

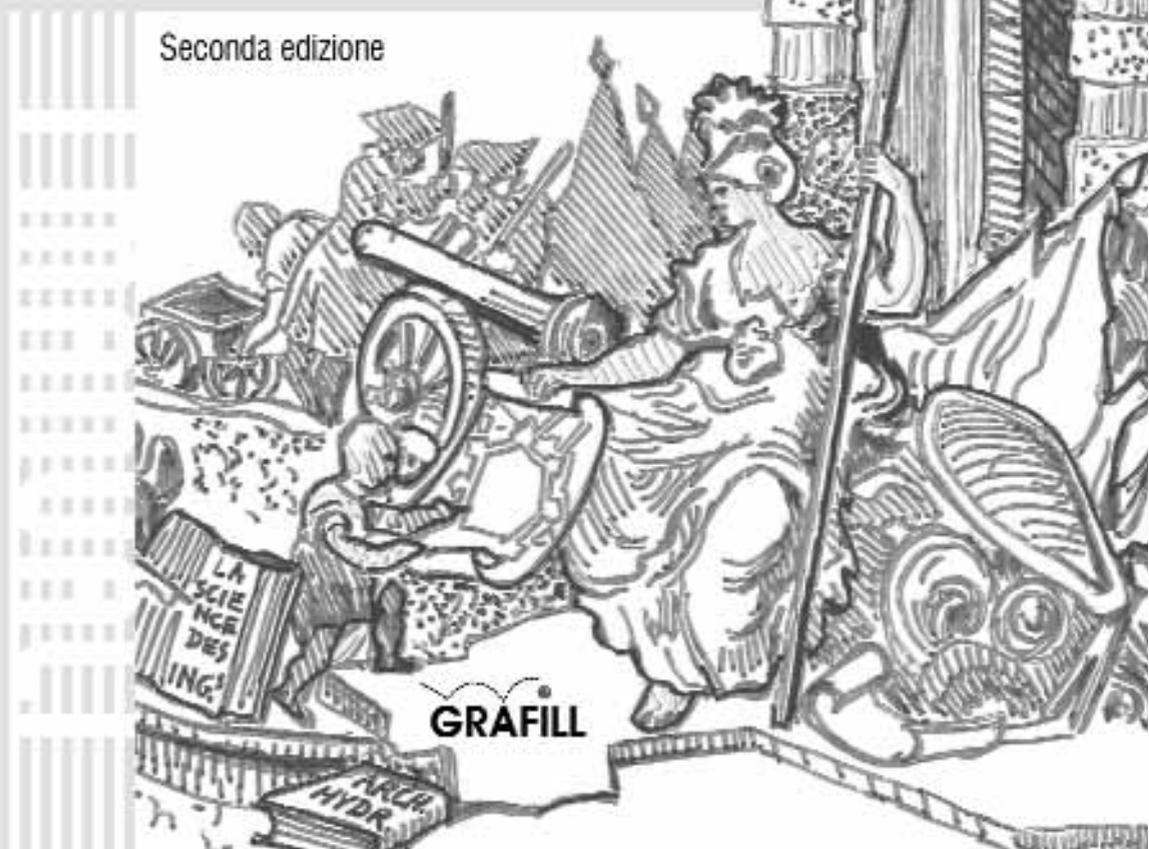
F. Cucco, T. Panzeca, M. Salerno, S. Terravecchia

# Strutture in muratura

## Le catene nel consolidamento

SOFTWARE DI CALCOLO ALLEGATO

Seconda edizione



GRAFILL

F. Cucco, T. Panzeca, M. Salerno, S. Terravecchia  
STRUTTURE IN MURATURA

ISBN 13 978-88-8207-251-3  
EAN 9 788882 072513

Software, 31  
Seconda edizione, giugno 2007

Strutture in muratura : l'impiego delle catene nel consolidamento / Filippo Cucco ... [et al.].  
– 2. ed. – Palermo : Grafill, 2007.  
(Software : 31)  
ISBN 978-88-8207-251-3  
1. Strutture in muratura – Consolidamento. I. Cucco, Filippo <1951 >  
693.1 CDD-21 SBN Pal0208086  
*CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"*

© **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](mailto:grafill@grafill.it)

Finito di stampare nel mese di giugno 2007  
presso Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l. Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

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

Prefazione .....	p.	5
■ CAPITOLO PRIMO		
<b>VULNERABILITÀ DEI PANNELLI MURARI NELLE VECCHIE COSTRUZIONI IN MURATURA</b> .....	"	7
1.1. Semplicità ed economicità dell'intervento .....	"	8
1.2. Reversibilità e compatibilità dei materiali negli interventi di recupero .....	"	9
1.3. Modi di rottura e rimedi .....	"	10
• <i>Catene</i> .....	"	12
• <i>Ricucitura di lesioni: intervento con blocchi di pietrame calcareo</i> .....	"	12
• <i>Ricucitura di lesioni: intervento con travi a doppio T</i> .....	"	13
• <i>Metodi di analisi</i> .....	"	13
■ CAPITOLO SECONDO		
<b>MODI DI ROTTURA</b> .....	"	15
2.1. Modo I: Meccanismo di facciata .....	"	15
2.2. Interventi di prevenzione .....	"	17
2.2.1. <i>Intervento di prevenzione contro l'insorgere del meccanismo di facciata – Modo I</i> .....	"	19
• <i>Ipotesi a): Ribaltamento della sommità della parete di facciata</i> .....	"	19
2.2.2. <i>Intervento di prevenzione contro l'insorgere del meccanismo di facciata: Modo I</i> .....	"	20
• <i>Ipotesi b): Ribaltamento della parete di facciata</i> .....	"	20
• <i>Verifiche dei cavi</i> .....	"	25
• <i>Verifiche del muro</i> .....	"	25
• <i>Sezione D</i> .....	"	26
• <i>Sezione B</i> .....	"	27
• <i>Sezione E</i> .....	"	27
2.3. Modo II: Meccanismo di parete per flessione .....	"	28
2.3.1. <i>Interventi di prevenzione contro l'insorgere del meccanismo di parete per flessione</i> .....	"	29
• <i>Impiego dei cavi</i> .....	"	30
• <i>Impiego di barre in acciaio</i> .....	"	38
2.4. Modo III: Meccanismo di parete per taglio .....	"	39
2.4.1. <i>Interventi di prevenzione contro l'insorgere del meccanismo di parete per taglio</i> .....	"	40

■	CAPITOLO TERZO	
	<b>APPENDICE</b> .....	p. 45
	• <i>Dominio di resistenza di una sezione muraria soggetta a pressoflessione</i> .....	" 45
■	SCHEDA	
	<b>Scheda n. 1</b> Ancoraggi delle catene.....	" 51
	<b>Scheda n. 2</b> Cavi in acciaio .....	" 55
	<b>Scheda n. 3</b> Interventi di risarcitura delle lesioni .....	" 61
	<b>Scheda n. 4</b> Intervento per la ripartizione dello stato di tensione nella muratura .....	" 65
	<b>Scheda n. 5</b> Meccanismi di rottura: modo I .....	" 69
	<b>Scheda n. 6</b> Meccanismi di rottura: modo II.....	" 73
	<b>Scheda n. 7</b> Meccanismi di rottura: modo I-III .....	" 77
	<b>Scheda n. 8</b> Portata dei tiranti con capicordapressati e filettati .....	" 81
■	CAPITOLO QUARTO	
	<b>TABELLE TRATTE DAL DECRETO DEL MINISTERO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI DEL 14 SETTEMBRE 2005</b> .....	" 85
■	CAPITOLO QUINTO	
	<b>GUIDA ALL'INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE</b> .....	" 87
	• <i>Introduzione al CD-ROM allegato</i> .....	" 87
	• <i>Requisiti hardware e software per l'installazione</i> .....	" 87
	• <i>Procedura per la richiesta della password utente</i> .....	" 87
	• <i>Procedura per l'installazione del software</i> .....	" 87
	• <i>Procedura per la registrazione del software</i> .....	" 88
■	CAPITOLO SESTO	
	<b>MANUALE DEL SOFTWARE STRUTTURE IN MURATURA</b> .....	" 91
	• <i>Attivazione del programma</i> .....	" 93
	• <i>Unità di misura</i> .....	" 93
	• <i>Verifica Modo I</i> .....	" 93
	• <i>Dati generali</i> .....	" 97
	• <i>Dati relativi alla muratura</i> .....	" 99
	• <i>Dati relativi ai vari piani</i> .....	" 101
	• <i>Dati relativi ai tiranti</i> .....	" 102
	• <i>Calcolo della struttura</i> .....	" 102
	• <i>Dati in uscita</i> .....	" 105
	• <i>Verifica Modo II e III</i> .....	" 109
	• <i>Immisione dei dati</i> .....	" 111
	• <i>Calcolo delle fasce</i> .....	" 114
	• <i>Descrizione dei dati in uscita</i> .....	" 115
■	<b>Bibliografia e riferimenti legislativi</b> .....	" 117
■	<b>Licenza d'uso</b> .....	" 119
■	<b>Scheda di registrazione per la richiesta della "password utente"</b> .....	" 120

## Prefazione

Questo testo analizza il comportamento delle strutture murarie soggette ad azioni esterne e rappresenta un contributo per la salvaguardia del consistente patrimonio di costruzioni storico-monumentale e non, che caratterizza gran parte delle città italiane.

Quando si intende intervenire su tali costruzioni per modifiche dovute a cambi di destinazione d'uso o per problemi connessi alla straordinaria ed ordinaria manutenzione o riguardanti la staticità, l'aspetto più complesso e più costoso è strettamente connesso agli interventi riguardanti le strutture e ciò al fine di garantire la necessaria sicurezza. Gli interventi sono quelli più invasivi e molto spesso comportano delle modifiche tali da non rendere più riconoscibile la costruzione nella sua originaria autenticità.

Questo contributo si propone di dare semplici soluzioni per migliorare la sicurezza delle costruzioni con l'impiego di tecniche di intervento reversibili, aggiornate nella tecnologia e compatibili con la muratura esistente, dando all'operatore la possibilità di introdurre soluzioni ormai desuete, sempre efficaci, ma con un supporto avente validità scientifica.

Ringrazio i professori F. Asta, A. Cangelosi e G. Cardamone, titolari dei Laboratori di Restauro nel Corso di Laurea in Architettura dell'Università di Palermo, che hanno consentito attraverso la mia partecipazione ai moduli di affinare le mie conoscenze in tale ambito culturale e di integrare i loro suggerimenti con la mia esperienza e con l'esperienza degli altri co-autori al fine di proporre interventi strutturali volti alla salvaguardia del patrimonio storico-monumentale e delle antiche tecniche costruttive.

*Prof. Teotista Panzeca*



Capitolo primo

## Vulnerabilità dei pannelli murari nelle vecchie costruzioni in muratura

Ci si riferisce sia alle costruzioni storiche e monumentali sia all'ingente patrimonio di vecchi edifici costruiti con tecnologie tradizionali.

Per queste costruzioni il Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici 20 novembre 1987 stabilisce le condizioni secondo cui vi è necessità di **adeguamento** della costruzione alla Legge sismica, suggerendo tutti quegli accorgimenti strutturali che rispettano le regole contenute nel decreto, ma anche – in alternativa – pone le condizioni di un possibile **miglioramento** strutturale della costruzione, dando alcune indicazioni sui possibili interventi da eseguire. Questa distinzione tra adeguamento e miglioramento è mantenuta nel Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici 9 gennaio 1996, come anche nella più recente Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 3 maggio 2005, n. 3431, anche se in quest'ultima sono contenute indicazioni riguardanti interventi di declassamento, consolidamento e riparazione.

Nell'ambito degli interventi di miglioramento, al fine di salvare la costruzione da interventi che modificherebbero in modo del tutto irreversibile la sua entità originaria, il progettista deve perseguire è quello di operare proponendo soluzioni valide che non danneggiano la costruzione nella sua staticità e storicità. Ciò comporta in primo luogo il necessario mantenimento della originaria distribuzione dei paramenti murari, ma anche la scelta di soluzioni che non modificano la tipologia costruttiva.

Il miglioramento citato in Normativa prefigura tipi di interventi che siano tali da rendere la costruzione più sicura nei confronti delle azioni esterne.

Nell'ambito di un intervento di miglioramento, l'obiettivo principale del progettista è quindi quello di migliorare il grado di sicurezza della costruzione rispetto a tutte le azioni esterne ed in particolare di ridurre la sua vulnerabilità alle azioni sismiche, ritenute tra le principali cause distruttive del patrimonio costruito esistente. Infatti si accetti come assioma che il concetto di vulnerabilità è legato non solo alle caratteristiche costitutive della muratura (malta, pietra) ed alla tessitura della maglia di pietrame nella formazione del paramento murario, ma anche e principalmente al comportamento scatolare del sistema murario formato da pannelli mutuamente connessi. Pertanto la capacità di resistenza complessiva della costruzione alle azioni sismiche dipende in larga misura da una corretta distribuzione planimetrica dei setti murari e dalla efficacia della loro connessione.

È da rilevare che, ai fini della resistenza globale di una costruzione soggetta a sisma, una elevata vulnerabilità della costruzione può essere dovuta anche alla presenza di un solo pannello murario non sufficientemente connesso al resto della struttura. Pertanto una ridotta connessione (ridotta continuità per cattiva esecuzione nella tessitura della muratura o per presenza di lesioni) tra pannelli in corrispondenza degli incroci e dei cantonali non garantisce la necessaria continuità strutturale e non garantisce quindi il comportamento scatolare del sistema murario. Tale condizione assume un carattere di grave pericolosità, e quindi di vulnerabilità, se vi è anche la presenza di discontinuità concentrate (lesioni) o diffuse all'interno dei pannelli.

La presenza di tali discontinuità nella muratura sono da imputare a:

- azioni esterne, in particolare le forze sismiche anche di modesta intensità che si sono esercitate nel tempo sulla costruzione e/o l'attivarsi di cedimenti delle fondazioni, causati da variazione differenziata della cedibilità del sedime di fondazione;
- perdita di capacità aggregante della malta: infatti lo spessore della malta di allettamento in genere è maggiore nel pannello murario, minore nel cantonale (o agli incroci), conseguentemente, per la perdita di consistenza della malta, la deformazione verticale che subisce il pannello murario risulta maggiore rispetto alla deformazione che si verifica nel cantonale (o negli incroci);
- ridotta capacità di contrasto dei cantonali per l'assenza di strutture di confinamento, cioè per l'assenza di costruzioni contigue alla costruzione oggetto di studio; infatti le tensioni orizzontali di trazione che nascono per l'effetto Poisson in presenza di carico verticale (peso proprio) non sono contrastate dalla presenza di strutture di confinamento e nel tempo queste tensioni creano microfessure distribuite in prossimità del cantonale;
- presenza di aperture poste in prossimità dei cantonali e degli incroci che causano una drastica riduzione nella connessione tra i pannelli murari ed i cantonali (o gli incroci);
- cause antropiche dovute alle continue modifiche della geometria (chiusura o apertura di vani, ...) anche in funzione di eventuali cambi di destinazione d'uso.

Un carente comportamento scatolare accresce drasticamente la vulnerabilità della costruzione: infatti, prendendo in esame la causa più vistosa rappresentata dalle azioni sismiche, i pannelli murari che risultano disposti in posizione ortogonale all'ingresso del sisma (quindi in posizione di minima resistenza) e che nel contempo non sono ben connessi ai pannelli contigui, possono subire crolli coinvolgendo nel crollo gli eventuali orizzontamenti ad essi connessi e causando quindi danni in cascata nelle altre parti meno resistenti della costruzione.

L'esperienza corrente (suffragata dalle risultanze dei recenti eventi sismici) suggerisce che i pannelli murari che non garantiscono la necessaria tenuta scatolare sono i pannelli murari dei piani più alti (in genere l'ultimo piano e via via i piani sottostanti), non confinati cioè liberi da altre costruzioni confinanti. Questi pannelli, soggetti alle forze d'inerzia agenti ortogonalmente, secondo la direzione di minima resistenza, possono trasformarsi in elementi che, modificando l'assetto geometrico originario, determinano quindi meccanismi di collasso. Ed è a questi pannelli che occorre dedicare la maggiore attenzione studiando il fenomeno meccanico all'atto incipiente di collasso, cioè in quella condizione in cui vi è equilibrio limite tra le azioni meccaniche stabilizzanti e quelle instabilizzanti.

A salvaguardia della staticità dei pannelli che si trovano in tali condizioni di precarietà, devono essere suggeriti interventi che abbiano lo scopo di migliorare la stabilità di ciascun pannello, rendendolo meno vulnerabile, e ciò al fine di garantire una maggiore stabilità globale dell'intera costruzione. Tale obiettivo deve essere raggiunto operando con interventi semplici, poco costosi, non distruttivi, reversibili oltre che compatibili.

### 1.1. Semplicità ed economicità dell'intervento

Prevedere soluzioni che siano di *facile attuazione* è una considerazione ovvia. Le maestranze locali, nell'attuare ciò che il progettista prevede nella proposta di intervento strutturale, devono accettare le soluzioni ed operare con convincimento al fine di migliorare le condizioni statiche della costruzione. Peraltro prevedere tipi di interventi che comportino impegni di *somme modeste* de-

ve essere sempre una condizione essenziale. Ciò permetterebbe, nel bilancio delle economie disponibili, di raggiungere una maggiore resa (riduzione del rapporto costi-benefici) e nel contempo con le risorse disponibili di operare più interventi sul patrimonio esistente.

È noto che non sempre una tipologia di intervento costosa risulta migliore rispetto ad altre tipologie più economiche. Vi sono moltissimi esempi di interventi costosi o eccessivamente costosi dove il manufatto ha subito tali e tante modifiche da non potere più essere riconoscibile nella sua identità storica e da non acquisire le auspiccate necessarie condizioni di sicurezza, spesso peggiorandole.

Peraltro, opere invasive, oltre ad essere irreversibili, comportano un eccessivo aumento dei costi perché spesso la loro realizzazione non può prescindere dalla esecuzione di altre opere ad esse connesse. Ad esempio se si vuole realizzare un cordolo come elemento di connessione dei muri di perimetro, ciò comporta la necessaria realizzazione di un nuovo solaio o di un nuovo tetto, impiegando molto spesso tecnologie di intervento alternative alle esistenti: quasi sempre l'eventuale solaio in legno viene sostituito da un solaio latero-cementizio o, bene che vada, da un solaio con putrelle e forati in laterizio. La sostituzione del solaio in legno con altri tipologicamente diversi non è una scelta ma è una condizione che nasce dalla interpretazione delle Norme da parte degli Organi di controllo quando si procede per adeguamento.

## 1.2. Reversibilità e compatibilità dei materiali negli interventi di recupero

La *reversibilità* comporta la esecuzione di un intervento di consolidamento che può essere migliorato, dismesso o sostituito senza modificare l'originario assetto strutturale e le tipologie costruttive esistenti. La *compatibilità* invece riguarda l'impiego di materiali che devono avere caratteristiche fisico-chimiche tali da non alterare la consistenza dei materiali impiegati nella costruzione esistente ma anche riguarda la tipologia dell'intervento che non deve modificare le caratteristiche tecnologiche-costruttive della costruzione.

Considerato che l'obiettivo da perseguire è quello di non consentire l'attivarsi di meccanismi di rottura in presenza di azioni sismiche utilizzando una tecnologia più avanzata rispetto a quella tradizionale, si vogliono proporre soluzioni che, nel rispetto del manufatto da salvaguardare sia dal punto di vista strutturale sia dal punto di vista storico, mantengano integra la costruzione, migliorandone la sicurezza. Per raggiungere tale scopo è di fondamentale importanza la salvaguardia del comportamento scatolare della costruzione. Infatti la ridotta connessione agli incroci dei muri ha comportato danneggiamenti nelle vecchie costruzioni specialmente come effetto di eventi sismici. Pertanto analizzando gli effetti disastrosi del sisma, si è potuto notare che:

- i pannelli murari crollati hanno subito collassi quasi sempre secondo meccanismi di rottura in direzione ortogonale al pannello stesso;
- le parti delle costruzioni che risultano maggiormente danneggiate riguardano i pannelli prossimi alla copertura.

L'insorgere dei meccanismi di collasso di alcuni pannelli rappresenta l'inizio del crollo dell'intera costruzione o di una sua parte.

Nelle proposte di recupero delle strutture murarie, o di prevenzione rispetto alle possibili azioni sismiche, si vogliono impiegare tecniche di intervento reversibili, la cui esecuzione non causi cambiamenti che danneggiano la costruzione dal punto di vista tipologico e la rendano non più riconoscibile dal punto di vista storico ed architettonico. Nelle ultime decadi sono stati realizzati tipi di interventi che spesso hanno avuto come unico obiettivo l'aspetto statico e l'interesse pratico, e che non hanno posto il benché minimo rispetto all'organismo architettonico ed alla sua storia.

Purtroppo tali scelte ci hanno privato e ci continuano a privare di un considerevole patrimonio d'arte che invece tutti vogliamo e dobbiamo salvaguardare.

Le proposte di intervento di miglioramento da impiegare devono garantire certamente l'aspetto statico, migliorandone la sicurezza, e nel contempo devono consentire una integrazione strutturale, senza modificare la tipologia costruttiva esistente. Inoltre deve essere consentita una successiva eventuale rimozione dei materiali impiegati senza che tale rimozione comprometta l'integrità della costruzione. L'impiego di mezzi tecnologicamente più avanzati non deve modificare le caratteristiche strutturali della costruzione stessa, poiché tali tipi di interventi spesso comportano la smaterializzazione del costruito.

Bisogna sollecitare i tecnici che operano nel settore a non effettuare tipologie di intervento innovative considerate *la soluzione del problema*, in quanto per le vecchie costruzioni non esiste la soluzione. Non bisogna dimenticare che molti esempi di cattivo utilizzo di tecniche innovative hanno prodotto situazioni negative, rilevate successivamente come interventi dannosi ed irreversibili. Ciò perché tali interventi sono sorti da una sbagliata metodologia progettuale originata dalla convinzione che qualsiasi costruzione può essere conservata con il semplicistico artificio di abilitare intere strutture edilizie o parti di esse da portanti a portate, inserendo nelle strutture originarie o affiancando ad esse altre nuove strutture di sostegno in c.a. o in acciaio. L'impiego di queste nuove tipologie strutturali non consentono la desiderata integrazione strutturale, ma certamente modificano la tipologia costruttiva in modo irreversibile. Questo fenomeno si è verificato in quanto si ha una ottima conoscenza della struttura a telaio, ma non si è sufficientemente edotti nell'operare con strutture in muratura.

Gli interventi sul costruito murario esistente devono richiedere di affrontare il problema del consolidamento strutturale con l'impiego di tecnologie tradizionali (del passato) con un approccio artigianale che non escluda l'uso di adeguate tecniche avanzate e l'uso di materiali innovativi.

L'introduzione sul mercato di nuovi prodotti, di cui sempre vengono mostrati i potenziali aspetti positivi, deve essere vista nell'intenzione di definire interventi per i quali le costruzioni traggano il massimo vantaggio; non bisogna pertanto adoperare questi prodotti con disinvoltura introducendoli nelle costruzioni spesso con atteggiamento di sperimentazione. Purtroppo l'impiego di parecchi di questi materiali che vengono proposti è recente, e di essi spesso non si conosce con certezza l'efficacia nonché la compatibilità con i materiali esistenti nella costruzione né la loro durabilità.

### 1.3. Modi di rottura e rimedi

Gli interventi proposti riguardano i pannelli murari ed in particolare sia i pannelli confinati che quelli non confinati. Per tali pannelli vengono proposti interventi di prevenzione, nell'ambito del miglioramento strutturale, con lo scopo di rendere meno vulnerabile la costruzione soggetta ad azioni esterne, quali sono le forze sismiche. L'intervento va effettuato se si è in presenza di un quadro fessurativo che desta qualche preoccupazione anche se questo può essere stato causato dall'invecchiamento dei materiali o da altre cause antropiche. In ogni caso però l'intervento può essere proposto laddove non si riscontrano segni di dissesti, avendo quindi carattere di prevenzione. La caratteristica deve essere quella di migliorare globalmente la staticità della costruzione nei confronti di tutti i fattori esterni.

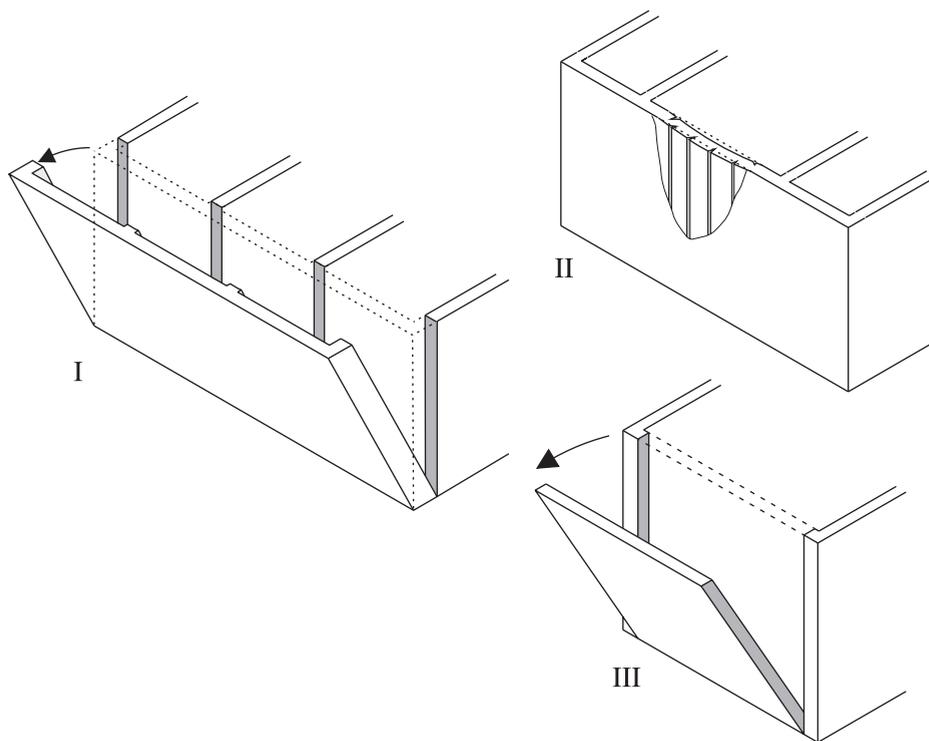
Per potere impiegare opere che comportano un miglioramento strutturale è necessario che siano rispettate le condizioni essenziali che la Normativa prevede: ad intervento effettuato la costruzione muraria deve possedere un grado di sicurezza più elevato.

Come è stato detto, l'obiettivo è quello di rendere più monolitica la costruzione migliorandone l'effetto scatolare, con particolare riguardo ai pannelli murari che si trovano nelle ultime elevazioni e lungo i prospetti.

A tal fine in forma esemplificativa sono stati previsti tre modi di rottura dei pannelli e per ciascuno di essi sono state proposte soluzioni atte ad eliminare il relativo modo di rottura.

Essi sono:

- *Modo I: Meccanismo di facciata:* consiste nell'attivazione di un moto rigido che coinvolge uno o più pannelli murari di facciata dell'ultimo o degli ultimi piani della costruzione;
- *Modo II: Meccanismo di parete per flessione:* in presenza di una parete estesa, è possibile un cambio di configurazione assimilabile ad una catenaria seguito da un crollo della zona centrale della parete a forma di V;
- *Modo III: Meccanismo di parete per taglio:* è assimilabile al Modo I, ma il moto rigido della parete non coinvolge nel crollo i cantonali o le connessioni tra muri di spina e muri di facciata.



**Fig. 1 – Modi di rottura: I, II, III**

Durante un evento sismico i modi di rottura descritti possono manifestarsi contemporaneamente in modi di rottura composti.

Altre forme di danneggiamento si manifestano in presenza di sisma tra aperture vicine e in genere nei maschi murari secondo la classica forma di Croce di S. Andrea (forma di X). Tali effetti non sono da annoverare tra i meccanismi di rottura ma rappresentano una riduzione di rigidità del pannello e quindi un indebolimento della intera costruzione.

Gli interventi di miglioramento che saranno proposti rappresentano un adeguato contributo alla tenuta globale della costruzione e quindi garantiscono per essa un grado di sicurezza più elevato. Tali interventi consistono principalmente nel predisporre opportune catene poste lungo i muri e nella esecuzione di ricuciture delle lesioni.

### *Catene*

La catena rappresenta un elemento strutturale di grande rilevanza nella tecnologia delle costruzioni storiche; infatti è uno dei pochi elementi di innovazione dell'ultimo millennio ed è stato introdotto nelle costruzioni in muratura, spesso fin dal loro nascere, al fine di consentire la realizzazione di opere ardite. La sua presenza rende solidali i collegamenti tra le pareti e quindi più monolitica la costruzione, garantendo un più efficace comportamento della stessa alle azioni esterne, sia sismiche che di altra natura. Per molte di tali costruzioni la presenza delle catene, spesso non visibili, ha consentito una vita più duratura.

Nella scheda n. 1 sono riportate alcune foto che mostrano le tipologie di ancoraggio delle catene ai muri di facciata.

La catena è stata eseguita nelle costruzioni più antiche con barra di sezione rettangolare sagomata alle estremità e più recentemente con barra tonda liscia (filettata alle estremità) eventualmente suddivisa in più tronchi per ragioni di facile posa in opera. In epoca più recente è stata impiegata la fune di acciaio (cavo) con capotesta e tondo filettato di estremità. Quest'ultima può essere inserita a diverse quote nei paramenti murari, in funzione del quadro fessurativo. Solitamente si interviene in sommità dei muri, parte più vulnerabile della costruzione, dove sono massimi gli spostamenti, ed in corrispondenza degli orizzontamenti e/o degli architravi delle aperture.

Nella scheda n. 2 è riportato lo schema di rappresentazione, la modalità e la sequenza della posa in opera proposta per i cavi.

### *Ricucitura di lesioni: intervento con blocchi di pietra calcarea*

Nel caso di muratura fratturata e/o decoesa ed in special modo quando la frattura interessa l'intero spessore della muratura (lesione passante), al fine di consentire la connessione tra le parti vengono suggerite tecniche di ricucitura (risarcitura) delle lesioni, alternative e migliorative del sistema tradizionale a scuci e cucì. Tali risarciture consistono nell'inserimento di connettori in pietra calcarea di opportune dimensioni, collocati su piani sfalsati in corrispondenza della lesione, lungo le due facce del muro, secondo le indicazioni contenute nella scheda n. 3. Questo intervento deve essere seguito da un riempimento della lesione con malta di calce (sigillatura), secondo la sequenza di intervento suggerita nella stessa scheda.

È opportuno precisare che nell'impiego della tecnica di ripristino a scuci e cucì, tradizionalmente impiegate con l'uso dei mattoni pressati, si riscontrano due inconvenienti:

- a) durante la fase di intervento, nel caso in cui è interessato l'intero spessore del muro, le linee di forza di compressione, che originariamente corrono pressoché parallelamente alla lesione, seguono dei percorsi diversi allontanandosi dalla originaria lesione al crescere della apertura della breccia. Come conseguenza, immediatamente dopo l'intervento i mattoni posti nella zona ricostruita non risultano soggetti a nessuna azione interna, tranne che al peso proprio; lo stato di sforzo che agisce nella parte di muratura non interessata dall'intervento permane in essa. L'eventuale trasferimento delle azioni interne nella zona di intervento dipende dal cambio di configurazione della muratura e quindi dalla modifica delle proprie caratteristiche fisico-geometriche: ciò si verifica in genere lentamente nel tempo.

b) se la causa che aveva provocato la lesione risulta ancora attiva, di norma la lesione si riproduce in corrispondenza dell'attacco tra il vecchio muro e la parte di muro ricostruito; in tal caso il fenomeno va seguito nel tempo con tecniche appropriate di controllo, e la tecnica di intervento deve essere cambiata.

#### *Ricucitura di lesioni: intervento con travi a doppio T*

Spesso ci si trova in presenza di pareti murarie fortemente dissestate con presenza di fratture e sconnessioni diffuse sui due lati. In genere questo danno è conseguenza di una azione sismica su pareti costituite da pietrame informe posto alla rinfusa, o è la conseguenza della presenza di vuoti tra le pietre e del contemporaneo invecchiamento della malta che ha già perso gran parte delle sue caratteristiche di legante. Ciò può verificarsi su tutti i pannelli murari, ma in presenza di sisma ciò si verifica principalmente nei pannelli ai piani bassi della costruzione laddove sono massime le azioni di compressione. Infatti le azioni orizzontali dovute a forze di inerzia, ripetute con alternanza secondo versi opposti e combinate con le azioni verticali, determinano nelle pareti concentrazione di sforzi provocando fratture diffuse causate dalle elevate tensioni principali di trazione.

L'intervento più idoneo è rappresentato dall'inserimento di travi a doppio T, disposte in posizione orizzontale, incassate sulle due facce della parete e realizzate secondo le operazioni sequenziali indicate nella scheda n. 4. L'inserimento di tali elementi strutturali ha parecchi vantaggi, tra cui si segnala la creazione della continuità fisica tra le varie zone difformi della parete muraria e la capacità di ripartire sul piano di appoggio della trave uno stato di tensione variabile con continuità. Tale intervento evoca la costante presenza delle travi di legno che molto spesso venivano introdotte nella muratura all'atto della sua costruzione con le stesse funzioni che oggi verrebbero assunte dalle travi a doppio T.

#### *Metodi di analisi*

Il miglioramento ottenuto con la introduzione delle catene contro l'insorgere dei meccanismi di rottura e con la restituzione della necessaria continuità alla muratura attraverso la risarcitura con blocchi di pietrame calcareo e/o l'eventuale inserimento di profilati, può essere osservato attraverso una simulazione con programmi di calcolo che consentono la individuazione del cambiamento dello stato di tensione tra il pannello danneggiato e lo stesso pannello modificato dagli interventi di miglioramento descritti. Allo scopo possono essere utilizzati programmi di calcolo agli Elementi Finiti o agli Elementi di Contorno. Sia gli uni che gli altri consentono la lettura di una mappatura delle tensioni nel pannello e la individuazione all'interno di esso dei valori massimi nei vari stadi di progetto, cioè nelle varie proposte di miglioramento. Con il Metodo degli Elementi Finiti si deve necessariamente intervenire con una forte discretizzazione del continuo murario in piccoli elementi chiamati elementi finiti, invece con il Metodo degli Elementi di Contorno il continuo murario rimane integro e si interviene con una discretizzazione del solo contorno. Con questo ultimo Metodo i pannelli murari possono essere suddivisi in macro-elementi dove inserire eventuali soluzioni di continuità della muratura. Lo stesso può essere effettuato con il Metodo degli Elementi Finiti, ma ciò richiede difficoltà notevoli nella discretizzazione della muratura in prossimità della lesione.

Una volta garantita la necessaria continuità tra i pannelli con gli interventi proposti, si passa alla verifica dell'intera struttura muraria con gli usuali metodi di analisi, ad esempio il metodo POR, impiegando, per la determinazione delle rigidezze dei pannelli murari, criteri approssimati quali la relazione di Turnsek-Cacovic o approcci agli Elementi di Contorno o agli Elementi Finiti.

Le considerazioni fin qui svolte hanno evidenziato che una delle principali cause dei crolli nelle costruzioni è la mancata o ridotta connessione dei pannelli murari di facciata ai muri di spina (che danno luogo ai Modi di collasso I e III) o l'eccessiva dimensione del pannello di facciata (che da luogo al Modo di collasso II). Se si pone rimedio alle cause indicate con le catene e le opere di risarcitura, allora il crollo della costruzione può avvenire soltanto se si superano i limiti di resistenza dei pannelli murari soggetti ad azioni complanari. Da ciò si deduce che il classico metodo di analisi del POR è subordinato allo studio sulla vulnerabilità dei singoli pannelli secondo quanto definito nei tre Modi di Rottura.