

# Valutazione speditiva della vulnerabilità sismica di murature in pietra: un caso di studio

F. Doglioni, G. Mirabella Roberti

*Dipartimento di Storia dell'Architettura, Università IUAV di Venezia, Italia*

**SOMMARIO:** Il presente lavoro riprende alcuni risultati ottenuti nel corso di una ricerca sviluppata per conto dell'ICR nell'ambito del programma ENEA – MIUR per la mitigazione del rischio da catastrofi naturali sul patrimonio culturale. Il programma ha consentito la messa a punto e la sperimentazione di procedure di analisi integrata di dati tecnici di pericolosità territoriale sismica e di vulnerabilità individuale, realizzata approfondendo i dati relativi ad un territorio campione della regione Umbria (comune di Nocera Umbra) e delle relative fabbriche già schedate. La ricerca ha consentito di individuare ed elaborare una serie di parametri semplici in grado di caratterizzare le murature in pietrame dal punto di vista del comportamento meccanico. A questi sono correlati i risultati di prove di caratterizzazione meccanica e chimico fisica sui materiali costituenti, eseguite in situ e in laboratorio, in modo da ottenere una procedura ripetibile per la determinazione di indici complessivi di vulnerabilità.

**ABSTRACT:** This paper recall some of the results obtained during a research developed on behalf of the ICR, in the framework of a program ENEA-MIUR for the reduction of the risk for natural catastrophes to the cultural heritage. The program allowed setting up and testing integrated procedures for the analysis of technical data of territorial seismic danger and individual vulnerability, developed on a test area in the Umbria region (the municipality of Nocera Umbra) and their buildings already documented. The research allowed selecting and elaborating a series of simple parameters able to characterize stone masonry regarding their mechanical behaviour. The results of some tests of mechanical and chemical-physical characterization, obtained both in situ and in the laboratory, are also correlated, in order to obtain a repeatable procedure for the determination of an overall vulnerability index.

## 1 INTRODUZIONE

La necessità di un'estesa opera di prevenzione dei danni da rischio sismico si pone con drammaticità per una considerevole parte del costruito storico italiano. Alla vastità del problema fa riscontro la grande difficoltà nell'individuazione di una scala di priorità per gli interventi di prevenzione, che non può non basarsi anche sulla valutazione di parametri oggettivi di vulnerabilità degli edifici (Petrini 1995), da affiancare certamente ad altri parametri meno facilmente oggettivabili (come ad esempio giudizi di valore: storico, artistico, sociale, ecc.).

Nel complesso problema della valutazione di vulnerabilità degli edifici rientra quello preliminare della valutazione delle qualità meccaniche delle murature di cui l'edificio è costituito: tale valutazione analitica, più o meno dettagliata e supportata da riscontri sperimentali, precede dal punto di vista logico quella applicata all'intero edificio, costituendo una sorta di esame preliminare alla individuazione di meccanismi di collasso di pareti o porzioni di edificio, per verificare la sussistenza di condizioni minime di resistenza o fornire orientamenti nella scelta dei meccanismi più probabili (Doglioni et al. 1994).

Poiché la sperimentazione diretta delle proprietà meccaniche dei manufatti murari (tramite prove *in situ* o prelievo di campioni da sottoporre a prova in laboratorio) si rivela onerosa e raramente praticabile, vista la invasività di tali prove, sono state sperimentate con successo diverse tecniche di indagine, prevalentemente non distruttive o poco distruttive, applicate in passato al controllo di strutture civili o industriali, in grado di fornire indicazioni (spesso solo qualitative) sulle caratteristiche costruttive o sulla presenza di irregolarità o imperfezioni nascoste. Nel caso

specifico della valutazione preventiva di vulnerabilità sismica, è ancora più stringente la necessità di selezionare tecniche e metodologie di indagine, a basso costo e facilmente acquisibili da operatori non specialisti, e formalizzare delle procedure che possano servire da supporto alle operazioni di schedatura per il controllo degli edifici.

D'altro canto, molti studi recenti sul comportamento sismico degli edifici storici hanno posto l'accento sulla necessità di studiare, particolarmente per le murature in pietrame, la regola costruttiva del muro e la sua apparecchiatura, che hanno dimostrato di svolgere un ruolo fondamentale nel determinare la qualità della risposta meccanica, certamente almeno pari a quello svolto dalla resistenza dei singoli materiali (Giuffrè 1993; Gurrieri 1999; Doglioni 2000). Il giudizio sulla qualità costruttiva (sull'uso delle regole dell'arte) può essere opportunamente dedotto da osservazioni e misurazioni di tipo geometrico e visivo, quando il paramento e la sezione del muro siano direttamente rilevabili. A questo tipo di rilievi si affiancano sempre più spesso indagini sulla stratigrafia degli elevati che consentono di individuare le parti omogenee e ricostruire in modo relativo la successione delle fasi costruttive (Doglioni 1997).

Il presente lavoro riprende alcuni risultati ottenuti nel corso di una ricerca recentemente conclusa sviluppata per conto dell'Istituto Centrale del Restauro nell'ambito del programma ENEA – MIUR "Catastrofi naturali e loro conseguenze sul patrimonio culturale e ambientale italiano, mitigazione e previsione di alcune tipologie di eventi". Tale programma, secondo il coordinatore A. Bianchi, "ha fornito l'opportunità per un avanzamento nella riflessione teorica e tecnica sui problemi della prevenzione e della risposta agli eventi naturali disastrosi quali il sisma, attraverso l'utilizzazione della banca dati creata in occasione del terremoto del 1997. Il programma ha costituito infatti il quadro ideale per un'esperienza di lavoro multidisciplinare, consistente nella messa a punto e nella sperimentazione di procedure di analisi integrata di dati tecnici di pericolosità territoriale sismica e di vulnerabilità individuale, realizzata approfondendo i dati relativi ad un territorio campione della regione Umbria (comune di Nocera Umbra) e delle relative fabbriche già incluse nel sistema" (Bianchi 2003).

Un primo obiettivo della ricerca è consistito nell'individuare ed elaborare una serie di parametri semplici, da ottenersi ad esempio con elaborazioni geometriche, in grado di caratterizzare le murature in pietrame dal punto di vista del comportamento meccanico. A questi vanno correlati i risultati di prove di caratterizzazione meccanica sui materiali costituenti, da eseguirsi possibilmente in situ e con strumentazioni sufficientemente semplici, in modo da ottenere una procedura ripetibile per la determinazione di indici complessivi di vulnerabilità.

Un secondo obiettivo riguarda l'elaborazione di criteri omogenei per utilizzare i risultati di prove non distruttive o moderatamente distruttive di diversa natura, in modo da ricavare indicazioni attendibili sulla vulnerabilità intrinseca delle murature stesse anche da dati molto eterogenei. Una particolare attenzione è stata rivolta alla selezione di tecniche di indagine in funzione delle esigenze specifiche di un rilevamento speditivo, che garantiscano risultati affidabili a fronte di costi ragionevolmente contenuti.

Il terzo obiettivo operativo è consistito nella predisposizione di una scheda di rilevamento, concepita come possibile segmento della più generale scheda di vulnerabilità, in cui raccogliere sistematicamente i dati relativi ai singoli parametri individuati, al fine di consentire, attraverso la combinazione dei valori ottenuti, la stima di un "indice di vulnerabilità muraria". Si è considerata la possibilità di ottenere tale indice anche utilizzando un numero più ristretto di parametri, associando ad esempio un minore livello di affidabilità all'indice così ottenuto.

## 2 STIMA DELLA VULNERABILITÀ MURARIA

Le strutture murarie presentano caratteristiche e condizioni il cui variare influenza in modo molto marcato la risposta sismica. Murature con efficaci legami di adesione e coesione e più elevate caratteristiche meccaniche, in particolare della malta, tendono a discretizzarsi in grandi blocchi, subendo l'azione dei principali meccanismi di dissesto legati alla configurazione geometrica della costruzione. Al decrescere di tali caratteristiche e all'aumentare della vulnerabilità propria della muratura, si attivano sub-meccanismi di più limitata ampiezza fino a giungere, nel caso di inadeguate caratteristiche meccaniche ed adesivo-coesive, a disgregazioni diffuse che portano a collasso anche senza che si attivino i meccanismi di danno tipici per configurazione. I diversi livelli di vulnerabilità della muratura indicano perciò non soltanto una diversa propensione al danneggiamento, ma anche il variare delle modalità di danno (per grandi meccanismi/per di-

sgregazione diffusa) cui dovrebbero corrispondere approcci di intervento marcatamente differenziati.

Un procedimento di stima della vulnerabilità sismica deve quindi fondarsi su una valutazione dell'efficienza e della qualità costruttiva propria della muratura: l'efficienza è legata al mantenimento o alla perdita di qualità costruttive iniziali. Esse vanno quindi valutate con indicatori separati, per descrivere da un lato l'allontanamento dalla condizione iniziale dovuto al degrado, al dissesto e alle trasformazioni subite, dall'altro le caratteristiche di costruzione, legate in particolare all'ingranamento murario sul piano dei paramenti e in direzione trasversale. Tuttavia l'elemento di maggiore rilevanza per una valutazione dell'efficienza (e quindi anche della vulnerabilità) è costituito dalle caratteristiche attuali della malta che forma la muratura, malta che è necessario esaminare in modo specifico.

Si propone di valutare la *vulnerabilità muraria* secondo un indicatore articolato in cinque livelli e inserire questo valore nel procedimento di stima della vulnerabilità complessiva del manufatto. La valutazione sarà opportunamente articolata per macroelementi della costruzione (es. sagrestia laterale, torretta sopralzata, ecc.) nel caso le murature siano differenziate nelle parti costruite in tempi diversi.

I livelli previsti sono:

- 5 – muratura superiore: efficiente e di elevata qualità costruttiva (bassa vulnerabilità);
- 4 – muratura medio-superiore: efficiente e ben costruita (vulnerabilità limitata);
- 3 – muratura media: di media efficienza e qualità costruttiva (vulnerabilità media);
- 2 – muratura medio-inferiore: scarsamente efficiente e/o di mediocre qualità costruttiva (vulnerabilità accentuata);
- 1 – muratura inferiore: non efficiente e/o di cattiva qualità costruttiva (vulnerabilità elevata).

La muratura superiore (livello 5) presenta le più elevate qualità costruttive, in genere proprie delle grandi opere, con tessiture a forte ingranamento sul piano e trasversale, malte di allettamento e nel nucleo che assumono a riferimento l'*opus caementicium* di tradizione romana e perciò di elevate caratteristiche adesivo-coesive. In tali contesti il lesionamento, se presente, si manifesterà con lesioni concentrate e non ramificate, dovute ad un comportamento marcatamente a blocco rigido, e non devono essere presenti marcati interventi di trasformazione e fenomeni di degrado. Si tratta quindi di murature ben costruite e ben conservate.

La muratura medio-superiore (livello 4) può essere costituita sia da una muratura di elevata qualità che ha subito fenomeni di parziale degrado, dissesto o trasformazione, sia da una muratura ben conservata ma con caratteristiche costruttive inferiori al massimo standard per almeno un parametro significativo: minore ingranamento, minori prestazioni della malta, ecc.

La muratura di livello medio (livello 3) può essere sia una muratura di qualità che ha subito accentuati fenomeni di degrado, dissesto, trasformazione, sia una muratura ben conservata con caratteristiche di ingranamento e qualità delle malte non ottimali. Le lesioni, se presenti, si manifesteranno con ramificazioni e bracci paralleli non eccessivamente articolati, ed il comportamento tenderà a svilupparsi con discretizzazione in blocchi di ridotte dimensioni, con zone intermedie di plasticizzazione-disgregazione.

La muratura di livello medio-inferiore (livello 2) può essere costituita da una muratura di maggiore qualità che ha subito accentuati processi di degrado, dissesto, trasformazione, oppure da una muratura ben conservata di ridotte caratteristiche costruttive, con ingranamenti limitati, separazione tra paramenti nel nucleo, malte di ridotte caratteristiche meccaniche ed adesivo-coesive. Le lesioni, ove presenti, tenderanno a presentarsi con assetto fortemente ramificato discretizzando in piccoli blocchi la muratura, e con ampie zone di plasticizzazione-disgregazione. Il comportamento disgregativo prevale su quello a meccanismi e formazione di blocchi, a fatica riconoscibile.

La muratura di livello inferiore (livello 1) può essere costituita da una muratura di qualità media o medio-inferiore che ha subito accentuati e diffusi fenomeni di degrado, dissesto e trasformazione, oppure da una muratura povera largamente al di sotto della regola dell'arte per ingranamento, con separazione del nucleo dai paramenti, qualità meccaniche ed adesivo-coesive delle malte del tutto inadeguate (malte che si tolgono a mano senza attrezzi dall'allettamento, che si schiacciano manualmente polverizzandosi, ecc.). I quadri di dissesto presenteranno ampie deformazioni plastiche, lesioni diffuse con enucleazione dei singoli conci dalla malta, senza che sia più possibile riconoscere meccanismi di insieme separandoli dai fenomeni disgregativi diffusi.

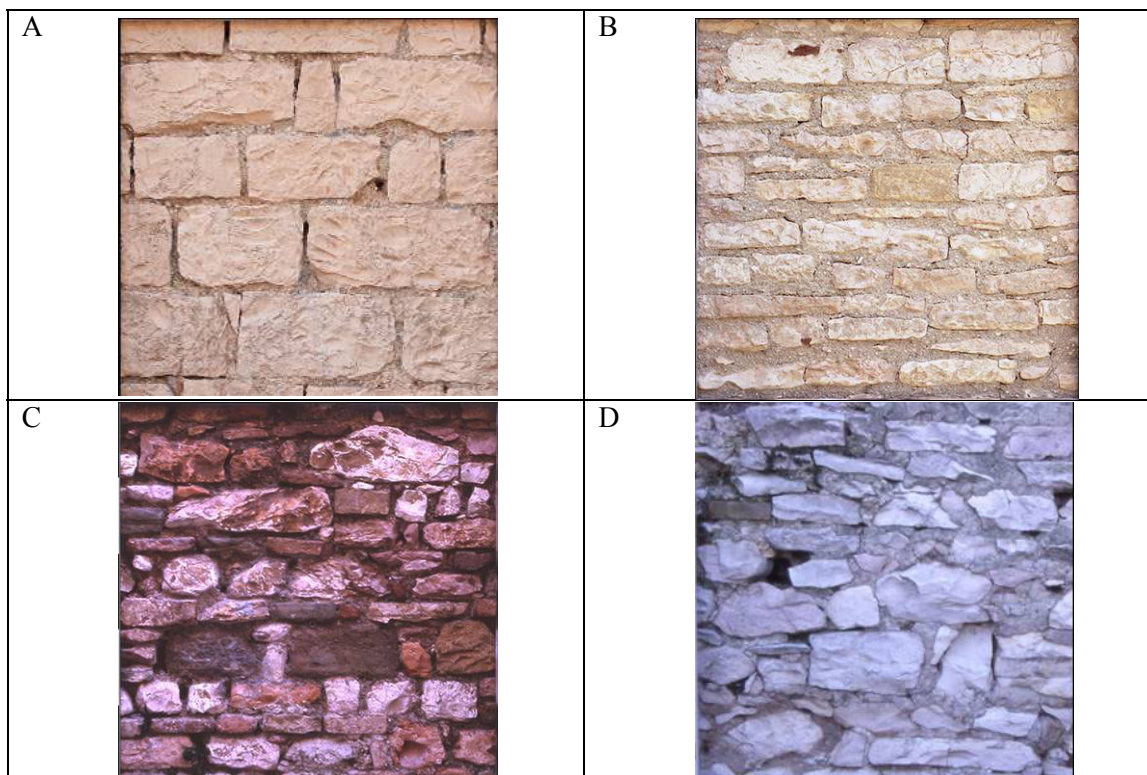


Figura 1. Esempificazione delle quattro classi di paramenti catalogate (territorio di Nocera Umbra).

### 3 DESCRIZIONE DEL CAMPIONE

Il gruppo di manufatti individuato come campo di studio nel territorio di Nocera Umbra presenta caratteristiche e condizioni particolari che hanno indirizzato la scelta dei campioni di muratura da esaminare. Tra queste:

- presenza di manufatti già restaurati dopo il 1984 e/o dopo il 1997, con sostituzione di malte di allettamento, iniezioni, ecc.;
- presenza di manufatti completamente intonacati o reintonacati, in cui la tessitura muraria non è osservabile direttamente;
- presenza di situazioni di crollo o di dissesto, che permettono in alcuni casi di osservare la sezione muraria oppure di studiare le modalità di danneggiamento, utilizzabile come sintomo indiretto della costituzione ed efficienza della muratura.

La scelta dei campioni è stata rivolta prevalentemente alle situazioni più agevolmente osservabili e con limitati interventi recenti, includendo tuttavia anche murature già restaurate, in cui il paramento era rilevabile senza i giunti di malta di allettamento iniziale, per un totale di 22 paramenti.

Essa inoltre esemplifica murature rappresentative di diverse tipologie murarie, rispetto a quattro classi di riferimento (vedi Figura 1), così definite:

- tipo A: muratura a corsi regolari orizzontali realizzata con elementi in pietra squadrata o semisquadrata;
- tipo B: muratura a corsi regolari sub-orizzontali realizzata con elementi in pietra semisbozzata o a lastra;
- tipo C: muratura a corsi irregolari con interposizione di alcuni elementi di regolarizzazione orizzontale (corsature ad elementi laterizi o lapidei) realizzata con elementi in pietra semisbozzata o a lastra;
- tipo D: muratura priva di corsature realizzata con elementi in pietra sbozzata o a spacco, elementi laterizi, ecc. senza elementi di regolarizzazione orizzontale.



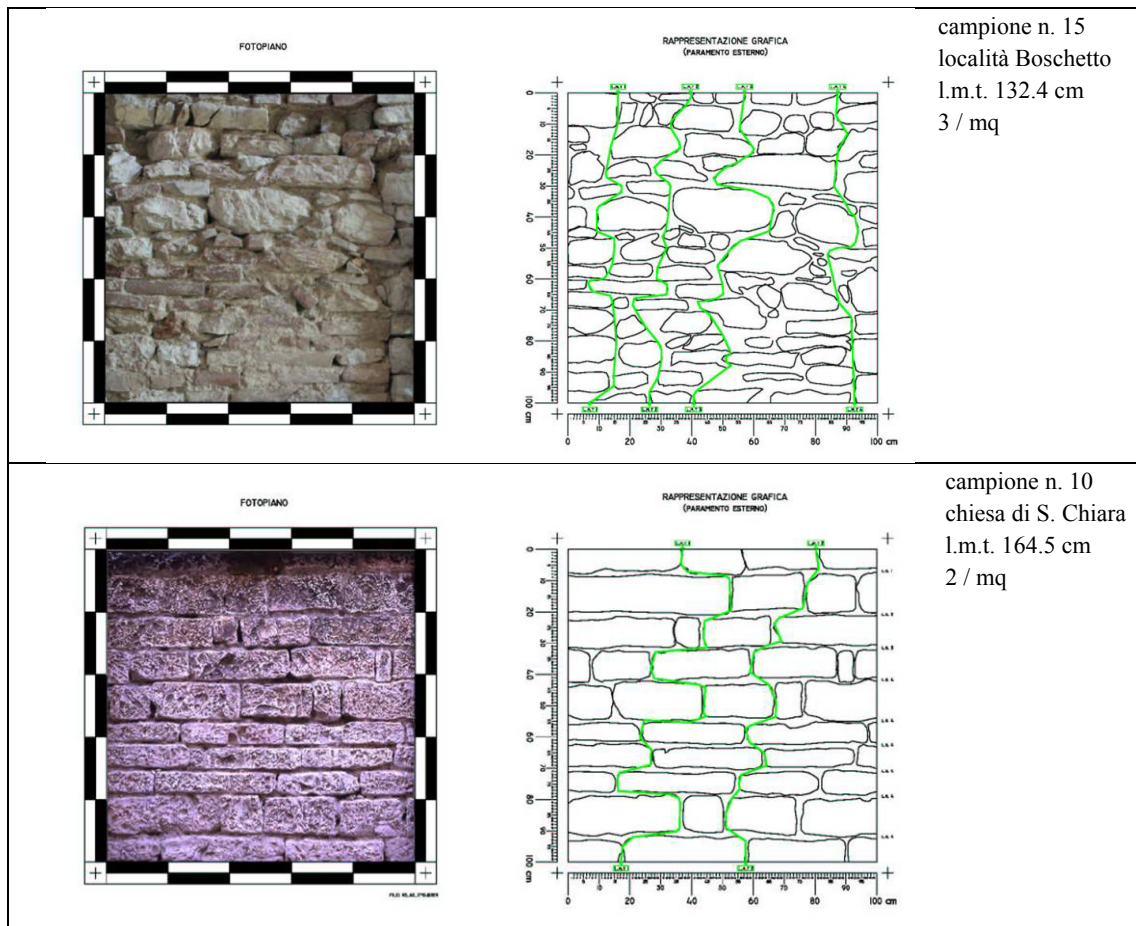


Figura 2. Rilevamento dei paramenti e calcolo della lunghezza dei tracciati (parametro 1.1).

#### 4 ATTRIBUZIONE DEL LIVELLO DI VULNERABILITÀ

L'attribuzione del livello di vulnerabilità può avvenire in via sintetica (I) come parere esperto che tiene conto di tali fattori, oppure, con maggiore attendibilità, (II) fondarsi su una valutazione separata dei diversi fattori analizzabili senza esecuzione di prove, o (III) attraverso l'ulteriore esecuzione di prove in situ o di laboratorio, operando una successiva combinazione dei risultati per ottenere il livello di vulnerabilità complessivo della muratura osservata.

L'attendibilità del livello di vulnerabilità attribuito è funzione della diversa modalità adottata, e del numero di osservazioni o prove realmente effettuate.

L'attribuzione del livello è basata sui risultati di due gruppi di osservazioni e prove:

1. Primo gruppo: parametri misurabili o classi differenziabili in base ad osservazioni visive, che non comportano prove strumentali in situ o su campioni:
  - 1.1. Misura dell'ingranamento dei supporti sul piano esterno del paramento murario; esso è costituito dal numero e dalla lunghezza dei tracciati non contigui o intersecati riconoscibili tra il bordo superiore e il bordo inferiore di un campione di paramento murario di 1×1m. Maggiore è la lunghezza del percorso e minore il numero dei tracciati, maggiore è l'ingranamento (Fig. 2). Valori di riferimento: da 100 a 115 cm livello 1; da 116 a 130 cm livello 2; da 131 a 145, livello 3; da 145 a 160 livello 4; oltre 161, livello 5.
  - 1.2. Misura dell'ingranamento trasversale tra i paramenti opposti; operabile solo nel caso sia osservabile la sezione muraria, misura su un tratto di 1 m la lunghezza della linea centrale più breve che attraversa il nucleo murario in verticale aderendo al lato interno dei conci dell'uno o dell'altro paramento ove questi superino l'asse centrale. Maggiore è la lunghezza del tracciato, maggiore è l'ingranamento. Valori di riferimento: da 100 a 110 cm livello 1; da 111 a 120 cm livello 2; da 121 a 130, livello 3; da 131 a 140 livello 4; oltre 141, livello 5. La misura è significativa soltanto per murature in pietra di spessore non e-

levato (55-60 cm max), mentre non lo è per murature di maggiore dimensione. In alternativa alla misura, possibile solo in particolari occasioni, questo elemento di valutazione può essere fondato su osservazioni di natura diversa, come la sicura assenza di diatoni o conci profondamente ingranati nel nucleo (in caso di murature di ciottoli di piccole dimensioni, di mattoni disposti unicamente o in larga prevalenza per fascia anziché per chiave, ecc.) o nel caso di evidenti separazioni dal paramento dal nucleo o dal paramento opposto (imbozzamenti discordi di uno o entrambe i paramenti, separazioni mediane verticali in corrispondenza di porte o finestre, ecc.).

- 1.3. Osservazione della qualità, costituzione e consistenza della malta di allettamento. Attraverso osservazioni visive (eventualmente anche con ausilio di videomicroscopio) e limitate prove di estrazione o infissione, si stima la qualità della malta, considerata variabile da fortemente aderente ai supporti e tenace (valore 5) a distaccata e fortemente friabile (valore 1).
- 1.4. Osservazione dei modi di fessurazione, ove presente: classificazione da lesioni del tutto concentrate e a grande distanza una dall'altra (valore 5, indicatore di minima vulnerabilità) a lesioni molto ravvicinate e ramificate, fino ad enucleare i singoli conci (valore 1, indicatore di massima vulnerabilità).
- 1.5. Osservazione dei fattori che hanno ridotto l'efficienza rispetto alla condizione iniziale: si tratta di una valutazione composita costituita dalla combinazione di più elementi, quali la presenza-assenza di discontinuità ed eterogeneità dovute a fasi e riprese costruttive, la presenza-assenza di fenomeni di degrado delle malte di allettamento (es. perdita dei giunti) o dei supporti, la presenza di fenomeni fessurativi da dissesto pregresso (Fig. 3).



Livello 1 (sopra) Lesioni diffuse con enucleazione dei singoli elementi; assenza di comportamento a blocco rigido (sagrestia chiesa di Colle).

Livello 5 (a sinistra): Lesioni concentrate, non ramificate, dovute ad un comportamento marcatamente a blocco rigido (portici S. Filippo-mura urbane).



Livello 1: forte disomogeneità dovuta a trasformazioni della fabbrica, presenza di effetti di degrado e di dissesto pregresso

Livello 5: unica fase costruttiva prevalente, buono stato di conservazione, assenza di dissesti

Figura 3. Esempio di valutazione dei parametri 1.4 (sopra) e 1.5 (sotto)

2. Secondo gruppo: misure in situ o su campioni prelevati con strumentazioni non distruttive o a limitatissimo impatto.
  - 2.1. Esecuzione di prove penetrometriche dinamiche (Liberatore, 2003) sulla malta dei giunti orizzontali di allettamento, con misurazione del numero di colpi necessari a raggiungere la profondità di mm 40.
  - 2.2. Esecuzione di prove soniche per trasparenza, con misura della velocità media di propagazione su 36 punti entro un campione di  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ .
  - 2.3. Esecuzione di analisi su campioni di malta prelevata: distribuzione granulometrica, percentuale in calce, porosità totale e distribuzione percentuale della dimensione dei pori.

Per ciascun fattore o prova vengono stabilite soglie di valori o situazioni di riferimento opportunamente esemplificate, per suddividere il campo in cinque livelli. Il valore attribuito alla muratura può essere calcolato come media ponderale dei fattori relativi alle singole prove o osservazioni, approssimato al livello superiore o inferiore (es. 2,56→ 3). Nel caso sia presente anche un solo fattore con valore 1, il livello complessivo viene arrotondato comunque per difetto, senza tenere conto dei decimali (es. 2,56→ 2).

Di seguito vengono illustrate le prove e le indagini del secondo gruppo, insieme a una prima sintesi in attesa del completamento delle analisi chimico-fisiche e di uno sviluppo delle correlazioni tra i risultati delle diverse prove.

## 5 PROVE PENETROMETRICHE

Le caratteristiche meccaniche della muratura sono fortemente influenzate dalle caratteristiche della malta, specialmente nei casi, molto frequenti nell'edificato storico, in cui la tessitura muraria è costituita da pietre di forma irregolare con un ridotto grado di ingranamento. Le prove *in situ* sulla malta, come il bond wrench test, sono spesso distruttive e costose. Un'alternativa è rappresentata dalla prova penetrometrica, grazie al basso costo, alla minore distruttività e alla possibilità d'impiego su tutti i tipi di muratura. Tuttavia, il penetrometro Windsor, oggi comunemente utilizzato sul calcestruzzo, raggiunge una profondità di circa 10 mm, e quindi è in grado di fornire informazioni solamente sulla malta di ristilatura.

Al fine di aumentare la profondità di penetrazione, è stato recentemente progettato e realizzato presso il DiSGG della Università della Basilicata uno strumento in grado di perforare giunti di malta fino a una profondità di 40-50 mm con una punta di piccolo diametro, adatta a giunti sottili. Queste caratteristiche possono essere realizzate solamente con un penetrometro a colpi multipli, in modo da prevenire l'instabilità e la rottura della punta. Il penetrometro permette di eseguire un gran numero di prove su una singola struttura, è facilmente trasportabile e ha un modo d'uso manuale.

Il meccanismo del penetrometro è realizzato con una molla calibrata, che spinge una massa battente cilindrica, che a sua volta colpisce un tamburo dove è alloggiata la punta. La molla è caricata tramite un manicotto fissato alla massa battente. Quando il manicotto viene tirato indietro, la molla si carica e, al rilascio del manicotto, la massa battente viene spinta in avanti e colpisce il tamburo. La corsa del manicotto è limitata da un anello in acciaio che può essere fissato in quattro posizioni differenti. Le prove sono state eseguite con corsa della molla pari a 30 mm, alla quale corrisponde il carico 126 N. La punta è in acciaio indurito, ha diametro 3 mm e lunghezza 110 mm.

Il penetrometro, il cui peso complessivo è di circa 4 kg, è completato da un treppiede con aste telescopiche, che permette di aggiustare l'altezza di prova da 0.70 a 2.10 m.

La prova consiste nell'infissione della punta a una profondità almeno pari a 40 mm attraverso colpi multipli, facendo avanzare a ogni colpo il meccanismo interno del penetrometro al fine di assicurare un'intensità del colpo costante al progredire dell'avanzamento. Il risultato della prova è il numero medio di colpi per millimetro di penetrazione (SPU: Strokes per Penetration Unit).

## 6 PROVE SONICHE

Le cosiddette prove soniche sono basate sull'osservazione dei fenomeni legati alla propagazione di onde elastiche in mezzi continui più o meno omogenei. Una sorgente (generalmente un martello strumentato) genera un impulso che attraversa il mezzo indagato (in questo caso un



pannello di muratura) fino a uno strumento ricevitore (un accelerometro) che permette di registrare il segnale.

Nelle elaborazioni successive, il parametro caratteristico più frequentemente utilizzato è la velocità di trasmissione del segnale, ottenuta misurando il tempo di attraversamento dello spessore del muro nelle prove per trasparenza; la maggiore o minore velocità di attraversamento è direttamente legata alla maggiore o minore compattezza della muratura (in termini meccanici al suo modulo elastico) e inversamente legata alla presenza di vuoti o discontinuità; la mappa delle velocità misurate su un pannello murario consente di visualizzare in modo intuitivo il grado di disomogeneità del pannello ed evidenziarne il grado di compattezza, soprattutto per le caratteristiche legate alla consistenza degli strati interni. Bisogna osservare che è possibile eseguire queste prove anche in presenza di intonaco, purché ben aderente al supporto, anche se normalmente si cerca di utilizzare pannelli non intonacati.

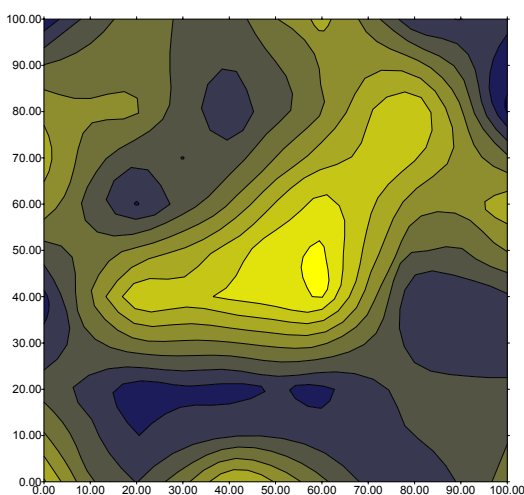


Figura 5. Mappatura delle velocità soniche rilevate su un pannello campione ed esecuzione delle prove con l'attrezzatura impiegata.

### 6.1 Descrizione delle prove

È stato possibile eseguire le prove su 7 pannelli dei 22 esaminati in totale; è stato utilizzato un reticolo di  $6 \times 6$  punti a passo 20 cm, in modo da coprire un'area di  $1 \times 1$  m<sup>2</sup>. Un oscilloscopio digitale consentiva di osservare e registrare direttamente i segnali emessi e ricevuti su un computer portatile; la necessità di disporre di alimentazione elettrica ha forzatamente limitato l'estensione del campionamento.

### 6.2 Sintesi dei risultati

Nella tabella sotto riportata sono riportati soltanto i valori sintetici ottenuti nelle diverse prove, vale a dire: il valore medio della velocità sonica sui 36 punti misurati insieme alla varianza e al coefficiente di variazione che indicano la dispersione dei risultati attorno al valore medio. Si ritiene che questi parametri possano essere sufficienti per una stima speditiva della qualità delle murature.

Tabella 1. Risultati delle prove soniche su 7 pannelli

prova	vel. media [m/sec]	varianza	coeff. variazione	livello stimato
Nocera-bib. 1	1133.823	547.8048	0.483149	3
Nocera-bib. 2	1031.698	237.1513	0.229865	4
Nocera-portici	1250.437	182.8928	0.146263	5
Salmaregia 1	813.5133	302.8115	0.372227	2
Salmaregia 2	788.6765	303.8311	0.385242	2
Colle-sacrestia	377.9248	81.24264	0.21497	1
Colle-canonica	582.3777	153.1002	0.262888	1



Una prima stima è stata eseguita col criterio:

velocità media	<500	500÷700	700÷900	900÷1100	>1100
livello	livello 1	livello 2	livello 3	livello 4	livello 5

dove le velocità medie (in m/sec) sono da moltiplicare per un fattore di penalizzazione (<1) se il coefficiente di variazione risulta elevato, per esempio > 14%:

c. variazione	<14 %	14÷26 %	26÷38 %	38÷50 %	>50 %
penalizzazione	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6

## 7 ANALISI DELLE MALTE

La preparazione e l'uso di una malta ha sicuramente una forte correlazione con il territorio in cui nasce il manufatto. In tutte le epoche, la costruzione di una casa come di un monumento prevede l'impiego di materiali di base presenti nelle immediate vicinanze, e questo condiziona fortemente la scelta della tipologia costruttiva. L'elemento comune a tutte le costruzioni in muratura è la malta, ma anche questa risente della qualità dei materiali disponibili per la sua composizione; dipende quindi anche dalla geologia del territorio.

Le malte dei campioni murari di Nocera Umbra mostrano all'atto del prelievo di campionamento una forte decoesione e appaiono polverulente; altrettanto evidente dall'esame delle murature oggetto di studio è la presenza di un inerte grossolano, conglomeratico, con clasti a spigoli vivi e di dimensioni superiori al cm. Una lettura più attenta rivela che detti clasti sono elementi tipici delle rocce che compongono le murature.

Da una ricognizione sui terreni circostanti si nota ad un primo esame che la composizione degli strati superficiali è formata da un limo pedogenizzato con una elevata frazione di clasti simili a quelli notati nelle malte.

La geologia del territorio circostante ci ricorda che siamo all'interno delle due falde di ricoprimento che formano la dorsale appenninica, e da un primo esame l'orogenesi di quest'area ha obliterato, se mai presenti, le zone alluvionali antiche, per cui nell'area non sono rilevabili depositi sabbiosi. Infatti le malte, ad una prima osservazione, non presentano inerti a grana sabbiosa. Quando nella malta manca l'impalcatura rappresentata dai clasti sabbiosi fini, viene a mancare uno degli elementi fondamentali della struttura che conferisce solidità e compattezza ad una malta di calce aerea, e tale assenza sembra rappresentare una condizione endemica dell'area di Nocera Umbra.

### 7.1 Metodologie di studio

I campioni litoidi sono stati studiati con metodologie d'indagine minero-petrografiche e chimiche che hanno compreso le seguenti tecniche:

- stereomicroscopia: per lo studio preliminare dei campioni, utile alla scelta delle orientazioni e del modo d'inglobamento/preparazione dei campioni;
- microscopia ottica in luce polarizzata sia trasmessa (su sezioni sottili) che riflessa (su sezioni lucide);
- diffrazione dei raggi X su polveri sia dei campioni tali e quali che, per alcuni, sul campione orientato finalizzato alla ricerca d'eventuali minerali argillosi presenti nei materiali litoidi;
- analisi qualitativa e quantitativa degli anioni solubili mediante cromatografia ionica;
- porosimetria mediante tecnica con mercurio finalizzata a distinguere le macroporosità dalle mesoporosità delle malte;
- granulometria mediante setacciatura.

La preparazione delle sezioni sottili e lucide è stata eseguita previo inglobamento in resina poliesteri per evitare disgregazioni e distacchi, specie nei materiali deteriorati. Nella levigatura sono stati utilizzati fluidi speciali per evitare la dissoluzione del gesso e di altri eventuali sali solubili in acqua presenti nei campioni.

Gli esami microscopici in luce polarizzata sono stati documentati con micrografie a vari ingrandimenti (vedi foto allegate), mentre quelli diffrattometrici e porosimetrici sono stati registrati su carta sotto forma di grafici. Nello studio dei materiali litoidi sono state seguite le raccomandazioni Normal 10/82, Normal 8/81, Normal 12/83, Normal 15/84.

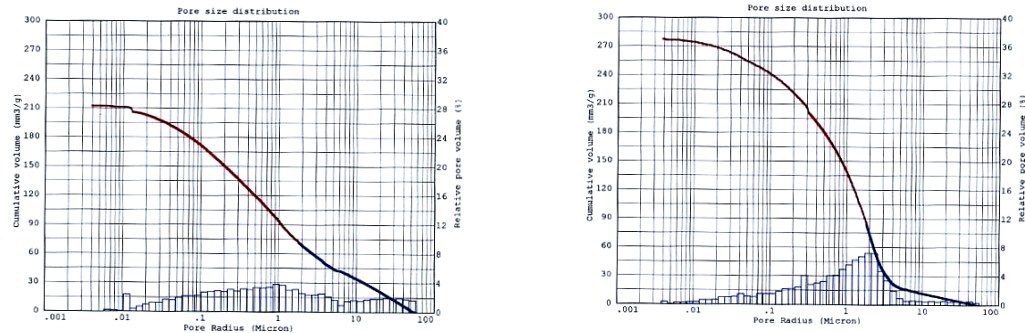


Figura 6. diagrammi porosimetrici ottenuti su prelievo alla biblioteca Piervissani di Nocera (a sinistra) e al palazzo Silvi in località Salmaregia.

La tecnica usata per la misurazione della porosità del materiale è la porosimetria a mercurio: un macchinario esamina la macroporosità (pori dal diametro superiore al micron) e lavora a una pressione massima di 500 KPa di mercurio, un secondo macchinario valuta la microporosità (pori dal diametro inferiore al micron) lavorando con una pressione massima di 2000 KPa di mercurio.

E' importante conoscere la porosità dei componenti della malta per poter valutare la sua possibilità di assorbire acqua; inoltre un materiale è tanto più gelivo quanto maggiore è la presenza di pori dal diametro di 0,1 micron (Fig. 6).

Parte del campione è stato osservato allo stereomicroscopio; esso mostra una fase a particelle granulose di calcite proveniente dalla carbonatazione della calce spenta usata nell'impasto originario, questi hanno comportamento completamente indipendente dai clasti presenti. La granulometria dei clasti risulta di tipo conglomeratico con clasti di dimensione massima di 15 mm, mentre la dimensione media è intorno a 10 mm. I clasti si presentano completamente sciolti e privi di cementazione (Fig. 7).

L'analisi diffrattometrica sulla polvere del campione privo dei clasti grossolani rivela una composizione calcitica e una presenza (rara) di quarzo (vedi Fig. 8). Con uno studio più accurato del campione in sezione sottile sarà possibile stabilire la struttura e la tessitura della calce e la percentuale di carbonatazione, mentre con l'analisi granulometrica sarà possibile stabilire il rapporto inerte legante e i percentili dell'inerte.

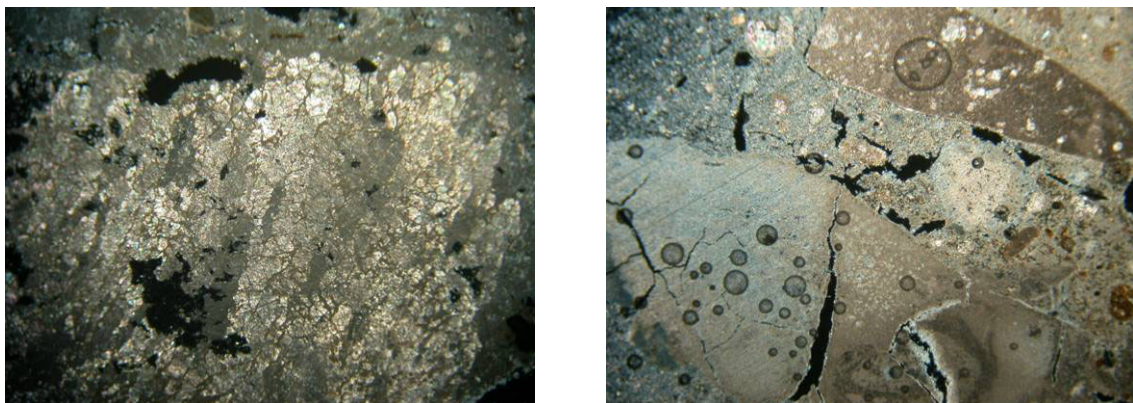


Figura 7. Esame al microscopio a luce riflessa di due campioni in sezione sottile.

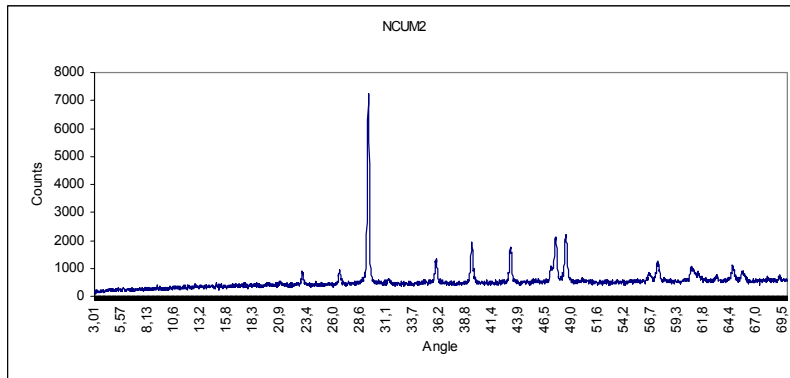


Figura 8. Analisi diffrattometrica del campione n. 2 (località Colle, sagrestia della chiesa di S. Gregorio): mostra i flessi caratteristici della calcite e un flessio del quarzo.

## 8 CONCLUSIONI

Pur non disponendo ancora del quadro completo dei dati e tenendo comunque conto della limitatezza del campione, è tuttavia possibile svolgere alcune considerazioni, in particolare osservando la tabella comparativa di seguito riportata (Tabella 2).

parametro	1.1 ingranam.	1.3 q. malta	1.4 fessuraz.	1.5 degrado	2.1 penetrom.	2.2 soniche**
Nocera–bibl. Piervissani (campione n.8)	140.77 /3 <b>3</b>		<b>2</b>		0.90	794 <b>2</b>
Nocera–bibl. Piervissani (campione n.7)	119.82 /3 <b>2</b>		<b>3</b>		0.99	928 <b>2</b>
Nocera–portici S.Filippo (campione n.9)	135.65 /3 <b>3</b>		<b>5</b>	<b>5</b>	1.02*	1125 <b>3</b>
Salmaregia -pal. Silvi (campione n.18)	128.56 /4 <b>2</b>		<b>2</b>	<b>2</b>	1.53	650 <b>5</b>
Salmaregia 2-pal. Silvi (campione n.19)	134.24 /3 <b>3</b>		<b>4</b>	<b>3</b>	1.55	552 <b>5</b>
Colle–sagrestia (campione n.1)	124.69 /3 <b>2</b>		<b>1</b>	<b>1</b>	0.97	340 <b>2</b>
Colle–canonica (campione n.4)	131.72 /3 <b>3</b>			<b>4</b>		524 <b>4</b>

\* valori calcolati su infissioni a rifiuto prima di 40 mm

\*\* valori corretti con coefficiente di penalizzazione

Va rilevato come i risultati delle prove penetrometriche, di per sé potenzialmente molto significative, siano stati fortemente condizionati dalla particolare composizione granulometrica delle malte proprie dell'area di Nocera Umbra, caratterizzate da clasti di elevata dimensione in matrice povera di frazione sabbiosa. L'avanzamento della punta è stato perciò ritardato o del tutto impedito dalla presenza di questi elementi, rendendo più difficile l'interpretazione dei risultati e aumentandone la dispersione. La significatività delle prove soniche appare evidenziata dall'applicazione di un coefficiente di penalizzazione legato alla varianza tra le diverse misure sullo stesso campione. Ad esempio, le prove sulla muratura del campione n. 9 (portici San Filippo, anche mura di Nocera) si distanziano significativamente dagli altri valori ottenuti solo per la minore varianza. Questo trova riscontro nelle osservazioni relative al primo gruppo di parametri. D'altra parte, anche le misure soniche ottenute sulla muratura della sagrestia della chiesa di S.Gregorio a Colle, che hanno dato risultati molto più bassi, trovano analogo riscontro con le osservazioni derivate dal primo gruppo.

Nei campioni riportati in tabella, limitati a quelli per i quali sono state eseguite le prove soniche, i valori di ingranamento (par. 1.1) non presentano marcati scostamenti. Sugli altri parametri esaminati, è interessante osservare il diverso comportamento al sisma delle murature della chiesa di S.Chiera a Nocera (lmt 164.50, 2/m<sup>2</sup>) e l'abside della chiesa dei SS. Felice e Costanzo



( $l_{mt} 183.2$ ,  $2/m^2$ , il valore più elevato rilevato nel campione) la prima conservata intatta e la seconda parzialmente crollata; il diverso comportamento è con evidenza dovuto alla diversa qualità delle malte, molto compatta nel primo caso e facilmente disgregabile nel secondo. L'efficacia di un elevato valore di ingranamento può essere vanificata dalla presenza di malte deboli. Indispensabile appare perciò l'integrazione con le analisi chimiche, fisiche e meccaniche delle malte.

Queste riflessioni ci inducono a mantenere ancora aperta la questione della valutazione conclusiva di vulnerabilità sulla base dei parametri qui applicati: si possono individuare diverse modalità di combinazione dei "punteggi" ottenuti sui singoli campioni, ma lo studio di una opportuna matrice di pesi non può avvenire che sulla base di una campionatura più estesa di quella esaminata nel presente studio.

## 9 RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano quanti hanno fattivamente collaborato allo svolgimento della ricerca, sul campo e in laboratorio, in particolare: il prof. Domenico Liberatore, con Giuseppe Spera, Michele Cotugno, Vito Racina, del DiSGG, Facoltà di Ingegneria, Università della Basilicata, che hanno realizzato le prove penetrometriche sulle malte; il dott. Stefano Cancelliere, del LAMA dell'università IUAV di Venezia per le analisi sulle malte; il tecnico Marco Cucchi del Laboratorio Prove Materiali del DIS, Politecnico di Milano, per le prove soniche; e infine gli arch. Michele Bondanelli, Monica D'Angelantonio, Zuleika Esposto, Francesco Trovò, del Dipartimento di Storia dell'Architettura dello IUAV, che hanno collaborato sia alle indagini sul campo sia alla rielaborazione dei dati raccolti.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Bianchi, A., 2003. La base dati "Carta del Rischio" sul terremoto del 26 settembre 1997 e il progetto ENEA-MIUR, In *Monumenti & terremoti. Nuove esperienze di analisi di vulnerabilità - pericolosità sismica. Risultati del programma ENEA-MIUR*. Roma: ICR.
- Doglion F., Moretti A., Petrini V., 1994. *Le chiese e il terremoto - Dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro, verso una politica di prevenzione*, Trieste: Edizioni Lint.
- Doglion F., 2000. *Codice di pratica (linee guida) per la progettazione degli interventi di riparazione, miglioramento sismico e restauro dei beni architettonici danneggiati dal terremoto umbro-marchigiano del 1997*, Supplemento al Bollettino Ufficiale della Regione Marche, Ancona, pp. 252.
- Doglion F., 1997. *Stratigrafia e Restauro- Tra conoscenza e conservazione dell'architettura*. pp. 312. Trieste: LINT.
- Giuffrè, A. (ed.), 1993. *Sicurezza e conservazione dei centri storici: il caso di Ortigia*, Bari: Laterza.
- Gurrieri, F. (ed.), 1999. *Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione postsismica degli edifici*, Regione Umbria. Roma: edizioni DEI.
- Liberatore, D., Spera, G., Cotugno, M., 2003. A new penetration test on mortar joints, in L. Binda e R.C. de Veckey (eds), *On-site control and evaluation of masonry structures*, 191-202. Bagnoux: RILEM.
- Petrini V., 1995. Overview report on vulnerability assessment, Proc. 5th International Conference on Seismic Zonation. Nice.
- Istruzioni generali per la redazione dei progetti di restauro nei beni architettonici di valore storico-artistico in zona sismica*, Comitato Naz. per la prevenzione del patrimonio culturale dal rischio sismico, Min. BB.CC. 29.10.1996.