

LE MURATURE STRUTTURALI NELLE NTC 2018

Paolo Morandi, PhD - Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università di Pavia / EUCENTRE Pavia

Guido Magenes, PhD - Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università di Pavia / EUCENTRE Pavia

Sommario:

Si discutono i punti più significativi delle nuove Norme Tecniche relativamente alle nuove costruzioni in muratura: progettazione per azioni sismiche e non, prescrizioni sui materiali ed i controlli in cantiere, evidenziando le principali differenze e gli elementi di novità rispetto alle Norme Tecniche del 2008.

Introduzione

In questo articolo si descrivono i punti più significativi dell'Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17 gennaio 2018 [1] (da qui in avanti chiamate NTC 2018) relativamente alle costruzioni in muratura portante, focalizzando l'attenzione principalmente sulla progettazione per azioni non sismiche (§ 4.5), per azioni sismiche (capitolo 7.8) e sulle prescrizioni sui materiali ed i controlli in cantiere (capitolo 11.10), evidenziando le differenze più significative e gli elementi di novità rispetto alle Norme Tecniche del 2008 [2] (NTC 2008). Molti degli aspetti innovativi inseriti nelle nuove Norme sono scaturiti da una proficua interazione tra il mondo accademico, professionale, industriale e istituzionale, e da una intensa attività di ricerca svolta a verifica ed a supporto della normativa stessa.

Costruzioni di muratura, aspetti generali della progettazione (§ 4.5 NTC 2018)

Il § 4.5 delle NTC 2018 fornisce indicazioni sui materiali, sulle caratteristiche tipologiche, sulla valutazione delle caratteristiche meccaniche, sull'organizzazione strutturale, sui dettagli costruttivi, sulle analisi e verifiche di sicurezza delle costruzioni con struttura portante verticale realizzata con sistemi di muratura.

Introduzione del sistema costruttivo in muratura confinata. Il principale aspetto di novità nell'ambito degli edifici in muratura strutturale è indubbiamente rappresentato dall'introduzione del sistema costruttivo in muratura confinata che mai, prima d'ora, era stato esplicitamente inserito nelle normative tecniche nazionali, sebbene fosse già incluso da molti anni negli Eurocodici. Dunque, oltre ai sistemi in muratura portante ordinaria ed armata, viene finalmente consentito anche l'uso della muratura portante confinata, tecnica peraltro già utilizzata da tempo in numerosissimi Paesi, in virtù delle migliori prestazioni sismiche rispetto alla muratura non armata.

La muratura confinata è una muratura costituita da elementi resistenti artificiali pieni e semipieni, dotata di elementi di confinamento in calcestruzzo armato o muratura armata. Il progetto della muratura confinata può essere svolto applicando integralmente quanto previsto negli Eurocodici strutturali ed in particolare nell'Eurocodice 6 [3] e nell'Eurocodice 8 [4] con le relative appendici nazionali. Inoltre, è possibile far riferimento ai criteri di progetto ed alle regole di dettaglio riportate al § 7.8 delle NTC, relativamente alle costruzioni soggette ad azione sismica. E' tuttavia importante sottolineare che gli Eurocodici non risultano particolarmente approfonditi in merito alla progettazione di questo sistema costruttivo; in particolare, i criteri di verifica delle pareti in muratura confinata sono estremamente semplificati e cautelativi e non perfettamente allineati con la letteratura tecnica specifica o

alle esperienze normative dei paesi extraeuropei. Ciò è riconosciuto nell'ambito delle sottocommissioni europee CEN/TC250/SC6 e SC8, talché nella revisione degli Eurocodici 6 e 8, attualmente in corso, si stanno elaborando indicazioni più specifiche ed aggiornate.

Caratteristiche dei materiali e delle murature. Per quanto invece riguarda i materiali e le caratteristiche tipologiche della muratura portante, per le malte si fa riferimento alle prescrizioni del capitolo 11.10 mentre per i blocchi in laterizio la classificazione rimane identica rispetto a quella delle NTC 2008, con una suddivisione in base alla percentuale di foratura φ ed all'area media della sezione normale di ogni singolo foro (elementi pieni $\varphi \leq 15\%$, semipieni $15\% < \varphi \leq 45\%$ e forati $45\% < \varphi \leq 55\%$). L'unico importante elemento di differenza è la reintroduzione dei limiti sullo spessore minimo dei setti interni ed esterni dei blocchi con foratura, che era stato cancellato nelle NTC 2008, sebbene fosse presente nella normativa previgente (D.M. 20 novembre 1987 [5]); il rispetto degli spessori minimi dei setti esterni ed interni degli elementi artificiali ha il fine principale di garantire sufficiente robustezza agli elementi, cioè di prevenire rotture eccessivamente fragili. Lo spessore minimo dei setti interni (distanza minima tra due fori) è prescritto pari a 7 mm per elementi in laterizio, mentre lo spessore minimo dei setti esterni (distanza minima dal bordo esterno al foro più vicino al netto dell'eventuale rigatura) è pari a 10 mm per elementi in laterizio.

Per quanto riguarda l'uso di giunti di malta sottili (spessore compreso tra 0.5 mm e 3 mm) e/o di giunti verticali a secco, esso viene limitato ad edifici con numero di piani fuori terra non superiore a quanto specificato nella parte relativa alla progettazione per azioni sismiche ed altezza interpiano massima di 3.5 m. Nella norma viene anche definito il caso di utilizzo di elementi per muratura che fanno affidamento a tasche per riempimento di malta; in questo caso, i giunti verticali possono essere considerati riempiti se la malta è posta su tutta l'altezza del giunto su di un minimo del 40% della larghezza dell'elemento murario, esattamente come specificato nell'Eurocodice 6 (si veda Fig. 1).

Per l'impiego di tipologie murarie o materiali diversi rispetto a quanto specificato nel capitolo 4.5, per esempio nel caso di blocchi per cui non vengono rispettati i limiti sullo spessore minimo dei setti, si deve applicare quanto previsto ai § 4.6 "Altri sistemi costruttivi", per cui la loro idoneità deve essere comprovata da una dichiarazione rilasciata dal Presidente del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici su conforme parere dello stesso Consiglio e previa istruttoria del Servizio Tecnico Centrale; inoltre, i materiali o prodotti strutturali utilizzati nel sistema costruttivo devono essere conformi ai requisiti di cui al § 11.

Per quel che riguarda i capitoli §4.5.4 "Organizzazione strutturale", §4.5.5 "Analisi strutturale", così come per i paragrafi 4.5.6.1 a 4.5.6.3 relativi alle verifiche di dettaglio, le nuove Norme non introducono modifiche significative rispetto alle NTC 2008.

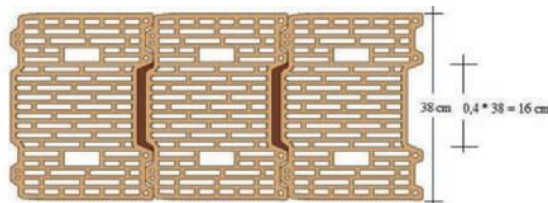


Figura 1. Muratura con blocchi a tasca riempita per almeno il 40% della larghezza dell'elemento murario.

Verifiche semplificate. Al paragrafo 4.5.6.4 "Verifiche semplificate" sono riportati i criteri per consentire il progetto, in presenza di azioni non sismiche, con un dimensionamento semplificato senza verifica estesa (edificio o costruzione "semplice"), limitandosi al rispetto dei requisiti da a) ad g) ed alla limitazione della tensione verticale media di piano. In primo luogo, è stato correttamente cambiato il titolo al paragrafo che nelle NTC 2008 era stato

impropriamente chiamato “Verifiche alle tensioni ammissibili”. Inoltre, è stato inserito il requisito g), che puntualizza la necessità di rispettare le percentuali minime, specificate in Tab. 7.8. Il del capitolo sulle costruzioni soggette ad azione sismica, di sezione resistente delle pareti nelle due direzioni ortogonali, calcolate rispetto alla superficie totale in pianta dell'edificio (determinata considerando la poligonale definita dal filo esterno delle pareti perimetrali al netto di eventuali aggetti come per es. gronde, balconi). Tale tabella riporta, tra l'altro, percentuali valide anche per valori di accelerazione di picco al terreno inferiori a 0.075g e quindi coerenti con la pericolosità sismica bassa (ex “zona sismica 4”). Questa precisazione, che precedentemente era stata inserita solo nella Circolare Ministeriale n.617 [6], ha colmato l'assenza nella norma (tra l'altro molto rischiosa) di una percentuale minima di pareti resistenti nelle due direzioni, peraltro già prescritta nel vecchio D.M.'87.

Si sottolinea inoltre che i requisiti per l'applicabilità del metodo semplificato dell'edificio o costruzione “semplice” per le verifiche ai carichi non sismici (azioni verticali e vento), garantiscono un buon comportamento d'insieme della struttura senza risultare eccessivamente stringenti; questi aspetti rendono il metodo dell'edificio “semplice” particolarmente attraente tra i progettisti in quanto rapido, efficace e di semplice applicazione. E' bene ricordare, tuttavia, che il rispetto dei requisiti da a) ad g) e la verifica della tensione verticale massima di piano non garantiscono il progettista nei confronti di eventuali problemi “locali”, come quello, ad esempio, della eccessiva compressione sotto carichi concentrati (si pensi ad una trave in c.a. in appoggio diretto su una parete in muratura ad essa trasversale), che devono essere prevenuti e risolti con adeguati accorgimenti costruttivi o eventuali verifiche locali.

Il capitolo 4.5.7 relativo alla muratura armata resta invariato rispetto alle NTC 2008.

Progettazione integrata da prove. Nella parte finale del § 4.5 è stato aggiunto un paragrafo, “Progettazione integrata da prove e verifica mediante prove”, in cui si consente che la resistenza e la funzionalità di strutture e di elementi strutturali possa essere misurata attraverso prove su campioni di adeguata numerosità. I risultati delle prove eseguite su opportuni campioni devono essere trattati con i metodi dell'analisi statistica, in modo tale da ricavare parametri significativi quali media, deviazione standard e fattore di asimmetria della distribuzione, sì da caratterizzare adeguatamente un modello probabilistico descrittore delle quantità indagate (variabili aleatorie). Indicazioni più dettagliate al riguardo e metodi operativi completi per la progettazione integrata da prove possono essere reperiti nella Appendice D dell'Eurocodice 0 [7].

Costruzioni di muratura soggette ad azioni sismiche (§ 7.8 NTC 2018)

Nel capitolo 7.8 delle NTC 2018 sono opportunamente integrate le regole generali di progettazione ed esecuzione per le costruzioni di muratura ordinaria, armata e confinata per l'impiego in zona sismica. Nel seguito si riportano principalmente gli aspetti innovativi rispetto alle NTC 2008 riguardanti i materiali ed i limiti di applicabilità dei diversi sistemi costruttivi in muratura, le analisi lineari e non lineari e la muratura confinata.

Non vi sono sostanziali novità sulle verifiche fuori piano di pareti portanti e sul criterio dell'edificio “semplice”. Per le verifiche fuori piano l'unica differenza rispetto alle NTC 2008 è che l'espressione per l'azione sismica ortogonale, rappresentata dall'accelerazione adimensionalizzata massima S_a , è stata inserita direttamente nel capitolo sulle murature, essendo stata eliminata nella parte generale del § 7 per gli elementi non strutturali. Per quanto riguarda invece il criterio delle costruzioni semplici, esso è applicabile solo nelle zone in cui $a_g S$ allo SLV è minore o uguale a 0.35g, mentre nelle NTC 2008 era applicabile nelle zone 2, 3 e 4.

Regole generali - premessa. Nella premessa alle regole generali, si ricorda che le costruzioni in muratura devono essere realizzate nel rispetto di quanto riportato ai § 4.5 e 11.10, in particolare per quanto concerne le caratteristiche fisiche, meccaniche e geometriche degli elementi naturali ed artificiali, nonché per i relativi controlli di produzione e di accettazione in cantiere. Le nuove Norme, inoltre, aggiungono che il rispetto di tali requisiti consente di classificare le costruzioni in muratura come moderatamente dissipative e quindi appartenenti alla classe di duttilità CD "B". Tale classificazione è concettualmente rilevante, in quanto riconosce il fatto che gli edifici in muratura, anche quelli in muratura ordinaria (non armata), posseggono, a livello di sistema strutturale, una capacità deformativa in campo non lineare e una capacità dissipativa che giustificano le regole progettuali proposte.

Un ulteriore elemento di novità è rappresentato da una diversa definizione del coefficiente parziale di sicurezza per la resistenza del materiale, che può essere ridotto del 20% e comunque fino ad un valore non inferiore a 2 rispetto a quello fornito nel Capitolo 4 per situazioni non sismiche; nelle NTC 2008 era fissato di default pari a 2.

Si sottolinea infine che nelle nuove NTC i limiti ed i requisiti definiti in funzione delle zone sismiche (per es. per l'applicazione del metodo semplificato per basse sismicità, per le limitazioni all'impiego di giunti di malta sottili e all'uso di giunti verticali a secco, per i requisiti geometrici delle pareti resistenti, per le costruzioni semplici), sono stati sostituiti da limiti in termini di valori di accelerazione di ancoraggio dello spettro elastico $a_g S$ allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV) mentre i riferimenti delle NTC 2008 alla zona sismica 4 sono stati sostituiti da un valore di $a_g S$ pari a 0,075g.

Regole generali - materiali. Ad eccezione delle costruzioni in zone a sismicità molto bassa, caratterizzata da un valore dell'accelerazione di ancoraggio dello spettro elastico $a_g S \leq 0,075g$, i materiali per le costruzioni in muratura devono rispettare una serie di requisiti aggiuntivi rispetto a quelli prescritti al § 4.5 delle Norme Tecniche, finalizzati alla prevenzione di rotture fragili. Tali regole, da applicarsi a tutti gli edifici (sia in muratura ordinaria, sia in muratura armata, sia in muratura confinata), sono sostanzialmente identiche a quelle presenti nelle NTC 2008, con delle minime differenze. In particolare, si mantengono il limite superiore alla percentuale di foratura degli elementi artificiali (45%), i limiti inferiori alla resistenza caratteristica degli elementi in direzione verticale ed orizzontale (rispettivamente pari a 5.0 e 1.5 MPa), e si richiede che gli eventuali setti disposti parallelamente al piano del muro siano continui e rettilinei (le uniche interruzioni ammesse sono quelle in corrispondenza dei fori di presa o per l'alloggiamento delle armature). E' inoltre anche rimasta l'indicazione per cui i giunti orizzontali e verticali siano riempiti con malta. Queste prescrizioni scaturiscono dal fatto che gran parte delle ipotesi di calcolo (in particolare i fattori di struttura, legati alle capacità deformative e dissipative del sistema) si basano su validazioni sperimentali che si riferiscono a muratura con elementi di adeguata robustezza e giunti integralmente riempiti di malta. Unica integrazione al testo, rispetto al passato, è rappresentata dalla possibilità di considerare, in direzione verticale, anche una resistenza media dei blocchi oltre a quella caratteristica (limitata inferiormente a 6 MPa), in modo da fornire indicazioni congruenti con quanto dichiarato dai produttori che, in base alle norme di prodotto UNI EN 771 per alcuni materiali (come per esempio i blocchi in laterizio), potrebbero dichiarare solamente il valore della resistenza media.

Le nuove NTC forniscono inoltre maggiori indicazioni sulla limitazioni all'impiego di giunti di malta sottili e all'uso di giunti verticali a secco. Per costruzioni in cui si utilizzino una o entrambe le tipologie di giunto, il § 4.5 limita l'altezza interpiano a 3,5 m. In funzione della

pericolosità sismica del sito si danno ulteriori limitazioni sull'altezza massima e sul numero dei piani dell'edificio.

In particolare, l'uso di giunti sottili (spessore compreso tra 0.5 mm e 3 mm) è consentito esclusivamente per edifici caratterizzati allo SLV, da $a_g S \leq 0,15 g$, con le seguenti limitazioni:

- altezza massima, misurata in asse allo spessore della muratura: 10,5 m se $a_g S \leq 0,075 g$; 7 m se $0,075 g < a_g S \leq 0,15 g$;
- numero dei piani in muratura da quota campagna: ≤ 3 per $a_g S \leq 0,075 g$; ≤ 2 per $0,075 g < a_g S \leq 0,15 g$.

L'uso di giunti verticali non riempiti è consentito esclusivamente per edifici caratterizzati, allo SLV, da $a_g S \leq 0,075 g$, costituiti da un numero di piani in muratura da quota campagna non maggiore di due e altezza massima, misurata in asse allo spessore della muratura, di 7 m. L'altezza massima si riferisce all'altezza della struttura in muratura (con esclusione di un eventuale piano interrato o seminterrato a setti in c.a., che è assimilato in questo contesto a struttura di fondazione), misurata dallo spiccatto della fondazione all'imposta della copertura. Nel conteggio del numero dei piani si esclude l'eventuale piano interrato o seminterrato in calcestruzzo armato.

Successivamente, viene riportato che gli elementi per muratura con giunti sottili e/o giunti verticali a secco devono soddisfare le seguenti limitazioni: spessore minimo dei setti interni pari a 7 mm, spessore minimo dei setti esterni pari a 10 mm, percentuale massima di foratura pari al 55%. Di fatto si tratta di una ripetizione di prescrizioni già riportate al capitolo 4. Tale ripetizione, che non appare necessaria agli scriventi, non deve portare a dubbi interpretativi in merito ai requisiti geometrici degli elementi. In particolare, la percentuale massima di foratura per gli elementi artificiali scende al 45% qualora $a_g S$ sia maggiore di 0,075g, in modo analogo a quanto richiesto per la muratura con giunti ordinari.

Fattori di comportamento (fattori di struttura) per analisi elastiche e lineari. Nelle nuove Norme, la denominazione "fattore di struttura", finora adottata in Italia, è stata sostituita con "fattore di comportamento", analogo al "behaviour factor" della versione inglese degli Eurocodici; inoltre, i valori di q^* sono stati raccolti in un'unica tabella nella parte generale del § 7, ove invece nelle NTC 2008 sono inseriti nei capitoli specifici dei diversi sistemi costruttivi. Nelle NTC 2018 i valori del fattore di struttura q da utilizzare nelle analisi elastiche e lineari degli edifici in muratura ordinaria sono stati oggetto di revisione a seguito dell'evidenza, scaturita da sperimentazioni su pareti con blocchi semipieni soggette ad azioni cicliche nel piano [8] (Fig. 2), di una diminuzione dei valori di capacità deformativa ultima rispetto a quelli comunemente utilizzati in precedenza, riferiti principalmente a murature "tradizionali" di mattoni. Adottando questi limiti deformativi aggiornati e a seguito di una vasta ricerca numerica di tipo parametrico su diverse configurazioni di edifici in muratura non armata [9], si sono ricavati i nuovi valori del fattore di struttura q ($q^* \cdot \alpha_w / \alpha_1$), riportati sinteticamente nella tabella seguente, insieme ai valori delle NTC 2008. Dal confronto tra i valori di q , si può notare che, per edifici regolari a 2 o più piani, il fattore di struttura si riduce da 3.6 a circa 3.0. Sono stati inoltre introdotti i valori della muratura confinata adottando, per q^* , il valore raccomandato dall'EC8 parte 1 e per α_w / α_1 un valore intermedio tra quello della muratura ordinaria ed armata. Nessuna variazione è stata invece apportata al fattore di struttura per la muratura armata. In (Tab.1) si riportano i valori di q^* e α_w / α_1 per tutti i sistemi costruttivi in muratura.

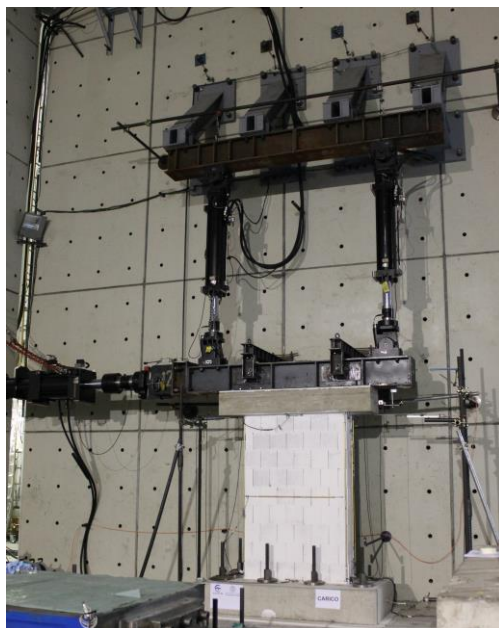


Figura 2. Prove cicliche nel piano taglio-compressione di pannelli in muratura portante.

Tabella 1. Confronto tra valori dei fattori di struttura q delle NTC 2008 con quelli delle NTC 2018. I valori indicati tra parentesi si riferiscono agli edifici ad 1 piano.

	NTC 2008		NTC 2018	
	q^*	α_w/α_1	q^*	α_w/α_1
Costruzioni di muratura ordinaria	2.0	1.8 (1.4)	1.75	1.7
Costruzioni di muratura armata	2.5	1.5 (1.3)	2.5	1.5
Costruzioni di muratura armata con progettazione in capacità	3.0	1.3	3.0	1.3
Costruzioni di muratura confinata	-	-	2.0	1.6

Analisi elastiche e lineari. Per quanto riguarda l'applicazione dell'analisi statica lineare, sempre applicabile per costruzioni in muratura portante (anche nel caso di edifici irregolari in elevazione) oltre alla revisione dei fattori di struttura si segnala un'altra differenza rispetto alle NTC 2008 che riguarda l'espressione semplificata per la valutazione del periodo del modo di vibrare principale nella direzione in esame (T_1) in alternativa alla valutazione con analisi modale. Mentre nelle NTC 2008 e nell'EC8 T_1 può essere calcolato semplicemente conoscendo l'altezza H della costruzione attraverso l'utilizzo della ben nota espressione $T_1=0.05 \cdot H^{3/4}$, nelle NTC 2018 il periodo del modo principale di vibrare può essere calcolato attraverso la seguente equazione:

$$T_1 = 2 \cdot \sqrt{d} \quad (1)$$

dove d è lo spostamento laterale elastico del punto più alto dell'edificio, espresso in metri, prodotto dai carichi verticali nella combinazione sismica applicati nella direzione orizzontale. Questa variazione comporta dunque al progettista di dover obbligatoriamente sempre preparare, per la valutazione approssimata del periodo T_1 , un modello strutturale dell'edificio.

Per quanto riguarda il procedimento di redistribuzione delle azioni interne ottenute dall'analisi lineare, è stata inserita un'importante indicazione, che precisa che la redistribuzione non è ammessa nel caso in cui il rapporto α_w/α_1 necessario per il calcolo del fattore di struttura q sia stato ottenuto dal progettista direttamente da un'analisi non lineare, rimanendo

ovviamente possibile nel caso in cui per la determinazione di α_u/α_l ci si sia avvalsi dei valori prudenziali riportati in (Tab.1).

Infine, nel caso degli stati limite di esercizio, le verifiche si intendono soddisfatte quando lo spostamento di interpiano d_r , ovvero la differenza tra gli spostamenti del solaio superiore e del solaio inferiore, risulti inferiore a $0.002 \cdot h$, $0.0025 \cdot h$ e $0.003 \cdot h$, rispettivamente, per edifici in muratura ordinaria, confinata ed armata, essendo h l'altezza di piano. Tali valori evidenziano una sostanziale diminuzione rispetto ai limiti delle NTC 2008, pari a $0.003 \cdot h$ e $0.004 \cdot h$, rispettivamente, per la muratura ordinaria ed armata, giustificata dalle evidenze sperimentali.

Analisi statiche non lineari. Alcune sostanziali differenze sono state introdotte per le analisi statiche non lineari. In particolare, sono state meglio definite le diverse distribuzioni di forze laterali appartenenti alle distribuzioni principali (Gruppo 1), in cui sono stati più chiaramente suddivisi i casi di edifici con masse partecipanti al primo modo di vibrare inferiori e superiori al 75% (60% nel caso di edifici in muratura) ed è stata aggiunta la possibilità di includere una distribuzione multimodale tra le distribuzioni secondarie (Gruppo 2).

Inoltre, mentre nelle NTC 2008 ciascuna delle due componenti orizzontali principali delle azioni poteva essere applicata separatamente, assumendo come effetti massimi i valori più sfavorevoli ottenuti, nelle nuove NTC 2008 è invece necessario considerare la contemporanea applicazione delle due componenti orizzontali che, tuttavia, produce un aumento considerevole del numero di analisi da svolgere.

Infine, la modifica forse più significativa riguarda gli stati limite da considerare per le analisi statiche non lineari, per le quali, oltre alle verifiche allo Stato Limite di Danno e di Salvaguardia della Vita, si aggiunge anche quella a prevenzione del collasso (SLC). Nel modello strutturale gli elementi murari non armati sono caratterizzati da deformazioni angolari ultime a meno di moti rigidi (si tratta, di fatto, di "rotazioni della corda" delle sezioni di estremità) riferite allo SLC pari a 0.5% ed 1.0% dell'altezza del pannello, rispettivamente per risposta a taglio e a pressoflessione. Tali limiti deformativi risultano invece rispettivamente pari a 0.8% e a 1.6% nel caso di muratura armata, mentre non vi sono indicazioni riguardanti la muratura confinata. Le verifiche di sicurezza consistono nel confronto, sulla curva globale di capacità (taglio alla base-spostamento di un punto di controllo), tra la capacità di spostamento ultimo e la domanda di spostamento allo SLD (SLO nel caso di strutture strategiche e rilevanti), allo SLV ed anche allo SLC. La rigidità elastica del sistema bilineare equivalente si individua tracciando la secante alla curva di capacità nel punto corrispondente ad un taglio alla base pari a 0,7 volte il valore massimo (taglio massimo alla base). Il tratto orizzontale della curva bilineare si individua tramite l'uguaglianza delle aree sottese dalle curve tracciate fino allo spostamento ultimo del sistema. In ogni caso, sia per le costruzioni in muratura ordinaria sia per le costruzioni in muratura armata senza progettazione in capacità, la verifica di sicurezza non è soddisfatta qualora il rapporto tra taglio totale agente alla base del sistema equivalente a un grado di libertà, calcolato con lo spettro di risposta elastico per lo SLC, e taglio alla base resistente del sistema equivalente a un grado di libertà ottenuto dall'analisi non lineare, ecceda il valore 4,0. Nelle NTC 2008, le verifiche allo SLU si effettuavano solo in termini di SLV e questo limite era pari a 3.

Muratura confinata. Come detto, nelle nuove NTC è stata introdotta la muratura confinata. Con $a_g S > 0.075g$, le pareti sismo-resistenti in muratura confinata devono possedere uno spessore minimo pari a 24 cm, una snellezza massima inferiore a 15 ed un rapporto minimo

tra l (lunghezza del muro) ed h' (altezza massima delle aperture adiacenti alle pareti) maggiore di 0.30.

Sono stati inoltre introdotte le regole di dettaglio per le costruzioni di muratura confinata, che dovranno essere progettate rispettando i seguenti requisiti (si veda Fig. 3):

- gli elementi di confinamento orizzontale e verticali dovranno essere collegati fra loro e ancorati agli elementi del sistema strutturale principale;
- per garantire un collegamento efficace fra gli elementi di confinamento e la muratura, il calcestruzzo degli elementi di confinamento dovrà essere gettato dopo la realizzazione della muratura;
- la minima dimensione trasversale degli elementi di confinamento orizzontali e verticali non dovrà essere inferiore a 150 mm. Nelle pareti a doppio foglio lo spessore degli elementi di confinamento dovrà garantire la connessione dei due fogli ed il loro confinamento;
- gli elementi di confinamento verticali dovranno essere posizionati:
 - a) lungo i bordi liberi di ogni parete strutturale,
 - b) su entrambi i lati delle aperture aventi area maggiore di $1,5 \text{ m}^2$,
 - c) all'interno delle pareti, con passo non maggiore di 5 m,
 - d) alle intersezioni delle pareti strutturali, in tutti i casi in cui gli elementi di confinamento più vicini siano ad una distanza superiore a $1,5 \text{ m}$;
- gli elementi di confinamento orizzontali dovranno essere posizionati nel piano della parete ad ogni piano e, in ogni caso, ad un passo non maggiore di 4 m;
- l'armatura longitudinale degli elementi di confinamento dovrà avere un'area non inferiore a 300 mm^2 o all'1% della sezione dell'elemento di confinamento;
- le staffe dovranno avere diametro non inferiore a 5 mm e passo non maggiore di 15 cm;
- le lunghezze di sovrapposizione delle barre longitudinali non dovranno essere minori di 60 diametri.

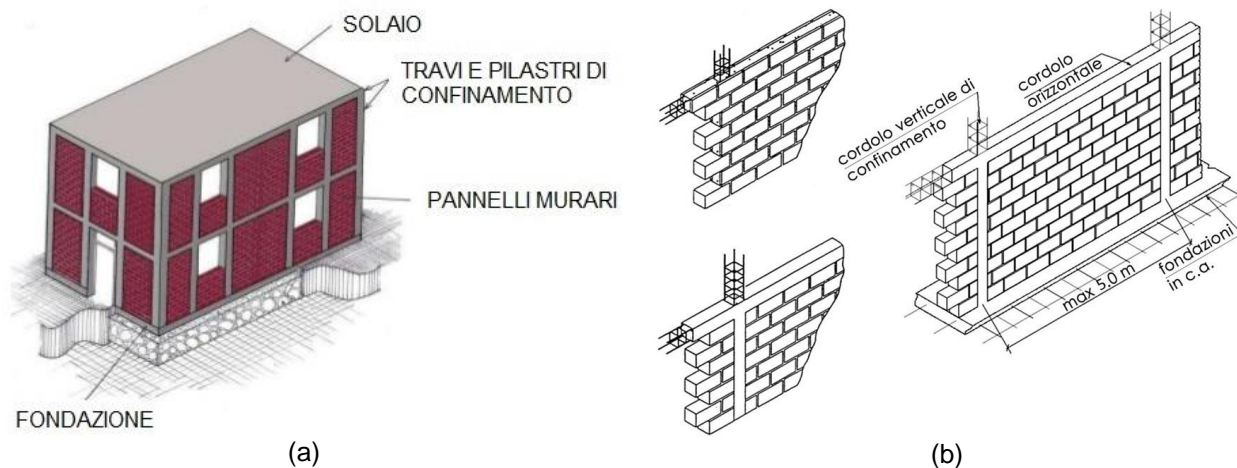


Figura 3. Edificio in muratura confinata: (a) struttura d'insieme e b) dettagli costruttivi.

Materiali e prodotti per uso strutturale – muratura portante (§ 11.10 NTC 2018)

Oltre ad una più corretta specifica nella definizione della categoria di appartenenza dei blocchi per muratura strutturale (Categoria I e II), al capitolo 11.10 i maggiori punti di novità riguardano le prove di accettazione in cantiere sui blocchi e sulle malte ed i criteri per la valutazione delle resistenze a compressione e taglio nelle murature.

Prove di accettazione in cantiere. Per quanto riguarda i blocchi, il controllo di accettazione in cantiere ha lo scopo di accertare se gli elementi da mettere in opera abbiano le caratteristiche dichiarate dal fabbricante e viene eseguito in termini di resistenza a compressione degli elementi resistenti. Diversamente dalle NTC 2008, nelle nuove Norme, il controllo di accettazione dipende dal tipo di resistenza dichiarata dal fabbricante (media o caratteristica) ed il numero di controlli viene distinto in funzione del volume (in m³) di fornitura degli elementi e della Categoria di appartenenza (Categoria I e II).

Nel caso in cui il fabbricante abbia dichiarato la resistenza media, il controllo sarà effettuato su almeno un campione ogni 350 m³ di fornitura per elementi di Categoria II, e ogni 650 m³ per elementi di Categoria I. Ogni campione sarà costituito da $n \geq 6$ elementi da sottoporre a prova di compressione. Per ogni campione, f_1, f_2, \dots, f_n siano le resistenze a compressione degli elementi con $f_1 < f_2 < \dots < f_n$; il controllo sul campione si considera positivo se risultano verificate entrambe le disuguaglianze:

$$(f_1 + f_2 + \dots + f_n)/n \geq f_{bm} \quad (2)$$

$$f_1 \geq 0.80f_{bm} \quad (3)$$

dove f_{bm} è la resistenza media a compressione dichiarata dal fabbricante.

Nel caso invece in cui il fabbricante non abbia dichiarato la resistenza media ma abbia dichiarato la sola resistenza caratteristica, il controllo di accettazione in cantiere sarà effettuato su almeno un campione ogni 350 m³ di fornitura per elementi di Categoria II, innalzabili a 650 m³ per elementi di Categoria I. Per ogni campione, f_1, f_2, \dots, f_6 siano le resistenze a compressione dei sei elementi con $f_1 < f_2 < \dots < f_6$; il controllo si considera effettuato con esito positivo se risulta verificata la seguente disuguaglianza: $f_1 \geq f_{bk}$, dove f_{bk} è la resistenza caratteristica a compressione dichiarata dal fabbricante.

Un'altra importante novità delle nuove NTC è l'introduzione dell'obbligo del controllo di accettazione in cantiere da parte del Direttore dei Lavori anche sulle malte ad uso strutturale, attraverso opportuni prelievi. Le malte possono essere prodotte in fabbrica, come malte a prestazione garantita o a composizione prescritta, oppure prodotte in cantiere mediante la miscelazione di sabbia, acqua ed altri componenti leganti e definite dalle specifiche di progetto. Il controllo di accettazione va eseguito su miscele omogenee e prevede il campionamento di almeno 3 provini prismatici 40 x 40 x 160 mm ogni 350 m³ di muratura realizzata con la stessa miscela nel caso di malte a composizione prescritta o prodotte in cantiere, oppure ogni 700 m³ di muratura realizzata con la stessa miscela nel caso di malte a prestazione garantita, da sottoporre a flessione, e quindi a compressione sulle 6 metà risultanti, secondo quanto indicato nella norma UNI EN 1015-11 [10]. Il valore medio delle resistenze a compressione misurate deve risultare maggiore o uguale del valore di progetto.

Determinazione dei parametri meccanici della muratura. La determinazione della resistenza a compressione e taglio della muratura può essere effettuata attraverso prove di caratterizzazione meccanica o stimando tali parametri da tabelle ed espressioni empiriche.

Per quanto riguarda la determinazione sperimentale, nelle NTC 2018 sono state eliminate alcune incongruenze presenti nelle NTC 2008 in relazione ai test sperimentali, facendo chiaro riferimento alle norme UNI-EN (1052-1 per la resistenza a compressione [11], 1052-3 [12] e 1052-4 [13] per la resistenza a taglio in assenza di tensioni normali). Il riferimento alle prove a compressione diagonale, in alternativa a quelle su triplete, per la misura sperimentale della resistenza a taglio in assenza di tensioni normali, sembra essere stato mantenuto per tipologie murarie per le quali le prove di taglio 1052-3 e 1052-4, che di fatto mirano alla valutazione della resistenza a taglio del giunto, risultano non significative in

quanto la rottura per taglio della muratura è governata da meccanismi di fessurazione diagonale (si veda Fig. 4).

In alternativa alle prove sperimentali, la resistenza caratteristica a compressione della muratura, f_k , può essere dedotta dalla resistenza caratteristica a compressione dei blocchi e dalla classe della malta tramite opportune tabelle, utilizzabili sono nel caso di elementi pieni o semipieni e limitatamente a murature con giunti verticali ed orizzontali completamente riempiti di malta e di spessore compreso tra 5 e 15 mm. In questo contesto, la grande novità delle nuove NTC risiede nella possibilità di stimare la resistenza a compressione della muratura anche nei casi diversi da quelli sopracitati (es. blocchi con foratura fino al 55%, giunti verticali non riempiti e giunti di malta per strati sottili con spessore del giunto tra 0.5 e 3 mm), potendo far riferimento alle espressioni riportate al § 3.6 della parte 1 dell'EC6, integrato dalla relativa Appendice Nazionale, in funzione del tipo di blocco e della sua resistenza a compressione normalizzata f_b , e della tipologia dei giunti di malta e della sua resistenza a compressione.

Per la stima della resistenza caratteristica a taglio in assenza di tensioni normali, f_{vk0} , le nuove NTC introducono una tabella in funzione del tipo di blocco e del tipo di malta (ordinaria, per strati sottili, alleggerita) e della classe di resistenza, ampliando dunque le casistiche utilizzabili rispetto alle NTC 2008, che sono limitate solo alla muratura ordinaria di blocchi con percentuale di foratura inferiore o uguale al 45%. La nuova norma sottolinea inoltre che i valori in questa tabella (identica a quella attualmente presente nell'EC6 con l'eccezione del caso con giunti sottili), possono essere direttamente utilizzati nel caso di giunti orizzontali e verticali riempiti di malta, mentre nel caso di giunti orizzontali riempiti di malta e giunti verticali non riempiti, ma con le facce adiacenti degli elementi di muratura poste in contatto l'una con l'altra, i valori della tabella vanno dimezzati. Inoltre, la nuova norma consente anche la stima della resistenza a taglio della muratura con letto di malta interrotto, nella quale gli elementi di muratura sono disposti su due o più strisce uguali di malta ordinaria, andando a ridurre opportunamente i valori di f_{vk0} relativi al letto pieno secondo quanto indicato nell'EC6, integrato dalla relativa Appendice Nazionale.

Infine, per quanto riguarda il calcolo della resistenza caratteristica a taglio della muratura, f_{vk} , essa è definita come:

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0.4\sigma_n \quad (4)$$

in cui f_{vk0} è, come detto, la resistenza caratteristica a taglio in assenza di carichi verticali e σ_n è la tensione normale media dovuta ai carichi verticali agenti nella sezione di verifica. Un aspetto importantissimo introdotto nelle nuove Norme Tecniche riguarda il valore massimo della resistenza a taglio, $f_{vk,lim}$, che è posto pari a $0.065f_b$, per gli elementi in laterizio.. Questi valori di $f_{vk,lim}$ sono relativi a muratura con giunti verticali riempiti di malta, mentre nel caso di giunti orizzontali riempiti di malta e giunti verticali non riempiti, ma con le facce adiacenti degli elementi di muratura poste in contatto l'una dell'altra, si adotta $f_{vk,lim} = 0,045f_b$. Si sottolinea che questi nuovi limiti sono coerenti con l'EC6 e, soprattutto, maggiormente in linea con le risultanze sperimentali (si veda per es. [14]) rispetto al limite riportato nelle NTC 2008 pari a $1.4f'_{bk}$, con f'_{bk} valore caratteristico della resistenza degli elementi in direzione orizzontale e nel piano del muro.



(a)



(b)

Figura 4. Determinazione della resistenza a taglio (a) su tripletta per murature a blocchi, (b) in compressione diagonale (fessurazione diagonale) su murature irregolari (per es. in pietra).

Conclusioni

Sebbene i principi di applicazione delle NTC 2018 siano in linea con quanto già riportato nelle NTC 2008, sono state introdotte, nel testo della nuova Norma, molte novità significative riguardanti le costruzioni in muratura portante.

In primo luogo, è stata finalmente inserita una normazione sulla progettazione e realizzazione della muratura confinata. Questo sistema costruttivo, sviluppato per la prima volta nella ricostruzione dopo il terremoto del 1908 di Reggio e Messina, è oggi diffuso e collaudato in diversi paesi del mondo, anche ad elevata sismicità ed è anche trattato dagli Eurocodici 6 e 8, a cui le nuove norme fanno spesso utile riferimento. In particolare, nel nuovo testo normativo sono riportati i requisiti geometrici per le pareti, i dettagli costruttivi, il fattore di struttura da utilizzare per analisi elastiche; per il progetto le norme rimandano agli Eurocodici 6 e 8 (con le relative Appendici Nazionali, in corso di redazione).

E' stato normato l'impiego di murature con giunti sottili e con giunti verticali a secco o a incastro fino a moderati livelli di sismicità ed in funzione del numero di piani e dell'altezza massima dell'edificio. Sono stati inoltre introdotti nuovi criteri per la stima della resistenza a compressione e a taglio, coerenti e con riferimenti all'EC6, in modo da coprire tutte le casistiche ed i sistemi murari prima non contemplati. Sono stati infine reinseriti i limiti sullo spessore minimo dei setti interni ed esterni dei blocchi che ne garantiscono, congiuntamente con le prescrizioni sulla percentuale di foratura, la continuità dei setti longitudinali e la resistenza minima, la robustezza degli elementi resistenti.

Per quanto riguarda le analisi strutturali, sono stati revisionati i fattori di struttura (o "di comportamento", come definito nelle nuove Norme) da utilizzare per le analisi elastiche e lineari per gli edifici in muratura non armata, alla luce di nuove risultanze sperimentali sulla capacità deformativa dei maschi in muratura moderna ottenute da recenti ricerche scientifiche. Per quanto riguarda invece le analisi statiche non lineari, sono state apportate modifiche sugli stati limite da considerare per gli stati limite ultimi, che prevedono verifiche

anche allo Stato Limite di prevenzione del Collasso, con relativa introduzione di capacità deformative a livello di parete allo SLC.

Un ultimo importante elemento di novità è rappresentato dalle prove di accettazione in cantiere: da un lato, sono state definiti più opportunamente i criteri per i controlli sui blocchi, distinti in base al tipo di resistenza dichiarata dal fabbricante (media o caratteristica) ed in base al volume (in m³) di fornitura degli elementi e della Categoria di appartenenza (Categoria I e II); dall'altro sono stati introdotti anche i controlli di accettazione per le malte, in funzione del tipo di malta e del volume di muratura realizzata con la stessa miscela.

Si può affermare in conclusione che le nuove Norme Tecniche hanno risolto una serie di criticità e limiti presenti nelle NTC 2008 e costituiscono indubbiamente un valido strumento operativo che si è posto come obiettivo una definizione sistematica e coerente di tutti quei sistemi costruttivi che precedentemente, per motivi diversi, non sono stati adeguatamente trattati nel testo delle norme tecniche. Una normazione definitiva di tutti i sistemi in muratura moderna, ed in particolare di quelli di cui si hanno a disposizione meno informazioni, come il caso della muratura confinata, sembra essere la prossima sfida normativa che dovrà puntare sia sull'implementazione di precisi dettagli costruttivi che sullo sviluppo di opportuni criteri di analisi e verifica validati sperimentalmente. Ciò potrà avvenire tanto più rapidamente quanto più sarà possibile costruire e mantenere un dialogo costante tra industria, professione, ricerca e istituzioni.

Riferimenti bibliografici

- [1] D.M. 17/01/2018: Aggiornamento delle "Norme Tecniche per le costruzioni" (NTC2018), G.U. Serie Generale n. 42 del 20/02/2018 – S.O. n. 8, Roma, Italia, 2018.
- [2] D.M. 14/01/2008: Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008), G.U. Serie Generale n. 29 del 14/02/2008 - S.O. n.30, Roma, Italia, 2008.
- [3] CEN, Eurocode 6 - Design of masonry structures, Part 1-1: Common rules for reinforced and unreinforced masonry structures, EN 1996-1-1:2005, Brussels, Belgium, 2004
- [4] CEN. Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, European Committee for Standardization, EN 1998-1:2004, Brussels, Belgium (2004).
- [5] Ministero dei Lavori Pubblici, Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento, D.M. del 20/11/87, Gazzetta Ufficiale 5/12/1987, n. 285 - S. 1987.
- [6] Circolare esplicativa n.617 C.S.LL.PP. 02/02/2009: Istruzioni per l'applicazione delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14/01/2008, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, G.U. n.47 del 26/02/2009, S.O. No. 27, Roma, Italia, 2009.
- [7] CEN. Eurocode 0 – Basis of structural design, European Committee for Standardization, EN 1990:2002, Brussels, Belgium (2002).
- [8] Frumento S., Magenes G., Morandi P., Calvi G.M., (2009), Interpretation of experimental shear tests on clay brick masonry walls and evaluation of q-factors for seismic design, EUCENTRE Research Report 02/09, IUSS Press, Pavia.
- [9] Morandi, P., Frumento, S., Magenes, G., (2009) "Valutazione del fattore di struttura q per differenti tipologie di muratura in laterizio", Atti del XIII Convegno di Ingegneria Sismica ANIDIS, June 28-July 2 2009, Bologna, Italy.
- [10] UNI EN 1015-11, 2007: Metodi di prova per malte per opere murarie - Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita.
- [11] UNI EN 1052-1, 2001: Metodi di prova per muratura - Determinazione della resistenza a compressione
- [12] UNI EN 1052-3, 2007: Metodi di prova per muratura - Determinazione della resistenza iniziale a taglio.
- [13] UNI EN 1052-4, 2001: Metodi di prova per muratura - Determinazione della resistenza a taglio inclusi gli strati impermeabili all'umidità.
- [14] Morandi, P., Albanesi, L., Magenes, G., (2016) "In-plane test campaign on different load-bearing URM typologies with thin shell and web clay units", Proc. of XVI International Brick and Block Masonry Conference, 26-30 June 2016, Padova, Italy.