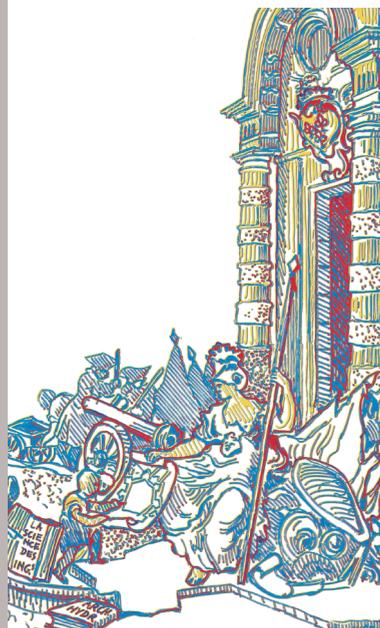


F. Cucco, T. Panzeca, M. Salerno, S. Terravecchia

Strutture in muratura

LE CATENE NEL CONSOLIDAMENTO

SOFTWARE DI CALCOLO INCLUSO



QUARTA EDIZIONE

Aggiornata al Decreto Ministeriale 14 gennaio 2008
Norme Tecniche per le Costruzioni

The logo for GRAFILL, featuring the word "GRAFILL" in a bold, sans-serif font. Above the letters "A" and "I" are stylized, dashed lines that suggest a structural or architectural theme.

INDICE

PREFAZIONE	p.	5
1. VULNERABILITÀ DEI PANNELLI MURARI		
NELLE VECCHIE COSTRUZIONI IN MURATURA	"	7
1.1. Semplicità ed economicità dell'intervento.....	"	11
1.2. Reversibilità e compatibilità dei materiali negli interventi di recupero.....	"	12
1.3. Modi di rottura e rimedi.....	"	13
<i>Catene</i>	"	15
<i>Cucitura di lesioni: intervento con blocchi di pietrame calcareo</i>	"	16
<i>Cucitura di lesioni: intervento con travi a doppio T</i>	"	16
<i>Metodi di analisi</i>	"	17
<i>Osservazioni riassuntive</i>	"	18
2. MODI DI ROTTURA CAUSATI DA FORZE AGENTI FUORI DAL PIANO	"	19
2.1. Modo I: Meccanismo di facciata.....	"	19
2.2. Interventi di prevenzione.....	"	21
2.2.1. Valutazione della sicurezza delle pareti murarie.....	"	23
<i>Parametri che caratterizzano la muratura</i>	"	27
2.2.2. Intervento di prevenzione contro l'insorgere del Meccanismo di facciata – Modo I.....	"	29
<i>Ipotesi a): Ribaltamento della sommità della parete di facciata</i>	"	29
<i>Ipotesi b): Ribaltamento dell'intera parete di facciata</i>	"	30
2.3. Modo II: Meccanismo di parete per flessione.....	"	43
2.3.1. Interventi di prevenzione contro l'insorgere del Meccanismo di parete per flessione.....	"	44
<i>Impiego dei cavi</i>	"	45
<i>Impiego dei cavi – Ipotesi di fascia muraria perfettamente incastrata</i>	"	47
<i>Verifica a presso-flessione sezione di mezzera della muratura</i>	"	48
<i>Impiego dei cavi – Comportamento a catenaria</i>	"	49
<i>Determinazione dello sforzo nei cavi</i>	"	51
<i>Verifica cavi catenaria</i>	"	54
<i>Verifica della sezione mediana come muratura armata</i>	"	56
<i>Progetto della sezione dei cavi</i>	"	57
<i>Considerazioni sull'eventuale impiego di barre di acciaio in sostituzione dei cavi</i>	"	58
2.4. Modo III: Meccanismo di parete per taglio.....	"	59

	<i>Interventi di prevenzione contro l'insorgere del Meccanismo di parete per taglio</i>	p.	60
3. APPENDICE		"	64
A.	Dominio di resistenza di una sezione muraria soggetta a pressoflessione	"	64
	<i>Adimensionalizzazione</i>	"	65
SCHEDA			
Scheda n. 1	Ancoraggi delle catene	"	67
Scheda n. 2	Cavi in acciaio	"	71
Scheda n. 3	Interventi di sarcitura delle lesioni	"	81
Scheda n. 4	Intervento per una migliore ripartizione dello stato di tensione nella muratura	"	89
Scheda n. 5	Meccanismi di rottura: modo I	"	93
Scheda n. 6	Meccanismi di rottura: modo II	"	97
Scheda n. 7	Meccanismi di rottura: modo I-III	"	101
Scheda n. 8	Portata dei tiranti con capicorda pressati e filettati	"	105
Scheda n. 9	Solai con travi di legno	"	109
4. TABELLE DI NORMATIVA		"	119
5. IL SOFTWARE "STRUTTURE IN MURATURA"		"	121
5.1.	Introduzione al software incluso	"	121
5.2.	Requisiti minimi hardware e software	"	121
5.3.	Download del software e richiesta della password di attivazione	"	121
5.4.	Procedura per l'installazione e l'attivazione del software	"	121
6. MANUALE DEL SOFTWARE "STRUTTURE IN MURATURA"		"	123
6.1.	Attivazione del programma	"	123
6.2.	Unità di misura	"	125
6.3.	Inserimento Dati sismici	"	126
6.4.	Verifica Modo I	"	128
6.5.	Dati generali	"	133
6.6.	Dati relativi alla muratura	"	134
6.7.	Dati relativi ai vari piani	"	138
6.8.	Dati relativi ai tiranti	"	139
6.9.	Calcolo della struttura	"	140
6.10.	Dati in uscita	"	141
6.11.	Verifica Modo II e III	"	146
6.12.	Immissione dei dati	"	148
6.13.	Calcolo delle fasce	"	151
6.14.	Descrizione dei dati in uscita	"	153
BIBLIOGRAFIA		"	157
	<i>Riferimenti legislativi</i>	"	158

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 con modifiche dovute a cambi di destinazione d'uso o per problemi connessi alla straordinaria ed ordinaria manutenzione, compresi quelli 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.

Le tipologie degli interventi previsti ricalcano, in chiave moderna, soluzioni impiegate in molte costruzioni storiche.

Gli obiettivi sono:

- la riduzione del livello di vulnerabilità dei singoli pannelli murari e quindi dell'intera costruzione, con una grande resa in termini di sicurezza strutturale;
- l'innovazione nella modalità di esecuzione e possibilità di controllo dello stato di sofferenza della muratura, con annessa possibilità di modifiche e di miglioramenti;
- la reversibilità e durabilità dell'intervento;
- l'impiego di risorse economiche limitate e semplicità nella esecuzione dell'intervento, con una consistente riduzione del rapporto costi-benefici;
- il mantenimento dei carichi statici, senza l'aggravio di carichi aggiuntivi.

L'occasione di questo studio è nata a seguito dei frequenti incontri che gli autori hanno avuto con i titolari dei Laboratori di Restauro, professori Giovanni Cardamone e Renata Prescia, della Facoltà di Architettura dell'Università di Palermo.

Prof. Teotista Panzeca

Capitolo 1

Vulnerabilità dei pannelli murari nelle vecchie costruzioni in muratura

Ci si riferisce alle costruzioni esistenti, 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 stabiliva le condizioni secondo cui vi era necessità di **adeguamento** della costruzione alla Legge sismica, suggerendo tutti quegli accorgimenti strutturali nel rispetto delle regole contenute nel decreto, ma anche – in alternativa – ponendo le condizioni di **miglioramento** strutturale della costruzione, seguendo le 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 di declassamento, consolidamento e riparazione.

Nella più recente normativa antisismica introdotta con il Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 14 gennaio 2008, entrato in vigore il primo luglio 2010, viene mostrata al punto 8.4 una distinzione più marcata degli interventi distinguendoli in interventi di **adeguamento**, di **miglioramento**, di **riparazione** (o intervento locale). In particolare:

- gli interventi di adeguamento (8.4.1) sono individuati attraverso una precisa casistica, comprendente i casi di sopraelevazione, di ampliamento con opere strutturalmente connesse alla costruzione, di variazione di classe e/o di destinazione d'uso con incrementi di carichi globali in fondazione superiori al 10%, di interventi che trasformano la costruzione con un insieme sistematico di opere che portano ad un organismo diverso dal precedente. Resta comunque l'obbligo di procedere ad un progetto riferito all'intera costruzione, contenente le verifiche sia locali delle singole parti e/o elementi della struttura, sia dell'intera struttura post-intervento, come se si trattasse di nuova costruzione (7.8);
- gli interventi di miglioramento (8.4.2) sono finalizzati ad accrescere la capacità di resistenza delle strutture esistenti alle azioni considerate. È possibile eseguire tale tipo di intervento nei casi in cui non ricorrano le condizioni specificate al paragrafo 8.4.1 per gli interventi di adeguamento. In tal caso il progetto e la valutazione della sicurezza dovranno essere estesi a tutte le parti della struttura potenzialmente interessate da modifiche di comportamento, nonché alla struttura nel suo insieme, mostrando che l'intervento rende la costruzione più sicura rispetto alla condizione esistente;
- gli interventi di riparazione (8.4.3) riguarderanno singole parti e/o elementi della struttura e interesseranno porzioni limitate della costruzione. Il progetto e la valutazione della sicurezza potranno essere riferiti alle sole parti e/o elementi interessati e documentare che, rispetto alla configurazione precedente al danno, al degrado o alla variante, non siano prodotte sostanziali modifiche al comportamento delle altre parti e della struttura nel suo insieme e che gli interventi comportino un miglioramento delle condizioni di sicurezza preesistenti.

La norma attribuisce quindi ai tipi di interventi una scala di importanza recitando inoltre che “*gli interventi di adeguamento e miglioramento devono essere sottoposti a collaudo statico*” e che per

ambidue i tipi di intervento il progetto per la valutazione della sicurezza dovrà essere riferito all'intera costruzione; diversamente, per gli interventi di riparazione, le verifiche potranno essere limitate alle sole parti interessate.

Ulteriori e più dettagliati chiarimenti per quanto riguarda i tipi di interventi vengono introdotti al punto C8.4 della Circolare 617 del 2 febbraio 2009 (Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008).

Il punto C8.4.2 riguardante gli interventi di **miglioramento** così recita: *“In generale ricadono in questa categoria tutti gli interventi che, non rientrando nella categoria dell'adeguamento, fanno variare significativamente la rigidezza, la resistenza e/o la duttilità dei singoli elementi o parti strutturali e/o introducono nuovi elementi strutturali, così che il comportamento strutturale locale o globale, particolarmente rispetto alle azioni sismiche, ne sia significativamente modificato. Ovviamente la variazione dovrà avvenire in senso migliorativo, ad esempio impegnando maggiormente gli elementi più resistenti, riducendo le irregolarità in pianta e in elevazione, trasformando i meccanismi di collasso da fragili a duttili”*.

Mentre il punto C8.4.3 riguardante gli interventi di **riparazione** si differenzia dal precedente. Infatti: *“Rientrano in questa tipologia tutti gli interventi di riparazione, rafforzamento o sostituzione di singoli elementi strutturali (travi, architravi, porzioni di solaio, pilastri, pannelli murari) o parti di essi, non adeguati alla funzione strutturale che debbono svolgere, a condizione che l'intervento non cambi significativamente il comportamento globale della struttura, soprattutto ai fini della resistenza alle azioni sismiche, a causa di una variazione non trascurabile di rigidezza o di peso. Può rientrare in questa categoria anche la sostituzione di coperture e solai, solo a condizione che ciò non comporti una variazione significativa di rigidezza nel proprio piano, importante ai fini della redistribuzione di forze orizzontali, né un aumento dei carichi verticali statici. 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/tiranti) ricadono in questa categoria, in quanto comunque migliorano anche il comportamento globale della struttura, particolarmente rispetto alle azioni sismiche. Infine, interventi di variazione della configurazione di un elemento strutturale, attraverso la sua sostituzione o un rafforzamento localizzato (ad esempio l'apertura di un vano in una parete muraria, accompagnata da opportuni rinforzi) possono rientrare in questa categoria solo a condizione che si dimostri che la rigidezza dell'elemento variato non cambi significativamente e che la resistenza e la capacità di deformazione, anche in campo plastico, non peggiorino ai fini del comportamento rispetto alle azioni orizzontali”*.

La distinzione tra intervento di miglioramento e riparazione passa attraverso un confine abbastanza sottile rappresentato dall'influenza che l'intervento o la somma degli interventi possano avere nei confronti della rigidezza del pannello o dei pannelli murari interessati e quindi influenzare il comportamento globale della struttura.

Per le nuove costruzioni murarie, e quindi anche per le costruzioni esistenti per le quali si prevede un intervento di adeguamento, la Normativa (D.M. 14 gennaio 2008) prevede al punto 4.5.4 che *“L'organizzazione dell'intera struttura e l'interazione ed il collegamento tra le sue parti devono essere tali da assicurare appropriata resistenza e stabilità, ed un comportamento d'insieme scatolare. Per garantire un comportamento scatolare, muri ed orizzontamenti devono essere opportunamente collegati fra loro. Tutte le pareti devono essere collegate al livello dei solai mediante cordoli di piano di calcestruzzo armato e, tra di loro, mediante ammorsamenti lungo le intersezioni verticali. I cordoli di piano devono avere adeguata sezione ed armatura. Devono inoltre essere previsti opportuni incatenamenti al livello dei solai, aventi lo scopo di collegare tra loro i muri*

paralleli della scatola muraria. Tali incatenamenti devono essere realizzati per mezzo di armature metalliche o altro materiale resistente a trazione, le cui estremità devono essere efficacemente ancorate ai cordoli ... Per il collegamento in direzione normale alla tessitura del solaio, si possono adottare opportuni accorgimenti che sostituiscano efficacemente gli incatenamenti costituiti da tiranti estranei al solaio”.

È importante ed opportuno sottolineare come la norma preveda per le nuove costruzioni opportuni incatenamenti al livello dei solai aventi lo scopo di collegare tra loro i muri paralleli della scatola muraria e da realizzarsi per mezzo di armature metalliche o altro materiale resistente a trazione, mentre per le vecchie costruzioni, fra gli interventi di riparazione è previsto il 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/tiranti).

Per le vecchie costruzioni murarie la Normativa (D.M. 14 gennaio 2008) prevede al punto 8.7.1 la possibilità del manifestarsi di meccanismi locali e di meccanismi d'insieme (o globali). Ovviamente *“la sicurezza della costruzione deve essere valutata nei confronti di entrambi i tipi di meccanismo”*. Pertanto: *“per l'analisi sismica dei meccanismi locali si può far ricorso ai metodi dell'analisi limite dell'equilibrio delle strutture murarie, tenendo conto, anche se in forma approssimata, della resistenza a compressione, della tessitura muraria, della qualità della connessione tra le pareti murarie, della presenza di catene e tiranti. Con tali metodi è possibile valutare la capacità sismica in termini di resistenza (applicando un opportuno fattore di struttura) o di spostamento (determinando l'andamento dell'azione orizzontale che la struttura è progressivamente in grado di sopportare all'evolversi del meccanismo). L'analisi sismica globale deve considerare, per quanto possibile, il sistema strutturale reale della costruzione, con particolare attenzione alla rigidezza e resistenza dei solai e all'efficacia dei collegamenti degli elementi strutturali”*.

Quindi è prevista la presenza di catene e tiranti nell'analisi dei meccanismi locali.

Pertanto, nella precedente normativa (O.P.C.M. 3431, All. 11E) era previsto per le costruzioni esistenti l'inserimento dei tiranti nelle due direzioni principali del fabbricato.

La Circolare 617 del 2 febbraio 2009 nell'allegato al punto C8A.5 fornisce i criteri generali di guida agli interventi di consolidamento degli edifici in muratura, e al punto C8A.5.1 contempla gli interventi volti a ridurre le carenze dei collegamenti e *“miranti ad assicurare alla costruzione un buon comportamento d'assieme ...”*. Fra questi interventi è previsto: *“L'inserimento di tiranti, metallici o di altri materiali, disposti nelle due direzioni principali del fabbricato, a livello dei solai ed in corrispondenza delle pareti portanti, ancorati alle murature mediante capochiave (a paletto o a piastra), può favorire il comportamento d'assieme del fabbricato, in quanto conferisce un elevato grado di connessione tra le murature ortogonali e fornisce un efficace vincolo contro il ribaltamento fuori piano dei pannelli murari. Inoltre, l'inserimento di tiranti migliora il comportamento nel piano di pareti forate, in quanto consente la formazione del meccanismo tirante-puntone nelle fasce murarie sopra porta e sotto finestra. Per i capochiave sono consigliati paletti semplici, in quanto vanno ad interessare una porzione di muratura maggiore rispetto alle piastre; queste sono preferibili nel caso di murature particolarmente scadenti, realizzate con elementi di piccole dimensioni (è in genere necessario un consolidamento locale della muratura, nella zona di ancoraggio). È sconsigliabile incassare il capochiave nello spessore della parete, specie nel caso di muratura a più paramenti scollegati”*.

Da quanto si evince dalla lettura delle Normative che sono state introdotte, così come anche dal recente D.M. 14 gennaio 2008, appare ovvio che l'obiettivo è quello di migliorare le condizioni di sicurezza della costruzione. Gli interventi, nella interpretazione della legge, devono chiarire su quali

modalità e tipologie ci si deve orientare per garantire una adeguata sicurezza, che ovviamente deve essere più elevata rispetto a quella esistente prima dell'intervento.

Al punto 8.6 l'attuale Normativa parla dei materiali da utilizzare nel caso di interventi in strutture esistenti, specificando: *“Nel caso di edifici in muratura è possibile effettuare riparazioni locali o integrazioni con materiale analogo a quello impiegato originariamente nella costruzione, purché durevole e di idonee caratteristiche meccaniche”*, e nello specifico al punto C8A.5.6 della Circolare 617 si suggeriscono interventi volti ad incrementare la resistenza dei maschi murari attraverso connessioni a cucì e scuci ed attraverso l'inserimento di diatoni.

Ovviamente, nell'ambito degli interventi citati di adeguamento, di miglioramento e/o di riparazione, al fine di salvare la costruzione da interventi che modificherebbero in modo del tutto irreversibile la sua entità originaria, il tentativo che il progettista deve perseguire è quello di operare, proponendo soluzioni valide che non danneggino 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 tecnologiche che non modifichino la tipologia costruttiva.

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. Infatti, 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 mutua connessione.

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

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 verificate nel tempo agendo sulla costruzione e/o la presenza di cedimenti in fondazione, causati da variazione differenziata della cedibilità del terreno di sedime;
- perdita di capacità aggregante della malta: infatti lo spessore della malta di allettamento in genere è maggiore nel pannello murario, minore nel cantonale. Conseguentemente, a causa della perdita di consistenza della malta per invecchiamento, la deformazione verticale che subisce il pannello murario risulta maggiore rispetto alla deformazione verticale che si manifesta nel cantonale; come conseguenza questo diverso comportamento pannello murario-cantonale crea nelle zone di interfaccia una concentrazione di tensioni tangenziali che possono localmente superare i valori limiti di resistenza;
- 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) nella zona terminale del muro, 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 in corrispondenza degli 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 del pannello) e che nel contempo non sono ben connessi ai pannelli contigui possono subire crolli, coinvolgendo gli eventuali orizzontamenti e causando quindi danni in cascata nelle altre parti meno resistenti della costruzione.

L'esperienza corrente (suffragata dalle osservazioni sugli effetti prodotti dai 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). Questi pannelli, soggetti alle forze d'inerzia agenti ortogonalmente possono trasformarsi in elementi che, modificando l'assetto geometrico originario, determinano meccanismi di collasso. Ed è a questi pannelli che occorre dedicare la maggiore attenzione studiando il fenomeno fisico-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'eseguire ciò che il progettista prevede nella proposta di intervento strutturale, devono intervenire con tecniche costruttive semplici, al fine di migliorare le condizioni statiche della costruzione. Peraltro prevedere tipi di interventi che comportino impegni di *somme modeste* deve 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, nel contempo, 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, la realizzazione di un cordolo come elemento di connessione dei muri di peri-

metro comporta in molti casi 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 pannelle 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 specialmente 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 simili a quelli esistenti, ma in ogni caso tali da non alterare la consistenza dei materiali presenti nella costruzione. Peraltro la tipologia dell'intervento 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, attraverso un esame dei danni riscontrati nelle costruzioni a causa delle azioni del sisma, la poco efficace connessione agli incroci dei muri ha comportato danneggiamenti in special modo nelle vecchie costruzioni.

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.

È da notare che l'insorgere del 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 determini cambiamenti che possano danneggiare la costruzione dal punto di vista tipologico e non la rendano più riconoscibile dal punto di vista della sua valenza storica ed architettonica. È opportuno segnalare che, malgrado i controlli degli Enti per la salvaguardia del patrimonio 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 interventi, anche se attuati spesso con uno spirito di salvaguardia del bene, ci hanno privato e ci continuano a privare di un considerevole patrimonio d'arte che invece tutti vogliamo e dobbiamo salvaguardare.

Spesso gli interventi creano delle condizioni di apparente stabilità e le conseguenze, spesso disastrose, sono gli effetti di scelte non appropriate. Basti pensare alla crescita dei carichi a causa della sostituzione dei solai (anche quelli di copertura) con solai latero-cementizi, di parte dei muri portanti con elementi di calcestruzzo armato o di ricoprimenti a sandwich con malta di cemento e rete a maglia di pannelli murari decoesi.

Le proposte di intervento di adeguamento, miglioramento e/o riparazione 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 e/o sostituzione dei materiali impiegati senza che tale intervento comprometta l'integrità della costruzione. L'impiego di mezzi tecnologicamente più avanzati, o indicati come tali, non deve modificare le caratteristiche strutturali della costruzione stessa, poiché questi 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 e continua a verificarsi. La ragione dell'utilizzo di tale tecnica costruttiva deriva dall'ottima conoscenza del comportamento della struttura a telaio, ma non si è sufficientemente edotti nell'operare su 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 in qualche caso l'uso di adeguate tecniche e/o tecnologie avanzate, assistite dall'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 né l'efficacia né la loro durabilità. La compatibilità con i materiali esistenti nella costruzione difficilmente viene raggiunta.

▲ 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 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 la cui origine è da imputare all'invecchiamento dei materiali o a cause antropiche. In ogni caso però l'intervento può essere proposto anche in assenza di dissesti, quindi con carattere di prevenzione.

L'obiettivo deve essere quello di migliorare globalmente la staticità della costruzione nei confronti di tutti i fattori esterni. Per potere impiegare opere che comportino un adeguamento, miglioramento e/o riparazione strutturale è necessario che siano rispettate le condizioni essenziali che la Normativa prevede, che hanno come conseguenza che, 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 il perimetro.

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 trasversali e muri di facciata.

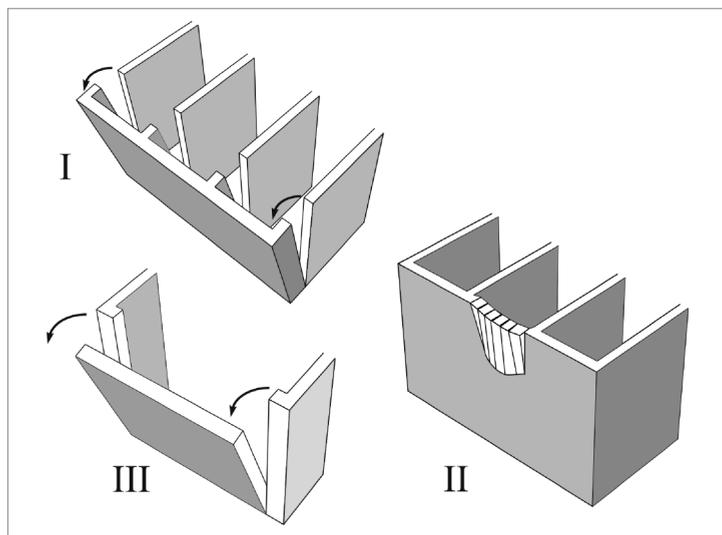


Fig. 1. Modi di rottura: I, II, III

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

Si fa osservare che in questo volume vengono principalmente presi in considerazione ed approfonditi quei meccanismi che comportano una fuoriuscita dal piano delle pareti murarie, meccanismi cui la Normativa dedica soltanto alcuni cenni ai paragrafi 7.8.1.5.2, 7.8.1.5.3, 7.8.1.6 e 7.8.2.2.3. Tali meccanismi sono anche quelli da annoverare come cause principali di crolli e devastazioni come, purtroppo, tante immagini ci hanno drammaticamente messo in evidenza.

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 stati inseriti tra i meccanismi di rottura, ma essi comportano una riduzione di rigidità del pannello e conseguentemente un indebolimento dell'intera costruzione.

Lo scopo di questo volume è quello di proporre interventi che consistono principalmente nel predisporre opportune catene nelle pareti murarie, ma anche nella esecuzione di ricuciture delle lesioni con modalità inconsuete al fine di ottenere un adeguato contributo alla tenuta globale della costruzione e quindi di garantire per essa un grado di sicurezza più elevato.

L'impiego di catene dà la possibilità al progettista di volta in volta di procedere ad interventi di adeguamento, miglioramento e/o di riparazione secondo la scelta progettuale stabilita. Ovviamente questa soluzione, cioè la introduzione di catene, non esaurisce le possibili verifiche secondo Normativa, ma certamente è integrativa e rappresenta una tipologia di intervento che certamente migliora le condizioni di sicurezza delle costruzioni murarie.

L'inserimento delle catene (cavi e/o barre), come elementi di connessione tra pannelli murari, risulta essenziale e ciò sarà spiegato in questo capitolo ed in maniera più approfondita nei successivi. Il loro impiego nasce per far fronte ai possibili meccanismi di rottura dei pannelli murari di perimetro, ipotizzati sulla base di semplici osservazioni che traducono il modo secondo cui si manifesta la perdita della staticità muraria.

La causa principale dei crolli delle costruzioni murarie si manifesta allorché sui pannelli murari di perimetro agiscono forze agenti fuori dal piano, determinando i tre meccanismi illustrati. Tali meccanismi sono legati al tipo di collasso possibile nei cui confronti è necessario intervenire anche a fine di prevenzione.

Quando si opera nell'ambito dell'adeguamento e del miglioramento, si vuole rendere più sicura l'intera costruzione attraverso un intervento che prefigura il miglioramento sistematico di tutte le parti della struttura, in particolare di tutti i pannelli murari e delle mutue connessioni. Nel caso di riparazione l'intervento può occuparsi solamente di uno o più pannelli murari.

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, a secondo delle necessità. 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.

Inoltre è possibile inserire nei pannelli catene diagonali o anche catene orizzontali e verticali per migliorare la rigidità del pannello, limitando così lo spostamento relativi tra i piani.

Nei piani alti la presenza dei cavi o delle barre limita il degrado della muratura perché garantisce il mantenimento dello schema scatolare.

Cucitura di lesioni: intervento con blocchi di pietrame calcareo

Nel caso di muratura fratturata, 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 cucitura (sarcitura) delle lesioni, alternative e migliorative del sistema tradizionale a scuci e cucì.

Tali sarciture consistono nell'inserimento di connettori in pietrame calcareo 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 si è allontanato dalla originaria lesione, agendo nella parte di muratura non interessata dall'intervento, permane nella stessa zona. L'eventuale trasferimento delle azioni interne, dalla muratura originaria non interessata dall'intervento di scuci e cucì alla breccia dove sono stati inseriti i mattoni, dipende dal cambio di configurazione della muratura e quindi dalla modifica delle proprie caratteristiche fisico-geometriche: questo è un fenomeno reologico che si verifica 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 con mattoni; in tal caso il fenomeno va seguito nel tempo con tecniche appropriate di controllo.

Cucitura di lesioni: intervento con travi a doppio T

Spesso ci si trova in presenza di pareti murarie fortemente dissestate con presenza di fratture e sconessioni 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 sia nei pannelli ai piani bassi della costruzione laddove sono massime le azioni di compressione e di trazione sia ai piani alti dove invece si manifestano i massimi spostamenti. Infatti nei piani bassi le azioni orizzontali dovute a forze di inerzia, ripetute con alternanza secondo versi opposti e combinate con le azioni verticali, determinano nelle pareti concentrazioni di tensioni provocando fratture diffuse per le elevate tensioni principali di trazione, nei piani alti gli spostamenti causati dal sisma raggiungono valori elevati e, a causa degli spostamenti relativi tra le pietre contigue, la muratura si degrada perdendo così la necessaria continuità fisico-meccanica.

Nei piani bassi l'intervento più idoneo, in alternativa ai cavi o alle barre, è rappresentato dall'inserimento di travi a doppio **T** a coppie, disposte sulle due facce in posizione orizzontale, incasate sulle pareti 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 una distribuzione di tensioni variabili con continuità. Tale intervento evoca la 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**. La eventuale ossidazione deve essere fronteggiata con la zincatura o la pitturazione delle travi con una o più mani di antiruggine prima della loro collocazione. Si consiglia che tale intervento venga effettuato nei muri interni ed, in ogni caso, nelle pareti dove non vi sia presenza di umidità.

Fenomeni di *rigetto* a lungo termine per incompatibilità fisica sono possibili in quanto il coefficiente di dilatazione termica della muratura è diverso di quello dell'acciaio. Tale rigetto si manifesta con la presenza di lesioni orizzontali parallele alla trave. Al fine di evitare la presenza di tali lesioni è preferibile inserire travi di legno al posto delle travi di ferro a doppio **T**, ripristinando l'antico sistema che era impiegato all'atto della realizzazione della costruzione.

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 sarcitura 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 attraverso gli interventi 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 delle tensioni nei vari stadi di progetto, cioè nelle varie proposte di adeguamento, miglioramento e/o riparazione. 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.

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 impiegando, per la determinazione delle rigidità dei pannelli murari, criteri approssimati basati sulla espressione analitica di **Turnsek-Cacovic** o approcci più idonei attraverso l'impiego dei **Metodi agli Elementi di Contorno** o agli **Elementi Finiti**.

Il Metodo Simmetrico degli Elementi di Contorno, di recente impiego da parte della comunità scientifica internazionale, può conferire all'analisi per sistemi murari una risposta difficilmente raggiungibile con altri metodi di analisi. Alcuni ricercatori del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali dell'Università di Palermo e della Facoltà di Architettura e di Ingegneria della Università Kore di Enna hanno creato un programma di calcolo, denominato **Karnak.sGbem**. Release 2.0, che dà una forte risposta ed una concretezza alle necessità dettate dalla attuale Normativa.

Osservazioni riassuntive

Si rappresenta un breve riepilogo dei principali interventi che servono a migliorare l'efficienza strutturale e quindi la sicurezza di una costruzione muraria in presenza della principale causa dei crolli, che è il sisma.

Infatti, le forze d'inerzia, che nascono per effetto del sisma, determinano un consistente stato di sforzo localizzato nei piani bassi della costruzione con la nascita di fratture e distacchi e, contemporaneamente, un campo elevato di spostamenti tra le sommità dei pannelli dell'ultima elevazione. In genere, sia lo stato di sforzo nei piani bassi, sia il campo di spostamenti in sommità dei pannelli dell'ultima elevazione non hanno andamento regolare, ma sono fortemente variabili da punto a punto a causa della eterogeneità della muratura. Ciò causa una aleatorietà nell'interpretare correttamente la risposta strutturale, qualunque sia lo strumento di analisi adottato.

Le soluzioni atte a migliorare la sicurezza della costruzione nei confronti del sisma si possono raggruppare in due grandi obiettivi:

- 1) Il miglioramento delle condizioni di resistenza della muratura ai piani bassi deve avvenire attraverso un consistente e sistematico potenziamento della muratura attraverso la riconnessione dei giunti tra il pietrame, l'ammorsaggio tra pannelli murari, la eliminazione dei vuoti, la cucitura delle lesioni con blocchi di pietrame calcareo a forma di coda di rondine, l'inserimento di travi di acciaio a doppio T o di legno.
- 2) La eliminazione del pericolo di crollo per il verificarsi di un campo di spostamenti fortemente differenziato in sommità dei pannelli dell'ultima elevazione deve avvenire attraverso un collegamento con catene e attraverso la cucitura delle lesioni con blocchi di pietrame calcareo a forma di coda di rondine, al fine di trasformare la costruzione in un sistema scatolare efficace. Tali interventi sono ottenuti a bassissimo costo e senza aumento dei carichi.

L'oggetto principale degli argomenti trattati nei capitoli successivi è rappresentato dall'analisi delle costruzioni murarie soggette a forze agenti fuori dal piano e ciò in quanto si ritiene che queste azioni sono la causa principale dei crolli. Si intende sopperire alle forti carenze della Normativa emessa con Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 14 gennaio 2008, dove queste azioni vengono solo marginalmente discusse.

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 trasversali (che danno luogo ai Modi di collasso I e III) o l'eccessiva dimensione del pannello di facciata (che dà luogo al Modo di collasso II). Se si pone rimedio alle cause indicate con le catene e le opere di sarcitura, allora il crollo della costruzione può avvenire soltanto se si superano i limiti di resistenza dei pannelli murari soggetti ad azioni complanari, e questa circostanza non è oggetto di valutazione nel presente contesto.