

**Michele Russo**

Architetto, Dottore di Ricerca, attualmente ricopre il ruolo di ricercatore di Disegno presso il Dipartimento di Disegno del Politecnico di Milano. Dal 2003 si occupa di tematiche legate al rilievo e alla modellazione 3D nel campo dei Beni Culturali e del Design. È revisore ed autore di diversi articoli su rivista e atti di convegno nazionali ed internazionali legati al tema del 3D Imaging.

**Luca Ercolin**

Ingegnere, dal 2002 è iscritto all'Ordine della Provincia di Rovigo. Negli anni collabora con diversi studi con compiti di progettazione e direzione dei lavori. Nel 2007 è tra i soci fondatori della Zenith Ingegneria srl, impresa spin-off della Università di Ferrara e dal 2008 ricopre il ruolo di amministratore e presidente del C.d.A. della suddetta impresa.

**Maria Paternò di Sessa**

Ingegnere, dal 2004 è iscritta all'Ordine della Provincia di Ferrara. Titolare di diversi assegni ed insegnamenti presso l'Università di Ferrara, dal 2007 è tra i soci fondatori della Zenith Ingegneria srl, impresa spin-off della Università di Ferrara. Dal 2013 è iscritta al dottorato in Scienza dell'Ingegneria presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Ferrara.

**Paolo Russo**

Professore Ordinario di Topografia e Cartografia nel Dipartimento di Ingegneria, Università di Ferrara, negli anni ricopre il ruolo di Preside di Facoltà e Prorettore alla didattica. Coordinatore di progetti nazionali, recentemente si occupa di rilievo 3D, modelli geometrici e stocastici nella compensazione delle reti geodetiche e telerilevamento da satellite.

## La fotografia per la mappatura del quadro fessurativo del patrimonio architettonico in situazioni di emergenza

### *2D digital imaging for cracks mapping of Cultural Heritage in emergency condition*

La fotografia digitale rappresenta non soltanto un mezzo di comunicazione immediata, ma anche uno strumento efficace di rilievo e monitoraggio del patrimonio architettonico. Il rilevamento fotografico consente infatti di acquisire informazioni geometriche e materiche multi-scala anche in tempi molto brevi. Questa peculiarità rende particolarmente efficace l'applicazione della fotografia digitale al rilevamento del quadro fessurativo in condizioni di emergenza, ad esempio immediatamente dopo un evento sismico. Con riferimento a questa specifica applicazione, si presenta un procedimento di acquisizione, organizzazione e restituzione delle immagini fotografiche adottato nel rilievo del quadro fessurativo di un palazzo storico delle città di Ferrara, Palazzo Renata di Francia, gravemente danneggiato dagli eventi sismici avvenuti del Maggio 2012.

*The digital photography represents not only an immediate medium aimed at data communication, but also an effective instrument for surveying and monitoring the architectural buildings. In this context, 2D images allow to acquire multi-scale geometrical and material data in a few time. This peculiarity makes this technique very suitable for the survey of cracks distribution in emergency condition, for example immediately after an earthquake. Referring to this specific application, the article suggests a process of 2D images acquisition, data management and representation for surveying crack distribution inside an historical building in Ferrara, Palazzo Renata di Francia, seriously damaged by the seismic events happened in May 2012.*

**parole chiave:** fotografia digitale, mappatura del quadro fessurativo, emergenza, disegno

**keywords:** digital imaging, cracks mapping, emergency, drawing

## INTRODUZIONE

Il patrimonio storico-artistico del nostro Paese è soggetto a un progressivo deterioramento, dovuto all'azione di diverse concause tra le quali gli agenti atmosferici, l'incuria e il verificarsi di eventi catastrofici di origine antropica o naturale. Essendo il territorio italiano caratterizzato da una elevata sismicità, dovuta a una situazione geodinamica sfavorevole, i terremoti rappresentano da sempre uno dei fattori di maggiore rischio per i Beni Culturali.

In particolare, negli ultimi anni, alcuni importanti eventi sismici (San Giuliano di Puglia 2003, L'Aquila 2009 e Emilia 2012) hanno evidenziato l'estrema vulnerabilità del patrimonio architettonico.

Dal 2005 la Normativa italiana ha iniziato a tenere in grande considerazione gli effetti sismici sui fabbricati, prevedendo accurate verifiche di vulnerabilità per i fabbricati di maggior rilevanza strategica e culturale. Nel caso dell'edilizia storica è molto complessa la valutazione del comportamento della struttura sotto l'effetto delle sollecitazioni dinamiche, senza parlare della difficoltà di concepire interventi non invasivi di messa in sicurezza e adeguamento sismico. In questo momento di transizione normativa si sono verificati gli eventi sismici del 20 e del 29 maggio 2012, rispettivamente di magnitudo 5,9 e 5,8, che hanno colpito pesantemente il territorio emiliano tra il modenese e il ferrarese e in forma più lieve il centro storico di Ferrara, danneggiando soprattutto i palazzi storici di una città considerata dall'UNESCO patrimonio dell'umanità.

All'indomani del primo terremoto è stata avviata un'imponente e speditiva campagna di sopralluoghi da parte di tecnici appartenenti ad enti pubblici o privati e di liberi professionisti, finalizzata a verificare l'agibilità dei fabbricati e a prescrivere i primi interventi di messa in sicurezza. Ovviamente nell'era dei telefoni cellulari con fotocamera, la maggior parte dei sopralluoghi è stata corredata da una serie di immagini digitali utili a testimoniare la valutazione del tecnico. In questo caso possiamo parlare di un utilizzo meramente documentale della fotografia digitale, molto distante da un vero e proprio rilevamento geometrico su base fotografica.

Il lavoro descritto nell'articolo si inquadra nel tema del rilievo e della valutazione dei danni che il patrimonio culturale architettonico subisce a seguito di un sisma. In tale contesto il rilievo geometrico delle lesioni è basilare per valutare la sicurezza del fabbricato, predisporre eventuali interventi di messa in sicurezza e definire il progetto di consolidamento e ripristino della struttura, volto ad accrescere la sua risposta alle azioni sismiche fino ai valori normativi. Tale attività avviene, per quanto possibile, nei giorni immediatamente successivi al sisma, pertanto i tecnici si trovano a operare in fabbricati danneggiati dal terremoto mentre lo sciame sismico è ancora in corso, quindi in condizioni di scarsa sicurezza oltre che di evidente difficoltà operativa (ostacoli creati da macerie e arredi caduti, polvere, scarsa illuminazione per assenza di collegamenti elettrici, etc.). Il vantaggio del rilevamento fotografico è legato alla possibilità di acquisire informazioni su un elemento strutturale danneggiato senza esserne a diretto contatto, soprattutto se si hanno le planimetrie dei locali e alcuni dati metrici generali di base. Nel contempo si richiede una strumentazione leggera (fotocamera digitale e distanziometro laser portatile), facilmente trasportabile e di rapido impiego. Tale rilevamento può essere ripetuto nel tempo, o in seguito a un altro evento sismico, permettendo di valutare l'evoluzione temporale del danno.

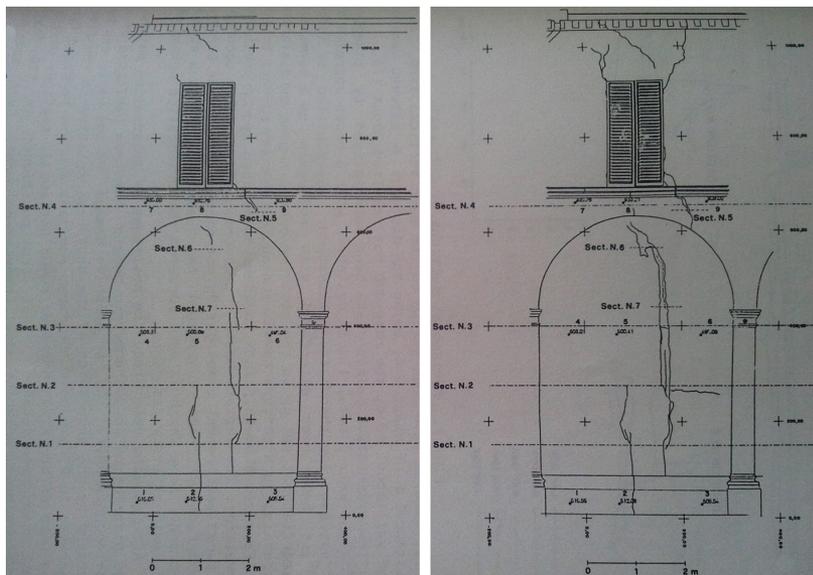
Il caso studio descritto riguarda l'applicazione della fotografia digitale al rilevamento post-sisma del quadro fessurativo e alla quantificazione dei danni strutturali presenti nel Palazzo Renata di Francia, sede del Rettorato dell'Università degli Studi fino agli eventi sismici del 20 e 29 maggio 2012, in seguito ai quali è stato dichiarato parzialmente inagibile. Il rilevamento è stato eseguito nei giorni compresi tra il 21 e il 28 maggio 2012, quindi tra i due eventi sismici. Alla fase di sopralluogo e acquisizione delle immagini è seguita un'importante attività di archiviazione delle fotografie e restituzione grafica del quadro fessurativo, in grado di fornire tutti gli elementi necessari a valutare l'agibilità della struttura. In particolare la fase di restituzione grafica ha permesso di raccogliere le informazioni contenute nelle singole

fotografie e tradurle in elaborati grafici complessivi e comprensibili agli strutturisti, permettendo la rapida individuazione delle lesioni strutturali e la loro lettura in un quadro d'insieme.

## STATO DELL'ARTE

La mappatura del quadro fessurativo presente in un fabbricato storico è fondamentale per effettuare la valutazione della condizione statica e della vulnerabilità sismica. Viene frequentemente affiancata da rilievi geometrici degli elementi strutturali, prelievi materici e prove di laboratorio volti a conoscere la resistenza dei materiali utilizzati e da indagini geognostiche, utili per determinare la portanza del terreno di fondazione.

Il rilevamento del quadro fessurativo viene per lo più eseguito tramite misure dirette, utilizzando dispositivi semplici (metri a stecche o a nastro e calibri digitali), al fine di acquisire le minime informazioni necessarie a stabilire il livello di danneggiamento dell'elemento strutturale, quali l'estensione e la larghezza delle principali lesioni. Inoltre è fondamentale posizionare le lesioni e gli elementi danneggiati all'interno del complesso architettonico, pertanto occorre effettuare il rilievo geometrico, così da disporre di planimetrie, sezioni e prospetti su cui riportare graficamente il quadro degli indicatori del dissesto strutturale. Accanto alle operazioni di rilievo diretto, da diversi decenni vengono affiancate tecniche di rilievo indiretto basate sulla restituzione fotografica da immagini, che consentono la rappresentazione metrica del fabbricato (vedi figura 1) e il relativo confronto sulla evoluzione delle lesioni nel corso del tempo (Gubellini et al., 1984). Il rapporto tra le tecniche di rilievo dirette ed indirette oggi è ancora molto forte, in quanto spesso il primo ha la funzione di supporto e verifica dei dati acquisiti con gli strumenti digitali. Per interpretare il cinematismo all'origine di una lesione, e quindi risalire alla causa della stessa, risulta utile conoscere anche lo stato di deformazione dell'elemento lesionato rispetto al suo stato iniziale. A tal fine sono disponibili diverse tecniche geomatiche. Ad esempio si possono utilizzare stazioni totali in modalità RL (reflectorless), rilevando un numero di punti sufficiente a



discretizzare con buona approssimazione la forma dell'oggetto. In alternativa gli strumenti ottici attivi consentono di coprire una maggiore dinamica di scala, dai manufatti di dimensioni contenute fino alla scala architettonica. Il loro utilizzo si sta diffondendo rapidamente grazie alla loro capacità acquisizione di molti punti quasi simultaneamente e in maniera non invasiva (Guidi et al., 2010) e di garantire una mappatura geometrica, anche di grandi superfici, con parametri di risoluzione, accuratezza ed incertezza di misura molto elevati. Si ricorda l'impiego dell'interferometria radar (Gens e Van Genderen, 1996) e dei sistemi a tempo di volo, sempre più utilizzati per il rilievo e lo studio delle deformazioni di grandi strutture (Tsakiri et al., 2006; Pesci et al., 2011; Chen et al., 2012; Guarnieri et al., 2013).

Per un'analisi di tipo locale si possono utilizzare sensori attivi o passivi. I primi, basati sul principio della triangolazione, consentono il rilevamento geometrico ad alta risoluzione di piccoli volumi, attraverso l'utilizzo di luce laser o strutturata, basata sulla proiezione di pattern (Kujawińska et al., 2009). Per quanto riguarda i sensori passivi si fa

riferimento alla fotogrammetria digitale, una tecnica che, a partire da immagini fotografiche digitali ad alta risoluzione e applicando dei particolari algoritmi di correlazione delle immagini, consente di creare dei modelli reality-based (Remondino e El-Hakim, 2006).

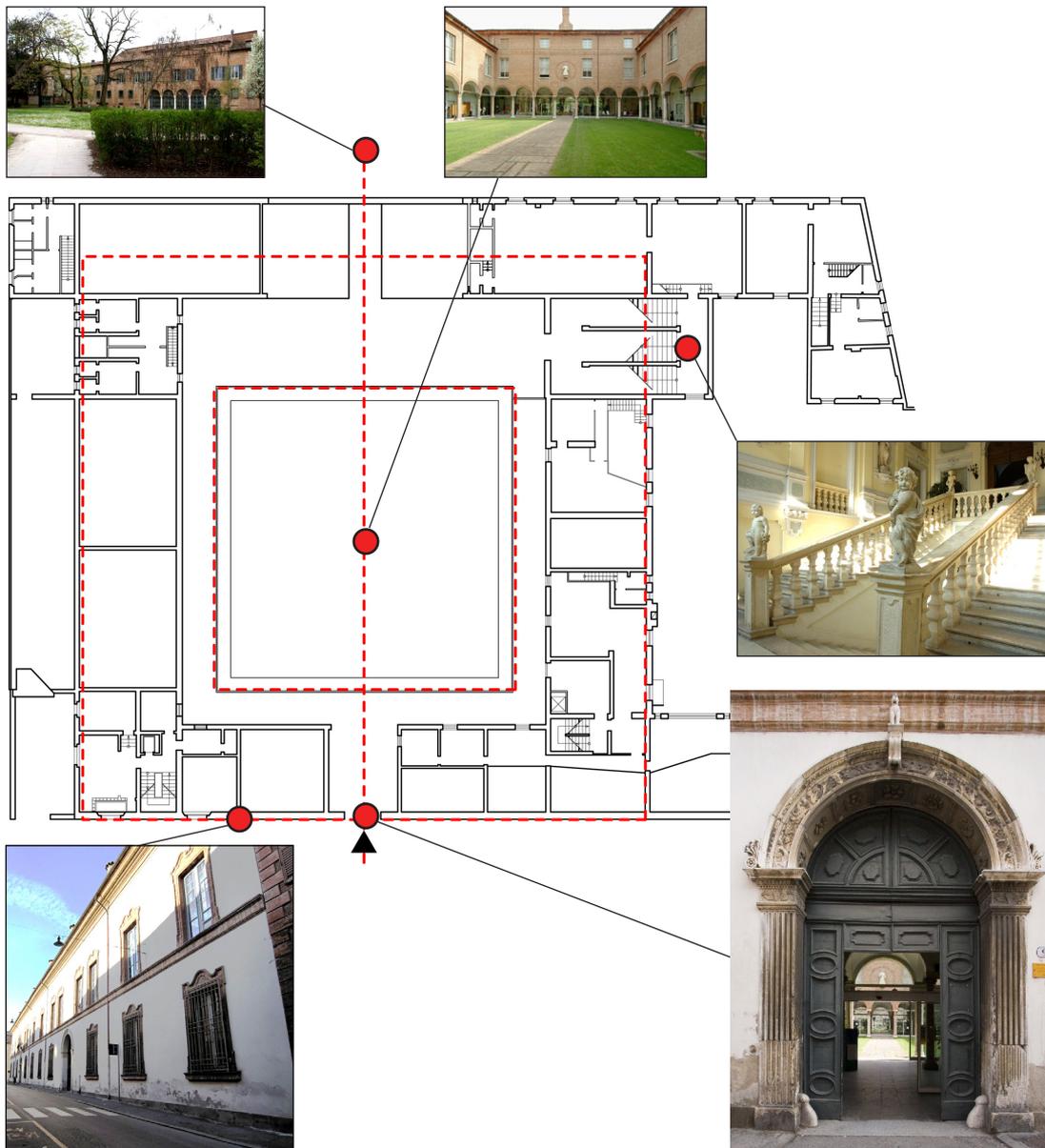
La possibilità di integrare immagini acquisite con diversi sensori permette di incrementare notevolmente l'analisi geometrica e materica dei beni culturali a diversi livelli di scala, dallo studio territoriale (Simon et al., 2010) a quello architettonico (El Hakim et al., 2004; Guidi et al., 2009) fino allo studio di piccoli artefatti 2D (Remondino et al., 2011). Uno dei casi studio esemplificativi per l'utilizzo integrato di sistemi di tipo attivo e passivo applicati su un artefatto di piccole dimensioni è rappresentato dalla analisi del dipinto della Monna Lisa (Borgeat et al., 2007).

Per il monitoraggio delle lesioni, in particolare, sono stati sviluppati numerosi tipi di sensori in grado di rilevare la variazione della distanza tra punti di riferimento infissi nella muratura a cavallo della lesione stessa. Per un monitoraggio continuo e automatico si ricordano i trasduttori

1. Confronto fra due restituzioni fotogrammetriche a distanza di 5 anni relative al rilievo del quadro fessurativo della chiesa di San Giacomo Maggiore (Bologna) avvenuta negli anni 70.

di posizione lineare (in questo ambito detti fessurimetri), che possono raggiungere accuratezze anche di 0,01 mm.

Questo panorama mostra come siano molteplici le tecniche che possono essere utilizzate per mappare le lesioni e determinare le deformazioni di un manufatto architettonico, in relazione al livello di dettaglio dell'analisi e alla dimensione del manufatto stesso. Tuttavia la maggior parte di queste richiede tempi di programmazione e di acquisizione dei dati incompatibili con le condizioni di emergenza in cui ci si trova ad operare a seguito di un evento sismico. L'impiego della fotografia digitale permette di ovviare a questo problema, data la rapidità che tale tecnica presenta nell'acquisizione di tutti i dati utili a descrivere lo stato di danneggiamento di un fabbricato, demandando ad una fase di post-elaborazione il compito di rappresentare graficamente i risultati del rilievo. Come è noto, il legame tra immagine e disegno è molto forte in diversi ambiti scientifici. Nel restauro, ad esempio, il ruolo e l'uso dell'immagine è ben codificato per tutto il processo, dal rilievo del manufatto fino alla sua restituzione attraverso



2. Sequenza di immagini fotografiche di alcune porzioni dell'edificio posizionate sulla planimetria del piano terra, sulla quale sono state evidenziate le linee geometriche principali e l'asse di simmetria.

so elaborati grafici, indirizzando l'uso delle immagini ad una specifica restituzione grafica, che si concretizza in tavole tematiche, accanto alle quali la fotografia ha sempre un ruolo essenziale per la comprensione dei fenomeni.

Nell'ambito del rilievo architettonico, le immagini da oltre un secolo rappresentano il dato di partenza dal quale poter estrarre attraverso la tecnica fotogrammetrica un modello geometrico dell'oggetto.

#### IL CASO STUDIO

Il palazzo Estense di San Francesco è più noto col nome di "Renata di Francia", per via della presenza durante gli anni 1536-1554 della duchessa Renata, figlia del re francese Luigi XII e moglie del duca Ercole II d'Este. Fu eretto a partire dal 1474 per volere di Ercole I d'Este, con l'intento di realizzare una delle più importanti fabbriche ducali all'interno dell'antico nucleo medioevale (Toselli, 1997).

Il complesso architettonico è considerato uno degli esempi più rappresentativi e compiuti della tipologia di palazzo con loggia, con una valenza



3. Sequenza di fotografie che illustrano i danni subiti dal fabbricato in seguito al terremoto. La foto a sinistra mostra la condizione di rischio durante il rilievo.

storica e architettonica che gli conferisce un ruolo di primo piano all'interno dello sviluppo culturale e storico del Rinascimento ferrarese (Zevi, 1971). La fabbrica, uno dei palazzi più maestosi e vasti dell'intero nucleo urbano per la presenza di una ampia corte interna e di un parco ampio rivolto a settentrione, è stato sede del Rettorato dell'Università degli Studi di Ferrara, dal 1963 al maggio 2012, quando ha riportato importanti lesioni in seguito al sisma (Bottoni, 1963).

L'edificio si compone di due livelli, il piano terreno e quello nobile, oltre all'ammezzato e il sottotetto, organizzati intorno ad una corte centrale quadrata. Il prospetto principale, rivolto a sud (figura 2), è di notevole ampiezza e costituisce uno degli elementi di maggiore rappresentanza. La disposizione generale del palazzo, che risale alla prima fase di edificazione, è improntata ad una grande regolarità, tanto da riconoscere un asse privilegiato di organizzazione sud-nord che consente di cogliere l'intera prospettiva del lotto (figura 2).

Il piano terra presenta un porticato, che su tre lati funge da spazio di accesso ai vari vani di servizio, mentre sul quarto (rivolto a nord) introduce ad una loggia passante, composta da tre file di colonne parallele, che rappresenta un filtro tra la corte interna e il giardino retrostante, l'antico parco Pareschi.

I nuclei principali sono composti dalla loggia passante nel corpo di fabbrica nord, la scala monumentale nel corpo est che immette negli ambienti del piano nobile, la loggia d'onore (detta anche salone dei passi perduti) e l'aula magna al piano nobile. L'importanza di tali ambienti è identificata anche dalla maggiore altezza rispetto agli spazi prospicienti.

Il palazzo è oggi organismo composito e stratificato, che conserva molti dei segni delle diverse configurazioni architettoniche della sua storia passata, per ampi tratti ancora leggibili. Di seguito alcune date fondamentali che hanno segnato la storia architettonica e strutturale di questo edi-

ficio:

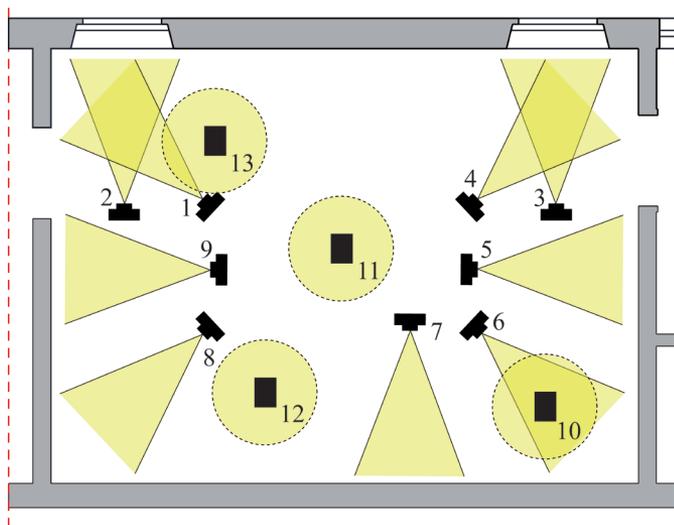
- 1474: fondazione del Duca Ercole I d'Este a cura di Pietro Benvenuti degli Ordini;
- 1491: crollo parziale del palazzo e nuovi lavori a cura di Biagio Rossetti;
- 1534-1535: grandi lavori di Ippolito II;
- 1570: il più gravoso evento sismico nella storia della città di Ferrara, descritto dai cronisti dell'epoca [1];
- 1738: grandi lavori di ristrutturazione;
- 1744-1746: costruzione dello scalone monumentale;
- 1944: danni per bombardamenti sulla città;
- 1960: inizio lavori di restauro curati da Pietro Bottoni;
- 1963: inaugurazione della sede dell'Università degli Studi.

La tecnica costruttiva adottata, come nella maggior parte degli edifici ferraresi, è una muratura in laterizio con malta, prevalentemente composta da calce aerea, che presenta buona caratteristiche meccaniche. Lo spessore prevalente delle murature portanti è un muro a tre teste, mentre la collocazione degli elementi lapidei (colonne, conci di chiave ecc) pare rispondere alle esigenze di ordine sia statico, sia spaziale.

Il palazzo nel suo complesso appare come un esempio di maestria costruttiva, nel quale i progettisti dell'epoca hanno saputo fondere scelte strutturali ardite, dando luogo a un organismo di particolare valore architettonico.

E' evidente che, pur applicando raffinate simulazioni di calcolo agli elementi finiti e approfondite analisi sulle caratteristiche dei materiali, il comportamento sismico di un edificio come palazzo Renata di Francia è di difficile valutazione, poiché dipende da una configurazione geometrica e strutturale con numerose irregolarità e variabilità al suo interno (Mallardo et al., 2008). Le stratificazioni hanno inoltre apportato modifiche agli elementi costruttivi e alle strutture non sempre riconoscibili, né individuabili da ricerche archivistiche.

Già nel corso del primo sopralluogo, svolto dall'ufficio tecnico dell'Ateneo poche ore dopo il primo sisma, è apparso evidente l'importante



4. Schema planimetrico della posizione dei punti di presa di una stanza e immagini relative alle lesioni (corrispondenti alle fotografie 10 e 6).

danneggiamento causato dal terremoto e riguardante tanto gli elementi strutturali (figura 3), quanto i non strutturali. Le maggiori criticità sono state individuate nel loggiato del piano primo, in particolare il corridoio posto sul lato ovest è stato immediatamente dichiarato inagibile e si è rapidamente intervenuti per metterlo in sicurezza (figure 8 e 9).

Il loggiato, gli uffici dell'ala est del primo piano, il salone dei passi perduti e lo scalone monumentale presentavano una serie di lesioni delle volte a crociera, pertanto se ne è limitato temporaneamente l'accesso.

Il giorno dopo, 21 maggio, si è dato inizio alle operazioni di rilevamento fotografico delle quadro fessurativo, seguendo una modalità operativa descritta di seguito.

#### STRUMENTI

Gli strumenti utilizzati durante il rilievo sono stati una coppia di distanziometri laser Leica e di fotocamere digitali Canon, opportunamente calibrate prima della campagna fotografica, oltre a apparati di misura diretta quali metri a nastro.

Il distanziometro è uno strumento di misura basato sul principio del tempo di volo, con un campo di utilizzo compreso tra 20 cm e 100 m e con una precisione di acquisizione del singolo punto dell'ordine del millimetro; pertanto, per effettuare misure inferiori, si sono utilizzati comuni metri a nastro e rilievo diretto dei punti.

Le fotocamere sono modelli PowerShot SX130IS (Canon), dotate di sensori CMOS con risoluzione di 12,1 megapixel, utilizzate con focale e tempi di esposizione variabili.

#### METODOLOGIA OPERATIVA

Si possono individuare tre fasi di lavoro: la pianificazione del rilievo, l'acquisizione del dato e la restituzione grafica. Nel caso in esame la priorità è stata data al contenimento dei tempi nella fase di acquisizione, per ovvi motivi di sicurezza degli operatori.

Per quanto riguarda la pianificazione del rilievo ci si è basati sulle planimetrie del fabbricato messe a disposizione dall'amministrazione universitaria. Tali elaborati sono stati utilizzati come base geometrica per la georeferenziazione delle opera-

zioni di rilievo. Partendo dalla planimetria, sono definiti alcuni aspetti fondamentali.

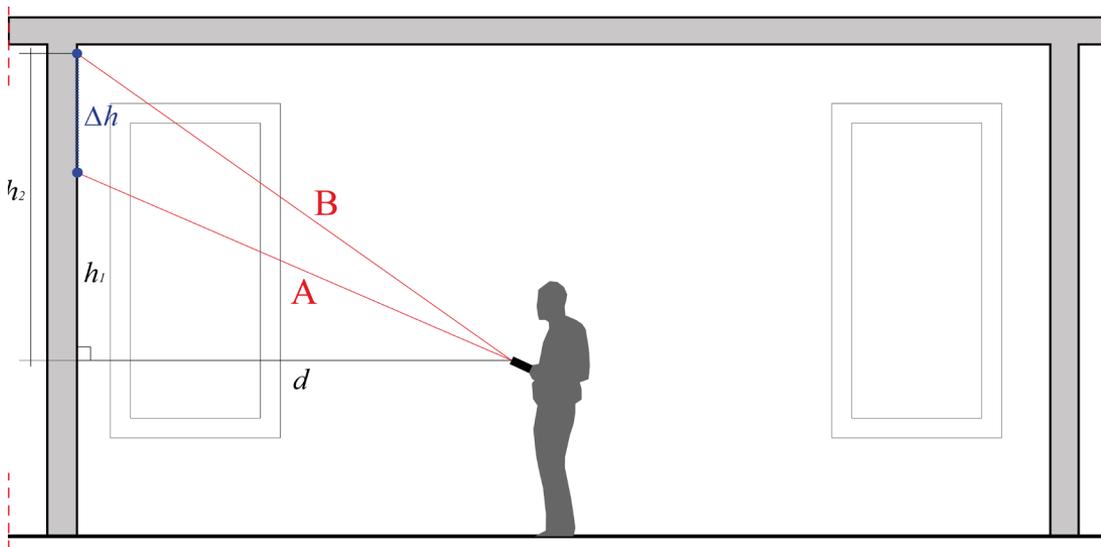
In primis si è proceduto alla codifica univoca degli ambienti sulla mappa, per definire una griglia di riferimento per la creazione del database.

In parallelo si è operata una classificazione a priori delle tipologie di lesioni, iniziando a considerare la codifica grafica da adottare per rappresentarle. Sulla base della mappa e della famiglia di lesioni individuate, si è proceduti alla definizione di un metodo di codifica delle immagini fotografiche che consentisse di porle in relazione all'ambiente e alla lesione rappresentata.

Infine sono state predisposte delle schede fotografiche per ogni ambiente, per poter minimizzare il tempo di permanenza all'interno del fabbricato.

Una volta terminata la fase di preparazione, si è passati alla acquisizione dei dati, seguendo una serie di passaggi che sono stati ripetuti per ogni ambiente del fabbricato.

Innanzitutto sono state individuate le lesioni significative all'interno dell'ambiente e sono state restituite sull'eidotipo, numerate e classificate



5. Schema di acquisizione della differenza di quota  $\Delta h$  tra due punti di una lesione tramite misura di tre distanze giacenti sul medesimo piano.

seguendo il principio di divisione definito in partenza.

Quindi si è proceduto alla campagna di acquisizione e codifica delle immagini digitali, posizionando sull'eidotipo la posizione dell'operatore. Dallo schema (figura 4) si può osservare come si sia deciso di adottare una rappresentazione iconografica che identifica non solo la posizione delle fotocamera ma anche la direzione; nel caso delle fotografie del soffitto si è usato un cerchio tratteggiato, mentre per il pavimento un cerchio continuo.

Da ognuno di questi punti con il distanziometro elettronico sono state prese tre misure, corrispondenti alla minima distanza dal piano a cui appartiene la fessura ( $d$ ), e ai due punti che definiscono l'altezza della lesione.

Questo tipo di procedura non consente ovviamente di avere una misura molto accurata della estensione della fessura, che spesso non ha un andamento verticale, ma è principalmente finalizzata alla rapidità della esecuzione.

Pertanto, assumendo che i segmenti A, B,  $d$  giacciono sul medesimo piano, attraverso alcuni sem-

plici calcoli è possibile risalire alla proiezione verticale (altezza) dei due punti estremi della fessura ( $\Delta h = h_1 - h_2$ ), un riferimento metrico indispensabile per scalare l'immagine nella fase di post-elaborazione (figura 5). Queste misure sono state riportate sull'eidotipo accanto al grafico della fessura. Infine, ad ogni stanza è stato attribuito un livello di danneggiamento, che è stato soggetto a verifica durante la fase di restituzione dei dati acquisiti.

Al termine delle operazioni di rilievo, le immagini sono state organizzate e strutturate in un database relazionale.

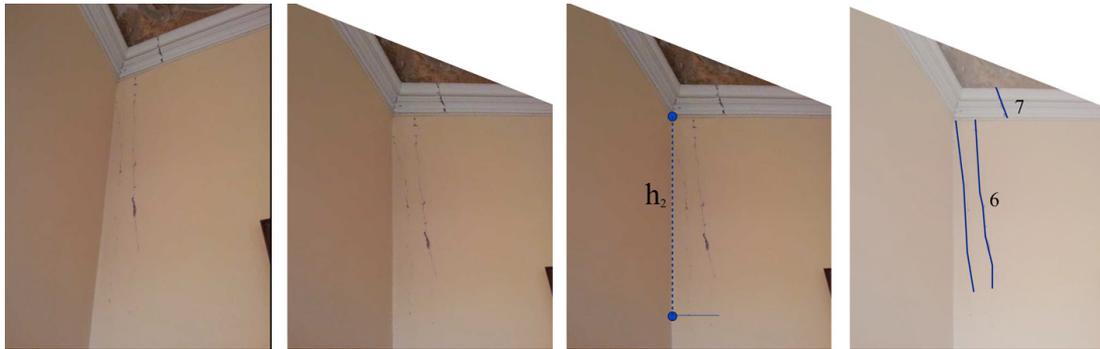
Passando alla fase di restituzione grafica, gli ambienti sono stati disegnati in ambiente CAD 2D. Per ciascuna immagine, indicizzata nel database, si è effettuato un semplice raddrizzamento fotogrammetrico digitale, sfruttando la geometria degli ambienti risultante dai rilievi e dalle planimetrie.

Sulle immagini raddrizzate e opportunamente scalate secondo la misurazione ottenuta con il distanziometro, sono state successivamente restituite le lesioni principali, rappresentandole nei

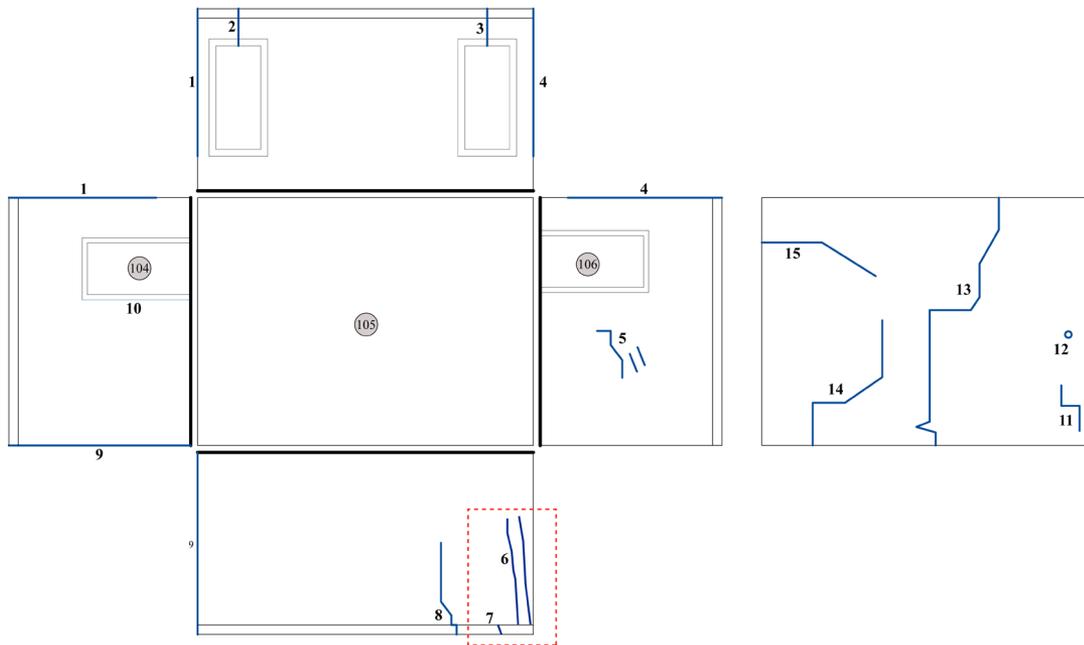
principali tratti distintivi, ovvero direzione e posizione.

Gli ambienti particolarmente complessi dal punto di vista architettonico o di particolare pregio storico-artistico sono stati rappresentati mediante l'impiego delle classiche sei proiezioni mongiane. A conclusione di questa fase di restituzione, si è ottenuta una rappresentazione bidimensionale complessiva del quadro fessurativo dell'intero organismo architettonico, nella quale sono apparse evidenti le correlazioni tra le lesioni e i punti di maggiore criticità dal punto di vista strutturale (figura 7).

In questa fase si è raffinata la distinzione definita a priori tra le diverse tipologie di fessura, definendo una nuova divisione fra le lesioni riscontrate: lesione verticale, diagonale, e orizzontale su parete, lesione su pavimento, lesione su soffitto, singolarità. La maggiore differenziazione sulle lesioni a parete è giustificata dalla loro maggiore presenza e variazione. Per ognuna di queste tipologie è stata identificata una rappresentazione iconografica che consentisse di identificarle rapidamente nella mappa generale (figura 8).

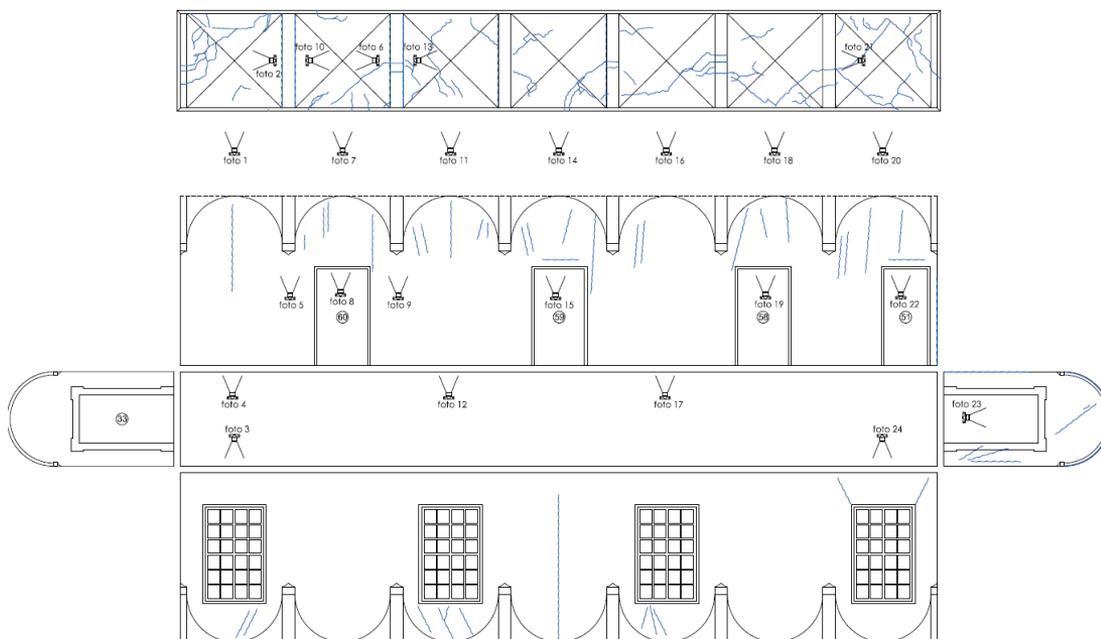
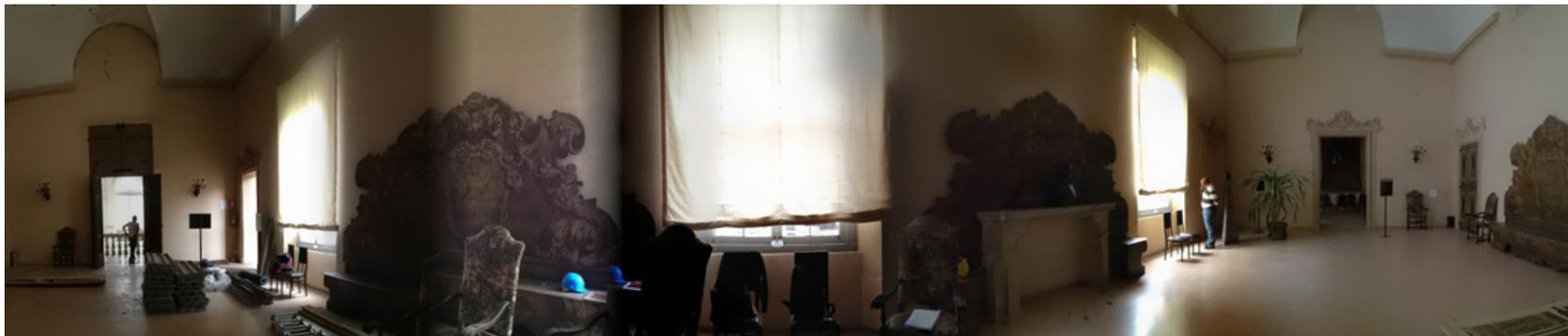


6. Processo di traduzione delle immagini in rappresentazione grafica applicato ad una stanza a campione. Nell'ordine: immagine originale; immagine raddrizzata; immagine scalata secondo la misura acquisita; ridisegno delle fessurazioni localizzate inquadrata dalla immagine; rappresentazione del quadro fessurativo di un ambiente con relative proiezioni.



Infine, si è effettuata una mappatura delle lesioni, attribuendo a ciascun ambiente uno tra quattro livelli di gravità di danno, in relazione al numero e alla tipologia delle lesioni presenti, in maniera da creare una mappatura basata su una codifica di colore immediatamente comprensibile (figura 9). Per meglio comprendere l'entità del lavoro svolto, si riporta di seguito una tabella riassuntiva.

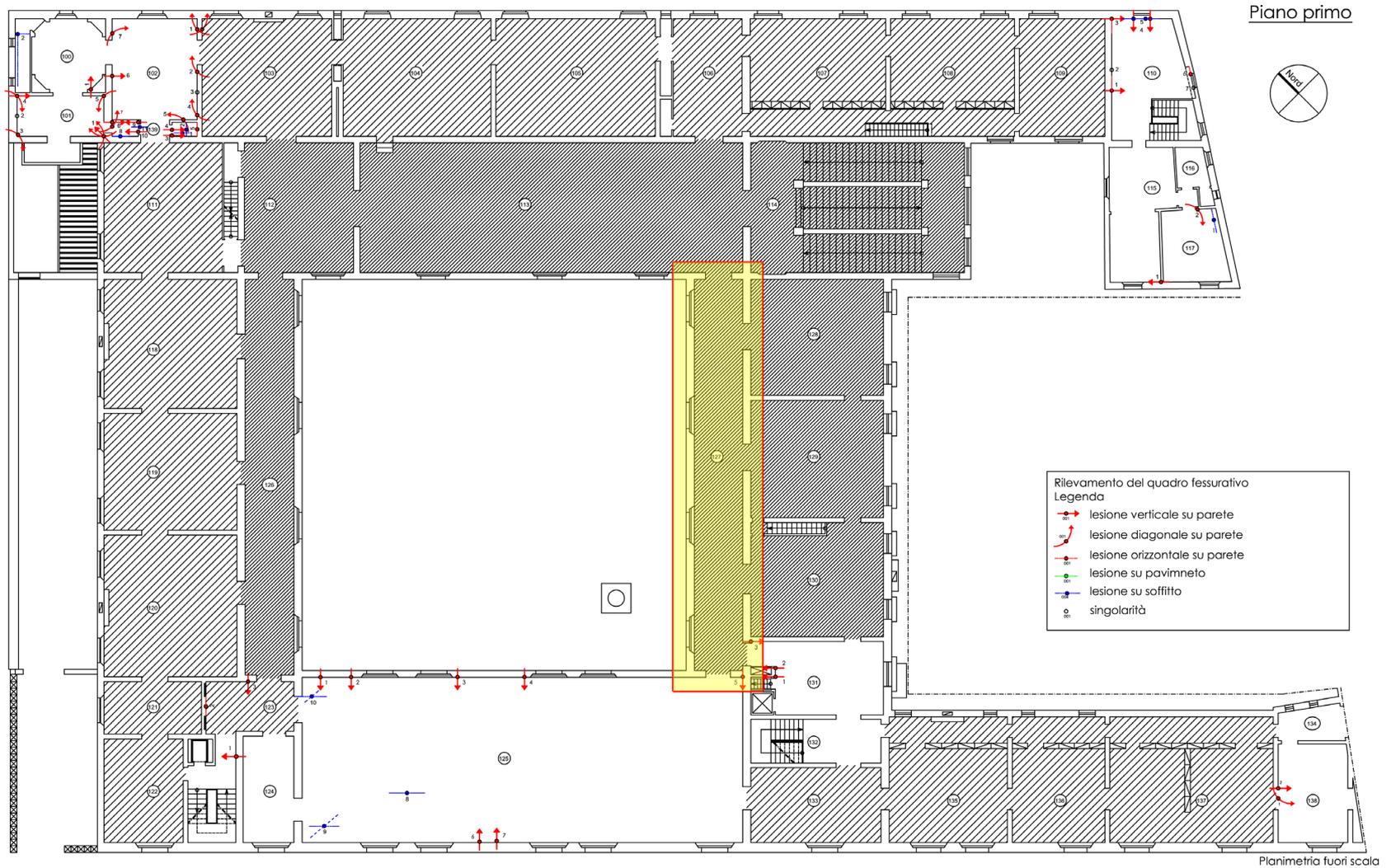
	Stanze	Immagini	Lesioni	Tempo (ore)
Piano Terra	43	83	70	6
Piano Ammezzato	32	70	64	5
Piano Primo	40	74	60	15
Esterno	-	15	18	1
<b>Totale</b>	<b>115</b>	<b>242</b>	<b>212</b>	<b>27</b>



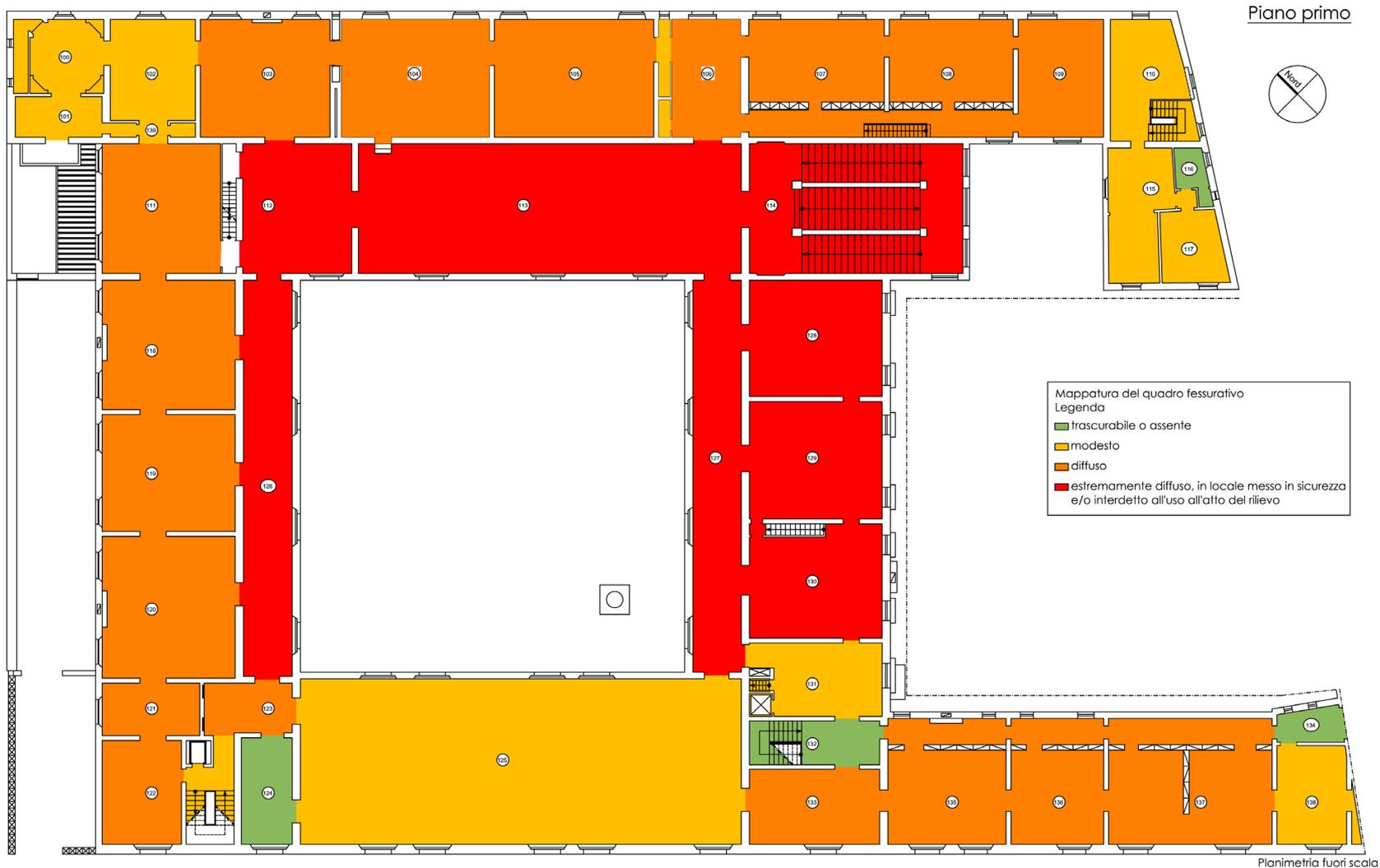
### CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si è dimostrato come l'utilizzo di immagini fotografiche sia vincente nel rilievo del quadro fessurativo di un fabbricato in situazioni di emergenza, in cui sia indispensabile operare con la massima celerità per la sicurezza degli operatori. Si è visto altresì l'importanza di una adeguata organizzazione delle informazioni e di una traduzione grafica studiata ad hoc per fornire uno strumento completo di analisi e quantificazione del danno. La metodologia descritta può essere generalizzata, consentendo una sua applicazione ad altri casi studio in condizioni di emergenza analoghe. Inoltre la mappatura e rappresentazione geometrica di questi fenomeni non esclude la possibilità di un confronto nel tempo, per verificarne un possibile quadro evolutivo delle lesioni all'interno di un processo di monitoraggio dell'edificio.

7. Foto panoramica e relativa rappresentazione di uno degli ambienti caratterizzati dal quadro fessurativo più significativo.



8. Mappature generale del piano primo del quadro fessurativo con relativa distinzione grafica della tipologia della lesione.



9. Mappa cromatica del primo piano con indicazione del livello di emergenza strutturale delle singole stanze.

## NOTE

[1] Il terremoto sicuramente colpì il palazzo, ma non esiste una indagine approfondita dell'epoca sui danni subiti. Una conferma diretta si ha dalla cronaca citata: "Ruine grandi della città...il Palatio del Cardinale da S.to Francesco ruinate in parte..." (Memoria de' gran Terremoti, e Ruine causate da essi nella città di Ferrara l'anno 1570, Anonimo)

## BIBLIOGRAFIA

Borgeat, Louis. Godin, Guy. Mascotte, Pellerine. Poirier, Juliane. Blais, Francois. Beraldin, Jean-Angelo (2007), *Visualizing and Analyzing the Mona Lisa*, in IEEE Computer Graphics and Applications, 27(6), 2007, pp. 60-68.

Bottoni, Piero (1963), *Problemi della moderna composizione architettonica degli ambienti storici e nel restauro dei monumenti*, Milano.

Chen, Shen-En. Liu, Wanqiu. Bian, Haitao. Smith, Ben (2012), *3D LiDAR Scans for Bridge Damage Evaluations*, in Forensic Engineering, 2012, pp. 487-495.

El-Hakim, Sabry. Beraldin, Jean-Angelo. Picard, Michael. Godin, Guy (2004), *Detailed 3D reconstruction of large-scale heritage sites with integrated Techniques*, in IEEE Computer Graphics and Application, 24 (3), 2004, pp. 21-29.

Farinelli Toselli, Alessandra (1997), *Palazzo Renata di Francia*, a cura di L. Olivato, Corbo, 1997.

Gens, Rudiger. Van Genderen, John (1996), *SAR interferometry: issues, techniques, applications*, in International Journal of Remote Sensing, 17, 1996, pp. 1803-1836.

Guarnieri, Alberto. Milan, Nicola. Vettore, Antonio (2013), *Monitoring Of Complex Structure For Structural Control Using Terrestrial Laser Scanning (TLS) And Photogrammetry*, in International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration, 7 (1), 2013, pp. 54-67.

Gubellini, Alberto. Lombardini, Giuseppe. Russo, Paolo (1984), *Application of high precision levelling and photogrammetry to the detection of the movements of an architectonic complex produced by subsidence in the town of Bologna*. In: Proceedings of the third international Symposium on Land Subsidence, IAHS Publication, 151,

1984, pp. 257-267.

Guidi, Gabriele. Russo, Michele. Beraldin, Jean-Angelo (2010), *Acquisizione e modellazione poligonale*, McGraw Hill, Milano, pp. 480.

Guidi, Gabriele. Remondino, Fabio. Russo, Michele. Menna, Fabio. Rizzi, Alessandro. Ercoli, Sebastiano (2009), *A multi-resolution methodology for the 3D modeling of large and complex archeological areas*, in Special Issue in International Journal of Architectural Computing (IJAC), pp 39-55.

Kujawinska, Malgorzata. Sitnik, Robert. Grzegorz, Dymny. Karaszewski, Maciej. Michonski, Kuba. Krzeslowski, Jakub. Mularczyk, Krzysztof. Bolewicki, Pawel (2009), *Remote on-line monitoring and measuring system for civil engineering structures*. In: Proceedings of Optical Measurement Systems for Industrial Inspection, Munich, Germany, Vol. 7389, 2009.

Mallardo, Vincenzo. Malvezzi, Roberto. Milani, Enrico. Milani, Gabriele (2008), *Seismic vulnerability of historical masonry buildings: A case study in Ferrara*, in Engineering Structures, 30, 2008, pp. 2223-2241.

Pesci, Arianna. Casula, Giuseppe. Bonali, Elena. Boschi, Enzo (2011), *Un metodo per lo studio di edifici storici mediante misure laser a scansione terrestre: le due torri di Bologna*, in Rapporti Tecnici INGV, 178, 2011, pp. 1-28.

Remondino, Fabio. Rizzi, Alessandro. Barazzetti, Luigi. Scaioni, Marco. Fassi, Francesco. Brumana, Raffaella. Pelagotti, Anna (2011), *Review of Geometric and Radiometric Analyses of Paintings*, in The Photogrammetric Record, 26, 2011, pp. 439-461.

Remondino, Fabio. El-Hakim, Sabry (2006), *Image-based 3D modelling: a review*, in The Photogrammetric Record, 21 (115), 2006, pp. 269-291.

Simon, Camille. Huxhagen, Uwe. Mansouri, Alamin. Heritage, Adrian. Boochs, Frank. Marzani, Franck (2010), *Integration of high resolution spatial and spectral data acquisition systems to provide complementary datasets for cultural heritage applications*. In: Proceedings of IS&T/SPIE Electronic Imaging Meeting, San Jose, United States, 2010.

Tsakiri, Maria. Lichti, Derek. Pfeifer, Norbert (2006), *Terrestrial laser scanning for deformation monitoring*. In: Proceedings of the 12th FIG Symposium on Deformation Measurements and 3rd IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Baden, Austria.

Zevi, Bruno (1971), *Saper vedere l'urbanistica: Ferrara di Biagio Rossetti, la prima città moderna europea*, Einaudi, Torino.