



RICCARDO DAVID DE PONTI
LORENZO CANTINI LAURA BOLONDI

EDIFICI IN MURATURA

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE,
VULNERABILITÀ E APPROFONDIMENTI DIAGNOSTICI



WEBAPP INCLUSA
CON AGGIORNAMENTO AUTOMATICO

GRAFILL

Riccardo David De Ponti, Lorenzo Cantini, Laura Bolondi
**EDIFICI IN MURATURA: CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE,
VULNERABILITÀ E APPROFONDIMENTI DIAGNOSTICI**

Ed. I (12-2021)

ISBN 13 978-88-277-0281-9

EAN 9 788827 7 02819

Collana **MANUALI** (271)



**Licenza d'uso da leggere attentamente
prima di attivare la WebApp o il Software incluso**

Usa un QR Code Reader
oppure collegati al link <https://grafill.it/licenza>

Per assistenza tecnica sui prodotti Grafill aprire un ticket su <https://www.supporto.grafill.it>

L'assistenza è gratuita per 365 giorni dall'acquisto ed è limitata all'installazione e all'avvio del prodotto, a condizione che la configurazione hardware dell'utente rispetti i requisiti richiesti.

© **GRAFILL S.r.l.** Via Principe di Palagonia, 87/91 - 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 - Fax 091/6823313 - Internet <http://www.grafill.it> - E-Mail grafill@grafill.it

**CONTATTI
IMMEDIATI**



Pronto GRAFILL
Tel. 091 6823069



Chiamami
chiamami.grafill.it



Whatsapp
grafill.it/whatsapp



Messenger
grafill.it/messenger



Telegram
grafill.it/telegram

Finito di stampare presso **Tipografia Publistampa S.n.c. - Palermo**

Edizione destinata in via prioritaria ad essere ceduta nell'ambito di rapporti associativi.

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

SOMMARIO

RINGRAZIAMENTI	p.	8
PREFAZIONE	"	9
INTRODUZIONE	"	11
1. LOGICA COSTRUTTIVA DEGLI EDIFICI STORICI	"	13
1.1. Approccio metodologico		
allo studio degli edifici in muratura	"	13
1.1.1. Interpretazione delle componenti strutturali		
delle costruzioni in muratura.....	"	14
1.1.2. Riferimenti normativi e linee guida	"	17
1.1.3. Stato dell'arte degli studi compiuti	"	19
1.2. Le tipologie murarie nelle tradizioni costruttive italiane	"	21
1.2.1. Studio delle apparecchiature murarie	"	23
1.2.2. Interpretazione della composizione		
della sezione interna delle murature	"	25
1.3. Le componenti materiali delle murature storiche	"	29
1.3.1. Rocce naturali	"	31
1.3.2. Rocce artificiali	"	33
1.3.3. I leganti storici	"	34
2. MECCANICA DELLE MURATURE STORICHE	"	36
2.1. La muratura come materiale composito	"	36
2.2. Murature soggette ad azioni di compressione	"	42
2.3. Murature soggette ad azioni di taglio	"	49
2.4. Murature soggette a stati di presso-flessione	"	53
3. INTERPRETAZIONE DEL DEGRADO		
E DEL QUADRO FESSURATIVO DELLE MURATURE	"	58
3.1. Studio e interpretazione del degrado delle superfici lapidee	"	58

3.1.1.	Degrado naturale	p.	59
3.1.2.	Degrado antropico	"	65
3.1.3.	Degrado biologico	"	68
3.2.	Analisi del quadro fessurativo degli edifici in muratura	"	69
3.2.1.	Studio dell'andamento delle fessurazioni	"	70
3.2.2.	Cinematismi di collasso	"	76
4.	TECNICHE DI APPROFONDIMENTO DIAGNOSTICO	"	78
4.1.	Linee guida per un percorso della conoscenza	"	78
4.2.	Analisi storico-archivistica	"	80
4.3.	Rilievo geometrico, materico e patologico-fessurativo	"	82
4.4.	Prove sperimentali in situ	"	84
4.4.1.	Indagini termografiche	"	86
4.4.2.	Indagini soniche e ultrasoniche	"	99
4.4.3.	Indagini radar (in collaborazione con Ing. M. Porcu)	"	120
4.4.4.	Indagini con martinetti piatti	"	129
4.4.5.	Valutazione dello stato di conservazione delle strutture storiche in legno	"	148
4.5.	Campionamento e caratterizzazioni di laboratorio	"	157
4.5.1.	Il prelievo dei campioni lapidei	"	157
4.5.2.	Caratterizzazione mineralogico-petrografica, chimica, fisica	"	158
4.5.3.	Caratterizzazione meccanica (prove di laboratorio)	"	163
5.	CASI STUDIO	"	167
5.1.	Basilica della Natività (Betlemme, Palestina)	"	167
5.1.1.	Indagini soniche	"	169
5.1.2.	Analisi petrografiche delle malte e degli intonaci	"	173
5.1.3.	Indice di qualità muraria (IQM)	"	174
5.2.	Chiesa di San Bartolomeo ad Enzola (Poviglio, Reggio Emilia)	"	177
5.2.1.	Indagini termografiche	"	179
5.2.2.	Indagini soniche	"	181
5.2.3.	Analisi della distribuzione dei carichi mediante martinetto piatto singolo	"	184
5.2.4.	Interpretazione del comportamento tenso-deformativo delle murature mediante prova con doppio martinetto	"	185

5.3.	Complesso di S. Eufemia (Modena)	p.	186
5.4.	Copertura lignea di Palazzo Motti (Reggio Emilia)	"	192
5.5.	Palazzo comunale di Alfonsine (Ravenna)	"	197
CONCLUSIONI		"	206
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI		"	207
CONTENUTI E ATTIVAZIONE DELLA WEBAPP		"	214
	Contenuti della WebApp	"	214
	Requisiti hardware e software	"	214
	Attivazione della WebApp	"	214

PREFAZIONE

I gravi danni subiti dal patrimonio edilizio storico in occasione degli ultimi eventi sismici, come il terremoto di Amatrice con il lungo sciame sismico che ha interessato nel 2016 una gran parte del territorio del Centro Italia, hanno nuovamente confermato la cronica mancanza di attenzione nei confronti di fenomeni che periodicamente mettono in crisi i sistemi costruttivi storici.

I crolli e i diversi guasti riportati dall'edilizia civile e da quella monumentale hanno messo in evidenza i problemi legati alla prevenzione del rischio sismico e le lacune in merito allo studio dei sistemi costruttivi storici. La riproposizione di certe contrapposizioni metodologiche tra i progetti di adeguamento antisismico rispetto agli interventi di miglioramento antisismico ha mostrato come la gestione del ricco patrimonio edilizio storico che caratterizza la nostra nazione sia ancora incerta, con scelte sempre vincolate a risorse insufficienti e a disposizioni normative che non riescono ad avere un deciso impatto sullo sviluppo di politiche di salvaguardia realmente efficaci.

Il presente testo è indirizzato proprio alle diverse figure professionali, con particolare riguardo a ingegneri, architetti e geometri, che si occupano di edifici storici o più in generale che si trovano ad operare sul patrimonio edilizio esistente. Attraverso un recupero delle basilari conoscenze per comprendere la meccanica degli edifici storici, il volume offre un approfondimento sulle caratteristiche costruttive delle strutture murarie, con l'obiettivo di recuperare una serie di conoscenze sulle loro proprietà meccaniche, utili per interpretare la logica costruttiva degli organismi architettonici antichi. Parallelamente, il presente studio raccoglie i più recenti aggiornamenti normativi che si occupano di analisi delle caratteristiche delle strutture storiche, fornendo un'ampia esemplificazione delle principali metodologie sperimentali oggi disponibili per approfondire la conoscenza delle strutture edilizie esistenti.

Il panorama delle prove sperimentali è estremamente ampio e l'applicazione di tecniche diagnostiche sulle strutture esistenti è promosso da diverse normative e linee guida, sia a livello nazionale che internazionale. Sulla base di un'esperienza diretta, maturata sia in ambito accademico che professionale, gli autori propongono una metodologia utile per determinare lo stato di fatto delle strutture edilizie, con particolare attenzione ai manufatti in muratura, comprendendo anche le strutture in legno relative alle coperture e ai solai. Attraverso brevi premesse di ordine teorico, il lettore verrà introdotto alle strategie

di approfondimento impiegate per il progetto diagnostico con l'illustrazione di casi studio esemplificativi a cui gli autori hanno preso parte direttamente.

Come ricordato da R. Sennet nel suo saggio sull'impostazione metodologica del lavoro perseguita dal cosiddetto *uomo artigiano*, aspetti empirici e teorici si integrano con un mutuo supporto grazie al quale, dall'accuratezza e dall'efficacia della sperimentazione pratica, si dà completezza ai principi teorici. Allo stesso modo, gli autori propongono l'applicazione di un metodo per lo studio degli edifici storici fondato sull'accuratezza e l'efficacia di determinate tecniche d'indagine, utile per avviare quel percorso della conoscenza che è alla base della corretta progettazione degli interventi rivolti a incrementare la sicurezza degli edifici storici nel rispetto delle loro caratteristiche storiche e materiali.

INTRODUZIONE

Il presente volume si compone di tre parti principali. Una prima sezione dedicata alla logica costruttiva degli edifici storici e al loro comportamento meccanico, rispettivamente capitolo 1, 2 e 3, fa riferimento alle tipologie murarie, ai materiali della tradizione costruttiva, al funzionamento delle strutture in muratura sotto diverse sollecitazioni, fino ad arrivare a considerare le principali dinamiche di degrado che possono affliggere questi manufatti. Una seconda parte del testo, corrispondente al capitolo 4, è riservata alla descrizione delle principali tecniche d'indagine utili ad approfondire la conoscenza di aspetti specifici delle strutture storiche, comprendendo oltre alla muratura anche le strutture in legno connesse ad essa.

Per una comprensione più esaustiva dei principi di funzionamento delle tecniche diagnostiche e della loro calibrazione, la terza parte del testo, compresa tra i capitoli 4 e 5, prende in esame diversi casi di studio, esempi applicativi in cui, seguendo le indicazioni delle normative in ambito di sicurezza degli edifici e conservazione del patrimonio architettonico, gli approfondimenti sono stati appositamente selezionati per incrementare la conoscenza della tipologia edilizia, del suo stato di conservazione, delle eventuali dinamiche di danno in modo da favorire l'analisi del suo comportamento meccanico ed eventuali vulnerabilità.

Con l'affermazione delle nuove tecniche costruttive, la muratura che caratterizza la maggior parte degli edifici dei nostri centri storici è stata lungamente trascurata. In ambito accademico, la muratura non viene più insegnata e una limitata conoscenza delle sue caratteristiche è demandata ai corsi di restauro architettonico. Per sua natura, questo particolare ambito disciplinare raccoglie diversi contributi scientifici da più campi: in primo luogo dalla storia dell'architettura, ma anche dalle discipline architettoniche e ingegneristiche che approfondiscono le tecniche costruttive e il loro funzionamento, con il fondamentale contributo di rilievi topografici sempre più accurati. Nell'impostazione metodologica del progetto di conservazione dell'edificio storico, la fase di analisi riveste un ruolo determinante. La conoscenza del patrimonio edilizio esistente si delinea così come la fase preliminare di studio senza la quale ogni intervento proposto sugli edifici storici rischia di risultare incerto o lacunoso, con le conseguenti complicazioni dell'iter di verifica e approvazione previsto per quegli organismi edilizi che ricadono sotto forme di tutela e vincolo.

Indicazioni prescrittive sulle strategie da mettere in atto per operare sulle architetture storiche sono oggi presenti nelle principali linee guida e normative che si occupano della tutela del patrimonio edilizio esistente. Sulla base di questi precetti, il presente testo nasce con l'obiettivo di fornire una chiara guida per studiare gli edifici in muratura dal punto di vista delle loro caratteristiche meccaniche e per approfondirne alcuni aspetti peculiari che possono risultare strategici in determinati ambiti, come quello sismico, o più semplicemente per fornire un indirizzo metodologico utile per la calibrazione delle proposte progettuali di restauro e conservazione riferite agli antichi organismi edilizi.

LOGICA COSTRUTTIVA DEGLI EDIFICI STORICI

1.1. Approccio metodologico allo studio degli edifici in muratura

L'affermarsi delle nuove tecniche di costruzione, dalle prime applicazioni di Perret del calcestruzzo armato, passando per i primi solai in calcestruzzo precompresso introdotti da Luca Beltrami nei palazzi di piazza Cordusio, fino alle più recenti sperimentazioni di additivi in grado di conferire ai materiali proprietà sempre più sorprendenti per durabilità e resistenza, ha progressivamente limitato gli investimenti e lo studio sulle tecniche costruttive tradizionali. La conoscenza della muratura, materiale composito avente il compito di portare i carichi principali dell'edificio, nel corso del Novecento non viene nemmeno più prevista nei programmi didattici delle università tecniche fino al principio del nuovo millennio; lo studio delle sue caratteristiche è confinato ad alcuni corsi di che costituiscono una nicchia per gli appassionati del restauro e la conservazione degli edifici storici. All'interno dei laboratori didattici di restauro architettonico sono, infatti, ancora custodite le conoscenze di base, fondate principalmente sulla manualistica codificata a partire dall'età dei lumi e sistematizzata nei trattati di fine Ottocento ed inizio Novecento. Questo testo le ripropone seguendo l'esperienza dei suoi autori in ambito accademico e professionale.

Analisi ed interpretazione delle strutture storiche richiedono di superare l'approccio semplificatorio a cui siamo abituati quando studiamo il funzionamento di un edificio, seguendo i criteri tradizionali della scienza e della tecnica delle costruzioni. Questi, avendo come oggetto di studio strutture moderne perfettamente standardizzate, dai laterizi ai calcestruzzi, ci insegnano che gli edifici possono essere ricondotti a modelli che seguono determinati comportamenti meccanici in base ai vincoli con cui le loro parti sono messe in relazione. Così un moderno telaio di travi e pilastri in calcestruzzo armato darà luogo ad un comportamento iperstatico. Ricondurre la muratura eseguita con le tecniche storiche all'interno di questa logica non sarebbe invece corretto. Le strutture in muratura sono spesso realizzate con regole proprie o perlomeno comuni a certi contesti geografici e particolari periodi storici, con la conseguenza di aumentare in maniera ragguardevole il grado di complessità di questa tecnica costruttiva.

La maggiore incertezza che rende le murature difficilmente interpretabili riguarda l'organizzazione della loro sezione. Tolte le tipologie più regolari, una esigua minoranza, o i modelli desunti dagli archetipi vitruviani, l'apparecchiatura muraria può presentare differenti soluzioni, a volte frutto di ingegnose strategie di assemblaggio tra i materiali

componenti, oppure dipendenti da fattori che ne limitano la qualità, come i costi e l'approvvigionamento dei materiali costruttivi. Il panorama italiano è caratterizzato da strutture murarie con sezioni definite "a più paramenti". Il fatto che il muro non sia costituito da un unico blocco monolito da un lato all'altro non significa necessariamente che presenti scarsi caratteristiche costruttive. In base alla scelta e alla logica con cui è stata condotta la posa in opera dei materiali componenti è possibile discriminare tra comportamenti meccanici di diversa natura. Dal tipo di ammorsamento realizzato all'interno della sezione dipende infatti la risposta di tipo monolitico o meno delle murature. Per comprendere questa caratteristica è quindi necessario conoscere le strategie di studio che si possono applicare alle murature storiche al fine di pervenire ad una caratterizzazione esaustiva delle loro proprietà meccaniche.

1.1.1. Interpretazione delle componenti strutturali delle costruzioni in muratura

Ricondurre le murature ad un modello strutturale affidabile è l'obiettivo degli approfondimenti sperimentali di tipo non distruttivo o leggermente invasivo che verranno illustrati in questo libro. Una prima distinzione del comportamento meccanico delle strutture murarie si basa sulla determinazione delle loro componenti e sul modo in cui tali elementi sono stati collocati in opera per costituire la sezione interna. Antonino Giuffrè, tra gli ultimi grandi esperti di murature, ha codificato dei principi molto utili per comprendere le caratteristiche delle murature. Queste possono andare incontro ad una semplificazione per comprenderne le principali proprietà, sempre che sia possibile accedere ad una serie di informazioni che permettano di valutarne la qualità. Partendo dal richiamo al ricorso di componenti regolari, disposti per filari, alternando ortostati e diàtoni, conci di pietra o laterizi possono assumere un comportamento monolitico anche se la sezione è composta da più strati paralleli, a patto che sia verificabile la presenza di elementi di raccordo trasversale tra i suddetti strati.

Questa caratteristica, facilmente identificabile con l'impiego di tecniche di indagine di tipo non invasivo, risulta essere molto rilevante in ambito sismico, in cui le conseguenze degli ultimi eventi tellurici hanno mostrato la profonda vulnerabilità delle strutture portanti in muratura a più paramenti, con un nucleo centrale solitamente molto più irregolare degli strati murari dai quali è delimitato. L'espulsione parziale dei paramenti murari sollecitati dagli scuotimenti prodotti dai terremoti è un tipo di danno molto comune agli edifici in muratura danneggiati dagli eventi sismici. La complessità delle tipologie murarie non consente una facile analisi per riconoscere tali vulnerabilità, ma dagli studi maturati in seguito ai terremoti (come gli ultimi episodi occorsi in centro Italia), gli esperti hanno sistematizzato delle procedure che, grazie ad una serie di approfondimenti, sono in grado di fornire i parametri necessari per verificare se le murature siano state realizzate in modo tale da limitare la presenza di certe vulnerabilità.

Sin dalle loro origini, tutti gli artefatti edilizi devono offrire la risposta corretta ad una serie di forze fisiche che danno luogo a numerose sollecitazioni:

- peso proprio;
- azione del vento;
- subsidenza del terreno;
- vibrazioni telluriche;
- variazioni di temperatura.

L'esperienza empirica sviluppata sul campo ha prodotto tecniche costruttive che si rivelarono più o meno efficaci in base al livello di conoscenza maturato sulle proprietà dei materiali impiegati, sulle modalità di assemblaggio, sul comportamento osservato lungo la vita delle strutture architettoniche.

Le regole costruttive, oltre ad una tradizione di trasmissione orale, fin dall'antichità ricevono l'attenzione da parte di esperti trattatisti che cercano di codificarne i principali contenuti. In questi testi l'attenzione principale è rivolta a tre ordini di problemi relativi a: stile, tipologia e tecniche di realizzazione. Cenni alla necessità di saggiare la bontà dei materiali da costruzione e al corretto assemblaggio sono marginali, ma sempre presenti. L'attenzione riservata dalla manualistica verso il patrimonio edificato è giustificata da molteplici considerazioni:

- 1) Larga parte del patrimonio costruito non possiede i requisiti prestazionali (prevalentemente di carattere energetico) prescritti per gli edifici di nuova costruzione: l'adeguamento ai nuovi parametri rappresenta un processo ricorrente nei confronti del patrimonio edilizio esistente.
- 2) L'edilizia storica diffusa (edifici non direttamente vincolati ed inseriti negli elenchi delle soprintendenze), presenta ampie differenze tipologiche a livello strutturale. Per questa ragione occorre adottare un metodo di valutazione delle caratteristiche prestazionali delle strutture in opera attraverso appropriate verifiche e successivi interventi.
- 3) L'intima conoscenza delle proprietà meccaniche delle costruzioni è auspicabile per raffinare i modelli di verifica proposti dalla normativa. Se per le opere di nuova realizzazione l'impiego di materiali certificati e ampiamente caratterizzati favorisce la certezza del modello sperimentale applicato, per il patrimonio esistente ogni dubbio sulle caratteristiche delle strutture costituisce un limite al corretto svolgimento delle verifiche proposte. La normativa, privilegiando la sicurezza di progetto, è pensata per penalizzare gli interventi proposti su strutture esistenti per le quali non si sia in possesso di adeguati livelli di conoscenza.

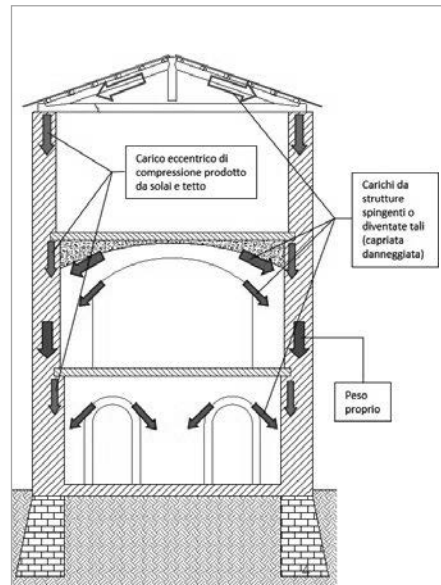
Nel caso degli edifici storici, il modello costruttivo si compone di strutture portanti principali e secondarie. Fondazioni e muratura portante fanno parte della prima categoria. Il ruolo della muratura è quello di distribuire uniformemente i carichi fino alle fondazioni. Oltre al peso proprio, le sollecitazioni provengono da tutti gli elementi collegati ai muri portanti: i diaframmi orizzontali e le coperture. Si tratta delle cosiddette strutture secondarie, composte da solai, archi, volte e tetti.

Con particolare riferimento alla logica costruttiva che veniva applicata nell'antichità agli edifici, murature, solai in legno e coperture in legno possono essere intese come

gli elementi di uno schema statico semplice: la connessione di elementi piani (come le pareti), raccordati da elementi monodimensionali (come solai ed archi) e spaziali (come le volte), dà luogo ad un sistema scatolare che può essere caratterizzato da una notevole rigidezza. Dalla fondamentale operazione di ispezione dell'opera, seguita da un rilievo accurato e possibilmente dal reperimento di informazioni sulle principali modifiche nel tempo, è possibile pervenire ad un primo modello interpretativo dell'edificio. Si consideri ad esempio un fabbricato di modesta importanza, situato in campagna, con tre piani fuori terra e adiacente ad una roggia (Figura 1.1a).



(a) Esempio di edificio in muratura tradizionale con cantonali in blocchi sbazzati ammassati alla muratura composta da ciottoli di fiume.



(b) Schema interpretativo della distribuzione dei carichi in un edificio storico.

Figura 1.1. Logica costruttiva degli edifici storici.

L'assenza di rivestimenti alle pareti permette di distinguere una certa cura nell'apparecchiatura muraria, costituita da ciottoli disposti lungo file ordinate, ma con l'attenzione di utilizzare conci sbazzati di pietra negli angoli, sovrapposti con lunghezze diverse in modo da ammassare con maggiore efficacia il resto della muratura. La presenza di un capochiave in facciata denota un'ulteriore attenzione al vincolo tra le diverse parti, per una migliore connessione tra murature e solai o in alternativa per l'impiego di catene atte a contenere le spinte dei sistemi voltati.

Misurando con precisione la sezione delle murature per ciascuno dei vari livelli si noterà che le pareti si rastremano man mano che l'altezza aumenta. Questo era uno stragemma comune che consentiva di limitare il loro peso proprio in base al principio che con l'altezza diminuivano i carichi e di conseguenza lo spessore poteva essere ridotto. Dal

MECCANICA DELLE MURATURE STORICHE

2.1. La muratura come materiale composito

La muratura è un "materiale composito" costituito da malta, pietre e/o mattoni. Nelle murature moderne vengono comunemente utilizzati blocchi pieni e forati in laterizio o in calcestruzzo, ecc. Gli elementi per muratura, nella tradizione costruttiva italiana, sono prevalentemente costituiti da blocchi di pietra o laterizi, ma si possono anche riscontrare esempi di murature realizzati in terra cruda o con combinazioni di materiali che rispondono ad influenze arrivate da altri contesti, come avvenne con l'occupazione di parte dei territori italiani da parte di alcune potenze straniere.

Resistenza e deformabilità della muratura dipendono dalle singole proprietà degli elementi resistenti e della malta, ma come dimostra la letteratura specifica, nel caso di murature composte da materiali diversi e articolate in sezioni disomogenee, non è facile trovare un modello teorico che ne descriva la reciproca interazione e ne possa prevedere l'evoluzione nel tempo. Quando due componenti, malta e mattone/pietra, si uniscono per formarne un terzo materiale, la muratura appunto, questo acquista caratteristiche sue proprie che non sono facilmente correlabili con quelle dei suoi componenti, ma che ne definiscono la "qualità muraria". Con questo termine si intendono tutti gli accorgimenti costruttivi adottati nella realizzazione di un pannello murario e che ne condizionano la risposta meccanica alle azioni sollecitanti. Le caratteristiche che qualificano le prestazioni meccaniche di una muratura storica sono:

- *Resistenza, forma e dimensioni degli elementi resistenti in mattoni o pietra.* L'efficace ingranamento dei blocchi tra gli elementi resistenti, a cui si deve gran parte della capacità resistente nei confronti di azioni orizzontali complanari, è assicurato dalla presenza di due facce orizzontali sufficientemente piane e da una dimensione dei blocchi che, in rapporto allo spessore del muro, ne assicura un buon grado di monoliticità (Figura 2.1).
- *Organizzazione del paramento murario.* L'organizzazione lungo corsi orizzontali di mattoni o pietre permette una buona distribuzione dei carichi verticali, mentre lo sfalsamento dei giunti verticali permette l'effetto catena che contribuisce alla resistenza a trazione della muratura (Figura 2.2).
- *Presenza o meno di collegamenti trasversali (diatoni) nella sezione resistente.* Si tratta di un accorgimento impiegato per rendere più solidali tra loro i differenti

paramenti che compongono la sezione del muro e di conseguenza aumentarne la resistenza, impedendone la separazione, permettendo la distribuzione dei carichi su tutto lo spessore del muro (Figura 2.3).

- *Qualità della malta*. Costituisce l'elemento che regolarizza il contatto con le pietre, trasmette e ripartisce le azioni in modo uniforme ed assicura un certo livello resistenza di natura coesiva, se di buona qualità.
- *Snellezza dell'elemento murario*: rapporto tra l'altezza libera d'inflessione dell'elemento murario, come ad esempio l'altezza intermedia tra due orizzontamenti, e la minor larghezza della sua sezione.

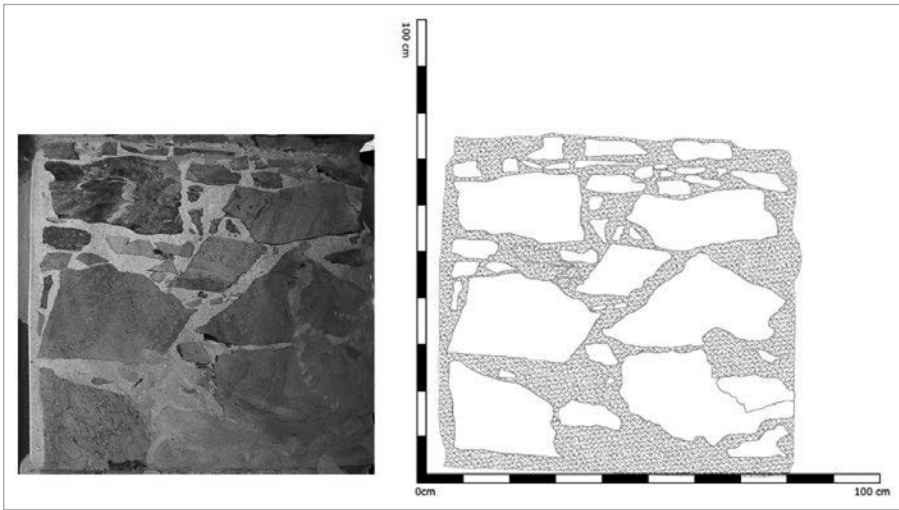


Figura 2.1. Esempio di apparecchiatura muraria composta con blocchi di pietra di diversa pezzatura con inzeppatura di piccoli conci per favorire l'ingranamento tra gli elementi resistenti.

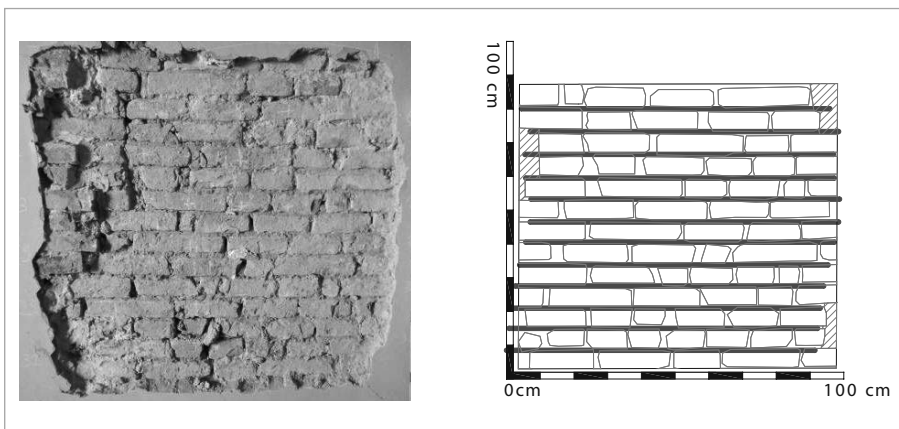


Figura 2.2. Analisi della orizzontalità dei piani di posa in un paramento murario di mattoni.



Figura 2.3. *Presenza di elementi trasversali che si estendono oltre la metà della sezione muraria.*

Si evince quindi che il comportamento tensionale e deformativo della muratura non dipende esclusivamente dai carichi, ma è funzione anche delle dimensioni e dell'ingranamento dei conci. Infatti, all'interno di ogni paramento murario, le forze si distribuiscono in modo differenziato tra gli elementi resistenti, che conferiscono un efficace comportamento monolitico alla parete, e gli altri componenti che non sono in grado di seguire le deformazioni delle parti soggette a compressione. Questo diverso comportamento determina la comparsa di fessure che si manifestano come micro-lesioni o macro-lesioni tra le aree più rigide da quelle che presentano maggiore deformabilità.

In una condizione ideale, il carico verticale agente nella muratura dovrebbe essere uniformemente distribuito (Figura 2.4a), ma possono subentrare dei cambiamenti che conducono ad una distribuzione disomogenea del carico (Figura 2.4b) a causa di modifiche dell'edificio, ad esempio con cambi di destinazione d'uso, o anche per cause intrinseche alla composizione stessa della muratura, con paramenti più rigidi rispetto agli altri.

Aree della sezione non apparecchiate seguendo certe attenzioni, con materiali maleamente ingranati o giunti verticali quasi allineati, possono favorire la separazione tra le aree meno deformabili e quelle che lo sono maggiormente (Figura 2.4c). Col tempo, il progressivo incremento della fessura può dar luogo a estese deformazioni lungo il profilo della muratura, arrivando addirittura a forme di cedimento per effetto della sollecitazione di presso-flessione che ha avuto origine all'interno della sezione muraria (Figura 2.4d). Se il cedimento avviene con i paramenti che si deformano nella medesima direzione, questo viene detto concorde, mentre se le deformazioni seguono direzioni opposte, il cedimento è detto concorde.

La risposta della muratura dipende inoltre dalle azioni considerate, che siano verticali, orizzontali agenti nel piano della muratura, oppure orizzontali agenti perpendicolarmente alla muratura (Figura 2.5).

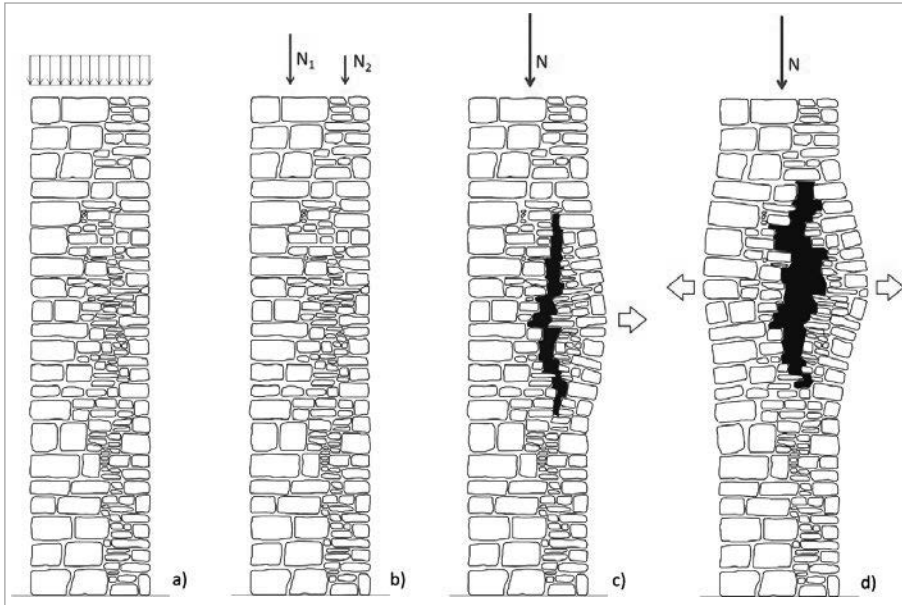


Figura 2.4. Esempi di distribuzioni del carico di compressione:
 a) carico uniformemente distribuito; b) carico concentrato sul lato più rigido;
 c) cedimento della porzione meno resistente della sezione disomogenea;
 d) cedimento discorde per presso-flessione.

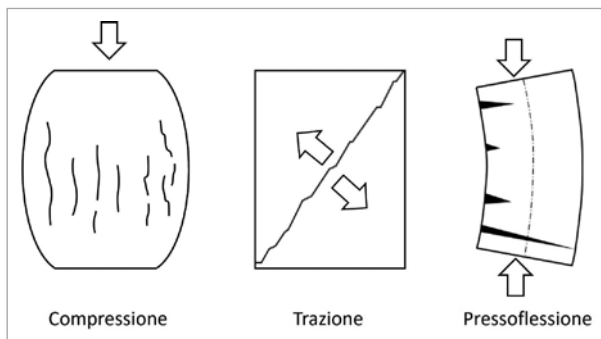


Figura 2.5. Schematizzazione dei principali stati tensionali a cui è sottoposto un solido murario.

Nel caso di azioni agenti verticalmente, le tensioni di compressione si diffondono in una limitata porzione di muratura. Il modo in cui esse si propagano è legato alla tessitura muraria. Le azioni verticali concentrate in un determinato punto della struttura si propagano con una diffusione limitata a pochi conci: se questi sono correttamente disposti lungo corsi orizzontali e ben sfalsati tra di loro, il carico si distribuisce con una ripartizione modulare (Figura 2.6a), mentre in caso di giunti non sfalsati la sezione si parzializza con il carico che si concentra su un'unica colonna di materiali (Figura 2.6b).

INTERPRETAZIONE DEL DEGRADO E DEL QUADRO FESSURATIVO DELLE MURATURE

3.1. Studio e interpretazione del degrado delle superfici lapidee

Ogni materiale posto in un determinato ambiente tende a mettersi in equilibrio con esso e se le condizioni ambientali cambiano anche il materiale si deve riadattare a queste ultime. Tali trasformazioni provocano una serie di processi di alterazione nella struttura originaria che interessano tutti i materiali, dal metallo ai materiali lapidei. Questi ultimi comprendono le pietre naturali ed anche tutti i manufatti artificiali utilizzati in architettura, quali laterizi, terrecotte, stucchi, malte, vetri ottenuti dalla lavorazione di pietre naturali con le quali condividono molte caratteristiche chimiche, fisiche e mineralogiche.

Per intraprendere un adeguato intervento conservativo dei materiali presenti in un manufatto, oltre alle caratteristiche mineralogiche-petrografiche degli stessi è importante conoscere i meccanismi di alterazione e le cause che innescano i fenomeni di deterioramento. Si introduce una breve "parentesi terminologica" riguardante i due termini *degradazione* (degrado o deterioramento) e *alterazione*. Secondo quanto indicato dalla commissione NORMAL (Normativa Materiali Lapedei) il termine *degradazione* sottintende sempre un peggioramento delle caratteristiche sotto il profilo conservativo di un materiale. Con il termine *alterazione* si intende una modificazione del materiale che non implica necessariamente un peggioramento del suo stato di conservazione. Di seguito verranno trattati principalmente i fenomeni di degradazione e si analizzeranno in alcuni casi fenomeni di alterazione.

Le cause di degrado di un materiale dipendono da fattori diversi quali:

- 1) la composizione chimica e mineralogica;
- 2) la resistenza dei singoli minerali;
- 3) la struttura (porosità, granulometria);
- 4) la lavorazione della superficie;
- 5) l'ambiente in cui si trova.

Per semplicità è possibile fare una prima grande suddivisione tra cause di degrado naturale, derivante dall'interazione tra materiale ed ambiente fisico, ed antropico, causato dall'immissione di inquinanti nell'atmosfera da parte dell'uomo. In genere le prime hanno effetti più lenti sui materiali, mentre le seconde sono assai più veloci. Generalmente vi è una concausa tra fenomeni di degrado naturale ed antropici.

Il degrado di tipo naturale può essere causato da:

- 1) fenomeni chimici dovuti a corrosione, idrolisi, idratazione e ossidazione;
- 2) fenomeni fisici per tensionamento interno, dilatazione termica ed erosione alveolare;
- 3) attacchi biologici di microorganismi, piante ed animali.

Il degrado di tipo antropico legato all'inquinamento atmosferico che altera le superfici dei materiali creando le condizioni ideali per reazioni chimiche assai dannose; gli inquinanti più pericolosi sono l'anidride solforosa, l'anidride carbonica, gli ossidi di azoto, l'acido solforico e il materiale particellare.

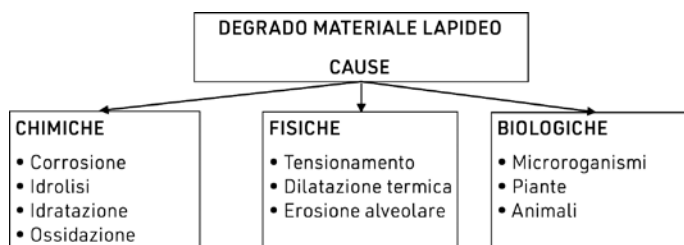


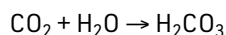
Figura 3.1. Schema delle tipologie di degrado tipici dei materiali lapidei.

3.1.1. Degrado naturale

Degrado chimico

Rappresenta la forma di degrado più comune a cui è soggetto il materiale lapideo quando entra in contatto con l'atmosfera che, nel caso di degrado naturale, è considerata priva di inquinanti di natura antropica. L'elemento scatenante per l'innescare di questo tipo di degrado è il contatto tra l'acqua, meteorica nella maggioranza dei casi, e pietra che determina lo sviluppo di reazioni chimiche tra la componente acquosa e i diversi minerali presenti nella pietra.

La pioggia, in assenza di inquinamento atmosferico, contiene diversi tipi di sali come il sodio, potassio, magnesio, i cloruri e i solfati oltre a composti azotati e gli ioni ammonio. La concentrazione di tali componenti nell'acqua piovana è variabile in base alle zone geografiche, così come è differente la concentrazione di biossido di carbonio (CO₂) disciolto in essa. L'anidride carbonica disciolta in acqua dà origine ad una soluzione debolmente acida, l'acido carbonico (H₂CO₃), secondo la seguente reazione:



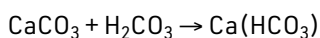
La concentrazione di CO₂ influenza il livello di acidità dell'acqua e di conseguenza la sua azione aggressiva nei confronti della pietra. L'entità del degrado dipende anche dalla quantità di acqua che viene a contatto con la superficie lapidea e dalla sua attitudine ad

assorbirla in base alla sua porosità caratteristica (Alessandrini, 1997). L'interazione tra acqua meteorica e pietra avviene secondo alcuni processi:

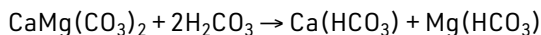
- 1) la *dissoluzione*;
- 2) l'*idrolisi*;
- 3) l'*idratazione*;
- 4) l'*ossidazione*.

La *corrosione* o *dissoluzione* si verifica nelle rocce prevalentemente carbonatiche, quali pietre calcaree, dolomie e marmi, nelle rocce sedimentarie a cemento carbonatico (arenarie) e nelle rocce che contengono minerali solubili come solfati e cloruri. La velocità di alterazione dipende dalla facilità con cui si solubilizzano i minerali, dalla temperatura atmosferica e dall'acidità della pioggia. Quest'ultima provoca la solubilizzazione della calcite o magnesio (dolomie) con la formazione di bicarbonato di calcio/magnesio, prodotti facilmente dilavabili dalla superficie.

L'acido carbonico trasforma il carbonato di calcio (CaCO_3) in *bicarbonato di calcio* $\text{Ca}(\text{HCO}_3)$, composto solubile in acqua:



Nelle rocce dolomitiche il magnesio presente, reagendo con l'acido carbonico, si trasforma in composto solubile, il *bicarbonato di magnesio* $\text{Mg}(\text{HCO}_3)$:



Questo tipo di alterazione chimica è comunque un processo molto lento dal momento che la solubilità dei principali minerali contenuti nelle rocce è bassa: si parla di 1-2 mm di superficie degradata ogni 50 anni circa (Alessandrini, 1997). In particolare nei materiali calcarei come i marmi, il fenomeno dell'attacco per dilavamento è molto limitato ed interessa soltanto lo strato superficiale a causa della scarsa porosità del materiale.

Gli stessi fenomeni di degrado sulle pietre a cemento carbonatico, come le arenarie, interessano anche gli strati più interni, poichè questi materiali sono dotati di elevata porosità e favoriscono il proseguimento dei fenomeni alterativi anche in profondità. L'azione dilavante delle acque piovane provoca lo "scioglimento" della matrice carbonatica che lega a sé i grani componenti la struttura resistente della pietra provocando la polverizzazione del materiale anche negli strati più interni.

La corrosione per dilavamento a scapito delle rocce silicatiche si chiama *idrolisi*. Tale processo è una vera e propria solubilizzazione della pietra originaria con formazione di minerali argillosi assai più deboli rispetto a quelli originali.

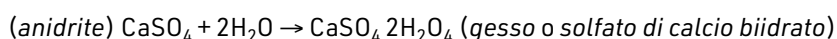
I minerali silicatici che costituiscono le rocce sono formati da cristalli che contengono gli ioni alluminio, calcio, magnesio sodio e potassio. Quando la superficie lapidea entra

in contatto con l'acqua, tali ioni si legano ad essa molto velocemente, disgregandone i minerali e spezzando così la struttura silicatica della roccia stessa. Il processo di alterazione termina con la formazione di minerali argillosi, spesso contenuti molta più acqua rispetto ai primari. Questo meccanismo di degrado colpisce soprattutto le rocce magmatiche contenenti minerali feldespatici che a contatto con acque acide portano alla formazione di materiali argillosi come la caolinite. La velocità di solubilizzazione dipende da:

- *Natura del materiale*: in genere la velocità di alterazione è maggiore nei minerali che si sono solidificati a temperature più alte.
- *Acidità dell'acqua*: il processo aumenta in presenza di maggiori concentrazioni di CO₂. Maggiore è l'acidità dell'acqua maggiore è la quantità di minerali argillosi (caolinite) di neo-formazione.
- *Clima*: la temperatura maggiore dissocia maggiormente l'acqua e quindi tale processo cresce quando ci si avvicina all'equatore.

Il terzo fenomeno che vede coinvolta l'acqua a contatto con una roccia si chiama *idratazione*. Esso consiste nell'adsorbimento di umidità da parte di molti minerali componenti la roccia, con conseguenti aumenti di volume dei prodotti di neoformazione tali da causare la fessurazione della roccia stessa. Tale fenomeno trova tipica manifestazione nelle rocce costituite da anidrite (solfato di calcio) e in quelle carbonatiche che, a contatto con l'umidità atmosferica o con le piogge acide, danno luogo alla formazione di gesso accompagnato da un elevato aumento del volume e dalla successiva formazione di uno strato superficiale polverulento.

La reazione tra minerali e acqua piovana o umidità atmosferica prevede che il *solfato di calcio* CaSO₄, a contatto con l'acqua, diventi *solfato di calcio biidrato* CaSO₄ 2H₂O₄, ovvero un sale di media solubilità.



La formazione di solfato di calcio biidrato sta alla base della formazione della crosta:

Crosta = cristalli di calcite + particolato atmosferico + prodotti di media solubilità

Tra i prodotti di media solubilità si trova il gesso che da bianco diventa nero in seguito al particolato atmosferico, originando il fenomeno della crosta nera.

L'acqua favorisce anche l'*ossidazione* di alcuni elementi interni al minerale nel momento in cui vengono a contatto con l'atmosfera. Un esempio eclatante è quello fornito dai marmi, come il Candoglia, che contengono pirite (solfuro di ferro di colore giallo chiaro). A contatto con l'atmosfera la pirite si trasforma in ossido di ferro, conferendo alla roccia una tipica colorazione rossastra. Se tale fenomeno si manifestato a larga scala può portare alla disgregazione del manufatto in marmo.

Per una prima ricognizione dei danni subiti dagli edifici colpiti da eventi sismici, questo ausilio fornisce un riscontro immediato che consente di compiere una verifica speditiva del comportamento meccanico fornito dalle strutture in muratura sotto l'azione di scuotimento del terremoto (Figura 3.17).

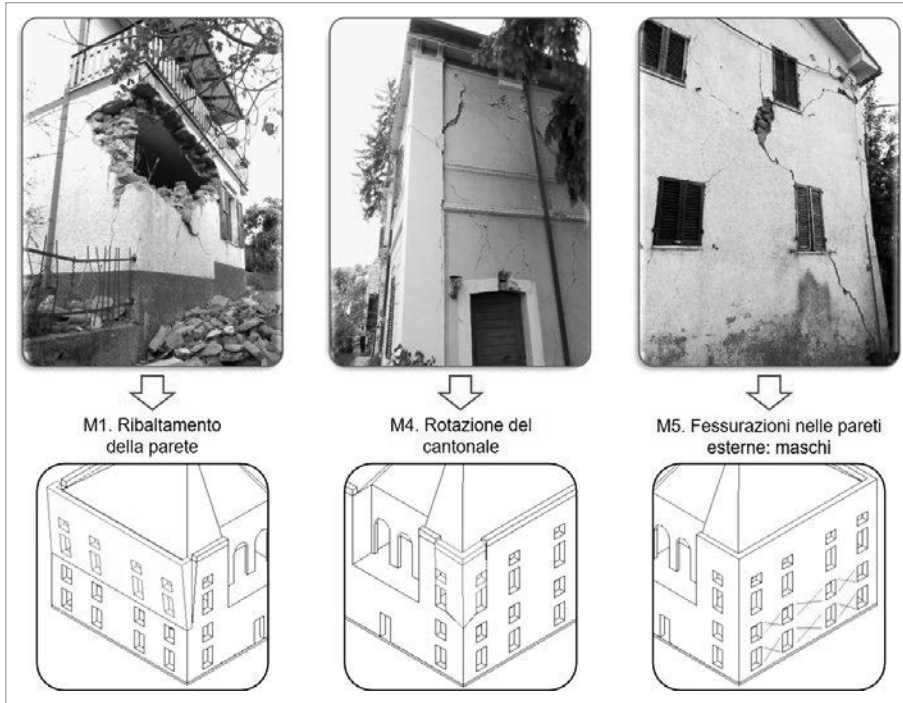


Figura 3.17. Esempi relativi al riconoscimento dei cinematici di collasso per degli edifici osservati in ambito sismico, il cui quadro fessurativo è stato messo a confronto con alcuni abachi della scheda palazzi.

Il contributo più importante riguarda il fondamentale supporto all'identificazione delle vulnerabilità per quegli edifici fessurati che in seguito a nuove scosse sismiche potrebbero andare in contro ad ulteriori danni, permettendo di comprendere l'eventuale vulnerabilità per predisporre i necessari interventi di salvaguardia.

TECNICHE DI APPROFONDIMENTO DIAGNOSTICO

4.1. Linee guida per un percorso della conoscenza

Indipendentemente dal fatto che l'edificio in muratura sia vincolato o meno, le buone prassi per la stesura del piano di conservazione prevedono di condurre gli approfondimenti necessari per comprendere le caratteristiche del fabbricato, dalle tecniche costruttive impiegate, alla natura di degradi e dissesti osservati (Saisi et al., 2011). In questo modo è possibile delineare un vero e proprio percorso della conoscenza grazie al quale dare supporto alla fase di calibrazione degli interventi da proporre per la conservazione dell'edificio storico.

Il ricorso alla diagnostica strumentale costituisce un passaggio chiave nell'azione di tutela del patrimonio edilizio: le informazioni ricavate vengono infatti messe in relazione ai contenuti maturati dalla ricerca storica e dal rilievo geometrico, in modo da completare lo studio sull'edificio. Il progettista potrà quindi identificare le buone pratiche da impiegare per dare risposta alle problematiche presenti.

Come osservato nei capitoli precedenti, il ricorso alle tecniche di intervento nei confronti delle strutture degli edifici storici è strettamente legato alle loro caratteristiche meccaniche, in termini di risposta alle seguenti sollecitazioni:

- a) azioni verticali di compressione costanti nel tempo, dovute al peso proprio delle strutture primarie e ai carichi delle strutture secondarie;
- b) azioni di pressoflessione dovute ad una distribuzione disomogenea dei carichi sulle strutture primarie;
- c) azioni orizzontali nel piano o fuori dal piano sulle strutture primarie e secondarie.

La determinazione della risposta delle strutture a queste condizioni di carico è oggi raccomandata dalle NTC 2018 e dalle Linee guida per la mitigazione del rischio sismico per i beni culturali.

Per raggiungere un adeguato livello di conoscenza sulle vulnerabilità degli edifici è necessario identificare le proprietà della costruzione in termini di comportamento scotolare attraverso una serie di verifiche sperimentali. Facendo riferimento al Capitolo 8 delle NTC 2018 (dedicato agli edifici esistenti), ed alle integrazioni contenute nella relativa circolare, l'impostazione dell'intervento sui beni culturali viene condotta attraverso un progressivo approfondimento conoscitivo delle componenti strutturali dell'edificio. Le conoscenze acquisite servono a comprendere eventuali vulnerabilità nella concezione

strutturale della fabbrica architettonica e a verificare la presenza di eventuali dinamiche di danno o dissesto in atto nell'edificio.

Come indicato nel paragrafo C8.4 della Circolare n. 7/2019, gli interventi che possono essere scelti per il patrimonio edilizio si dividono in:

- a) *Intervento di adeguamento*: non prevede il soddisfacimento delle prescrizioni indicate per i dettagli costruttivi, valide per le nuove costruzioni. A seguito dell'intervento, la struttura deve risultare idonea a resistere alle combinazioni delle azioni di progetto secondo quanto riportato nelle NTC 2018, con il grado di sicurezza previsto dalle stesse.
- b) *Intervento di miglioramento*: prevede la trasformazione dei meccanismi di collasso da fragili a duttili. La valutazione di sicurezza consiste nella determinazione dell'entità massima delle azioni, previste da progetto in varie combinazioni, alle quali la struttura può resistere con il grado di sicurezza richiesto.
- c) *Riparazione o intervento locale*: si tratta di riparare, rafforzare o sostituire singoli elementi strutturali che non risultano adeguati alla funzione portante che debbono svolgere. Interventi di ripristino o rinforzo delle connessioni tra elementi strutturali diversi (ad esempio tra pareti murarie, tra pareti e travi o solai, anche attraverso l'introduzione di catene e tiranti) sono finalizzati al miglioramento del comportamento globale della struttura.

Nel caso di edifici storici (vincolati o meno), le indicazioni del legislatore mettono in risalto come la diffusione di differenti tipologie murarie non faciliti la standardizzazione dei metodi di intervento sul patrimonio architettonico. Per questo motivo, la normativa fa esplicito riferimento all'introduzione di una serie di approfondimenti conoscitivi per verificare le condizioni delle strutture, il loro funzionamento in certe condizioni di sollecitazione e l'intervento più indicato per garantire la sicurezza del fabbricato.

La scelta dell'intervento va quindi basata su una serie di livelli di conoscenza ai quali, in virtù di un certo grado di incertezza legato alle strutture storiche, vengono associati dei fattori di confidenza. Le caratteristiche meccaniche dei materiali e delle diverse parti strutturali non possono essere note come nel caso delle costruzioni di nuova edificazione, in cui sono intese come dati progettuali da conseguire in fase di realizzazione. Per le costruzioni esistenti tali proprietà vanno identificate mediante una serie di approcci conoscitivi che possono essere riepilogati come di seguito:

- a) *Analisi storico-critica*: documentazione sulle vicende edificatorie dell'edificio per ricostruirne le diverse fasi di sviluppo.
- b) *Rilievo*: finalizzato alla messa a punto di un modello di calcolo accurato, deve pervenire ad una certa accuratezza della geometria strutturale
- c) *Caratterizzazione meccanica dei materiali*: in base alle informazioni ritenute più utili, materiali e strutture composite possono essere esaminati con varie prove sperimentali. Le proprietà delle tipologie murarie più ricorrenti in ambito nazionale sono riportate nella tabella C8.5.I, appendice C8B della Circolare n. 7/2019. A loro volta le Regioni possono elaborare tabelle specifiche per ambiti territoriali.

Nella valutazione dei requisiti di sicurezza per gli edifici esistenti, la normativa prende in esame l'analisi sismica globale e l'analisi dei meccanismi locali. Avendo riscontrato che in molti casi le costruzioni non presentano un chiaro comportamento d'insieme, è allora opportuno valutare se l'edificio in esame sia in grado di rispondere alle sollecitazioni del sisma come un insieme di meccanismi locali: sottoinsiemi costituiti da elementi strutturali che manifestano modalità distinte di dissesto e collasso.

4.2. Analisi storico-archivistica

Affrontare in modo organico e completo un argomento come l'analisi storico-archivistica su un edificio esistente è più complesso di quanto si pensi. Troppo spesso ridotta ad una mera formalità, necessaria ad ottenere le autorizzazioni per l'intervento di restauro, la ricerca storica è invece un passaggio fondamentale per un'ottimale progettazione sul costruito. Quando si parla di ricerca storico-archivistica si può incappare nell'errore di pensare ad una raccolta sistematica di dati tratti da libri e da documenti più o meno recenti. Non si tratta soltanto di questo tipo di operazione, ma di un'attività complessa, da realizzare necessariamente in un'ottica pluriprospettica (Mannoni, 2002a). L'edificio va quindi osservato mediante l'uso combinato di tecniche codificate, spesso derivate dall'archeologia (una su tutte, la mensiocronologia) e di dati ottenuti in modo meno scientifico, sfruttando il patrimonio immateriale come, ad esempio, la tradizione orale.

Scopo principale della ricerca storica è la ricostruzione del percorso evolutivo del complesso edificato, per valutarne aspetti di forza e di debolezza, così come i punti di omogeneità e gli elementi di discontinuità.

In questo senso, l'analisi storico-critica e le ricerche di documenti inerenti l'edificio devono andare di pari passo ed essere verificate mediante un accurato confronto con il rilievo geometrico, materico e del quadro fessurativo. Sono questi elaborati ad avvalorare, o, talvolta, a smentire i dati emersi dalle ricerche bibliografiche e di archivio.

Dal rilievo geometrico è possibile osservare incongruenze nell'impianto strutturale, con spessori murari anche molto diversi tra loro nella distribuzione in pianta che coincidono con nuclei più antichi ed addizioni avvenute nel tempo. La disponibilità di piante catastali storiche (Cadinu, 2012), seppur prive di certi dettagli distributivi, è comunque utile per verificare i cambiamenti più macroscopici dell'impianto architettonico.

Nel caso degli edifici più recenti è possibile recuperare il progetto delle opere in calcestruzzo armato dagli archivi del Genio Civile, con possibili dettagli costruttivi. Più in generale, si può far ricorso agli strumenti dell'analisi urbanistica per una classificazione tipologica dell'edificio (Caniggia, 1997) e valutare le sue caratteristiche in relazione al contesto. Il ricorso a fonti differenti, così come l'utilizzo di metodi di analisi che vanno dalla lettura archeologica delle fasi costruttive (Mannoni, 1994), all'interpretazione delle tecniche architettoniche impiegate e, se presenti, allo studio delle decorazioni artistiche, consente di avere una visione diacronica dell'evoluzione dell'edificio (Caniggia, Maffei, 2008).

Un giusto approccio prevede che venga consultata la documentazione riguardante la storia dell'immobile, che venga sottoposta essa stessa per prima ad un'analisi critica dei dati raccolti e che si pongano questi dati tutti sullo stesso piano, senza conferire ad uno un valore maggiore rispetto ad altri.

Ai documenti raccolti vanno affiancati anche dati sulle vicissitudini che l'edificio ha affrontato da un punto di vista storico e ambientale (Margottiniet al., 2005). Ogni notizia raccolta può diventare importante per capire le cause che hanno portato la costruzione ad avere l'aspetto attuale, soprattutto se, come nei casi delle aree più soggette a sisma o ad eventi catastrofici quali guerre e incendi, essi hanno portato alla distruzione di alcune parti.

Un aspetto importante delle ricerche storiche consiste nel saper catalogare e documentare non solo le notizie, ma soprattutto le fonti da cui esse sono state tratte. In questo modo chiunque riesce a ricostruire l'iter di ricerca condotto ed, eventualmente, poter consultare e verificare le fonti originali.

Una parte dell'analisi, soprattutto per un edificio monumentale o collocato in una zona di alto valore storico, è volta a ricostruire ciò che c'era nello stesso luogo prima che la costruzione venisse edificata. Molti Comuni e realtà locali hanno in questi anni svolto una vasta opera di raccolta delle notizie sullo studio del territorio e, nel caso in cui l'edificio da investigare si trovi proprio in un'area interessata da tali lavori, non sarà difficile reperire online sui siti ufficiali di Comune, Provincia o Regione la documentazione ad oggi raccolta.

Meno facile e sicura sarà invece la ricostruzione della storia nelle zone rurali. Nei casi più fortunati, si potranno reperire pubblicazioni a carattere locale che raccontano, spesso per commemorare un evento o una persona, l'evoluzione storica locale.

Di primaria importanza sono le notizie orali locali che richiedono sempre un successivo lavoro di verifica che ne attesti l'attendibilità attraverso un riscontro con la documentazione archivistica. In questi casi persone che, a vario titolo, hanno vissuto o custodito l'edificio, potranno fornire notizie che siano utili per ricostruirne le evoluzioni storiche e costruttive. Passando invece a fonti più forti dal punto di vista storico, archivi pubblici e privati, laddove accessibili e ordinati, saranno la fonte principale di notizie documentali, sia scritte che grafiche (immagini, fotografie, etc.).

Nella ricerca storica nulla deve essere tralasciato, tutte le fonti vanno comunque considerate con le dovute cautele, relativamente ad una loro maggiore o minore affidabilità.

Una volta portato a termine questo tipo di ricerca documentale, i dati raccolti andranno connessi alle varie parti che compongono l'edificio, per stabilirne la fase evolutiva.

Studiare approfonditamente una realtà complessa come un edificio che è stato realizzato e modificato negli anni e, a volte, nei secoli è condizione necessaria, ma purtroppo non sufficiente, ad un giusto e corretto intervento (Grimoldi, 2000). Nulla infatti garantisce un rapporto di consequenzialità tra una ricerca svolta in modo oculato, completo e multidisciplinare ed un buon restauro (Jurina, 2000). Alla ricerca storico-archivistica potranno, e dovranno, infatti essere affiancate altre attività, a completare il quadro delle operazioni che portano ad una ottimale conoscenza della costruzione. Le principali sono esposte nei paragrafi successivi.

Il presente capitolo riporta alcuni casi studio condotti dagli autori.

Le indagini eseguite sono state concordate con i tecnici incaricati, architetti e/o ingegneri, in funzione delle esigenze progettuali di ogni cantiere.

5.1. Basilica della Natività (Betlemme, Palestina)

La Basilica della Natività a Betlemme è stata oggetto di un lungo processo di restauro iniziato nel 2013 e conclusosi nel 2019. Gli autori si sono occupati in particolar modo della campagna di indagini diagnostiche sulle murature verticali e sulle volte del narthex, lo spazio interposto fra le tre navate della chiesa e la facciata principale, oggi unico accesso alla Basilica attraverso la piccola porta chiamata "Porta dell'Umiltà".



Figura 5.1. Basilica della Natività.

Il narcece è definito da muri dello spessore di circa 1 m, formati da blocchi squadrati in pietra di grandi dimensioni, sormontati da cinque volte a crociera di epoca Giustiniana, realizzate in muratura irregolare con pietre di dimensioni più piccole ed ampi giunti di malta. Nel corso dei secoli la facciata del narcece ha ruotato verso l'esterno e di conseguenza le volte a crociera, costruite senza efficaci connessione alle murature, si sono staccate dai muri manifestando quadri fessurativi diffusi sia in estradosso che in intradosso (Figura 5.3).



Figura 5.2. Vista dell'estradosso della copertura voltate del narcece.



Figura 5.3. Particolari costruttivi delle volte a crociera in appoggio alla muratura del narcece.

A supporto dei progettisti strutturali è stato formulato un piano di prove diagnostiche (prove soniche e mappatura umidità, indice di qualità muraria IQM, analisi microscopiche delle malte, rilievi termografici) per definire le caratteristiche costruttive delle strutture murarie (murature verticali e volte) e stimarne i parametri meccanici da adottare per la calibrazione del modello strutturale ad elementi finiti.

Nello specifico, le indagini soniche sono state impiegate per caratterizzare dal punto di vista qualitativo le murature delle strutture verticali (murature longitudinali e trasversali) e orizzontali (volte) del narcece. L'indagine sonica ha verificato inoltre la presenza di elementi lapidei trasversali interni alla sezione muraria. Alla base del narcece è stato impiegato anche un igrometro a microonde, per stimare la distribuzione dell'umidità nelle murature, con il fine di verificare la presenza di concentrazioni di umidità tali da incrementare il passaggio dei segnali generati dal martello, alterandone così il reale valore.

La valutazione dei parametri meccanici è stata condotta senza ricorrere alle prove con martinetti piatti per problemi legati alla logistica e al timore che certi livelli di sollecitazione potessero influire negativamente sulle precarie condizioni delle parti di muratura più danneggiate. In alternativa è stato proposto il rilievo dell'indice di qualità muraria (IQM), impiegando anche i risultati delle analisi petrografiche sulle malte di allettamento e delle prove soniche, per stimare i parametri meccanici $f_m - E - \tau$, rispettivamente resistenza media a compressione, modulo elastico e resistenza a taglio, da attribuire alla muratura per la sua modellazione strutturale.

Le osservazioni mediante prova termografica sono state impiegate per individuare la presenza di tamponature celate dall'intonaco e risalenti a fasi costruttive precedenti all'attuale e verificare la presenza di variazioni nella tessitura delle strutture verticali del narcece.

5.1.1. Indagini soniche

È stata condotta un'estesa campagna di prove soniche sulle murature verticali e sulle volte a crociera del narcece, di cui si riporta la localizzazione nello schema planimetrico sottostante. I risultati delle indagini condotte sulle volte hanno fornito prove della presenza di elementi trasversali di collegamento tra intradosso ed estradosso, seppur non distribuiti uniformemente sulla superficie.

Si riportano, a titolo esemplificativo, i risultati ottenuti dalle griglie di prova S05 ed S09 eseguite rispettivamente sulla volta 1 e sulla volta 3 (Figure 5.4, 5.5 e 5.6).

L'area estradosale in corrispondenza della griglia di prova S05 si presenta generalmente decoesa. La mappa di distribuzione della velocità rivela nella parte centrale della griglia l'assenza di elementi di connessione trasversale e la presenza di vuoti/fessure interne (velocità soniche prossime 350 m/s), mentre nei punti periferici 1, 21, 25 e 30 le velocità soniche sono oltre 2200 m/s ad indicare una muratura assai più solida ed ammassata.

I risultati della prova S09 eseguita sulla volta a crociera 3, a parità di tecnica costruttiva e materiali componenti utilizzati, ha restituito risultati più incoraggianti: qui sono presenti elementi di connessione tra intradosso ed estradosso chiaramente identificabili

nelle zone delimitate dai punti da 1 a 12, dai punti 14 e 15 e dal raggruppamento di punti 22, 23, 24, 28 e 29. In queste aree la distribuzione delle velocità è oltre i 3200m/s, tipica degli elementi lapidei monolitici.

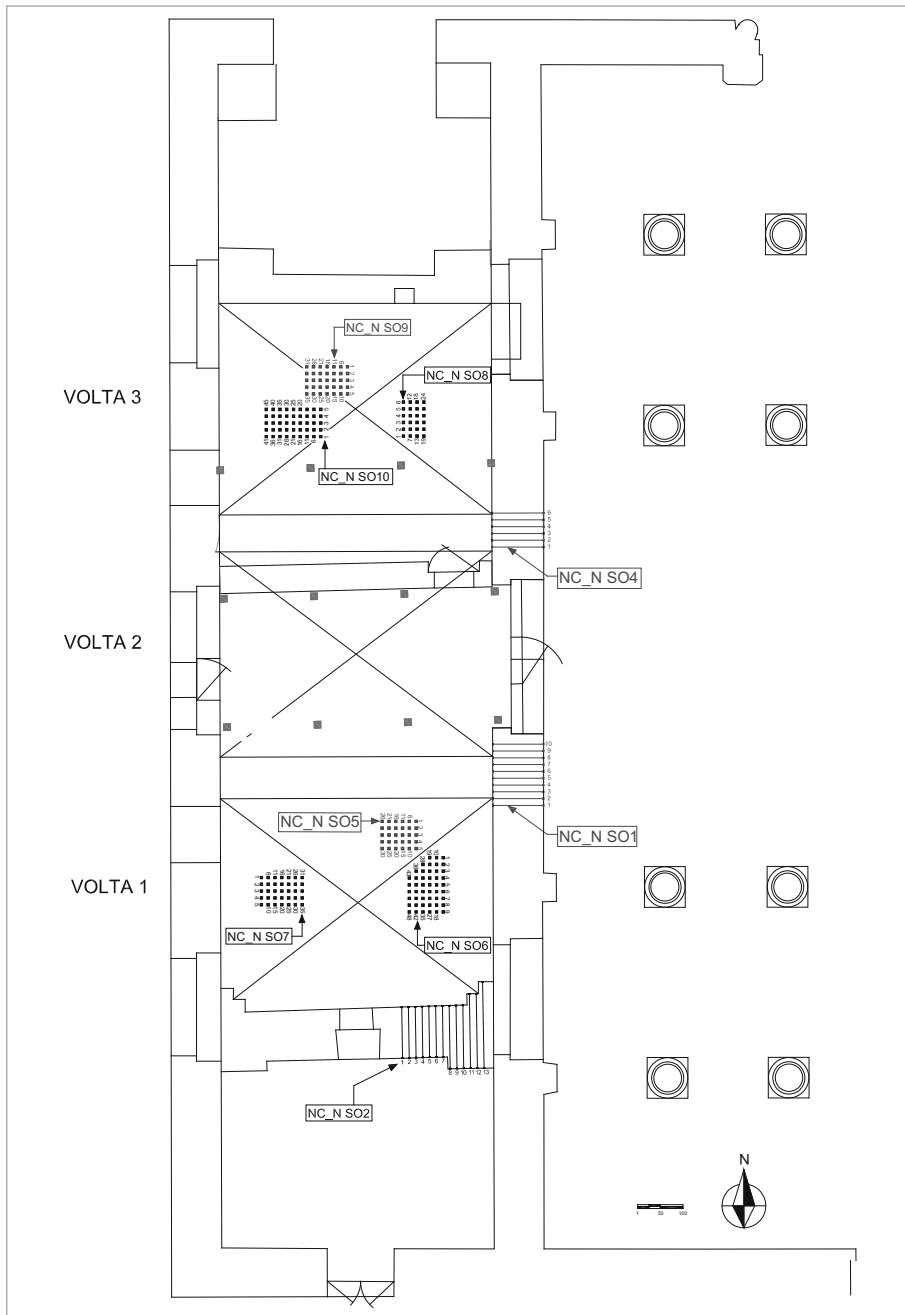


Figura 5.4. Localizzazione delle prove soniche.

CONTENUTI E ATTIVAZIONE DELLA WEBAPP

Contenuti della WebApp

- **Utilità e risorse:**
 - Classificazione delle principali patologie di degrado dei materiali lapidei;
 - Indagini conoscitive sulle murature;
 - Indagini conoscitive sulle murature con georadar ad alta frequenza;
 - Link alle raccomandazioni rese pubbliche dalla RILEM.
- **Normativa di riferimento** consultabile attraverso un motore di ricerca, con aggiornamenti automatici per 365 giorni dall'attivazione della WebApp.

Requisiti hardware e software

- Dispositivi con MS Windows, Mac OS X, Linux, iOS o Android;
- Accesso ad internet e browser web con Javascript attivo;
- Software per la gestione di documenti Office e PDF.

Attivazione della WebApp

- Collegarsi al seguente indirizzo internet:

https://www.grafill.it/pass/0281_9.php

- Inserire i codici **[A]** e **[B]** che sono presenti nell'ultima pagina del volume e cliccare su **[Continua]**;
- Accedere al **Profilo utente Grafill** oppure crearne uno su **www.grafill.it**;
- Cliccare sul pulsante **[G-CLOUD]**;
- Cliccare sul pulsante **[Vai alla WebApp]** a fianco del prodotto acquistato;
- Fare il *login* usando le stesse credenziali di accesso al **Profilo utente Grafill**;
- Accedere alla WebApp abbinata alla presente pubblicazione cliccando sulla relativa immagine di copertina presente nello scaffale **Le mie App**.



Il professionista che deve intervenire su un edificio esistente, antico o moderno che sia, si trova spesso a decifrare problematiche legate a sistemi costruttivi complessi, perché appartenenti a tradizioni e tecnologie vetuste o del tutto abbandonate.

Il progetto di conservazione degli edifici, specialmente quelli vincolati, richiede poi particolari attenzioni nei confronti dei materiali e della tutela degli elementi strutturali e non. Queste esigenze imprescindibili condizionano il tecnico nella valutazione della vulnerabilità dell'organismo architettonico. La buona riuscita dell'intervento dipende soprattutto dalla capacità del professionista di utilizzare tutte le risorse a sua disposizione, organizzando e scegliendo quelle più efficaci per raggiungere una conoscenza dell'edificio che sia il più possibile completa e mirata alle esigenze dell'intervento.

Gli argomenti trattati nel presente testo sono suddivisi in tre macro-aree:

- la prima descrive gli elementi che costituiscono le strutture edilizie;
- la seconda tratta le più rilevanti tecniche di diagnostica sul costruito, di cui i progettisti possono avvalersi per indirizzare gli interventi su muratura e legno;
- la terza area presenta una serie di casi di studio, con l'applicazione di tecniche diagnostiche opportunamente calibrate per supportare la conoscenza dell'edificio da conservare, restaurare ed eventualmente riqualificare o migliorare.

La **WebApp inclusa** gestisce le seguenti utilità:

- **Utilità e risorse:**
 - Classificazione delle principali patologie di degrado dei materiali lapidei;
 - Indagini conoscitive sulle murature;
 - Indagini conoscitive sulle murature con georadar ad alta frequenza;
 - Link alle raccomandazioni rese pubbliche dalla RILEM.
- **Normativa di riferimento** consultabile attraverso un motore di ricerca, con aggiornamenti automatici per 365 giorni dall'attivazione della WebApp.

REQUISITI HARDWARE E SOFTWARE

Qualsiasi dispositivo con MS Windows, Mac OS X, Linux, iOS o Android; accesso ad internet e browser web con Javascript attivo; software per la gestione di documenti Office e PDF.

Riccardo David De Ponti, architetto e co-fondatore di *Arch-Indagini*, ha collaborato con il Laboratorio Prove Materiali – Settore Beni Culturali del Politecnico di Milano. È certificato a livello massimo (3°) per l'esecuzione di prove e monitoraggi sulle strutture in muratura e calcestruzzo. Si occupa principalmente di indagini diagnostiche su strutture in muratura e legno.

Lorenzo Cantini, architetto, è ricercatore presso il dipartimento di Architettura, ingegneria delle costruzioni e ambiente costruito del Politecnico di Milano. Si occupa di recupero del patrimonio storico-architettonico e analisi degli edifici storici mediante tecniche di indagine di tipo non distruttivo e leggermente invasivo.

Laura Bolondi, architetto e co-fondatrice di *Arch-Indagini*, ha lavorato come ricercatrice post-doc alla Facoltà di Architettura del TU di Delft (Paesi Bassi). Si occupa di analisi sui materiali da costruzione applicate a singoli casi studio e a sistemi di architetture complesse.



WebApp



Assistenza
tecnica

ISBN 13 978-88-277-0281-9



9 788827 702819 >

Euro 38,00