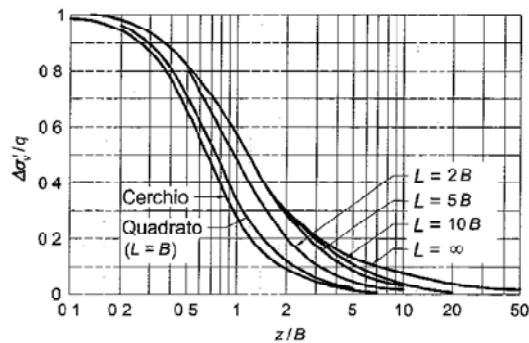
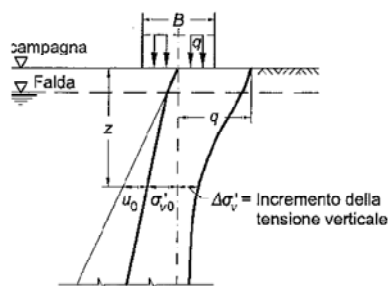
$$-\Delta e = C_r \log \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}} + C_c \log \frac{\sigma'_{v0} + \Delta \sigma'_z}{\sigma'_p}$$

Dove

C_r è l'indice di ricomprensione

C_c è l'indice di compressione

L'affidabilità di questo metodo che fa riferimento al carico netto ha riscontri in studi condotti a partire dal 1966 da Bjerrum e Eide che mostravano nel caso di fondazioni compensate come i cedimenti in fase di ricarico sono uguali al rigonfiamento che si hanno in fase di scavo. In studi successivi¹¹ si è poi osservato, su una casistica di nove edifici fondati su argille che il rapporto tra cedimento immediato e cedimento totale è pari a 0.1, mentre nel caso di fondazioni su argille consistenti il cedimento immediato è compreso tra il 32 e il 74% del cedimento totale. Per questo, nel caso di argille tenere, il cedimento stimato con il metodo monodimensionale corrisponde al cedimento di consolidazione e quello immediato è pari al 10% circa di tale stima. Nel caso di argille consistenti la valutazione descritta corrisponde al cedimento totale e il cedimento immediato ad 1/3 e 2/3 di tale valore.



Tensione verticale al di sotto dell'asse baricentrico di un area di carico flessibile (Janbu, Bjerrum e Kjaernisli, 1958)

¹¹ Simon e Som (1970)

PARTE TERZA

Nuovi contributi allo studio della relazione tra Torre e Duomo

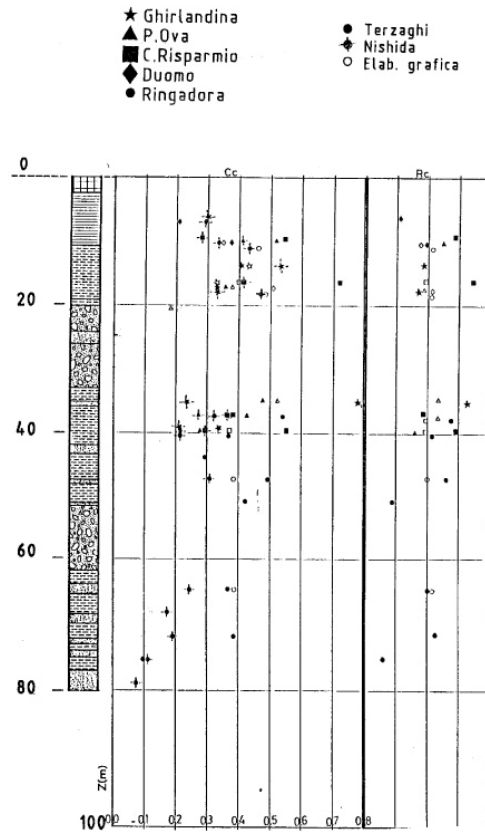


Grafico risultati prove edometriche: i valori di C_c e R_c per i campioni di Piazza Grande; Cancelli 1985

Esempio di calcolo su uno strato

$$\Delta H = H_0 \cdot \left[R_r \cdot \log OCR + R_c \cdot \log \frac{\sigma_{vf'}}{\sigma_{p'}} \right]$$

$$R_c = \frac{C_c}{1 + e_0} = 0.2 \text{ primo banco di argilla e } 0.22 \text{ secondo banco di argilla}$$

$$R_r = \frac{C_r}{1 + e_0} = 0.06$$

$\gamma_{sat} - \gamma_w = \gamma'$ peso specifico efficace

Peso complessivo torre 8280 t

$$q_{es} = \frac{\text{peso torre}}{\text{superficie fondazione}} = \frac{8280000 \text{ Kg}}{1150000 \text{ cm}^2} = 7.2 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = 706 \text{ KPa}$$

Profondità piano di posa 4 m

Detrazione della quota parte di scavo

B= 11 m (larghezza base torre) 12, 4 m (larghezza fondazione)

$$\gamma_{nat} = 18 \frac{\text{KN}}{\text{m}^3} \rightarrow \sigma'_{v0} = 18 \cdot 4 = 72 \text{ KPa}$$

$$q_{netto} = q_{as} - \sigma'_{v0} = \text{al netto del terreno occupato dalle fond} = 706 - 72 = 634 \text{ KPa}$$

STRATO 1 (2 - 7 m)

$$\sigma'_{v0}(-5.5m) = 18 \cdot 5.5 = 99 KPa \cong 100 KPa$$

$$OCR = 3$$

$$\sigma'_p = 100 \cdot 3 = 300 KPa$$

$z/b = 1.5/12 = 0.125 m$ dove z è la distanza dal piano di posa della fondazione dal punto del terreno considerate e b è la larghezza della fondazione

$$\Delta\sigma'_v = 0.95 \cdot 634 = 602.3 KPa$$

$$\sigma'_{v0} + \Delta\sigma'_v = 100 + 602.3 > 300 KPa$$

$$\rho_1 = H_0 \cdot \left(R_r \cdot \log OCR + R_c \cdot \log \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p} \right) = 3 \cdot (0.06 \cdot \log 3 + 0.2 \cdot \log 602/300) = 3 \cdot$$

$$(0.028 + 0.06) = 0.26 m$$

STRATO 2 (7 - 12m)

$$\sigma'_{v0}(-9.5m) = 18 \cdot 7 + 9 \cdot 2.5 = 126 + 22.5 = 148.5 KPa$$

$$OCR = 2$$

$$\sigma'_p = 148.5 \cdot 2 = 297 KPa$$

$z/b = 5.5/12 = 0.458 m$ dove z è la distanza dal piano di posa della fondazione dal punto del terreno considerate e b è la larghezza della fondazione

$$\Delta\sigma'_v = 0.7 \cdot 634 = 443.8 = KPa$$

$$\sigma'_p + \Delta\sigma'_v = 148.5 + 443.8 > 297 KPa$$

$$\rho_2 = H_0 \cdot \left(R_r \cdot \log OCR + R_c \cdot \log \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_p} \right) = 5 \cdot (0.06 \cdot \log 2 + 0.2 \cdot \log 592.3/297) = 5 \cdot$$

$$(0.018 + 0.06) = 0.38 m$$

STRATO 3 (12 – 16 m)

$$\sigma'_{v0}(-14m) = 18 \cdot 7 + 9 \cdot 5 + 9 \cdot 2 = 126 + 63 = 189 \text{ KPa}$$

$$\text{OCR} = 1$$

$z/b = 10/12 = 0.83 \text{ m}$ dove z è la distanza dal piano di posa della fondazione dal punto del terreno considerate e b è la larghezza della fondazione

$$\Delta\sigma'_v = 0.3 \cdot 634 = 190.2 = \text{KPa}$$

$$\rho_3 = H_0 \cdot \left(R_c \cdot \log \cdot \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} \right) = 4 \cdot (0.2 \cdot \log 189 + 190.2/189) = 0.24 \text{ m}$$

STRATO 4 (16 – 21 m) NC

$$\sigma'_{v0}(-18.5m) = 18 \cdot 7 + 9 \cdot 11.5 = 126 + 103.5 = 229.5 \text{ KPa}$$

$$\text{OCR} = 1$$

$z/b = 14.5/12 = 1.2 \text{ m}$ dove z è la distanza dal piano di posa della fondazione dal punto del terreno considerate e b è la larghezza della fondazione

$$\Delta\sigma'_v = 0.2 \cdot 634 = 126.8 = \text{KPa}$$

$$\rho_4 = H_0 \cdot \left(R_c \cdot \log \cdot \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} \right) = 4 \cdot (0.2 \cdot \log 229.5 + 126.8/229.5) = 0.15 \text{ m}$$

STRATO 5 (21 – 33 m) NC

$$\begin{aligned}\sigma'_{v0}(-36.5m) &= 18 \cdot 7 + 9 \cdot 14 + 10 \cdot 12 + 11 \cdot 3.5 = 126 + 126 + 120 + 38.5 \\ &= 410.5 \text{ KPa}\end{aligned}$$

$$\text{OCR} = 1$$

$z/b = 14.5/12 = 2.95 \text{ m}$ dove z è la distanza dal piano di posa della fondazione dal punto del terreno considerate e b è la larghezza della fondazione

$$\Delta\sigma'_v = 0.05 \cdot 634 = 31.7 \text{ KPa}$$

$$\rho_5 = H_0 \cdot \left(R_c \cdot \log \cdot \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} \right) = 7 \cdot \left(0.2 \cdot \log \frac{410.5 + 31.7}{410.5} \right) = 0.045 \text{ m}$$

STRATO 6 (33 – 40 m) NC

$$\sigma'_{v0}(-43m) = 410.5 + 11 \cdot 6.5 = 482 \text{ KPa}$$

$$\text{OCR} = 1$$

$$z/b = 39/12 = 3.25 \text{ m}$$

$$\Delta\sigma'_v = 0.02 \cdot 634 = 12.68 \text{ KPa}$$

$$\rho_6 = H_0 \cdot \left(R_c \cdot \log \cdot \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} \right) = 6 \cdot \left(0.2 \cdot \log \frac{482 + 12.68}{482} \right) = 0.013 \text{ m}$$

STRATO 7 (40 – 50 m) OC

$$\sigma'_{v0}(-48.5m) = 482 + 11 \cdot 5.5 = 542.5 \text{ KPa}$$

$$\text{OCR} = 1.6$$

$z/b = 44.5/12 = 3.7 \text{ m}$ dove z è la distanza dal piano di posa della fondazione dal punto del terreno considerate e b è la larghezza della fondazione

$$\Delta\sigma'_v = 0.02 \cdot 634 = 12.68 \text{ KPa}$$

$$\sigma'_p = 542.5 \cdot 1.6 = 868 \text{ KPa}$$

$$\sigma'_p + \Delta\sigma'_v = 542.5 + 12.68 < 868 \text{ KPa}$$

$$\rho_7 = H_0 \cdot \left(R_r \cdot \log \frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_{v0}} \right) = 5 \cdot \left(0.06 \log \left(\frac{542.5 + 12.68}{542.5} \right) \right) = 0.003 \text{ m}$$

Cedimenti 1°strato

$$\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 = 0.26 + 0.38 + 0.24 + 0.15 = 1.03 \text{ m}$$

Cedimenti 2°strato

$$\rho_5 + \rho_6 + \rho_7 = 0.045 + 0.013 + 0.003 = 0.061 \text{ m}$$

Cedimenti totale

$$\rho_{tot} = 1.091 \text{ m} = 109 \text{ cm}$$

CALCOLO DI ROTTURA DEL TERRENO in condizioni non drenate

Z punto rappresentativo calcolato pari a 8 m da p.c. originale

Quota della falda -7 m da p.c.

$$\Gamma_{\text{nat}} \text{ sopra falda } 18 \text{ KN/m}^3$$

$$\Gamma_{\text{sat}} \text{ sotto falda } 19 \text{ KN/m}^3$$

OCR =3 (primo strato)

$$\sigma'_{v0}(\bar{z}) = 18 \cdot 7 + 9 \cdot 1 = 135 \text{ KPa}$$

$$C_u = 55.5 \text{ KPa}$$

$$q_{lim} = C_u \cdot N_c \cdot S_c + q$$

Dove

- $N_c = 2 + \pi$ fattore di capacità portante;

- $S_c = 1 + 0.2 B/L = 1.2$ fattore correttivo che tiene conto della forma della fondazione;

- $q = \gamma D = 18 \cdot 4 = 72 \text{ KN/m}^2$ dove distanz da p.c. a quota d'imposta delle fondazioni (-4 m) .
Sovraccarico totale agente ai bordi della fondazione;

- C_u = resistenza al taglio iniziale.

$$q_{lim} = C_u \cdot N_c \cdot S_c + q = 55.5 \cdot 5.14 \cdot 1.2 + 18 \cdot 4 = 414 \text{ KPa}$$

Ipotesi di rottura al raggiungimento del 40 ° metro di quota.

$$q_{es} = \frac{Q_{della\ costruzione}}{suoerficie\ della\ fondazione} = \frac{45908909}{115} = 399.207 \text{ KPa}$$

$$q_{net} = q_{es} - q = 399.207 - 72 = 327,20 \text{ KPa}$$

$$F_s = \frac{q_{lim}}{q_{net}} = 1.26$$

Ipotesi di rottura al 47 ° metro realizzato

$$q_{es} = \frac{Q_{della\ costruzione}}{suoerficie\ della\ fondazione} = \frac{51060179}{115} = 444.0 \text{ KPa}$$

$$q_{net} = q_{es} - q = 444 - 72 = 372 \text{ KPa}$$

$$F_s = \frac{q_{lim}}{q_{net}} = 1.12$$

Ipotesi di rottura al la fine della parte ottagonale

$$q_{es} = \frac{Q_{della\ costruzione}}{suoerficie\ della\ fondazione} = \frac{57586669}{115} = 500.753\ KPa$$

$$q_{net} = q_{es} - q = 500 - 72 = 428\ KPa$$

$$F_s = \frac{q_{lim}}{q_{net}} = 0.96$$

I calcoli eseguiti mostrano che i coefficienti di sicurezza determinati, non escludono la possibilità di un cedimento in condizioni non drenate della torre.

$\phi(^{\circ})$	0	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42
N_c	5.14	16.88	19.32	22.25	25.80	30.14	35.49	42.16	50.59	61.35	75.31	93.71
N_q	1.00	7.82	9.60	11.85	14.72	18.40	23.18	29.44	37.75	48.93	64.20	85.38
N_{γ}	0.00	7.13	9.44	12.54	16.72	22.40	30.22	41.06	56.31	78.03	109.4	155.6

Coefficienti di capacità portante (Vesic, 1975)

Calcolo di rottura del terreno in condizioni drenate

$$q_{lim} = \frac{1}{2} \cdot B \cdot \gamma' \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma + c' \cdot N_c \cdot S_c + \gamma \cdot D \cdot N_q \cdot S_q$$
$$\rightarrow q_{lim} = \frac{1}{2} \cdot 12 \cdot 10 \cdot 8,2 \cdot 0,6 + 15 \cdot 4 \cdot 8,66 \cdot 1,42 = 295,2 + 737,8 = 1033 KPa$$

Dove

$$S_\gamma = 0,6$$

$$S_q = 1 + \tan \phi$$

Φ = angolo di rottura a taglio determinato sperimentalmente pari a 23°

- N_γ , N_c , N_q sono i fattori di capacità portante, tabellati in funzione dell'angolo di resistenza al taglio ϕ ;

- B è la lunghezza della base della fondazione;

- c' è la coesione;

- q' è il sovraccarico agente ai lati della fondazione.

Ipotesi di rottura al la fine della parte ottagonale

$$q_{es} = \frac{Q_{della\ costruzione}}{superficie\ della\ fondazione} = \frac{57586669}{115} = 500.753 KPa$$

$$q_{net} = q_{es} - q = 500 - 72 = 428 KPa$$

$$F_s = \frac{q_{lim}}{q_{net}} = 2.41$$

Questo calcolo mostra che se la torre fosse sprofondata per un fenomeno di rottura, lo avrebbe fatto in condizioni non drenate in quanto il coefficiente di sicurezza nel caso drenato risulta il doppio.

5 L'ANALISI DEI DATI DEL SISTEMA DI MONITORAGGIO DI TORRE E DUOMO

A partire dal 2003 su Torre e Duomo viene installato un sistema di monitoraggio.

I dati acquisiti coprono un periodo di poco più di quattro anni, ancora insufficienti per riuscire a delineare un quadro definitivo del comportamento della Torre e del Duomo, ma sufficienti per poter realizzare stime iniziali, se confrontati con le informazioni storiche, i rilievi e i calcoli numerici.

Il sistema di strumenti installato consente di analizzare nel corso del tempo il comportamento statico dei due monumenti a fronte delle maggiori azioni di origine naturale quali l'andamento termico, le variazioni del livello di falda, terremoti, il vento e gli eventi sismici.

I movimenti che generano i fattori ambientali nei monumenti nel breve periodo risentono dei cicli stagionali, ma nel lungo periodo consentono di determinare condizioni di stabilità o movimento.

Il sistema, installato¹² dal Comune di Modena, fornisce dati continui.

Dal 2003 (fig. 6) con cadenza trimestrale sono stati scaricati i dati dalla strumentazione per essere elaborati ed interpretati.

Per monitorare il movimento dei due monumenti sono stati installati, e collegati in un sistema di rete, sensori in grado di:

- misurare i cedimenti fondali (estensimetri)
- misurare l'apertura e la chiusura delle lesioni (misuratori di giunti),
- determinare la rotazione, il fuoripiombo della Torre (pendolo),
- misurare la temperatura (termometri),
- misurare la velocità e la direzione del vento (gonioanemometro).

¹² dalla A.G.I.S.Co. S.r.l.

La scelta degli strumenti , le loro caratteristiche e la loro localizzazione sono tali da assicurare un sistematico controllo degli eventi .

Gli estensimetri rigidamente collegati alle fondazioni dei monumenti forniscono una misura assoluta dei cedimenti , rispetto ad un punto di riferimento posto a -22 m dal p.c. considerato come fisso. La presenza di più strumenti installati in posizioni strategiche consente di individuare eventuali movimenti differenziali delle fondazioni. Il sistema di trasmissione di tipo wireless è perfettamente integrato nella pavimentazione. La sensibilità degli strumenti è del centesimo di millimetro. In totale sono stati installati cinque strumenti due per il Duomo e tre per la Torre (fig. 92).



FIG. 92- Estensimetro sistemato in prossimità della Torre

I misuratori di giunti ,installati a cavallo delle lesioni , ne consentono di valutare nel tempo l'apertura e la chiusura . Le tipologie a disposizione consentono in funzione del numero di sensori a disposizione sia di valutare i movimenti nel piano della lesione, sia di valutare quelli fuori dal piano.

All'interno del Duomo sono attualmente monitorate cinque lesioni di cui quattro in corrispondenza della navata centrale con misuratori biassiali e una con misuratore triassiale in prosecuzione di uno dei due archi di collegamento tra torre e Duomo. La sensibilità dello strumento raggiunge il centesimo di millimetro (fig. 93).



FIG. 93- Misuratore di giunto

Il pendolo diritto è stato installato per misurare gli scostamenti dalla verticale degli assi degli edifici. Lo strumento è fissato, tramite un ancoraggio, in corrispondenza della stanza dei Torresani e, tramite il filo a piombo, in lega di Invar pressoché insensibile alle azioni termiche, consente, grazie ad un telecoordinometro di determinare la posizione del filo a piombo.

I valori registrati consentono di vedere l'andamento delle inclinazioni della Torre, sia quelle periodiche¹³, sia quelle permanenti dovute a cedimenti strutturali. La sensibilità dello strumento è del centesimo di millimetro (fig. 94).



FIG. 94 Pendolo

¹³ Variazioni di carattere giornaliero dovute ad azioni termiche

Le sonde di temperatura servono per misurare le variazioni termiche cui sono soggette le strutture monitorate. Rilevando i dati di temperatura è possibile realizzare letture incrociate con le altre misure acquisite, per individuare eventuali dipendenze del comportamento strutturale dal fattore termico. Gli strumenti installati sulla torre sono tre: uno all'interno e due all'esterno, per riuscire a leggere in zone ad esposizione differente gli effetti dell'insolazione. Quelli installati nel Duomo sono solo all'interno (fig. 95).

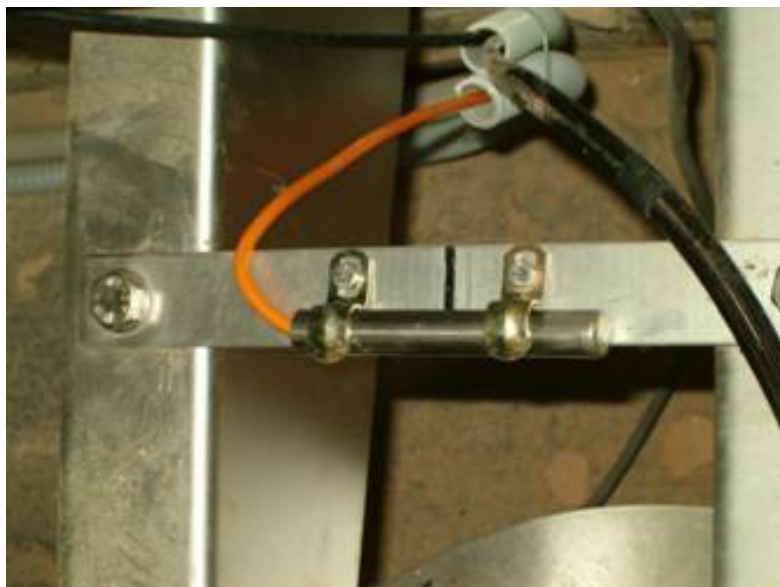


FIG. 95 Termometro

Ad eccezione degli estensimetri, tutti i sensori del Duomo e della Torre sono collegati tramite cavi di trasmissione dati ad un apparecchiatura di misura automatica sistemata all'interno della torre.

Il PC situato nella torre archivia tutte le misure e le invia con le immagini di una webcam in modo wire-less ad un PC situato nell'info-point di Piazza Grande. Lo scarico dei dati è possibile tramite l'accesso da internet (fig. 96).

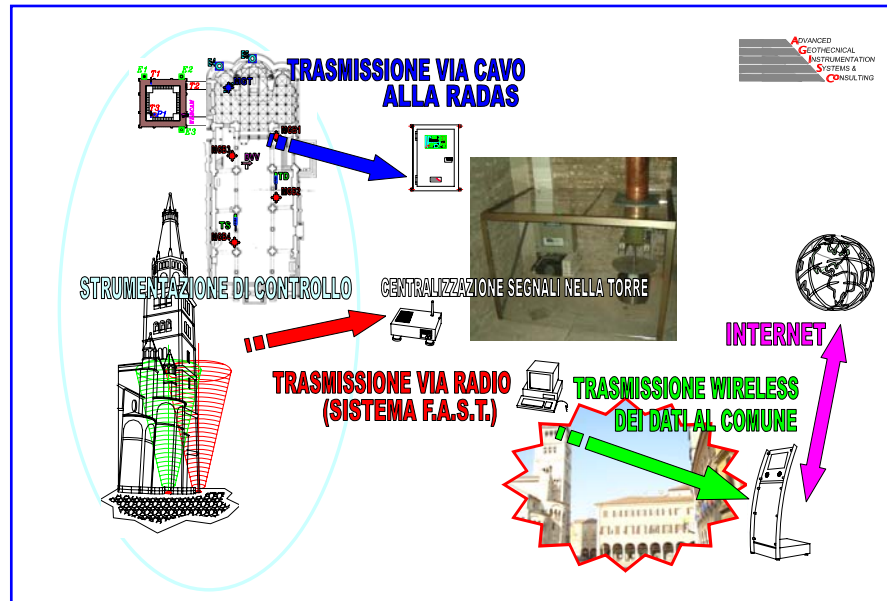


FIG.96- Schema del sistema di trasmissione dati.

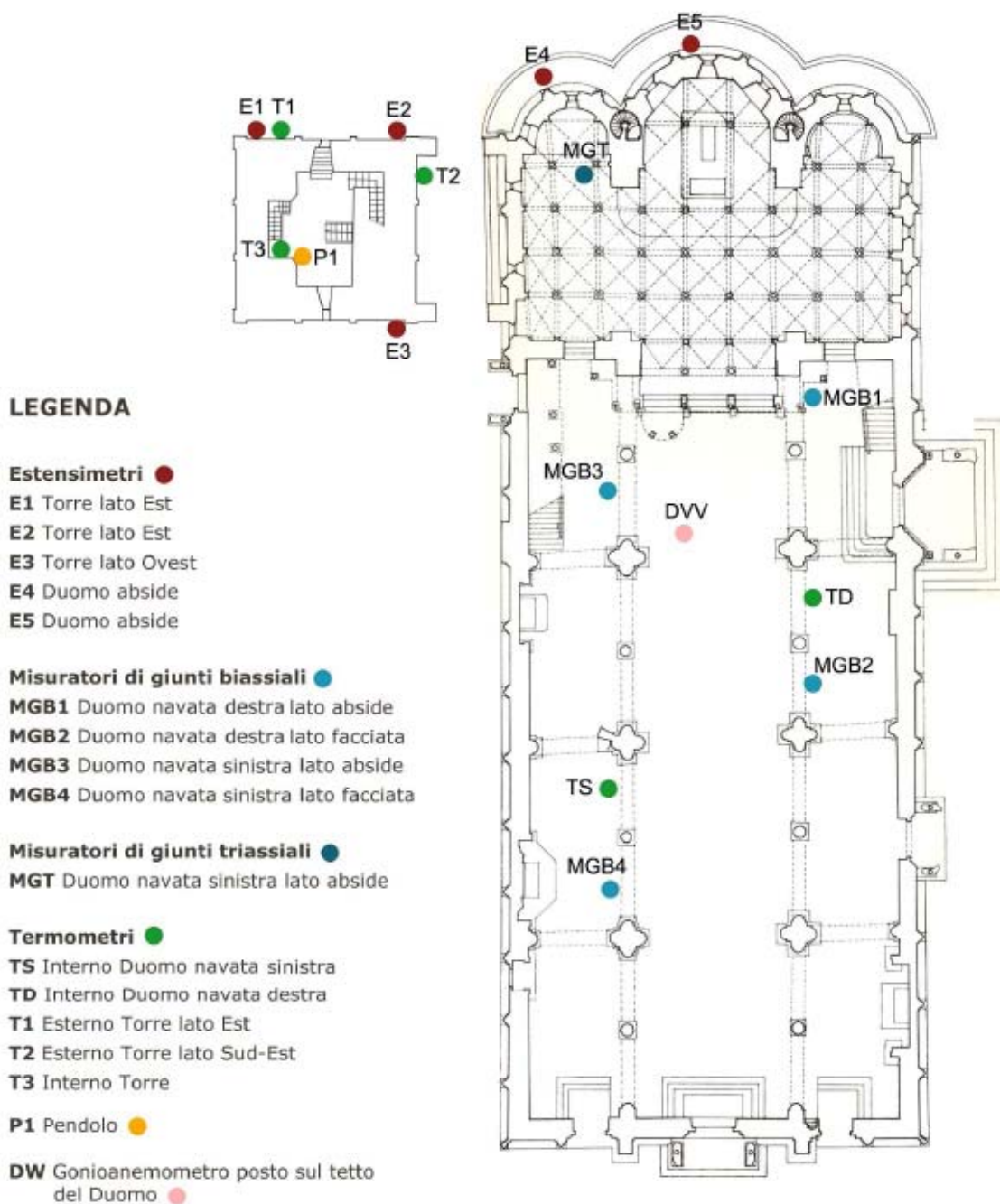


FIG. 97- Posizione degli strumenti rispetto alle piante degli edifici

L'analisi compiuta, sulla base dei dati forniti dal sistema di monitoraggio, è stata particolarmente impegnativa.

E' stato innanzitutto necessario attivare software dedicati¹⁴ in grado di elaborare migliaia di righe di dati e di graficizzarli secondo leggi matematiche imposte.

L'analisi, finalizzata a comprendere la direzione e la dimensione dei movimenti di Torre e Duomo, si è concentrata sullo studio dei dati provenienti dagli estensimetri dal pendolo; mentre i misuratori di giunto a causa di dati incompleti sono stati analizzati solo parzialmente.

Sebbene le grandezze misurate nell'arco temporale di un anno abbiano un andamento ciclico, l'osservazione di sintesi mette in evidenza come in nessun caso i valori finali tornino al punto di partenza. Ciò testimonia che pur in presenza di un movimento stagionale ripetitivo si registrano modificazioni tendenziali e prevalenti nei valori di riferimento.

Per poter descrivere la "tendenza" dei dati si è utilizzata una curva analitica capace di descrivere i dati rilevati per ogni strumento.

La formula parametrica $y=a*\sin(b*t+c)+d*t+e$, è la somma di una sinusoide generica, che rappresenta la componente ciclica, con un termine lineare, che rappresenta la componente cumulativa

I dati a disposizione utilizzati sono stati forniti all'inizio del 2008, dopo una revisione complessiva delle informazioni a disposizione fino ad allora raccolte.

Il primo strumento ad essere analizzato è stato il pendolo. Sebbene le misurazioni siano avvenute con cadenze differenti, nell'arco temporale dei cinque anni¹⁵, è stato possibile comunque eseguire una lettura sia della rotazione sia del movimento orizzontale che determina il fuori piombo della Torre.

¹⁴ Matlab

¹⁵ Nel 2003 le misurazioni avvenivano ogni 30 minuti, poi allo scattare di ogni ora e poi allo scattare dei dieci minuti superata l'ora.

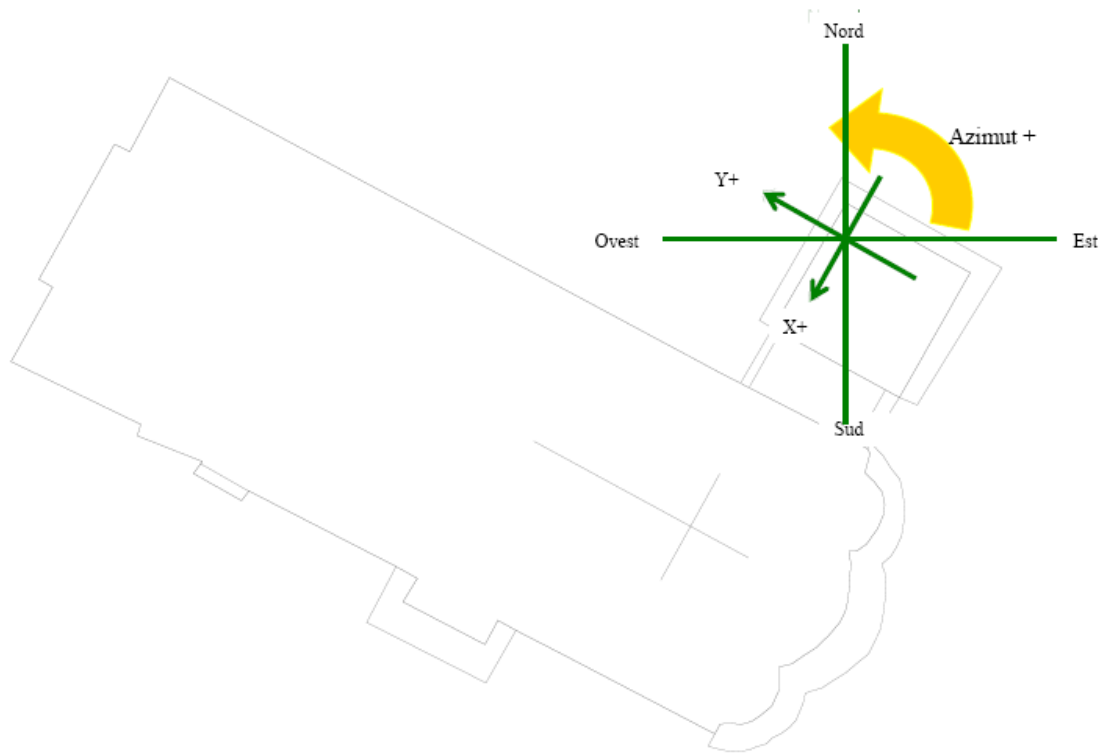


FIG.98 – Orientamento sistema di riferimento relativo del pendolo rispetto al nord geografico

L'orientamento del sistema di riferimento relativo, su cui si basa il pendolo, prevede un asse delle ascisse parallelo al lato ovest con direzione positiva verso sud e un asse delle ordinate parallelo al lato nord con direzione positiva verso ovest. Gli assi cartesiani si scostano da quelli relativi di circa 40° N. L'angolo orizzontale (azimut) calcolato per determinare la rotazione della torre è considerato positivo in senso antiorario. La misura in gradi sessagesimali prevede lo zero sull'asse delle ascisse.

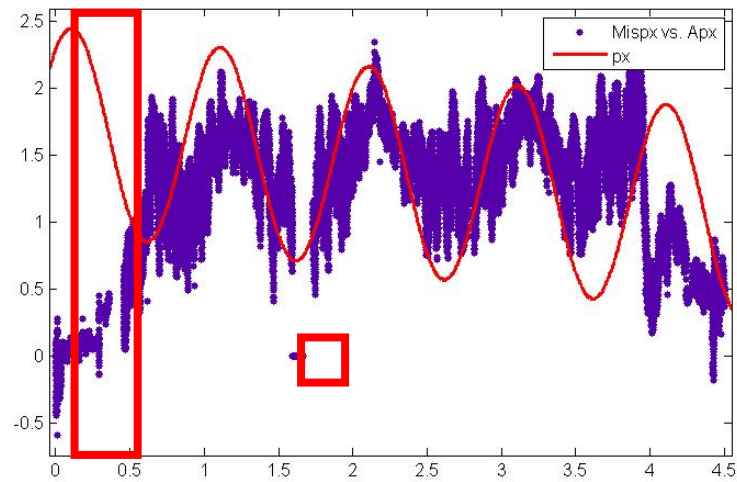


FIG. 99 – Curva di interpolazione dei dati (linea rossa) che mostra una tendenza di movimento della torre in direzione x (sud) quantificata pari a 0.46 mm/anno a partire dal 2003. Nei riquadri in rosso i dati non considerati nell'interpolazione.

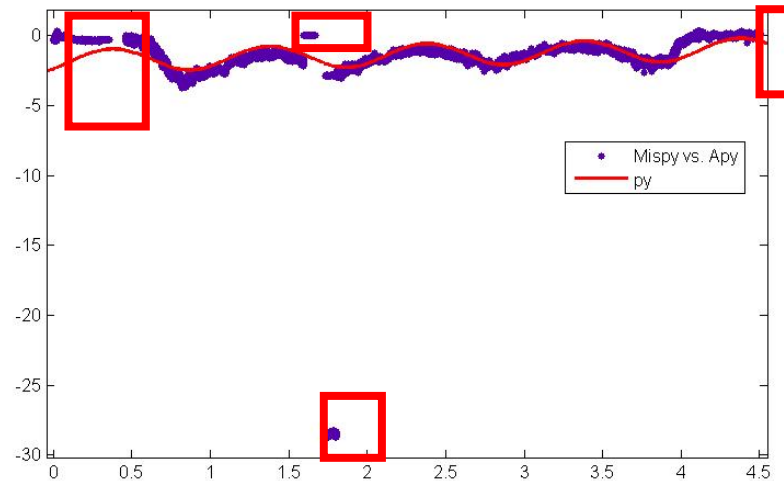


FIG. 100 – Curva di interpolazione dei dati (linea rossa) che mostra una tendenza di movimento della torre in direzione y (ovest) quantificata pari a 0.74 mm/anno a partire dal 2003. Nei riquadri in rosso i dati non considerati nell'interpolazione.

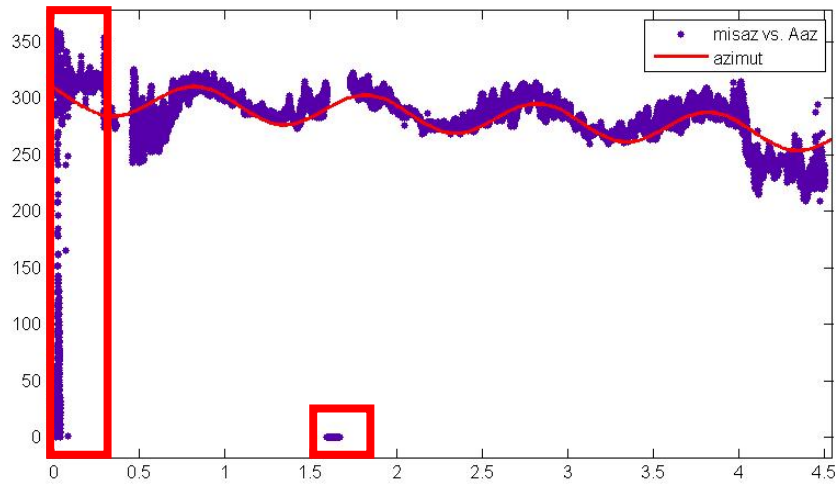


FIG. 101 – Curva di interpolazione dei dati (linea rossa) che mostra una tendenza di rotazione della Torre a partire dal 2003 in direzione sud-ovest. Nei riquadri in rosso i dati non considerati nell'interpolazione

L'analisi di questi primi dati ha evidenziato una tendenza del campanile a muoversi in modo sempre più marcato in direzione sud-ovest. Il motivo può ricondursi all'assenza di collegamenti o ritegni in direzione ovest che lascia più possibilità di movimento la struttura. L'ultimo valore considerato di Marzo 2008 ha mostrato una decrescita dell'azimut da sud a ovest (fig. 99,100,101).

Successivamente al pendolo sono stati analizzati i dati provenienti dagli estensimetri.

I dati raccolti, come nel caso del pendolo non mostrano sincronia (nei giorni e nelle ore) e questo se rende impossibile uno studio specifico sul comportamento dei cedimenti differenziali, non impedisce di compiere analisi qualitative sugli andamenti complessivi dei cedimenti. I primi estensimetri analizzati sono stati quelli della Torre e i dati analizzati arrivano fino al dicembre 2007.

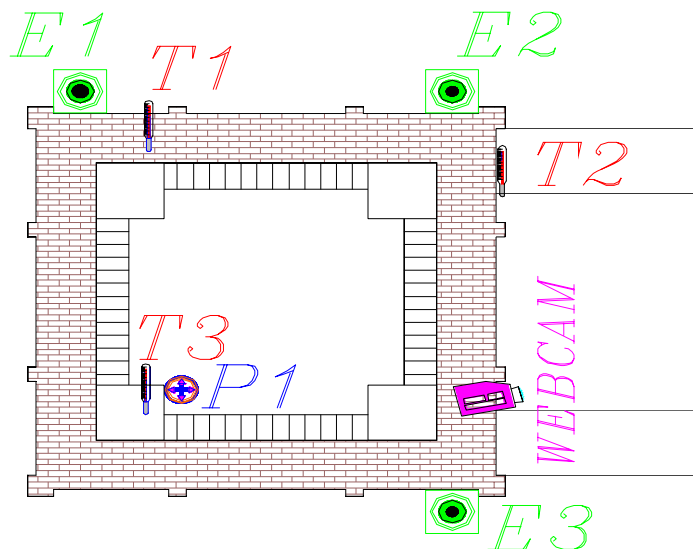


FIG. 102-Posizione degli strumenti sulla torre con le lettere E1, E2, E3 si sono indicati gli estensimetri, mentre con T, 1 e 2 i termometri e con P1 il pendolo

Gli estensimetri E2, E3, sono stati messi lungo il lato sud della fondazione della Torre, mentre E1 è lungo il lato est.

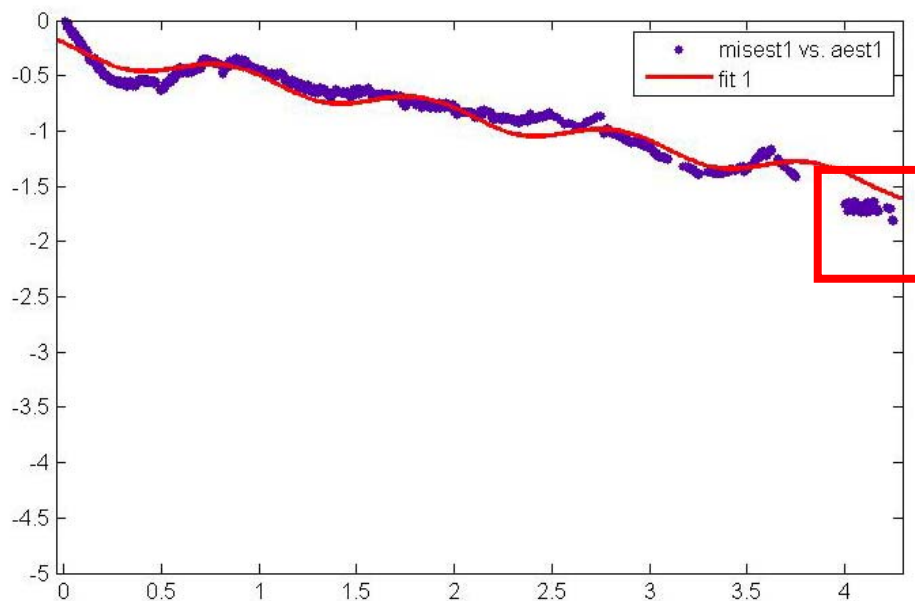


FIG. 103 - Elaborazione dati estensimetro E1. Nel riquadro rosso i dati non considerati

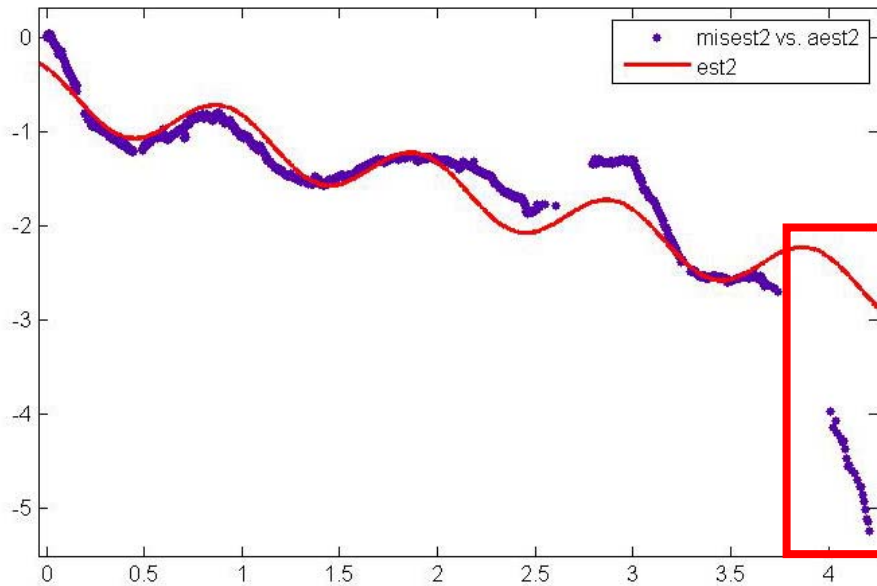


FIG. 104 - Elaborazione dati estensimetro E2. Nel riquadro rosso i dati non considerati.

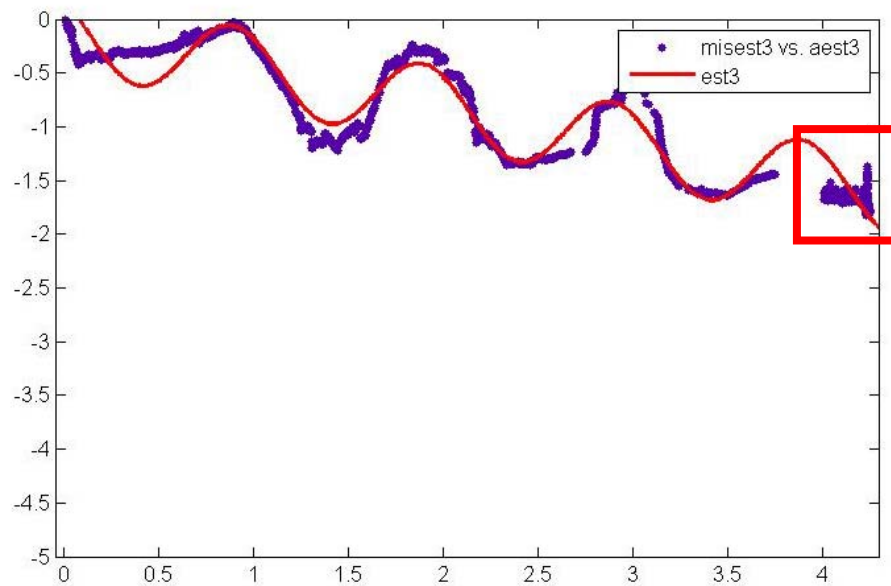


FIG. 105- Elaborazione dati estensimetro E3. Nel riquadro rosso i dati non considerati.

I grafici elaborati che rappresentano nel tempo l'andamento delle quote misurate dai vari estensimetri, hanno permesso di individuare un andamento stagionale di tipo oscillatorio con una tendenza decrescente più evidente negli estensimetri a sud della torre.

- E1 mostra un abbassamento di 0,29 mm/anno (fig. 103)
- E2 di 0,50 mm e E3 di 0,37 mm (fig. 104)
- E3 misura una tendenza inferiore a quella di E2 in misura assoluta presenta un abbassamento maggiore (fig.105).

Dopo gli estensimetri della Torre sono stati analizzati quelli del Duomo: E4, E5 , fissati alle fondazioni della zona absidale.

Come per gli estensimetri della torre, un confronto puntuale delle misure registrate è risultato poco attendibile a causa della differenza di tempi e giorni di registrazione. È stato comunque possibile realizzare uno studio sull'andamento qualitativo degli abbassamenti delle fondazioni (pur considerando problemi di funzionamento iniziale nell'estensimetro E4).

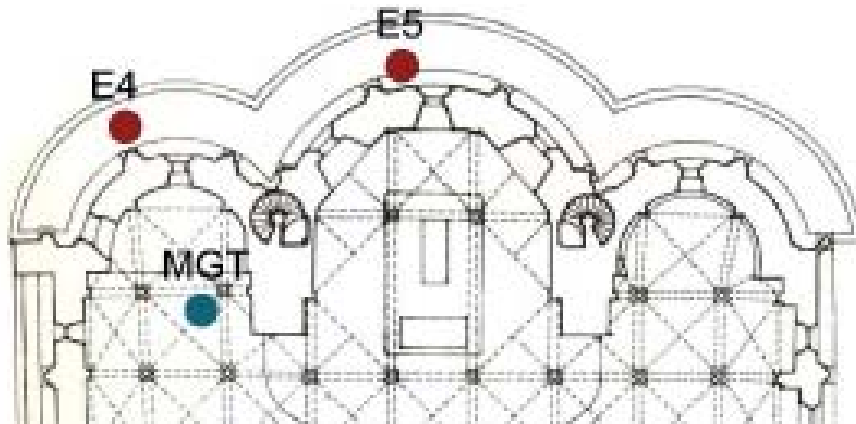


FIG. 106 - Posizione degli estensimetri E4 ed E5 della zona absidale del Duomo.

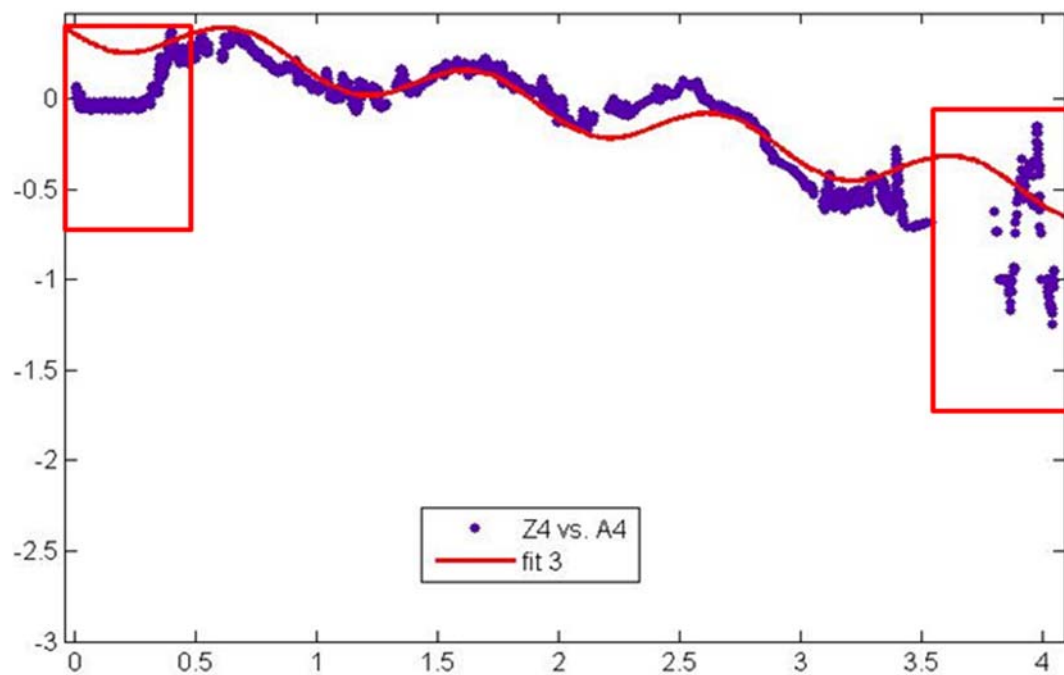


FIG. 107 - Elaborazione dati estensimetro E4. Nel riquadro rosso i dati non considerati.

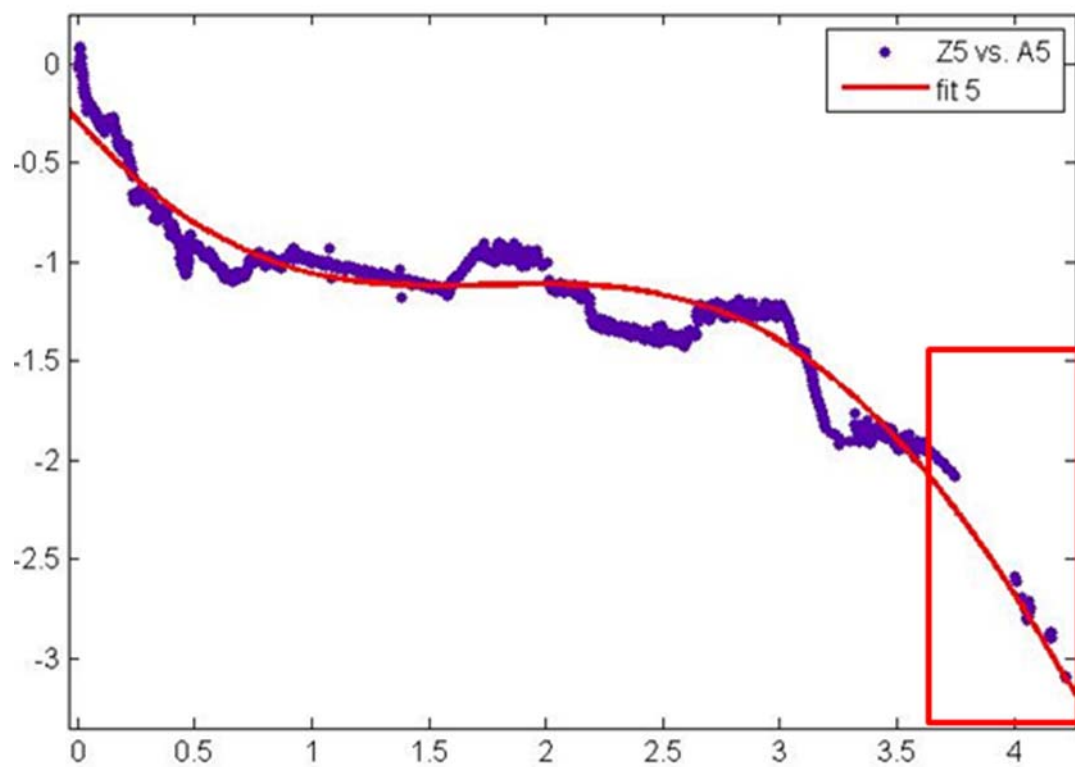


FIG. 108 - Elaborazione dati estensimetro E5. Nel riquadro rosso i dati non considerati.

L'andamento degli abbassamenti registrato risulta di circa 0.77 mm /anno nel caso dell'estensimetro E5 (fig.108) e di 0,23 mm/anno nel caso dell'estensimetro E4 (fig. 107). Nella consapevolezza dei problemi di misurazione (denunciati dalla ditta che ha installato gli strumenti) si è comunque rilevato un meccanismo di consolidamento non ancora esaurito alla base delle fondazioni del Duomo.

Gli ultimi dati a disposizione elaborati sono stati del misuratore di giunto biassiale MGB3 posizionato in una lesione in zona presbiterale sopra all'arco che divide longitudinalmente la navata centrale da quella a occidentale.

I dati forniscono valori positivi in caso di apertura della lesione e valori negativi in caso di chiusura. I dati elaborati per il misuratore di giunto MB3 hanno mostrato una tendenza dal momento dell'installazione di continua apertura con un incremento annuo di circa 0,021mm /anno. Questo valore che non ha significati particolarmente allarmanti testimonia comunque una tendenza all'apertura della lesione legata sicuramente ad un cedimento fondale della parte absidale.

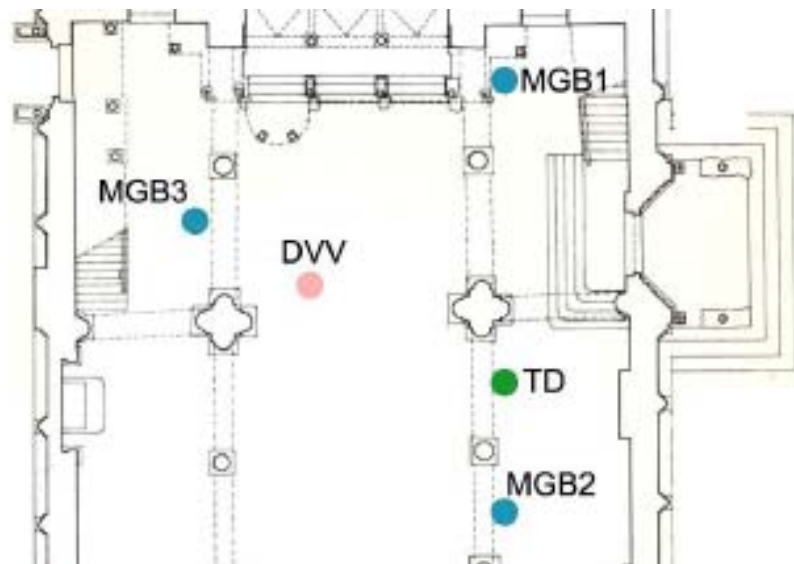


FIG. 109- Posizione del misuratore di giunto biassiale MGB3

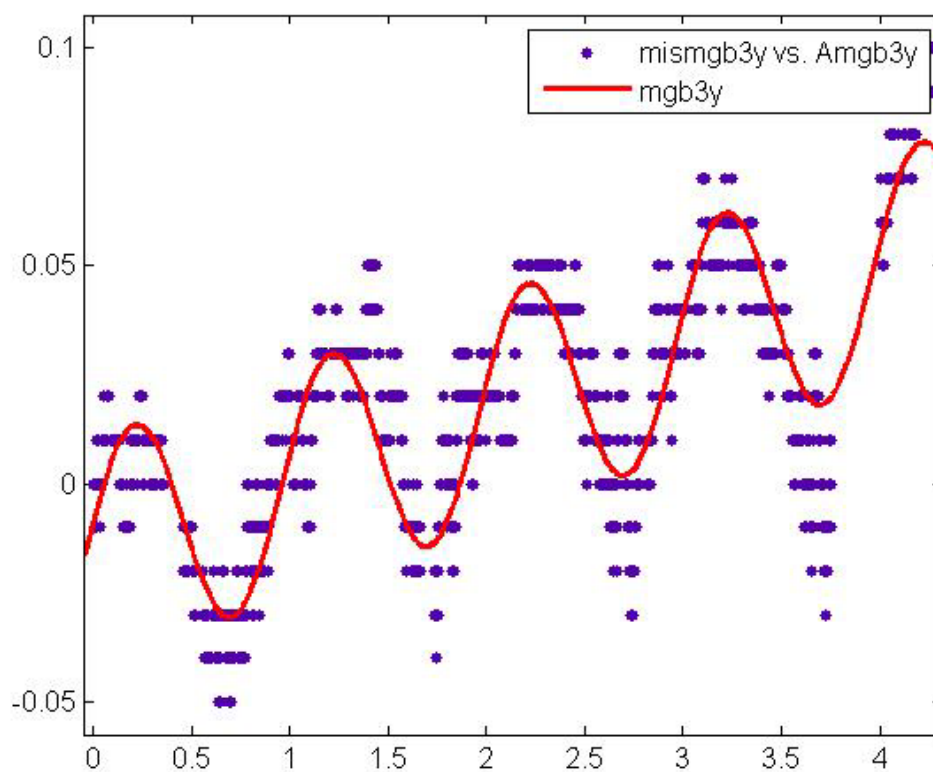


FIG. 110 - Elaborazione dati misuratore di giunto biassiale MB3

Un altro dato interessante è stato lo studio del comportamento ciclico giornaliero per capire gli spostamenti della orre in un giorno. L'osservazione è che pur non tornando mai al punto di partenza la Torre ogni giorno gira su se stessa con spostamenti millimetrici. Come si esemplifica nel grafico sottostante .

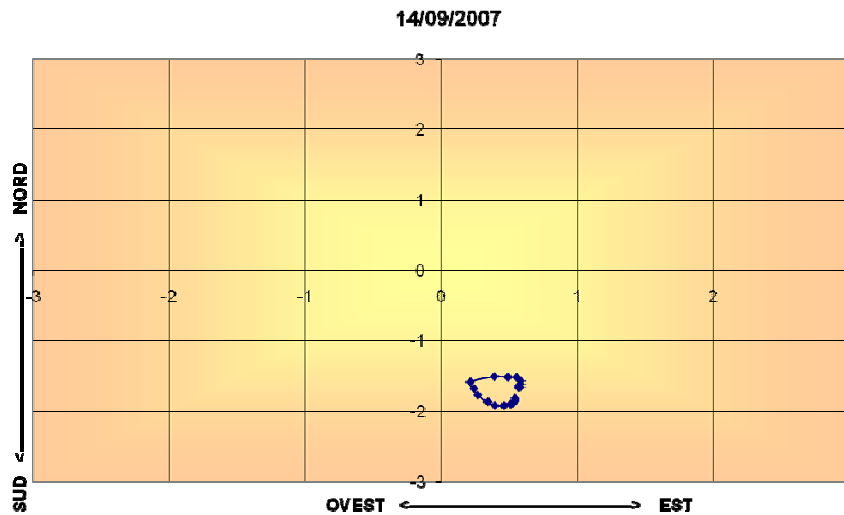


FIG. 111 - Grafico degli spostamenti del pendolo registrati in un giorno di settembre.

Complessivamente e in sintesi la lettura dei dati dall'ottobre del 2003 al dicembre 2007 ha messo in evidenza i seguenti fenomeni .

Si rileva un diffuso cedimento fondale sia nel Duomo che nella Torre, che non tende a stabilizzarsi ma piuttosto ad incrementare.

Il dato significativo è quello che i valori maggiori di cedimento sono quelli correlati agli strumenti installati vicini allo spazio che intercorre tra i due monumenti, segno di un influenza reciproca a livello fondale.

Inoltre i dati prodotti dal pendolo permettono di osservare abbastanza chiaramente lo spostamento della Torre in prevalente direzione sud ovest.

PARTE QUARTA

ALTRI PUNTI DI PARTENZA PER IL FUTURO

Conclusioni

Limitando le conclusioni al caso applicativo di Modena, in quanto esemplare nell'ambito del problema di interazione tra suolo e struttura negli edifici monumentali, dalle analisi e dagli approfondimenti storici emergono una serie di considerazioni che da un lato concludono questa trattazione e dall'altro aprono nuovi scenari e problematichità ancora irrisolte.

L'analisi della storia che coinvolge la Torre e il Duomo di Modena ha evidenziato la permanenza di uno stretto rapporto, sia dal punto di vista del processo costruttivo, sia dal punto di vista strutturale.

Questa relazione, concretizzata dai collegamenti costituiti dagli archi d'unione tra i monumenti e dal terreno fondale, ha prodotto sulle strutture effetti positivi ed effetti negativi.

Uno degli elementi fondamentali di questo rapporto è che da sempre è in atto un processo di inclinazione della Torre verso il Duomo.

L'unico effetto positivo della relazione consiste nel fatto che tale rapporto ha sicuramente rallentato il processo di inclinazione della Torre in direzione del Duomo. Questo effetto positivo è stato ed è attualmente garantito dalla presenza degli archi di collegamento poiché tali archi contrastano la spinta della Torre.

Questa considerazione è rilevante poiché la solidità degli archi è strategica nella complessità del sistema monumentale.

Molteplici ed articolate sono invece le conseguenze negative nel rapporto tra Torre e Duomo.

In parte dovute a relazioni di tipo fondale e in parte dovute a relazioni di tipo superficiale.

A livello fondale è netta l'azione di trascinamento della Torre nei confronti del Duomo. Ma al tempo stesso è stato verificato che la presenza della Cattedrale influisce in maniera determinante principalmente sulla direzione dell'inclinazione della Torre.

Si è cioè di fronte ad una relazione biunivoca in termini differenziati. Da una parte agisce una forza di trascinamento e dall'altra si risponde determinando la direzione del processo di inclinazione.

A livello superficiale, la già menzionata (positiva ai fini del rallentamento del processo di inclinazione) è però all'origine di un altro problema. Gli archi infatti sono la causa di importanti lesioni lungo i muri perimetrali del Duomo. Si tratta principalmente di lesioni fuori piano.

E questo è un fattore che accentua gli effetti già prodotti autonomamente dai cedimenti.

L'analisi del quadro fessurativo della Torre ha messo alla luce diverse letture dei meccanismi di collasso.

In particolare si identificano con una certa chiarezza due situazioni.

Da un parte molte lesioni della Torre (aggravate dall'inclinazione della stessa) sono riconducibili a fenomeni dinamici indipendenti dalla presenza del Duomo.

Da un'altra part talune tipologie di lesioni fanno pensare ad altre cause, ed in particolare a fenomeni localizzati dovuti alla concentrazione di tensioni di compressione.

Le lesioni che si riferiscono al Duomo hanno aspetto diverso. Ma soprattutto, sulla base delle analisi compiute, sono riferibili a fenomeni di natura non omogenea: a cedimento fondale, ad effetti di ribaltamenti fuori dal piano e ad eventi sismici.

Le lesioni da cedimento fondale rappresentano sicuramente quelle che si osservano con maggiore frequenza ed hanno una diffusa localizzazione. Le altre o sono di minore rilevanza e comunque localizzate a livello delle volte.

La tipicità dei meccanismi di collasso propri delle chiese si evidenzia sulla facciata ove il processo è quello tendenziale del ribaltamento della stessa.

Interessante è comunque notare che anche nella zona della facciata, in termini contigui, si riscontra un abbassamento di tipo fondale. Non è da scartare l'ipotesi (fermo rimanendo le autonomie delle cause originarie) di un collegamento tra i due fenomeni, nel senso che il cedimento fondale possa facilitare il tendenziale ribaltamento della facciata.

I cedimenti di tipo fondale sono evidenti anche in zona presbiterale.

Si tratta di cedimenti non omogenei, diversi per intensità e diffusi nell'area perimetrale del presbiterio stesso.

Ed anche in questo caso si ripresenta un rapporto sequenziale: la presenza del collegamento con la Torre accentua ulteriormente l'apertura delle lesioni prodotte dalla spinta trasmessa dagli archi.

Anche la zona della cripta manifesta cedimenti. Simmetrici sia lungo il lato settentrionale che quello meridionale. Più evidente e marcati in direzione sud.

Nella cripta, le formazione di lesioni nelle colonne, nei punti di giunzione con la base e il capitello, rappresentano un evento atteso. E' infatti giustificabile che in questi punti si generino le maggiori concentrazioni di tensione.

Un altro aspetto rilevato che riveste una certa importanza è quello relativo al comportamento delle navate. Nel caso oggetto di studio si è riscontrato che le navate nella zona centrale presentano delle deformazioni curvilinee concave.

Questo è fenomeno solitamente associato alla spinta degli archi e sicuramente anche nel caso osservato tale azione è verosimile.

Vi è però da considerare che questo fenomeno è anche strettamente connesso con la lunghezza stessa della navata.

Nel senso che, in assenza di elementi che adeguatamente contrastino le spinte degli archi (catene), maggiore è la lunghezza della navata, e più dunque ci si allontana dalle zone terminali dell'edificio, più il fenomeno tende ad accentuarsi.

Considerazioni di rilievo sono anche da ricollegare ai risultati del sistema di monitoraggio, soprattutto in chiave di impostazione di un piano di restauro.

Il sistema di monitoraggio negli ultimi cinque anni ha manifestato una netta tendenza delle Torre a muoversi in direzione sud-ovest ovvero verso il Duomo.

Inoltre il diffuso cedimento fondale sia nel Duomo che nella Torre, non tende a stabilizzarsi ma piuttosto ad incrementare e i cedimenti maggiori sono localizzati presso gli strumenti installati vicini allo spazio che intercorre tra i due monumenti.

La prima deduzione importante è che nel tempo molte questioni critiche che riguardano le strutture del Duomo hanno una diretta relazione con la Torre. E di conseguenza sia le analisi sia le prospettive devono assolutamente essere lette in termini integrati.

Da ultimo non si può dimenticare, anche sulla scorta dell'esperienza compiuta, l'importanza del calcolo numerico nell'ambito monumentale. Ovviamente non si tratta della stessa rilevanza che il calcolo numerico oggi assume nella moderna tecnica delle costruzioni, ove in

effetti esiste una forte correlazione tra la qualità dei materiali usati in termini di proprietà e di comportamenti e la possibile simulazione attraverso il calcolatore.

Può essere rilevante il calcolo numerico anche per il caso degli edifici monumentali se lo si considera uno strumento di supporto alla conoscenza delle situazioni statico strutturali. Da tale punto di vista la modellazione può fornire importanti risultati quando è necessario confermare alcune intuizioni o ipotesi formulate durante la lettura dello stato di conservazione dell'edificio, così come lo strumento può agire da supporto per tentare di offrire una spiegazione a fenomeni strutturali apparentemente irrisolti.

Questioni aperte

Alla luce delle criticità individuate e delle conclusioni tratte si aprono nuovi scenari sullo studio dei monumenti, e si aprono nuove prospettive e piste di lavoro sullo studio dei monumenti e si possono avanzare nuove ipotesi di ricerca su problemi che allo stato attuale non sono stati ancora risolti.

La questione dell'analisi degli effetti della spinta della Torre sul Duomo merita certamente approfondimenti.

Lo strumento della modellazione numerica necessita di un affinamento, in particolare riferito ai legami costitutivi implementati.

Se fossero stati disponibili dati recenti in grado di essere utilizzati per la definizione corretta di un modello a legame costitutivo elasto - plastico sicuramente noi oggi avremmo informazioni più approfondite e complete anche sulla spinta della Torre sul Duomo.

Il sistema di monitoraggio, con il quale è stato possibile determinare i movimenti della Torre e del Duomo, è sicuramente adeguato per quanto riguarda la tipologia della strumentazione a cui è collegato. È anche vero però che in casi così complessi dove è necessario sempre avere informazioni senza soluzioni di continuità il sistema di monitoraggio deve poter contare su una copertura continua dal punto di vista dell'acquisizione dei dati (l'esempio di Pisa da questo punto di vista insegna). Nella specificità dello studio in oggetto questa parziale adeguatezza del sistema di monitoraggio ha impedito la continuità nella produzione dei dati e ha influenzato in termini non rilevanti. Ma nella prospettiva di un monitoraggio di lungo periodo questo deficit potrebbe anche condurre ad inficiare eventuali proiezioni.

Anche con questo studio rimane aperto il problema della disponibilità di rilievi aventi caratteristiche pienamente utilizzabili dal punto di vista della diagnostica e del calcolo numerico. Sono stati infatti utilizzati i rilievi più recenti pubblicati nel 1984 sicuramente validi per la descrizione delle geometrie. Ciò che è mancato è l'acquisizione di informazioni in grado di giustificare in modo inequivocabile i meccanismi di collasso dedotti dalla lettura del quadro fessurativo. Nel caso di Modena sta per essere colmata. Resta comunque il problema del passaggio di trasformazione dei dati acquisiti attraverso questa nuova metodologia di rilievo in informazioni. Ovvero sarà necessario, all'interno di una enorme quantità di dati teoricamente disponibili, riuscire ad individuare quali saranno le effettive necessità informative e quali dati disponibili possono soddisfare questa esigenza.

Rimane un problema tipico negli edifici monumentali: l'approfondita conoscenza della struttura muraria. Sono note da una parte le difficoltà ad attivare saggi esplorativi sulla muratura e sono note anche le difficoltà che ancora permangono nell'approntare una strumentazione non invasiva per raggiungere questo obiettivo. Per altri versi, dato e non concesso che si possa giungere ad una soluzione, questa conoscenza di per se è ancora insufficiente per inquadrare complessivamente diversi problemi da quelli della resistenza a quelli di una uniforme composizione muraria su tutta la struttura. Occorre però considerare obiettivamente, senza voler generalizzare, che in alcune specifiche situazioni i problemi di consolidamento strutturale hanno fondamentale necessità di avvalersi di conoscenze sulla esatta composizione muraria.

BIBLIOGRAFIA RAGIONATA

Repertorio delle fonti bibliografiche e iconografiche

INTRODUZIONE

MARCO VITRUVIO POLLIONE, *De architectura*, I sec a.C., trad it Silvo Ferri, ed RCS libri s.p.a., Milano, 2002

JEAN RONDELET, *Traité théorique et pratique de l'Art de Bâtir*, chez l'Auteur, enclos du Panthéon, Paris, 1802-1817, trad. it. *Trattato teorico e pratico sull'arte di costruire*, a cura di Basilio Soresina, Tip. Caranenti, Mantova, 1831-1835

EUGENE EMMANUEL VIOLLET LE DUC, *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle* Paris, 1856 trad it *L'architettura ragionata Estratti dal Dizionario : costruzione, gusto, proporzione, restauro, scala, simmetria, stile, unita'*; Saggio introduttivo, commento e apparati di M. Antonietta Crippa, Jaca Book, Milano, 1982

EUGENE EMMANUEL VIOLLET LE DUC *Debats et Polemiques a propos de l'insegnement des arts du dessin in L'insegnement des arts. Il Y quelque chose a faire*, Gazzette des Beaux Art XII maggio 1862, parte III

LEON BATTISTA ALBERTI, *De re aedificatoria*, 1452, testo latino e traduzione di Giovanni Orlandi, con introduzione e note di Paolo Portoghesi, Edizioni Il Polifilo, Milano, 1966

VINCENZO SCAMOZZI, *L'idea dell'architettura Universale*, a cura di Stefano Tigozzi e Luigi Masieri, tipografia Borroni e Scotti, Milano 1538

LE CORBUSIER *Vers une Architecture*, 1923, articoli raccolti dell'Esprit Nouveau, trad. it. *Verso una architettura* a cura di Pierluigi Cerri e Pierluigi Nicolini, Longanesi, Milano, 1973

EUGENE EMMANUEL VIOLLET LE DUC, *Entretiens sur l'architecture* 1858-1872, trad. it. *Conversazioni sull'architettura selezione e presentazione di alcuni "Entretiens"*, a cura di Maria Antonietta Crippa, Jaca Book, Milano, 1990

BRUNO ZEVI, "Saper vedere l'architettura" Venezia, Einaudi, 1948, ristampa 2007, 193 p.ill.;

LEONARDO BENEVOLO, *Introduzione all'architettura*, Editori Laterza, Roma, 1960, pp 85-124

LEWIS MUMFORD, *The City in History. Its Origins, Its Transformations and its prospects*, New York 1961, ed it. *La città nella Storia*, Edizioni di Comunità, Milano 1963 (Etas Kompass, Milano 1967; Bompiani, Milano 1981)

ALISTAR C. CROMBIE, *Da S. Agostino a Galileo*, trad.it., p. 153-154, Milano, 1970.

EDUARDO TORROJA, *Razon y ser de los tipos estructurales*, Spagna 1975, trad it. *La concezione strutturale : logica ed intuito nella ideazione delle forme*, a cura di Franco Levi, CittaStudi, Milano 1995.

EDOARDO BENVENUTO, *La scienza delle costruzioni e il suo sviluppo storico*, edizioni Sansoni, Firenze 1981

ROLAND BECHMANN, *Le radici delle cattedrali, l'architettura gotica espressione delle condizioni dell'ambiente* trad it Giangiacomo Amoretti ed Marietti, Casale Monferrato, 1984

GIOVANNA BIANCHI, *L'analisi dell'evoluzione di un sapere tecnico, per una rinnovata interpretazione dell'assetto abitativo e delle strutture edilizie del villaggio fortificato di Rocca S.Silvestro*, in *Acculturazione e mutamenti. Prospettive nell'archeologia medievale del Mediterraneo. VI ciclo di lezioni sulla ricerca applicata in archeologia* a cura di E. Boldrini e R. Francovich Certosa di Pontignano (SI)-Museo di Montelupo Firenze, 1993

GIOVANNA BIANCHI, *L'analisi delle murature*, in G. Bianchi, E. Boldrini, D. De Luca, *Indagine archeologica a Rocchette Pannocchieschi-Rapporto preliminare*, "Archeologia Medievale", 1994, XXI, pp. 251-268

GIOVANNA BIANCHI, *Segesta: l'analisi delle tecniche costruttive dell'area del castello e della moschea*, "ASNP", 1995

SALVATORE DI PASQUALE, *L'arte del costruire, tra conoscenza e scienza*, Marsilio Editore, Venezia 1996, pp.19-184

PIERLUIGI NERVI *Scienza o arte del costruire? : caratteristiche e possibilità del cemento armato*, introduzione di Aldo Rossi, Cittastudiedizioni, Milano, 1997

DANIELE FERRETTI, IVO IORI, MARCO MORINI "La stabilità delle strutture : il caso delle costruzioni in cemento armato", McGraw-Hill, 2002, 341 p. ill. ; 24 cm.

JAMES S. ACKERMAN, *Architettura e disegno : la rappresentazione da Vitruvio a Gehry*, Trad. it. di Lara Bianciardi, Nicoletta Marconi, Margherita Zizi Electa, Milano, 2003. - 273 p. : ill. ; 24 cm.

CARLO BLASI, EVA COISSON, *Sesti e dissesti, in le forme dell'architettura nella tradizione, esperienze a confronto*, a cura di, Paolo Bertozzi, Agnese Ghini, Luca Guardigli, ed Franco Angeli s.r.l., Milano 2005, pp 235-252

PARTE PRIMA

D. LENCZNER, *Design of creep mechanism for brickwork*. in *Proceedings of the British Masonry Society*, n. 4, 1965, pp. 1-8.

D. LENCZNER: *Creep in model brickwork. Designing engineering and construction with masonry products*, ed. F.B. Johnson, Gulf Publishing Co., Houston, Texas, 1969, pp. 58-67

JAEGER JC, COOK NG. *Fundamentals of rock mechanics*. 2nd ed. London: Chapman & Hall; 1976

FRANCO BERGONZONI, *Esami di laboratorio su murature medioevali*, INARCOS, N.383, 1977

J. FRANCALANCIA, *Le fondazioni nella città di Venezia*, Atti XIV Conv. Naz. di Geotecnica, Firenze 1980

N. G. SHRIVE., G.L. ENGLAND, *Elastic creep and shrinkage behaviour of masonry*, in *International Journal of Masonry Construction*, vol. 1, n. 3, 1981, pp. 103-109

Z.P. BAZANT, *Size effect in blunt fracture: on concrete, rock, metal*, Journal of Engineering: Mechanics, 1984, Vol. 110, N04.

D P ABRAMS, J L NOLAND, R H ATKINSON, *Response of clay-unit masonry to repeated compressive forces*, Proceedings of the 7th IBMaC. Melbourne, Australia. (1985) 565-576

LUIGIA BINDA, ANNA ANZANI, G. GIODA, *An analysis of the time-dependent behaviour of masonry walls.*, in atti del 9th International Brick/Block Masonry Conference, Berlin, vol. 2, 1991, pp. 1058-1067

GIULIO BALLIO "Il consolidamento della torre Fraccaro a Pavia" L'edilizia Anno V-n°10 1991

CLAUDIO MODENA, PIER PAOLO ROSSI, Valutazione delle condizioni di stabilità e consolidamento delle torri in muratura, Materiali e Strutture, "L'ERMA" di Bretschneider Ed, Roma, 1992 anno II, numero 3, pp 97-110

G. BARTOLI, CARLO BLASI, V. GUSELLA, *Il sistema di monitoraggio della cupola del Brunelleschi: analisi dei dati rilevati (1988/1990)*, IV National Congress ASSI R C CO, Prato, Italy, ed Edizioni Kappa, Rome, (1992), pp 445-455

LUIGIA BINDA, GIANFELICE GATTI, GUIDO MANGANO, CARLO POGGI, GIANNANTONIO SACCHI LANDRIANI, *Studio sui materiali e sulla struttura della torre civica di Pavia*, in TeMa, Tecniche e Materiali, vol 1 1993

- LUIGIA BINDA, ANNA ANZANI**, *The time-dependent behaviour of masonry prisms: an interpretation*. The Masonry Society Journal, vol. 11, n. 2, 1993, pp. 17-34
- ANNA ANZANI, LUIGIA BINDA**. *The time-dependent behaviour of masonry prisms: an interpretation*. Masonry Soc J 1993;2(11):17-34
- G. BATOLI, CARLO BLASI** *Il Sistema di Monitoraggio della Cupola di S Maria del Fiore: Problematiche Relative al Funzionamento degli Strumenti ed alla Gestione dei Dati*, in *Monitoraggio delle Strutture dell'Ingegneria Civile*, ed. Malerba P G p 183-202, CISM (Centre International des Sciences Mecaniques), Udine 1995
- ANNA ANZANI, LUIGIA BINDA, G. MELCHIORRI**. *Time Dependent Damage of Rubble Masonry Walls*. In *Proceeding of the British Masonry Society*, No 7, ed HWH Wert, (1995) pp. 341-351
- ALBERTO CARPINTERI, B. CHIAIA**, *Fracture Mechanics of concrete structure-CoS-2*, ETH, Zurich, Wiumann F.H. (Ed.), Aedificatio Publ., Freiburg, 1995
- ANNA ANZANI, LUIGIA BINDA, MELCHIORRI G.** *Time dependent damage of rubble masonry walls*. Proc Brit Masonry Soc London, UK 1995;7(2): 341-51
- PIER PAOLO ROSSI** *Possibilities of the experimental techniques for the structural analysis of historical constructions*, Proc. Int. Seminar on Structural Analysis of Historical Construction. Barcellona Spain, 1995
- E. BERTOCCHI, D.C. TRUSSARDI**, *Studio delle vicende storiche e dei quadri fessurativi di torri in muratura per la valutazione della loro sicurezza sotto carichi ciclici e di lunga durata*, Tesi di Laurea (A.A.: 95/96).
- F. BALSAMO**, *La Chiesa Madre di Noto*, in *Quaderni del Mediterraneo*, n. 4, Siracusa, 1996
- LUIGIA BINDA**. GIULIO Mirabella Robeni, C.Poggi, *Il campanile del Duomo di Monza: valutazione delle condizioni statiche*, Editoriale L'Edilizia, 1996, n 718, 44-53
- LUIGIA BINDA, GIULIO MIRABELLA ROBERTI, C. POGGI**, *Il campanile del duomo di Monza: valutazione delle condizioni statiche*, L'Edilizia, 1996, N° 7-8.
- CRISTIAN ROSSI, PIER PAOLO ROSSI & E. VIO**, *Monitoring system of St Mark's Basilica in Venice Analysis and interpretation of the data*. prot. Int. Conf. Napoli, 1996
- PIER PAOLO ROSSI, S. ZALDIVAR GUERRA**, *Testing and monitoring for the restoration of the Mehtropolitan Cathedral Mexico City* prot. Int. Conf. Napoli, 1996
- GIULIO MIRABELLA ROBERTI, ANNA ANZANI, LUIGIA BINDA** *Experimental investigation into the effects of persistent and cyclic loads on the masonry of ancient towers*. In: Forde MC, editor. Seventh international conference on structural faults and repair, vol. 3. Edinburgh: Engineering Technics Press; 1997. p. 339-47
- PIER PAOLO ROSSI**, *The importante of monitoing for structural analysis of monumental bulding*, Keinote lecture International colloquium , Bergamo 1997
- PIER PAOLO ROSSI**, *The importance of monitoring for structural analysis of monumental buildings*. Keynote lecture, International Colloquium IABSE, Bergamo, 1997
- DR GIULIO MIRABELLA ROBENI, PROFESSORESSA LUIGIA BINDA, DR ANNA ANZANI**, *Experimental investigation into the effects of persistent and cyclic loads on the masonry of ancient towers*, in *Proceedings of the Seventh International Conference on Structural Faults and Repair*, structural fault and repair, 1997
- LUIGIA BINDA, E. BERTOCCHI, D.C. TRUSSARDI**, *Torri in Muratura: una metodologia per la valutazione della sicurezza*, in *Recupero & Conservazione*, Anno III, Ottobre/Novembre, pp. 26-34, 1997,
- GIOVANNI CARBONARA**, *Avvicinamento al restauro : teoria, storia, monumenti*, Liguori, Napoli, 1997
- N.G. SHRIVE SAYED, E.Y AHMED., D. TILEMAN**: *Creep analysis of clay masonry assemblages*, in *Canadian Journal of Civil Engineering*, n. 24, 1997, pp. 367-379
- DANIELE FERRETTI, IVO IORI, DANIELE RIVA**, *Un approccio allo studio della stabilità delle antiche torri: Il crollo della Torre civica di Pavia*, in *Studi e ricerche n°19, Scuola di specializzazione in costruzioni di cemento armato*, ed. Ital cementi s.p.a., Bergamo 1998

AVORIO, A BORRI; G CANGI, *Meccanica del danneggiamento negli edifici storici: dall'osservazione diretta all'interpretazione strutturale*, SEMINARIO INTERNAZIONALE WORKSHOP ON, *Il Comportamento Sismico del Patrimonio Edilizio nei Piccoli Centri Storici*, Seismic Performance of Built Heritage in Small Historic Centers 22-24 Assisi-99 Aprile 1999

ANNA ANZANI, LUIGIA BINDA, GIULIO MIRABELLA ROBERTI *The Role of Heavy Persistent Actions into the Behaviour of Ancient Masonry*, in 8th International Conference on Structural Faults and Repair-99, CD-ROM, 1999, London

GIULIO MIRABELLA ROBERTI, LUIGIA BINDA, ANNA ANZANI, *Numerical simulation of time dependent masonry behavior*, 8NAMC (North American Masonry Conf), Austin, USA, 1999, p 818-829

LUIGIA BINDA., C. TIRABOSCHI, R.: TONGINI FOLLI, *On site and laboratory investigation on materials and structure of a Bell-Tower in Monza*, in atti del 2nd International RILEM Conference on Rehabilitation of Structures, Highett, Australia, 1998, pp. 542-556, e *Int. Zeitschrift für Bauinstandsetzen und baudenkmalpflege*, 6, Jahrgang, Aedification Publishers, Heft 1, 2000, pp. 41-62

LUIGIA BINDA, ANNA ANZANI, GIULIO MIRABELLA ROBERTI *Studies on the mechanical behaviour of masonry and masonry structures : selected papers 1975-2000*, PUBBLICAZIONI Politecnico Di Milano, Milano, 2000

PAPA, ALBERTO TALIERICIO, *Prediction of the evolution of damage in ancient masonry towers*, in *Proc. Int. Symposium 'Bridging Large Spans from Antiquity to the Present'*, Istanbul, 2000, pp. 135-144

ANNA ANZANI, LUIGIA BINDA, GIULIO MIRABELLA ROBERTI, *The effect of heavy persistent actions into the behaviour of ancient masonry*, *Mater Struct* 2000;33:251-61

ANNA ANZANI, LUIGIA BINDA, GIULIO MIRABELLA ROBERTI, *The Effect of Heavy Persistent Actions into the Behaviour of Ancient Masonry*, in *Materials and Structures*, vol. 33, n. 228, 2000, pp. 251-261

ENRICO PAPA, ALBERTO TALIERICIO, GIULIO MIRABELLA-ROBERTI, *A damage model to predict the behaviour of masonry under sustained loading*, *Proc. 12th IBMAC*, Madrid, 2000, vol. III, pp. 1777-1790

ENRICO PAPA, A. TALIERICIO, LUIGIA BINDA, *Creep failure of ancient masonry: experimental investigation and numerical modeling*. In: Brebbia CA, editor. *Seventh SSRMHB*, International conference structural studies, repairs, and maintenance of historic buildings, Bologna, Italy, 2001. p. 285-94

ENRICO PAPA, ALBERTO TALIERICIO, LUIGIA BINDA, *Safety Assessment of Ancient Masonry Tower*, in atti. 2nd Int. Congress Studies in Ancient Structures, Istanbul, Turkey, vol. 1, 2001, pp. 345-354

M.L. BECONCINI, S BENNATI, W SALVATORE, *Structural characterisation of a medieval bell-tower: first historical, experimental and numerical investigations*, III International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, University of Minho, Guimaraes (Portugal), 7th - 9th November 2001, pp, 431-444

CLAUDIO MODENA, M.R. VALLUZZI, R. TONGINI FOLLI, LUIGIA BINDA, *Design Choices and Intervention Techniques for Repairing and Strengthening of the Monza Cathedral Bell*, in atti del congresso Tower, 9th International Conference on Structural Faults and Repair, CD-ROM, London, 2001

ANNA ANZANI, LUIGIA BINDA, GIULIO MIRABELLA ROBERTI, R. TONGINI FOLLI, *A Study of Ancient Masonry Towers Under Heavy Persistent Actions*. 5th Int. Symp. on Computer Methods in structural Masonry (V STRUMAS), Roma, Eds. T.G. Hughes, G.N. Pande, ISBN 0 9510380 2 8, pp.1-8, 2001

LIONELLO, I. CAVAGGIONI, *Il monitoraggio del Campanile di S. Maria dei Frari a Venezia tra conoscenza e conservazione*. ANAGKH 33, Milano, 2002

LUIGIA BINDA, C. TIRABOSCHI, G. BARONIO, *On site investigation on the remainings of the Cathedral of Noto*, in *Constr Build Mater* 2003;17(Special Issue):543-55.

LIONELLO, I. CAVAGGIONI, PIER PAOLO ROSSI, CRISTIAN ROSSI, CLAUDIO MODENA, CASARIN F., G. MARCHI, G. GOTTARDI, A. RAGAZZINI, *Preliminary investigation and monitoring for the design of a strengthening intervention of the Frari basilica, Venice*. 4th Int. Seminar on Struct. Analysis of Hist. Constr. (SAHC), Padova 2004, pp. 1323-1333

A. CARPINTERI, S. INVERNIZZI, G. LACIDOGNA *In situ damage assessment and nonlinear modelling of a historical masonry tower*, SCIENCE DIRECT, 2004

JOSÉ PINA-HENRIQUES, PAULO B. LOURENÇO, LUIGIA BINDA, ANNA ANZANI. *Testing and modelling of multiple-leaf masonry walls under shear and compression*. In Modena C., Lourenço P.B., Roca P., editors. *Proceedings of the fourth international seminar on structural analysis of historical constructions*, Balkema: Leiden (NL); 2004. 1: p. 299–310.

MARIA ROSA VALLUZZI, LUIGIA BINDA, CLAUDIO MODENA, *Mechanical behaviour of historic masonry structures strengthened by bed joints structural repointing*, SCIENCE DIRECT, 2004

AA.VV., *Atlante del restauro*, diretto da Giovanni Carbonara, UTET, Torino, 2004

ALBERTO CARPINTERI, G. LACIDOGNA, *Structural integrity assessment of medieval towers*, in atti del congresso, *Structural Analysis of Historical Constructions*, a cura di Claudio Modena, P. Lourenço & Roca (eds), Taylor & Francis Group, London, 2005

ALBERTO CARPINTERI, G. LACIDOGNA, *Structural integrity assessment of medieval towers*, in atti del congresso, *Structural Analysis of Historical Constructions*, a cura di Claudio Modena, P. Lourenço & Roca (eds), Taylor & Francis Group, London, 2005

ANNA ANZANI, LUIGIA BINDA, MARCIO ANTONIO RAMALHO, ALBERTO TALIERCIO, *Historic multi-leaf walls: experimental and numerical research*, in *Masonry Int* 2005;18(3): 101–14.

A.T. VERMELTFOORT, *“Preservation and stability of industrial masonry chimneys”* in *Structural Analysis of Historical Constructions*, a cura di P.B. Lourenço, P. Roca, C. Modena, London X, Taylor & Francis Group, 2005;

ANDREA CARPINTERI, G. LACIDOGNA, *“Structural integrity assessment of medieval towers”*, in *Structural Analysis of Historical Constructions*, a cura di P.B. Lourenço, P. Roca, C. Modena, London X, Taylor & Francis Group, 2005

AA.VV. *La Torre Restituita. Gli studi e gli interventi che hanno consentito la stabilizzazione della Torre di Pisa*, a cura di Salvatore Settis, Istituto Poligrafico Roma, 2006;

LUIGIA BINDA, JOSÉ PINA-HENRIQUES, ANNA ANZANI, A. FONTANA, PAULO B. LOURENÇO, *A contribution for the understanding of load transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and modelling*, Science Direct, 2006

LUIGIA BINDA, JOSÉ PINA-HENRIQUES, ANNA ANZANI, A. FONTANA, PAULO B. LOURENÇO, *A contribution for the understanding of load-transfer mechanisms in multi-leaf masonry walls: Testing and modeling*, SCIENCE DIRECT, 2006

DANIELE FERRETTI, ZDENĚK P. BAŽANT *Stability of ancient masonry towers: Moisture diffusion, carbonation and size effect*, SCIENCE DIRECT, 2006

M. MARCHI, G. GOTTARDI, A. LIONELLO, *Sulle fondazioni dei campanili di Venezia*, Atti V Convegno Nazionale dei Ricercatori di Ingegneria Geotecnica, Bari 2006, Vol. 1, pp. 177-192

BORTOLO BALDUZZI, DARIO MAZZA, DIEGO PAPIS, CHRISTIAN ROSSI, PIER PAOLO ROSSI *“Experimental and Numerical Analysis for the Strengthening Intervention of the Bell Tower of st. Sisto’s Church in Bergamo”*, *Structural Analysis of Historical Constructions*, a cura di P.B. Lourenço, P. Roca, C. Modena, New Delhi, S. Agrawal (Eds.), 2006;

MARCIO ANTONIO RAMALHO, ALBERTO TALIERCIO, ANNA ANZANI, LUIGIA BINDA, ENRICO PAPA, *A numerical model for the description of the nonlinear behaviour of multi-leaf masonry walls*, SCIENCE DIRECT, 2007

ANNA ANZANI, LUIGIA BINDA, GIULIO MIRABELLA ROBERTI, *Experimental researches into long term behaviour of historical masonry*. In: Binda L., editor. *Learning from failure*. Southampton, UK: WIT Press; 2007 [chapter 2].

ANNA ANZANI, LUIGIA BINDA, E. GARAVAGLIA, *Simple checks to prevent the collapse of heavy historical structures and residual life prevision through a probabilistic model*. In: Luigia Binda, editor. *Learning from failure*. Southampton, UK: WIT Press; 2007. p. 205–23 [chapter 9]

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

Repertorio delle fonti bibliografiche e iconografiche

ANNA ANZANI , ELSA GARAVAGLIA, LUIGIA BINDA *Long-term damage of historic masonry: A probabilistic model* Politecnico di Milano, Department of Structural Engineering, Milano, Italy Received 10 July 2006; received in revised form 19 February 2008; accepted 20 February 2008 Available online 18 April 2008

LUIGIA BINDA, L. SCHUENANS, E. VERTYNGE & S. IGNOUL, D. V. OLIVEIRA & PAULO B. LOURENCO, CLAUDIO MODENA, *Long term compressive testing of masonry- test procedure and practical experience*, in atti del congress, Structural Analysis of Historic Construction, ed D'Ayala & Fodde, Taylor & Francis Group, Bath (London), 2008

LUIGIA BINDA, ANTONELLA SAISI, C. TEDESCHI, *Danneggiamento per elevati sforzi di compressione ai pilastri di alcune chiese*, DIS - Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Politecnico di Milano, Milano

GEMERT, DIONYS VAN SCHUEREMANS, LUC VERSTRYNGE, ELS FIGEYS WINE *Pre-and post collapse emergency interventions an historic load bearing structures - case studies in Belgium*, Seiten:493-512 2008 WTA-Almanach 2008. Bauinstandsetzen und Bauphysik

PAULO B. LOURENCO, *Simulation of size effect in masonry structures*, in Fracture Mechanics of Concrete Structures, AEDIFICATIO Publisher, Freiburg

ELS VERSTRYNGE, SVEN IGNOUL, LUC SCHUEREMANS, DIONYS VAN GEMERT, *Damage accumulation in masonry under persistent loading evaluated by acoustic emission technique*,

PARTE SECONDA, PARTE TERZA

[?]AIMONE, *Relatio translationis corporis sancti Geminiani*, sec XI, a cura di Giulio Bertoni in Ludovico Antonio Muratori, *Rerum Italicarum Scriptores*, ed Città di Castello, 1907, tomo VI, Parte I

TOMMASO SANDONNINI, *Cronaca dei restauri del Duomo di Modena (1897-1925)*, a Cura di Orianna Baracchi Giovanardi, ed AEDES MURATORIANA, Modena, 1983, pp. 281

C. CAVEDONI, *Dichiarazione degli antichi marmi modenesi con le notizie di Modena al tempo dei romani*, Modena, 1828, 52-76

C. BORGHI, *Il Duomo, ossia cenni storici e descrittivi della Cattedrale di Modena*, Modena, 1845.

L. FORNI, *Modena cento anni fa*, Modena, 1845

P. BORTOLOTTI, *Antiche vite di S. Geminiano Vescovo e Protettore di Modena*, Modena, 1886

GIOVANNI MESSORI RONCAGLIA, *Sui restauri del duomo di Modena*, Modena 1878

CARLO BARBERI, *Risposta e rettifica ad alcuni appunti di Giovanni Messori Roncaglia su restauri progettati per la Cattedrale di Modena*, Modena 1878

A.DONDI, *Il Duomo di Modena notizie storiche e artistiche*, Modena, 1896

RAFFAELE FACCIOLI, *Relazione dei lavori compiuti dall'ufficio regionale per la conservazione dei monumenti dell'Emilia dall'anno 1892 al 1897*, Zanichelli ,Bologna, 1898.

ALESSANDRO GIUSEPPE SPINELLI, *I Ristauri del Duomo di Modena*, ne, *La provincia di Modena* nn. 34,35,36,3-4,4-5, e 5-6 Agosto 1898

RAFFAELE FACCIOLI *Relazione dei lavori compiuti dall'ufficio regionale per la conservazione dei monumenti dell'Emilia dall'anno 1898 al 1901*, ed Zanichelli, Bologna 1901

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

Repertorio delle fonti bibliografiche e iconografiche

VINCENZO MAESTRI, *L'architettura del Duomo di Modena e della Torre Ghirlandina*, aggiuntovi in appendice il Tesoro del Duomo, ms. XX sec. Con inserti a stampa, Modena 1905-1907

DI GIOVANNI TERESIO RIVOIRA, *Le origini della architettura lombarda e delle sue principali derivazioni nei paesi d'oltr'Alpe*, Pubblicato da Loescher, Roma, 1908

FRANCESCO CAVANI, *Pendenza, stabilita' e movimento delle torri la Garisenda di Bologna e la Ghirlandina di Modena*, ed Zanichelli, Bologna, 1903

ALESSANDRO GIUSEPPE SPINELLI, *Gli archi fra il Duomo e la Ghirlandina di Modena*, ne *La provincia di Modena* 9-10 luglio, 1903

GIOVANNI NASCIMBENI, *Il duomo di Modena*, Bonomi Editore, Milano, 1913

GIULIO BERTONI, *La Cattedrale modenese preesistente all'attuale. Primo ragguaglio sugli scavi del Duomo. Agosto-Settembre 1913*, Modena, 1914

ARTHUR KINGSLEY PORTER, *Lombard Architecture*, New Haven, Yale Univ. press, 1915

PAOLO EMILIO VICINI, *Regesto della chiesa Cattedrale di Modena*, Roma, 1931

A. BARBACCI, *Il restauro del Duomo di Modena Danneggiato dalla Guerra*, Bollettino d'artes. III; XXXVIII, 1953

CARLO ARTURO QUINTAVALLE, *La Cattedrale di Modena: problemi di romanico Emiliano*, voll.2, Modena 1964-65

ROBERTO SALVINI, *Il Duomo di Modena e il romanico nel modenese*, ed. Cassa di Risparmio di Modena, Modena, 1966.

L. BJERRUM, *Engineering geology of norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings*. Géotechnique, 1967

F. GANDOLFO, *Problemi della cattedrale di Modena*, in *Commentari*, N.S. X XII, 1971, pp.124-155

CRISTINA ACIDINI, LUCIANO SERCHIA, SERGIO PICONI, *I restauri del Duomo di Modena 1875-1984*, in *Lanfranco e Wiligelmo, il Duomo di Modena*, Edizioni Panini, Modena, 1984, p.394, ill

J.E. GARLANGER, *The consolidation of soils exhibiting creep under constant effective stress*. Géotechnique, 1972

P. GALAVOTTI, *Le più antiche fonti storiche del Duomo*, Modena 1972

T. ADACHI, M. OKANO, *A constitutive equation for normally consolidated clay*. *Soils and Foundations*, 1974

MARIA GRAZIA ORLANDINI, *La torre di Modena: la Ghirlandina*, Editore Artioli, Modena, 1975

WILLIAM MONTORSI, *La torre della Ghirlandina: comacini e campionesi a Modena*, ed. Aedes Muratoriana, Modena, 1976.

H. SEKIGUCHI, H. OHTA, *Induced anisotropy and time dependency in clays*. In 9th ICSMFE. Tokyo, 1977, pp. 229-238.

ORIANNA BARACCA GIOVANARDI, *Modena, Piazza Grande*, Modena, 1981

ORIANNA BARACCA GIOVANARDI, *Il Duomo di Modena nel '700 (appendice sui falegnami Manzini)*, in *Deputazione di Storia e Patria per le Antiche provincie Modenesi*, 1982

C. BERTELLI, *Traccia allo studio delle fondazioni dell'arte medievale italiana*, in *Storia dell'Arte* Einaudi, Torino 1983

R. NOVA, *A viscoplastic constitutive model for normally consolidated clays*. In IUTAM Conference on Deformation and Failure of Granular Materials. Delft, 1982. pp. 287-295.

AA. VV., *Lanfranco e Wiligelmo, il Duomo di Modena*, Edizioni Panini, Modena, 1984

R. GRANDI, *I Campionesi a Modena*, in *Lanfranco e Wiligelmo Il Duomo di Modena*, Modena 1984, pp. 545-570

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

Repertorio delle fonti bibliografiche e iconografiche

- CESARE LEONARDI, MARINA ARMANDI** *Il Duomo di Modena: atlante fotografico*, Edizioni Panini, Modena, 1984
- A. PERONI** *L'architetto Lanfranco e la struttura del Duomo*, in *Lanfranco e Wiligelmo*, ed. Panini, Modena, 1984 pp.141-206
- G. TROVABENE, G. SERRAZANETTI**, *Il Duomo nel tessuto urbanistico. Primi lineamenti per un'indagine sull'evoluzione edilizia cittadina*, in *Lanfranco e Wiligelmo*, ed. Panini, Modena, 1984 pp. 264-274;
- RENATO LANCELOTTA** "Geotecnica"- Bologna : Zanichelli, 1987. - 531 p. : ill.;
- ORIANNA BARACCHI, CARLO GIOVANNINI**, *Il Duomo e la torre di Modena*, ed. Aedes Muratoriana, Modena, 1988
- AA.VV.** *Il Duomo di Modena, Atlante Grafico*, a cura di Adriano Peroni, EDIZIONE PANINI, Modena 1988
- GOLINELLI P., MUZZIOLI G.** (a cura di), *Storia illustrata di Modena, 6, San Geminiano e l'origine della città medievale*, Nuova Editoriale Aiep, Milano 1989
- G. BERGONZINI et al.**, *La successione stratigrafica rilevata presso le absidi del Duomo*, in Modena 1988, pp.463-465.
- S.GELICHI**, *Modena e il suo territorio nell'Alto Medioevo*, in *Modena 1988*, 1988, pp.551-572
- MAURO CREMASCHI GASPERI G.,** *Il sottosuolo della città di Modena, caratteri sedimentologici, geopedologici, stratigrafici e significato paleo ambientale*, in *Modena dalle Origini all'anno mille. Studi di Archeologia e Storia*. Ed. Panini, Modena, 1988, pp. 63-71
- M. CREMASCHI, G. GASPERI**, *Il sottosuolo della città di Modena. Caratteri sedimentologici, geopedologici, stratigrafici e significato paleoambientale*, in *Modena 1988*, I, pp.285 – 305
- CARLO ARTURO QUINTAVALLE**, *Wiligelmo e Matilde*, Modena, 1991
- G.A. DELL'ACQUA**, *I Maestri Campionesi*, Bergamo 1992, pp 37-82
- SISTO MASTRODICASA**, "Dissesti statici delle strutture edilizie, diagnosi-consolidamento, istituzioni teoriche, applicazioni pratiche" Milano, Editore Ulrico Hoepli, 1993, 876p., ill.;
- M. BOUDALI**, *Comportement tridimensionnel et visqueux des argiles naturelles*. PhD Thesis, Université Laval, Québec, 1995
- CARLO VIGGIANI** "Fondazioni" ed. - Napoli : CUEN, 1996. XII, 472 p. : ill.
- N. GIORDANI et al.**, *Controlli archeologici preventivi nell'area urbana di Modena. Il sito della chiesa e del monastero di S. Cecilia*, "Studi e Documenti di Archeologia", VII, pp.57-81. *Lanfranco e Wiligelmo. Il Duomo di Modena*, Modena, 1984. *Modena 1988, Modena dalle origini all'anno Mille. Studi di archeologia e storia*, I-II, Modena, 1993
- ENRICA CERCHI, ANNA LOSI, MIRCA SGHEDONI** *Nuovi dati sul duomo di Modena: gli scavi di via lanfranco in Archeologia medievale in emilia occidentale. ricerche e studi* A cura di Sauro Gelichi Società Archeologica Padana s.r.l. Editrice S.A.P. 1998
- JAQUES HEYMAN**, *Structural Analysis, A Historical Approach*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998
- WILLIAM MONTORSI**, *Il duomo di Modena: 1099-1999 novecento anni dalla fondazione*, Edizioni il Fiorino, Modena, 1999.
- AA. VV.**, *Il Duomo di Modena*, Franco Cosimo Panini, Modena, 1999.
- RENATO LANCELOTTA, JOSÈ CALAVERA**, *Fondazioni*, ed. McGraw-Hill, Milano, 1999
- J. H. YIN, J. GRAHAM**, *Elastic viscoplastic modelling of the time dependent stress-strain behaviour of soils*. Canadian Geotechnical Journal, 1999
- MARIA TERESA COMO**, *Il restauro dei monumenti a torre in muratura*, in *Quaderni di Restauro dei monumenti e di urbanistica dei centri antichi*, Venezia, 2000, Edizioni Scientifiche Italiane, 141 p., ill.;
- LORELLA MONTRASIO** *Cedimenti di fondazioni su sabbia*, Benevento, Hevelius Edizioni, 2001

IL PROBLEMA DELL'INTERAZIONE SUOLO - STRUTTURA PER GLI EDIFICI STORICI:
IL CASO DELLA GHIRLANDINA E DEL DUOMO DI MODENA

Repertorio delle fonti bibliografiche e iconografiche

S.J WHEELER, A. NÄÄTÄNEN, M. KARSTUNEN, M. LOJANDER, *An anisotropic elastoplastic model for soft clays*. Canadian Geotechnical Journal, 2003

M. LIINGAARD, A. AUGUSTESEN, P.V. LADE, *Characterization of Models for Time-Dependent Behavior of Soils*, International Journal of Geomechanics, 2004

AA.VV. *La torre restituita : gli studi e gli interventi che hanno consentito la stabilizzazione della torre di Pisa*, a cura di Salvatore Settis,: Istituto poligrafico e Zecca dello Stato, Libreria dello Stato, Roma, 2005 (stampa 2006). - 3 v. + 20 tav. ripieg. in cartella : ill. ; 30 cm.

CARLO VIGGIANI, *Safety and Use vs. Integrity of Historical Constructions: Conflict or Synergy?*, Structural Analysis of Historical Constructions, a cura di P.B.Lourenco, P.Roca, C. Modena, New Delhi ,S. Agrawal (Eds.), 2006;

MARTINO LEONI & PIETER A. VERMEER, *Un nuovo modello costitutivo anisotropo per il creep nelle argille tenere*, Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2006 - IARG 2006 Pisa, 26 – 28 giugno 2006

P.A.,VERMEER, M. LEONI, M. KARSTUNEN, H.P. NEHER. Modelling and numerical simulation of creep in soft soils. *In* ICMSSE.Vancouver, 2006