

**CLAUDIO GALLI**

Insegna Restauro Architettonico presso l'Alma Mater Studiorum - Università di Bologna. Svolge ricerca nell'ambito della comprensione delle tecniche costruttive storiche e nell'ambito del progetto di restauro architettonico. Ha maturato esperienze nel campo progettuale e di direzione lavori intervenendo su siti archeologici di epoca romana e medievale e restaurando edifici di diverse epoche siti, anche, in aree a rischio sismico.

Miglioramento sismico e ragioni del rilievo critico

Seismic improvement and reasons of incisive survey

Il saggio sviluppa il tema del rapporto che intercorre tra le discipline del Disegno, della Storia e del Restauro. In specie, mediante esempi concreti, analizza la necessità di uno studio integrato al fine di determinare il processo storico – costruttivo che ha caratterizzato la realizzazione della fabbrica, il suo evolversi nel tempo e i dissesti in atto.

Lo scopo è quello di individuare modelli di rappresentazione e tecniche di intervento compatibili con il sistema costruttivo dell'edificio.

The essay expands the connection between Drawing, History and Restoration.

In particular, through real examples, it analyzes the necessity of an integrate study to define the historical-construction process which has characterized the realization of the building, its unfold in time and its instabilities.

The aim is to define representation models and restorative measures compatible with the building system.

Parole chiave: rilievo e consolidamento, rilievo e miglioramento sismico, indice qualità muraria (IQM), chiesa di San Domenico in Ravenna, palazzo Comunale di Mirandola (MO)

Keywords: survey and reinforcement, survey and seismic improvement, Index of Quality of Masonry (IQM), San Domenico Church in Ravenna, Municipality Building in Mirandola (MO)

PREMESSA

La sensibilità maturata nell'ambito del consolidamento e del miglioramento sismico dei beni culturali, recepita dalla recente D.P.C.M. 9-02-2011, richiede un approccio culturale innovativo sempre più orientato alla logica della conoscenza approfondita del monumento.

In conseguenza di tale più raffinato approccio bisogna adottare nuove modalità di rappresentazione, in grado di registrare tanto le informazioni relative alla consistenza e natura costruttiva della fabbrica, con tutte le stratificazioni che la contraddistinguono, quanto i fenomeni di degrado e i cinematismi in atto per risalire alle cause perturbatrici ed ai meccanismi di danno.

La complessità costruttiva e stratigrafica del manufatto, per essere interpretata, necessita oltre che di specifiche indagini dirette, dell'esercizio di modalità rappresentative sempre più aderenti alla realtà storica e tecnica del manufatto, le cosiddette 'tavole tematiche', in grado d'individuare con fedeltà i dati utili ad una valutazione oggettiva dei livelli di conoscenza e dei fattori di confidenza richiamati dalla norma citata. La D.P.C.M. impone un percorso di conoscenza e indagini dettagliate sulle murature e su tutti gli elementi della fabbrica che dovranno poi essere trasferite in modo organico nei grafici per ottenere una visione articolata e al contempo sintetica e sinottica del manufatto. Solo in questo modo potranno essere individuati modelli di comportamento attendibili e aderenti alla specificità del caso in esame.

A tale proposito le tavole tematiche utili a interpretare i caratteri e le peculiarità della fabbrica devono essere necessariamente ampliate per definire la struttura costruttiva e la continuità degli allineamenti murari, sia mediante opportune sezioni trasversali e longitudinali, sia mediante modellazioni tridimensionali in cui compaiano anche le connessioni murarie fra i muri ortogonali e i solai. Il rapporto conoscenza-rilievo dev'essere sviluppato in modo coordinato per giungere a definire, poi, un percorso d'intervento antisismico nella logica della compatibilità fisico-meccanica e nel rispetto dei valori storico-costruttivi della fabbrica.

Lo stesso può dirsi dell'analisi e del rilievo del degrado, la cui forma ed estensione devono essere registrate accuratamente e con dovizia di particolari. Il tema della diagnosi è di frequente collegato, oltre che all'intuizione personale, alla capacità di una rappresentazione tridimensionale dei cedimenti, delle deformazioni e delle lesioni subite che consenta di comprendere in modo

circonanziato le cause che hanno determinato i disastri.

Il presente scritto sviluppa la tematica del rapporto conoscenza-rilievo e definisce in che forma il rilievo debba venire condotto per essere funzionale al progetto di restauro, ovvero si propone di indagare, attraverso casi concreti, i modi d'un rilievo finalizzato al restauro e, in specie, al consolidamento e al miglioramento sismico. Tutto ciò costituisce la base ineludibile per l'agevole costruzione d'un modello di comportamento aderente e congruente alla realtà storico-costruttiva del manufatto che, di conseguenza, consenta di determinare in forma ragionevolmente veloce un eventuale modello matematico.

I casi di studio esaminati, quali la chiesa di San Domenico a Ravenna e il Palazzo Comunale di Mirandola, convincono a proseguire la ricerca in questa direzione intesa a sviluppare anche in ambito strutturale il rilievo inteso come 'edizione critica del testo architettonico'.

AMPLIAMENTO DEL CONCETTO DI RILIEVO E USO DELLO STRUMENTO INFORMATICO

Il rilievo oggi, per la sua esecuzione, non può prescindere dall'utilizzo dello strumento informatico in fase di rilevamento, o in fase di rappresentazione, o di entrambe. Ciò comporta notevoli vantaggi circa la fedele corrispondenza fra stato reale e rappresentazione, in quanto riduce il margine degli errori che vengono contenuti entro una soglia prefissata ma, nel contempo, richiede da parte del progettista un'adeguata analisi e interpretazione delle informazioni riportate nel rilievo, essendo presumibilmente quest'ultimo condotto da esperti nell'impiego di strumenti di rilevamento e di restituzione grafica. Pertanto si configura a posteriori la necessità di un'analisi condotta su due binari paralleli, quello su carta e quello sul testo reale, che stimoli una sintesi interpretativa del manufatto rappresentato e dei fenomeni ad esso correlati.

L'uso dello strumento informatico dev'essere preceduto da un "progetto del rilievo" nel corso del quale vengano fissati gli obiettivi stessi del rilevamento e, di conseguenza, le modalità idonee per conseguirli al fine di assicurare un giusto itinerario in cui sia rispettato l'equilibrio fra strumento e conoscenza; ciò per non raccogliere una quantità indiscriminata di dati non pienamente mirata alla conoscenza critica del manufatto. Infatti il modello tridimensionale di un bene architet-

tonico può essere elaborato digitalmente per diverse applicazioni, quali l'archiviazione di dati, la produzione di elaborati grafici, il restauro digitale, la rielaborazione di copie, i musei virtuali, il monitoraggio (1). Ne consegue che il modello tridimensionale dev'essere progettato in funzione delle specificità che dovrà esprimere per poter manifestare, in specie, la parte strutturale dell'edificio.

Recenti orientamenti della ricerca proseguono nella direzione di ricostruire modelli tridimensionali partendo semplicemente da una campagna fotografica mirata e progettata, consentendo in questo modo di elaborare con appositi software nuvole di punti, modelli tridimensionali capaci di sviluppare fotografie scattate con semplici fotocamere digitali.

Software di fotogrammetria automatica SFM – Structure from Motion – recepiscono i singoli scatti fotografici, li orientano e posizionano, riconoscendo, per ognuno, il punto di ripresa fotografica in cui è stata scattata la foto, effettuando una triangolazione fotogrammetrica di punti omologhi proiettati dalle diverse immagini. Il risultato è una nube densa a formare la superficie dell'oggetto, dalla quale è possibile ottenere una mesh e texturizzarla.

Dell'oggetto così ottenuto è possibile ricavare dei profili significativi, informazioni importanti per determinare il quadro deformativo senza l'utilizzo di strumenti di rilievo sofisticati come il laserscanner.

Condizioni necessarie perché il risultato sia soddisfacente sono:

1. Condizioni atmosferiche idonee;
2. Calibrazione e regolazione dell'apparecchio fotografico;
3. Criteri specifici di rilievo fotografico.

Per quanto riguarda il primo punto si precisa che, poiché il programma riconosce in automatico i punti omologhi tra più fotografie, tali punti devono essere identificabili. Questo avviene, in primis, se il riferimento colorimetrico è simile, per cui non devono essere effettuate fotografie molto esposte o molto in ombra. L'ideale è effettuare la campagna fotografica in una giornata con luminosità omogenea e luce diffusa, per avere colori uniformi delle stesse superfici.

Per quanto riguarda il secondo punto, fondamentale è regolare la macchina fotografica direttamente in sito, per aumentare la precisione della triangolazione fotogrammetrica. La calibrazione della fotografia può essere effettuata anche successivamente, attraverso appositi software, ma aumentano vertiginosamente le

tempistiche di rielaborazione delle immagini. In merito all'ultimo puto va osservato che, a seconda dell'oggetto che si vuole riprodurre, si possono effettuare riprese fotografiche da specifiche angolazioni e in numero sufficiente per ottenere un buon risultato. Se, per esempio, si vuole rilevare la facciata di un edificio, un buon risultato si ottiene effettuando delle fotografie ripetute lungo un asse parallelo alla facciata stessa, con una sovrapposizione tra due scatti successivi di almeno il 70%, in modo tale che uno stesso punto sia visto da almeno 3 camere. La ripresa deve essere il più possibile ortogonale, evitando di inclinare l'apparecchio fotografico, in modo tale da ottenere una mesh (superficie) più compatta e con meno rumore di fondo (disturbo-distorsione della superficie derivante da una cattiva ripresa fotografica di alcuni punti poco raggiungibili dall'apparecchio fotografico, come i cornicioni delle chiese, o che presentano molti dettagli architettonici, come i capitelli) (2).

Alla luce delle riflessioni suesposte, vengono individuate le indagini da eseguire sulla fabbrica, con tutto ciò che serve al fine d'interpretare le cause dei dissesti; di conseguenza, in un'ottica d'interdisciplinarietà, lo specialista del rilievo, congiuntamente all'architetto-ingegnere, stenderà il progetto di rilievo tenendo anche in considerazione l'economicità dei sistemi, per definire i metodi che possano fare uso dell'integrazione di differenti sistemi di rilevazione, per determinare l'intensità della nuvola di punti in rapporto alle tematiche da indagare, per definire le parti da approfondire in quanto strategiche per gli obiettivi proposti, quali il riconoscimento degli *allineamenti murari* nelle zone più dissestate, la rappresentazione dei collegamenti dei muri fra loro e fra muri e orizzontamenti ecc.

In specie nel caso oggetto di studio, relativo all'interpretazione degli aspetti materico-costruttivi relativi alla natura muraria e al degrado statico della fabbrica, si apre un territorio ancora da approfondire in modo sistematico e puntuale. Più in generale c'è un ampliamento del concetto di rilievo non visto solamente quale procedimento geometrico e indagine storico-critica del bene culturale, ma quale strumento d'indagine e rappresentazione della *storia meccanica delle murature*, capace di registrare i mutamenti in essa intervenuti nel corso del tempo, per redigere gli elaborati "tematici", per consentire la comprensione del degrado, dei dissesti statici, dei cinematismi in atto e definire, successivamente, il modello di comportamento strutturale della fabbrica. Si auspica che in un futuro imminente

quest'ultimo possa essere elaborato già nella fase di restituzione grafica del rilievo con spedite e semplici operazioni integrative. Senza un modello di comportamento congruente alla fabbrica è pressoché inutile utilizzare modelli di calcolo sofisticati in quanto i dati provenienti dall'analisi non corrispondono alla consistenza costruttiva del monumento e, quindi, le risultanze dei calcoli non sono attinenti alla realtà meccanica del bene stesso.

I due casi di studio illustrati mettono in luce la specificità del progetto di rilievo quando si affronti la problematica dei dissesti strutturali. Il primo caso affronta il tema dei dissesti in campo statico e la necessità di un rilievo tridimensionale in cui siano descritte dettagliatamente tutte le lesioni, le deformazioni e i cedimenti per poter comprendere le cause effettive dei dissesti. Il secondo caso affronta il tema della conoscenza degli edifici dissestati da sisma e della corrispondente ricerca di modalità di rappresentazione più prossime alla realtà delle murature e dei loro collegamenti, ciò per elaborare un piano di miglioramento congruente con la natura costruttiva della fabbrica. Resta inteso che ad un ampliamento della ricerca sulla conoscenza della fabbrica in campo tecnologico-costruttivo corrisponde un ampliamento della ricerca nel campo del rilievo in grado di esprimere i risultati conseguiti in termini di conoscenza critica, per far progredire entrambe le discipline in forma coordinata ed armonica, pur nel rispetto della loro autonomia.

PRIMO CASO DI STUDIO: LA CHIESA DI SAN DOMENICO A RAVENNA

La chiesa di San Domenico, costruita nel 1374 a navata unica demolendo e ampliando una chiesa precedente, modificata e rialzata poi alla fine del Seicento sul modello delle chiese della Controriforma, costituisce un palinsesto stratificato caratterizzato da un quadro fessurativo complesso. Essa rappresenta uno di quei casi speciali di dissesti complessi per i quali è necessario un rilievo attento e preciso del quadro fessurativo. Quest'ultimo, acuito dal terremoto che ha colpito l'Emilia nel 2012, è accompagnato da fenomeni deformativi e cedimenti verticali che investono spazialmente il complesso e per i quali, negli anni Ottanta del secolo scorso, furono eseguiti consolidamenti fondali mediante micropali (fig. 1).

Il rilevamento del manufatto è stato condotto per via manuale, osservando debitamente i tipi di lesioni e i dissesti che tali lesioni implicano, ma la rappresentazione grafica non si è limitata a registrare solo piante, prospetti e sezioni poiché è stata sviluppata tridimensionalmente per poter costruire il modello tridimensionale e ottenere viste simultanee del quadro fessurativo, da più angolature, e possedere quindi una visione globale del manufatto in grado di rappresentarne la totalità, ricca anche di dettagli tecnici. Tale rappresentazione ha implicato la necessità di delineare in forma dettagliata e, insieme, ragionevolmente sintetica il manufatto, sì da poter avere un quadro articolato dello stato attuale senza perdere di vista la globalità e la spazialità delle lesioni in atto che investono la chiesa in diverse parti. Dunque, è stato necessario esperire un loro collegamento visuale per comprendere le relazioni e interferenze che intercorrono fra i diversi macroelementi dell'edificio e fra i dissesti in atto.

Il quadro fessurativo, infatti, investe la struttura portante in senso longitudinale e trasversale coinvolgendo macroelementi che costituiscono spazi adiacenti in prosecuzione o ortogonali fra loro (navata, presbiterio e abside; navata, cappella del Ss. Crocefisso e presbiterio; cappella del Ss. Crocefisso, presbiterio e campanile) richiamando così la necessità di una rappresentazione spaziale che superi il disagio di una lettura del manufatto per semplici sezioni piane (figg. 1 e 2). L'orbitazione, ossia la possibilità di ruotare il modello tridimensionale a 360 gradi sui tre assi - fatto singolare e valore aggiunto fondamentale della rappresentazione informatica, non possibile con una restituzione

grafica manuale in cui vengono prescelte determinate angolature - costituisce una chiave fondamentale per la comprensione dei fenomeni di dissesto in atto sul monumento. Questi ultimi, essendo stati incrociati attentamente con i risultati delle ricerche bibliografiche e archivistiche dalle quali emergono le vicissitudini storiche che hanno interessato il passato prossimo e remoto della fabbrica (fig. 1), consentono di capire i meccanismi in atto e, successivamente, le cause stesse dei dissesti.

In sintesi, dalla capacità di gestione del *rilievo critico* tridimensionale in cui sono riportati, eventualmente mediante allegati, anche i segni desunti dalle notizie storiche, è possibile ricostruire un *quadro critico*, pressoché completo, delle informazioni funzionali alla formulazione di una *diagnosi* circostanziata sulle cause scatenanti i dissesti statici.

In specie nei grafici sono stati registrate le forme delle singole lesioni, l'entità dei cedimenti subiti dalle strutture e sono state indicate, mediante richiami, testimonianze di fenomeni avvenuti nel tempo e rinvenuti per via archivistica (fig. 1).

Fra tipo di lesione e tipo di dissesto intercorre una corrispondenza biunivoca per cui la lettura delle prime determina anche la comprensione dei dissesti, mentre più complesso è il giudizio sulle cause scatenanti dato che ai dissesti possono corrispondere una o più cause non esistendo fra l'evento e tali cause una corrispondenza diretta. Di qui nasce l'esigenza di un incrocio fra tre discipline - restauro, storia e disegno - che sono concatenate fra loro in un rapporto di reciproco scambio, determinante per la definizione della realtà del manufatto e, di conseguenza, per il progetto di conservazione (3).

Dai grafici redatti seguendo i criteri suesposti si evince che:

- le lesioni sulle murature della navata sinistra hanno andamento parabolico, ad indicare un cedimento di natura differenziale concentrato in corrispondenza della zona costituita dal presbiterio e dalla cappella del Ss. Crocefisso; infatti sulla muratura, in corrispondenza della cappella, sono visibili due rami di parabola contrapposti (figg. 1 e 2);
- nella parete della cappella del Ss. Crocefisso, ortogonale a quella della navata, sono riportati cedimenti fondali della parete di chiusura dell'arco, coi relativi distacchi della stessa parete dall'arco, che sono contraddistinti da frecce di intensità diversa ad indicarne l'andamento crescente verso l'esterno della chiesa (fig. 2);

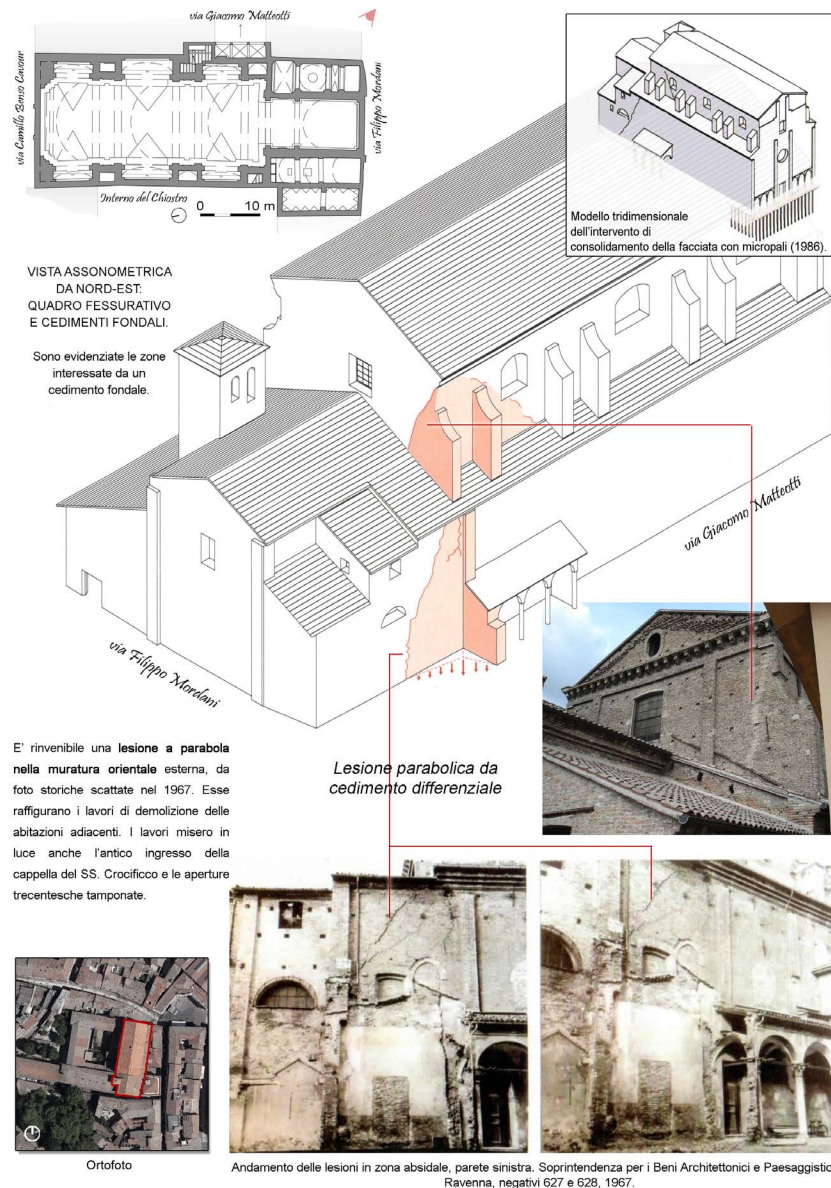


Fig. 1. Rappresentazione tridimensionale delle lesioni delle pareti orientali esterne: la loro formazione è precedente al 1967, anno in cui vennero scattate le foto, e al 1986 anno in cui furono eseguiti i micropali sotto alla facciata e in angolo con essa.

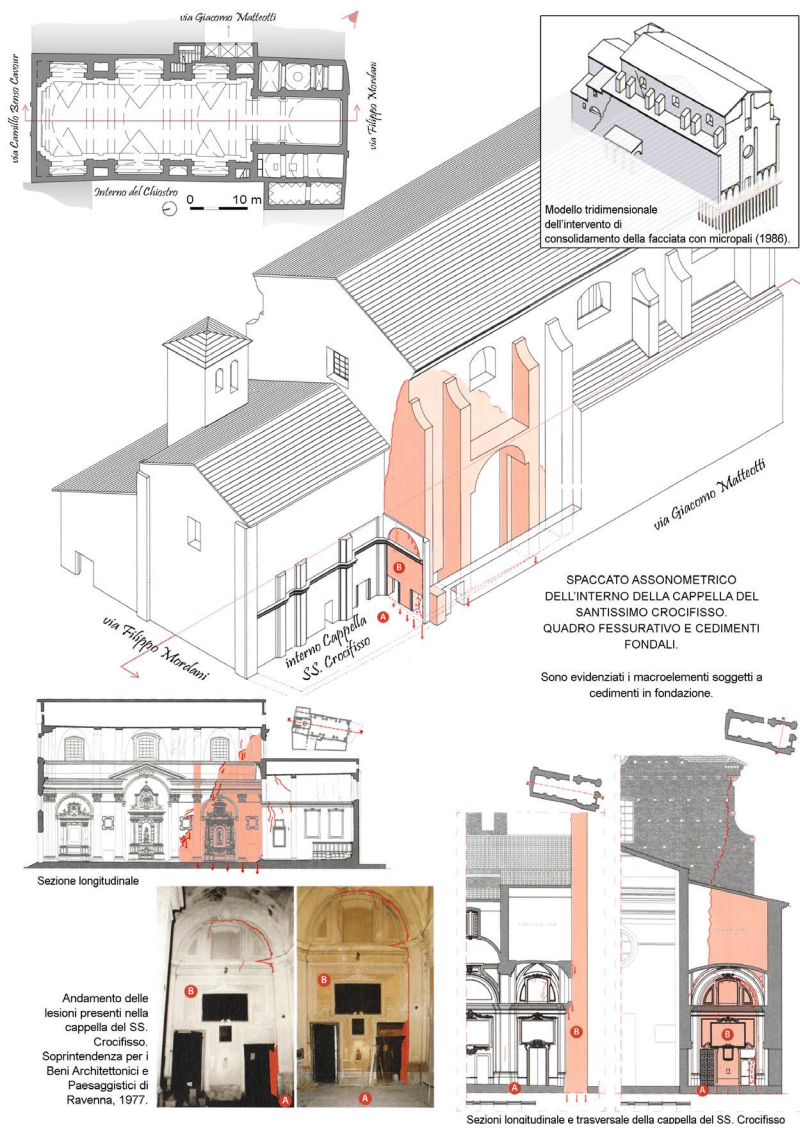


Fig. 2 Lesione parabolica da cedimento differenziale vista dall'interno della cappella del SS. Crocifisso e dall'interno della navata.

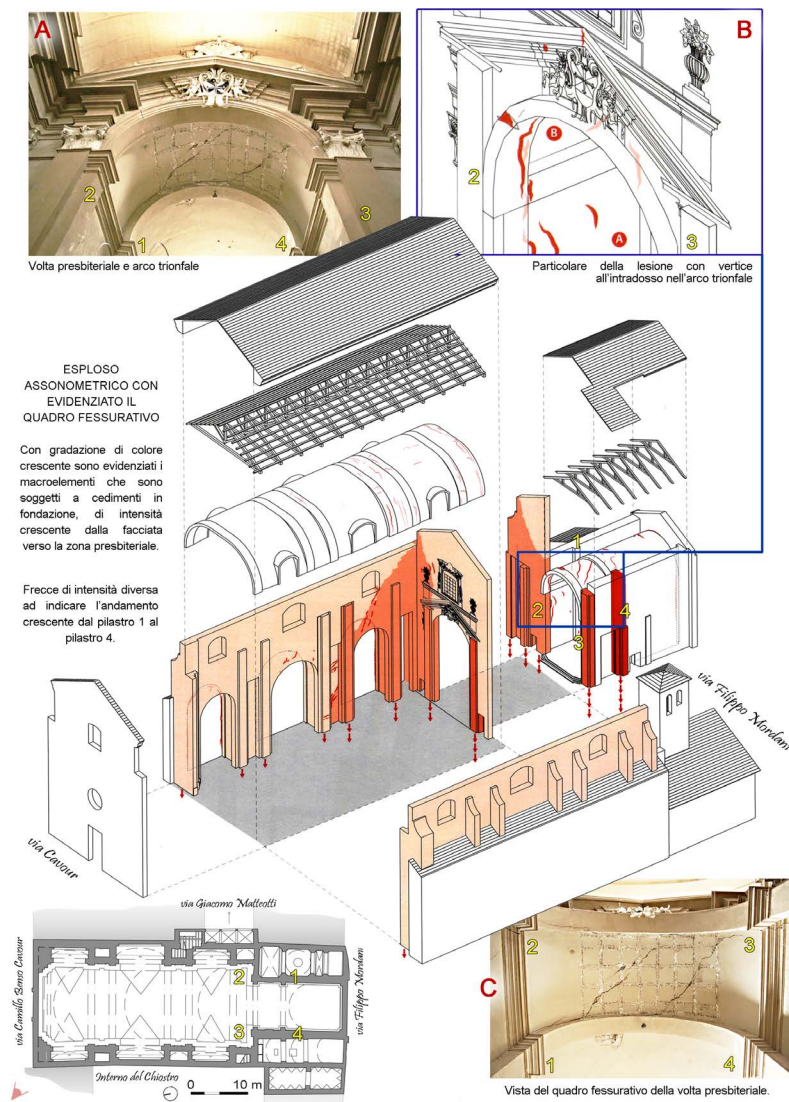


Fig. 3 Rappresentazione qualitativa dei cedimenti differenziali mediante la composizione di un diverso numero di frecce verticali; lesione a cuspidi rivolta verso il basso sul lato sinistro dell'arco di trionfo lesioni diagonali nella volta presbiteriale.

- nell'arco di trionfo, sulla parte sinistra, è presente una lesione a cuspide rivolta verso il basso che indica un cedimento sul piedritto destro e uno stiramento dell'arco nella parte destra (fig. 3);

- nella volta del presbiterio l'andamento diagonale delle lesioni indica un cedimento di grande entità nel piedritto ortogonale alle lesioni stesse, ovvero nel piedritto posteriore destro della volta (fig. 3);

- lungo la facciata principale e lungo la prima parte della parete sinistra della navata sono stati eseguiti consolidamenti fondali mediante l'esecuzione di micropali (fig. 1).

Nei grafici sono state riportate in forma qualitativa le entità dei differenti cedimenti, rappresentati mediante la composizione di un diverso numero di frecce verticali rivolte verso il basso in base all'entità del cedimento stesso (fig. 3).

Infine, con lo scopo di migliorare la comprensione dei dettagli e di leggere gli eventi che hanno influenzato la storia dei dissesti, è stata riportata ai margini delle tavole una serie di richiami-finestre, quali lesioni ingrandite alle reni dell'arco di trionfo, foto delle lesioni della volta a botte del presbiterio, foto d'epoca in cui si nota che erano già presenti, nel 1967, le lesioni sul muro posteriore della navata sinistra ecc. (fig. 1). Le considerazioni suesposte, raccolte in un articolato sistema di rappresentazione, hanno consentito di stabilire che le lesioni e i cedimenti presenti nella prosecuzione del muro della navata sinistra non avevano alcuna relazione con i micropali eseguiti in zone circoscritte della fabbrica negli anni Ottanta del secolo scorso e che, pertanto, gli stessi micropali non hanno indotto cedimenti differenziali successivi alla loro esecuzione. Inoltre la lettura incrociata ha consentito di definire con certezza che le lesioni presenti nelle diverse zone absidali della chiesa sono imputabili a cedimenti differenziali avvenuti in un passato prossimo (prima della foto risalente 1968) e non sono imputabili al terremoto che ha colpito l'Emilia, il quale ne ha acuito solo l'entità.

Il verdetto finale, raggiunto con chiarezza, dimostra l'importanza di concepire il rilievo quale *analisi critica del testo architettonico* (4) e quindi come risultato del contributo di differenti discipline - disegno, storia e restauro - necessariamente collegate fra loro in un rapporto di mutuo scambio, senza il contributo delle quali non è possibile definire un quadro affidabile dei fenomeni strutturali.

SECONDO CASO DI STUDIO: IL PALAZZO COMUNALE DI MIRANDOLA (MODENA)

Il Palazzo, realizzato nel corso del Quattrocento e modificato più volte nei secoli sia con l'aggiunta di un portico sulla facciata principale e di un altro su quella posteriore, sia con interventi pesanti per rispondere ad aggiornamenti funzionali, ha subito a causa del recente sisma alcuni dissesti imputabili alla propria *vulnerabilità specifica* (5), ovvero dovuti alle modalità costruttive originarie delle murature realizzate in mattoni legati, spesso, con semplice terra cruda e alle citate trasformazioni che ne hanno indebolito e frammentato la continuità strutturale, provocando la riduzione di valide connessioni.

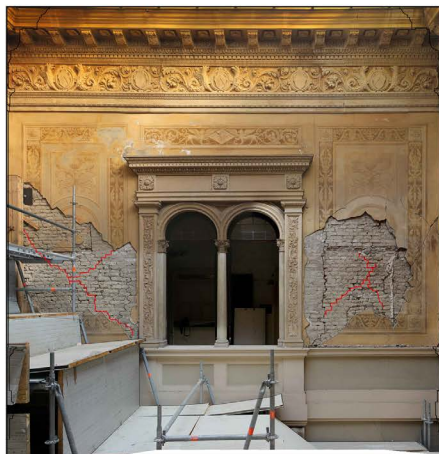
Tema fondamentale diviene l'estensione dell'analisi costruttiva all'intima razionalità dell'edificio e alle caratteristiche degli specifici materiali e delle singole murature che compongono la fabbrica. La normativa, in questo caso, è quanto mai precisa nell'individuare i necessari parametri da analizzare per l'interpretazione del manufatto, ma resta il problema centrale di come rappresentare in via sistematica e sintetica gli aspetti determinanti e utili a definire il modello di comportamento meccanico, per scegliere poi il modello di calcolo più plausibile (6). È necessario, a monte di qualsiasi intervento di miglioramento sismico, un progetto per la definizione delle caratteristiche materiche e strutturali della fabbrica e, quindi, un progetto di rilievo e rappresentazione in grado di mostrare facilmente e in modo coordinato le caratteristiche costruttive utili per la definizione tridimensionale del modello di comportamento in cui siano presenti anche le qualità delle connessioni fra muri e muri e fra muri e orizzontamenti.

La DPCM 9 febbraio 2011, nel capitolo quarto relativo alla "conoscenza del manufatto", parte dallo studio di quattro categorie d'indagine da effettuare: rilievo geometrico; identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica; proprietà meccaniche dei materiali; proprietà del terreno e delle fondazioni. Solo dopo aver definito il livello di conoscenza raggiunto si può determinare il "fattore di confidenza" di un determinato manufatto, con la conseguenza che meno si conosce il manufatto e più le resistenze considerate per i materiali vengono ridotte.

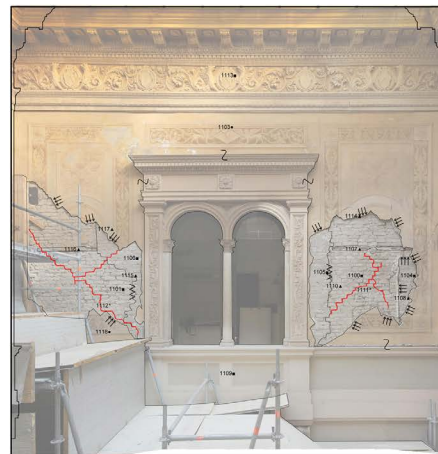
In merito al rilievo geometrico e alla conoscenza storico-costruttiva del manufatto valgono gli studi consolidati nei rispettivi settori scientifico-disciplinari. In

specie nel campo del rilievo sono considerate ormai di ordinaria applicazione le sperimentazioni condotte con sistemi informatici, che dovranno sempre più recepire gli aggiornamenti e le ricerche in atto, sia nel campo del disegno, sia in quello dell'analisi costruttiva e diagnostica dell'edificio al fine di rappresentare nel modo migliore le caratteristiche dell'edificio stesso. Nel campo della conoscenza e interpretazione del manufatto si fa riferimento alla consuetudine, in uso specialmente nel campo del restauro architettonico, di utilizzare indagini e tavole tematiche quali studi geometrici, proporzionali, dei sistemi di misura adottati, analisi comparative, mensoicronologiche e dell'archeologia in elevato (stratigrafia), indagini dei sistemi costruttivi e delle tecniche utilizzate nella realizzazione dell'opera come anche nelle modifiche succedutesi nel corso del tempo.

Un campo tutto da analizzare sotto il profilo delle modalità conoscitive, delle indagini e della restituzione grafica resta invece quello relativo alla terza categoria individuata dalla norma che è, appunto, quella della "caratterizzazione meccanica dei materiali". Questa terza categoria di informazioni da ottenere è complessa perché dipende da molti fattori che si combinano fra loro né può essere risolta con semplici indagini di laboratorio sui valori di resistenza dei materiali o con prove di resistenza condotte in loco (quali i martinetti piatti). Infatti una stessa muratura può essere stata eseguita con tecniche diverse e può essere stata più volte modificata nel corso del tempo, per cui bisogna tracciare la storia specifica della meccanica della muratura stessa. Un primo momento di analisi per l'interpretazione delle caratteristiche murarie, come suggerito dalla norma, è quello della "valutazione della qualità muraria". A tale proposito si può utilizzare il metodo dei punteggi che consiste nel determinare la classe di appartenenza di una muratura - classe A, classe B, classe C - in base al punteggio raggiunto da ogni singola muratura a seguito di un procedimento di valutazione che mette in gioco tutti i parametri caratteristici che definiscono la buona qualità muraria in base alle regole dell'arte. In specie si utilizza l'indice di qualità muraria IQM (7) per ciascuno dei tre tipi di azione sollecitante (azione verticale, azione ortogonale al piano, azione orizzontale nel piano); esso viene definito mediante una relazione parametrica che prende in considerazione il valore assegnato a ciascuno dei parametri della muratura (orizzontalità dei filari, ingranamento trasversale e verticale, forma, dimensione e resistenza degli elementi resistenti, qua-



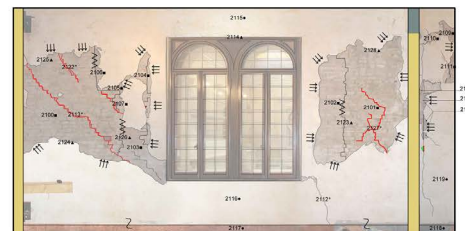
Prospetto nord - esterno



Analisi stratigrafica



Prospetto nord - interno



Analisi stratigrafica

Diagramma di Harris - Parete interna

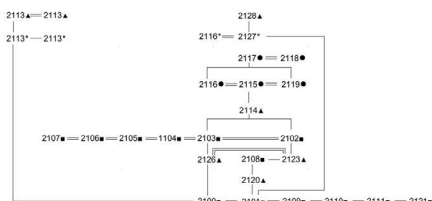
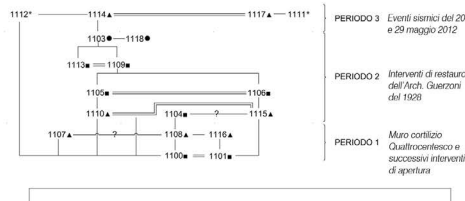


Diagramma di Harris - Parete esterna



UNITA' STRATIGRAFICHE

- murarie (USM)
- ▲ negative o di taglio (USN)
- di rivestimento (USR)

RAPPORTI STRATIGRAFICI

- ~ si lega a (contemporaneità)
- ⇌ si appoggia a / copre
- ⌋ taglia / rompe

lità della malta). Tale valore numerico da assegnare in base alle specifiche qualità varia da 0 a 3 (tab.1).

Il risultato ottenuto di IQM, variabile da 1 a 10, rientra in un intervallo predefinito che stabilisce la classe della muratura (classe A, classe B, classe C); gli intervalli non sono gli stessi per ogni azione sollecitante ma cambiano in rapporto ad esse (tab.2). Il metodo, pur semplice, può apparire farraginoso per l'elevato numero di dati da inserire e perché ripetitivo; pertanto conviene fare uso di schede in formato elettronico, i cui dati vengono poi ripresi per la creazione e definizione degli *allineamenti murari*.

In specie, la rappresentazione sintetica dei risultati ottenuti avviene tramite schede (scheda n.1) in cui sono riportate le foto ravvicinate della muratura e in cui vengono analizzati i parametri della muratura stessa ove, per comodità, si riporta anche il valore finale della IQM, ricavato mediante singole tabelle anch'esse redatte in formato elettronico (scheda n.2).


Il procedimento dell'IQM di cui sopra è stato ulteriormente sviluppato nel corso della nostra ricerca per comprendere la complessità dei diversi casi, ovvero per quei muri che non sono caratterizzati da un tessuto omogeneo ma da più unità stratigrafiche, in quanto ciascuna unità stratigrafica ha una propria classe di appartenenza. In questo caso viene eseguita l'analisi stratigrafica e compilato il diagramma di Harris (fig. 4) per arrivare a determinare la parte di muratura che resiste agli sforzi orizzontali e quella che invece non può essere presa in considerazione in quanto priva delle caratteristiche necessarie. Se le unità stratigrafiche sono tali da invalidare un comportamento murario unitario a seguito della mancanza di ammassamenti e della presenza di rigidzze differenti, si procede considerando solo i tratti di muratura reagenti ricompresi da solaio e si costruisce l'allineamento murario.

Il lavoro eseguito sulle murature portanti dei singoli vani è fondamentale per costruire gli *allineamenti murari*, sezioni che rappresentano le continuità murarie portanti utili per descrivere il modello resistente (fig. 5). Lo studio è proseguito ulteriormente nel senso della ricerca di un indice in grado di esprimere le connessioni esistenti fra muri: l'Indice di Qualità di Connessione Muraria, ossia la definizione, espressa sempre in lettere, della classe di appartenenza delle connessioni fra muri ortogonali o muri in prosecuzione fra loro. Questo nuovo indice è risultato necessario al fine di stabilire con certezza il modello reale tridimensionale di comportamento. Tale modello contiene le varie classi di

Fig. 4. Analisi stratigrafica in elevato e diagramma di Harris per individuare le relazioni fra le singole unità stratigrafiche che compongono il palinsesto murario.

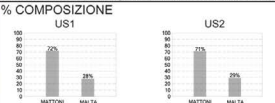
Scheda per la valutazione dei parametri della regola dell'arte

2 X2 - PIANO PRIMO - 2



DESCRIZIONE
US1: Muratura in mattoni pieni. Muratura realizzata con mattoni di varie dimensioni anche molto diverse tra loro; tessitura muraria non regolare; filari orizzontali e sfalsamento dei giunti verticali approssimativo.
US2: Muratura in mattoni pieni. Muratura realizzata con mattoni di dimensioni circa uguali; tessitura muraria regolare; filari orizzontali e sfalsamento dei giunti verticali corretto; posa posteriore all'US1.
Caratteristiche della malta
US1: Malta di argilla di scadente qualità, incoerente, zeppe assenti
US2: Malta di calce, di migliore qualità, coesa e priva di zeppe

% COMPOSIZIONE



% SPessori GIUNTI ORIZZONTALI





FOTO SUPERFICIE **RAPPRESENTAZIONE GRAFICA** **CONFRONTO PIENI-VUOTI**



Scheda 1

Punteggi da attribuire ai parametri della regola dell'arte.

UNITA' STRATIGRAFICA 1

Ing. tras.	Ing. p.	Or.	El.	Dim. el.	Ma.	Re. el.
NR	NR	R	R	NR	NR	PR

Azioni	Verticali	Fuori piano	Nel piano
IQM	3,5	2,8	2,1

Categoria	B	C	C
Parametri meccanici	L [N/cm²]	E [N/mm²]	T [N/cm²]
MIN-MAX	200-340	1000-1450	3-4,5

UNITA' STRATIGRAFICA 2

	Azioni verticali			Azioni fuori piano			Azioni nel piano		
	NR	PR	R	NR	PR	R	NR	PR	R
OR. Orizzontalità dei filari	0	1	2	0	1	2	0	0,5	1
P.D. Presenza dei diatoni / ingranamento trasversale	0	1	1	0	1,5	3	0	1	2
F.EL. Forma degli elementi resistenti	0	1,5	3	0	1	2	0	1	2
S.G. Sfalsamento dei giunti verticali / ingranamento nel piano	0	0,5	1	0	0,5	1	0	1	2
D.EL. Dimensione degli elementi resistenti	0	0,5	1	0	0,5	1	0	0,5	1
MA. Qualità della malta / efficace contatto fra elementi / zeppe	0	0,5	2	0	0,5	1	0	1	2
RE.EL. Resistenza degli elementi	0,3	0,7	1	0,5	0,7	1	0,3	0,7	1

Ing. tras.	Ing. p.	Or.	El.	Dim. el.	Ma.	Re. el.
R	R	R	R	PR	R	PR

Calcolo dell'IQC per Azioni verticali:
 $IQC = 0,7 \times (2+1+3+1+0,5+2) = 6,65$

Calcolo dell'IQC per Azioni fuori piano:
 $IQC = 0,7 \times (2+3+2+1+0,5+1) = 6,65$

Calcolo dell'IQC per Azioni nel piano:
 $IQC = 0,7 \times (1+2+2+2+0,5+2) = 6,65$

Azioni	Verticali	Fuori piano	Nel piano
IQM	6,5	6,5	6,5
Categoria	A	B	A
Parametri meccanici	L [N/cm²]	E [N/mm²]	T [N/cm²]
MIN-MAX	400-610	1700-2300	7,7-11

Metodo dei punteggi				
Tipo di azione	Categoria muratura	C	B	A
	Azioni verticali		$0 \leq IQ < 2,5$	$2,5 \leq IQ < 5$
Azioni ortogonali		$0 \leq IQ \leq 4$	$4 < IQ \leq 7$	$7 \leq IQ \leq 10$
Azioni orizz. complanari		$0 \leq IQ \leq 3$	$3 < IQ \leq 5$	$5 < IQ \leq 10$

Scheda 2

connessione, espresse mediante tre lettere, a seconda della qualità buona, media o bassa di connessione, che vengono graficizzate per ogni piano sui disegni tridimensionali i quali rappresentano lo schema portante della fabbrica (figg. 6 e 7). Un ultimo passaggio grafico, che costituisce il primo obiettivo della ricerca, è quello di riassumere i contenuti della IQM e della IQCM in un'unica tavola al fine di avere una visione globale del sistema, e poter accedere anche ad informazioni localizzate e di dettaglio.

La ricerca in corso sta proseguendo con le indagini sugli orizzontamenti e sulla qualità delle connessioni di questi alle murature portanti (Indice di Qualità di Connessione degli Orizzontamenti, IQCO) al fine di stabilire un criterio di valutazione funzionale per il completamento del modello reale di comportamento ed in analogia al metodo utilizzato per la definizione della IQM e della IQCM.

	Azioni verticali			Azioni fuori piano			Azioni nel piano		
	NR	PR	R	NR	PR	R	NR	PR	R
OR. Orizzontalità dei filari	0	1	2	0	1	2	0	0,5	1
P.D. Presenza dei diatoni / ingranamento trasversale	0	1	1	0	1,5	3	0	1	2
F.EL. Forma degli elementi resistenti	0	1,5	3	0	1	2	0	1	2
S.G. Sfalsamento dei giunti verticali / ingranamento nel piano	0	0,5	1	0	0,5	1	0	1	2
D.EL. Dimensione degli elementi resistenti	0	0,5	1	0	0,5	1	0	0,5	1
MA. Qualità della malta / efficace contatto fra elementi / zeppe	0	0,5	2	0	0,5	1	0	1	2
RE.EL. Resistenza degli elementi	0,3	0,7	1	0,5	0,7	1	0,3	0,7	1

Punteggi da attribuire ai parametri della regola dell'arte.

Tabella 1

Formula per il calcolo dell'Indice di Qualità Muraria:

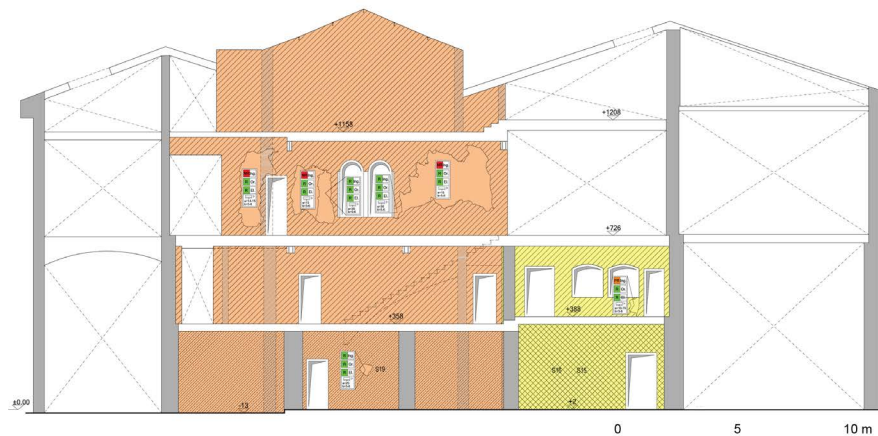
$$IQM = RE.EL. \times (OR. + P.D. + F.EL. + S.G. + D.EL. + MA.)$$

Metodo dei punteggi				
Tipo di azione	Categoria muratura	C	B	A
	Azioni verticali		$0 \leq IQ < 2,5$	$2,5 \leq IQ < 5$
Azioni ortogonali		$0 \leq IQ \leq 4$	$4 < IQ \leq 7$	$7 \leq IQ \leq 10$
Azioni orizz. complanari		$0 \leq IQ \leq 3$	$3 < IQ \leq 5$	$5 < IQ \leq 10$

Metodo dei punteggi: attribuzione delle categorie murarie.

Tabella 2

ALLINEAMENTO MURARIO X2



STRATIFICAZIONI MURARIE:

Individuazione della parte effettivamente portante

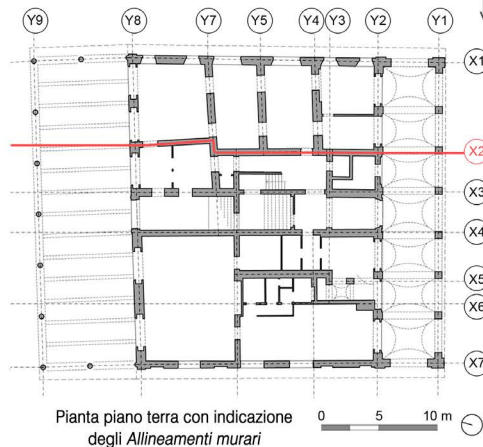
- Muratura piena
- Tamponatura 1: mattone pieno + isolante + laterizio forato (sp. 3-4 cm)
- Tamponatura 2: mattone pieno + isolante + laterizio forato (sp. 6-8 cm)
- Tamponatura 3: mattone pieno + laterizio forato + isolante + laterizio forato + isolante
- Tamponatura 4: mattone pieno + laterizio forato (sp. 20-25 cm)

SPESSORI DI MURATURA PORTANTE (LORDO INTONACO)

- 1 Testa (sp. 15-20 cm)
- 2 Teste (sp. 30-35 cm)
- 3 Teste (sp. 45-50 cm)
- 4 Teste (sp. 60-65 cm)

- Ingranamento trasversale e nel piano
- Orizzontalità dei filari
- Forma degli elementi resistenti
- Dimensione degli elementi

- NR: Non rispettato
- PR: Parzialmente rispettato
- R: Rispettato



Repertorio fotografico

Fig. 5. Studio e rappresentazione delle caratteristiche materico-costruttive dei singoli allineamenti murari per individuare le aree resistenti.

NOTE:

1- Per un'ampia informazione sullo sviluppo e le potenzialità delle tecniche di rilievo e di indagine diagnostiche cfr. Santopoli Nicola, Secchia Leonardo (2008), *Sviluppi delle tecniche analitiche e diagnostiche*, in Carbonara Giovanni (dir.), *Trattato di restauro architettonico*. Secondo aggiornamento, Utet, Torino, pp.165-191.

2- La tecnica è trattata in Rodriguez-Navarro, Pablo (2013), a cura di, *Disegnare con la fotografia digitale*, in DISEGNARECON, Volume 6, n. 12, in specie il saggio, Rodriguez-Navarro, Pablo, *Ricostruzione di una scena urbana 3D utilizzando VisualSfm*; cfr. inoltre Abate, Dante (2012), *La modellazione di una lapide sepolcrale attraverso tecniche Low-Cost Range ed Image Base*, UTICT - Unità Tecnica Sviluppo Sistemi per l'informatica e l'ICT, 2012.

3- Cfr. Carbonara, Giovanni (1997), *Avvicinamento al restauro. Teoria, storia, monumenti*, Liguori, Napoli, segnatamente il capitolo, *Rilievo e restauro dei monumenti*, pp. 467-479.

4- Cfr. Fancelli, Paolo (1998), *Il restauro dei monumenti*, Nardini Editore, Firenze, p. 214. In specie il capitolo *Lo studio finalizzato del monumento affronta le metodologie di indagine finalizzate ad una conoscenza mirata del manufatto*, i livelli di approfondimento e la grafia che meglio rappresenta il rilievo nel restauro; quest'ultima risulta essere il segno tettonico o aderente.

5- Cfr. Galli Claudio, Bergami Silvia (2014), *Processo*

storico-costruttivo, disegni e consolidamento: il caso di studio del Duomo di Mirandola, in Bertocchi Stefano, Silvio Van Riel, *La cultura del restauro e della valorizzazione*. Temi e problemi per un percorso internazionale di conoscenza, Alinea, Firenze, 2° Convegno Internazionale ReUSO, 6/8 novembre 2014.

6- Appare necessario, anche se del tutto scontato nel caso in esame, segnalare che una delle caratteristiche fondamentali del rilievo è quella di essere sintetico e al contempo dettagliato, in quanto destinato a rappresentare i caratteri dei singoli materiali e i disegni in atto.

7- Borri Antonio, De Maria Alessandro (2009), *Indice di qualità muraria (IQM) e sue applicazioni nell'ambito della NTC 2008*, in *L'Edilizia*, 2009, 160, pp. 46-57.

BIBLIOGRAFIA

Mastrodicasa, Sisto (1993), *Dissesti statici delle strutture edilizie: diagnosi, consolidamento, istituzioni teoriche, applicazioni pratiche*, IX ed., Hoepli, Milano.

Carbonara, Giovanni (1997), *Avvicinamento al restauro. Teoria, storia, monumenti*, Li-guori, Napoli

Fancelli, Paolo (1998), *Il restauro dei monumenti*, Nardini, Fiesole (Fi).

Cangi, Giovanni (2005), *Manuale del recupero strutturale e antisismico*, Dei, Roma.
Santopoli Nicola, Secchia Leonardo (2008), *Sviluppi delle tecniche analitiche e diagnostiche*, in Carbonara, Giovanni, *Trattato di restauro architettonico*, secondo aggiornamento, Utet, Torino.

Borri Antonio, De Maria Alessandro (2009), *IMQ Indice di qualità muraria. Applicazione nell'ambito delle NTC 2008*, in *l'Edilizia*, n. 160, 2009.

Cangi, Giovanni, Caraboni Mauro, De Maria Alessandro (2010), *Analisi strutturale per il recupero antisismico: calcolo dei cinematici per edifici in muratura secondo le NTC*, Dei Tipografia del Genio Civile, Roma.

AA. VV. (2011), *Manuale delle murature storiche*, direttore scientifico Antonio Borri, a cura di Chiara Donà, con la collaborazione di A. De Maria, Dei, Roma.

Borri Antonio, De Maria Alessandro, Paci Giuseppe (2011), *Resistenza a taglio delle murature: prove diagonali e correlazione con l'Indice di Qualità Muraria IQM*, In: XIV convegno ANIDIS, *L'ingegneria sismica in Italia*, Bari,

RAPPORTI TEMPORALI TRA PANNELLI MURARI

Ogni periodo è segnato da interventi strutturali sulla fabbrica

- ① Primo periodo: prima del 1468
- ② Secondo periodo: dal 1468 (costruzione loggiato nord)
- ③ Terzo periodo: dal 1783 (costruzione loggiato sud)
- ④ Quarto periodo: dal 1928 (realizzazione dello scalone)
- ⑤ Quinto periodo: dal 1970 (interventi strutturali sui solai)

SPESSORI MURARI PORTANTI E PRESENZA DI DISCONNESSIONE MURARIA

- sp. portante 4 teste
- sp. portante 3 teste
- sp. portante 2 teste
- sp. portante 1 teste
- Disconnessione
- Mancato Ammorsamento

0 5 10 m



PIANO TERRA

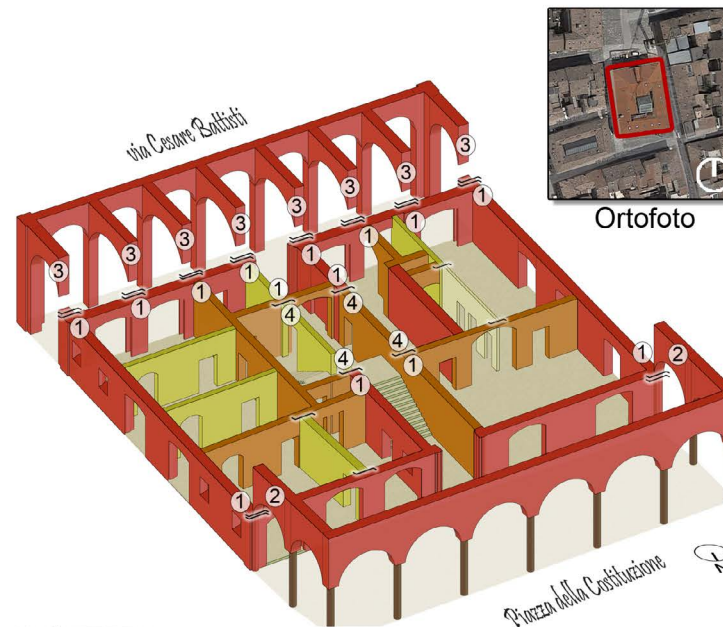


Fig. 6 Studio preparatorio per la definizione dell'Indice di Qualità di Connessione Muraria (IQCM) mediante l'analisi degli spessori dei muri, della presenza di disconnessioni murarie e dei rapporti temporali intercorrenti fra i pannelli murari.

INDICE DI QUALITA' DI CONNESSIONE MURARIA (IQCM)

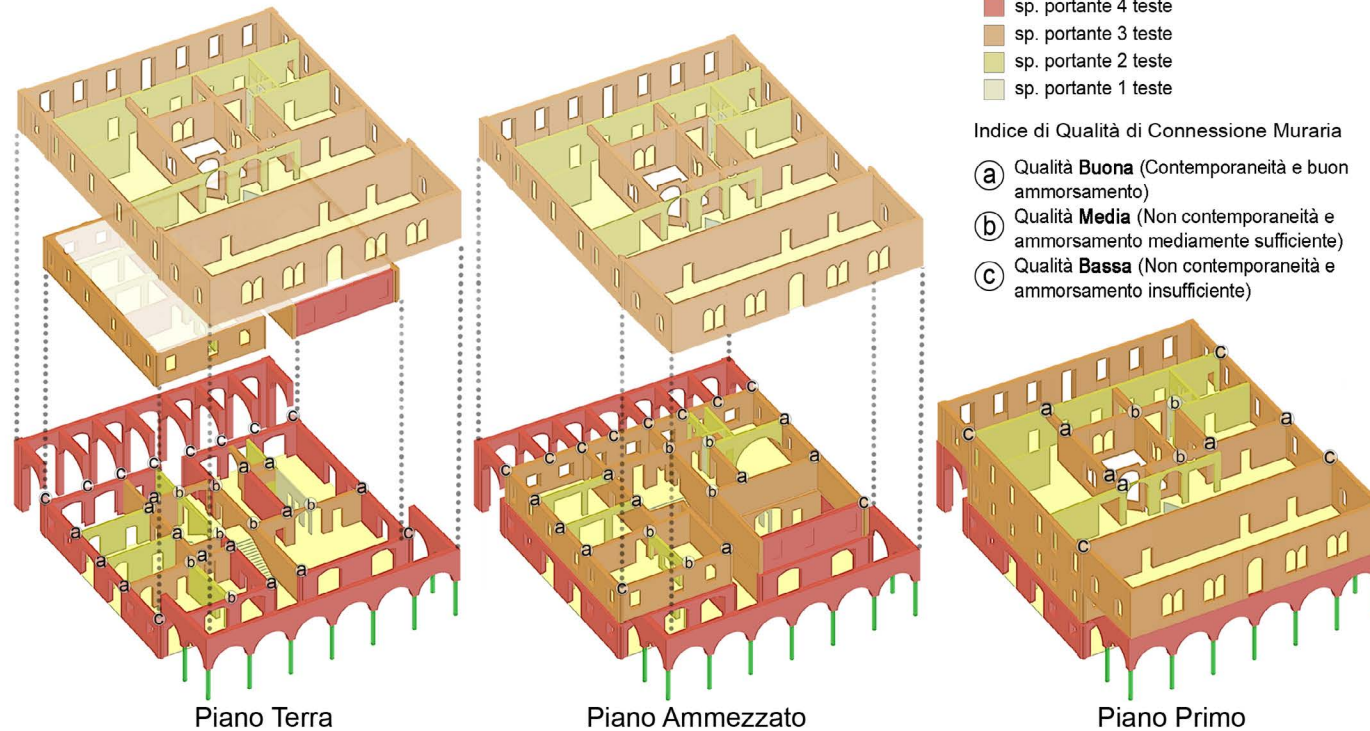


Fig. 7. Rappresentazione qualitativa dell'Indice di Qualità di Connessione Muraria (IQCM), mediante l'utilizzo di lettere che recepiscono i criteri studiati nella tavola precedente.

18-22 settembre 2011, Bari Rodriguez-Navarro, Pablo (2013), a cura di, Disegnare con la fotografia, in DISEGNARECON, Università di Bologna, vol.6, n. 12.

Galli Claudio, Bergami Silvia (2014), Processo storico-costruttivo, dissesti e consolidamento: il caso di studio del duomo di Mirandola, in La cultura del restauro e della valorizzazione: temi e problemi per un percorso internazionale di ricerca, Alinea, Firenze.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano gli Ingg. Jacopo Bettoli, Filippo Gaddoni, Gloria Ghiberti e Francesco del Monaco per il supporto alla stesura dell'apparato illustrativo.

Un particolare ringraziamento all'Ing. Massimo Tosti per la disponibilità e il sostanziale contributo offerto nella elaborazione della diagnosi della chiesa di S. Domenico e all'Ing. Silvia Bergami collaboratore alla ricerca tuttora in corso, relativa alla definizione di modelli di comportamento strutturali negli edifici storici.