



CONSOLIDAMENTO STATICO E ADEGUAMENTO SISMICO

Annotazioni per le costruzioni in muratura

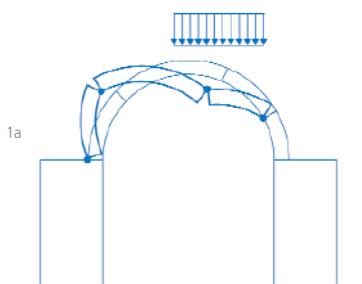
1ª parte

di Paolo Foraboschi
Dip. Costruzione dell'Architettura
Università IUAV di Venezia
paofor@iuav.it

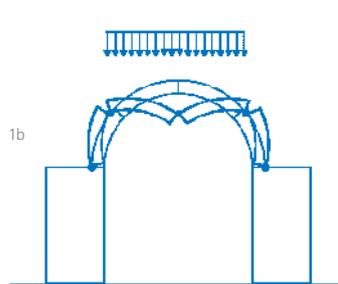
SULLA DOMANDA STRUTTURALE STANDARD

La normativa riporta la domanda standard (statica) di una struttura in muratura solo nelle verifiche agli stati limite, mentre la omette nelle più diffuse — e quindi più lette — verifiche alle tensioni ammissibili; inoltre la colloca nei paragrafi relativi al calcolo e quindi in secondo piano, mentre essa riguarda anche il progetto. La moderata incisività della

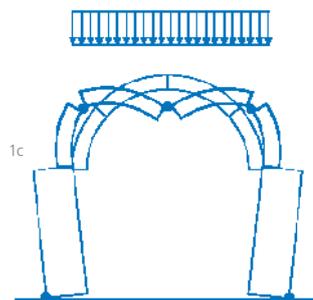
stesura normativa tende a originare la convinzione che la domanda strutturale di una costruzione in muratura coincida con quella di una costruzione in calcestruzzo armato o in acciaio, mentre invece è diversa. Il risultato è che molti professionisti non hanno ben chiara la domanda strutturale cui tendono a dare risposta con il consolidamento e con l'adeguamento. Può allora essere utile esplicitarla.



1a



1b



1c

Le costruzioni in muratura pongono una sola domanda strutturale standard: portare il carico estremo. Per contro, le strutture in muratura non pongono alcuna domanda strutturale relativamente al servizio. Si approfondisce quest'ultimo aspetto.

Tre sono le grandezze utili per descrivere la risposta di servizio di una struttura muraria: freccia, massima tensione di compressione, ampiezza di fessurazione.

1) *La freccia è sempre moderata nelle strutture murarie.* La cosa è ovvia: le strutture murarie lavorano a sforzo normale di compressione, contenuto nello spessore. Perciò la freccia è sempre inferiore al suo limite di esercizio, e quindi la verifica alla freccia è superflua.

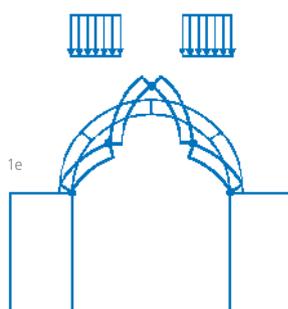
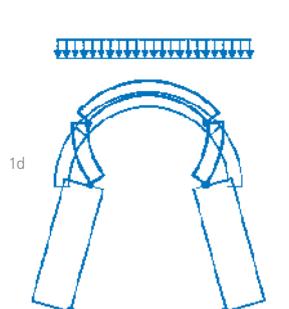
La freccia è considerevole solo a seguito dell'innescò di un meccanismo cinematico. In tal caso, tuttavia, la questione riguarda la portanza ultima, non il servizio. Si supponga di osservare un abbassamento eccessivo in un impalcato voltato. Tale abbassamento non deriva dall'inflessione dell'impalcato, come per un solaio. Probabilmente tale abbassamento (figura 1c) deriva dall'apertura delle imposte per rotazione dei piedritti (oppure, più raramente, per slittamento); altrimenti (figura 1a) è il risultato di un cinematiso a imposte fisse. In ogni caso si tratta di uno stato di incipiente collasso.

2) *I picchi tensionali di compressione possono micro-fessurare i letti di malta e talvolta anche i corsi di mattoni.* Tali micro-fessure non pregiudicano però la risposta strutturale di servizio. Non esistendo un limite d'esercizio, la verifica tensionale a compressione è priva di senso per una muratura. Per contro, le micro-fessure possono consistere nei prodromi dell'incipiente collasso per schiacciamento; ma in questo caso riguardano la portanza ultima, non il servizio.

3) *Le punte tensionali di trazione possono risolversi in fessure,* le quali possono interessare o la malta, o i mattoni, oppure entrambi i componenti. La fessurazione non riduce la durabilità dell'opera e quindi non riguarda il servizio. Non esistendo un limite d'esercizio, la verifica di fessurazione è priva di senso per una muratura. Diverso è il caso del c.a., in cui la fessurazione espone l'armatura all'aria e pertanto occorre verificare che l'apertura delle fessure non sorpassi taluni limiti, atti ad assicurare la dovuta durabilità.

1a. Meccanismo asimmetrico a imposte fisse: presenta 4 cerniere alternate, estradosso-intradosso; la prima, quella nella metà di arco meno caricata, è estradosale e in genere è all'imposta. I carichi che attivano questo meccanismo sono le stese – verticali od orizzontali – localizzate su una delle due metà dell'arco; soprattutto le stese tendenti al carico concentrato a un quarto della luce. **1b.** Il meccanismo simmetrico a imposte fisse presenta 5 cerniere alternate, estradosso-intradosso; quelle terminali sono all'imposta e sono estradosali. Questo meccanismo riguarda le volte aventi un rapporto tra spessore e luce inferiore al minimo della tipologia e si innesca all'atto del disarmo dalle centine (la struttura non sopravvive al varo); oppure si innesca rimuovendo il rinfiacco. **1c.** Meccanismo con apertura delle imposte. Può presentare 3 cerniere nell'arco (alternate) e 2 cerniere nel piedritto (alla sua base); alternativamente possono presentare due pattini nel piedritto, anziché due cerniere (meccanismo traslazionale del piedritto, anziché ribaltamento). Questo meccanismo riguarda le volte senza catena, impostate su piedritti aventi moderata resistenza alle azioni orizzontali (lateralì); riguarda anche le cupole impostate su un tamburo esile e non-contraffortato. Qualsiasi carico verticale tende ad attivare questo meccanismo; soprattutto le stese tendenti al carico concentrato in chiave. **1d.** Meccanismo con chiusura delle imposte: presenta 4 cerniere nell'arco (di cui due estradosali all'imposta, e due intradosali verso le reni), e 2 cerniere nel piedritto (alla sua base). Questo meccanismo riguarda le volte i cui piedritti sono assoggettati a spinte laterali verso l'interno. Qualsiasi carico verticale sull'estradosso rappresenta un ente resistente, ai fini di questo meccanismo; soprattutto le stese tendenti al carico concentrato in chiave. **1e.** Meccanismo simmetrico a imposte fisse, con innalzamento della chiave. E' l'inverso di quello indicato in figura 1-b; pertanto presenta 5 cerniere alternate, intradosso-estradosso (quelle terminali sono all'imposta e sono intradosali). Questo meccanismo riguarda gli archi e le volte a botte ribassati, dove è gerarchicamente inferiore al meccanismo di figura 1-b. In tali strutture voltate, il rinfiacco rappresenta un ente sollecitante. Il meccanismo riguarda anche alcune tipologie di cupola in cui la lanterna rappresenta un ente resistente (e quindi non va rimossa). I carichi che lo attivano sono le stese verticali distribuite simmetricamente attorno alle reni; soprattutto le stese tendenti ai carichi concentrati alle due reni. **1f.** Volta a botte, semicircolare, sperimentata in laboratorio caricandola a 1/4 della luce sino al collasso. La volta era rinforzata con tre nastri in composito della larghezza di 60 mm, ciascuno dei quali incollato lungo l'intera direttrice intradosale (lungo l'intero arco intradosale). Il rinforzo ha scambiato la gerarchia delle resistenze. Il modo di crisi più debole della volta rinforzata è diventato il distacco del rinforzo per rottura trasversale del mattone, mentre il modo di crisi più debole della volta naturale (non-rinforzata) era il meccanismo. Avendo interdetto la crisi per meccanismo, il rinforzo in FRP ha incrementato, peraltro considerevolmente, il carico ultimo della volta.

La crisi della volta rinforzata si è dunque innescata per distacco del rinforzo. Perso il rinforzo, la volta è tornata a comportarsi al naturale. Di conseguenza, la crisi è proseguita col meccanismo cinematico di figura 1-a. La crisi è si dunque evoluta col meccanismo che si sarebbe innescato nella volta in condizioni naturali ma sotto un carico drasticamente maggiore rispetto alla volta non-rinforzata. Il converso della crisi per distacco è che la volta acquisisce un'energia cinetica assai maggiore di quella che acquisirebbe in condizione naturale. La crisi per distacco è dunque particolarmente repentina e come tale è più ostica da gestire in termini di protezione civile.



2a. L'immagine raffigura una volta a crociera sperimentata caricandola sino al collasso. **Le volte a crociera portano i carichi maggiori in condizioni mono-dimensionali, poiché la fessurazione interdice la bi-dimensionalità. Quest'ultima sussiste quindi solo per i carichi minori, oltre i quali la volta si scompone in sistemi di archi.** Le intersezioni danno luogo ad archi diagonali (linea gialla), le vele ad archi di vela (linea rossa). Il carico ultimo è quindi portato dagli archi di vela e dagli archi diagonali. Gli archi di vela sono indipendenti tra loro; ciascuno porta il carico applicato direttamente sul suo estradosso e scarica sugli archi diagonali. Questi ultimi sono quindi caricati dalle reazioni (verticali e orizzontali) fornite agli archi di vela, cambiate di segno. Le reazioni orizzontali non controbilanciate si scaricano infine sulle vele adiacenti, dando luogo a spinte a vuoto.

2b. L'immagine raffigura una volta a padiglione sperimentata caricandola sino al collasso. Ai carichi maggiori, la volta ha esibito fessure di meridiano localizzate lungo le intersezioni delle vele (comparse per carichi lontani dal carico ultimo, mentre la fenditura nella vela vicino all'intersezione è comparsa per ultima). Le fessure lungo le intersezioni hanno spicchiato la volta a padiglione, in archi di vela. La volta a padiglione è così diventata spin-

gente. Il carico ultimo è quindi portato da quattro segmenti arcuati: le quattro vele.

3. Cupola della chiesa di Santa Maria del Fiore (Firenze). Le tecniche costruttive adottate dal Brunelleschi (in particolare i filari a corda branda) hanno conferito ai costoloni la massima resistenza a trazione. Le trazioni di parallelo si sono quindi convertite in fessure di meridiano nelle vele, anziché nei costoloni come invece più frequente (si veda figura 2-b).

La conseguenza è decisiva in questo caso. **La cupola si è spicchiata in archi la cui sezione trasversale è a "C": una vela più metà da ciascuna parte. Se le fessure di meridiano fossero avvenute nei costoloni, la cupola si sarebbe spicchiata in archi la cui sezione sarebbe rettangolare: una vela.** Lo spessore effettivo di una sezione coincide con la distanza tra l'asse che può dare luogo al perno estradosso di rotazione e l'asse che può dare luogo al perno intradosso di rotazione. Tale distanza è assai maggiore nella sezione a "C" rispetto a quella rettangolare. La fessurazione nelle vele ha quindi conferito il massimo spessore effettivo alla cupola. Perciò, lo spessore della cupola risulta adeguato alla luce; inoltre la spinta scaricata dalla cupola sul tamburo è minima.

SULLA CAPACITA' STRUTTURALE STANDARD

La normativa è poco incisiva anche nel definire la capacità standard di una struttura in muratura, analogamente alla domanda e per gli stessi motivi. A ciò si somma la confusione ingenerata dai calcoli convenzionali di normativa, i quali sono improntati sulle tensioni: le verifiche a rottura camuffate da verifiche tensionali delle norme potrebbero originare l'erronea convinzione che la capacità dipenda dalla resistenza a compressione e dalle punte tensionali. Può allora essere utile esplicitare la capacità standard di una muratura.

In primo luogo, la capacità deve corrispondere alla domanda, dovendo quella soddisfare questa. Per omogeneità con la domanda, pertanto, **la capacità standard di una costruzione in muratura è misurata dallo stato limite ultimo.** Di converso, attributi capacitivi d'esercizio non sussistono. Ciò premesso, **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. Il carico di meccanismo deve quindi sorpassare il carico estremo: questa è la verifica richiesta alle strutture murarie. L'affermazione riguarda qualsiasi muratura — paramenti, colonne, volte — purché in condizioni naturali; mentre non vale per la muratura rinforzata da apporti esterni resistenti a trazione, dove il carico ultimo può non essere di meccanismo.

I meccanismi si possono suddividere in articolati e traslazionali.

Meccanismo articolato (figure 1, 2 e 3): assemblaggio di conci connessi da cerniere. Esempi: il ribaltamento di un muro; il crollo di una volta. I conci talvolta possono essere

schematizzati come rigidi (1° modo di cui nel prosieguo); altre volte devono essere schematizzati come deformabili (2° modo). **Le cerniere sono diverse rispetto ai meccanismi del C.A. o dell'acciaio: ordinarie, non plastiche, collocate ai bordi delle sezioni, non sull'asse; unilaterali ossia possono solo aprirsi ma non chiudersi, non bi-laterali.**

Meccanismo traslazionale: scorrimento di una compagine muraria rispetto al resto. P.es.: lo slittamento della parte sovrastante di un piedritto rispetto alla parte sottostante.

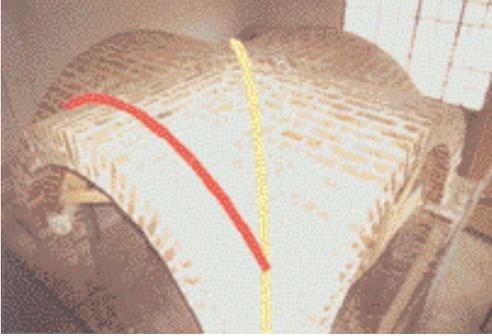
Il meccanismo — articolato o traslazionale — è un sistema labile. La labilità è attivata da alcune forze ed è contrastata da altre. Una forza è sollecitante, ovvero resistente, a seconda del suo punto d'applicazione sul meccanismo cinematico. Il carico di progetto in genere si scompone in una stesa sollecitante e in una stesa resistente. I carichi incarnano dunque due ruoli antitetici nelle murature: costituiscono sia gli enti sollecitanti sia gli enti resistenti. Le stese di carico resistenti, non solo possono attingere qualsiasi livello, ma più sono grandi 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.

La portanza fa quindi riferimento a carichi resistenti dati.

Questo punto è cruciale sia nella pratica che nel calcolo

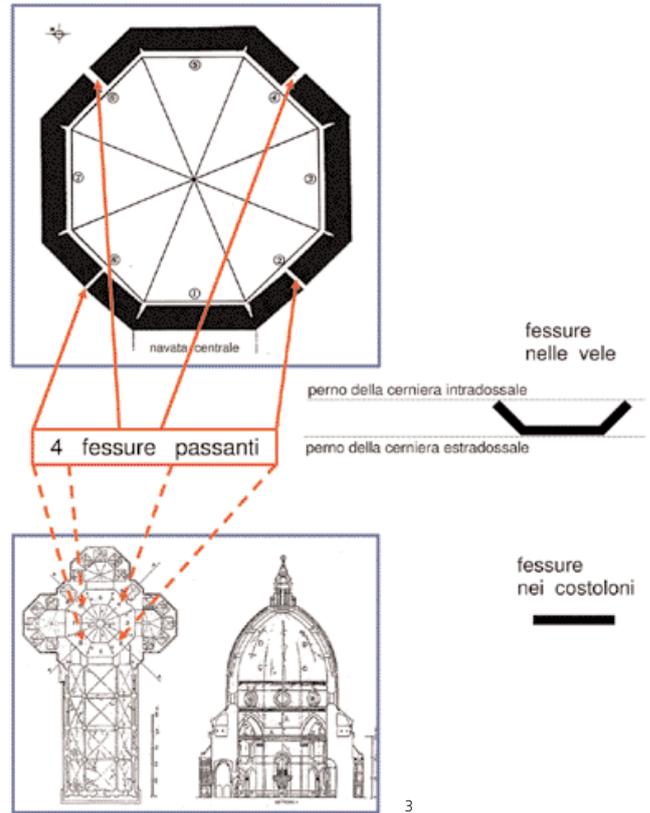
Pratica. Rimuovere le masse portate resistenti di una costruzione muraria sarebbe come idealmente rimuovere le armature in un elemento in c.a. o le ali in una putrela d'acciaio. Per esempio, la rimozione del rinfianco in una volta può comportarne il crollo.

2 a,b



Calcolo. Le verifiche di sicurezza debbono adottare il carico resistente minimo. Il valore di calcolo dei carichi resistenti è quindi il livello avente probabilità del 5 % di essere minorato. Assegnati i carichi resistenti, il massimo livello del carico sollecitante è conseguente. Quel livello definisce la portanza. Un carico sollecitante maggiore è staticamente inammissibile. Difatti, l'aliquota di carico sollecitante non controbalanciata dal carico resistente converte la propria energia potenziale in energia cinetica, innescando il moto. Un livello del carico sollecitante minore di quello ultimo — che quindi non arriva a controbalanciare il carico resistente — è invece tollerabile, poiché non può perturbare la quiete della struttura. Difatti, un meccanismo cinematico non può invertire il suo verso (cerniere unilaterali).

L'equilibrio s'instaura sempre sulla deformata. Le equazioni cardinali della statica debbono quindi essere impostate sulla deformata, a rigore. La scrittura dell'equilibrio rigoroso è però ostica, poiché la posizione deformata dei carichi non è nota a-priori. In alcune situazioni, tuttavia, l'influenza della



deformata sull'equilibrio è trascurabile. Qui le equazioni cardinali possono riferirsi alle forze sull'indefornata, la cui posizione è nota a-priori. Nelle altre situazioni, invece, le equazioni cardinali debbono riferirsi alle forze sulla deformata. 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.

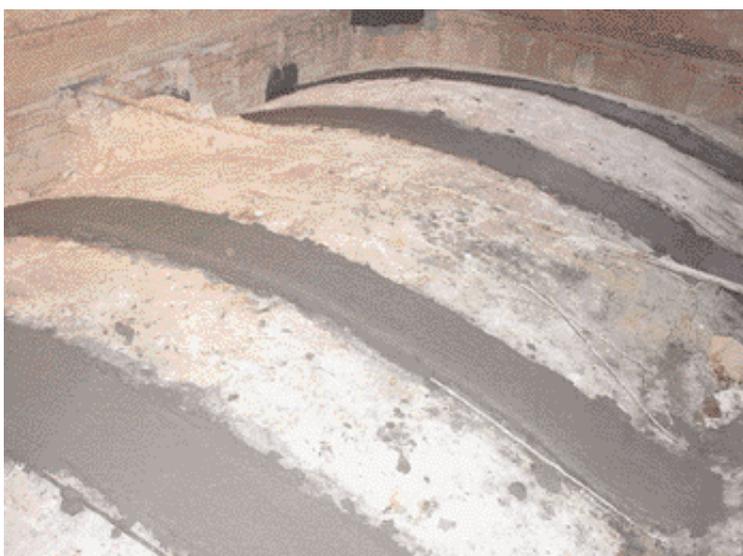
La snellezza effettiva di un componente murario è maggiore della snellezza percepita in quanto le sezioni trasversali tendono a parzializzarsi; ciò riduce la rigidità. Le colonne e i paramenti murari possono essere snelli, perciò, a dispetto dell'apparenza. Nelle colonne e nei paramenti, quindi, le azioni normali amplificano le imperfezioni di carico e di geometria, come pure gli effetti delle azioni laterali. L'amplificazione può degenerare nel meccanismo per svergolamento.

Conseguentemente, i meccanismi cinematici (articolati) della muratura possono essere suddivisi in due modi, a seconda che gli effetti della deformata sull'equilibrio siano (1°) trascurabili, (2°) ovvero essenziali. Il 1° modo riguarda: le colonne e i paramenti, assoggettati a prevalente flessione e prevalente taglio; le volte, eccetto quelle sottili ribassate. Il 2° modo riguarda: le colonne e i paramenti, assoggettati a prevalente sforzo normale; le predette volte sottili ribassate.

Lo stato limite definito dal 1° modo di crisi consiste nell'equilibrio ultimo delle forze sul cinematismo indeformato. Il 1° modo assume tacitamente che i conci costituenti il meccanismo siano infinitamente rigidi. Gli effetti deformativi governati dal modulo elastico sono esclusi per definizione e la resistenza a compressione non entra in gioco poiché la crisi per schiacciamento sta gerarchicamente dietro alla crisi per mec-

canismo. Conseguentemente, i parametri meccanici della muratura non influenzano la portanza del 1° modo.

Lo stato limite definito dal 2° modo di crisi consiste nell'equilibrio ultimo delle forze sul cinematismo deformato (figure 4, 5). Il 2° modo impone l'adozione di conci deformabili. Il modulo elastico è sostanziale ai fini della portanza del 2° modo, poiché quantifica la propensione della struttura a deformarsi. Inoltre, maggiore è il modulo elastico, maggiore è lo sforzo normale trasmesso dalle sezioni all'atto dello svergolamento. Al contrario la resistenza a compressione non influenza la portanza nemmeno del 2° modo.



4. Edificio sito a Modena (in via Poletti). Le volte erano eccessivamente sottili e ribassate: il carico di progetto comportava il collasso per meccanismo di 2° modo.

L'adeguamento statico ha previsto alcune nervature di cls, solidarizzate per incollaggio all'estradosso delle volte. Le nervature incrementano lo spessore della volta, invertendo la gerarchia delle resistenze: il 2° modo della volta consolidata sta dietro al 1° modo.

RIFLESSI DELLA CAPACITA' STRUTTURALE STANDARD
L'origine esclusivamente geometrica della capacità meccanica contrassegna le strutture in muratura, diversificandole dalle strutture in c.a. e in acciaio, la cui capacità è invece contrassegnata anche dalle proprietà meccaniche dei materiali.

Tale affermazione è in linea sia con le tecniche costruttive storiche, sia con le teorie strutturali del passato. Per contro, l'attuale pratica professionale non sempre è in linea con tale affermazione. Molti interventi trattano le strutture murarie come se fossero strutture in c.a., mortificando e deteriorando così le murature. Allo stesso modo, molti metodi di calcolo usati per le strutture murarie replicano i metodi del c.a. e dell'acciaio, risultando infelici per le murature.

Per tre quarti di secolo, le scuole d'ingegneria hanno escluso le murature dai programmi didattici (e da quelli scientifici), preferendo insegnare le teorie e le tecniche delle strutture ex novo. Tale cesura ha interrotto la continuità col passato. Quando il professionista si è trovato a dover trattare le murature — poiché a scuola si insegnava il nuovo, ma l'attuale professione verte prevalentemente sul costruito — lo ha fatto con gli strumenti cognitivi che aveva.

Portatori dei maggiori pericoli sono gli strumenti di calcolo di prassi. **Le analisi tensionali non hanno senso.** In particolare, la verifica che la massima tensione non sorpassi un fissato

limite è assurda. **Analisi che non facciano riferimento ai meccanismi non hanno senso per le murature in condizioni naturali (non-rinforzate). Nel caso degli elementi verticali, analisi che non si riferiscano ai meccanismi deformati (svergolamento) possono essere assurde.**

Al contrario, la pratica professionale fa spesso assistere a consolidamenti statici basati su analisi tensionali, condotte con codici di calcolo agli elementi finiti, il cui fine è ottenere le punte tensionali da confrontare con un presunto limite di ammissibilità. Non è chiaramente il metodo degli elementi finiti ad essere in discussione, il quale altro non è che la sostituzione di un sistema di equazioni differenziali con un sistema di equazioni algebriche. È l'uso che se ne fa ad essere stigmatizzato. Quanto sopra non vuole nemmeno affermare che i codici agli elementi finiti siano automaticamente inutili nelle strutture murarie. Gli elementi finiti sono inutili quando sono usati per le verifiche statiche. Gli elementi finiti possono invece essere proficui quando sono usati per interpretare il comportamento della costruzione (identificazione strutturale), come pure per indirizzare le analisi di meccanismo. Il metodo degli elementi finiti è assai utile anche nelle analisi sismiche.

DOMANDA E CAPACITA' STRUTTURALI SISMICHE

La domanda sismica è comune a tutte le strutture. La capacità sismica dipende invece dalla tipologia strutturale.

Domanda sismica

Associata a uno stato limite la domanda sismica fa riferimento a una famiglia di accelerogrammi al piede della costruzione, aventi contenuto in frequenza e durata coerenti col sito. Il massimo di ciascun accelerogramma componente la famiglia è fissato in coerenza statistica con il sito e con lo stato limite cui la domanda si riferisce.

I seguenti passaggi permettono di formulare la domanda sinteticamente. Ciascun accelerogramma della famiglia viene applicato a un sistema elastico, a un grado di libertà, di fissato periodo e di fissato smorzamento viscoso. Si determina la massima risposta del sistema elastico — di solito espressa in forma di accelerazione — a seguito dell'applicazione di ciascun accelerogramma. Si considerano quindi le massime risposte del sistema prodotte da tutti gli accelerogrammi della famiglia. Il massimo di tutti i massimi viene assunto come risposta sismica di un sistema elastico avente quel periodo e quello smorzamento.

La predetta serie di passaggi viene ripetuta in corrispondenza di un sistema elastico avente diverso periodo (e smorzamento). Ciascuna serie di passaggi individua un punto del diagramma avente in ascissa il periodo del sistema e in ordinata l'accelerazione di risposta elastica. Facendo variare il periodo da 0 sino a valori alti (tendenti a infinito), si costruisce un diagramma, detto spettro di risposta elastica. La viscosità può contemplarsi mediante una formula empirica che ragguaglia l'ordinata dello spettro al valore assunto per lo smorzamento. Lo spettro di risposta elastico fornisce la risposta sismica di un sistema elastico — accelerazione massima raggiunta dal

sistema sotto sisma — in coerenza col sito e con lo stato limite. **La domanda sismica di una costruzione civile contemporanea: il sisma di servizio, il sisma estremo, la scossa sismica catastrofica (circa una volta e mezzo maggiore del sisma estremo).** Il sisma di servizio, come pure estremo, indicano l'intero evento: sia la scossa maggiore, sia il relativo sciame sismico. Per scossa sismica si intende soltanto il massimo episodio dell'evento (prima scossa).

I sismi di servizio non debbono danneggiare né la struttura, né i componenti costruttivi non-strutturali. Si parla di danno sismico. Una protezione sismica avanzata deve escludere anche il danneggiamento degli impianti, specie degli edifici strategicamente importanti.

I sismi estremi non devono provocare il collasso della costruzione, laddove possono danneggiarla al punto da rendere la riparazione svantaggiosa o improbabile. Terminato lo sciame sismico, inoltre, la costruzione deve consentire lo sgombero, e non deve minacciare il crollo almeno nell'immediato.

La scossa sismica catastrofica non deve provocare il collasso della costruzione, laddove può danneggiarla al punto da comprometterne la sopravvivenza al susseguente sciame sismico, avendo però consentito l'evacuazione.

Capacità sismica generale alle strutture

L'azione sismica consiste nel trasferimento di energia, dal suolo in scuotimento alla costruzione sopra fondata. **La costruzione assorbe il sisma se e solo se è in grado di dissipare l'intera energia cinetica** in cui la costruzione ha trasformato l'energia trasferitale dal suolo. **La dissipazione può essere viscosa (coefficiente di smorzamento) o isteretica (lavoro di deformazione anelastica).**

La dissipazione viscosa smorza l'aliquota elastica degli spostamenti sismici. Riguardando il campo elastico, la dissipazione viscosa non comporta alcun danneggiamento strutturale. La dissipazione isteretica frena l'aliquota inelastica degli spostamenti sismici. Essendo connaturata col campo post-elastico, la dissipazione isteretica comporta un danneggiamento strutturale.

Una struttura assorbe i sismi mediante una combinazione di dissipazione viscosa e isteretica. La quota-parte di sisma assorbita per dissipazione viscosa è quella consumata dagli spostamenti elastici; ossia è quella che determina forze statiche equivalenti cui la struttura può resistere senza danneggiarsi (assorbimento per resistenza). La massima aliquota assorbibile per viscosità è correlativa al massimo spostamento elastico della struttura. In altre parole, il parossismo dell'aliquota sismica assorbita per resistenza corrisponde alla massima azione orizzontale (laterale) tollerabile dalla struttura in campo elastico (ovvero alla massima azione verticale). La quota-parte di sisma assorbita per dissipazione isteretica è quella consumata dagli spostamenti anelastici; ossia è quella che determina cicli isteretici cui la struttura può resistere, quantunque danneggiandosi. La massima aliquota assorbibile per isteresi è correlativa al massimo della combinazione numero-ampiezza dei cicli, ammesso dalla struttura. In altre parole, il parossismo dell'aliquota sismica assorbita per isteresi

si corrisponde alla massima energia di deformazione anelastica erogabile dalla struttura.

La combinazione tra le due componenti dissipative può essere stabilita dal progettista, il quale decide la frazione di una componente e pone l'altra componente di conseguenza. La stessa azione sismica può dunque essere assorbita con una minore (maggiore) resistenza più una maggiore (minore) dissipazione isteretica.

Al limite, un dato sisma può essere assorbito solo per resistenza, facendo rimanere la struttura in campo elastico. L'energia cinetica è così dissipata solo per viscosità, senza



5. Modena. In questo edificio le piogge di dicembre 2001 hanno determinato abbassamenti fondali differenziati. Il fenomeno, peraltro non raro nel centro storico di Modena, ha scaricato alcune colonne dell'edificio, sovraccaricando conseguentemente le altre colonne murarie. Alcune delle

colonne sovraccaricate erano state indebolite da uno scasso praticato in passato per allocarvi il pluviale di scarico delle acque bianche. Un intervento di somma urgenza ha evitato il collasso delle colonne per 2° modo. L'intervento è consistito nella cinturazione in composito a fibra di carbonio delle colonne, unitamente all'applicazione di nastri verticali anch'essi in composito (le colonne sono intonacate, per cui l'intervento finito non è percettibile). Per maggiore sicurezza, l'intervento ha previsto l'iniezione del pluviale incassato, avendolo by-passato con un pluviale nuovo; come pure ha previsto l'iniezione della base fondale delle colonne.

avvalersi della dissipazione isteretica connaturata col campo inelastico. La struttura non subisce danni. La costruzione non subisce danni purché la rigidità laterale della struttura non sia troppo piccola, altrimenti si danneggiano i componenti portati. Overo, un sisma può essere assorbito quasi totalmente per dissipazione isteretica, facendo fuoriuscire la struttura dal campo elastico per tutto l'evento sismico. L'energia cinetica è così dissipata per inelasticità, praticamente senza avvalersi di alcuna capacità resistente alle forze. La costruzione — sia la struttura sia i componenti non-strutturali — subisce enormi danni ma sopravvive all'evento anche in questo caso.

La dissipazione isteretica è il rovescio favorevole di un fenomeno sfavorevole: il danneggiamento. Dissipare per isteresi significa consumare energia per effetto di fenomeni degradanti: slittamenti nei reticoli molecolari, dislocazioni all'interno del materiale, micro-fessurazioni, fessurazioni, abrasioni, sgranamenti. Non solo. La dissipazione rimpiazza la resistenza ma non il calo di rigidità che la minore resistenza spesso comporta. Ne può conseguire un eccessivo danneggiamento dei tamponamenti. Per cui, maggiore (minore) è la frazione isteretica con la quale il sisma viene consumato, maggiore (minore) è il danneggiamento comportato, fer-

mo restando la sopravvivenza della costruzione al sisma. La compensazione della componente resistiva (dissipazione per smorzamento viscoso) con la componente isteretica (dissipazione per deformazioni anelastiche) è funzionale per assorbire i sismi di maggiore impegno: sisma estremo e sisma catastrofico. Conta solo che la costruzione sopporti tali sismi, non come sopravvive. Il progetto sfrutta allora il fatto che, maggiore è la componente isteretica, minore è l'onere strutturale in termini di ingombri e di costi.

La compensazione della componente resistiva con la componente isteretica non è invece funzionale ai fini dell'assorbimento dei sismi di servizio. La costruzione deve infatti assorbire i sismi più frequenti senza danneggiarsi; non basta che sopravviva all'evento. Il livello del sisma sino al quale garantire l'assenza di danneggiamento è il risultato di un bilancio tra oneri di costruzione — ingombri e costo — e oneri di riparazione sismica lungo la vita di servizio. Il progetto deve allora considerare che una fissata aliquota del sisma di maggiore impegno è assorbita per capacità resistente alle forze, mentre l'aliquota rimanente per dissipazione isteretica. Ciò condiziona il progetto strutturale.

Osservato che la capacità sismica è data dalla composizione della dissipazione viscosa e isteretica, occorre definire un metodo atto a trattare tali due componenti. L'ipotesi di seguito esposta consente di governare tali comportamenti in una struttura in C.A. o in acciaio.

Alla struttura data si associa un sistema indefinitamente elastico, a un grado di libertà, avente periodo proprio pari al periodo fondamentale della struttura (a pari smorzamento). Si considera un certo sisma, definito dal suo accelerogramma. Si applica tale accelerogramma al sistema elastico a un grado di libertà. Si considera quindi lo spostamento massimo prodotto da tale accelerogramma. Si denomina elastico tale spostamento. Interessano gli effetti prodotti dal sisma considerato sulla costruzione data. Si suppone che la struttura, sottoposta all'accelerogramma sismico, esibisca una risposta strutturale contenuta nel campo elasto-plastico. Si assume cioè che nessun componente strutturale sconfini nel ramo repentinamente degradante della propria risposta azione — spostamento. Per cui, alcuni elementi sono in campo elastico mentre gli altri sono in campo plastico, sotto il sisma considerato. Al limite, tutti gli elementi — e quindi l'intera struttura — sono in campo plastico. L'essenziale è che il sisma considerato non determini alcuna rottura, come pure che nessun componente strutturale percorra il ramo sensibilmente degradante della propria risposta azione-spostamento.

Si considera il massimo spostamento strutturale dovuto all'azione dell'accelerogramma sulla costruzione data. Si denomina anelastico tale spostamento.

L'ipotesi è la seguente. Il massimo spostamento anelastico coincide col massimo spostamento elastico.

Conseguenza dell'ipotesi. Si consideri un sisma, espresso dall'accelerogramma. Si imprima alla struttura uno

spostamento pari al massimo spostamento elastico prodotto dall'accelerogramma. Se tale spostamento impresso mantiene tutti i componenti strutturali in campo elasto-plastico, la costruzione sopporta il sisma.

L'ipotesi assunta è del tutto in linea col senso fisico.

La fase elastica è drasticamente più rigida della fase elasto-plastica. La maggiore rigidità comporta minori spostamenti sismici.

La fase elasto-plastica è drasticamente più dissipativa della fase elastica, poiché tale è la dissipazione isteretica rispetto alla dissipazione viscosa. Per di più la fase elasto-plastica amplifica assai meno l'accelerazione sismica al piede della costruzione, poiché l'amplificazione cala al crescere del periodo (a parte la zona iniziale dello spettro) e il periodo si abbatte in fase elasto-plastica, essendo associato alla rigidità tangente. La maggiore capacità dissipativa e la minore amplificazione comportano minori spostamenti sismici.

Tanto maggiori sono le escursioni plastiche dalla risposta, rispetto al limite elastico, tanto maggiori sono le dissipazioni, e tanto minore è l'energia sismica trasferita dal suolo all'edificio; per contro, tanto minore è la rigidità con la quale la struttura si oppone al moto. E viceversa.

Tirando le somme, gli effetti tendono a compensarsi: il massimo spostamento anelastico tende a coincidere con il massimo spostamento elastico.

Occorre precisare il grado di attendibilità di tale ipotesi. L'ipotesi è realistica per strutture aventi periodo fondamentale maggiore del periodo dominante del sisma (o quantomeno delle amplificazioni dovute al sisma). Se il periodo fondamentale della struttura è minore del periodo dominante del sisma, gli spostamenti anelastici sono moderati, ma moderata è pure l'amplificazione. In questo intervallo di periodi, i due spostamenti differiscono, ma l'errore è comunque percentualmente moderato. L'ipotesi rimane quindi accettabile. Se il periodo fondamentale della struttura è invece nell'intorno del periodo dominante del sisma (e/o delle amplificazioni dovute al sisma), l'ipotesi è meno realistica in senso non-conservativo: gli spostamenti anelastici tendono a essere maggiori degli spostamenti elastici. Esiste quindi una gamma di casi ove l'ipotesi è meno veritiera. Tuttavia, l'ipotesi può rimanere viva anche in tali casi: basta ritoccare i coefficienti che traducono l'ipotesi nella pratica. **Questo fa la normativa: i fattori di struttura (q) proposti dalla normativa tengono conto anche dei suddetti aspetti.**

Due sono gli stati elasto-plastici possibili all'acme dello spostamento:

> la plasticità è esibita dalle strutture orizzontali mentre le escursioni plastiche delle strutture verticali sono, al più, moderate: la costruzione sopravvive allo sciame sismico, oltre che alla singola scossa massima. Questo stato è confacente per assorbire il sisma estremo.

> la plasticità è esibita anche dalle strutture verticali, le quali sconfinano largamente in campo plastico: la costruzione so-

prative alla scossa che ha dato luogo allo spostamento anelastico, ma nessuna garanzia può essere fornita circa la sua sopravvivenza allo sciame sismico. Questo stato rappresenta il limite per assorbire la scossa catastrofica.

In definitiva, l'ipotesi di uguaglianza tra spostamento anelastico ed elastico consente di governare la risposta sismica di una costruzione, tenendo conto sia della capacità resistente sia della capacità isteretica. L'ipotesi consente dunque di rimpiazzare un calcolo elasto-plastico (quindi non-lineare) con un più semplice calcolo elastico (quindi lineare). L'ipotesi è quindi fondamentale anche sul piano operativo.

Capacità sismica di una struttura in muratura

La capacità sismica di una muratura deriva, oltre che dalla geometria, dalle caratteristiche meccaniche, compresa la resistenza a trazione, diversamente dalla capacità standard che invece deriva solo dalla geometria. Il ruolo decisivo delle proprietà meccaniche comporta che la capacità sismica di una muratura debba essere quantificata avvalendosi anche della meccanica dei solidi deformabili, diversamente dalla capacità standard.

Più nello specifico, la componente della capacità che assorbe il sisma per resistenza alle forze (dissipazione viscosa) viene determinata mediante analisi tensionali lineari. Ciò semplifica il calcolo; ma solo purché l'analisi sismica sia in grado di determinare l'altra componente della capacità, ossia quella che assorbe il sisma per dissipazione isteretica (inelasticità). Tale componente è misurata dal fattore di struttura q .

Sul piano dei fatti, dunque, l'analisi sismica di una muratura può essere condotta per via dinamica modale, mediante un codice di calcolo agli elementi finiti; o anche per via statica-lineare (pure in questo caso occorre spesso un codice di calcolo). Si ribadisce che l'attendibilità di un tale calcolo lineare è la diretta conseguenza dell'attendibilità con cui la capacità dissipativa inelastica (isteretica) viene quantificata, ossia della precisione con cui il fattore di struttura q è stimato.

Quanto sopra è del tutto in linea con l'analisi sismica di una qualsiasi struttura; ma solo nelle generalità.

La capacità dissipativa isteretica della muratura presenta tre aspetti peculiari, che connotano il progetto e l'analisi nella sostanza.

I) La dissipazione del c.a. e dell'acciaio deriva dalla fase plastica, per la quasi totalità. Al contrario, le murature non sono dotate di una significativa fase plastica. Questa lacuna sembra additare le murature come strutture poco dissipative.

Le realtà è invece diversa. La risposta inelastica di una muratura esibisce fessurazioni, abrasioni, sgranamenti, frizioni, dislocazioni di blocchi e giunti. Tali comportamenti inelastici consumano una considerevole quantità di energia, pur non essendo ascrivibili a plasticità (quest'ultima consistente, come noto, in slittamenti nei reticoli molecolari e in dislocazioni, all'interno del materiale). I suddetti fenomeni garantiscono una consistente capacità dissipativa inelastica,

in ragione della quale anche le strutture murarie possono assorbire una parte del sisma per dissipazione isteretica. La ricerca scientifica non ha ancora pienamente definito, e nemmeno compreso, le capacità dissipative delle murature. In particolare non è stato ancora stabilito se l'ipotesi di uguaglianza del massimo spostamento elastico e anelastico vale anche per le murature.

II) Il collasso di una costruzione è la desinenza di un meccanismo cinematico. Un meccanismo presuppone la labilità. La labilità implica l'isolamento sismico della costruzione dal suolo. Il terreno cessa dunque di trasferire energia alla costruzione, durante lo stato di meccanismo.

Una costruzione in muratura che ha attinto la condizione di meccanismo differisce sensibilmente da una costruzione in c.a. o in acciaio anch'essa in condizione di meccanismo. Il meccanismo di una costruzione muraria si attiva ed evolve senza implicare alcun sensibile degrado. Più nel dettaglio, il degrado è modesto se in campo elastico i maschi murari si deformano in condizione di mensola. Se i maschi si deformano in condizione di doppio incastro, invece, la fessurazione determina una decurtazione di portanza anche del 50 % (mediamente del 25 - 35 %). Ma poi il degrado evolve assai lentamente e quindi la portanza rimane pressoché costante per un'amplessima escursione (la curva "forza orizzontale-spostamento orizzontale" ha derivata prima negativa, ma prossima a zero, e pressoché costante).

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 degrado progressivamente crescente e quindi la portanza si abbatte repentinamente (derivata prima decisamente negativa, e progressivamente calante). In conclusione, la capacità sismica di una costruzione in muratura può avvalersi anche di una cospicua fase di meccanismo, diversamente della capacità sismica di una costruzione in c.a. o in acciaio dove invece il meccanismo s'innescava quando la gran parte della capacità è ormai compromessa.

III) Ricordando che i quadri fessurativi prodotti dai carichi non interessano le verifiche statiche, si potrebbe pensare di estendere la cosa alla sismica. L'estensione non è invece accettabile.

Si è già commentato che la dissipazione è sempre il converso di un danneggiamento. C'è però di più, per le murature. Le capacità dissipative di una muratura, e ancor più le capacità isolanti, comportano e presuppongono profondi ed estesi plessi fessurativi, e implicano dislocazioni nonché crisi locali. L'inelasticità provocata dalla dissipazione e pertanto intollerabile in servizio nella muratura, al contrario dell'inelasticità provocata dai carichi standard nella muratura. Talvolta, i dissesti comportati dal meccanismo non sono nemmeno tollerabili al fine dello stato ultimo, ma possono essere accettati solo a fronte del sisma catastrofico.

Tirando le somme relativamente ai punti su esposti, si è detto (I punto) che non esiste un supporto teorico adeguato a stabilire se le capacità dissipative delle murature garantiscono l'ipotesi che il massimo spostamento elastico e anelastico siano uguali. L'eventuale minore capacità dissipativa di una struttura muraria rispetto a una struttura in c.a. o in acciaio, peraltro tutta da dimostrare, tende a maggiore spostamento anelastico. Di converso (II punto), l'isolamento sismico connaturato con la fase di meccanismo tende a minorare lo spostamento anelastico. L'ipotesi di uguaglianza può dunque sussistere anche per le murature. La labilità di un meccanismo murario è da intendersi in senso tecnico. In realtà, lo spostamento rigido di un componente murario non può avvenire liberamente, ma comporta una certa dissipazione. Ciò riduce l'isolamento sismico dell'ele-

mento (II punto); però mantiene vive talune capacità dissipative (I punto). La condizione reale di meccanismo aggiunge dunque da una parte ma toglie dall'altra, allo spostamento anelastico.

La muratura ammette dunque l'ipotesi di uguaglianza dello spostamento elastico e anelastico, a patto di avvalersi della fase di meccanismo; ma la condizione è accettabile poiché la fase di meccanismo non è degradante nella muratura.

La posizione è duale rispetto al c.a. e all'acciaio. Questi materiali strutturali non abbisognano della fase di meccanismo affinché l'ipotesi sia valida (I punto); e non potrebbe essere diversamente poiché la fase di meccanismo è considerevolmente degradante nel c.a. e nell'acciaio e quindi non può essere sfruttata.

Accettare una dissipazione inelastica in servizio (III punto) condannerebbe la costruzione a subire danneggiamenti profondi con eccessiva frequenza. Questo fatto pone i requisiti prestazionali sismici in dissimmetria rispetto ai requisiti prestazionali standard della muratura. Mentre i requisiti prestazionali standard non includono gli stati limite d'esercizio, infatti, i requisiti prestazionali sismici della muratura li includono. Occorre dunque verificare che la sopravvivenza ai sismi frequenti avvenga solo per resistenza (dissipazione viscosa), senza chiamare in causa la dissipazione inelastica (isteretica). Si giustifica così l'apposizione di uno stato limite d'esercizio, come osservato a proposito della domanda. Gli stati limite sismici delle murature includono dunque l'esercizio – chiamandolo stato limite di danno – diversamente dagli stati limite standard delle murature, ma parimenti agli stati limite sismici del c.a. e dell'acciaio.

Per inciso, gli stati limite sismici delle murature esistenti includono l'evento catastrofico, mentre gli stati limite delle altre strutture ex-novo lo sottintendono.

SULLA SICUREZZA STRUTTURALE DELLE MURATURE

Le peculiarità della domanda e della capacità connotano la sicurezza strutturale di una muratura, e di conseguenza condizionano il progetto di consolidamento e di adeguamento.

Azioni standard

Il fatto che le strutture in muratura siano governate da leggi geometriche, spiega perché le costruzioni in muratura non abbiano avuto bisogno di teorie meccaniche per percorrere la loro formidabile storia; come pure, perché lo sviluppo della meccanica strutturale abbia sempre ricevuto pochi stimoli finché non sono comparso l'acciaio da carpenteria e il c.a. Per di più, l'evoluzione della meccanica strutturale non apportò nessun significativo avanzamento alle costruzioni in muratura ex novo.

Si approfondiscono le precedenti osservazioni. I manufatti murari seguono leggi che possono essere agevolmente intuite e perfezionate sul campo, e che possono essere facilmente tramandate. Queste conoscenze empiriche costituivano la perizia dei costruttori del passato (figura 3).

Commenti all'Ordinanza sismica n° 3274

Le nuove normative sismiche hanno portato la protezione sismica a un livello adeguato, laddove le vecchie normative proteggevano insufficientemente dai terremoti. Questa prerogativa deriva dalla nuova zonazione, più realistica di quella precedente; ma deriva anche da metodi avanzati per il progetto e la verifica delle costruzioni civili, più confacenti a governare il comportamento sismico delle strutture rispetto ai metodi delle precedenti normative. Questo vale particolarmente per il nuovo. Invece, il capitolo sulle murature è ancora immaturo in taluni passaggi.

La versione cogente dell'Ordinanza impone un fattore di struttura di valore modestissimo. Tale valore sembra sostenere l'idea che l'assenza di una fase plastica penalizzi notevolmente la capacità dissipativa delle murature.

L'Ordinanza applica le analisi statiche non-lineari in modo da ammettere tacitamente che l'ipotesi di uguaglianza del massimo spostamento elastico e anelastico valga per le murature così come per il c.a. e l'acciaio. Ciò implicitamente assegna alle murature una capacità dissipativa paragonabile a quella delle strutture in c.a. e in acciaio.

Le due posizioni sono evidentemente in contraddizione ma, soprattutto, nessuna delle due è probabilmente sostenibile.

Riguardo al fattore di struttura, le murature possiedono cospicue capacità dissipative e quindi meritano un fattore di struttura di valore maggiore a quello imposto. In effetti, l'aggiornamento dell'Ordinanza, al momento in bozza, rivede questo aspetto, esibendo fattori di struttura decisamente maggiori rispetto alla versione attualmente cogente.

Riguardo alle analisi statiche non-lineari, si è osservato che l'ipotesi di uguaglianza del massimo spostamento elastico e anelastico è sostenibile per le murature, però a patto che la capacità sismica includa la fase di meccanismo. Tuttavia, l'Ordinanza sismica non contempla adeguatamente la fase di meccanismo delle murature, in quanto limita lo spostamento massimo di un pannello murario e limita il calo della portanza di un pannello murario rispetto al picco di portanza. Sennonché tali limiti sono entrambi incongruenti con la fase di meccanismo. In altri termini, la muratura non può sfruttare proficuamente la fase di meccanismo, secondo l'Ordinanza sismica.

Un altro aspetto criticabile è la legge dei maschi murari, consigliata per le analisi non-lineari: comportamento elastico-perfettamente plastico; quindi legge forza-spostamento di tipo bilineare, con secondo ramo orizzontale. In realtà il ramo post-elastico è di propagazione delle fessure e quindi la sua pendenza dipende dalla geometria e dalla tessitura muraria, rispettivamente, dei maschi murari, delle fasce di piano e dei pannelli di nodo. I suesposti passaggi normativi meritano forse qualche piccolo miglioramento.

Le volte permettono di esemplificare il concetto. Esiste un rapporto limite superiore tra la luce e lo spessore, per ciascuna tipologia voltata. Per esempio, tale rapporto vale circa 19.5 nell'arco semicircolare, ovvero nella volta a botte non rinfiata (figura 6). Un arco con un rapporto luce diviso spessore superiore a 19.5 non può essere disarmato dalle centine. Gli archi con un rapporto superiore a 19.5, peraltro assai numerosi, furono disarmati solo dopo aver gettato il rinfiato. Il rinfiato non può essere rimosso in tali archi, ovviamente. La minima profondità di rinfiato necessaria per disarmare la struttura, rapportata alla freccia dell'arco, dipende solo dal predetto rapporto tra la luce e lo spessore. Anche il livello minimo di rinfiato, dunque, segue una legge geometrica.

Lo spessore di un arco o di una volta è un multiplo dei lati del mattone. Conviene allora ragionare a parità di spessore. La portanza della volta è tanto maggiore, quanto minore dell'unità è il rapporto tra la luce effettiva e la massima luce consentita dallo spessore. Il rinfiato aumenta molto la luce massima consentita dallo spessore, e quindi diminuisce il predetto rapporto.

Anche il rapporto altezza-spessore del piedritto presenta un limite superiore, se la volta non ha la catena all'imposta; e anche tale limite dipende dal rapporto luce-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 esclusivamente ponderali. Come tali sono gestibili geometricamente.

Tutte le volte geometricamente simili garantiscono la medesima sicurezza. Pertanto, un singolo caso concreto funge da modello a infiniti casi. Una volta può essere realizzata ignorando i limiti dei rapporti che ne governano la portanza. Basta riprodurre gli stessi rapporti geometrici delle volte esistenti. Una volta in scala, maggiore o minore, rispetto a una volta esistente garantisce la portanza; per di più consente di essere realizzata reiterando la medesima tecnica costruttiva.

La storia delle costruzioni è contrassegnata da tale aspetto. I costruttori del passato generalmente procedevano per similitudine con l'esistente. Talvolta, qualche costruttore ardito realizzava invece un manufatto che non replicava l'esistente, concependo così un'opera innovativa. Se il prototipo sopravviveva al varo, tale costruzione diventava un nuovo modello, duplicabile nella prassi.

Rispetto ai costruttori del passato, meno brillanti sono quei moderni strutturisti che correlano la portanza delle murature ai parametri meccanici, in particolare alle tensioni, reiterando acriticamente procedure progettuali e calcolative proprie delle costruzioni in C.A. e in acciaio.

Le costruzioni in C.A. e in acciaio si pongono in posizione diversa. Tali costruzioni sono governate da leggi meccaniche, oltre che geometriche. Non seguendo la proporzione geometrica, il comportamento delle strutture in acciaio o in C.A. non può essere acquisito soltanto sul campo. L'esperienza, il cui ruolo è comunque imprescindibile, deve integrarsi alla teoria. Non è un caso che il progresso della meccanica



strutturale abbia ricevuto il maggiore impulso con l'avvento delle costruzioni in acciaio e in C.A..

Quanto sopra giustifica, posto che ce ne fosse bisogno, la confluenza della meccanica delle murature nella geometria. Non giustifica, invece, l'automatica sussistenza delle condizioni di sicurezza strutturale per le costruzioni storiche.

Le volte si prestano ancora per approfondire l'ultimo concetto su espresso, fermo restando la sua generalità. I costruttori del passato affermavano che, se una volta sopravvive al disarmo, essa garantisce la staticità per i secoli a venire. L'affermazione non è corretta. Non lo è per le strutture voltate e ancor meno lo è per le strutture verticali.

Anche ai giorni nostri, in realtà, si assiste ad atteggiamenti analoghi sulle costruzioni storiche. Talvolta le posizioni vengono addirittura esasperate, affermando che l'evoluzione naturale ha selezionato il costruito, per cui i manufatti giunti ai giorni nostri, non solo testimoniano la felice concezione costruttiva con la sopravvivenza al varo ma certificano l'attuale idoneità strutturale con il lungo stato di servizio. Tali prese di posizione sono sconsiderate anche in zona non sismica.

Si ritorna all'esempio delle strutture voltate, ma si potrebbe adottare un qualsiasi altro esempio.

Molte volte avevano una portanza sufficiente per auto-sostenersi e per portare i carichi permanenti, ma avevano una moderata portanza ai sovraccarichi accidentali. Tali volte, o sono state cimentate da sovraccarichi onerosi, e quindi sono collassate; oppure sono ancora in servizio, e quindi rappresentano un pericolo.

L'affermazione è in linea con la storia delle costruzioni. I fallimenti strutturali di volte da lungo tempo in servizio, ancorché minoritari rispetto ai successi, sono stati comunque in numero non trascurabile. Questo smentisce l'idea che il rischio strutturale si esaurisca all'atto del varo. Le costruzioni giunte ai giorni nostri non possono pertanto essere dichiarate sicure a-priori, se non in senso vagamente statistico.

6. Ponte ad arco in muratura (Rio Magnoia - Imola): la volta a botte ha uno spessore pari a 1/19 della luce. La geometria della volta è dunque al limite (l'arco di volta è a tutto sesto).

I muri di contenimento del rinfiato esercitano la loro azione solo ai bordi della volta: la portanza ultima di una muratura non è in grado avvalersi della ripartizione trasversale. Fatte salve le zone di bordo della volta, quindi, il margine di sicurezza dell'arco deriva solo dal rinfiato (riempimento della volta). L'arco senza rinfiato si collocherebbe invece sull'equilibrio limite. La rimozione del rinfiato comporterebbe un disturbo la cui conseguenza sarebbe lo spostamento dell'equilibrio al di là del limite, innescando il meccanismo di figura 1b.

7. Ex-Filanda sita a Caraglio (Cuneo), trasformata in edificio comunale aperto al pubblico. L'analisi sismica condotta usando il coefficiente di struttura di normativa comportava un intervento di adeguamento esorbitante, e come tale improponibile. L'analisi statica non-lineare ha invece consentito di progettare un intervento ragionevole. Tra l'altro, l'analisi statica non-lineare ha giustificato la rimozione delle catene dei sistemi di volte a crociera.

A ciò si aggiunge l'adattamento del costruito alle esigenze attuali. L'uso moderno comporta carichi maggiori che in passato. I carichi moderni impegnano le strutture esistenti ad un livello mai raggiunto in passato: livello che può essere intollerabile. Inoltre l'uso moderno implica frequentemente modifiche architettoniche. La moderna configurazione può causare stese di carico diverse che in passato: distribuzioni non-simmetriche ovvero concentrazioni di carico, alla cui sopportazione le costruzioni murarie sono meno avvezze. Come pure, può determinare riduzioni della capacità strutturale: aperture praticate nelle murature, rimozione di catene, eliminazione di masse permanenti. L'uso moderno sottintende quindi un nuovo cimento strutturale alle costruzioni storiche. Conseguentemente, l'adattamento delle costruzioni storiche agli usi moderni comporterebbe una nuova selezione naturale, se condotto senza analisi preventive. Una nuova selezione naturale del costruito sarebbe ovviamente in antitesi con l'istanza di protezione civile, ancor prima che con l'istanza conservativa. La meccanica delle murature offre quell'alternativa alla selezione naturale che non esisteva in passato. Il costruito deve quindi essere strutturalmente verificato a fronte dell'uso e degli adattamenti attuali, e, nel caso, deve essere adeguato.

Azioni sismiche

Le resistenze meccaniche, specie quella a trazione, recitano un ruolo importante nella sismica. L'influenza della resistenza è trattabile solo mediante la meccanica strutturale. Perciò, il comportamento sismico delle costruzioni in muratura non è governabile esclusivamente con la geometria e soprattutto non lo è affatto con criteri di proporzione con l'esistente (figura 7).

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 storiche. Ciò non significa che le costruzioni arrivate ai giorni nostri abbiano soltanto approfittato di fortunate coincidenze costruttive. Una costruzione muraria realizzata secondo le re-



gole dell'arte ha maggiore probabilità di sopravvivenza anche ai terremoti di maggiore impegno, benché tali regole non contemplino esplicitamente la sismica.

La longevità di un edificio non comprova l'attuale adeguatezza sismica. Molti edifici storici sono sismicamente inadeguati pur avendo attraversato i secoli. L'affermazione rimane valida pure per gli edifici che sono sopravvissuti a sismi anche violenti. Tre sono le ragioni:

► una costruzione può essere arrivata ai giorni nostri senza aver sopportato azioni sismiche onerose, sebbene la sua zona sia stata investita da terremoti violenti. Questo per due motivi. Un'elevata magnitudo del sisma non comporta necessariamente un'accelerazione parimenti elevata al piede della costruzione. Una cosa è l'energia rilasciata durante il terremoto, la cui misura è appunto la magnitudo. Ben altra cosa è l'azione sismica al piede. Questa dipende del terreno attraversato dal terremoto, che funge da filtro alle onde sismiche nel loro tragitto dall'ipocentro al piede. Ragion per cui lo stesso terremoto può comportare un'azione impegnativa in un sito e meno impegnativa in un altro sito della stessa zona. Il secondo motivo è che un'elevata accelerazione al piede della costruzione non comporta necessariamente una parimenti elevata sollecitazione nella struttura. Una cosa è l'azione sismica, la cui misura è appunto espressa dall'accelerogramma al piede. Ben altra cosa è la sollecitazione indotta dall'azione sismica sulla costruzione, che dipende da tre ulteriori circostanze.

Il contenuto in frequenza dell'accelerogramma in rapporto alle prime frequenze naturali della costruzione: la stessa azione sismica può produrre effetti esiziali in certe tipologie (per esempio su edifici bassi), ed effetti moderati in altre tipologie (per esempio su edifici alti).

La seconda circostanza è rappresentata dalla durata del sisma: dieci-quindici secondi in più possono essere fatali.

Infine, la direzione della componente orizzontale al piede: lo stesso accelerogramma, stessa intensità, stesso contenuto spettrale e stessa durata, sulla stessa costruzione può avere effetti distruttivi in una direzione, mentre effetti moderati in un'altra direzione. Insomma, l'edificio può essere sopravvissuto a sismi violenti in senso generale, ma non particolarmente impegnativi per l'edificio stesso. Non per questo un sisma oneroso per l'edificio è da escludersi in futuro.

► Il naturale invecchiamento del costruito implica che, a sopportare lo stesso sisma, ora vi sia un edificio più debole che nei secoli addietro.

► Le masse attuali possono essere maggiori che in passato, o peggio distribuite.

