

ALLEGATO B

L'analisi strutturale delle costruzioni storiche in muratura

Al fine della corretta modellazione meccanica di una costruzione storica in muratura, è opportuno conoscere il funzionamento dei diversi elementi che la compongono: il materiale muratura, il suo utilizzo nei diversi elementi costruttivi e le modalità di connessione tra questi nella formazione dell'intera costruzione.

La muratura

La muratura è un materiale composito costituito dall'assemblaggio di elementi, che possono essere naturali (pietre erratiche, a spacco, sbazzate o squadrate) o artificiali (laterizi). Le variabili caratteristiche sono: il materiale costituente gli elementi (pietra, laterizio, terra cruda, ecc., usati anche in modo misto); le dimensioni e la forma degli elementi; la tecnica di assemblaggio (a secco o con giunti di malta); la tessitura, ovvero la disposizione geometrica degli elementi nel paramento murario; ulteriori dettagli (listatura, uso di scaglie, ecc.). La risposta meccanica di questo materiale composito dipende da tutte queste variabili.

Gli elementi hanno in genere un comportamento elasto-fragile, con una resistenza a trazione minore rispetto a quella a compressione, ma comunque significativa. La malta presenta un comportamento elasto-fragile in trazione, con resistenza molto inferiore a quella degli elementi ed, in assoluto, molto bassa; in compressione e taglio il suo comportamento è duttile e fortemente non lineare. La risposta meccanica dei giunti è fortemente influenzata dall'attrito e presenta forti non linearità. Le caratteristiche meccaniche della muratura dipendono non solo dai parametri di resistenza e deformabilità dei materiali costituenti, ma anche dai loro valori relativi (in particolare, i diversi moduli elastici degli elementi e della malta).

Nella muratura gli elementi sono disposti per strati successivi, in genere ad andamento orizzontale; ciò determina la formazione di giunti principali continui e di giunti secondari, al contatto tra due elementi adiacenti, discontinui in quanto opportunamente sfalsati (ingranamento). L'orientamento dei giunti principali è in genere ortogonale alle sollecitazioni di compressione prevalenti, al fine di ottimizzare il comportamento della muratura sotto carichi di esercizio. Tuttavia, i giunti principali diventano potenziali piani di discontinuità, con conseguenze sulla resistenza del solido murario, in presenza di sollecitazioni di trazione e taglio dovute all'azione sismica. In questi casi l'attrito, generato sui giunti dalle tensioni normali di compressione associate alle forze inerziali, contribuisce alla resistenza ed alla dissipazione.

L'ingranamento nel piano della muratura influisce sul comportamento a taglio; in generale, esso è funzione del rapporto medio tra la base e l'altezza degli elementi e dei criteri di sfalsamento dei giunti secondari. La costituzione della muratura nella sezione influenza la resistenza a compressione e il comportamento fuori dal piano; nel caso di murature a due o più paramenti, parametro è significativa la presenza di elementi passanti che creino una connessione tra i due paramenti esterni (diatoni).

La risposta sismica di una struttura in muratura non dipende unicamente dal materiale impiegato, ma anche da diversi aspetti tecnologici, ed in particolare dai collegamenti tra gli elementi strutturali. Le costruzioni storiche in muratura, infatti, sono generalmente costituite da sistemi più o meno complessi di pareti e orizzontamenti (solai lignei, volte). Le pareti possono essere considerate come elementi strutturali bidimensionali, che per la scarsa resistenza a trazione della muratura presentano una risposta molto diversa ad azioni orizzontali nel piano e fuori dal piano. La qualità della risposta globale è funzione sia del corretto dimensionamento delle pareti sia della capacità del sistema di trasferire le azioni tra tali elementi (connessione tra le pareti verticali; connessione dei solai alle pareti). L'efficacia dei collegamenti tra pareti verticali è principalmente legata all'ammorsamento nelle zone di connessione; inoltre, un contributo significativo può derivare dalla presenza di catene metalliche o di altri dispositivi puntuali. L'efficacia dei collegamenti tra le pareti e i solai è funzione del sistema di appoggio (dimensione della superficie d'appoggio, sagomatura della testa delle travi, connessioni metalliche).

La modellazione strutturale

La modellazione e la verifica delle strutture storiche in muratura è quindi un problema complesso per la difficoltà di considerare adeguatamente la geometria, i materiali e le condizioni di vincolo interno. A tutto questo si aggiunge l'evolversi delle vicende storiche attraverso le quali si è formata e trasformata la costruzione; inoltre, spesso questa è inserita in agglomerati urbani complessi, nei quali è difficile distinguere edifici isolati o unità costruttive strutturalmente autonome. Questo rende problematica la scelta della scala della modellazione ed, inoltre, la definizione dei confini spaziali e dei vincoli della struttura.

Il riconoscimento della struttura all'interno della costruzione è particolarmente difficoltoso, in quanto dipende, oltre che dalla sua storia costruttiva, dai carichi applicati e dagli stati di danneggiamento presenti. Quindi, per la definizione di modelli strutturali è spesso necessario disporre di legami costitutivi che considerino il comportamento fortemente non lineare della muratura.

La modellazione strutturale di una costruzione storica in muratura richiede sempre un'approfondita conoscenza (indagine storica, rilievo strutturale e tecnologico, indagini diagnostiche), al fine di scegliere:

- la scala spaziale, ovvero quale parte della costruzione è opportuno modellare;
- lo schema strutturale, che se possibile deve essere riconosciuto o verificato dalle vicende passate;
- il tipo di analisi, condizionato dallo schema strutturale ma anche dalle finalità dell'analisi stessa.

La scelta della scala della modellazione è condizionata da diversi fattori. Nel caso di una costruzione inserita in un contesto di aggregato urbano, sarebbe necessario considerare questo integralmente, ma spesso ciò è improponibile, sia per la difficoltà di accedere e conoscere le parti adiacenti, sia per la complessità e gli oneri computazionali.

Nella definizione dello schema strutturale è opportuno considerare i seguenti fattori: la geometria della struttura; l'interazione tra struttura ed ambiente; le fasi di costruzione e trasformazione; il danneggiamento.

L'analisi della geometria tridimensionale della struttura è finalizzata ad individuare possibili simmetrie o direzioni significative per il suo comportamento globale. In base a queste osservazioni, infatti, spesso la struttura può essere notevolmente semplificata e i suoi gradi di libertà ridotti. Spesso è possibile scegliere sezioni significative della struttura rispetto alle quali svolgere un'analisi piana (es.: la sezione trasversale della navata di una chiesa). Nel caso di strutture simmetriche, è possibile modellare solo una parte della costruzione, pur di assegnare opportune condizioni di vincolo (es.: analisi di metà struttura, nel caso di un sistema arco-piedritto, o di uno spicchio di cupola, grazie alla sua assialsimmetria).

L'interazione tra la struttura e l'ambiente è fondamentale nel caso di costruzioni storiche caratterizzate da un grande rigidezza e massa (è il caso, per esempio, di un arco trionfale); in questi casi può risultare determinante considerare la deformabilità del terreno di fondazione, anche se di ottime caratteristiche, data la notevole rigidezza della struttura.

L'individuazione delle fasi di costruzione e trasformazione (es.: annessioni di nuovi corpi di fabbrica, sopraelevazioni, modifiche interne con demolizioni parziali e ricostruzioni) è fondamentale per due ragioni. In primo luogo gli stati tensionali e deformativi nei diversi elementi dipendono da tale sequenza; tali aspetti possono essere investigati attraverso opportuni metodi di analisi, anche con modelli costitutivi lineari. Inoltre, le parti aggiunte successivamente alla costruzione, anche se appaiono in continuità con il complesso della costruzione, sono spesso strutture in qualche modo indipendenti; è quindi opportuno considerare il corretto grado di collegamento tra le diverse parti del complesso strutturale. In particolare, nel caso degli aggregati complessi nei centri storici, la corretta individuazione delle celle originarie, e distinzione da quelle di accrescimento e di intasamento, consente una più corretta definizione dei vincoli nel modello.

Il riconoscimento dei dissesti presenti nella struttura, attraverso il rilievo del quadro fessurativo e delle deformazioni, è un fattore determinante per la scelta delle strategie di modellazione e di analisi di una costruzione in muratura. Nel caso di stati lesionativi importanti, questi dovranno essere considerati nel modello e, in alcuni casi, la presenza di un meccanismo di dissesto chiaramente riconoscibile, può portare ad identificare il comportamento della costruzione e consentire una modellazione locale di dettaglio.

I metodi di analisi

La complessità delle costruzioni in muratura, costituite da elementi bi e tridimensionali, suggerirebbe il ricorso al metodo degli elementi finiti, in quanto teoricamente in grado di modellare la risposta di geometrie complesse, in condizioni di massima generalità nei vincoli e nei carichi. Nel caso di costruzioni massive è possibile ricorrere ad una modellazione solida tridimensionale degli elementi strutturali; più efficacemente, nel caso frequente di costruzioni costituite da pareti, volte, cupole, risulta spesso conveniente schematizzare la struttura come elementi bidimensionali (con comportamento a piastra o a membrana), in grado di simulare adeguatamente il comportamento nel piano e fuori dal piano. Il comportamento non lineare del materiale costituisce tuttavia un aspetto critico nella modellazione delle costruzioni in muratura.

L'analisi elastica ad elementi finiti può fornire indicazioni utili per una preliminare interpretazione del comportamento. In essa, è indispensabile modellare accuratamente il grado di connessione tra gli elementi (ad esempio, il vincolo interno tra gli elementi di una struttura lignea o tra questi e la struttura muraria di appoggio può essere di difficile identificazione e, in taluni casi, anche unilatero). Inoltre, è opportuno considerare le diverse fasi costruttive della struttura (ad esempio, si pensi allo stato tensionale nella muratura

in corrispondenza di una apertura tamponata o in un contrafforte realizzato in fase successiva, come presidio a seguito del manifestarsi di un dissesto). L'analisi elastica presenta in genere zone nelle quali le tensioni principali di trazione sono superiori all'effettiva resistenza a trazione della muratura. Se queste zone sono di limitata ampiezza, la struttura reale probabilmente ivi presenterà una lieve fessurazione (lesioni fisiologiche) e la soluzione fornita dall'analisi elastica ad elementi finiti può essere ritenuta in una certa misura attendibile; se invece è ragionevole attendersi una significativa redistribuzione delle tensioni a seguito della fessurazione, gli stati tensionali e deformativi ottenuti non sono attendibili e risulta necessario procedere ad una modellazione non lineare, nella quale il comportamento del materiale venga simulato con maggiore precisione (danneggiamento, fessurazione, rottura, degrado di rigidezza e resistenza, attrito).

L'analisi elastica ad elementi finiti è quindi utile per descrivere il comportamento strutturale in esercizio, nel caso di una costruzione non soggetta a dissesti significativi, ma non consente di valutare la sicurezza nei riguardi dello stato limite ultimo. Infatti, il raggiungimento di condizioni limite di rottura del materiale a livello locale (stato tensionale puntuale) non può essere messo in alcun modo in relazione alle condizioni limite ultime della struttura, che comportano in genere la perdita di equilibrio di intere porzioni della costruzione.

Tali limitazioni possono essere concettualmente superate attraverso una modellazione non lineare ad elementi finiti, che consideri sia la non linearità del materiale che quella geometrica. Tuttavia, alle già espresse difficoltà di modellazione di una costruzione reale attraverso gli elementi finiti si aggiungono in questo caso la complessità dei legami costitutivi per la muratura e la scarsa robustezza delle procedure di analisi, che fanno sì che la modellazione non lineare possa essere utilizzata solo se si dispone delle necessarie capacità e competenze; per tale ragione essa non può essere uno strumento imprescindibile per la verifica sismica.

Al fine di verificare la sicurezza nei riguardi di una condizione limite di collasso è possibile fare riferimento a metodi di analisi più semplici ed efficaci, che pur se non in grado di descrivere il comportamento in condizioni di esercizio, possono cogliere le condizioni ultime. In particolare, per l'analisi a collasso delle strutture murarie si ricorre frequentemente all'analisi limite dell'equilibrio, utilizzando sia il teorema statico (analisi incrementale) sia quello cinematico (analisi per cinematismi). Il teorema statico, attraverso l'individuazione di soluzioni equilibrate, ci consente di valutare se la costruzione è sicura in presenza di certi carichi, anche se non viene determinata l'esatta soluzione. L'analisi per cinematismi (che considera la struttura come composta da blocchi rigidi), nel caso in cui questi siano correttamente individuati (anche grazie all'osservazione del danno manifestato), ci fornisce in modo molto semplice una stima attendibile delle risorse ultime della costruzione.

Nel caso della muratura, la validità dei due teoremi è stata dimostrata con riferimento alle seguenti ipotesi: non resistenza a trazione del materiale, infinita resistenza a compressione, limitata deformabilità, assenza di scorrimenti. Tuttavia è possibile tener conto, con opportuni accorgimenti, anche delle situazioni reali, nelle quali le suddette ipotesi non sono completamente rispettate.

La non resistenza a trazione rappresenta sempre un'ipotesi a favore di sicurezza, ovvero essa porta a sottostimare la reale capacità della struttura. Nel caso in cui i piani di rottura siano scelti in corrispondenza di giunti principali della muratura, essendo questi dotati di resistenza a trazione molto limitata, tale sottostima è relativamente contenuta. Al contrario, nel caso in cui i piani di rottura interessino zone di ammorsamento tra gli elementi della muratura, tale contributo dovrà essere adeguatamente modellato o dovranno essere selezionati piani di minore resistenza, se si vogliono evitare stime eccessivamente cautelative.

L'infinita resistenza a compressione della muratura è invece un'ipotesi a sfavore di sicurezza, in quanto la condizione ultima non si verifica in corrispondenza di un contatto puntuale tra i blocchi (fatto che comporterebbe una tensione di compressione infinita), ma quando la sezione reagente parzializzata è tale da portare alla rottura per schiacciamento della muratura. Tuttavia, l'analisi limite può ancora essere utilizzata, a patto di considerare un margine geometrico nella posizione delle cerniere che definiscono il cinematismo, opportunamente calibrato in funzione della qualità della muratura.

La limitata deformabilità è un'ipotesi in genere accettabile, almeno nel caso delle costruzioni in muratura di tipo massivo. L'analisi limite valuta la condizione di equilibrio di una struttura labile, costituita dall'assemblaggio di porzioni murarie rigide, ovvero si controlla che questa risulti staticamente determinata sotto i carichi assegnati, prevalentemente grazie alla propria forma; trascurare la deformabilità significa ipotizzare che anche nella configurazione deformata, non determinabile attraverso l'analisi limite, la struttura sia ancora in equilibrio. È opportuno tuttavia considerare che, nel caso dell'analisi di costruzioni esistenti, la configurazione geometrica che viene determinata attraverso il rilievo geometrico è già quella deformata, per cui l'analisi limite è in grado di valutare le condizioni di sicurezza nello stato attuale.

Infine, l'assenza di scorrimenti tra i conci murari può essere in genere assunta come ipotesi, salvo poi controllare a posteriori che questi non si verifichino in concomitanza delle azioni che vengono valutate nell'analisi. In genere, ad esclusione di rari casi in cui sono presenti elevati carichi concentrati su strutture di grande spessore, le azioni mutue tra i conci murari sono pressoché perpendicolari ai giunti principali (sedi dei possibili scorrimenti) e comunque all'interno del cono d'attrito relativo alle strutture murarie.

L'analisi limite può essere utilizzata anche per valutare la capacità sismica, considerando tale azione come un sistema di forze orizzontali, proporzionali alle masse della costruzione attraverso un opportuno moltiplicatore. Tale moltiplicatore può essere messo in relazione all'accelerazione massima del suolo. È tuttavia noto che l'accelerazione sismica che attiva il meccanismo di collasso, quella per cui compaiono evidenti fessurazioni ed i diversi blocchi iniziano ad oscillare, è inferiore rispetto a quella che produce il vero e proprio collasso; l'azione sismica ha infatti natura dinamica, per cui un sistema labile di blocchi rigidi, pur oscillando, può tornare nella iniziale configurazione di equilibrio se l'impulso che ha attivato il meccanismo ha durata ed energia limitate, ed i successivi impulsi non sono tali da incrementare ulteriormente gli spostamenti. È quindi possibile valutare la capacità di spostamento del sistema, prima del vero e proprio collasso, facendo riferimento a configurazioni variate del cinematismo; in tale modo viene valutata una vera e propria curva di capacità del sistema, che rappresenta la resistenza offerta dalla struttura al crescere degli spostamenti. Tale metodo di valutazione della risposta sismica è stato introdotto nell'allegato 11.C dell'Ordinanza e può essere preso come riferimento nel caso in cui si vogliono modellare meccanismi locali di collasso.