

# RECUPERO STATICO E ADEGUAMENTO SISMICO DEI BENI CULTURALI: ANNOTAZIONI

P. Foraboschi

*Università IUAV di Venezia; Terese; Dorsoduro, 2206; 30123 – Venezia. E-mail: paofor@iuav.it*

## SOMMARIO

La storica contrapposizione tra sicurezza strutturale e conservazione architettonica può essere ricomposta dotando la struttura della capacità di tollerare le azioni esterne più severe, con interventi che conservino il funzionamento strutturale originario e che mantengano le tecniche costruttive storiche. La nota presenta qualche riflessione al riguardo.

## ABSTRACT

The historical antagonisms between structural safety and architectonic conservation may be mended providing the structure with the capacity of tolerating the more severe external actions with rehabilitation works that conserve the original structural behavior and maintain the historical constructive techniques. This paper analyzes the topic.

## 1. ANNOTAZIONI SULLA DOMANDA E SULLA CAPACITÀ STATICA E SISMICA

### 1.1 Domanda statica

Come noto, la domanda statica delle costruzioni in muratura riguarda soltanto lo stato limite ultimo ed è sintetizzata dalla richiesta di portare il carico estremo (frattile 5 ‰). Altro, le murature non richiedono. In particolare, le murature non pongono alcuna domanda di esercizio. Nelle strutture murarie, infatti, la freccia è sempre inferiore al suo limite d'esercizio, poiché lavorano a sforzo normale di compressione contenuto nello spessore; inoltre, le tensioni di compressione e l'ampiezza di fessurazione non pregiudicano la risposta di servizio, poiché non c'è un lato acciaio da proteggere. Pertanto, le grandezze che descrivono il comportamento di esercizio di una struttura muraria o rispettano sempre il loro limite oppure non hanno limiti.

### 1.2 Capacità statica

La capacità statica, dovendo corrispondere — e quindi essere omogenea — alla domanda statica, è misurata dallo stato limite ultimo. Per contro, attributi capacitivi d'esercizio non sussistono. Lo stato limite ultimo di una muratura è univocamente definito dal meccanismo cinematico di collasso, espresso dalla forma, e dal carico associato, detto *carico di meccanismo*.

Pertanto, una costruzione muraria è staticamente idonea se e solo se il carico di meccanismo sorpassa il carico estremo. L'affermazione riguarda qualsiasi muratura (paramenti, colonne, volte), inteso in condizioni naturali; mentre non vale per la muratura rinforzata da apporti esterni resistenti a trazione, nel qual caso il carico ultimo può non essere di meccanismo.

I meccanismi si dividono in *articolati* (blocchi connessi da cerniere: figure 1 e 2) e *traslazionali* (scorrimento relativo di compagini murarie: figura 3). Nelle murature, la cerniera è un perno (figura 4); come tale, localizza il contatto tra i blocchi. In una sezione incernierata, quindi il profilo tensionale è assimilabile allo stress-block. La posizione della cerniera è dunque il baricentro dello stress-block. Più la tensione di schiacciamento della muratura è grande e più lo sforzo normale è piccolo, meno la cerniera è interna allo spessore sezionale, e viceversa. I normali profili di stress-block hanno un'estensione trascurabile rispetto allo spessore murario. Si può pertanto assumere che la cerniera stia sul bordo sezionale. Possono fare eccezione le murature meno resistenti, assoggettate a elevato sforzo normale (figura 5). I meccanismi traslazionali dipendono direttamente dall'attrito interno della muratura; dipendono anche dalla resistenza a taglio in assenza di sforzo normale (coe-

sione), ma moderatamente. Considerato che l'attrito interno delle murature è generalizzabile e stante la predetta ipotesi di cerniere sui bordi, il carico di meccanismo può essere calcolato a-priori dalle proprietà meccaniche della muratura.

La labilità di un meccanismo è attivata da alcune forze ed è contrastata da altre. Una forza è sollecitante ovvero resistente a seconda del suo punto d'applicazione sul meccanismo cinematico. I carichi incarnano dunque due ruoli antitetici nelle murature: costituiscono sia gli enti sollecitanti sia gli enti resistenti. In generale, il carico di progetto si compone di una stesa sollecitante e di una stesa resistente. Più le stese di carico resistenti sono di livello elevato, più la struttura è sicura. Di conseguenza, la portanza riguarda soltanto le stese di carico sollecitanti. Il massimo livello raggiungibile da una stesa di carico sollecitante è quello esattamente controbilanciato dalla stesa di carico resistente. Assegnati i carichi resistenti, dunque, il massimo livello del carico sollecitante è di conseguenza. Quel livello definisce la portanza ultima. Un carico sollecitante maggiore è staticamente inammissibile: l'aliquota di carico sollecitante non controbilanciata dal carico resistente converte la propria energia potenziale in energia cinetica, innescando il moto. Un carico sollecitante minore di quello ultimo, che come tale non arriva a controbilanciare il carico resistente, è invece tollerabile, poiché non perturba la quiete della struttura: un meccanismo non può invertire il suo verso, poiché le cerniere sono unilaterali (possono aprirsi, ma non chiudersi).

La portanza deve quindi riferirsi a carichi resistenti dati, considerando il minimo livello ragionevolmente prevedibile (5 % di probabilità di essere minorato). Chiaramente, rimuovere le masse resistenti di una costruzione muraria sarebbe come eliminare le armature in un elemento in C.A. o le ali in una putrella d'acciaio. In una volta semicircolare sottile, per esempio, rimuovere il rinfiacco comporta il suo crollo; lo stesso accade in una cupola ogivale sottile rimuovendo la lanterna.

L'equilibrio s'instaura sempre sulla deformata. A rigore, quindi, le equazioni cardinali della statica debbono essere imposte sulla deformata. La scrittura dell'equilibrio rigoroso è però ostica, poiché la posizione deformata dei carichi non è nota a-priori (a-priori è nota la posizione indeformata). In alcune situazioni, però, la deformata influenza trascurabilmente l'equilibrio; qui, le equazioni cardinali possono riferirsi all'indeformata. Nelle altre situazioni, invece, le equazioni cardinali debbono riferirsi alle forze sulla deformata. Come noto, le grandezze che discriminano le due situazioni sono la snellezza e l'entità dello sforzo normale: l'equilibrio deve essere impostato sulla deformata quando la loro combinazione attinge livelli elevati.

La snellezza effettiva di un componente murario è maggiore della snellezza percepita, in quanto le sezioni trasversali tendono a parzializzarsi e la parzializzazione riduce la rigidità. Pertanto, le colonne e i paramenti murari possono essere snelli a dispetto dell'apparenza. Nelle colonne e nei paramenti, quindi, le forze normali tendono ad amplificare le imperfezioni di carico e di geometria, come pure gli effetti delle azioni laterali (orizzontali), favorendo il meccanismo di ribaltamento.

In generale, le volte, eccetto quelle sottili ribassate, e le strutture verticali assoggettate a prevalente flessione e taglio permettono di impostare l'equilibrio sull'indeformata: i blocchi costituenti il meccanismo possono essere assunti infinitamente rigidi. Le colonne e i paramenti assoggettati a prevalente sforzo normale e le predette volte sottili ribassate richiedono invece che l'equilibrio sia impostato sulla deformata: le caratteristiche di deformabilità della struttura devono essere considerate.

### 1.3 Domanda e capacità sismica

Per tutte le costruzioni, come noto, l'azione sismica è espressa dal picco di accelerazione al suolo fondale (PGA) e la domanda sismica consiste in due richieste di PGA per lo stato limite ultimo e due richieste di PGA per lo stato limite d'esercizio.

Per tutte le costruzioni, la capacità sismica consiste nell'attitudine a convertire l'energia cinetica in calore; si parla di dissipazione (energia cinetica consumata dalla costruzione). Come noto, la dissipazione può essere indotta o dagli spostamenti elastici, nel qual caso è detta viscosa (smorzamento), e dagli spostamenti anelastici, nel qual caso è detta isteretica.

La dissipazione viscosa non comporta alcun danno alla struttura, laddove può provocare danni agli elementi portati; la dissipazione isteretica provoca per definizione danni alla struttura (quasi sempre comporta anche danni agli elementi portati).

In esercizio, una costruzione muraria è sismicamente idonea se ciascuna delle due domande di PGA comporta un massimo spostamento relativo rispettoso di un dato limite. In esercizio, tacitamente, le PGA vengono tollerate avvalendosi soltanto della dissipazione viscosa, senza ricorrere della dissipazione isteretica (ovvero ricorrendovi, ma in misura modica).

Allo stato limite ultimo, una costruzione muraria è sismicamente idonea se, avvalendosi della dissipazione sia viscosa sia isteretica, può tollerare le due domande di PGA; precisamente, la maggiore delle due domande di PGA può avvalersi

dell'intera capacità dissipativa isteretica, mentre la minore deve avvalersi di una data frazione della capacità isteretica.

Per le costruzioni in C.A. e in acciaio, la stima della dissipazione isteretica è sufficientemente affidabile e aderente; per le costruzioni in muratura, invece, la stima risente di qualche lacuna cognitiva. Al riguardo si può osservare quanto segue.

La dissipazione isteretica del C.A. e dell'acciaio deriva dalla fase plastica, per la quasi totalità. Al contrario, le murature non sono dotate di una considerevole fase plastica. Questa lacuna sembra additare le murature a strutture poco dissipative. La realtà è invece diversa. La risposta inelastica di una muratura esibisce fessurazioni, frizioni, ingranamenti, sgranamenti, abrasioni, dislocazioni. Tali comportamenti consumano una considerevole quantità di energia: pur non essendo ascrivibili a plasticità (in più, nemmeno sono ciclicamente reversibili), garantiscono una consistente capacità dissipativa isteretica.

Il meccanismo di una costruzione muraria si attiva ed evolve senza implicare degradi cospicui. Più nel dettaglio, il degrado è modesto se in campo elastico i maschi murari si deformano a mensola; se si deformano a doppio incastro, la fessurazione determina una decurtazione di portanza sino al 50 %, ma poi il degrado evolve lentamente e quindi la portanza rimane pressoché costante per un'ampia escursione. Al contrario, il meccanismo di una costruzione in C.A. o in acciaio implica un apprezzabile livello di degrado già per innescarsi; per evolvere, poi, implica un repentino abbattimento di portanza.

Il collasso è la desinenza di un meccanismo. Un meccanismo presuppone la labilità. La labilità implica l'isolamento sismico dell'edificio dal suolo. Il terreno cessa dunque di trasferire energia elastica all'edificio, durante lo stato di meccanismo.

Nelle murature, la dissipazione isteretica deriva dal danneggiamento della costruzione, e non della sola struttura: struttura e tamponamenti coincidono. Le murature devono quindi tollerare le PGA di livello intermedio (oltre che basso) avvalendosi di meno dissipazione isteretica del C.A. e dell'acciaio, dove invece l'ossatura portante è distinta dai tamponamenti portati.

Tali osservazioni mostrano che la capacità dissipativa isteretica della muratura ha sì natura diversa ed è sì più incerta, rispetto a C.A. e acciaio, e che forse è pure minore; ma probabilmente è maggiore di quanto riconosciuto dalle normative.

## 2. DALLA CAPACITÀ ALLA MISURA DELLA SICUREZZA E AL PROGETTO DI ADEGUAMENTO

### 2.1 Azioni statiche

Poiché la capacità statica della muratura dipende solo dai carichi ma non dal materiale, la portanza dei pesi propri e dei carichi permanenti dipende solo dalla geometria della costruzione, e la portanza dei sovraccarichi accidentali dipende dalla geometria della costruzione e dal rapporto tra i sovraccarichi accidentali stessi con gli altri carichi. Siccome il predetto rapporto è moderato (in passato era piccolo), si può affermare che la capacità statica delle murature deriva solo dalla geometria.

L'origine esclusivamente geometrica della capacità statica caratterizza la muratura, diversificandola dal C.A. e dall'acciaio la cui capacità è invece caratterizzata anche dalle proprietà meccaniche dei materiali. Si approfondisce la questione.

Siccome la capacità statica dipende solo dalla geometria, due strutture murarie geometricamente simili hanno la medesima sicurezza statica. Vale a dire, le strutture di muratura possono essere governate per proporzione geometrica. Ogni tipologia muraria è contrassegnata da una geometria limite. Se i rapporti geometrici rispettano i limiti, la struttura garantisce la staticità; se non li rispettano, collassa. A seconda di quali limiti la struttura disattende, il collasso può avvenire in servizio, per i sovraccarichi, in fase costruttiva, per i carichi permanenti, o anche all'atto del disarmo dalle centine, per il peso proprio.

Le volte permettono di esemplificare il concetto bene. Per ciascuna tipologia voltata, il rapporto tra la luce e lo spessore non può superare un dato limite. Nell'arco semicircolare, per esempio, il rapporto vale 19.5 circa relativamente al peso proprio. Quando il rapporto supera 19.5, l'arco non può essere disarmato dalle centine: senza le centine, l'arco crolla per meccanismo a imposte fisse, a cinque cerniere, di cui quella in chiave all'estradosso (figura 1). Gli archi e le volte a botte semicircolari aventi un rapporto superiore a 19.5 furono disarmati dopo aver gettato il rinfiango, che aumenta drasticamente il limite di tale rapporto. Anche la minima profondità del rinfiango necessaria per il disarmo segue una legge geometrica.

Lo spessore della calotta è un multiplo dei lati del mattone. Conviene allora ragionare a parità di spessore. La portanza di una volta è tanto maggiore, quanto minore dell'unità è il rapporto tra la sua luce diviso la massima luce che il suo spessore permetterebbe. La luce massima consentita dallo spessore può essere aumentata con il rinfiango, come sopra accennato, oppure mediante frenelli; o anche con nervature secondo le direttrici (così da aumentare lo spessore efficace, minimizzando

l'impiego di materiale); nel caso di archi ribassati e di cupole ogivali, con carichi permanenti in chiave (per le cupole ogivali, una pesante lanterna al cervello); nel caso di cupole emisferiche, con contrafforti (mentre la lanterna deve essere leggera).

Pure il rapporto altezza del piedritto diviso spessore del piedritto è contrassegnato da un limite superiore (a meno che non ci sia la catena all'imposta). Anche questo limite dipende dal rapporto luce diviso spessore della calotta. Questa correlazione non è l'unica dipendenza che governa la meccanica del piedritto, ma è una delle principali. Ad ogni modo, le altre correlazioni sono governabili con i pesi e con i bracci di leva, e quindi sono riconducibili anch'esse alla geometria.

Una struttura muraria può essere realizzata ignorando i limiti dei rapporti che ne governano la portanza. Basta riprodurre gli stessi rapporti geometrici del costruito: una struttura muraria in scala — maggiore o minore — rispetto a una esistente garantisce la portanza. Tale considerazione è in linea sia con le tecniche sia con le teorie costruttive storiche; in particolare, spiega perché le murature non abbiano richiesto teorie meccaniche per percorrere la loro formidabile storia: un singolo caso funge da modello a infiniti casi; inoltre, un caso innovativo che funziona funge da nuovo modello. In effetti, lo sviluppo della meccanica strutturale ha sempre ricevuto pochi stimoli finché non sono comparse le strutture di acciaio e di C.A., la cui sicurezza dipende invece anche dai materiali, per cui queste strutture non sono governabili per proporzione geometrica.

Ai fini della sicurezza statica, dunque, le murature seguono leggi che possono essere acquisite e perfezionate sul campo, e che possono essere tramandate. Queste conoscenze empiriche costituivano la perizia dei costruttori del passato.

La storia delle costruzioni è contrassegnata da quanto sopra. I costruttori solitamente procedevano per similitudine con l'esistente. Un esempio è la cupola di Santa Maria del Fiore a Firenze: Filippo Brunelleschi realizzò su scala molto più grande quanto altri avevano già realizzato. Talvolta, qualche costruttore ardito realizzava invece un'opera che non replicava l'esistente. Se sopravviveva, il prototipo diventava un nuovo modello, riproducibile nella prassi. Un esempio è Ponte Vecchio a Firenze: Taddeo Gaddi (posto che sia stato davvero lui il costruttore dell'opera) realizzò archi di forma innovativa (molto ribassati, peraltro seguendo una regola statica errata), che non erano mai stati realizzati prima, nemmeno lontanamente.

Quanto sopra spiega perché le murature possano essere governate con la sola proporzione geometrica. Per contro, quanto sopra non giustifica l'automatica sussistenza delle condizioni di sicurezza strutturale per le costruzioni storiche. Il fatto che un manufatto sia giunto ai giorni nostri testimonia la felice concezione costruttiva, ma non dimostra che la capacità strutturale è adeguata: un lungo stato di servizio non certifica l'idoneità nei confronti del servizio stesso. Benché totalmente errata, l'idea che il costruito abbia superato una sorta di selezione naturale, e che quindi sia idoneo alla fruizione attuale, è presente talvolta anche in qualche addetto ai lavori. Tra le cause, anche qualche massima, come quella che "una volta muraria, se dopo il disarmo dalle centine sta in piedi per qualche istante, starà in piedi per i secoli a venire". Trattasi di una affermazione sbagliata; non vale nemmeno per le strutture verticali. Con l'aggravante che suona bene e perciò è rimasta impressa. Se è vero che il disarmo rappresentava il momento di maggiore criticità, infatti, è anche vero che la portanza dipende dagli enti geometrici. Molte strutture avevano una portanza sufficiente per auto-sostenersi e per portare i carichi permanenti, ma avevano una portanza moderata ai sovraccarichi accidentali. Tali strutture, o sono state cimentate da sovraccarichi impegnativi, e quindi sono collassate, oppure sono ancora in servizio, e quindi rappresentano un pericolo.

A ciò si aggiunge che l'adattamento del costruito alle esigenze attuali implica modifiche architettoniche: aperture nelle murature, rimozione o spostamento di paramenti o di catene, eliminazione o aggiunta di masse permanenti, maggiori sovraccarichi, carichi concentrati o largamente non-simmetrici. Lo stato di progetto deve quindi essere verificato.

## 2.2 Azioni sismiche

La longevità di un edificio non ne comprova l'attuale adeguatezza sismica. Molti edifici storici sono sismicamente inadeguati pur avendo attraversato i secoli. L'affermazione rimane valida pure per gli edifici sopravvissuti a sismi anche violenti. Infatti, una costruzione può essere arrivata ai giorni nostri senza aver sopportato azioni sismiche onerose, sebbene la sua zona sia stata investita da terremoti di elevata intensità. Un'elevata magnitudo del sisma non comporta necessariamente un'accelerazione parimenti elevata al piede della costruzione, la quale dipende anche dal terreno attraversato. Come pure un'elevata accelerazione al piede della costruzione non comporta necessariamente una parimenti elevata sollecitazione nella struttura, la quale dipende anche dal contenuto in frequenza del terremoto rapportato alle

prime frequenze naturali della costruzione, dalla durata del sisma e dalla direzione dell'azione. Insomma, l'edificio può essere sopravvissuto a sismi severi in senso generale, ma non impegnativi. Tuttavia un sisma impegnativo per l'edificio non è da escludersi in futuro. Inoltre, lo stesso sisma, adesso, deve essere sopportato da un edificio degradato.

A ciò si aggiunge che il tempo di ritorno dei sismi distruttivi è superiore alla vita media dell'uomo, soprattutto del passato. Pertanto, i costruttori non arrivavano a formarsi conoscenze empiriche atte a realizzare costruzioni antisismiche. La mancanza di criteri costruttivi antisismici ha interdetto la sopravvivenza a una rilevante frazione delle costruzioni. Ciò non significa che le costruzioni arrivate ai giorni nostri abbiano soltanto approfittato di fortunate coincidenze costruttive. Una costruzione muraria realizzata secondo le regole dell'arte ha maggiore probabilità di sopravvivenza anche ai terremoti di maggiore impegno, benché tali regole non contemplino esplicitamente la sismica.

Il comportamento sismico delle costruzioni in muratura non è governabile esclusivamente con la geometria; in particolare, non è governabile mediante criteri di proporzione con l'esistente. La dissipazione (sia viscosa sia isteretica) può essere governata solo mediante la meccanica strutturale.

### 3. INTERVENTI: RECUPERO STATICO E/O MIGLIORAMENTO O ADEGUAMENTO SISMICO

La meccanica delle murature supporta e giustifica sei tipologie d'intervento strutturale.

#### 3.1 Modifica dei carichi: da sollecitanti a resistenti

*Incremento dei carichi permanenti resistenti; spostamento dei punti di applicazione di alcuni carichi permanenti, così da trasformarli da sollecitanti in resistenti; incanalamento dei sovraccarichi in modo che la maggior parte sia resistente.*

Esempi: diversa orditura dei solai; disposizione di muri porta-solaio ex-novo (figure 6-12); irrigidimento dei solai nel loro piano e cucitura dei solai ai muri porta-solaio (figure 13-19), collocazione e modifica di rinfianchi, contrafforti, speroni, frenelli; sistemazione di travi porta-solaio ex-novo; collocazione di colonne ex-novo; appesantimenti delle sommità.

#### 3.2 Modifica del materiale: dalla muratura alla muratura armata

*Applicazione di apporti ex-novo resistenti a trazione aderenti alla muratura.* Gli apporti, spesso denominati rinforzi, costituiscono un'armatura. Se i rinforzi sono esterni, l'applicazione è per incollaggio epossidico sulla superficie muraria (figure 20-23); se invece sono interni, è per inghisaggio nella massa muraria, con malta o con resina (epossidica).

In passato, l'acciaio era l'unica opzione possibile per realizzare i rinforzi; attualmente, i materiali compositi rappresentano un'alternativa largamente più vantaggiosa sul piano funzionale ed esecutivo. Da circa una quindicina d'anni, in effetti, la muratura armata viene realizzata con nastri in FRP incollati sulla superficie muraria. L'avvento dei compositi non si è esaurito nel rimpiazzo del materiale — il composito in luogo dell'acciaio — ma è riverberato su tutto l'intervento, originando una tecnica innovativa più funzionale, non solo della sua versione in acciaio, ma spesso di tutte le tecniche alternative. Logica conseguenza, questa tecnica ha conosciuto uno sviluppo rapidissimo; al punto che le applicazioni pratiche hanno di molto preceduto gli apparati teorici previsionali, come pure le normative (nate solo nel 2004).

L'origine di tale imprudenza sta anche in due esempi: le costruzioni in muratura e gli altri settori tecnici. Costruzioni formidabili realizzate per secoli in assenza di apparati teorici hanno maturato il convincimento, in alcuni, che la pratica possa sopperire alla teoria. Invece, la cosa è vera solo per le murature, la cui sicurezza dipende essenzialmente dalla geometria. Tutti i settori della tecnica nascono sul campo; i supporti teorici vengono molto dopo. Tuttavia, gli effetti di un fallimento strutturale sulla collettività sono drasticamente maggiori rispetto al fallimento in un altro settore (l'unico settore che, un po', si avvicina alla strutturistica in questo senso è l'aeronautica civile). Cui si aggiunge che le strutture producono prototipi, ciascuno diverso tutti gli altri (compreso quelli tipologicamente uguali), mentre gli altri settori producono in serialità. Che, nella strutturistica, tale modo di procedere — ancorché istintivo e naturale — sia errato lo testimonia la storia. Quasi tutte le tecniche e le tipologie strutturali attuali sono state adottate affrettatamente rispetto al supporto teorico, e per questo hanno conosciuto il fallimento ai primordi, provocando crolli e disastri. In definitiva, le murature

armate non possono essere governate empiricamente, per proporzione geometrica. In particolare, la muratura rinforzata in composito costituisce una tipologia strutturale distinta dalla muratura e come tale richiede una meccanica ad hoc.

Il rinforzo in composito non ha fortunatamente dato luogo a crolli solo per due ragioni: gli interventi riguardano il costruito e non il nuovo, per cui il rinforzo deve garantire soltanto un incremento di portanza, chiamato in causa con un tempo di ritorno elevato; i quantitativi di FRP messi in opera sono spesso largamente sovradimensionati.

Oltre che per una certa avventatezza, la diffusione delle armature in composito merita di essere criticata anche per avere cancellato le armature in acciaio. Invece, la muratura armata in acciaio continua a rappresentare una valida alternativa per quei casi in cui deve essere preservata la faccia a vista. Le armature d'acciaio si prestano infatti benissimo ad essere inserite all'interno delle masse murarie (anche avvalendosi dei considerevoli progressi delle tecniche di carotatura). In più, le armature in acciaio permettono la pre-trazione (armature attive), meglio delle armature in composito. La pre-trazione delle armature imprime uno stato coattivo di precompressione nelle murature. La precompressione delle murature merita qualche chiarimento. Trascurando l'incrudimento dell'acciaio armonico, la capacità statica non dipende dal tiro dell'armatura: che l'armatura si attivi o lentamente non interessa ai fini della portanza. La capacità sismica dipende invece anche dal tiro dell'armatura: la precompressione della muratura incrementa la rigidezza della costruzione. Quindi, la capacità relativa agli stati limite di servizio sismico (SLO e SLD) è tanto maggiore quanto maggiore è il tiro. Se si considera l'equilibrio sulla deformata, ovviamente, la precompressione incrementa anche la portanza ultima.

In questa tipologia rientrano anche gli interventi di cucitura. Le cuciture degli ammorsamenti tra muri ortogonali e dei solai ai muri di appoggio rappresentano provvedimenti essenziali per la protezione sismica delle costruzioni.

### 3.3 Inserimento di nuove strutture

*Collocazione di strutture ex-novo, in sostituzione di parte delle strutture esistenti o in aggiunta a queste.* L'intervento dà quindi luogo a un organismo strutturale composto in parte dalle strutture esistenti e in parte dalle strutture nuove.

Tra gli interventi appartenenti a questa tipologia finalizzati all'adeguamento sismico: strutture verticali ex-novo per ridurre l'eccentricità del centro delle rigidezze rispetto al baricentro delle masse; cordoli ex-novo per interdire i meccanismi a mensola dei paramenti murari fuori dal loro piano e, in generale, per la "scatolarità"; controventi dissipativi.

### 3.4 Consolidamento delle fondazioni

*Rendere la fondazione capace di scambiare i carichi di progetto con il terreno.* Questa tipologia d'intervento vale se la fondazione esistente non è in grado di trasferire i carichi al suolo, oppure di ricevere le reazioni trasmesse dal suolo.

Diverso è il problema del terreno che si muove per cause proprie. Un terreno si muove anche indipendentemente dalle azioni scaricate attraverso le fondazioni delle costruzioni in esso fondate. Al riguardo, una prima causa è l'acqua: imbibizione, siccità, dilavamento, sifonamento, subsidenza (anche da gas), infiltrazioni, scivolamenti (smottamenti). Una seconda causa è la morfologia dei terreni (natura e stratificazione): scorrimenti, moti franosi. Quando il terreno si muove per cause proprie, questa tipologia non è la diretta soluzione del problema; talvolta può risolverlo, ma indirettamente.

Le fessure, che ovviamente vengono osservate nella sovrastruttura, devono essere ricondotte al sistema che le ha causate: sovrastruttura, fondazione, terreno. Se la fessura è stata causata dalla sovrastruttura, si rientra in quanto annotato nel capitolo 1. Se la fessura è stata causata dalla fondazione, un intervento appartenente a questa tipologia può risolvere il problema, posto che davvero si tratti di un problema. In questo caso, un'ulteriore interpretazione è necessaria: occorre stabilire se la fondazione sia carente di portanza oppure di rigidezza. Se la fondazione è carente di portanza, occorre imprescindibilmente dotare la fondazione della capacità di scambiare adeguatamente le azioni col terreno (allargamento, pali). Se la fondazione è carente di rigidezza, la questione esce dalla statica, poiché la fessura è il contrario del funzionamento: la muratura lavora a compressione e si parzializza a trazione. In questo caso, si interviene o no a seconda che le fessure disturbino o no (irrigidimento). Se la fessura è stata causata dal terreno, la questione trasla dalla strutturistica alla geotecnica; la soluzione — posto che esista e che non sia troppo onerosa — riguarda il sistema terreno. Questa tipologia di intervento può semmai servire come rimedio riflesso, laddove spesso è pressoché inutile.

### 3.5 Incremento della capacità aggregante delle masse murarie

Interventi tesi a mitigare la tendenza della muratura a disgregarsi sotto carico. Questa tipologia comprende l'iniezione (di malta, talvolta di resina), la chiodatura e il placcaggio. Tali tecniche spesso vengono combinate tra di loro.

Si consideri una generica struttura di muratura e un carico che comporta uno sforzo normale di compressione interno allo spessore murario. Si cresca il carico sino alla crisi. Tre sono i modi di crisi. (1°) Ribaltamento (figure 24, 25): la crescita del carico determina fessure ad andamento parallelo allo sforzo normale (favorite dalle singolarità), che scompongono la struttura in elementi longitudinali snelli; l'ulteriore crescita del carico determina la crisi dei predetti elementi longitudinali, per meccanismo a tre cerniere, con traslazione verso l'esterno della loro mezzeria, a partire dagli elementi periferici che sono presso-inflessi. (2°) Schiacciamento: rottura a compressione del materiale. (3°) Disgregazione: il carico vince l'azione di coesione esercitata della tessitura muraria e scompone l'apparecchio murario nei componenti. Per inciso, lo splitting costituisce una delle cause d'inesco — ma non la principale — del 2° e del 3° modo di crisi.

Il modo di crisi per disgregazione è correlato alla fattura. Nelle murature a regola d'arte, la crisi per disgregazione sta al livello gerarchico superiore, mentre al livello gerarchico inferiore stanno la crisi per ribaltamento e la crisi per schiacciamento; nelle murature di modesta qualità, la crisi per disgregazione sta invece al livello gerarchico inferiore. In questo caso può essere opportuno assoggettare la muratura a un intervento appartenente alla tipologia in oggetto.

Meno soggettivo è il confronto tra disgregazione e meccanismi. Se e solo se la crisi per disgregazione si colloca a un livello gerarchico superiore rispetto al collasso per meccanismo, il comportamento meccanico della muratura è quello considerato nel capitolo 1. Se invece la crisi per disgregazione si colloca a un livello gerarchico inferiore rispetto al collasso per meccanismo, il comportamento meccanico della muratura è di materiale sciolto (incoerente, o al più moderatamente coesivo). In quest'ultimo caso, la struttura muraria non è affidabile; pertanto, deve essere consolidata mediante un intervento appartenente alla tipologia in oggetto. Solo dopo avere conferito alla muratura la capacità aggregante, infatti, il materiale può essere considerato come strutturale e la struttura muraria può essere governata.

Gli interventi di trasformazione della muratura, in muratura armata (punto 3.2) vengono solitamente progettati in modo da interdire la formazione di tutti i meccanismi. Vale a dire, la muratura armata modifica la gerarchia delle resistenze: porta il collasso per meccanismo a un livello più alto, ponendo al livello più basso la crisi della muratura armata.

La muratura armata pone allora un altro problema. Se la crisi per disgregazione si colloca a un livello gerarchico superiore alla crisi della muratura armata, la meccanica della muratura e della muratura armata continuano a vigere. Se però la crisi per disgregazione si colloca a un livello gerarchico inferiore alla crisi della muratura armata, la struttura muraria richiede un intervento appartenente alla tipologia in oggetto, congiuntamente all'intervento di muratura armata.

Sfortunatamente, la crisi per disgregazione non può essere affidabilmente prevista; in particolare, gli apparati teorici sono ancora inadeguati a tal proposito. Tale stato limite deve quindi essere governato empiricamente. Logica conseguenza, le iniezioni e le chiodature vengono adottate molto di più di quanto stringentemente necessario. In realtà, le murature aventi un comportamento sciolto, che richiedono questa tipologia di intervento, sono una netta minoranza.

### 3.6 Isolamento sismico e incremento delle capacità dissipative

Sconnessione della sovrastruttura dal suolo, per aumentare drasticamente il periodo della sovrastruttura (disaccoppiamento del moto orizzontale della sovrastruttura, dal terreno); incremento delle capacità dissipative della costruzione.

Le modalità d'intervento sono ben note sia per l'isolamento sia per la dissipazione. L'unica osservazione è che la tecnologia dell'isolamento si è molto evoluta, al punto da poterla convenientemente applicare anche al costruito.

## 4. ALCUNI INTERVENTI RICORRENTI SUL COSTRUITO: OSSERVAZIONI

Nella prassi, talvolta, gli interventi di adeguamento statico e/o sismico perseguono i seguenti obiettivi, mediante le seguenti tecniche: riparazione delle fessure, mediante iniezione (di malta o di resina), scuci e cucì, chiodatura, armature

esterne; riempimento dei vuoti, mediante iniezione; placcaggio mediante paretine in C.A. o reti in composito.

Tali tecniche sono molto invasive in termini di conservazione e non sono giustificabili in termini di restauro. Specie per le costruzioni di valore culturale, occorre allora domandarsi se gli obiettivi giustificano gli oneri e se gli stessi obiettivi non possano invece essere raggiunti con tecniche meno invasive. Di seguito, alcune osservazioni al riguardo.

Una fessura riparata diventa una compagine più forte delle altre. Perciò la riparazione trasla le zone deputate a fessurarsi, dalle compagini riparate alle compagini limitrofe in condizioni naturali. Il risultato è un irrilevante incremento di portanza statica (leggera modifica del meccanismo) e un incremento di portanza sismica trascurabile rispetto all'onere.

La riparazione delle fessure in quanto tale è quindi erronea. In particolare, il seguente ragionamento è sbagliato: la fessurazione riduce la sicurezza, quindi occorre riparare le fessure, intervenendo su ciascun elemento fessurato. Al contrario, la portanza statica si esplica in condizione fessurata e pertanto non risente delle fessure. La riparazione delle fessure è quindi inutile. Quanto agli interventi sugli elementi murari fessurati, l'atteggiamento deve essere coerente con una delle seguenti due posizioni. L'elemento strutturale è sicuro: allora l'intervento è inutile, quale che sia lo stato di fessurazione. L'elemento è insicuro, cosa che però non dipende dalla fessurazione: allora l'intervento è indispensabile, ma deve essere esteso a tutti gli elementi aventi la medesima geometria (e carico), anche se non fessurati.

Un caso eloquente è quello dei sistemi di volte che reiterano la stessa geometria. Se una volta merita di essere consolidata, tutte le altre volte del sistema debbono essere ugualmente consolidate, fessurate o integre che siano.

Il riempimento dei vuoti incrementa la portanza statica solo nelle murature in cui lo stato di disgregazione ha un limite eccessivamente basso (materiale sciolto); diversamente è inutile, poiché un elemento murario lavora per massa.

Il placcaggio in forma di paretine in C.A. solidarizzate ai paramenti murari funziona pienamente sul piano strutturale, poiché fa aumentare la portanza (e anche la capacità dissipativa); tuttavia, tende a esautorare le murature dal protagonismo nella portanza; inoltre occulta l'esistente e impoverisce le capacità traspiranti dei paramenti. Siccome esistono tecniche che procurano i medesimi vantaggi strutturali senza comportare tali inconvenienti, il placcaggio è da ritenersi quantomeno obsoleto. Rientra nel discorso anche l'applicazione di reti in composito sull'intera superficie.

## 5. CONCLUSIONI: RESTAURO STRUTTURALE

La gestione del costruito — salvaguardia e adattamento — è storicamente contrassegnata dalla contrapposizione tra sicurezza strutturale e conservazione architettonica. L'una si è sempre ricavata il proprio spazio a svantaggio dell'altra. Da un lato, infatti, il progetto strutturale tende da sempre a tutelare oltremodo gli addetti ai lavori nei confronti delle loro responsabilità; e dunque, molti interventi sono assai più onerosi e invasivi di quanto stringentemente necessario. Dall'altro lato, la conservazione architettonica non sempre intende le ragioni della sicurezza e spesso non apprezza i provvedimenti strutturali; e dunque il progetto di restauro non riesce a metabolizzare il progetto strutturale; logica conseguenza, come minimo si limita a tollerarlo o a subirlo, talvolta lo contrasta. In passato, dunque, l'azione professionale dello strutturista e quella del restauratore erano come minimo agnostiche l'una dell'altra, spesso antagoniste.

In questi ultimi anni, fortunatamente, la disciplina strutturale è particolarmente cresciuta sul piano culturale, prendendo finalmente atto che, a essere maggiormente degno della conservazione, è proprio l'organismo strutturale. Lo strutturista si sta insomma rendendo conto che l'oggetto del proprio lavoro — la struttura e le tecniche costruttive — costituisce l'aspetto di maggior valore storico, culturale e intellettuale dell'edificio. Il passaggio è cruciale: la conservazione strutturale rappresenta una condizione necessaria alla conservazione architettonica. A seguito di tale presa di coscienza, è proprio lo strutturista a perseguire il restauro con la propria azione professionale e non più a subirlo.

A seguito di tale evoluzione del pensiero, la strutturalistica e la conservazione tendono a convergere in un'unica disciplina: *il restauro strutturale*, la quale è culturalmente più elevata delle due discipline da cui deriva. Il restauro strutturale si basa su due criteri, che rappresentano asintoti inconfutabili pur nelle soggettività delle teorie sul restauro.

1) Un intervento si colloca nel restauro strutturale solo se conserva il comportamento d'esercizio della costruzione.

Difatti, una costruzione che, dopo l'intervento, porta i carichi d'esercizio diversamente da prima è un'altra costruzione. In questo caso l'opera è stata cancellata, anche se l'intervento ha conservato l'impianto architettonico, gli intonaci, i rivestimenti, i fregi, le modanature, le paraste, gli stucchi, i cromatismi, i decori, gli impiantiti.

Un primo criterio del restauro strutturale è quindi: l'intervento deve incrementare la portanza ultima, la quale incrementa direttamente la sicurezza, ma deve essere inerte in servizio, la cui condizione non influenza la sicurezza.

Chi osserva una costruzione che è stata sottoposta a un restauro strutturale, dunque, la vede lavorare nelle modalità originali, salvo circostanze con tempo di ritorno molto più che decennale. Tali circostanze consistono in carichi onerosi oppure in sismi severi. In tali circostanze, e solo in quelle, la struttura chiama in causa l'intervento, che le consente di tollerare le azioni esterne estreme. Quando l'intervento lavora, la struttura esibisce comportamenti innaturali. D'altronde quei comportamenti estranei alla concezione primigenia permettono alla costruzione di sopravvivere.

Questo criterio è pienamente osservato dal rinforzo in composito, poiché i nastri di FRP sono pressoché inerti in servizio, entrando in azione solo nelle situazioni estreme (vengono progettati per deformazioni maggiori del 3‰).

Questo criterio non può invece essere osservato nel caso di costruzioni che non rispettano lo stato limite di danno sismico (o di operatività). In particolare, la pre-trazione delle armature irrigidisce l'edificio, ma ne modifica il comportamento d'esercizio. La mitigazione delle irregolarità è un altro caso in cui questo criterio viene disatteso. Mentre nei casi predetti l'inosservanza del criterio deve essere accettata, esistono molti altri casi in cui il criterio viene disatteso per raggiungere obiettivi che, invece, avrebbero potuto essere raggiunti con interventi rispettosi del criterio. Esempi sono gli inserimenti di ossature in C.A. o in acciaio, quali strutture alternative alle strutture murarie esistenti; oppure i placcaggi delle murature, ove le cortine di ricoprimento tendono a rimpiazzare la muratura placcata; o anche le cappe di C.A. sulle volte, le quali relegano la calotta muraria al ruolo di controsoffitto; o peggio, i sistemi di sospensione delle volte.

2) Un intervento si colloca nel restauro strutturale solo se conserva le tecniche costruttive. Difatti, una costruzione che, dopo l'intervento, non presenta più le tecniche costruttive originali è un'altra costruzione. In questo caso l'opera è stata cancellata; non si può parlare di conservazione, neppure se il resto della costruzione è stato conservato.

Un secondo criterio di restauro strutturale è quindi: l'intervento deve mantenere materialmente le tecniche costruttive originarie. Questo criterio, congiuntamente al primo criterio, comporta che le tecniche costruttive originali vengano, non solo conservate, ma anche mantenute funzionanti.

Questo criterio è osservato dal rinforzo in composito, poiché i nastri di FRP si configurano come apporti aggiuntivi che lasciano in opera, intatti, i componenti originari.

Le armature in acciaio interne alle murature, sia aderenti sia lente, rispettano sostanzialmente i due criteri suesposti; con una prerogativa aggiuntiva rispetto ai nastri in FRP: preservano la faccia a vista della muratura.

Il restauro strutturale si propone dunque di salvaguardare sia l'idea primigenia, sia la materia (a meno del naturale invecchiamento del manufatto e delle eventuali manomissioni antropiche storicizzate). Il restauro strutturale recide alla radice la dicotomia tra sicurezza strutturale e conservazione architettonica: il perseguimento della sicurezza conformemente ai due criteri suesposti garantisce automaticamente la conservazione, senza bisogno di alcuna concertazione.

Un importante contributo al restauro strutturale è stato dato dalle normative di recente acquisizione, tra le quali le *Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*.

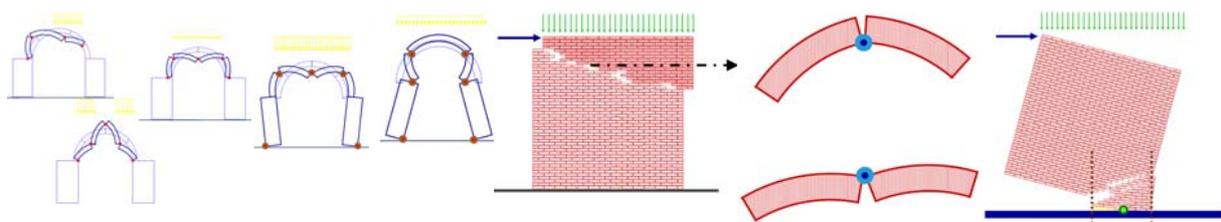


Figura 1. Volte: meccanismi articolati a imposte fisse.

Figura 2. Volte: meccanismi articolati a imposte che traslano.

Figura 3. Paramenti: possibile meccanismo traslazionale.

Figura 4. Cerniere delle murature: perni unilaterali sul contorno.

Figura 5. Muratura debole e N elevato: cerniera interna allo spessore.

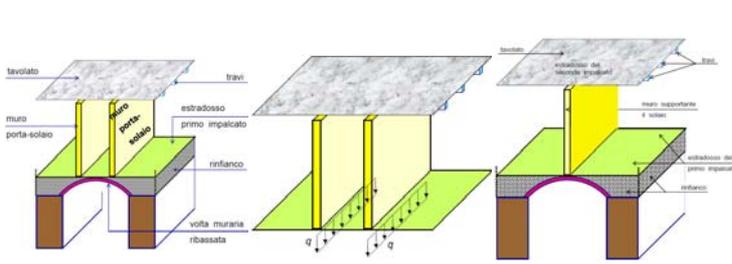


Figura 6. Il solaio superiore è supportato dalla volta a botte muraria semicircolare ribassata (arco murario). I carichi del solaio superiore si incanalano nei muri.

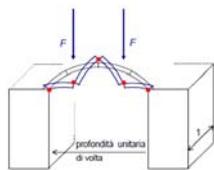


Figura 7. Innesco del meccanismo.

Figura 8. I due muri alle reni vengono sostituiti con un muro in chiave dell'arco: modifica dei carichi permanenti e dei sovraccarichi.

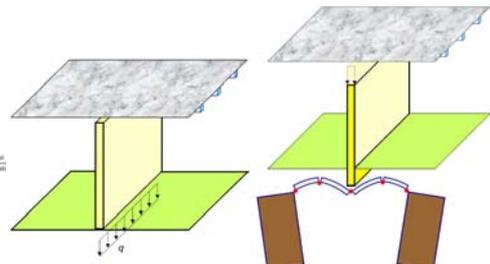


Figura 9. Il meccanismo non si innesca.

Figura 10. Se i piedritti sono sufficientemente tozzi, il nuovo assetto ha una portanza maggiore del precedente. Diversamente, la portanza può essere ottenuta con una catena all'imposta.

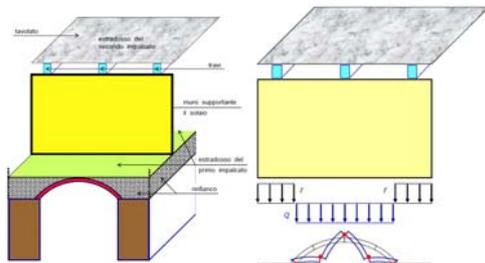


Figura 11. Muro porta-solaio trasversale: interdice il meccanismo per apertura dell'imposta.

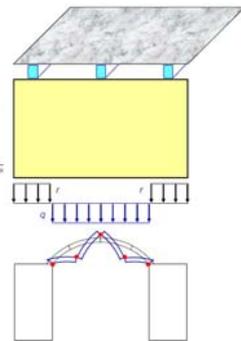


Figura 12. Meccanismo possibile.

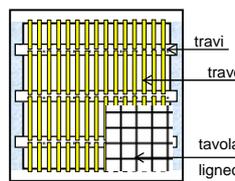


Figura 13. Impalcato ligneo supportato da quattro muri. L'impalcato non è rigido nel proprio piano, a meno di tavolati speciali.

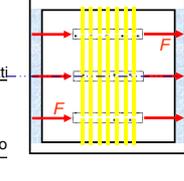


Figura 14. La forza statica equivalente al sisma,  $G$  viene scaricata sui muri attraverso le tre forze  $F$ . Lo scarico avviene sui muri ortogonali a  $G$  e alle  $F$ .

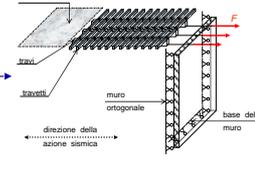


Figura 15. Le forze  $F$  tendono a provocare la crisi del muro fuori dal suo piano. Il muro è ammorzato ai due muri di controvento.

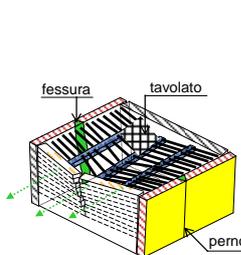


Figura 16. Meccanismo fuori dal piano: vista.

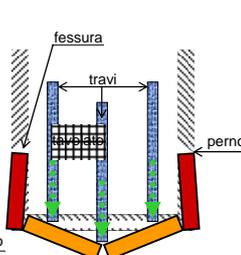


Figura 17. Meccanismo fuori dal piano: pianta.

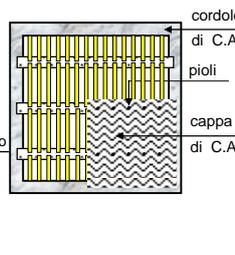


Figura 18. Irrigidimento e cucitura del solaio.

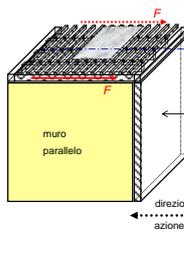


Figura 19. La forza  $G$  si scarica sui muri paralleli.

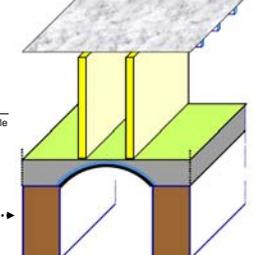


Figura 20. Nastro di FRP all'intradosso.

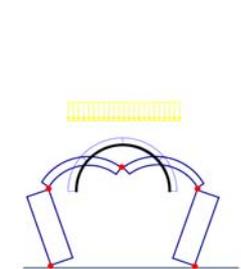


Figura 21. Il meccanismo non si innesca.

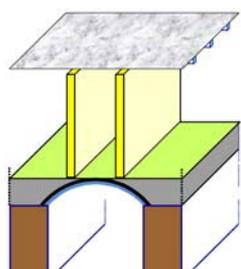


Figura 22. Nastro di FRP all'estradosso.

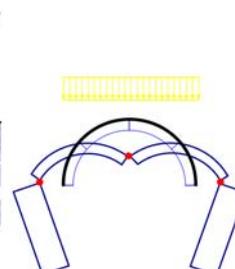


Figura 23. Il meccanismo si innesca.

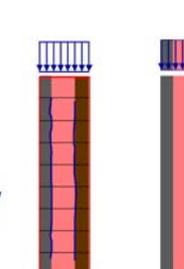


Figura 24. Fessurazione: scomposizione.

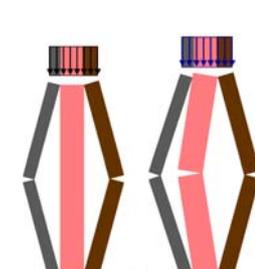


Figura 25. Ribaltamento degli elementi fessurati.