

11. Criteri di analisi e di verifica



Il progetto dell'edificio esistente riflette naturalmente lo stato delle conoscenze al tempo della costruzione e può contenere difetti di impostazione e di realizzazione, anche non immediatamente visibili. Gli edifici esistenti, in genere, non soddisfano né i principi di gerarchia delle resistenze né posseggono adeguata duttilità. Gli edifici in muratura, soprattutto i più antichi, non seguono particolari criteri di progetto, ma sono basati su tecniche tradizionali. Infine gli edifici esistenti possono risentire, anche in modo non manifesto, di terremoti passati o di altre azioni accidentali.

La valutazione della sicurezza di un edificio esistente è perciò affetta da un grado di incertezza maggiore di quello degli edifici di nuova progettazione. Ciò comporta:

- la difficoltà di definire il fattore di struttura q ;
- l'impiego di adeguati *fattori di confidenza* nelle verifiche di sicurezza;
- la variabilità dei metodi di analisi e di verifica in funzione della completezza e dell'affidabilità delle informazioni, cioè del livello di conoscenza.

Per le combinazioni di carico non sismiche vengono presi in considerazione gli stessi stati limite delle nuove costruzioni (SLU e SLE).

Per le combinazioni di carico che includono il sisma, saranno presi in considerazione:

- gli stati limite ultimi, distinti in stato limite di collasso (SLC) e di salvaguardia della vita (SLV);
- gli stati limite di esercizio, distinti in stato limite di danno (SLD) e stato limite di operatività (SLO).

Lo stato limite di collasso viene considerato solo per costruzioni di calcestruzzo armato o di acciaio, in cui la verifica di tale stato limite può essere eseguita in alternativa a quella di stato limite di salvaguardia della vita; nelle costruzioni in muratura si assume che il soddisfacimento della verifica allo SLV implichi anche il soddisfacimento della verifica dello SLC.

Gli stessi metodi previsti dalle norme di progetto per le nuove costruzioni valgono in generale per la valutazione degli edifici esistenti.

Esistono però procedimenti particolari e prescrizioni del tutto specifiche, qui illustrati in modo necessariamente qualitativo; per informazioni dettagliate si rimanda al punto C8A della Circolare n. 617.

■ Valutazione della sicurezza

Per la definizione dell'azione sismica, per la modellazione della struttura e le modalità di analisi si applicano i criteri generali già esposti per gli edifici di nuova progettazione (v. unità E1 ed E2).

Nel caso di verifica con analisi lineare e impiego del fattore q , il valore da utilizzare per quest'ultimo, in assenza di più precise valutazioni, può essere assunto pari a:

- $q = 2,0 \cdot 1,5 = 3$ per edifici regolari in elevazione;
- $q = 1,5 \cdot 1,5 =$ per tutti gli altri edifici.

■ Edifici semplici

È consentito applicare le norme semplificate relative ai nuovi edifici in muratura definiti *semplici* (v. unità E2) se, oltre alle condizioni ivi prescritte, dopo l'intervento di adeguamento, risulta che:

- le pareti ortogonali sono ben collegate tra loro;
- i solai sono ben collegati alle pareti;
- tutte le aperture sono dotate di architravi resistenti a flessione;
- tutte le spinte di tetti, archi e volte sono state eliminate o equilibrate;
- tutti gli elementi, anche non strutturali, a elevata vulnerabilità sono stati eliminati;
- le murature non sono a sacco o a doppio paramento, e in generale di cattiva qualità e scarsa resistenza.

Invece della resistenza caratteristica a compressione f_k si utilizzerà il valore medio f_m diviso per il *fattore di confidenza* (v. paragrafo 10 online).

■ Resistenza di calcolo

Nel caso di analisi elastica con il fattore q , i valori di calcolo della resistenza sono ottenuti dividendo i valori medi per i rispettivi fattori di confidenza e per il coefficiente parziale di sicurezza γ_M (v. unità E2). Nel caso di analisi non lineare, i valori di calcolo delle resistenze da utilizzare sono ottenuti dividendo gli stessi valori medi per i soli fattori di confidenza.

■ Valori medi della resistenza del materiale

La ►TABELLA 1 riporta i **valori medi** delle resistenze e degli altri parametri meccanici che possono essere adottati nelle analisi degli edifici in muratura, e precisamente:

TABELLA 1 Valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura, riferiti alle seguenti condizioni: malta di caratteristiche scarse, assenza di ricorsi (listature), paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata

Tipologia di muratura	f_m	τ_0	E	G	w (kN/m ³)
	(N/cm ²)	(N/cm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	
	min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadriati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (per esempio: doppio UNI)	500 800	24,0 32,0	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (percentuale di foratura < 45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (percentuale di foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (percentuale di foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

Fonte: OPCM 3241.

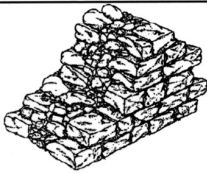
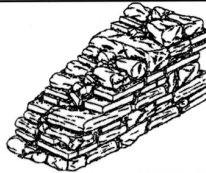


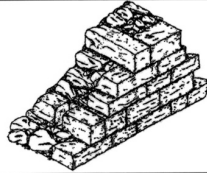
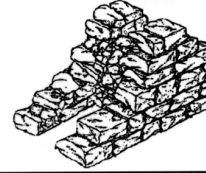



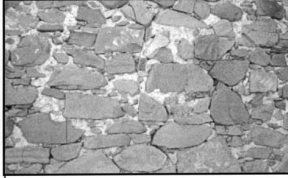





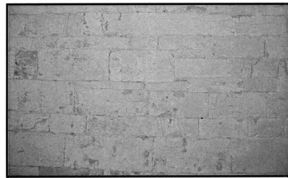

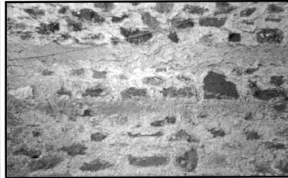

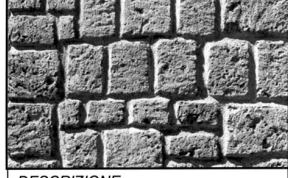


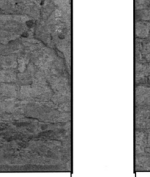


<p>1 Muratura a sacco formata da pietre di pezzature molto varie, male intessuta e priva di collegamento tra i due fogli. CLASSE D</p>	<p>3 Murature di pietra sbazzata in presenza di irregolarità. CLASSE C o D</p>		
			
<p>DESCRIZIONE: Sezione muraria con nucleo incoerente priva di elementi di collegamento (diatoni) tra i due paramenti.</p>	<p>DESCRIZIONE: Sezione muraria con ricorsi in pietra squadrata o mattoni pieni che non attraversano tutto lo spessore murario.</p>	<p>DESCRIZIONE: Costituita da elementi in pietra non lavorata e di varie dimensioni ottenuti da spezzoni di pietra e scauoli di cava.</p>	<p>DESCRIZIONE: Costituita da elementi in pietra grezza di varie dimensioni disposte irregolarmente, con inserti in mattoni.</p>
			
<p>DESCRIZIONE: Sezione muraria con nucleo non degradato con scarso numero di collegamenti (diatoni) tra i due paramenti.</p>	<p>DESCRIZIONE: Sezione muraria con nucleo parzialmente tufo o fortemente degradato.</p>	<p>DESCRIZIONE: Costituita da elementi in pietra non squadrato e di varie dimensioni disposte in maniera caotica, in assenza di orizzontalità dei filari.</p>	<p>DESCRIZIONE: Costituita da elementi in tufo, molto poroso, di pezzatura ed apparecchiatura irregolari.</p>
			
<p>DESCRIZIONE: Paramento di muratura a sacco in pietrame con elementi di pezzatura disomogenea, parzialmente sbazzati.</p>	<p>DESCRIZIONE: Paramento di muratura a sacco in pietrame non squadrato con apparecchiatura disorganizzata ed irregolare.</p>	<p>DESCRIZIONE: Costituita da elementi semilavorati pressoché lastriiformi, con apparecchiatura muraria caotica.</p>	<p>DESCRIZIONE: Costituita da elementi semilavorati pressoché lastriiformi, con apparecchiatura muraria con filari orizzontali piuttosto regolari.</p>
<p>4 Murature di pietra sbazzata con spigoli mazzette e/o ricorsi in mattoni pieni e/o pietra squadrata. CLASSE B o C</p>	<p>7 Muratura in blocchetti di tufo o pietra da taglio di dimensioni costanti. CLASSE A o B</p>		
			
<p>DESCRIZIONE: Presenza di ricorsi continui o discontinui in mattoni pieni, in presenza di pietrame discretamente squadrato.</p>	<p>DESCRIZIONE: Presenza di ricorsi in conglomerato cementizio.</p>	<p>DESCRIZIONE: Costituita da elementi omogenei in pietra naturale ben squadrata e lavorata, di accurata fattura.</p>	<p>DESCRIZIONE: Costituita da elementi omogenei in pietra naturale ben squadrata e lavorata, di accurata fattura.</p>
			
<p>DESCRIZIONE: Presenza di ricorsi continui o discontinui in mattoni pieni, in presenza di pietrame non squadrato o grossolanamente squadrato.</p>	<p>DESCRIZIONE: Presenza di ricorsi in conglomerato cementizio non degradato (fascioni).</p>	<p>DESCRIZIONE: Costituita da elementi in tufo di dimensioni standard e apparecchiatura regolare.</p>	<p>DESCRIZIONE: Costituita da elementi in tufo squadrato con adeguata tessitura muraria.</p>
			
<p>DESCRIZIONE: Paramento di muratura in pietra sbazzata con mazzette in mattoni pieni.</p>	<p>DESCRIZIONE: Paramento di muratura in pietra sbazzata con spigoli in mattoni pieni.</p>	<p>DESCRIZIONE: Paramento di muratura in tufo con cantonale ben eseguito.</p>	<p>DESCRIZIONE: Costituita da elementi in tufo grossolanamente squadrati con apparecchiatura irregolare.</p>
	<p>DESCRIZIONE: Costituita da elementi in tufo di antica posa in opera con apparecchiatura regolare.</p>		

FIGURA 1 Tipologie murarie: rilevamento delle carenze strutturali per edifici in muratura in zona sismica (Regione Toscana).

- resistenza media a compressione f_m ;
- resistenza media a taglio τ_0 ;
- valore medio del modulo elastico normale E ;
- valore medio del modulo elastico tangenziale G .

Nella stessa tabella è riportato anche il peso specifico medio w .

Per la valutazione della qualità muraria e la determinazione delle caratteristiche meccaniche risulta di particolare importanza rilevare:

- la presenza di collegamenti trasversali (diàtoni);
- la forma e le dimensioni degli elementi;
- la tessitura e l'orizzontalità delle giaciture;
- la regolarità dei giunti di malta e il loro spessore;
- la qualità e la consistenza della malta.

Data la grande varietà di tecniche costruttive e di materiali impiegati su scala nazionale, le Regioni possono a tal fine definire tabelle specifiche contenenti le tipologie e le caratteristiche meccaniche delle murature presenti sul proprio territorio (► FIGURA 1).

Si noti come i valori indicati nella ► TABELLA 1 facciano riferimento a murature di caratteristiche scadenti. Se la muratura presenta caratteristiche migliori i valori dei parametri meccanici riportati in tabella possono essere moltiplicati per i coefficienti maggiorativi indicati nella ► TABELLA 2.

In definitiva, per i diversi livelli di conoscenza e per ogni tipologia muraria, i valori medi dei parametri meccanici sono determinati come segue.

Per i moduli elastici si assume in ogni caso la media delle prove o i valori medi degli intervalli riportati in tabella. Nei riguardi delle resistenze si assumono valori diversi in funzione del livello di conoscenza.

Per i diversi livelli di conoscenza i valori medi dei parametri meccanici possono essere assunti come segue.

TABELLA 2 Coefficienti correttivi dei parametri meccanici (indicati nella tabella 1) da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone o ottime; presenza di ricorsi o listature; presenza sistematica di connessioni trasversali; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato

Tipologia di muratura	Malta buona	Giunti sottili (< 10 mm)	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Nucleo scadente o ampio	Iniezioni di miscele leganti	Intonaco armato
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	–	1,3	1,5	0,9	2	2,5
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	1,4	1,2	1,2	1,5	0,8	1,7	2
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	–	1,1	1,3	0,8	1,5	1,5
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,5	1,5	–	1,5	0,9	1,7	2
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	1,2	–	1,2	0,7	1,2	1,2
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1,5	1,5	–	1,3	0,7	1,5	1,5
Parametri (f_m , τ_0 , E , G) cui applicare i coefficienti	Tutti	Tutti (*)	f_m , τ_0	f_m , τ_0 (**)	Tutti	Tutti	Tutti

(*) Solo la metà del coefficiente per τ_0 .

(**) Solo murature storiche.

Fonte: OPCM 3241.

LC1

- Resistenze → valori minimi degli intervalli riportati in tabella.
- Moduli elastici → valori medi degli intervalli riportati.

LC2

- Resistenze → i valori medi degli intervalli riportati in tabella.
- Moduli elastici → valori medi degli intervalli riportati in tabella.

LC3

Caso a (sono disponibili tre o più valori sperimentali di resistenza).

- Resistenze → media dei risultati delle prove.
- Moduli elastici → media dei risultati delle prove o valori medi degli intervalli riportati in tabella.

Caso b (sono disponibili due valori sperimentali di resistenza).

- Resistenze.
 - Il valore medio delle resistenze sperimentali è compreso nell'intervallo riportato in tabella → valore medio dell'intervallo.
 - Il valore medio delle resistenze sperimentali è maggiore dell'estremo superiore dell'intervallo → valore superiore dell'intervallo.
 - Il valore medio delle resistenze sperimentali è inferiore al minimo dell'intervallo → valore medio sperimentale.
- Moduli elastici → vale quanto indicato per il caso *a*.

Caso c (è disponibile un solo valore sperimentale di resistenza).

- Resistenze.
 - Il valore sperimentale è compreso nell'intervallo riportato in tabella, oppure è superiore → valore medio dell'intervallo.
 - Il valore sperimentale è inferiore al minimo dell'intervallo → valore sperimentale.
- Moduli elastici → vale quanto indicato per il caso *a*.

APPLICAZIONE

Determinare la resistenza media a compressione di una muratura esistente in mattoni pieni e malta di calce di buone caratteristiche.

LC1 → si assume il valore minimo riportato nella ► TABELLA 1: 2,4 N/mm². La presenza di malta di buone caratteristiche consente di moltiplicare tale valore per il coefficiente maggiorativo 1,5 (► TABELLA 2). Si ha:

$$f_m = 2,4 \cdot 1,5 = 3,6 \text{ N/mm}^2$$

LC2 → si assume il valore medio dell'intervallo riportato in tabella: (2,4 + 4,0)/2 = 3,2 N/mm². La presenza di malta di buone caratteristiche consente di assumere:

$$f_m = 3,2 \cdot 1,5 = 4,80 \text{ N/mm}^2$$

LC3 (con un solo valore sperimentale di 1,7 N/mm²) → essendo 1,7 < 1,8, si assume:

$$f_m = 1,5 \cdot 1,7 = 2,7 \text{ N/mm}^2$$