

Ao8

Francesco Monni

**Edifici esistenti in muratura
conoscenza, analisi, interventi**

Postfazione di
Alessandro Battaglia





Aracne editrice

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

Copyright © MMXX
Giacchino Onorati editore S.r.l. — unipersonale

www.giacchinoonoratieditore.it
info@giacchinoonoratieditore.it

via Vittorio Veneto, 20
00020 Canterano (RM)
(06) 45551463

ISBN 978-88-255-3444-3

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: giugno 2020

Indice

- 7 *Introduzione*
- 9 **Capitolo I**
Progettare l'intervento secondo i paradigmi del restauro
- 15 **Capitolo II**
La concezione strutturale dell'edificio in muratura
- 19 **Capitolo III**
La conoscenza dell'edificio come presupposto imprescindibile per il progetto
3.1. Il rilievo geometrico–architettonico, 19 – 3.2. L'analisi storica degli eventi e degli interventi subiti, 20 – 3.3. Il rilievo del quadro fessurativo e deformativo, 21 – 3.4. L'analisi materica e tecnologico–costruttiva, 22 – 3.5. La diagnostica in situ, 23
- 27 **Capitolo IV**
La diagnosi del dissesto. Vulnerabilità tipiche e specifiche
- 33 **Capitolo V**
La modellazione per macroelementi e il metodo dell'analisi cinematica lineare
5.1. Meccanismi di primo modo, 34 – 5.1.1. *Ribaltamento semplice*, 35 – 5.1.2. *Ribaltamento composto*, 36 – 5.1.3. *Flessione verticale*, 37 – 5.1.4. *Flessione orizzontale*, 39 – 5.2. Meccanismi di secondo modo, 41
- 43 **Capitolo VI**
L'analisi globale di un edificio in muratura
- 47 **Capitolo VII**
Migliorare la risposta al sisma. La qualità della muratura
7.1. Scuci e cucì, 52 – 7.2. Iniezioni di miscele, 53 – 7.3. Intervento di ristilatura dei giunti, 54 – 7.4. Inserimento di diatoni artificiali, 55 – 7.5. Intonaco armato, 57

59 **Capitolo VIII**

Migliorare la risposta al sisma. Il comportamento scatolare

8.1. Inserimenti di tiranti metallici o catene, 59 – 8.2. Inserimento di cordoli, 63 – 8.3. Riduzione delle carenze dei collegamenti tra pareti, 65 – 8.4. Riduzione delle carenze dei collegamenti tra pareti e solai, 67 – 8.5. Irrigidimento degli impalcati, 68 – 8.6. Creazione e rinforzo delle aperture, 69

71 **Capitolo IX**

I materiali compositi per il consolidamento delle strutture in muratura

9.1. Il quadro normativo, 74 – 9.2. Archi e strutture voltate, 76 – 9.3. Recupero e consolidamento di strutture lignee, 80

85 *Postfazione*

di Alessandro Battaglia

89 *Bibliografia*

Introduzione

Il territorio del nostro paese ospita in maniera diffusa di edifici di valore architettonico, storico e culturale. Allo stesso tempo quello italiano è, notoriamente, un territorio fortemente soggetto all'azione del terremoto. Oltre alla recente crisi sismica del centro Italia del 2016 non serve, purtroppo, sforzare molto la memoria per ricordare i danni generati dal sisma emiliano del 2012, quello aquilano del 2009 o da quello umbro-marchigiano del 1997. La frequenza e l'intensità di questi eventi mette il patrimonio architettonico del paese in condizione di elevata vulnerabilità, condizione aggravata dal pessimo stato di salute di molti di questi edifici, spesso lasciati al degrado dovuto allo scorrere del tempo.

Se si vuole donare longevità a questi "documenti" del passato, risulta quindi fondamentale fornirgli la possibilità di resistere al terremoto o quanto meno migliorare la loro risposta a questo evento. Pertanto in questo senso, appare come più che sensato integrare il progetto di restauro con il miglioramento sismico, superando una distinzione tra restauro e consolidamento, che troppo spesso considera i due interventi come alternativi e non come complementari. Chiaramente, nel rispetto dei principi e delle istanze del restauro, le operazioni di consolidamento dovranno rispettare criteri e modalità (di cui si parlerà in maniera più approfondita in seguito) che regolino l'impatto sulla fabbrica e, parallelamente, il progetto di restauro dovrà accogliere i concetti alla base delle opere di consolidamento, come finalizzati all'eliminazione di una vulnerabilità che potrebbe portare a un degrado insostenibile.

L'obiettivo del progettista deve essere quindi il mantenimento dell'equilibrio tra restauro e consolidamento, fare in modo che entrambi occupino il giusto spazio all'interno del percorso progettuale, facendo ricorso a tutte le possibilità che la tecnologia oggi offre. Ma la sismicità del nostro territorio non mette a rischio solo i monumenti o i fabbricati di pregio: ci sono poi tutte le costruzioni che, pur non soggette a vincoli, perché percepite come di minor valore, rappresentano comunque una

cospicua porzione del patrimonio edilizio. Anche in questo caso però, perseguire la salvaguardia della vita umana e il mantenimento della funzionalità dell'edificio presuppongono la necessità di intervento in molti casi, specie quando non si abbia a che fare solo con edifici privati ma anche con strutture pubbliche con funzioni anche strategiche (scuole, ospedali, uffici, ecc.). Anche in questo caso il progettista che si trova a dover dare la giusta importanza alle esigenze della conservazione e quelle del consolidamento e miglioramento strutturale, darà totalmente risalto alle seconde, ma in questo caso l'obiettivo sarà ugualmente raggiunto.

Nessuna regola ferrea quindi, ma sicuramente tanta attenzione e sensibilità a progettare, e quindi intervenire, in modo da ottenere la "ricetta" giusta per ogni edificio.

Restauro e consolidamento possono convivere, anzi, devono.

Progettare l'intervento secondo i paradigmi del restauro

Il pregio del costruito storico che caratterizza il nostro Paese, impone di prendere in seria considerazione la tutela e la conservazione dell'opera originale all'interno del percorso progettuale degli interventi che mirano a garantirne la sicurezza. Pregio che non si ravvisa solo nel caso di edifici monumentali, ma anche in tutti quegli esempi edilizi che assumono un forte valore perché testimonianza delle civiltà del nostro passato, dei loro usi e costumi, come ad esempio i centri storici medioevali o l'edilizia tradizionale rurale delle nostre campagne.

Fino agli anni '70 e '80 la volontà di conferire la possibilità a queste costruzioni di resistere al sisma, come già detto piaga per la quasi totalità del territorio italiano, ha però portato a interventi che nulla avessero a che fare con le istanze della conservazione.

Diversi fattori, come l'eccessiva fiducia da parte di tecnici e imprese in un materiale come il calcestruzzo (tanto versatile e moderno quanto lontano nel comportamento meccanico dalla muratura), la perdita di sensibilità nel comprendere il funzionamento delle fabbriche originali e il progressivo disperdersi della conoscenza accurata di materiali e tecniche del passato, hanno fatto in modo che gli edifici oggetto di intervento diventassero oggetti ibridi tra le strutture murarie del passato e quelle intelaiate moderne.

Inoltre, gli eventi sismici che si sono succeduti (per ultimi quelli che hanno colpito il centro Italia a partire dal 24 agosto 2016) hanno messo in luce l'inadeguatezza di questi interventi, che si sono dimostrati così incapaci di assolvere alla loro funzione principale, in alcuni casi con effetti catastrofici. Intervenire in maniera acritica e, per certi versi inconsapevole, con tecniche e materiali moderni ha portato quindi a un risultato diametralmente opposto a quello che ci si aspettava (Figg.1.1

e 1.2). A tal proposito, nel recente passato alcune normative (come il d.m. 16.01.1996) iniziano a parlare di interventi di “miglioramento” intendendo con questo termine quegli interventi mirati a garantire una maggiore sicurezza rispetto a quella del manufatto allo stato di fatto, senza però portarlo agli standard propri di un nuovo edificio e senza quindi dover apportare drastiche trasformazioni.

Oggi le nuove norme tecniche, propongono ancora questo approccio e suddividono gli interventi in tre differenti categorie, sottolineando come questi (anche non propriamente in chiave antisismica), debbano essere primariamente finalizzati alla limitazione o riduzione significativa delle carenze gravi legate a errori di progetto e di esecuzione, al degrado, a danni, a trasformazioni, e ad altri fattori per poi prevedere l'eventuale rafforzamento della struttura esistente, anche in relazione a un mutato impegno strutturale.

Consolidare nel rispetto della conservazione, quindi, seguendo quei criteri, quei paradigmi, che ormai sono presi ad esempio nella pratica del restauro e che possono essere così sintetizzati:



Figura 1.1. Danneggiamenti causati dall'inserimento di elementi di copertura pesanti su murature in pietra.



Figura 1.2. Danneggiamenti causati dall'inserimento di elementi di copertura pesanti su murature in pietra.

- a) tendenza al minimo intervento: l'intervento, che deve essere il meno invasivo possibile, deve essere strettamente mirato a una certa carenza, quindi motivato. Un buon accorgimento in questo senso risiede nell'attribuire a una stessa opera, di nuova realizzazione, più di una funzione;
- b) ricerca della compatibilità: la compatibilità va ricercata sotto diversi aspetti. Dal punto di vista meccanico-strutturale, l'intervento non deve mutare la concezione strutturale, ma la deve integrare limitatamente alle azioni rispetto alle quali l'edificio è vulnerabile. Dal punto di vista fisico-chimico, si

deve verificare che non si inneschino interazioni negative tra materiali di apporto e materiali già presenti nella fabbrica, a garanzia anche della durabilità dell'intervento, ossia al permanere dei requisiti richiesti. Dal punto di vista costruttivo, va ricercata la maggiore affinità tra materiali di apporto e quelli originali della fabbrica. Si dovrebbe cercare di mantenere le tecniche costruttive di partenza utilizzando anche gli stessi materiali da costruzione (in una capriata ad esempio si dovrebbe poter mantenere lo stesso tipo di aggancio);

- c) reversibilità: la ricerca della reversibilità si concretizza con l'utilizzo di tecniche che consentano la rimozione senza danni eccessivi per l'opera dell'intervento effettuato, nel caso per varie ragioni esso dovesse dimostrarsi inefficiente o, addirittura, dannoso. Inoltre, qualora si tema per l'insorgere di forme di incompatibilità (meccanica, fisico-chimica) tra elemento inserito e struttura preesistente, o le probabilità del verificarsi di una limitata durabilità del nuovo elemento, maggiore deve essere l'attenzione a consentire la amovibilità futura, ricercando un affiancamento non invasivo e ancoraggi puntuali;
- d) rispetto dell'autenticità: questo è un requisito che viene legato al significato che si attribuisce al termine "autenticità" in funzione delle differenti scuole di pensiero. C'è che riferisce l'autenticità alla configurazione architettonica e chi alla materia costitutiva. In ogni caso prudenzialmente si attua limitando al massimo le sostituzioni di materia e di superficie stratificata;
- e) conservazione della materia: l'identità e la testimonianza del passato che l'opera rappresenta sono in larga parte contenute nella materia originale con cui essa è costituita, pertanto va fatto tutto il possibile per evitarne la perdita o la sostituzione. Inoltre il suo mantenimento, consentirà anche in futuro di osservare i segni del trascorrere del tempo con fenomeni di danno, degrado, ecc. permettendo di ripetere il processo interpretativo–diagnostico che ha preceduto l'intervento. Conservare la materia è quindi anche un modo per perseguire e verificare nel tempo l'efficacia dell'opera di miglioramento;

- f) controllo dell'impatto visivo: vanno limitate al minimo le modifiche visibili conseguenti agli interventi, specie quando queste possano alterare la percezione dell'opera;
- g) riconoscibilità dell'intervento: è necessario che risultino come distinguibili dal manufatto originario tutti gli apporti. Per arrivare a questo si può operare con l'utilizzo di un linguaggio figurativo autonomo rispetto all'esistente, oppure l'utilizzo di materiali differenti o con evidenti discontinuità cromatiche.

La concezione strutturale dell'edificio in muratura

Le costruzioni realizzate con materiali come l'acciaio o il cemento armato, sono concepite come strutture "intelaiate", ossia costituite da elementi portanti verticali (pilastri) e orizzontali (travi) perfettamente connessi tra loro.

Le costruzioni in muratura, specialmente quelle costruite nel passato, mancano di questa continuità strutturale. Ogni paramento murario, infatti, interagisce con quello ortogonale limitatamente alla porzione immediatamente prossima con questo, e spesso il collegamento con le strutture orizzontali (solai e coperture) non è così forte da rendere collaboranti le parti. Le costruzioni storiche inoltre, sono in genere il risultato di continue trasformazioni eseguite nel corso del tempo; questo comporta la presenza di soluzioni di continuità negli elementi portanti, dovute al fatto che la nuova muratura, spesso realizzata con materiali e tecniche differenti, non è connessa come dovrebbe a quella preesistente.

Il risultato di tutto questo è la possibilità che in caso di sisma si verificino collassi parziali in cui è la parte più debole del manufatto a cedere all'azione del terremoto, senza coinvolgere le parti limitrofe. Per questo a differenza di quanto avviene per le costruzioni in acciaio o in cemento armato, per quelle in muratura non ha alcun senso distinguere tra elementi strutturali e quindi portanti e quelli portati, per il semplice motivo che ogni elemento fornisce il suo contributo all'equilibrio di tutta la struttura muraria.

L'edificio in muratura è una struttura complessa, di fatto concepito e realizzato come un assemblaggio tridimensionale di muri e orizzontamenti, in cui tutti gli elementi contribuiscono nel resistere ai carichi applicati e che funziona bene quando venga garantito a esso un comportamento "scatolare" con opportuni provvedimenti. Un criterio abitual-

mente utilizzato per raggiungere questo obiettivo, è quello di considerare l'edificio come una serie di elementi indipendentemente opportunamente assemblati.

È da sottolineare il fatto che la resistenza delle murature soggette a forze agenti nel loro piano è molto maggiore rispetto a quella riferita alle murature soggette a forze agenti ortogonalmente al loro piano: le pareti murarie soggette a forze ortogonali al loro piano rischiano fortemente di perdere di stabilità. In definitiva a seconda della direzione del sisma, sono in grado di opporsi a esso efficacemente solo alcune delle pareti (quelle disposte parallelamente a essa in quanto sollecitate nel piano), mentre altre non offrono resistenza in quanto sollecitate fuori dal loro piano. In una costruzione in muratura è perciò possibile identificare molteplici strutture resistenti a seconda della condizione di carico considerata. È chiaro quindi che la stabilità alle azioni orizzontali richiede pannelli murari disposti secondo almeno due direzioni ortogonali.

La loro capacità di resistere alle azioni orizzontali è poi favorevolmente influenzata dalla presenza di azioni verticali stabilizzanti. Inoltre per garantire il rispetto del comportamento scatolare della costruzione in muratura, è necessario garantire un efficace collegamento tra muri e i solai, che devono essere sufficientemente rigidi e resistenti allo scopo di ripartire le azioni orizzontali tra i vari paramenti resistenti. I collegamenti possono ad esempio essere realizzati con cordoli, i quali svolgono una funzione di vincolo alle pareti sollecitate ortogonalmente al proprio piano ostacolandone, di fatto, i meccanismi fuori dal piano. È da sottolineare che, mentre nelle costruzioni in muratura “recenti”, si ritrovano usualmente cordoli al livello di ogni orizzontamento, nelle costruzioni storiche, come ad esempio i palazzi signorili o la maggior parte degli edifici dei centri storici, questo non avviene. Per questo motivo le pareti murarie di tali manufatti vengono spesso danneggiati dal sisma con meccanismi tipici dovuti alle azioni ortogonali al loro piano: infatti se non vi sono altri presidi che garantiscano la scolarità della struttura il sisma può causare il ribaltamento di questi paramenti.

Inoltre per assicurare un'appropriata robustezza e stabilità d'insieme, i pannelli murari ortogonali tra loro devono essere efficacemente ammorsati lungo le intersezioni verticali, mediante un'opportuna disposizione degli elementi che li costituiscono (Fig. 2.1). Intervenire per porre rimedio quando manca un sufficiente “ammorsamento”, è cosa di pratica comune. L'esperienza diretta del passato ha infatti portato molti

edifici storici a essere dotati di catene (o tiranti), ossia elementi metallici a collegamento di pareti parallele tra loro, i quali riconducono l'edificio ad avere un comportamento scatolare, trasformando la risposta fuori piano di alcune pareti, a una risposta nel piano di quelle a esse ortogonali.



Figura 2.1. Dettaglio di un edificio storico in muratura mista e irregolare: l'angolata presenta pietre di maggiori dimensioni rispetto alla pezzatura media utilizzata nei paramenti e una disposizione più regolare.

È chiaro quindi come, in caso di sisma, gli edifici storici in muratura non manifestano un comportamento strutturale globale. Molto più realistica è una analisi per “macroelementi”, ossia porzioni di muratura che per forma e dimensioni reagiscono autonomamente al terremoto, riconoscibili e catalogabili sulla base delle esperienze del passato. Questo approccio, proposto da vari autori¹, risulta ormai consolidato anche all’interno del quadro normativo che regola gli interventi sulle costruzioni esistenti in muratura in genere² e anche sugli edifici di interesse storico e architettonico³.

La risposta al sisma dell’edificio storico in muratura è quindi quella offerta dai suoi macroelementi (Fig. 2.2): il loro moto durante l’azione sismica definisce i cosiddetti cinematismi di collasso attivabili dei quali è possibile verificare la sicurezza rispetto all’azione sismica attesa e, quindi, progettare e dimensionare opportuni presidi per scongiurarne l’attivazione.



Figura 2.2. Introduzione di presidi provvisori per scongiurare l’evolversi di meccanismi di ribaltamento fuori dal piano di pareti in muratura.

¹ A. Giuffrè, *Letture sulla meccanica delle murature*, edizioni Kappa, Roma 1991; F. Dogliani, A. Moretti, V. Petrini (a cura di), *Le chiese e il terremoto*, LINT Editoriale Associati, Trieste 1994.

² d.m. 17.01.2018, *aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»*, da ora in poi NTC 2018; Circolare del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici n.7 del 21.01.2019, da ora in poi Circolare 2019.

³ Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 09.02.2011, *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni di cui al d.m. del 14.01.2008*, da ora in poi DPCM 09.02.2011.

La conoscenza dell'edificio come presupposto imprescindibile per il progetto

Le norme che attualmente regolano gli interventi su costruzioni esistenti di carattere storico e monumentale¹, fanno fortemente emergere il ruolo fondamentale che assume la conoscenza della costruzione, come presupposto per la corretta interpretazione del comportamento strutturale dell'edificio prima, e successivamente, della valutazione della vulnerabilità e la scelta di efficaci accorgimenti per migliorarne il comportamento e la sicurezza.

Nell'approccio proposto, la conoscenza viene quantificata secondo modelli interpretativi che arrivano a definirne il livello raggiunto (“Livello di Conoscenza”) e secondo il meccanismo dei “Fattori di confidenza” si va a premiare la modellazione che può far conto su una padronanza più accurata dell'edificio e a penalizzare quella che invece dispone solo di informazioni superficiali su di esso.

Questo “Percorso della conoscenza”, come definito al Capitolo 4.1 del DPCM 09.02.2011, si snoda attraverso alcune attività fondamentali come il rilievo geometrico–architettonico, l'analisi storica degli eventi e degli interventi subiti, il rilievo del quadro fessurativo e deformativo e l'analisi materica e tecnologico-costruttiva.

3.1. Il rilievo geometrico-architettonico

Questo rilievo va riferito sia alla geometria complessiva dell'organismo che a quella degli elementi costruttivi, comprendendo i rapporti con le eventuali strutture in aderenza.

¹ NTC 2018, Circolare 2019 e DPCM 09.02.2011.

La tecnologia di rilievo tridimensionale mediante laser scanner, ormai di uso comune nel campo del recupero dell'edificato esistente, permette di acquisire digitalmente posizione e forma di oggetti, descrivendoli attraverso una nuvola di punti, la cui posizione spaziale viene determinata secondo un sistema di coordinate.

Tale metodologia, oltre a ridurre i tempi di acquisizione dei dati e di restituzione grafica, risulta particolarmente versatile e utile in tutti quei casi dove la conformazione dell'edificio (presenza di superfici curve, presenza di piani sfalsati in altezza, ecc.) renderebbe difficoltoso e poco affidabile un rilievo manuale (Fig. 3.1).



Figura 3.1. Nuvola di punti ottenuta da un rilievo eseguito con metodologia laser scanner 3D, sezionata in modo da ottenere la sezione di un edificio caratterizzato da adiacenze e superfetazioni. Risulta così più agevole definire correttamente le interazioni tra i vari corpi di fabbrica a livello degli orizzontamenti e individuare eventuali zone non ispezionabili da sottoporre ad indagini più approfondite.

3.2. L'analisi storica degli eventi e degli interventi subiti

Utilizzando tutte le fonti utili (pubblicazioni, documentazione d'archivio, immagini fotografiche, planimetrie catastali, ecc.) e soprattutto analizzandole anche dal punto di vista ingegneristico, e non solo della pura cronaca storica, va ricostruito il processo di realizzazione dell'edificio in tutte le sue fasi e le successive modificazioni subite nel tempo dal manufatto, nonché gli eventi traumatici che lo hanno interessato.

Questo consentirà di avere maggiore consapevolezza non solo della morfologia e dell'organizzazione del sistema resistente, ma anche delle possibili discontinuità e disomogeneità dello stesso.