

Università di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura

Corso di
Problemi Strutturali dell'Edilizia Storica

ELEMENTI MURARI

Prof. Ing. Natalino Gattesco

BIBLIOGRAFIA

Hendry A.W. (1986) “Statica delle strutture in muratura di mattoni”, Patron Editore, Bologna.

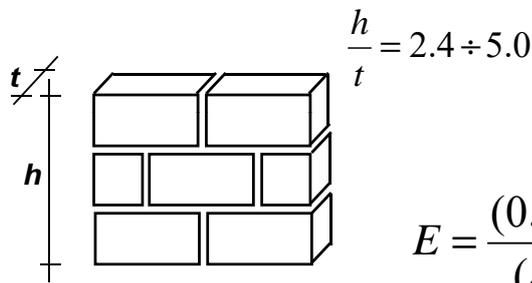
Tomazevic M. (2001) “Earthquake-Resistant Design of Masonry Buildings”, Series on Innovation in Structures and Construction – Vol. 1, Imperial College Press, London.

Eurocodice 6 – “Progettazione delle strutture in muratura – Parte 1.1: Regole generali per gli edifici – Regole per la muratura armata e non armata”, UNI ENV 1996-1-1

D.M. 14.01.2008 – Norme tecniche per le costruzioni.

LEGAME σ - ε

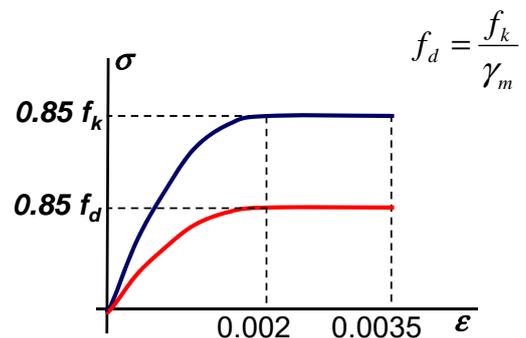
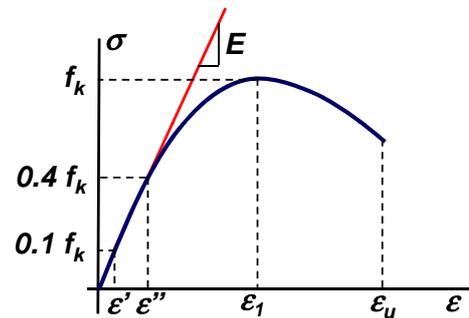
Il legame costitutivo della muratura per sforzi di compressione viene ricavato con prove specifiche su muretti



$$E = \frac{(0.4 - 0.1)}{(\varepsilon'' - \varepsilon')} f_k$$

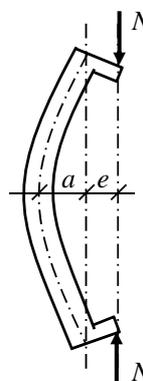
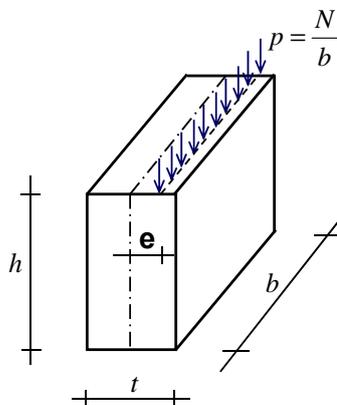
$$E \approx 1000 f_k \rightarrow G = \frac{E}{2(1+\nu)} \approx 0.4 E$$

$$\begin{aligned} \sigma &= 850 \varepsilon (1 - 250 \varepsilon) f_k && \text{per } \varepsilon \leq 0.002 \\ \sigma &= f_k && \text{per } \varepsilon > 0.002 \end{aligned}$$



RESISTENZA MURATURA

La resistenza a compressione di una muratura è sensibilmente influenzata dall'eccentricità del carico e dalla snellezza fuori piano della parete



e = eccentricità di carico

a = effetto del 2° ordine

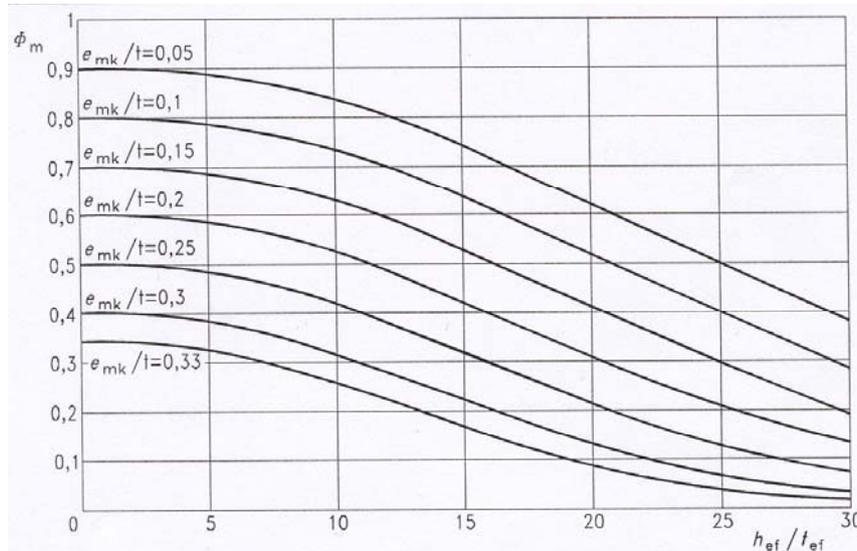
E' possibile tener conto di questi effetti pur eseguendo una verifica a compressione centrata, riducendo la resistenza con un opportuno coefficiente riduttivo ϕ

$$N_{Rd} = \phi f_d b t$$

COEFFICIENTE RIDUTTIVO ϕ

Nell'EC6 viene fornita una relazione esplicita del coefficiente ϕ

$$\phi\left(e, \frac{h}{t}\right) = \left(1 - 2 \frac{e}{t}\right) \exp\left(-\frac{\frac{h}{t} - 2}{23 - 37 \frac{e}{t}}\right)$$



COEFFICIENTE RIDUTTIVO ϕ

Nel DM 17.1.2018 il coefficiente ϕ viene fornito in forma tabellare

Snellezza λ	Coefficiente di eccentricità $m = 6 e/t$				
	0	0,5	1,0	1,5	2,0
0	1,00	0,74	0,59	0,44	0,33
5	0,97	0,71	0,55	0,39	0,27
10	0,86	0,61	0,45	0,27	0,16
15	0,69	0,48	0,32	0,17	
20	0,53	0,36	0,23		

Per valori non contemplati in tabella è ammessa l'interpolazione lineare. Non sono ammesse estrapolazioni.

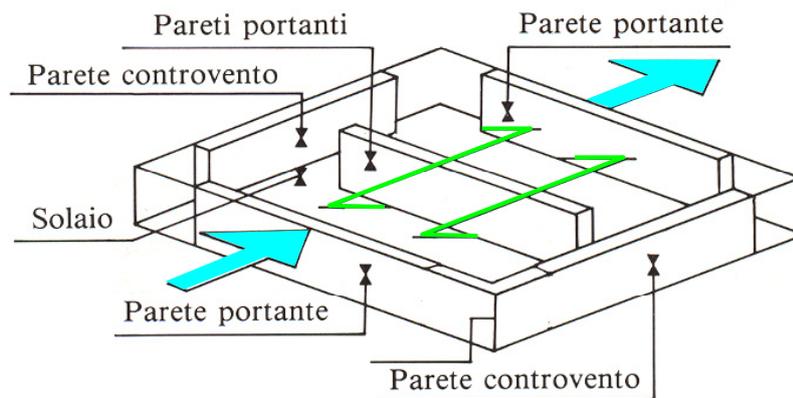
CONCEZIONE STATICA EDIFICIO A MURATURA PORTANTE

Gli edifici in muratura portante presentano in genere un comportamento statico di tipo scatolare e quindi tridimensionale caratterizzato dai seguenti elementi

Muri portanti – hanno il compito di “reggere” i solai

Muri di controvento – hanno il compito di assorbire le azioni orizzontali

Solai – svolgono il duplice compito di distribuire sia i carichi verticali sui muri portanti che le forze orizzontali sulle pareti di controvento



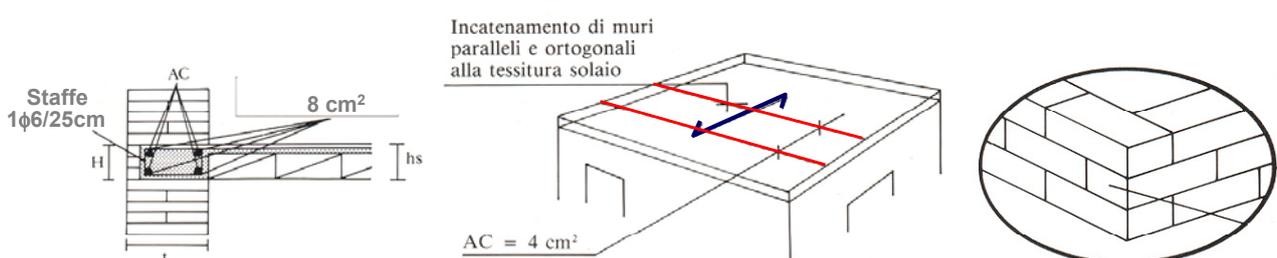
COLLEGAMENTI

Per un buon funzionamento strutturale sia sotto carichi verticali sia per azioni orizzontali è indispensabile che gli elementi siano efficacemente collegati fra loro in corrispondenza delle intersezioni

Cordoli armati orizzontali collegano i solai di piano e di copertura alle pareti

Incatenamenti orizzontali interni che collegano i muri paralleli a livello dei solai eseguiti con armature metalliche

Ammorsamenti tra pareti tra loro ortogonali mediante incastro degli elementi (*mattoni, blocchi*) che compongono la muratura

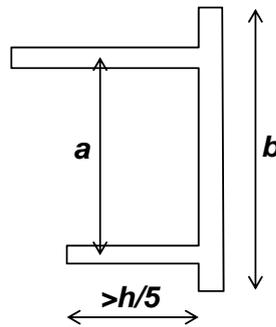
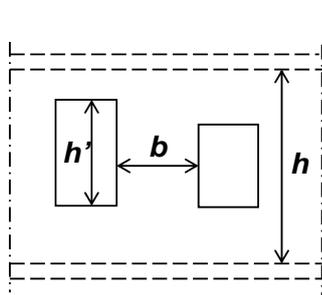


GEOMETRIA DELLE PARETI

Le pareti al netto dell'intonaco devono rispettare le dimensioni:

Tipologie costruttive	t_{\min}	$(\lambda=h_0/t)_{\max}$	$(l/h')_{\min}$
Muratura ordinaria, realizzata con elementi in pietra squadrata	300 mm	10	0,5
Muratura ordinaria, realizzata con elementi artificiali	240 mm	12	0,4
Muratura armata, realizzata con elementi artificiali	240 mm	15	Qualsiasi
Muratura ordinaria, realizzata con elementi in pietra squadrata, in siti ricadenti in zona 3 e 4	240 mm	12	0,3
Muratura realizzata con elementi artificiali semipieni, in siti ricadenti in zona 4	200 mm	20	0,3
Muratura realizzata con elementi artificiali pieni, in siti ricadenti in zona 4	150 mm	20	0,3

t è lo spessore della parete, h_0 è l'altezza di libera inflessione, h' è l'altezza delle aperture adiacenti alla parete, b larghezza della parete



$$h_0 = \rho \cdot h$$

	Valori di ρ
$h/a \leq 0.5$	1
$0.5 < h/a \leq 1.0$	$3/2 - h/a$
$h/a > 1.0$	$1/[1 + (h/a)^2]$

ALTEZZA EFFETTIVA SECONDO EC6

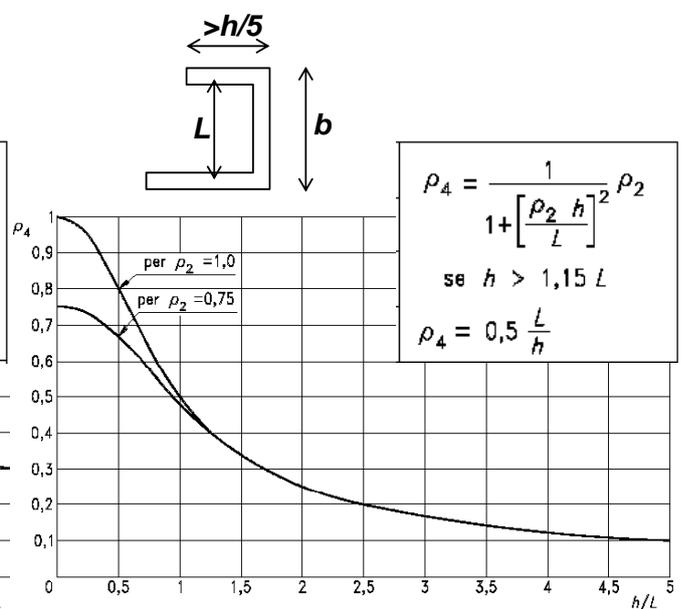
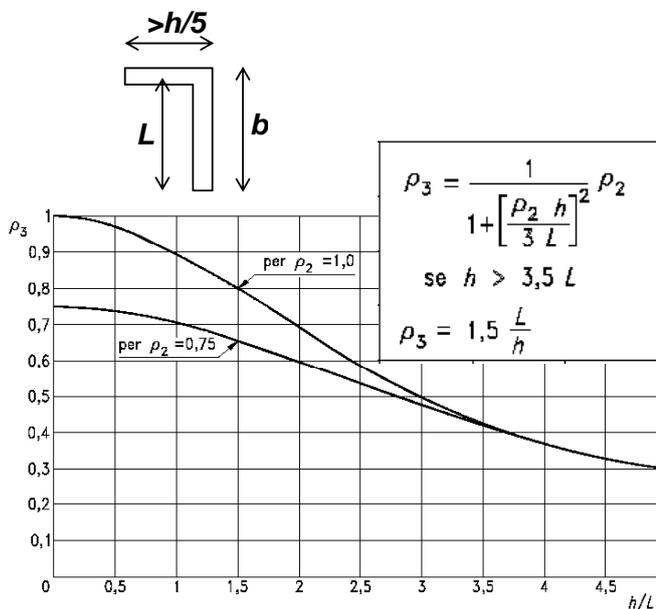
Nell'Eurocodice n. 6 l'altezza effettiva in funzione dei vincoli è pari a

$$h_{ef} = \rho_n \cdot h$$

(n numero di lati vincolati)

$\rho_2=0.75$ per solai in laterocemento

$\rho_2=1.0$ per solai in legno



MODELLI ANALITICI PER L'ANALISI

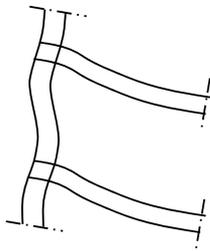
Una costruzione in muratura è costituita dall'insieme di elementi piani (pareti e solai) connessi tra loro.

Un calcolo rigoroso richiede procedure ad elementi finiti in grado di tener conto sia della non linearità meccanica dei materiali che degli effetti della deformazione della struttura (effetti del 2° ordine).

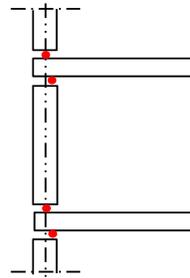
Questo modo di procedere però diventa proibitivo nella pratica progettuale, per cui si utilizzano metodi convenzionali di facile impiego.

Tali metodi si basano su una serie di ipotesi semplificative sul comportamento statico della struttura

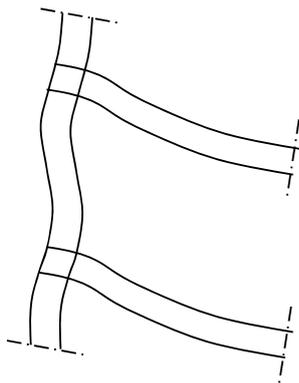
Schema della continuità



Schema dell'articolazione



MODELLI ANALITICI PER L'ANALISI

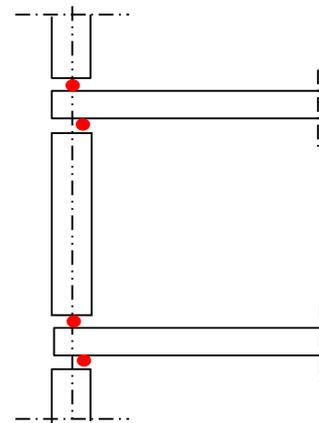


Schema della continuità

Le sollecitazioni fuori-piano di ogni singolo elemento (*pannello murario*) vengono determinate facendo riferimento ad uno schema a telaio piano a nodi fissi assumendo le rigidzze elastiche per solai e pareti

Schema dell'articolazione

Si ipotizzano i muri incernierati agli estremi. Per tener conto dei momenti flettenti dovuti ai carichi verticali, alle tolleranze di esecuzione ed alle azioni orizzontali, i carichi assiali vengono applicati con opportune eccentricità (*generalmente si assume eccentricità nulla al piede*)

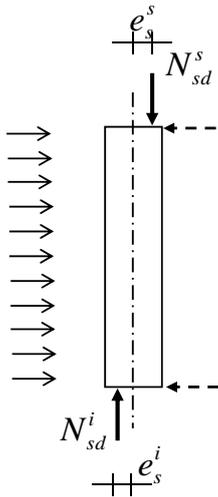


VERIFICA SINGOLO PANNELLO

La verifica del singolo pannello nei confronti dei carichi verticali e delle sollecitazioni flessionali fuori-piano consiste in una semplice verifica a compressione con penalizzazione della resistenza (coefficiente ϕ) per tener conto dei momenti di estremità.

$$N_{sd} \leq N_{Rd}$$

$$N_{Rd} = \phi \cdot f_d b t$$



$$\phi = f\left(\frac{e}{t}, \frac{h_0}{t}\right)$$

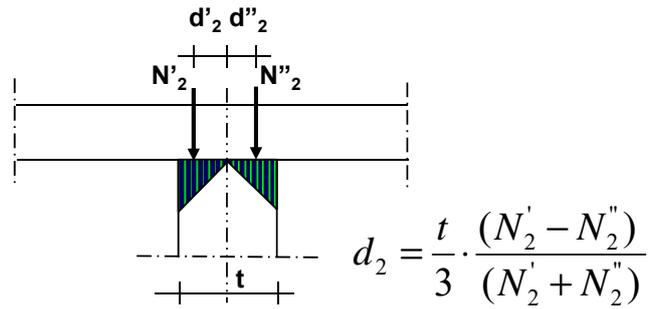
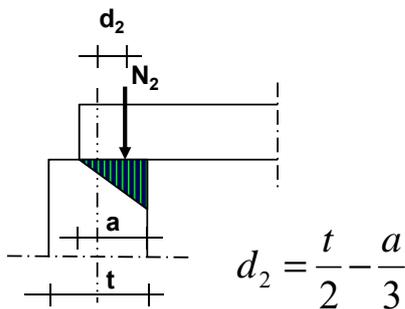
eccentricità

snellezza

I valori delle eccentricità dei carichi possono essere determinati facendo ricorso a metodi a telaio semplificati (EC6)

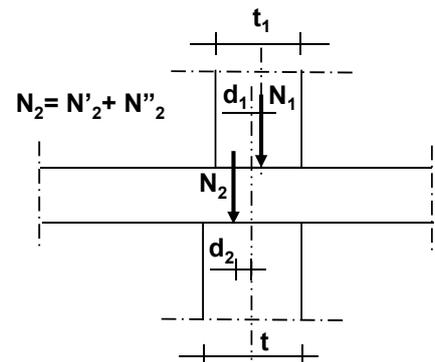
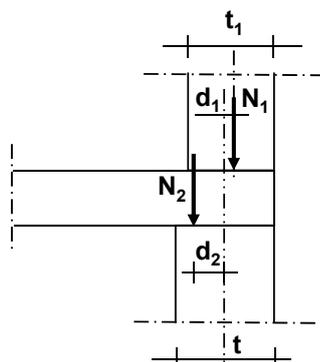
ECCENTRICITA' STRUTTURALE

Un altro metodo di calcolo delle eccentricità del carico dei solai si basa su regole empiriche



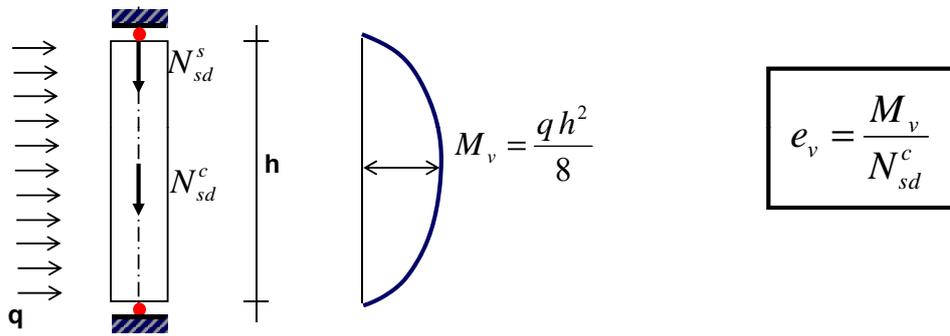
L'eccentricità strutturale totale è quindi data dalla relazione

$$e_s = \frac{N_1 d_1 + N_2 d_2}{N_1 + N_2}$$



ECCESTRICITA' DA CARICO ORIZZONTALE

L'azione orizzontale agente perpendicolarmente al piano medio della parete produce un momento flettente dal quale si ricava e_v



ECCESTRICITA' ACCIDENTALE e_a

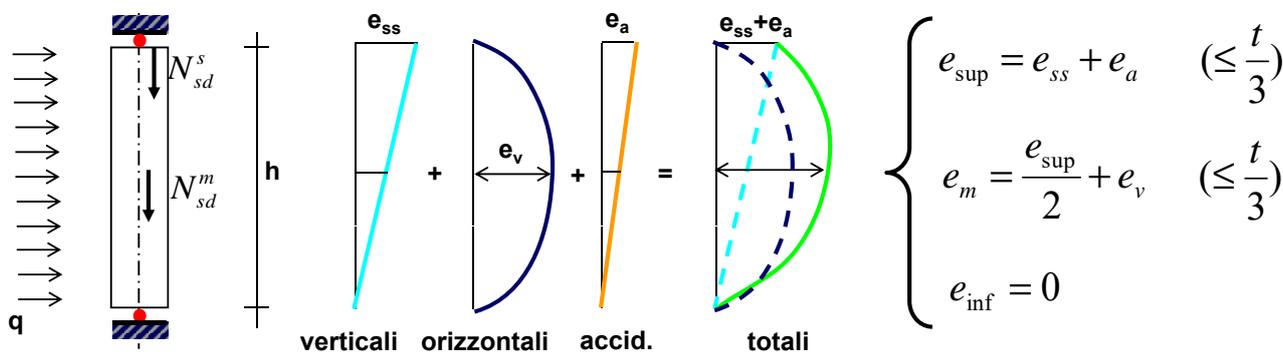
Tiene conto delle tolleranze di verticalità e linearità nella costruzione della parete

$$e_a = \frac{h}{200}$$

h altezza di piano in cm

COMBINAZIONE ECCESTRICITA'

DM 17.01.2018



VERIFICA PANNELLO

Sezioni di estremità pannello

$$\phi_{s,i} = f\left(\frac{e_{\text{sup,inf}}}{t}, 0\right) = 1 - 2 \frac{e_{\text{sup,inf}}}{t} \quad (\text{Valori Tabella } \phi \text{ NTC 2018})$$

$$N_{Rd} = \phi_{s,i} \cdot f_d \cdot b \cdot t$$

$$N_{sd} \leq N_{Rd}$$

Sezioni centrale del pannello

$$\phi_m = f\left(\frac{e_m}{t}, \frac{h_o}{t}\right) = \left(1 - 2 \frac{e_m}{t}\right) \exp\left(-\frac{\frac{h_o}{t} - 2}{23 - 37 \frac{e_m}{t}}\right) \quad (\text{Valori Tabella } \phi \text{ NTC 2018})$$

$$N_{Rd} = \phi_m \cdot f_d \cdot b \cdot t$$

$$N_{sd} \leq N_{Rd}$$

PROCEDURA DI VERIFICA STRUTTURALE PER CARICHI VERTICALI E LATERALI

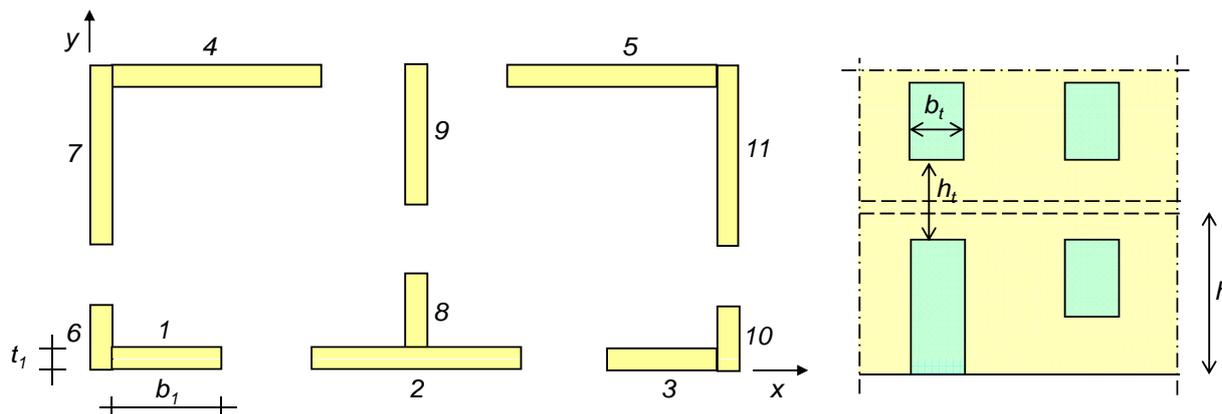
Le fasi operative per la verifica di una costruzione in muratura soggetta ai carichi verticali ed orizzontali da vento (*non sismici*) sono le seguenti:

1. Individuazione della struttura portante e della geometria
2. Determinazione delle caratteristiche meccaniche della muratura
 - resistenza caratteristica a compressione f_k
 - resistenza caratteristica a taglio puro f_{vko}
 - resistenze di calcolo
 - moduli di elasticità E e G

INDIVIDUAZIONE STRUTTURA PORTANTE

In sede di progettazione è necessario cercare di disporre le murature con una certa regolarità al fine di evitare parti di struttura molto più sollecitate di altre.

Allo schema di edificio si introduce un sistema di assi cartesiani e si procede alla numerazione delle pareti reagenti. Si attribuiscono delle dimensioni b_i e t_i ai vari maschi e si definisce l'altezza di piano h e la dimensione delle traverse b_t , t_t e h_t .



CARATTERISTICHE MECCANICHE MURATURA

Si suppone che l'edificio venga costruito con elementi in laterizio semipieni con resistenza dei blocchi di $f_{bk} > 15 \text{ MPa}$ e con malta cementizia della classe M10 (10 MPa)

Dalla Tabella 11.10.VI del DM 17.01.2018 si ricava per la resistenza caratteristica a compressione della muratura

$$f_k = 6.7 \text{ MPa}$$

La resistenza a taglio in assenza di carichi verticali si ricava dalla Tabella 11.10.VIII dello stesso Decreto

$$f_{vko} = 0.3 \text{ MPa}$$

I valori di E e G risultano

$$E = 1000 f_k = 6700 \text{ MPa}$$

$$G = 0.4 E = 2680 \text{ MPa}$$

I valori di progetto delle resistenze si ricavano dividendo quelli caratteristici per

$$\gamma_M = 2 \div 3$$

Dipende dalla classe di esecuzione e dal tipo di controllo dei materiali (categoria)

CARATTERISTICHE MECCANICHE MURATURA

Si ricavano da prove in situ (martinetti piatti), da prove su campioni prelevati e sottoposti a prova in laboratorio e da indicazioni basate sulla tipologia e tessitura della muratura

I valori di calcolo si ricavano dividendo i valori caratteristici per i coefficienti di sicurezza parziali γ_m e per i fattori di confidenza FC.

I valori di E e G , in assenza di risultati sperimentali, possono essere determinati sulla base delle seguenti relazioni

$$E = 1000 f_k \qquad G = 0.4 E$$

PROCEDURA DI VERIFICA STRUTTURALE PER CARICHI VERTICALI E LATERALI

3. **Analisi dei carichi**
4. **Distribuzione del carico verticale sui muri**
5. **Determinazione sollecitazioni agenti sul muro da verificare**
 - *determinazione sollecitazioni normali N_1, N_2*
 - *determinazione della sollecitazione orizzontale (fuoripiano)*
 - *determinazione momento da forze orizzontali (fuoripiano)*
6. **Verifica agli sforzi normali**
 - *determinazione eccentricità $e_a, e_s, e_v, e_{sup}, e_{inf}, e_m$ per le verifiche*
 - *determinazione dei coefficienti ϕ*
 - *verifica a compressione nelle sezioni di estremità e di mezzeria*

ANALISI DEI CARICHI

Si considerano i gruppi di azioni che agiscono sulla struttura:

- peso proprio delle opere strutturali G_{k1} e non strutturali G_{k2}
- sovraccarico variabile sui solai Q_{k1} e sulla copertura Q_{k2}
- azione del vento Q_{k3}

Per le verifiche agli Stati Limite Ultimi, i gruppi di azioni vanno combinati nella maniera più sfavorevole

$$\gamma_{G1} G_{k1} + \gamma_{G2} G_{k2} + \gamma_{Q1} Q_{k1} + \gamma_{Q2} \psi_{02} Q_{k2} + \gamma_{Q3} \psi_{03} Q_{k3}$$

Categoria/Azione variabile	ψ_{0i}		Coefficiente γ_F	A1 STR
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,7			
Categoria B Uffici	0,7			
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,7			
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,7	Carichi permanenti	favorevoli	1,0
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0		sfavorevoli	1,3
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	Carichi permanenti non strutturali ⁽¹⁾	favorevoli	0,0
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7		sfavorevoli	1,5
Categoria H Coperture	0,0			
Vento	0,6			
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	Carichi variabili	favorevoli	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7		sfavorevoli	1,5
Variazioni termiche	0,6			

DISTRIBUZIONE DEI CARICHI VERTICALI

La quota parte di carico dei solai che confluisce sul generico maschio può essere valutata individuando delle opportune aree di influenza

Nella definizione delle aree di influenza è necessario tenere conto anche della quota parte di carico che viene portata dalle pareti disposte parallelamente alle travi del solaio per effetto piastra

