

Statica per l'edilizia storica

Università degli Studi di Cagliari
Corso di Laurea Magistrale in
Architettura

A.A. 2014-2015

Prof. ing. Antonio Cazzani, Dr. ing. Flavio Stochino

antonio.cazzani@unica.it

<http://people.unica.it/antoniocazzani/ses/>

Lezione 2 - I materiali costituenti la muratura

Sommario

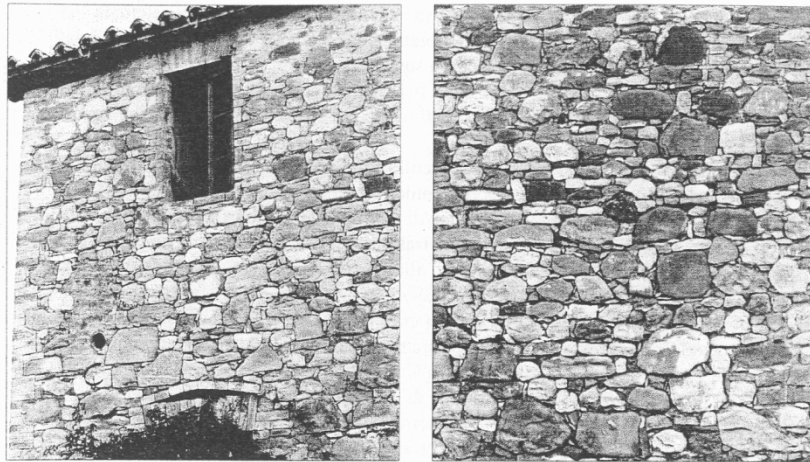
- Materiali per murature:
 - Malte
 - Elementi naturali per murature portanti
 - Elementi artificiali per murature portanti
 - Elementi di completamento della struttura portante in muratura
- Tipologie delle murature:
 - Classificazione in base agli elementi utilizzati
 - Classificazione secondo il ruolo funzionale e la tipologia strutturale
 - Classificazione secondo tecniche di esecuzione e forma
 - Classificazione in relazione alla apparecchiatura muraria
 - Normative italiane ed europee
- Proprietà meccaniche della muratura (aspetti fenomenologici):
 - Compressione semplice
 - Resistenza a taglio
 - Resistenza a trazione e a flessione
 - Proprietà deformative

Muratura

Assemblaggio di elementi murari disposti secondo uno specifico modulo e uniti insieme con malta

In base alla funzione svolta si distingue fra:

- Muratura portante (*funzione strutturale*);
- Muratura di tamponamento o di partizione (*funzione architettonica o energetica*);
- Muratura di finitura od ornamentale (*funzione estetica*).



Costruzioni in muratura in pietra naturale.
(Immagine tratta da Boscotrecase *et al.*, *op. cit.*)

Malte (1/5)

Miscele costituite da *legante* (calci, gesso, cemento) unito a *sabbia* e *acqua*: l'impasto fresco è plasmabile per un periodo più o meno lungo e indurisce in tempi variabili a seconda del legante.

La sabbia ha lo scopo di (i) impedire un ritiro troppo marcato (con conseguenti screpolature); (ii) aumentare il volume dell'impasto senza sminuirne le proprietà meccaniche; (iii) riempire giunti e cavità in modo economico ed efficace.

Per malte adibite a murature strutturali si usa sabbia a granulometria media ($D < 1 \text{ mm}$); per intonaci a granulometria fine ($D = 0.2 \div 0.5 \text{ mm}$).

L'acqua ha lo scopo di realizzare la reazione chimica con il legante che permette di saldare fra loro le particelle di sabbia e fare aderire la malta ai componenti solidi della muratura.

Deve essere pura per non produrre reazioni indesiderate con conseguenze negative in termini di resistenza meccanica e/o formazione di efflorescenze e/o alterazioni cromatiche.

Cemento (Portland) è ottenuto da cottura a $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ di miscele di calcari argille e altri minerali: il prodotto della cottura è il *clinker* che, macinato finemente, fornisce prodotto con tipiche caratteristiche idrauliche.

Accanto al cemento Portland si hanno anche il cemento pozzolanico, quello di altoforno e quello alluminoso.

Malte (2/5)

Calce aerea è ottenuta da cottura di calcari fra 850 e 900 °C: si ottiene la calce viva (carbonato di calcio) costituita da blocchi informi porosi che producono a contatto con acqua una vivace reazione esotermica con formazione di idrato di calcio (*grassello*) usato per la formazione di malta.

Una variante è la calce idrata in polvere, calce spenta senza aggiunta di acqua così da ottenere un prodotto secco macinato e commercializzato come polvere.

Calce idraulica è ottenuta per cottura di calcari marnosi fra 900 e 1000 °C: la macinazione del prodotto di cottura dà luogo a una farina costituente il legante per malte di tipo idraulico.

Si possono ottenere calci idrauliche artificiali mescolando calce aerea spenta con loppa d'altoforno in granuli.

Gesso è ottenuto per cottura fra 110 e 200 °C di "pietra di gesso", minerali ad alta percentuale di gesso e contenenti solfato di calcio idrato. Il prodotto viene macinato più o meno finemente per consentirne l'uso come legante. Nelle malte di gesso non si fa generalmente uso di sabbia.

Per migliorare la lavorabilità durante la posa in opera si fa uso di additivi che danno origine a *calce plastica* e *agglomerante cementizio plastico*.

Malte (3/5)

Composizione e classificazione delle malte. (Tabella tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Classe	Tipo di malta	Composizione				
		Cemento	Calce aerea	Calce idraulica	Sabbia	Pozzolana
M4	Idraulica	–	–	1	3	–
M4	Pozzolonica	–	1	–	–	3
M4	Bastarda	1	–	2	9	–
M3	Bastarda	1	–	1	5	–
M2	Cementizia	1	–	0,5	4	–
M1	Cementizia	1	–	–	3	–

Caratteristiche di resistenza media a compressione per malte di altra composizione.

12 N/mm ²	per l'equivalenza alla malta M ₁
8 N/mm ²	per l'equivalenza alla malta M ₂
5 N/mm ²	per l'equivalenza alla malta M ₃
2,5 N/mm ²	per l'equivalenza alla malta M ₄

(Tabella tratta da Boscotrecase *et al.*, *op. cit.*)

Malte (4/5)

Composizione, classificazione e caratteristiche di resistenza a compressione.

Classe	Composizione in volume			Resistenza a compressione σ_{rc} (MPa)
	Cemento 325	Calce Idraulica	Sabbia	
M1	1	0	3	20
M2	1	0.5	4	10
M3	1	1	5	5
M4	1	2	9	-

(Tabella tratta da Olivito, *op. cit.*)

Designazione in base alle caratteristiche di resistenza a compressione.

Classe	M2,5(*)	M5	M10	M15	M20	M d
Resistenza a compressione f_m (N/mm ²)	2,5	5	10	15	20	d>25 dich. dal produttore

(*) Secondo le OPCM in zona sismica: $f_m \geq 5$ N/mm²

(Tabella tratta da Iacobelli, *op. cit.*)

Malte (5/5)

Effetti della composizione sulle caratteristiche meccaniche della malta.

Tabella 2.6 Richieste per la malta (BS 5628).

Designazione della malta	Tipi di malta (proporzione in volume)			Resistenza a compressione a 28 giorni (N/mm ²)	
	Cemento: Calce: Sabbia	Cemento per per muratura: Sabbia	Cemento: Sabbia con additivo plastico	Test preliminari (in laboratorio)	Prove in sito
(i)	1:0 a $\frac{1}{4}$:3	–	–	16.0.	11.0
(ii)	1: $\frac{1}{2}$:4 a 4 $\frac{1}{2}$	1:2 $\frac{1}{2}$ a 3 $\frac{1}{2}$	1:3 a 4	6.5'	4.5
(iii)	1:1:5 a 6	1:4 a 5	1:5 a 6	3.6	2.5
(iv)	1:2:8 a 9	1:5 $\frac{1}{2}$ a 6 $\frac{1}{2}$	1:7 a 8	1.5	1.0

↑ Resistenza crescente

↓ Capacità crescente di assecondare i movimenti, per esempio dovuti a cedimenti, variazioni di temperatura ed umidità.

Direzione di variazione nelle proprietà rappresentata dalle frecce

Resistenza crescente al gelo durante la costruzione

→ Aumento di aderenza e conseguente resistenza alla penetrazione della pioggia

←

Tabella tratta da Hendry *et al.*, *op. cit.*

Elementi naturali per muratura portante (1/5)

Elementi naturali sono le pietre, rocce di varia origine presenti in ambiti regionali abbastanza definiti.

- Requisiti:
- (i) non friabilità;
 - (ii) assenza di sostanze solubili o residui organici;
 - (iii) assenza di parti alterate o facilmente rimosibili;
 - (iv) buona adesività alle malte.

Inoltre è richiesta attenzione ad alcune proprietà fisiche correlate alla durabilità (come la gelività) o al comportamento fisico (sensibilità alla risalita capillare, tendenza a efflorescenze, presenza di microfrazioni).

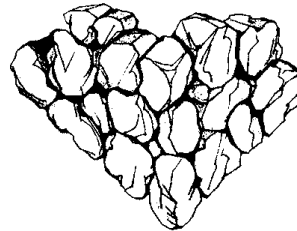
Applicazioni:

Muratura di pietra non squadrata

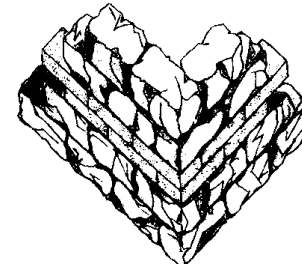
Muratura di pietra listata

Muratura di pietra squadrata

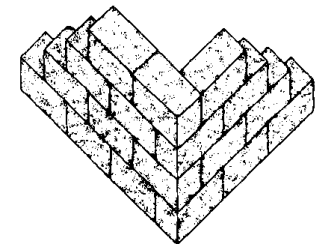
PIETRA NON SQUADRATA



PIETRA LISTATA



PIETRA SQUADRATA



Esempi di murature in pietra naturale.
Immagine tratta da Sbacchis, *op. cit.*

Elementi naturali per muratura portante (2/5)

Caratteristiche
meccaniche di
alcune rocce.

Materiale	Peso volumico kN/m ³	Compressione N/mm ²				Taglio N/mm ²			
		Scadenti di scarto	Normali	Ottimi	Valori attesi su elementi di buona qualità	Scadenti di scarto	Normali	Ottimi	Valori attesi su elementi di buona qualità
Alabastrì	23.00-28.00	50	50-65	65-120	65	-	-	-	-
Altri scisti*	26.00-31.00	29	29-70	70-150	70	-	-	-	-
Ardesia	[27.00]	-	-	-	-	-	-	-	-
Arenarie	18.00-27.00 [23.00]	7-40	40-130	130	80	1-3	3-9	9-17	4.5-(11.4)
Argilla compatta	20.00-22.00 [21.00]	-	-	-	-	-	-	-	-
Basalti	27.00-32.00 [29.00]	80-200	200-400	400-500	320	-	-	-	-
Calcarei e calcari dolomitici	24.00-27.00 [26.00]	0,5-50	50-150	150-220	90 (190)	2,5-5	5-11	11-25	11.5
Cipollino	27.00	115	115-150	150	110 (130)	-	-	-	-
Conglomerati (breccie, brecciolo, puddinghe)	-	9-80	80-150	150	75	-	-	-	-
Conglomerati metamorfici	-	180	180-360	360	225	-	-	-	-
Dioriti	27.00-30.00 [29.00]	130-180	180-200	200-240	180	-	-	-	-
Dolomie	23.00-29.00 [26.00]	39	39-110	110	110	5-7	7-9.5	9,5	7
Gneiss	25.00-27.00 [27.00]	53-80	80-190	190-195	110	22-26	26-31	31-48	26
Graniti	23.00-27.00	57-150	150-230 (100-200)	230-400	205 (160)	3	3-19	19-35	9 (28)
Marmi	27.00-28.00 [27.00]	19-100	100-140	140	130 (110)	-	11-19	19-28	11.5
Pomice	5.00-11.00 [8.00]	-	-	-	-	-	-	-	-
Porfidi	24.00-27.00 [26.00]	60-100	100-250	250-300	190	8-12	12-16	16	12
Quarziti	26.00	260	260-320	320-400	285	-	-	-	-
Rocce leucitiche	25.00-26.00	110-150	150-200	200-230	175	-	-	-	-
Serpentini	25.00-27.00	68	68-240	240-265	217 (155)	17-25	25-33	33-42	25
Sieniti	27.00-31.00 [28.00]	80-150	150-200	200-240	205 (150)	-	-	28-43	-
Trachiti	24.00-27.00	15-100	100-180	180-220	150	-	-	-	7
Travertini	22.00-25.00 [24.00]	0.4-45	45-90	90-120	95 (45)	-	-	-	-
Tufi calcarei	12.00-19.00 [22.00]	0.7-5	5-10	10-15	8	-	-	-	-
Tufi vulcanici	11.00-18.00 [17.00]	0.3-3	3-7	7-18	7	-	-	-	0.3

* Non specificatamente citati.

I valori tra parentesi tonde si riferiscono ad altre fonti bibliografiche autorevoli.

I valori tra parentesi quadre si riferiscono a quanto riportato nella norma sui carichi.

(Tabella tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Elementi naturali per muratura portante (3/5)

Caratteristiche
meccaniche di
alcune rocce.

Materiale	Flessione N/mm ²				Trazione N/mm ²				Modulo Elastico N/mm ²
	Scadenti di scarto	Normali	Ottimi	Valori attesi su elementi di buona qualità	Scadenti di scarto	Normali	Ottimi	Valori attesi su elementi di buona qualità	
Alabastrì	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Altri scisti	-	-	39-51 ⁽¹⁾	-	-	-	-	-	-
Ardesia	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Arenarie	1-4	4-9	9-12.5	5.5	0.4-1	1-4	4-10	2	5000-30.000 (20.000-40.000)
Argilla compatta	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Basalti	-	-	-	-	-	-	-	-	90.000-120.000
Calcari e calcari dolomiti	3-8	8-17	17-32	15 (12)	0.9-3	3-7	7-10	0.5	75.000 (40.000-70.000)
Cipollino	9	9-16	16	-	-	-	-	-	60.000-70.000
Conglomerati (brecce, brecciolo, puddinghe)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Conglomerati metamorfici	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Dioriti	-	19	-	19	-	-	-	-	80.000-100.000
Dolomie	7.5-10	10-18	18	10	1	1-2.5	2.1-2.8	2	40.000-70.000
Gneiss	10-12	12-18	18-23	18	-	-	-	-	27.000
Graniti	7.5-10	10-17.5	17.5-24	18 (15)	0.7-2.0	2-6	6-8	3.5	43.300 (50.000-60.000)
Marmi	8	8-20	20-25	16.5 (14)	3	3-9	9	4	60.000 (40.000-70.000)
Pomice	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Porfidi	-	16-22	22-31	19	5	5-7	7	6	50.000-70.000
Quarziti	-	35-45	45-55	40 (45)	-	-	-	-	40.000-60.000
Rocce leucitiche	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Serpentini	15.5-23	23-60	60-78	40 (47)	5	5-10	10-10.5	8	133.400
Sieniti	-	15-16	16-21.5	16	-	-	-	-	55.600 (50.000-60.000)
Trachiti	-	8.5	8.5-11	8.5	2.5	2.5-4.5	4.5	3.5	-
Travertini	-	10-13	13-15.5	13	-	-	-	-	65.000
Tufi calcarei	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tufi vulcanici	-	0.5-0.7	0.7-1.5	0.6	0.5	0.5-1.5	1.5	0.8	3000-15.000

⁽¹⁾ Argilloscisti

(Tabella tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Elementi naturali per muratura portante (4/5)

Caratteristiche meccaniche di alcune rocce.

Materiale	Densità (Kg/m ³)	Carico rottura a compressione (MPa)	Modulo di Elasticità E (MPa)
Graniti	2500-2900	100-200	50000-60000
Porfidi	2400-2700	100-250	50000-70000
Basalto	2700-3100	200-400	90000-120000
Tufo vulcanico	1100-1800	3-7	3000-15000
Tufo calcareo	1100-2000	1-50	-
Calcari teneri	2000-2400	10-40	20000-40000
Calcari compatti	2400-2700	50-150	20000-80000
Dolomie	2300-2900	100-110	40000-70000
Travertini	2200-2500	40-50	-
Conglomerati Breccie, Puddinghe	2000-2700	80-150	-
Arenarie	1800-2700	40-130	5000-30000
Marmi	2700-2800	100-140	40000-70000

Muratura	Peso specifico (N/m ³)
Pietrame calcareo	22000
Pietrame listata	21000

(Tabella tratta da Iacobelli, *op. cit.*)

Elementi naturali per muratura portante (5/5)

Caratteristiche meccaniche di alcune rocce.

Roccia	Caratteristiche meccaniche			Caratteristiche fisiche	
	Tensione di rottura a compressione σ_R (kg/cm ²)	Tensione di rottura a trazione σ_T (kg/cm ²)	Modulo di elasticità E (kg/mm ²)	Peso specifico γ (t/m ³)	Coefficiente di imbibizione (% del volume)
BASALTO	oltre 2.000	80	9.000 + 12.000	2,75 + 3,10	—
PORFIDO	1.500 + 2.000	60	5.000 + 7.000	2,45 + 2,70	0,1 + 0,6
GRANITO		40	5.000 + 6.000	2,55 + 2,90	
MARMO SACCAROIDE E CIPOLLINO	1.000 + 1.500	50 + 60	4.000 + 7.000	2,70 + 2,75	0,1
CALCARI CALCARI DOLOMITICI	500 + 1.000	50	3.000 + 6.000	2,40 + 2,70	2 + 4
TRAVERTINO	100 + 500	20	3.000 + 4.000	2,10 + 2,50	10 + 20
ARENARIE				1,80 + 2,70	1,5 + 7
CONGLOMERATI				6 + 12	
TUFO CALCAREO	inferiore a 100	8	300 + 1.500	1,12 + 2,00	10 + 25
TUFO VULCANICO				1,10 + 1,75	25 + 50

(Tabella tratta da Boscotrecase *et al.*, *op. cit.*)

Elementi artificiali per muratura portante (1/9)

Tipologie di componenti artificiali per murature aventi funzioni statiche (normativa Italiana):

- Elementi in laterizio normale
- Elementi in laterizio alleggerito
- Elementi in calcestruzzo normale
- Elementi in calcestruzzo alleggerito

Tipologie di componenti artificiali per murature aventi funzioni statiche (Eurocodice):

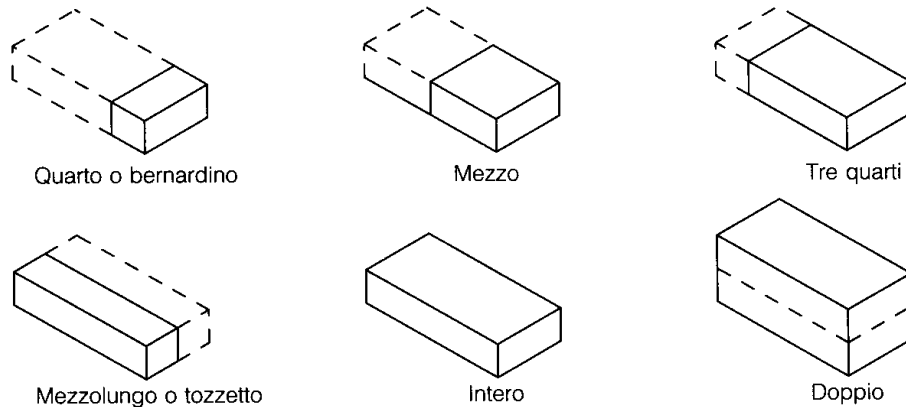
- Elementi resistenti in laterizio (inclusi elementi in laterizio alleggerito)
- Elementi resistenti in silicato di calcio
- Elementi resistenti in conglomerato cementizio realizzati con aggregati pesanti o leggeri
- Elementi resistenti in conglomerato cementizio aerati in autoclave

Elementi artificiali possono essere pieni o caratterizzati da cavità o forature di vario tipo.

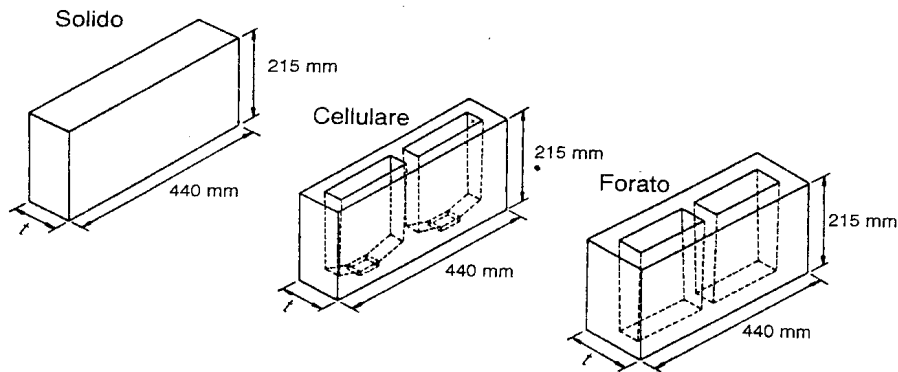
Il comportamento statico è influenzato dalla presenza di fori:

- Elementi forati orizzontalmente presentano sezioni resistenti per carichi verticali nettamente inferiori a quelle forate verticalmente e quindi resistenze più basse.
- Elementi forati verticalmente forniscono minore resistenza di elementi pieni.

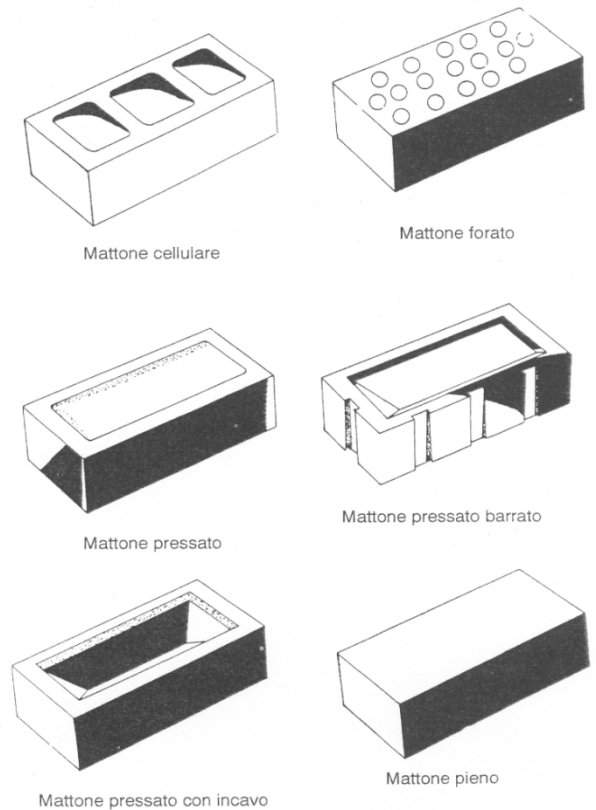
Elementi artificiali per muratura portante (2/9)



Multipli e sottomultipli dell'elemento base in laterizio.
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

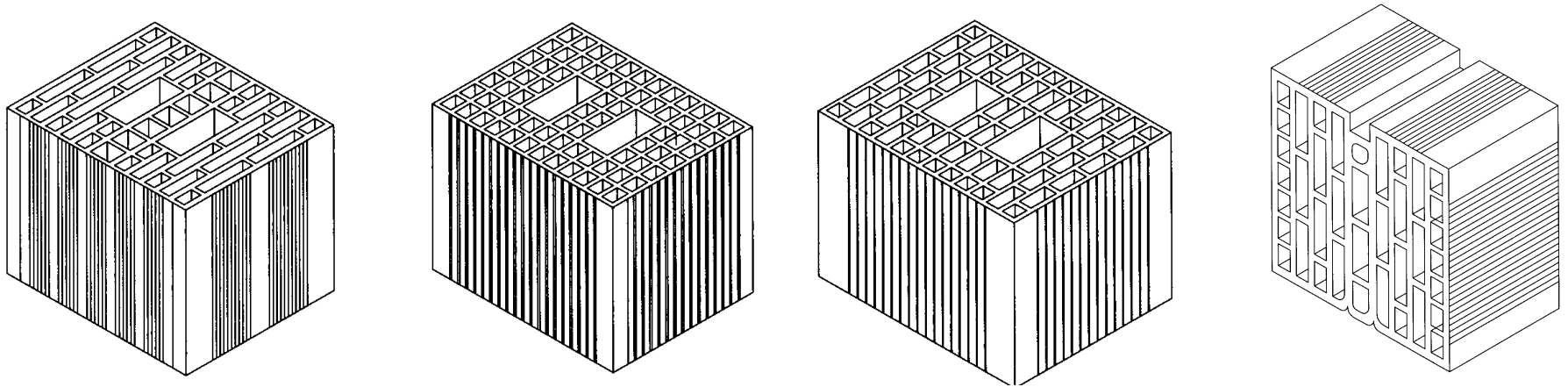


Blocchi in calcestruzzo.
(Immagine tratta da Hendry *et al.*, *op. cit.*)



Tipi di mattone standard.
(Immagine tratta da Hendry *et al.*, *op. cit.*)

Elementi artificiali per muratura portante (3/9)



Blocchi in laterizio alleggerito.
(Immagini tratte da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

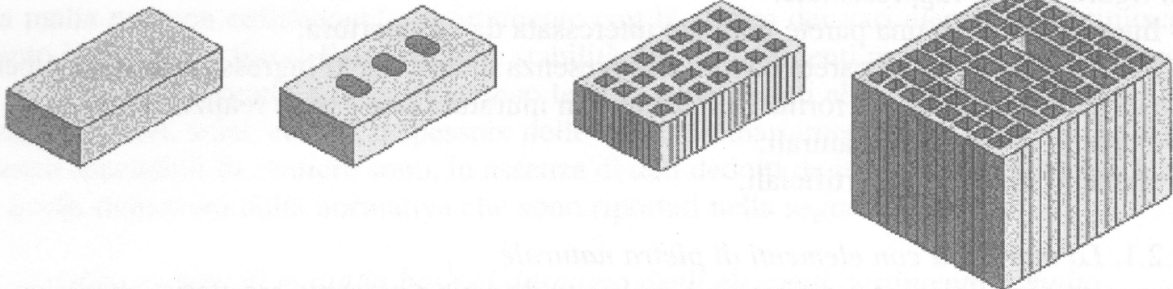
Prescrizioni della normativa
Italiana sulle dimensioni
dell'area forata f rispetto alla
sezione lorda A .

Elementi pieni in laterizio	$f \leq 9 \text{ cm}^2$
Elementi semipieni in laterizio	$f \leq 12 \text{ cm}^2$
Elementi forati in laterizio	$f \leq 15 \text{ cm}^2$
Elementi in calcestruzzo con $A \leq 900 \text{ cm}^2$	$f \leq 0.10 A$
Elementi in calcestruzzo con $A > 900 \text{ cm}^2$	$f \leq 0.15 A$

(Tabella tratta da Boscotrecase *et al.*, *op. cit.*)

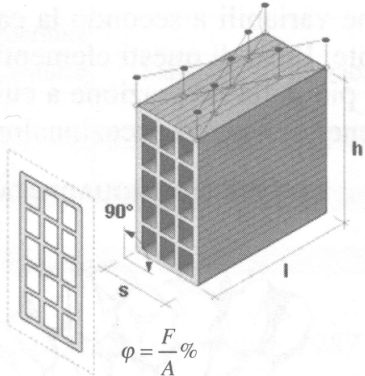
Elementi artificiali per muratura portante (4/9)

Classificazione degli elementi per muratura secondo la Normativa Italiana.



F = area complessiva della foratura e A – area lorda della sezione.
 In base alla percentuale di foratura $\varphi = \frac{F}{A} \%$ si hanno:

percentuale foratura	mattoni	spessore minimo
$\varphi \leq 15 \%$	Pieno	Spess. $\geq 12 \text{ cm}$
$15 \% < \varphi \leq 45 \%$	Semipieno	Spess. $\geq 20 \text{ cm}$
$45 \% \leq \varphi < 55 \%$	Forato	Spess. $\geq 15 \text{ cm}$



(Immagine tratta da Sbacchis, *op. cit.*)

Elementi artificiali per muratura portante (5/9)

	Gruppo			
	1	2a	2b	3
Volume dei fori (% del volume lordo) ¹	≤ 25	> 25-45 per gli elementi in laterizio > 25-50 per gli elementi in calcestruzzo	> 45-55 per gli elementi in laterizio > 50-60 per gli elementi in calcestruzzo ²	≤ 70
Volume di ciascun foro (% del volume lordo)	≤ 12,5	≤ 12,5 per gli elementi in laterizio ≤ 25 per gli elementi in calcestruzzo	≤ 12,5 per gli elementi in laterizio ≤ 25 per gli elementi in calcestruzzo	Limitato dall'area (v. sotto)
Area di ciascun foro	Limitata dal volume (v. sopra)	Limitata dal volume (v. sopra)	Limitata dal volume (v. sopra)	≤ 2800 mm ² a eccezione degli elementi con un solo foro, in cui il foro deve essere ≤ 18.000 mm ²
Spessore combinato (% della larghezza totale) ³	≥ 37,5	≥ 30	≥ 20	Nessun requisito

Classificazione degli elementi per muratura secondo l'Eurocodice.

(Tabella tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Note

1. I fori possono essere costituiti da fori verticali attraverso gli elementi o da cavità o nicchie.
2. Qualora esista una pratica diffusa a livello nazionale, basata su prove attestanti che la sicurezza della muratura non è ridotta in maniera inaccettabile quando venga incorporata una più alta percentuale di fori, il limite del 55% per gli elementi in laterizio e del 60% per gli elementi in calcestruzzo può essere incrementato per gli elementi murari che vengono impiegati in tali paesi.
3. Lo spessore combinato è lo spessore delle cartelle interne ed esterne, misurato orizzontalmente attraverso l'elemento, perpendicolarmente alla facciata del muro.

Elementi artificiali per muratura portante (6/9)

Caratteristiche meccaniche di un blocco in laterizio alleggerito per muratura portante.

Percentuale di foratura		%	45
Classificazione dei blocchi secondo norme UNI 8942/1			BSA 11-31
Resistenza meccanica del blocco (resistenza caratteristica secondo il DM del 20.11.1987)	Resistenza a compressione nella direzione dei carichi verticali (f_{bk})	N/mm ²	12
	Resistenza a compressione nella direzione ortogonale a quella dei carichi verticali e nel piano della muratura (\bar{f}_{bk})	N/mm ²	2
	Coefficiente di variazione δ		< 0,20
Resistenza meccanica della muratura ⁽¹⁾ (resistenza caratteristica secondo il DM del 20.11.1987)	Resistenza caratteristica (f_k) ⁽¹⁾	N/mm ²	5,5
	Resistenza caratteristica a taglio (f_{vko}) ⁽¹⁾	N/mm ²	0,25
Trasmittanza ⁽²⁾	Muratura di spessore 30 cm	W/m ² K	0,76
Conducibilità termica equivalente (λ_e)		W/mK	0,265
Peso specifico apparente dei blocchi ⁽³⁾		kN/m ³	8
Potere fonoisolante della muratura ⁽²⁾	Indice di valutazione a 500 Hz (muratura 30 cm)	dB	45

(1) Muretti confezionati con malta M3.

(2) Valore medio di una parete con intonaco civile di 15 mm su entrambi i lati.

(3) Valutato per un peso specifico indicato dell'impasto cotto di 14,5 kN/m³.

(Tabella tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Elementi artificiali per muratura portante (7/9)

	Numero saggi	Peso daH	Resistenza a compressione (N/mm ²)	Resistenza a trazione indiretta (N/mm ²)	Capacità di assorbimento (g/dm ² × 1')
B ₃ (normale)	(15)	16,9 (4,1%)*	1,7 (13,3%)	0,34 (9,7%)	13,6
B ₄ (faccia a vista)	(15)	18,3 (2,8%)	2,8 (11,5%)	0,29 (13,1%)	20,0
L ₁ (faccia a vista)	(15)	20,2 (1,1%)	6,2 (7,4%)	0,95 (4,8%)	2,3
L ₂ (normale)	(15)	14,6 (2,3%)	2,3 (10,8%)	0,46 (8,3%)	16,3
L ₃ (pieno)	(15)	17,0 (4,4%)	2,5 (14,3%)	0,33 (10,9%)	15,1
L ₄ (multicamera)	(15)	19,3 (3,7%)	4,2 (13,4%)	0,34 (18,5%)	24,4
V ₂ (normale)	(15)	17,5 (2,5%)	3,1 (17,4%)	0,45 (9,1%)	11,7
V ₃ (faccia a vista)	(15)	18,3 (1,7%)	4,3 (18,3%)	0,45 (14,1%)	3,9

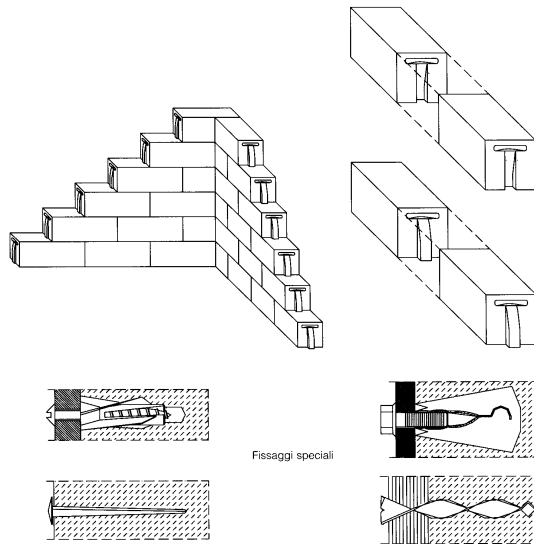
* I valori entro parentesi sono i coefficienti di variazione Cv.

	Valori medi	Coefficienti di variazione (Cv)
Resistenza a compressione	6,2 ÷ 1,7 N/mm ²	18,3%-7,4%
Peso	20,2 ÷ 14,6 daH	4,4%-1,1%
Resistenza a trazione indiretta	0,95 ÷ 0,29 N/mm ²	18,5%-4,8%

Risultati di prove meccaniche su blocchi di argilla espansa.

(Tabella tratta da Carbone *et al., op. cit.*)

Elementi artificiali per muratura portante (8/9)



Caratteristiche meccaniche di blocchi in calcestruzzo aerati in autoclave.

(Tabella tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

	Classe di resistenza	Peso specifico (kN/m ³)	Peso di calcolo (kN/m ³)	Carico di rottura* (N/mm ²)	Carico di sicurezza (N/mm ²)	Resistenza al taglio τ (N/mm ²)	Modulo di elasticità E (N/mm ²)
Blocchi piani	G 2	5,0	6,0	2,50	0,60	0,14	~ 1700
	G 4	6,0	7,0	5,00	1,00	0,20	~ 2500
	G 6	7,0	9,0	7,50	1,20	0,23	~ 2600
Pannelli	GB 3,3	5,0	6,2	3,50	–	0,07	~ 1750
	GB 4,4	7,0	8,4	5,00	–	0,10	~ 2600

* secondo DIN

Elementi artificiali per muratura portante (9/9)

Tabella 3.2 Resistenza a compressione e prismi compressi in differenti direzioni*.
(a) Resistenza del mattone (N/mm²)

Tipo di mattone	Prove		
	in piano	di lista	di testa
14 fori	74.3 (100)	26.2 (35)	10.4 (14)
10 fori	70.2 (100)	29.5 (42)	21.7 (31)
3 fori	82.0 (100)	53.2 (65)	40.2 (49)
5 fori	64.1 (100)	51.8 (81)	13.8 (22)

(b) Resistenza di prismi (N/mm²)

Mattone	Giacitura		
	in piano	di lista	di testa
14 fori	28.9 (100)	08.5 (35)	14.6 (14)
10 fori	22.0 (100)	15.0 (42)	20.0 (31)
3 fori	37.6 (100)	30.5 (65)	21.8 (49)
5 fori	34.1 (100)	29.0 (81)	13.9 (22)

* Fra parentesi le resistenze relative. Malta con composizione 1: $\frac{1}{4}$: 3.

Resistenza a compressione di *mattoni* in laterizio compressi secondo varie direzioni (sopra) e di *blocchi di muratura* in laterizio compressi secondo diverse direzioni (sotto).

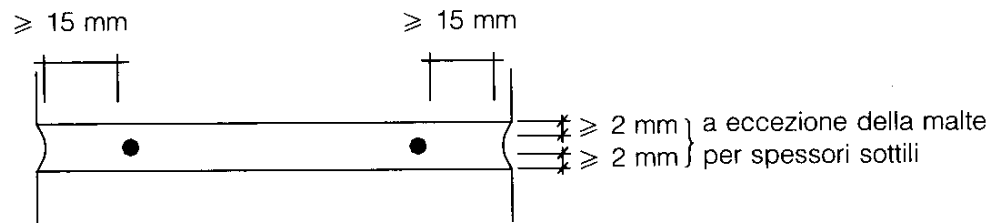
(Tabella tratta da Hedry *et al.*, *op. cit.*)

Elementi di completamento della struttura portante in muratura (1/2)

Elementi di rinforzo alle pareti murarie:

- Calcestruzzo
- Acciaio per l'armatura di murature e relativa protezione
- Dispositivi metallici

Classe di esposizione	Spessore minimo del copriferro in calcestruzzo			
	Rapporto acqua/cemento non maggiore di			
	0,65	0,55	0,5	0,45
	Contenuto di cemento (kg/m ³) non minore di			
	260	280	300	300
	mm	mm	mm	mm
1	20	20	20	20
2	-	25	25	25
3	-	-	40	40
4	-	-	40	40
5	-	-	-	40



Copriferri minimi di barre di armatura nei letti di malta.

(Tabella tratta da
Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Elementi di completamento della struttura portante in muratura (2/2)

Classe di esposizione	Livello minimo di protezione per l'acciaio d'armatura	
	Posizionato nella malta.	Posizionato nel calcestruzzo con un copriferro minore di quanto richiesto nella tabella 5.2 [= tabella 1.10].
1	Acciaio al carbonio non protetto (v. nota 1).	Acciaio al carbonio non protetto.
2	Acciaio al carbonio, con zincatura profonda o con protezione equivalente (v. nota 2).	Acciaio al carbonio non protetto oppure, quando la malta è utilizzata per riempire i vuoti, acciaio al carbonio, con zincatura profonda o con protezione equivalente (v. nota 2).
	Acciaio al carbonio non protetto, in muratura con rinzaffo di malta sulla superficie esposta (v. nota 3).	
3	Acciaio inossidabile austenitico (v. nota 4).	Acciaio al carbonio, con zincatura profonda o con protezione equivalente (v. nota 2).
	Acciaio al carbonio non protetto, in muratura con rinzaffo di malta sulla superficie esposta (v. nota 3).	
4 e 5	Acciaio inossidabile austenitico (v. nota 4).	Acciaio inossidabile austenitico (v. nota 4).

Note:

1. Per la parete interna di muri a cassa vuota esterni aventi probabilità di trovarsi in presenza di umidità, l'acciaio al carbonio, l'acciaio con zincatura profonda o con protezione equivalente, dovrebbero di regola essere impiegati come prescritto nella nota 2.
2. L'acciaio al carbonio deve essere galvanizzato con una massa minima di rivestimento di zinco pari a 900 g/m², oppure pari a 60 g/m² e fornito di un rivestimento aderente epossidico di spessore pari ad almeno 80 μm, con una media di 100 μm. Si veda inoltre 3.4.2.
3. La malta della muratura dovrebbe di regola essere costituita da malta ordinaria, non minore del tipo M5; il copriferro laterale indicato in figura 5.12 [= figura 1.5] dovrebbe di regola essere aumentato fino a 30 mm e la muratura dovrebbe essere intonacata inizialmente con un rinzaffo di malta realizzato in accordo con la normativa EN 998-1 e di spessore minimo pari a 15 mm.
4. In alternativa all'acciaio inossidabile pieno, si può ottenere una protezione equivalente con l'acciaio al carbonio rivestito con uno spessore minimo d'acciaio inossidabile austenitico pari a 1 mm.

(Tabella tratta da Carbone *et al., op. cit.*)

Tipologie delle murature

La muratura è uno degli elementi costruttivi più antichi e di maggiore utilizzo nel mondo: solo negli ultimi decenni è stata soppiantata, nella funzione di elemento portante, da strutture intelaiate in calcestruzzo armato o in acciaio.

Nasce dalla giustapposizione di elementi di varia natura (pietra, laterizio, blocchi di calcestruzzo, ecc.) collegati fra loro mediante malte e/o graffe metalliche così da ottenere elementi strutturali monolitici come pareti, pilastri, archi, piattabande, sistemi voltati, cupole ecc.

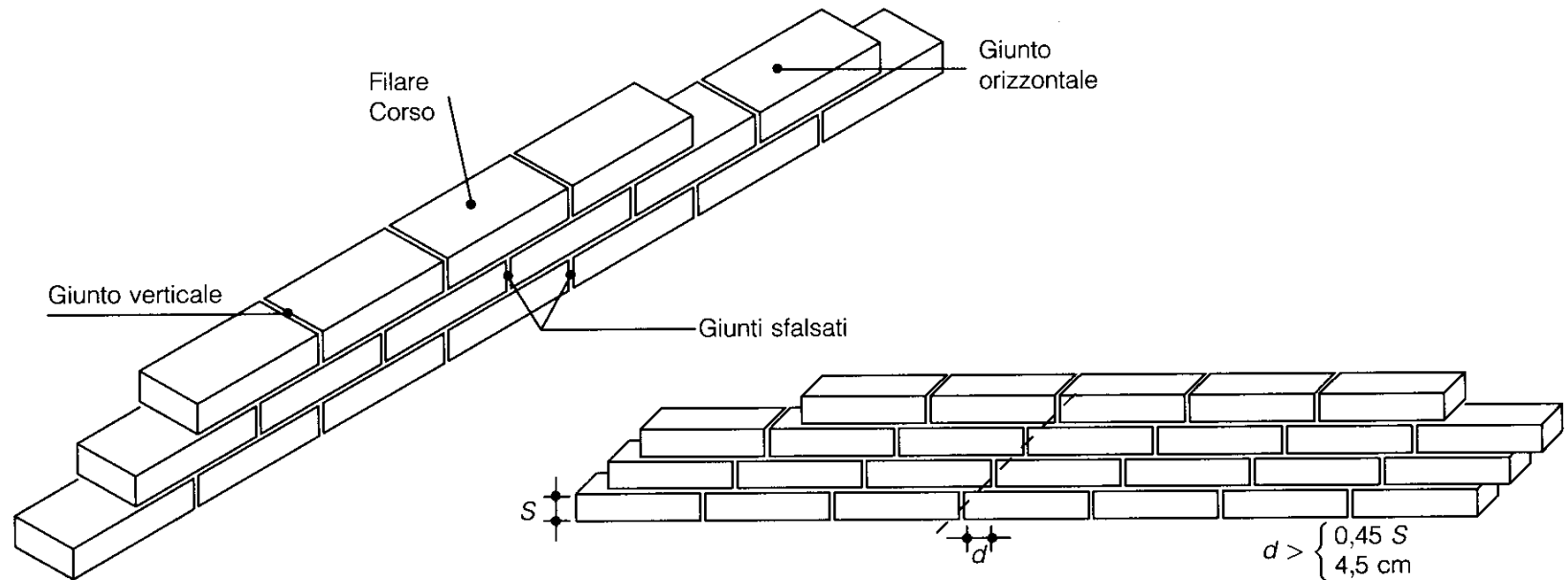
Criteri di classificazione possibili:

- in base agli elementi utilizzati;
- in base al ruolo funzionale e alla tipologia strutturale;
- in base alle tecniche di esecuzione e alla forma;
- in base all'apparecchiatura muraria.

Elementi utilizzati (1/6)

Murature in laterizio: realizzate con elemento in laterizio (mattoni o blocchi) messi in opera in corsi continui di altezza costante, opportunamente sfalsati fra corso e corso e legati da giunti (letti) di malta.

Lo sfalsamento si realizza ricorrendo a sottomultipli dell'elemento base.

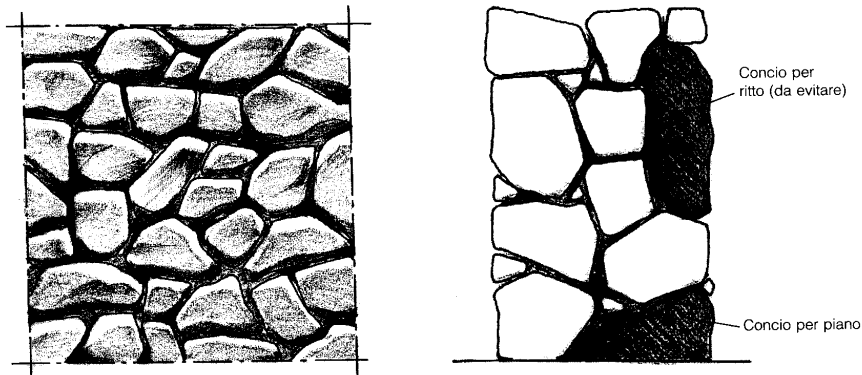


Criterio generale per lo sfalsamento dei giunti verticali, d .
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

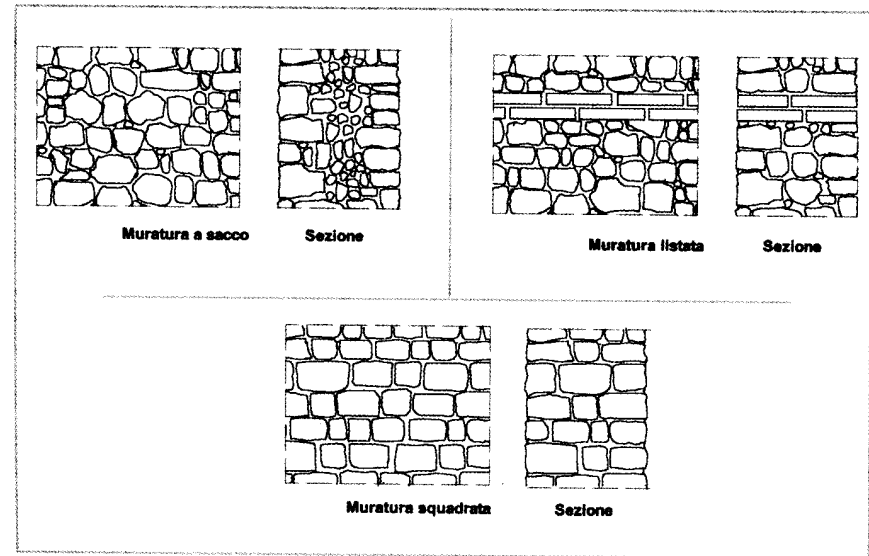
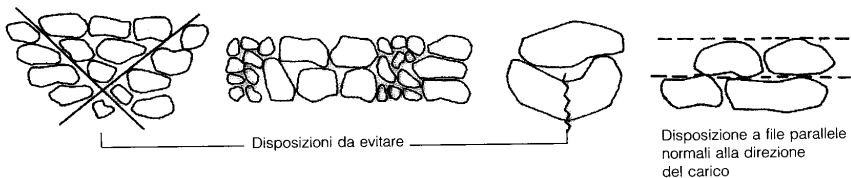
Elementi utilizzati (2/6)

Murature ordinarie in pietra: realizzate con elementi in pietra irregolari (conci o scapoli) disposti il più possibile per piano e in modo tale da ridurre al minimo gli spazi vuoti fra gli elementi e legati con malta.

In antico erano anche realizzate *a sacco*, con interposizione di materiali sciolti fra i due paramenti.



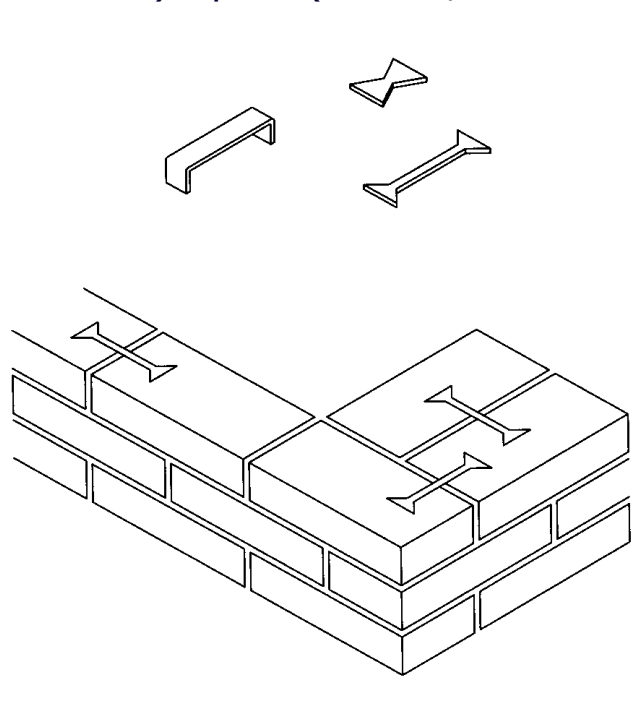
Muratura in pietrame a *opus incertum*



Tipologie di murature in pietra.
(Immagine tratte da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Elementi utilizzati (3/6)

Murature in pietra squadrata: sono realizzate con conci di pietra lavorati (in generale a forma di parallelepipedo), giustapposti interponendo un sottile strato di malta ed eventualmente collegati con zanche metalliche (orizzontali) e perni (verticali, fra corso e corso).



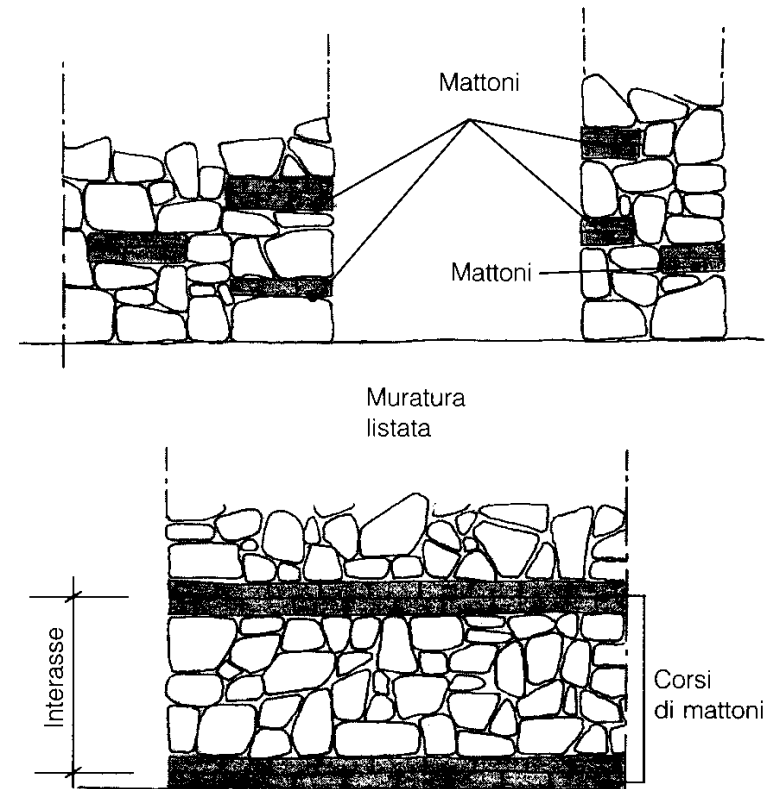
Solidarizzazione di murature mediante zanche metalliche.
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Elementi utilizzati (4/6)

Murature in tufo: sono realizzate con blocchi di tufo perfettamente essiccati (per garantire una buona resistenza); in generale possono essere impiegate solo per costruzioni di dimensioni modeste.

Murature in blocchi di calcestruzzo o di calcestruzzo alleggerito: sono adatte a tamponamenti o a muri portanti di piccoli edifici; economiche perché il successivo rivestimento o intonacatura consente minore attenzione durante la fase di posa.

Murature miste di pietrame e mattoni: il laterizio può essere usato come elemento di riempimento e livellamento o per realizzare ricorsi orizzontali estesi a tutto lo spessore del muro, con un interasse verticale variabile (80 ÷ 160 cm) e migliore capacità portante.



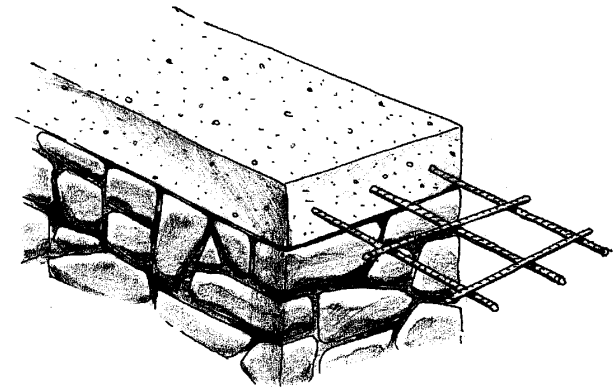
Murature miste in pietra e mattoni.
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Elementi utilizzati (5/6)

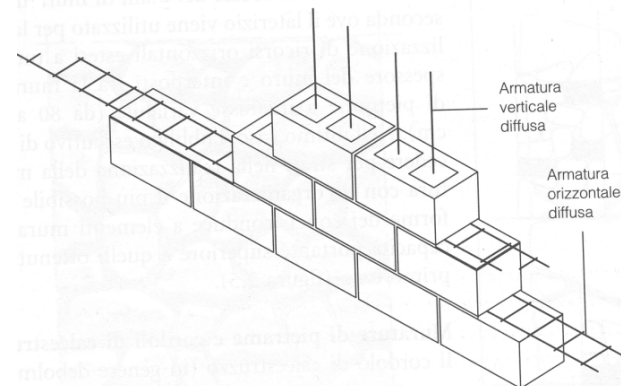
Murature di pietrame e cordoli di calcestruzzo (debolmente armati): i cordoli vengono utilizzati per la realizzazione di ricorsi orizzontali estesi a tutto lo spessore del muro, con interassi variabili (60 ÷ 160 cm).

Murature armate: dotate di elementi di rinforzo (armature): barre e/o reti metalliche, con getti di calcestruzzo di completamento, barre in materiale fibroso, ecc. con preciso ruolo strutturale. Si possono avere armature diffuse o concentrate a formare una struttura intelaiata.

Murature a pannelli prefabbricati, con proprietà meccaniche dipendenti dai singoli elementi e dalle modalità costruttive adottate; l'impiego è subordinato al rispetto delle specifiche di progetto e calcolo specificate nei certificati di idoneità.

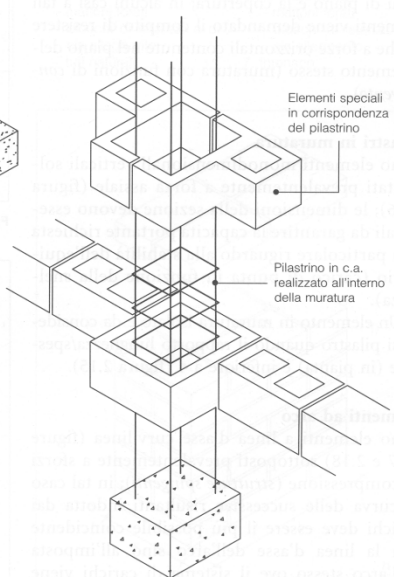
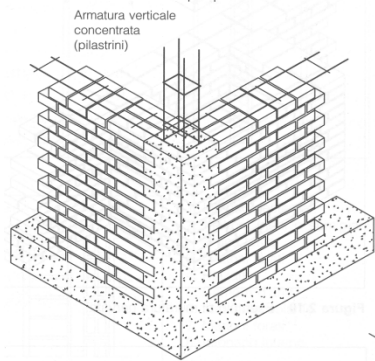
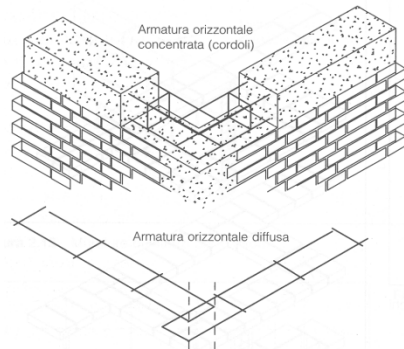


Muratura in pietra con cordoli in c.a.

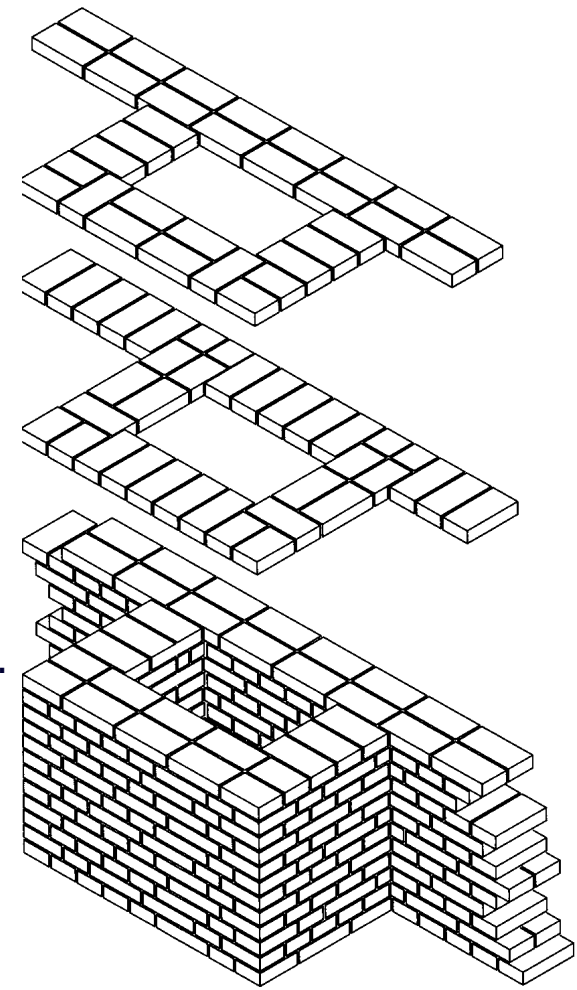


Muratura armata con armatura diffusa.
(Immagini tratte da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Elementi utilizzati (6/6)



Murature armate con armatura concentrata e diffusa.



Muratura nervata.

(Immagini tratte da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Ruolo funzionale delle murature (1/2)

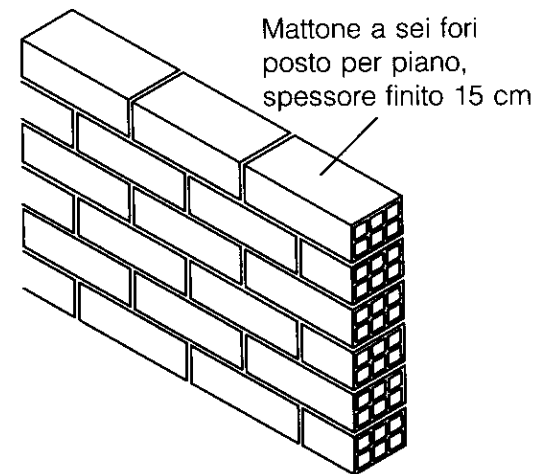
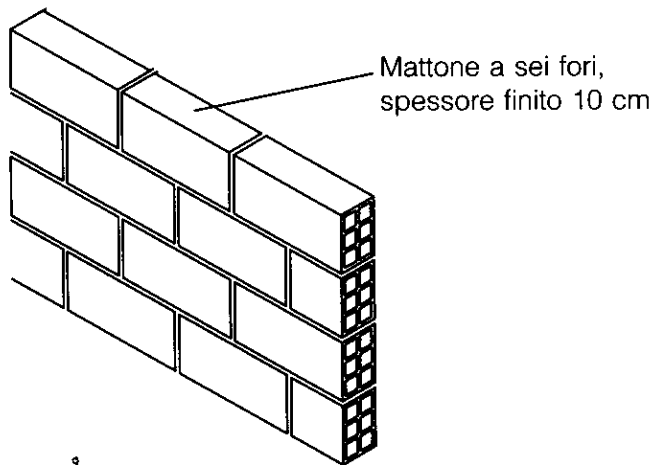
Murature *portanti*: in grado di svolgere compiti statici, garantendo una risposta adeguata in termini di capacità portante ai carichi permanenti e accidentali alle quali sono sottoposte durante la vita della struttura. La capacità portante è influenzata non solo dalle dimensioni, dal materiale e dalla malta utilizzata, ma anche dalla modalità di esecuzione, dall'apparecchiatura muraria (articolazione degli elementi) e dalla presenza di rinforzi (armature o nervature).

Murature *non portanti*: non sono tenute a svolgere funzioni statiche di particolare rilievo (tramezzi, muri di tamponamento di strutture intelaiate, ecc).

Murature con *coibenza termica o acustica*

Murature *resistenti al fuoco*.

Ruolo funzionale delle murature (2/2)



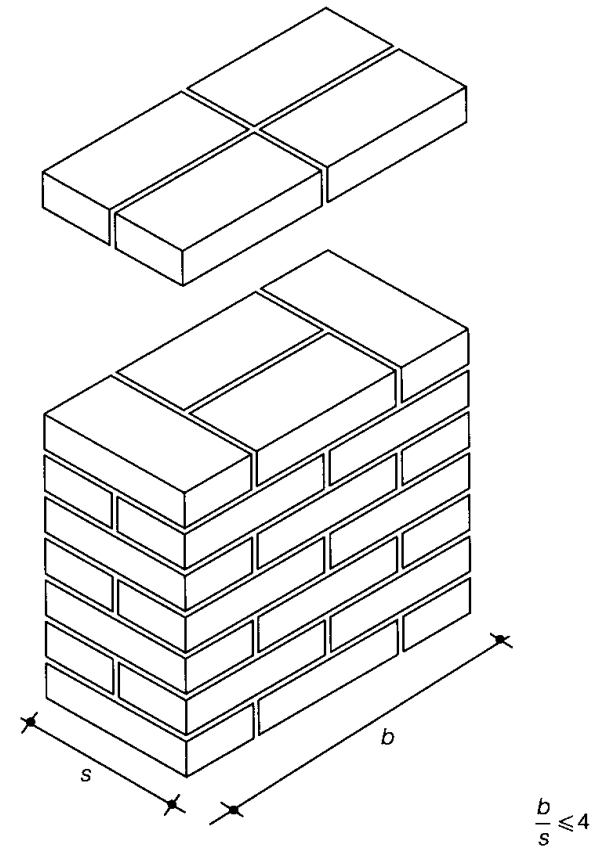
Muri in laterizio per divisori.
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Tipologia strutturale (1/5)

Murature di fondazione: utilizzate quando la capacità portante del terreno e/o l'entità dei carichi non richiedano soluzioni complesse. È sempre necessario garantire protezione dalle infiltrazioni d'acqua e da fenomeni igrotermici.

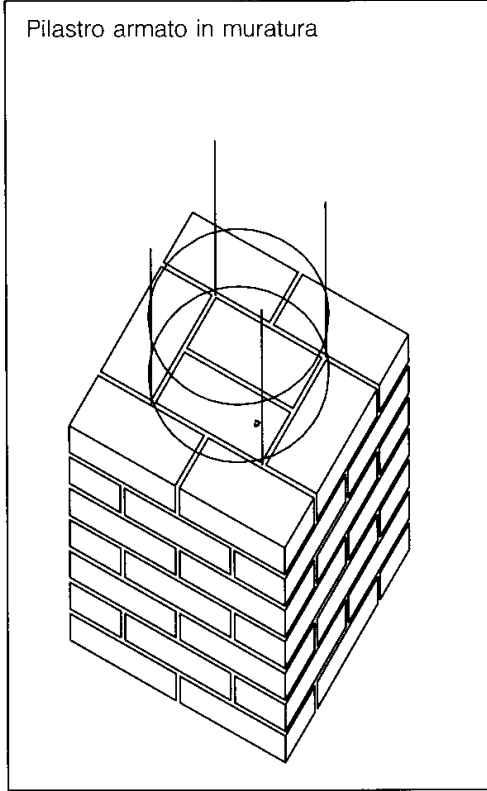
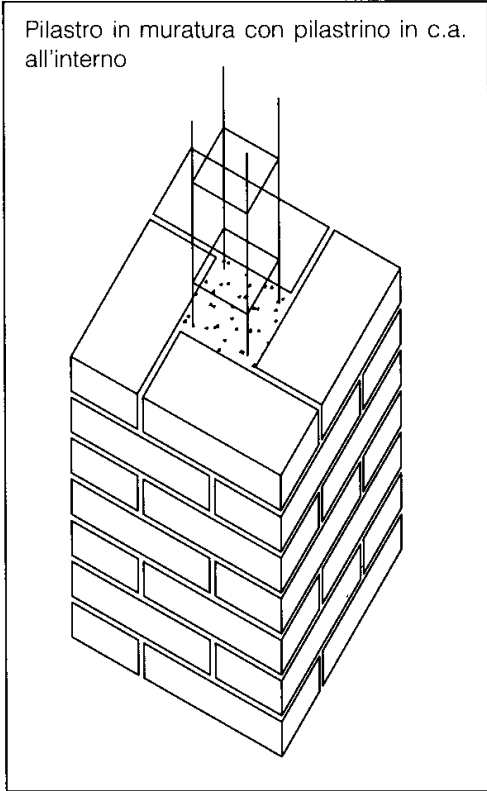
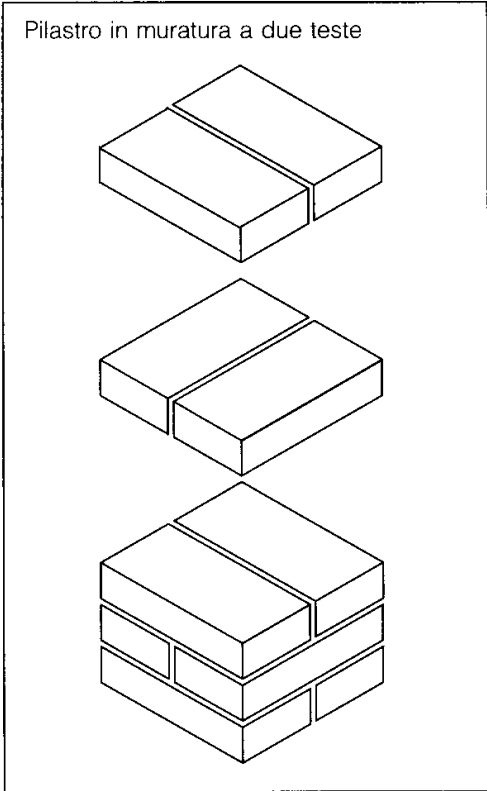
Setti e muri portanti: sono destinati a sostenere carichi verticali e a costituire piani di appoggio per i solai di piano e la copertura; in alcuni casi devono anche resistere ad azioni orizzontali con funzioni di *controvento* (muri di spina).

Pilastri: sono elementi monodimensionali verticali sollecitati prevalentemente a compressione. Le dimensioni della sezione devono essere tali da garantire la capacità portante richiesta con particolare riguardo alla stabilità dell'equilibrio (carico di punta). Un elemento in muratura isolato viene considerato un pilastro se il rapporto fra le dimensioni in pianta è inferiore a 4.



Muratura in laterizio con funzione di pilastro.
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Tipologia strutturale (2/5)



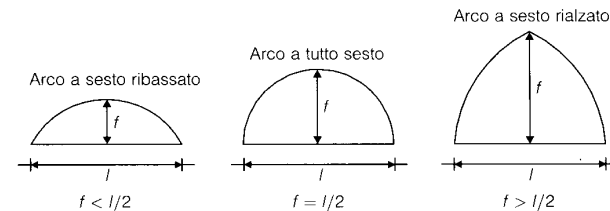
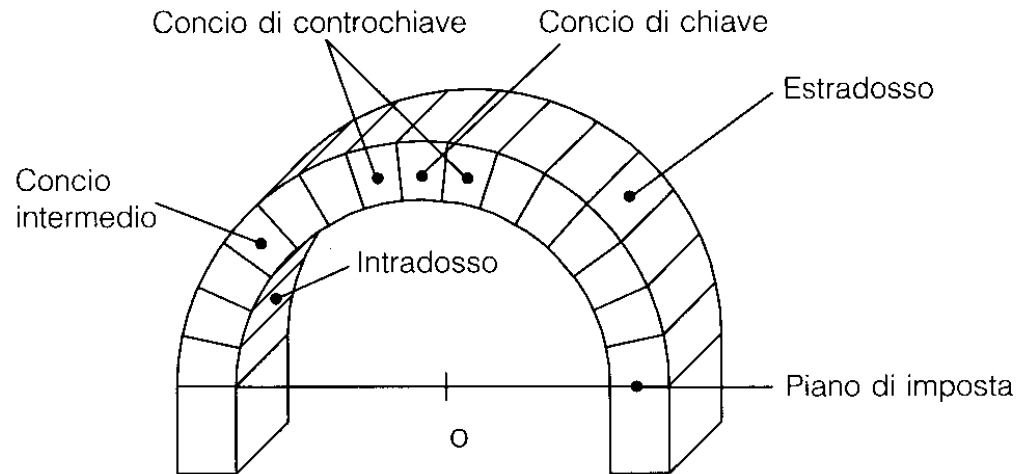
Tipologie di pilastri in muratura semplice e armata.
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Tipologia strutturale (3/5)

Elementi ad arco : sono elementi a linea d'asse curvilinea, sottoposti prevalentemente a compressione (elementi spingenti).

La curva delle pressioni (ovvero il poligono funicolare delle successive risultanti) indotta dai carichi deve essere il più possibile coincidente con la linea d'asse sino all'imposta, dove il sistema dei carichi viene ripreso dagli elementi verticali.

Si distinguono in base alla forma della linea d'intradosso (sesta, donde *sesto*) in archi a *tutto sesto*, nei quali la freccia è pari al raggio (e quindi al lato dell'esagono inscritto), in archi a *sesto ribassato* (dove la freccia è inferiore al raggio) e a *sesto rialzato* (o acuto), dove la freccia è maggiore del raggio.

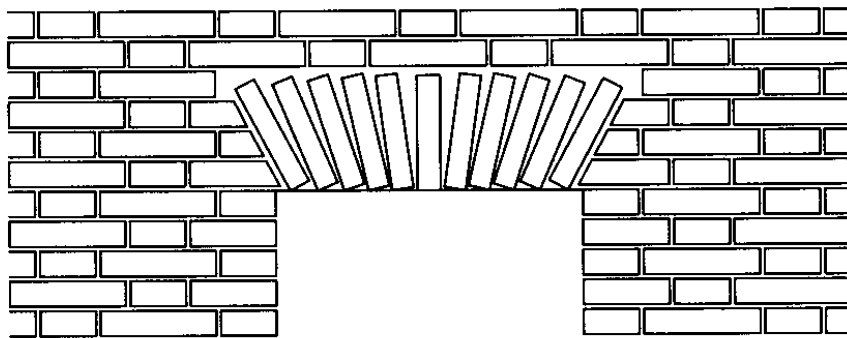


Terminologia degli elementi costitutivi di un arco e tipologie di archi. (Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

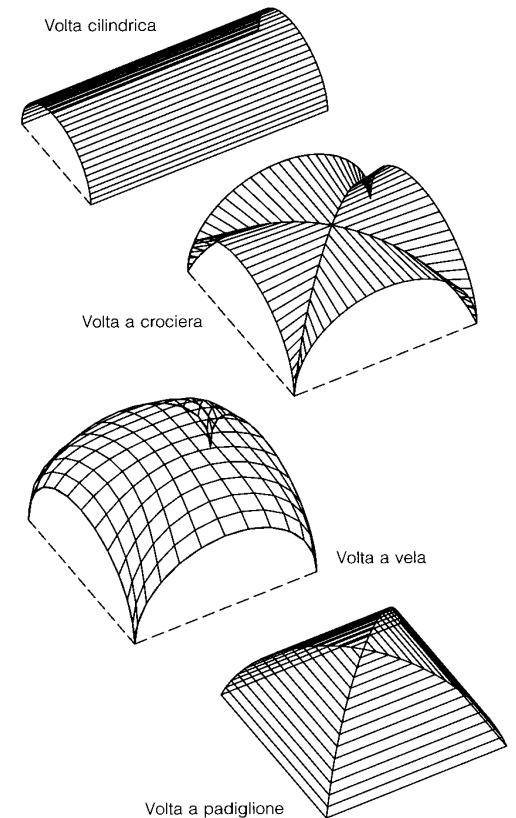
Tipologia strutturale (4/5)

Strutture voltate: sono strutture spingenti bidimensionali, il cui comportamento statico è fortemente influenzato dalla forma.

Piattabande in muratura: possono essere considerate degli archi anomali poiché lavorano con lo stesso principio pur avendo frecce molto limitate (da 1/30 a 1/100 della luce) e luci alquanto modeste.

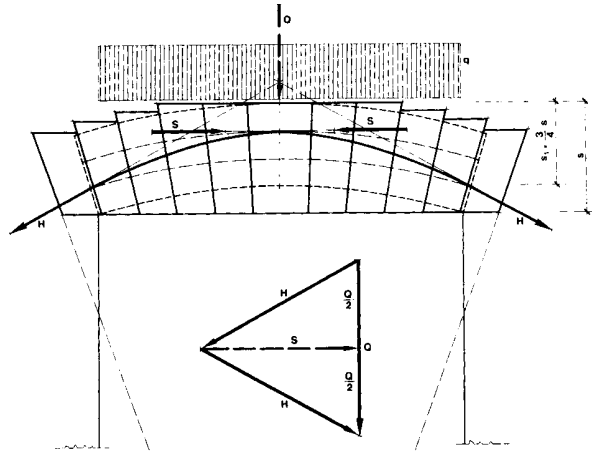


Piattabanda in muratura.
(Immagini tratte da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

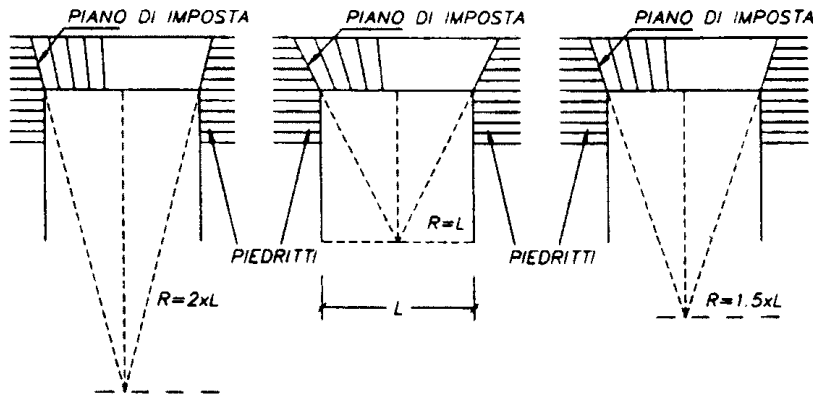


Tipologie di volte.

Tipologia strutturale (5/5)

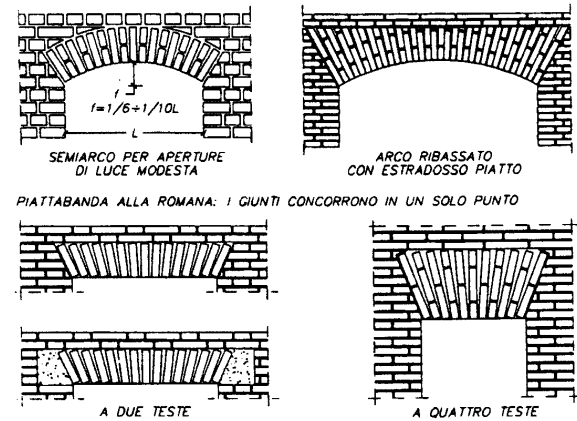


Curva delle pressioni della piattabanda [Alasia, Corso di Costruzioni, SEI].

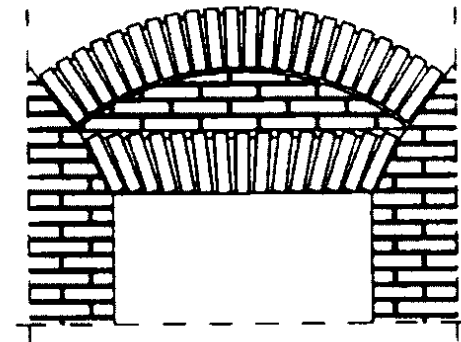


Punti di convergenza delle piattabande.

Tipologie di piattabande. (Immagini tratte da Sbaccis, *op. cit.*)



Tipi di piattabanda [Manuale dell'architetto].



Piattabanda e arco di sordino.

Tecnica di esecuzione

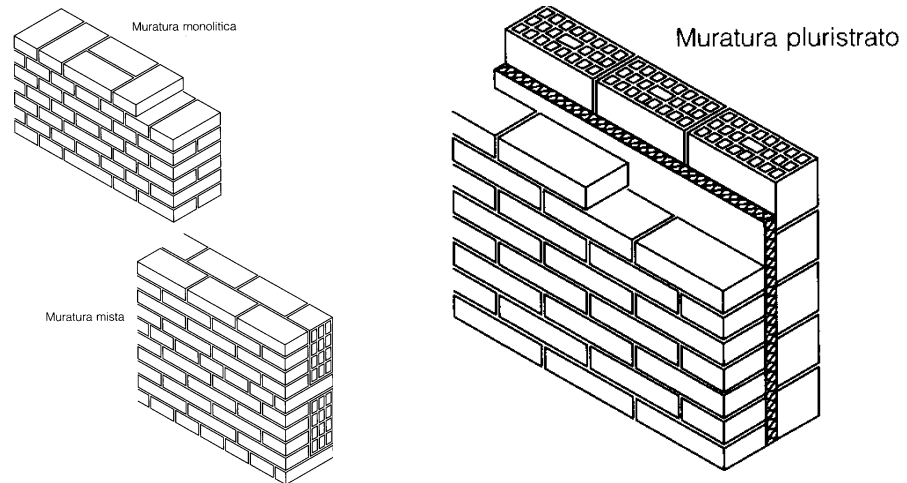
Muratura a secco : i singoli elementi sono semplicemente giustapposti, senza utilizzo di malte. Si tratta di murature non adatte a compiti strutturali; attualmente l'impiego è limitato alla realizzazione di muri di contenimento di terrapieni di altezza modesta: la stabilità è affidata interamente al peso proprio della muratura.

Muratura con malta : i singoli elementi sono cementati mediante malte di varia natura.

La forma (1/2)

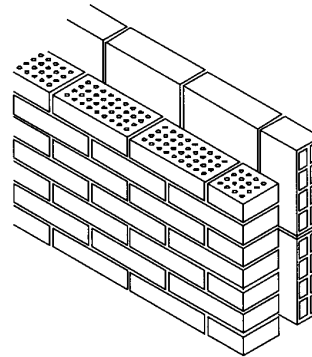
Murature di tipo monolitico: sono realizzate in modo da avere sezione piena e continua. Nel caso di impiego di due o più elementi diversi accoppiati su due strati verticali compenetrati, tali da formare una struttura adeguatamente collegata si parla di *muratura mista*.

Murature di tipo articolato: presentano, nello spessore o nel loro sviluppo, in modo più o meno regolare discontinuità fisiche e/o variazioni morfologiche: *murature a doppia parete*, *murature cave* (a cassa vuota, a maglia, a cunicoli), caratterizzate da migliore coibenza termica e da maggiore rigidezza.

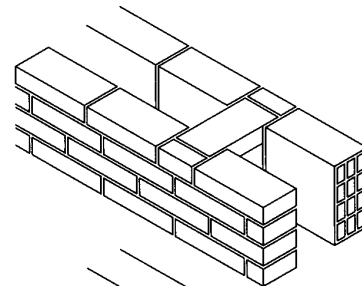
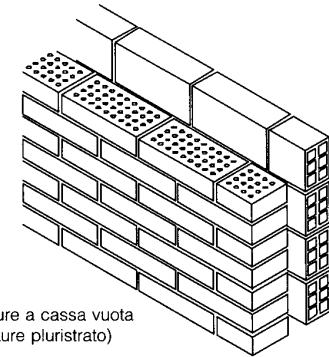


Tipologie di murature: monolitiche, miste, multistrato.
(Immagine tratte da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

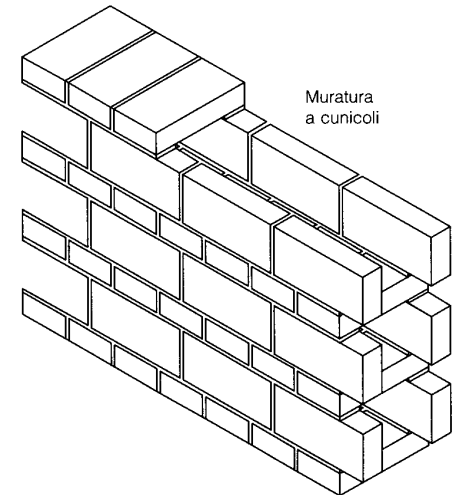
La forma (2/2)



Murature a cassa vuota
(murature pluristrato)

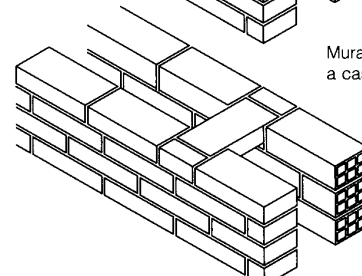


Murature
a cassa vuota



Muratura
a cunicoli

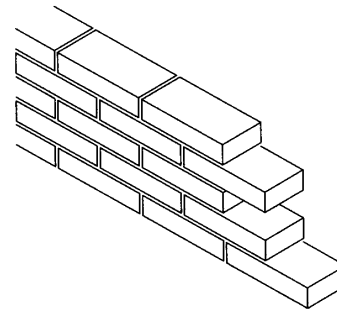
Tipologie di murature articolate.
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)



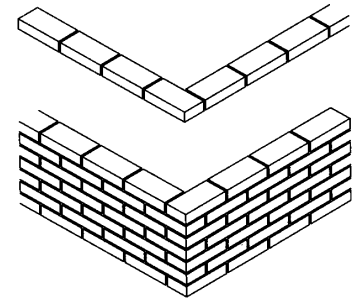
L'apparecchiatura muraria (1/5)

Disposizione in foglio o di costa: murature realizzate con elementi appoggiati di lista o di costa, aventi dimensione trasversale di sezione pari allo spessore dell'elemento.

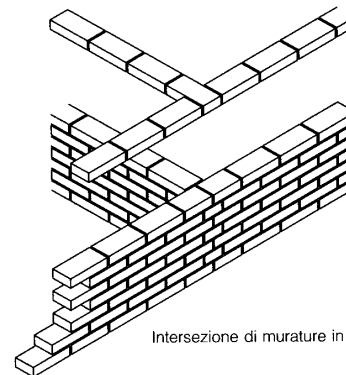
Testa o punta è il lato minore di base; *lista, costa o fascia* è il lato maggiore.



Muratura in spessore o a una testa



Muratura in spessore: soluzione d'angolo



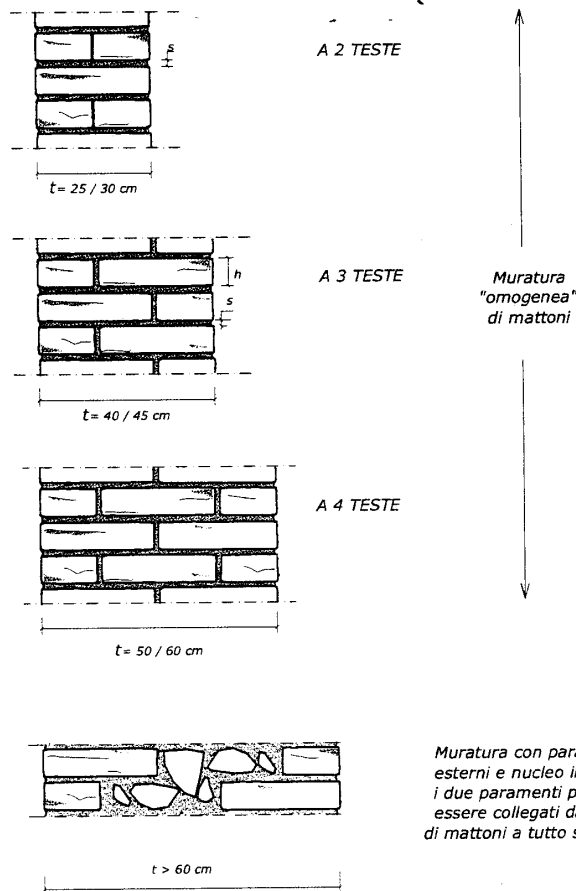
Intersezione di murature in spessore

Tipologie di muratura a una testa o in spessore.
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

L'apparecchiatura muraria (2/5)

Disposizione in spessore o a una testa: murature realizzate con elementi aventi giacitura in spessore e disposti di fascia; negli schemi più utilizzati i giunti verticali sono sfalsati in modo da ritrovarsi al terzo o al quinto corso.

Disposizione a due o più teste: murature realizzate con elementi aventi giacitura in spessore e disposti di fascia o di lista, con elementi che raccordano i paramenti esterni in modo da creare un sistema monolitico; sono possibili molte *disposizioni* ordinate, note con denominazioni particolari.



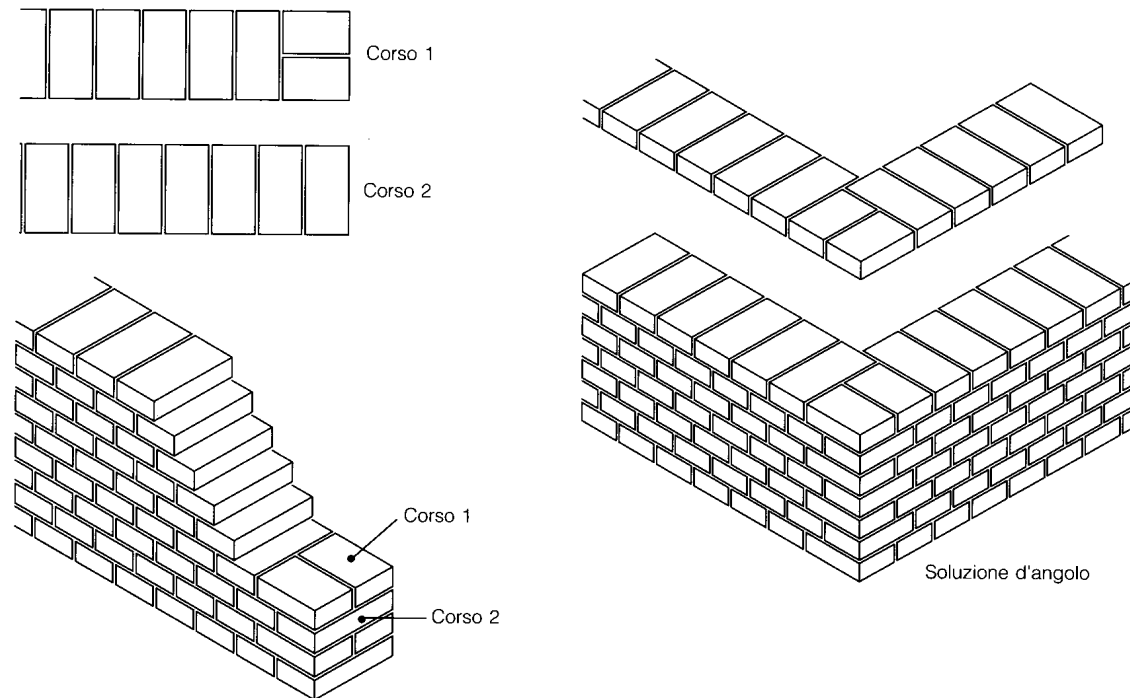
Tipologie di muratura a due o a più teste.
(Immagine tratta da Boscotrecase et al., op. cit.)

Muratura con paramenti esterni e nucleo interno; i due paramenti possono essere collegati da strati di mattoni a tutto spessore

L'apparecchiatura muraria (3/5)

Disposizione in chiave o di punta: murature (a due teste) realizzate con elementi aventi giacitura in spessore e disposti di punta.

Questa disposizione consente la rapida risoluzione di strutture ad andamento curvo.
La sezione della muratura è eguale alla dimensione massima dell'elemento.



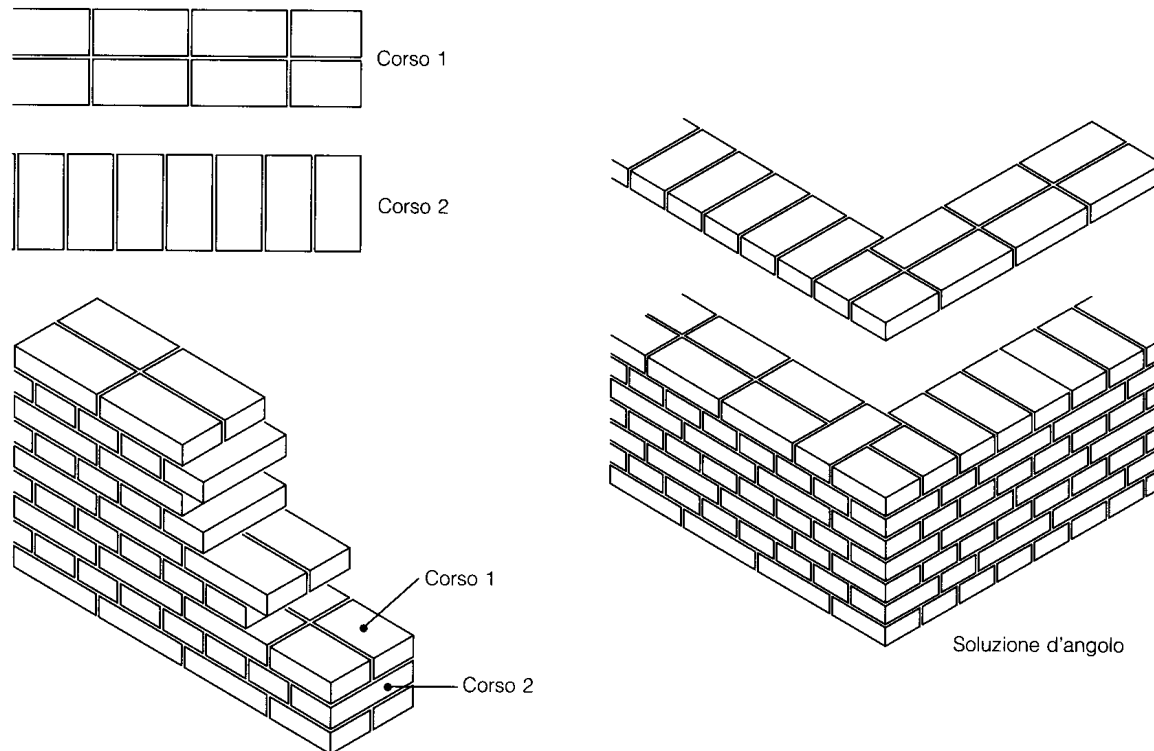
Disposizione in chiave o di punta (muratura a due teste).

(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

StatICA per l'edilizia storica - A. Cazzani , F. Stochino - Lezione 2

L'apparecchiatura muraria (4/5)

Disposizione a blocco : murature (a due o più teste) realizzate con elementi aventi giacitura in spessore e disposti, a corsi alterni, di fascia e di punta.

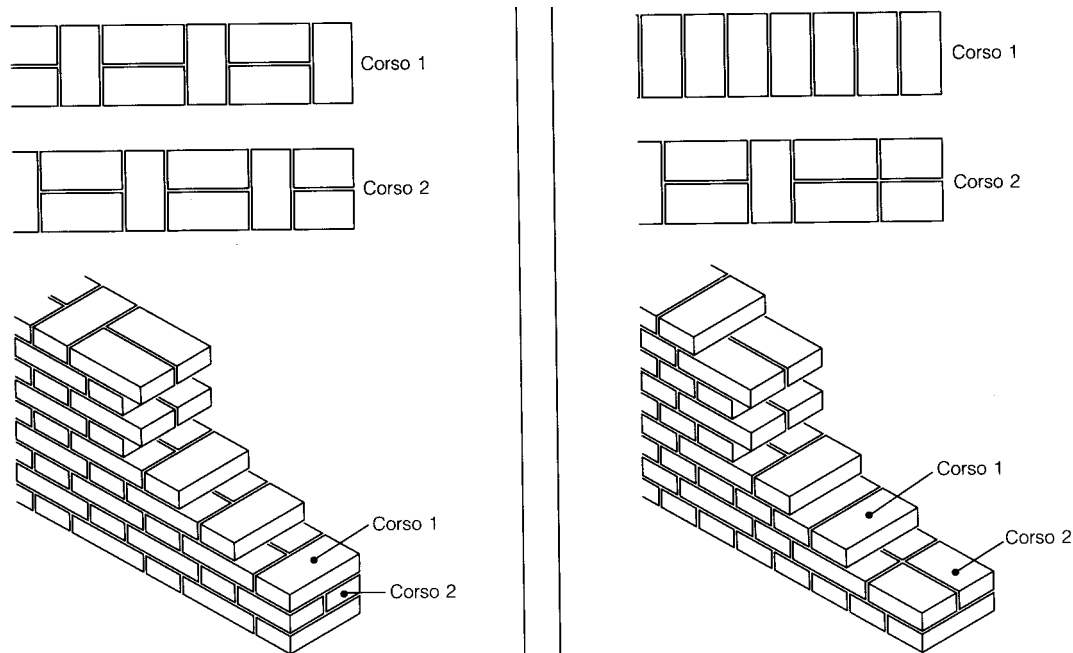


Disposizione a blocco (muratura a due teste).
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

L'apparecchiatura muraria (5/5)

Disposizione gotica : murature (a due o più teste) realizzate con elementi aventi giacitura in spessore e, per ogni corso, con disposizione alternata di fascia e di punta.

Disposizione fiamminga : murature (a due o più teste) realizzate con elementi aventi giacitura in spessore e disposti a corsi alterni, l'uno di fascia/punta e l'altro solo di punta.



Disposizione gotica e disposizione fiamminga.
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Normative Italiane ed Europee (1/2)

Normativa Italiana:

- D.M. 20/11/1987 *“Norme tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento”*
- Ordinanza del P.C.M. del 20/03/2003 n. 3274 *“Normativa tecnica per le costruzioni in zona sismica e connessa classificazione sismica del territorio nazionale”*
- Ordinanza del P.C.M. del 02/10/2003 n. 3316 *“Modifiche ed integrazioni all’Ordinanza del P.C.M. n. 3274 del 20/03/2003”*
- Ordinanza del P.C.M. del 03/05/2005 n. 3431 *“Ulteriori modifiche ed integrazioni all’Ordinanza del P.C.M. n. 3274 del 20/03/2003”*

Normativa Europea

- Eurocodice 6: *“Progettazione delle strutture in muratura”*
- Eurocodice 8: *“Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture”*

Normative Italiane ed Europee (2/2)

Per la Normativa Italiana sono previste queste tipologie murarie:

Muratura costituita da elementi resistenti artificiali

Muratura costituita da elementi resistenti naturali (pietra non squadrata, pietra listata, pietra squadrata)

e le seguenti tipologie strutturali:

Muratura sollecitata prevalentemente da azioni verticali

Muratura sollecitata prevalentemente da azioni orizzontali

Per la Normativa Europea sono previste queste tipologie murarie:

- Muro portante
- Muro monostrato
- Muro a cassa vuota
- Muro a doppia parete
- Muro con intercapedine di calcestruzzo fluido
- Muro a faccia a vista
- Muro con letto di malta interrotto
- Muro di rivestimento
- Muro resistente a taglio
- Muro di irrigidimento
- Muro non portante

Proprietà meccaniche della muratura: compressione semplice (1/14)

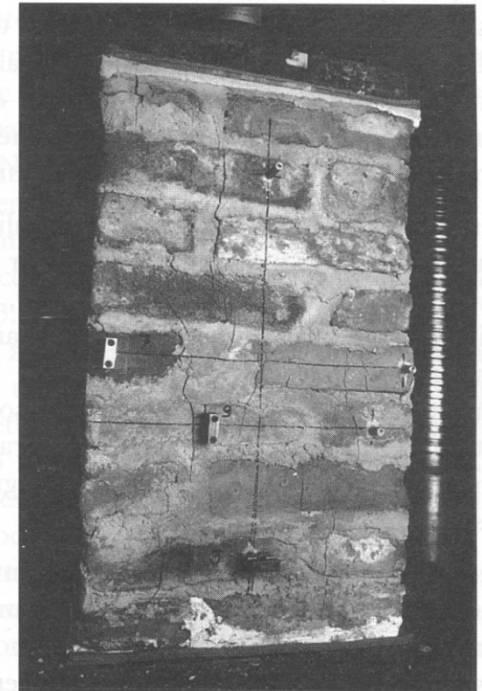
La muratura presenta tessitura regolare a filari orizzontali di mattoni e giunti di malta.

La rottura evidenzia un insieme di fessure verticali relativamente più frequenti nella parte centrale.

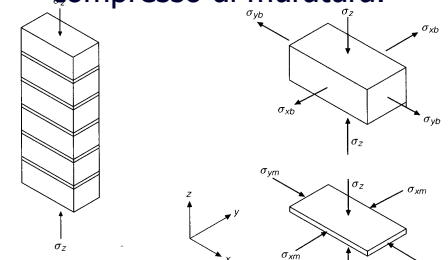
È tipica e rappresentativa di murature in mattoni a blocchi uniti da regolari giunti orizzontali di malta.

Causa della rottura: differente deformabilità dei costituenti. La malta, più deformabile, si trova in uno stato di confinamento tra gli strati di mattoni che produce uno stato di compressione triassiale; per reazione sulle facce dei mattoni che ad essa aderiscono nasce uno stato (piano) di trazione biassiale che ne causa, al crescere del carico, la rottura.

Lesioni verticali (presenti su entrambi i piani verticali) sono dovute a collasso per trazione dei blocchi nel piano orizzontale.



Fessurazioni in un elemento compresso di muratura.



Stato di sforzo nella malta e nel laterizio.
(Immagini tratte da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

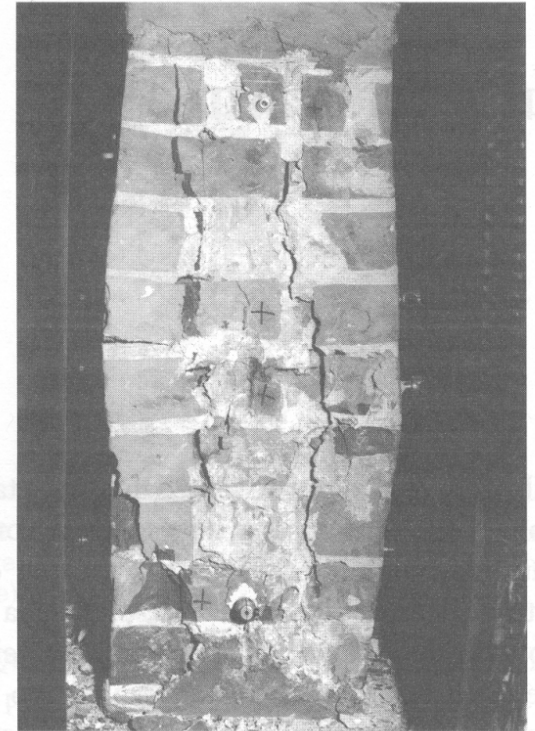
Proprietà meccaniche della muratura: compressione semplice (2/14)

Il collasso avviene poi per effetti secondari:

- instabilità dei pilastri che progressivamente si formano per distacco dalla parete;
- pressoflessione;
- taglio in corrispondenza di parti inclinate più deboli.

Evidenze sperimentali:

- muri costituiti da malte particolarmente deboli (anche solo sabbia sciolta!) si rompono a valori di tensione superiori alla resistenza della malta;
- mattoni particolarmente resistenti (con buon comportamento a trazione) migliorano le prestazioni della muratura;
- murature in ciottoli tondi e a sacco presentano una diversa modalità di crisi.



Fessurazioni in un elemento di muratura compresso e prossimo alla rottura.

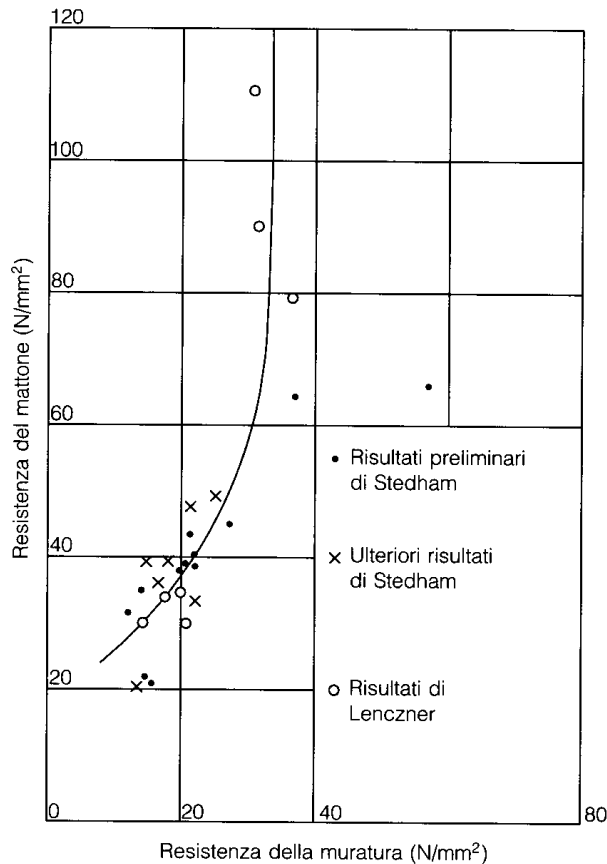
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Proprietà meccaniche della muratura: compressione semplice (3/14)

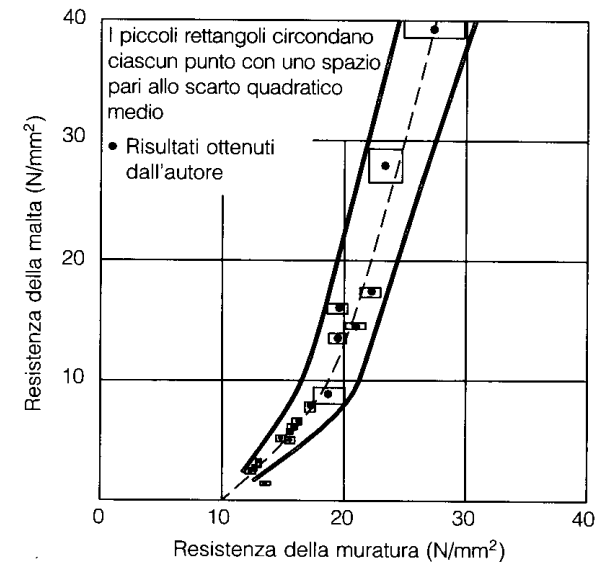
Parametri che influenzano il comportamento a compressione semplice:

- la resistenza (soprattutto quella a trazione) del mattone;
- la geometria del mattone;
- la resistenza e la rigidità della malta (al crescere della rigidità diminuisce l'effetto di contenimento e lo stato tensionale si avvicina a quello del mattone); si tratta però di una influenza modesta;
- le caratteristiche deformative di mattone e malta;
- lo spessore dei giunti (che influenza lo stato di confinamento);
- la capacità di assorbimento d'acqua del mattone;
- la capacità di ritenzione d'acqua della malta;
- l'aderenza fra malta e mattone;
- la lavorazione della muratura.

Proprietà meccaniche della muratura: compressione semplice (4/14)



Resistenza della muratura in funzione di quella del mattone
(cubi di muratura stagionati 28 giorni).

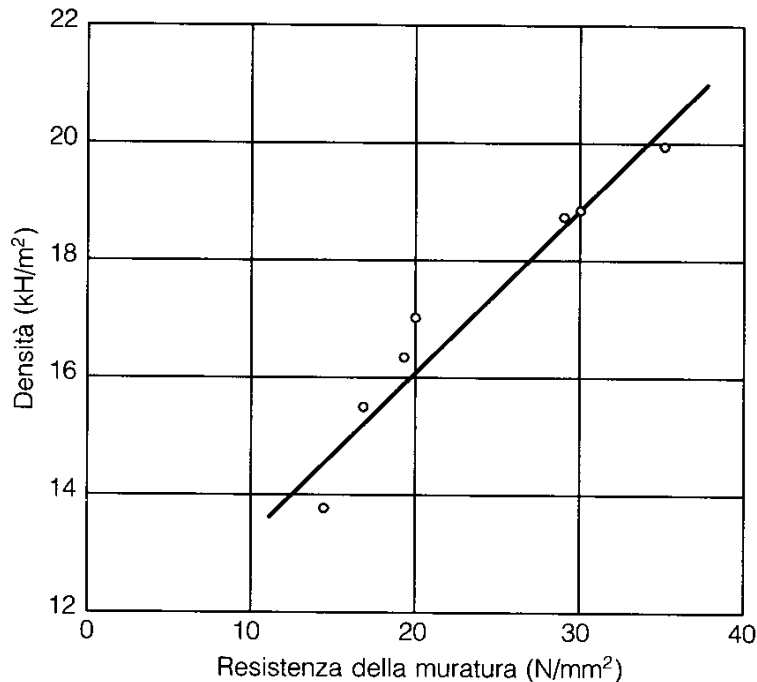


Resistenza della muratura in funzione di quella della malta
(cubi di muratura stagionati 28 giorni).

(Immagini tratte da
Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Proprietà meccaniche della muratura: compressione semplice (5/14)

Resistenza della muratura in funzione della densità del mattone.



(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

La densità del mattone è indice di compattezza e indirettamente della resistenza del laterizio. Peraltra a maggiore compattezza corrisponde una minore porosità e dunque un minore assorbimento di acqua dalla malta dei giunti. Un eccessivo potere assorbente del mattone ha effetto negativo sulla resistenza f della muratura poiché lascia nella malta cavità che, riempiendosi di aria, riducono la resistenza del materiale messo in opera.

Empiricamente si è trovato che:

$$f \propto \sqrt{f_b} \text{ e che } f \propto (f_m)^{1/3} \text{ o } f \propto (f_m)^{1/4}$$

dove f_b = resistenza del mattone,

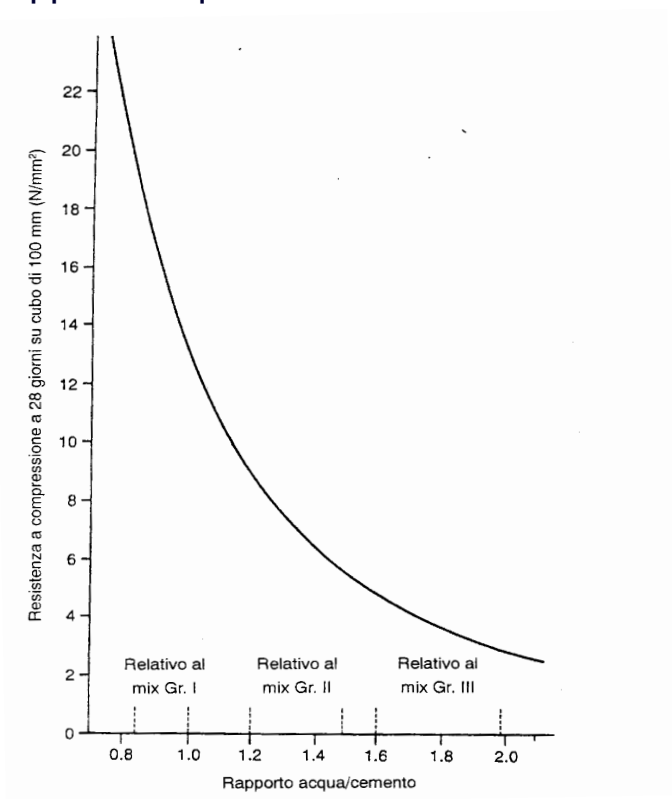
f_m = resistenza della malta,

f = resistenza della muratura.

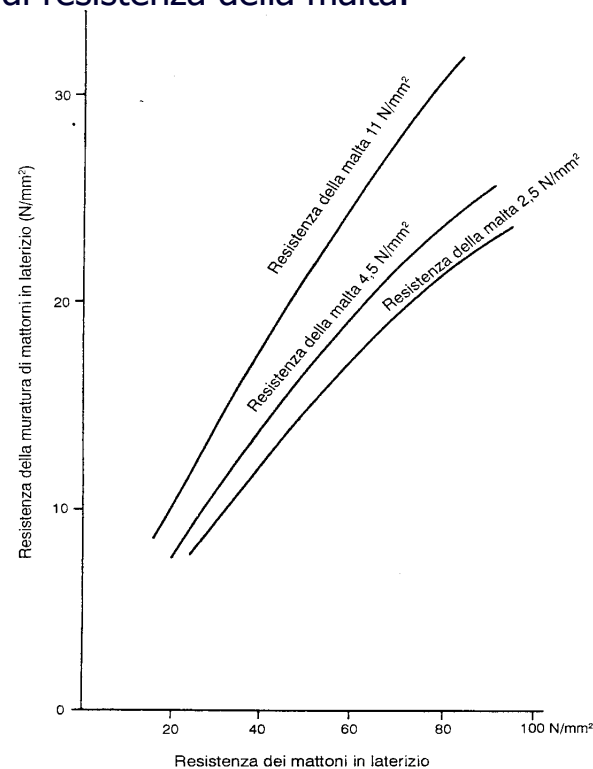
∴ Per una muratura resistente è più importante avere mattoni resistenti che malte resistenti!

Proprietà meccaniche della muratura: compressione semplice (6/14)

Resistenza della muratura in funzione del rapporto acqua-cemento nella malta.



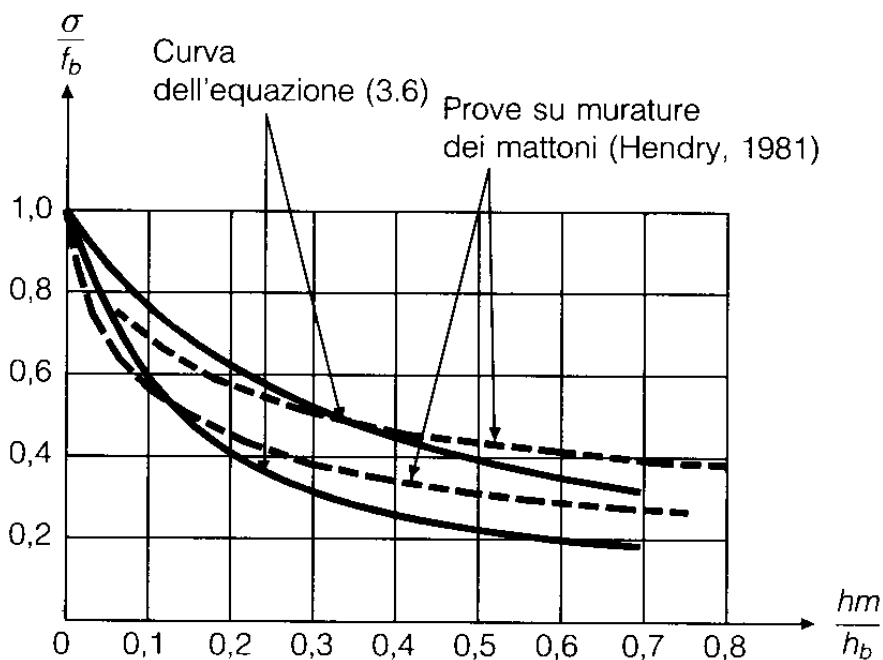
Resistenza della muratura in funzione della resistenza dei mattoni per assegnati valori di resistenza della malta.



(Immagini tratte da Hendry *et al.*, *op. cit.*)

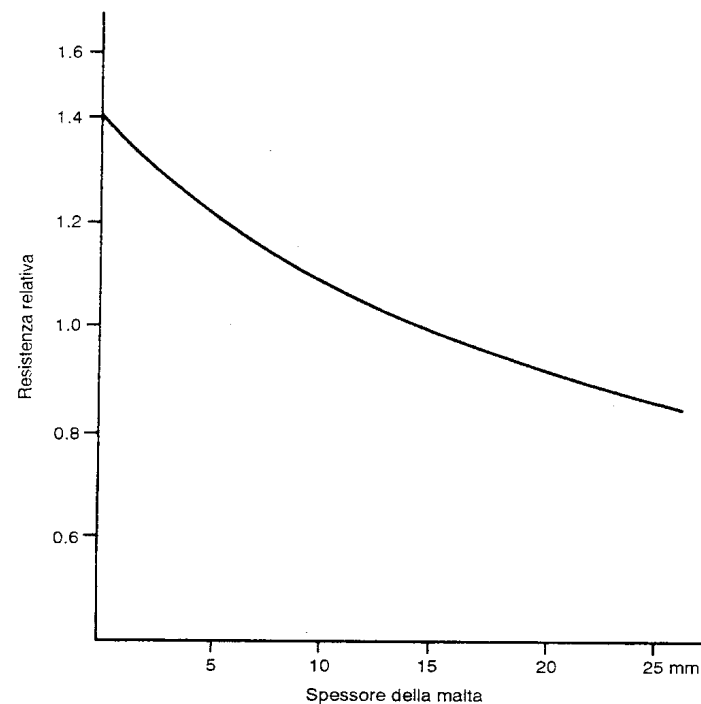
Proprietà meccaniche della muratura: compressione semplice (7/14)

Resistenza relativa della muratura in funzione del rapporto fra spessore del letto di malta e mattone.



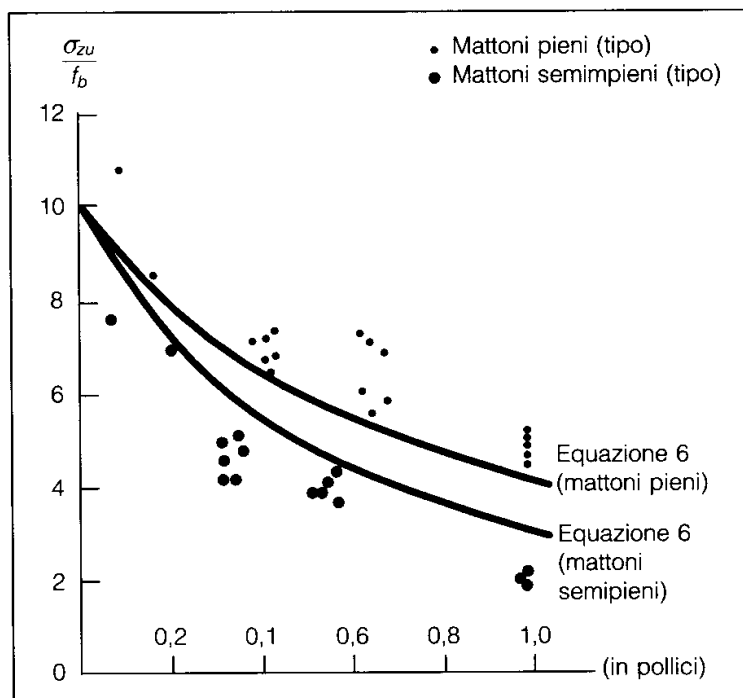
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Resistenza relativa della muratura in funzione dello spessore del letto di malta.



(Immagine tratta da Hendry *et al.*, *op. cit.*)

Proprietà meccaniche della muratura: compressione semplice (8/14)



Influenza del rapporto spessore del giunto/altezza del mattone sulla resistenza a compressione della muratura.

Resistenza relativa della muratura in funzione del rapporto fra spessore del letto di malta e mattone per mattoni pieni e semipieni.

(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Proprietà meccaniche della muratura: compressione semplice (9/14)

Influenza dell'esecuzione sulla resistenza della muratura:

- Errata composizione e miscelazione della malta;
- Esecuzione difettosa dei giunti (riempimenti incompleti o aumenti di spessore producono una riduzione della resistenza);
- Disturbo dei mattoni in fase di presa dopo la posa (per rottura dei legami);
- Difetti di verticalità e di allineamento (per eccentricità di carico);
- Mancanza di protezione dagli agenti atmosferici in fase di maturazione (per congelamento o evaporazione dell'acqua contenuta nella malta).

Proprietà meccaniche della muratura: compressione semplice (10/14)

Formule di derivazione empirica per la determinazione della resistenza della muratura

<i>Drögsler</i>	$f = 0,736 f_{cb} - \frac{221,5}{f_m} + 28,6$	<i>Nylander</i>	$f = f_m + k \sqrt[3]{f_b^2}$ $k = 0,6$ per malta di calce
<i>Ekblad</i>	- con malta di calce, $f_m \leq 350$ kgf/cm ² $f = \left(14 + \frac{f_b}{5,9} - \frac{f_b^2}{5200}\right) \frac{\sqrt{f_m} + 0,5}{\sqrt{h} + 12,7} h_b$ - con malta di calce, $f_m > 350$ kgf/cm ² $f = \left(23 + \frac{f_b}{13}\right) \frac{\sqrt{f_m} + 0,5}{\sqrt{h} + 12,7} h_b$ - con malta di calce-cemento $f = \left(12 + \frac{f_b}{6,5}\right) \frac{\sqrt{f_m}}{\sqrt{h} + 12,7} h_b$ - con malta di cemento $f = \left(6 + \frac{f_b}{6,5}\right) \frac{\sqrt{f_m}}{\sqrt{h} + 12,7} h_b$	<i>Oniszczyk</i>	$f = f_b \left(0,33 + \frac{1}{f_b}\right) \left(1 - \frac{0,2}{0,3 + f_m/f_b}\right)$
<i>Graf</i>	$f = \frac{f_b (4 + 0,1 f_m)}{1 + 3h/t} h_b + e$ $e = 10$ kgf/cm ² per eccellente esecuzione	<i>Suenson e Dührkop</i>	$f = 3,61 \sqrt[3]{f_m} \frac{f_b - 0,15 (\max f_b - \min f_b)}{9,71 + \sqrt{f_b}}$
<i>Haller</i>	$f = (\sqrt{1 + 0,15 f_b} - 1) (8 + 0,057 f_m)$	<i>Voellmy</i>	$f = \frac{f_b}{2} - \frac{180}{\sqrt{f_b}} \left[\frac{\max f_b}{\min f_b} + \left(\frac{f_b - f_m}{100}\right)^2 \right]$
<i>Hansson</i>	$f = 2 \sqrt{f_b} + 3 \sqrt{f_m}$	<i>Monk</i>	con malta di cemento: sabbia = 1 : 3 $f = 0,297 f_b$ con malta di cemento : calce : sabbia = 1 : 1 : 6 $f = 0,177 f_b$ con malta di calce : sabbia = 1 : 3 $f = 0,138 f_b$
<i>Herrmann</i>	$f = 0,45 \sqrt[3]{f_m f_b^2}$		con malta di tipo S- Laboratorio SCPRF $f = -409 + 0,8719 f_b - 0,3009 (f_b)^2 \cdot 10^{-4} \text{ psi}^8$ con malta di tipo S- Laboratorio SCPRF - Lab. commerciali $f = -1852 + 0,8826 f_b - 0,2624 (f_b)^2 \cdot 10^{-4} \text{ psi}^8$
<i>Kreüger</i>	$f = \left(\frac{f_b}{\gamma^3} + 3,5 \gamma^2\right) \frac{6 + 0,1 f_m}{8 + 2,5 h/d} \sqrt{h_b}$ $h_b = 6,5$ cm $f_m \leq 60$ kgf/cm ²		

Formule di origine empirica per determinare la resistenza della muratura.

(Tabella tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Nelle formule:

f = resistenza della muratura (kgf/cm²);
 f_b = resistenza del laterizio a compressione (kgf/cm²);
 f_m = resistenza della malta a compressione (kgf/cm²);
 f_{cb} = resistenza del laterizio a flessione (kgf/cm²);
 h_b = altezza del mattone (cm);

h = altezza della parete in muratura (cm);
 t = spessore della muratura (cm);
 γ = densità del mattone

⁸ Dove 1 psi (libbra/pollice quadrato) \cong 75 kgf/cm².

Proprietà meccaniche della muratura: compressione semplice (11/14)

Tabella A delle norme, che indica la resistenza caratteristica f_k della muratura in funzione della resistenza dei laterizi e del tipo di malta

Resistenza caratteristica a compressione f_{bk} dell'elemento		Tipo di malta							
		M ₁		M ₂		M ₃		M ₄	
N/mm ²	kgf/cm ²	N/mm ²	kgf/cm ²	N/mm ²	kgf/cm ²	N/mm ²	kgf/cm ²	N/mm ²	kgf/cm ²
2,0	20	1,2	12	1,2	12	1,2	12	1,2	12
3,0	30	2,2	22	2,2	22	2,2	22	2,0	20
5,0	50	3,5	35	3,4	34	3,3	33	3,0	30
7,5	75	5,0	50	4,5	45	4,1	41	3,5	35
10,0	100	6,2	62	5,3	53	4,7	47	4,1	41
15,0	150	8,2	82	6,7	67	6,0	60	5,1	51
20,0	200	9,7	97	8,0	80	7,0	70	6,1	61
30,0	300	12,0	120	10,0	100	8,6	86	7,2	72
40,0	400	14,3	143	12,0	120	10,4	104	-	-

(Tabella tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Proprietà meccaniche della muratura: compressione semplice (12/14)

Resistenza caratteristica della muratura in pietra naturale secondo la Normativa Italiana. Murature a giunti orizzontali e verticali riempiti di malta, di spessore s , $5 \text{ mm} \leq s \leq 15 \text{ mm}$.

Tabella D delle norme, che indica la resistenza caratteristica f_k della muratura in funzione della resistenza degli elementi naturali e del tipo di malta

Resistenza caratteristica a compressione f_{bk} dell'elemento		Tipo di malta							
		M ₁		M ₂		M ₃		M ₄	
N/mm ²	kgf/cm ²	N/mm ²	kgf/cm ²	N/mm ²	kgf/cm ²	N/mm ²	kgf/cm ²	N/mm ²	kgf/cm ²
1,5	15	1,0	10	1,0	10	1,0	10	1,0	10
3,0	30	2,2	22	2,2	22	2,2	22	2,0	20
5,0	50	3,5	35	3,4	34	3,3	33	3,0	30
7,5	75	5,0	50	4,5	45	4,1	41	3,5	35
10,0	100	6,2	62	5,3	53	4,7	47	4,1	41
15,0	150	8,2	82	6,7	67	6,0	60	5,1	51
20,0	200	9,7	97	8,0	80	7,0	70	6,1	61
30,0	300	12,0	120	10,0	100	8,6	86	7,2	72
≥ 40,0	≥ 400	14,3	143	12,0	120	10,4	104	-	-

Proprietà meccaniche della muratura: compressione semplice (13/14)

Resistenza caratteristica della muratura, f_k , è il valore di resistenza corrispondente al *frattile* del 5% di tutte le misure di resistenza della muratura.

Il valore può essere dedotto da risultati di prove specifiche o dalla valutazione dei dati di prova o di altri valori specificati. Nel caso di dati tabulati (validi, nel caso di laterizi, solo per *elementi pieni* o *semipieni* e non per i forati) è ammessa l'interpolazione ma non l'estrapolazione.

Quando la verifica di stabilità richieda un valore di resistenza caratteristica $f_k \geq 8 \text{ N / mm}^2$ (MPa) occorre, in sede di direzione lavori, garantire il controllo del valore di f_k .

Secondo l'Eurocodice la resistenza caratteristica a compressione per muratura non armata con impiego di malta ordinaria e spessore dei giunti s , $8 \text{ mm} \leq s \leq 15 \text{ mm}$ è pari a

$$f_k = K f_b^{0.65} f_m^{0.25} \quad (\text{N/mm}^2)$$

dove

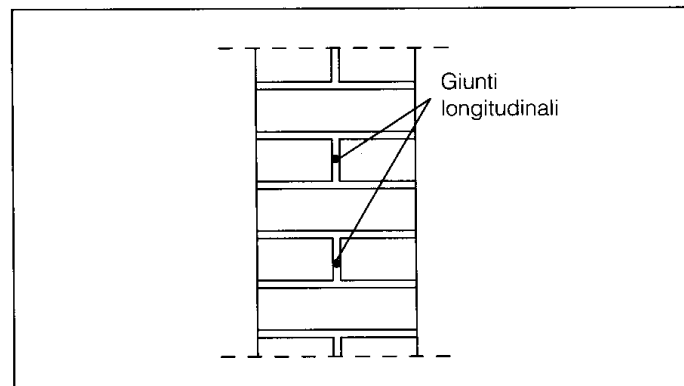
f_b = resistenza a compressione normalizzata degli elementi in muratura, espressa in N/mm^2 ;

f_m = resistenza a compressione della malta, espressa in N / mm^2 ; $f_m = \min (20, 2f_b)$ in N/mm^2 ;

K = costante, avente dimensioni in $(\text{N/mm}^2)^{0.10}$ assunta come segue:

Proprietà meccaniche della muratura: compressione semplice (14/14)

- $K = 0.60 \Rightarrow$ per elementi murari del gruppo 1 in assenza di giunti longitudinali;
 $K = 0.55 \Rightarrow$ per elementi murari del gruppo 2a in assenza di giunti longitudinali;
 $K = 0.50 \Rightarrow$ per elementi murari del gruppo 2b in assenza di giunti longitudinali o
per elementi murari del gruppo 1 in presenza di giunti longitudinali
 $K = 0.45 \Rightarrow$ per elementi murari del gruppo 2a in presenza di giunti longitudinali;
 $K = 0.40 \Rightarrow$ per elementi murari del gruppo 2b in presenza di giunti longitudinali o
per elementi murari del gruppo 3.



Giunti longitudinali (verticali) in un blocco di muratura.
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a taglio (1/15)

La resistenza a taglio della muratura è coinvolta nella risposta ad azioni sismiche o ad altre azioni orizzontali.

In queste condizioni le pareti di controvento sono investite nel loro piano in sommità dalle azioni orizzontali trasmesse dai solai a esse appoggiate e, alla base, da reazioni dei vincoli inferiori: dunque si comporterebbero come elementi tozzi (pannelli) soggetti a puro taglio.

In realtà la situazione è più complicata e si deve considerare che:

- Esiste sempre anche una componente verticale di compressione (peso proprio della muratura, carico dei solai e peso dei muri sovrastanti);
- L'azione orizzontale in sommità tende a fare ruotare la parete: il meccanismo resistente è dovuto alla componente verticale e all'azione di ritegno di eventuali vincoli di sommità rigidi (solai di c.a.);
- Pareti molto alte non possono essere considerate tozze e vanno analizzate tenendo in conto gli effetti flessionali, che divengono prevalenti, indotti dall'azione orizzontale;
- In pareti tozze la rottura, attribuibile a taglio, può avvenire in diversi modi, non sempre riconducibili allo schema di un pannello isotropo che si fessura per effetto della tensione principale di trazione.

Comportamento della muratura in presenza di sollecitazione a taglio in presenza di uno sforzo di compressione: situazione significativa per pannelli di muratura tozzi (rapporto altezza/lunghezza < 2).

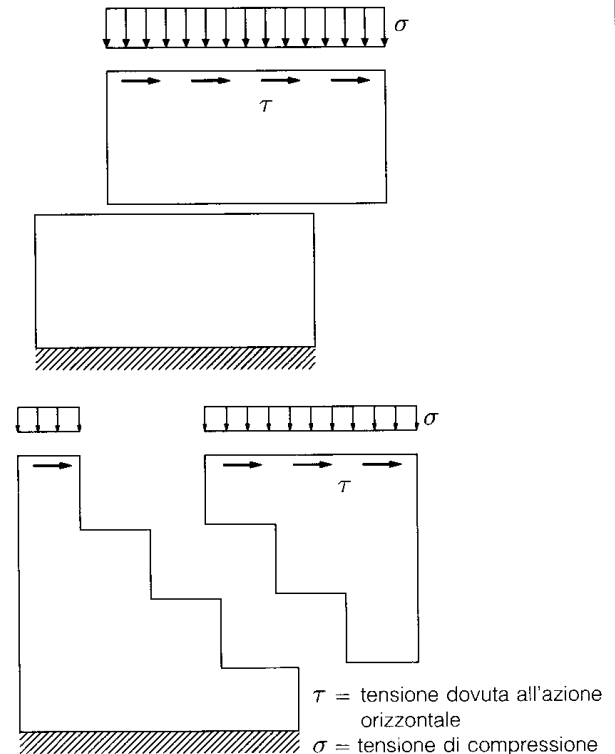
Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a taglio (2/15)

Modi di rottura di un pannello murario incastrato alla base, non armato e privo di aperture:

1. Scorrimento per taglio nei giunti orizzontali, solitamente nella porzione centrale.

La sconnessione può riguardare un solo giunto orizzontale o, più frequentemente, un sistema di giunti orizzontali e verticali

Caratteristico di murature con malta di qualità scadente e carichi verticali modesti.



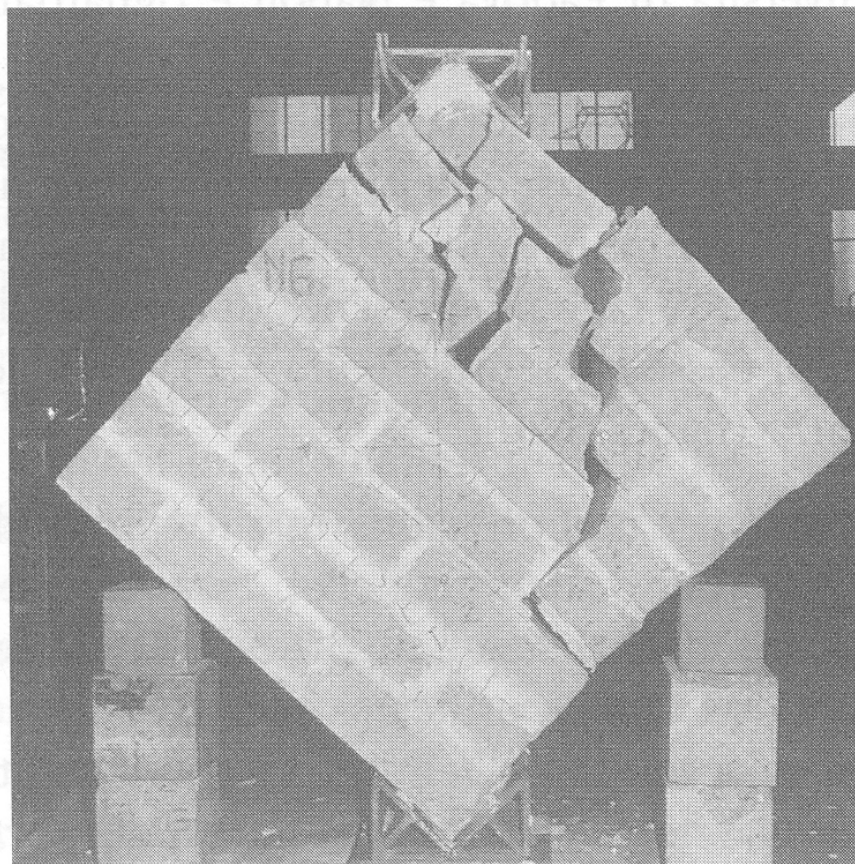
Rottura per scorrimento nei giunti orizzontali.
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a taglio (3/15)

La situazione si può evidenziare, in alternativa, mediante una prova su un pannello di muratura a compressione diagonale.

Pannello dotato di bassa aderenza soggetto a compressione diagonale concentrata.

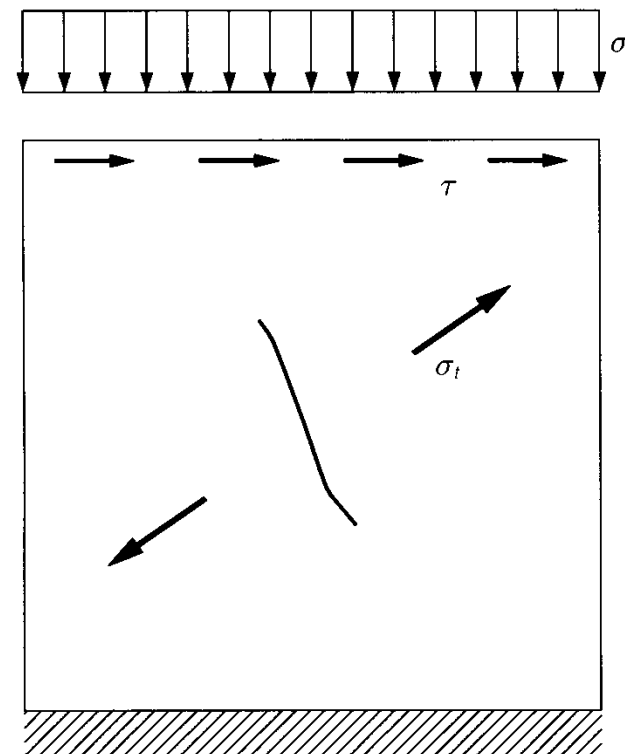
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)



Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a taglio (4/15)

2. Rottura per taglio-trazione nella zona centrale della parete.

Caratteristico di murature con buona aderenza fra malta e blocchi e carichi verticali fra bassi e medi.



Rottura per taglio-trazione.
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

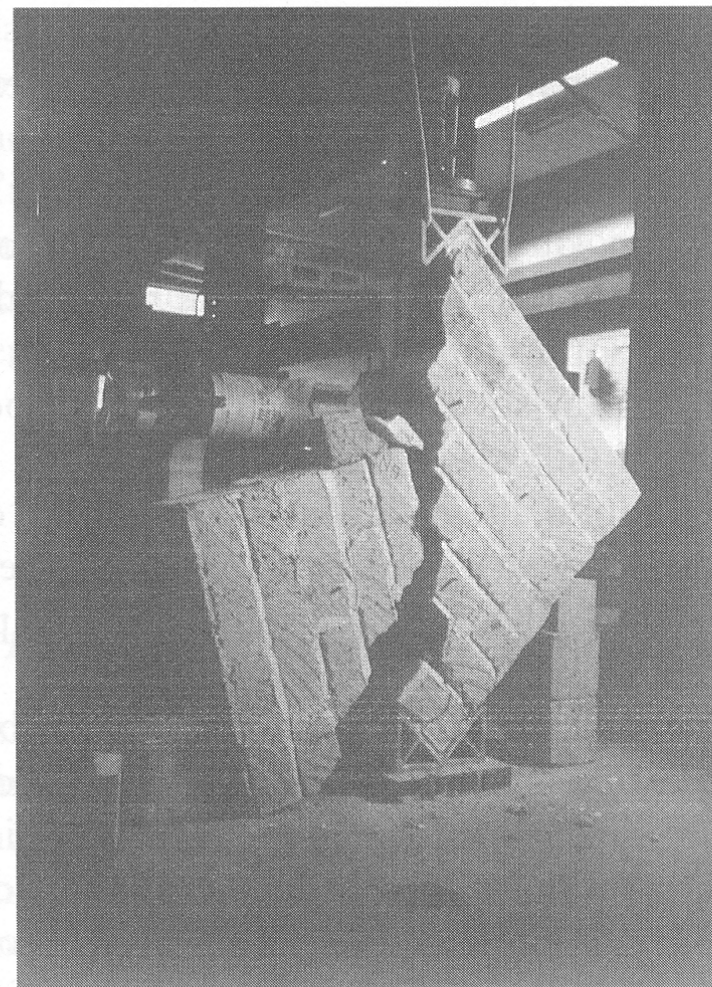
τ = tensione dovuta all'azione orizzontale
 σ = tensione di compressione
 σ_t = tensione principale di trazione

Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a taglio (5/15)

La situazione si può evidenziare, in alternativa, mediante una prova a compressione diagonale su un pannello di muratura.

Pannello dotato di elevata aderenza soggetto a compressione diagonale concentrata.

(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)



Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a taglio (6/15)

3. Rottura per compressione in corrispondenza di un angolo basso del pannello.

Caratteristico di murature con basse e medie resistenze a compressione.

A seconda dell'intensità del carico verticale varia la zona interessata:

- per carichi verticali bassi si ha distacco della parete alla base per parzializzazione delle sezione resistente e schiacciamento nella zona compressa;
- per carichi verticali alti il contatto alla base si mantiene quasi completamente e lo schiacciamento interessa una porzione estesa.

Rottura in prossimità di un angolo basso: caso di σ elevata.

(Immagine tratte da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

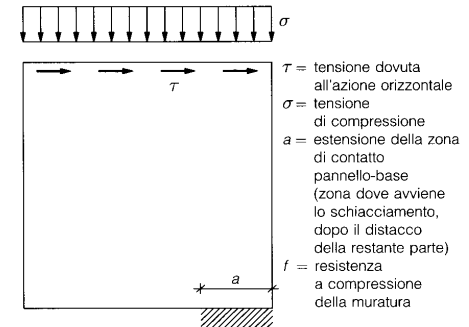


Diagramma di tensione alla base del pannello

Rottura in prossimità di un angolo basso: caso di σ piccola.

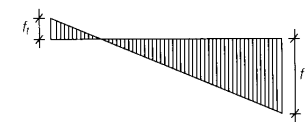
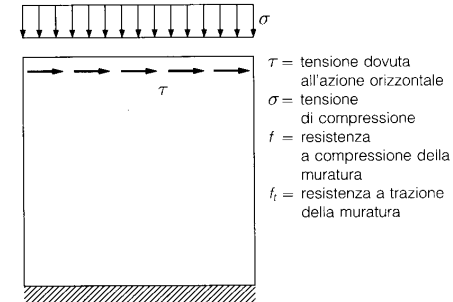


Diagramma di tensione alla base del pannello: la resistenza a trazione f_t è essenzialmente teorica.

Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a taglio (7/15)

In conclusione pannelli geometricamente eguali possono presentare modalità di rottura differenti, in funzione delle caratteristiche meccaniche che li contraddistinguono.

Non è possibile identificare un unico criterio di rottura in quanto può verificarsi:

- Rottura dovuta a scorrimento fra i giunti;
- Rottura dovuta a fessurazione prodotta da una tensione principale di trazione;
- Rottura dovuta a schiacciamento della muratura nella zona più sollecitata a compressione.

In alcuni casi variando l'entità della componente orizzontale dell'azione applicata, V , e la tensione di compressione verticale, σ , si possono ottenere tutte le modalità di collasso sopra citate.

Si possono così ottenere dei diagrammi di interazione che correlano la tensione tangenziale ultima

$$f_v = V / (t \cdot L)$$

dove t e L sono lo spessore e la lunghezza del pannello, con la tensione di compressione verticale applicata, σ .

I risultati sono riportati nella forma adimensionale f_v / f e σ / f , dove f è la resistenza a compressione monoassiale della muratura.

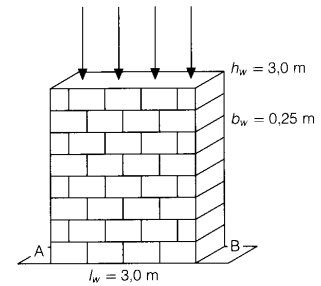
Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a taglio (8/15)

Diagramma di interazione per un pannello di muratura non armata ottenuto da Thassios (1988).

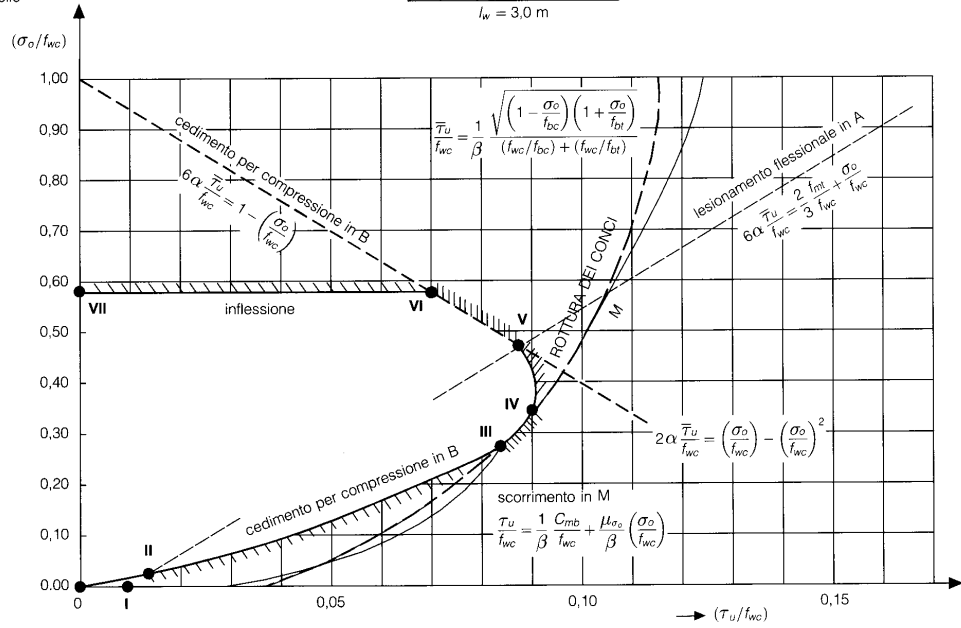
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Nella figura si sono mantenuti i simboli del testo originale; per consuetudine coi simboli impiegati in questo testo essi vanno trasformati nel modo seguente:

- $\sigma_0 \rightarrow \sigma$ = precompressione verticale
- $f_{wc} \rightarrow f$ = resistenza a compressione della muratura
- $\tau_u \rightarrow \tau_v$ = resistenza a taglio della muratura
- $C_{mb} \rightarrow c$ = coesione tra malta e mattoni/blocchi
- $\mu\sigma_0 \rightarrow \mu\sigma$ = coefficiente di attrito lungo un giunto orizzontale espresso in funzione della tensione verticale σ
- $a = h/l$ dove h = altezza pannello
 l = lunghezza pannello
- β = coefficiente di distribuzione delle tensioni tangenziali
- $f_{mt} \rightarrow$ = resistenza a trazione del legante
- $f_{bt} \rightarrow$ = resistenza a trazione del mattone o del blocco
- $f_b \rightarrow$ = resistenza a compressione del mattone o del blocco
- $h_w \rightarrow h$ = altezza del pannello
- $l_w \rightarrow l$ = lunghezza del pannello
- $b_w \rightarrow t$ = larghezza del pannello



- $f_{bc} = 20,0$
- $f_{bt} = 0,6$
- $f_{mc} = 10,0$
- $f_{mt} = 0,5$
- $c_{mb} = 0,2$
- $k = E_w/f_{wc} = 900$
- $\varphi = 0,8$
- $\alpha = \eta_w/l_w = 1$



Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a taglio (9/15)

Lo scorrimento dei giunti di malta è interpretabile con la legge di Coulomb:

$$f_v = f_{v0} + \mu \cdot \sigma$$

- dove f_v = resistenza a taglio (media sulla sezione);
 f_{v0} = resistenza a taglio in assenza di compressione,
pari al valore di aderenza per scorrimento (coesione);
 μ = coefficiente di attrito (dipendente dalle proprietà dei
materiali, dalla forma e da altri fattori eventuali);
 σ = tensione di precompressione.

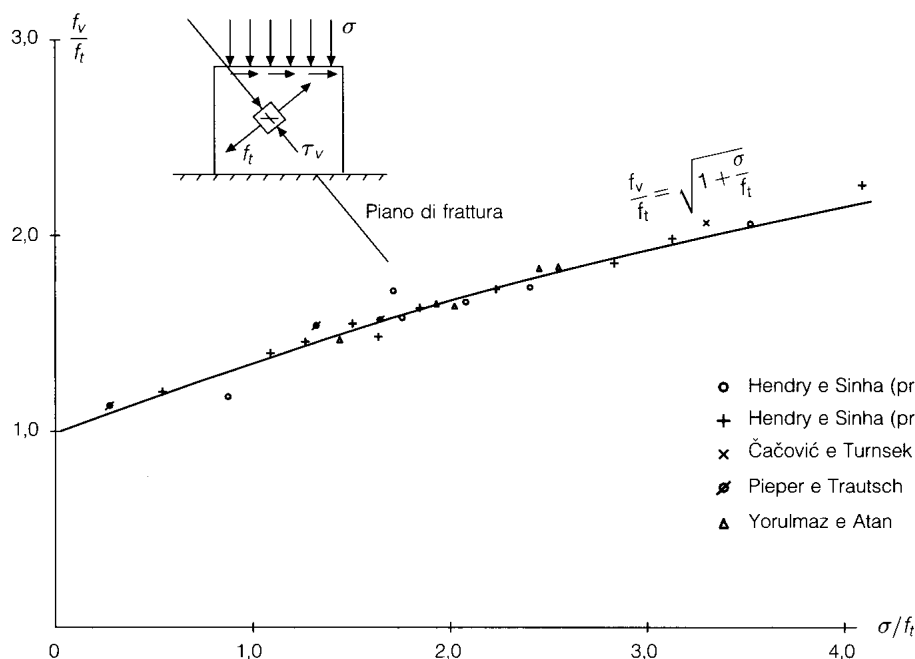
L'adozione di un criterio di questo tipo trova applicazione non solo per rotture dovute a cedimento dei giunti di malta, ma anche a comparsa di lesioni diagonali, per le quali si ha raggiungimento del valore critico della tensione principale di trazione nella muratura del pannello: la presenza di precompressione comporta un aumento della forza verticale necessaria al raggiungimento del valore critico, tanto più quando si considera l'anisotropia della muratura, valutabile variando l'inclinazione relativa fra giunti e carico orizzontale.

Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a taglio (10/15)

Diagramma di crisi per trazione di un pannello di muratura non armata

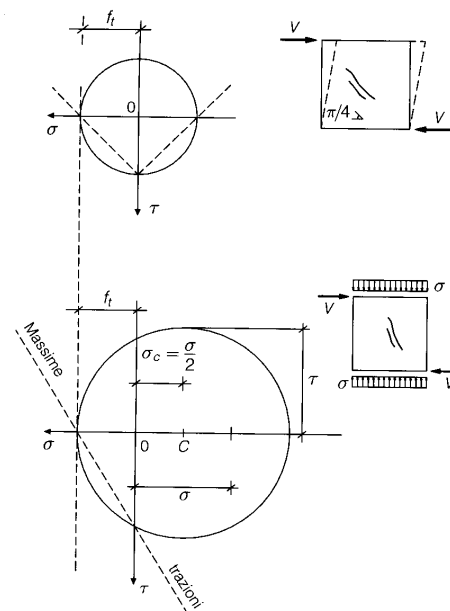
$$f_v / f_t = (1 + \sigma / f_t)^{1/2}$$

f_t = resistenza a trazione della muratura nella direzione della tensione principale



Critero di crisi per taglio-trazione di un pannello in muratura. Diagramma adimensionale della tensione tangenziale media in funzione della compressione applicata.

(Immagini tratte da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

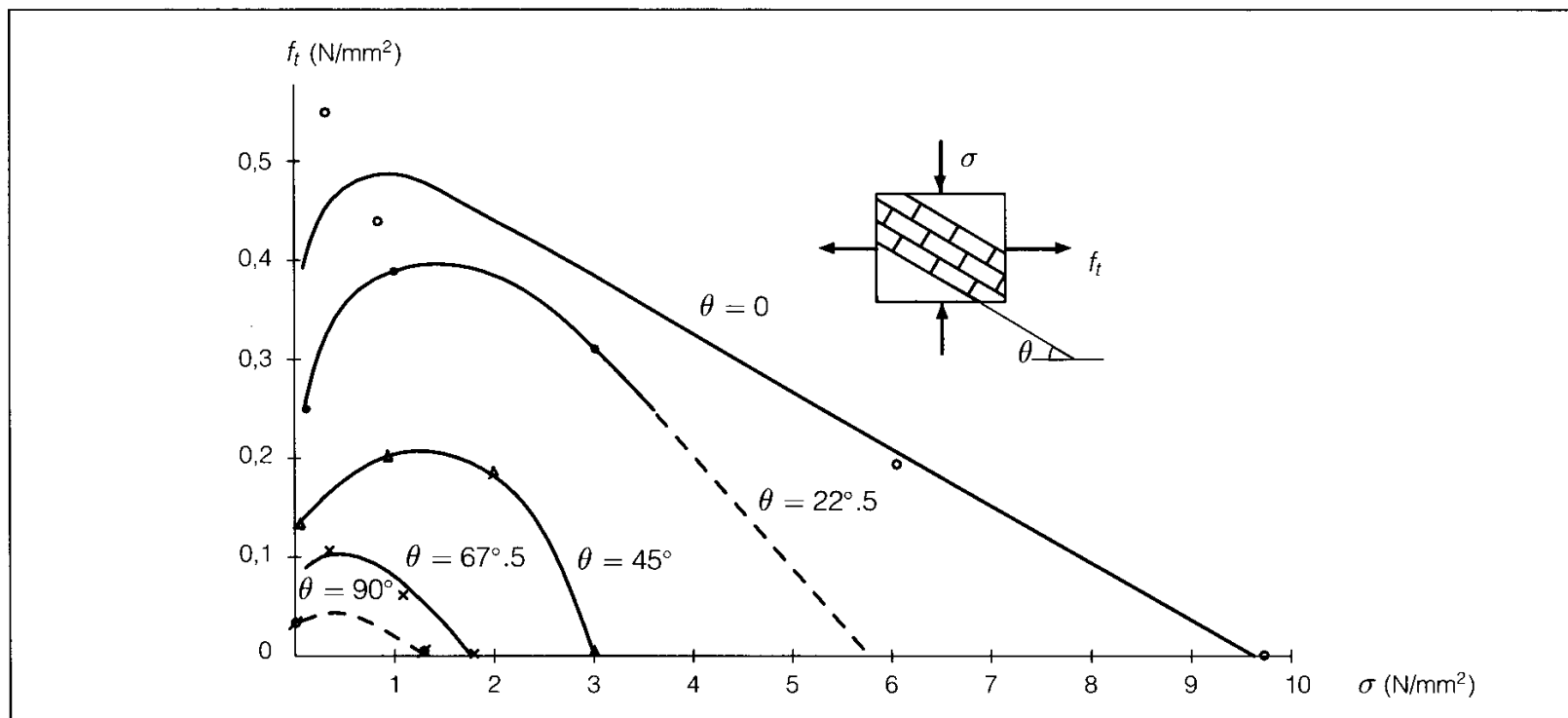


Interpretazione secondo la teoria elastica del comportamento di un pannello sottoposto a una tensione di compressione uniforme σ e ad azioni orizzontali V .

Le fessure si localizzano in posizione centrale in quanto le tensioni tangenziali sono massime al centro ($\tau = 1,5 \tau$ media) e la zona è lontana dall'influenza dei vincoli superiori e inferiori. Si osserva come, ammesso un criterio che collega la comparsa della prima fessurazione al raggiungimento di un prefissato valore f_t della tensione principale di trazione, in assenza di carico verticale, il cerchio di Mohr è il più piccolo, $\tau = f_t$, e il piano delle massime trazioni è inclinato sull'orizzontale di $\pi/4$. La comparsa di una tensione verticale σ fa sì che il cerchio di Mohr che passa per l'ascissa f_t e soddisfa contemporaneamente alla condizione: tensione orizzontale = 0 e tensione verticale = σ (cerchio con centro di ascissa $\frac{\sigma + 0}{2} = \frac{\sigma}{2}$), sia più grande quanto più è grande la tensione verticale σ ; di conseguenza la tensione tangenziale associata alla σ cresce, come ovviamente lo sforzo V che la provoca; inoltre i piani su cui insiste la tensione principale di trazione sono via via più inclinati, con fessurazioni che tendono progressivamente alla verticale.

Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a taglio (11/15)

Variazione della resistenza a trazione della muratura, f_t , con l'inclinazione dei giunti di malta in funzione della compressione σ applicata.



Curve di crisi di pannelli di muratura in regime biassiale per diverse orientazioni dei giunti.

(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a taglio (12/15)

La resistenza a taglio della muratura può essere determinata, secondo la Normativa Italiana o per via sperimentale (diretta) o, per via indiretta, in base alle caratteristiche dei componenti (per elementi artificiali solo nel caso di elementi pieni e semipieni).

Si definisce una *resistenza caratteristica a taglio* f_{vko} *in assenza di tensione normale*, e una *resistenza caratteristica a taglio di calcolo*, f_{vk} , determinata tenendo conto della combinazione con la tensione normale, σ_n

$$f_{vk} = f_{vko} + 0.4 \sigma_n$$

Per elementi artificiali semipieni o forati deve poi risultare $f_{vk} \leq f_{vk,lim} = 1.4 \eta f_{bk}$, dove ηf_{bk} è il *valore caratteristico della resistenza a compressione degli elementi in direzione orizzontale nel piano del muro*.

Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a taglio (13/15)

Valore di f_{vko} per murature in elementi artificiali in laterizio pieni e semipieni (tabella B della normativa)

Resistenza caratteristica a compressione f_{bk} dell'elemento		Tipo di malta	f_{vko}	
N/mm ²	kgf/cm ²		N/mm ²	kgf/cm ²
$f_{bk} \leq 15$	$f_{bk} \leq 150$	$M_1 - M_2 - M_3 - M_4$	0,20	2,0
$f_{bk} > 15$	$f_{bk} > 150$	$M_1 - M_2 - M_3 - M_4$	0,30	3,0

Valore di f_{vko} per murature in elementi artificiali in calcestruzzo pieni e semipieni (tabella C della normativa)

Resistenza caratteristica a compressione f_{bk} dell'elemento		Tip di malta	f_{vko}	
N/mm ²	kgf/cm ²		N/mm ²	kgf/cm ²
$f_{bk} \leq 3$	$f_{bk} \leq 30$	$M_1 - M_2 - M_3$	0,1	1
		M_4	0,1	1
$f_{bk} > 3$	$f_{bk} > 30$	$M_1 - M_2 - M_3$	0,2	2
		M_4	0,1	1

Valore di f_{vko} per murature in pietra naturale squadrata (tabella E della normativa)

Resistenza caratteristica a compressione f_{bk} dell'elemento		Tipo di malta	f_{vko}	
N/mm ²	kgf/cm ²		N/mm ²	kgf/cm ²
$f_{bk} \leq 3$	$f_{bk} \leq 30$	$M_1 - M_2 - M_3$	0,1	1
		M_4	0,1	1
$f_{bk} > 3$	$f_{bk} > 30$	$M_1 - M_2 - M_3$	0,2	2
		M_4	0,1	1

(Tabella tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a taglio (14/15)

Secondo l'Eurocodice la resistenza caratteristica a taglio per muratura non armata a giunti riempiti è pari al più piccolo fra i valori elencati:

$$f_{vk} = f_{vko} + 0.4 \sigma_d$$

$$f_{vk} = 0.065 f_b \geq f_{vko}$$

$$f_{vk} = \text{valore limite fornito in tabella}$$

dove f_{vko} = resistenza a taglio in assenza di compressione;

f_b = resistenza a compressione normalizzata degli elementi, relativa alla direzione del carico perpendicolare al piano di posa;

σ_d = tensione di compressione di progetto, agente in direzione perpendicolare al taglio.

Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a taglio (15/15)

Valori di f_{vko} e valori limite di f_{vk} per la malta ordinaria (tabella 3.5 dell'Eurocodice)

Elemento murario	Malta	f_{vko} (N/mm ²)	Valori limite di f_{vk} (N/mm ²)	
Elementi in laterizio del gruppo 1	da M10 a M20	0,3	1,7	
	da M2.5 a M9	0,2	1,5	
	da M1 a M2	0,1	1,2	
Elementi del gruppo 1 diversi da laterizio e pietra naturale	da M10 a M20	0,2	1,7	
	da M2.5 a M9	0,15	1,5	
	da M1 a M2	0,1	1,2	
Elementi in pietra naturale del gruppo 1	da M2.5 a M9	0,15	1,0	
	da M1 a M2	0,1	1,0	
Elementi d'argilla del gruppo 2a	da M10 a M20	0,3	Il minore della resistenza longitudinale a compressione (v. nota sotto) oppure	1,4
	da M2.5 a M9	0,2		1,2
	da M1 a M2	0,1		1,0
Elementi del gruppo 2a e 2b diversi dal laterizio ed elementi in laterizio del gruppo 2b	da M10 a M20	0,2		1,4
	da M2.5 a M9	0,15		1,2
	da M1 a M2	0,1		1,0
Elementi in laterizio del gruppo 3	da M10 a M20	0,3	Nessun limite diverso da quello dato dall'equazione [3.4]	
	da M2.5 a M9	0,2		
	da M1 a M2	0,1		

Nota: Per gli elementi per muratura del Gruppo 2a e 2b, la resistenza longitudinale a compressione degli elementi è assunta come resistenza misurata, con δ non maggiore di 1,0.

Quando sia attesa una resistenza longitudinale a compressione maggiore di $0,15 f_b$, considerando la geometria dei fori, non è necessario condurre delle prove.

(Tabella tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a trazione (1/2)

La resistenza a trazione della muratura è molto bassa, tanto che non vi si può fare affidamento, come evidenziato da molti studi sperimentali.

Nel caso di sollecitazione nel piano della parete, la trazione si sviluppa attraverso i giunti di posa della muratura e la resistenza dipende dalle forze di adesione fra mattoni e malta.

I fattori che influenzano la resistenza sono:

- bassa velocità di assorbimento del mattone e iniziale contenuto d'acqua;
- tipo di malta
- tipo di mattone;
- spessore dei giunti di malta;
- qualità dell'esecuzione della muratura.

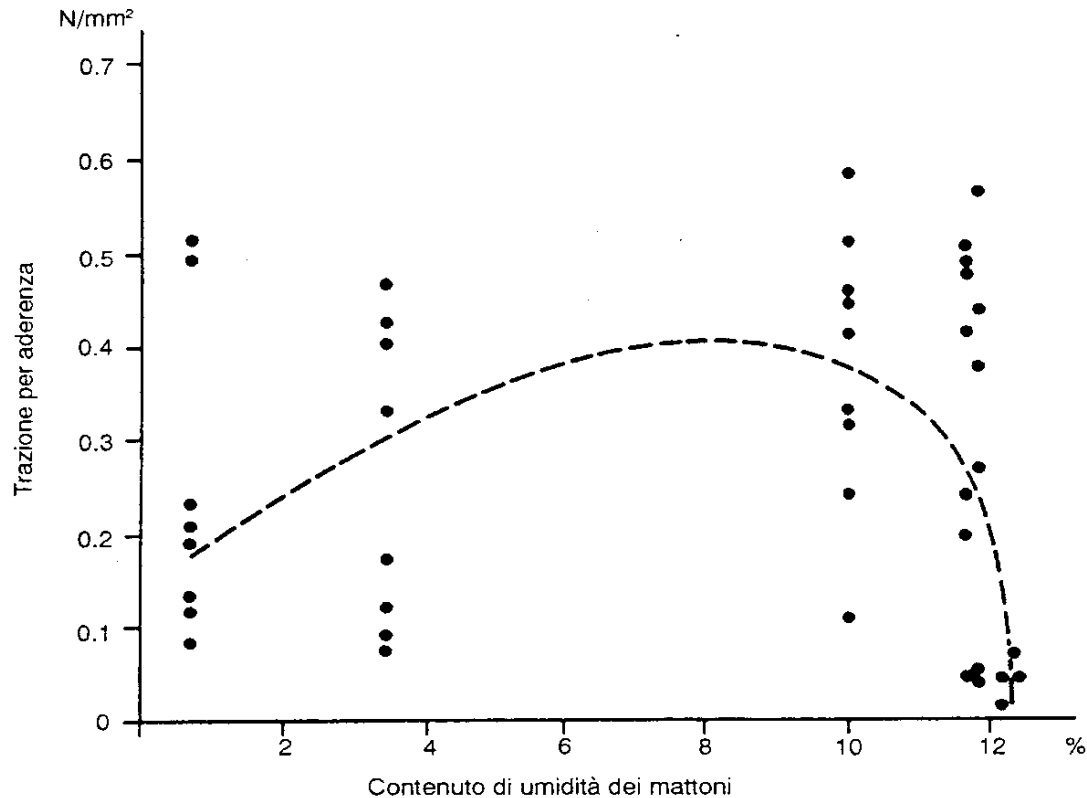
La resistenza a trazione può essere incrementata aggiungendo additivo plastico alla malta in fase di miscelazione, anche se ciò produce incremento dei costi.

Studi sperimentali confermano che il contenuto d'acqua del mattone al momento della posa in opera è importante ai fini della resistenza a trazione della muratura.

Né le Norme Italiane, né l'Eurocodice forniscono indicazioni specifiche sulla resistenza a trazione.

Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a trazione (2/2)

Resistenza a trazione della muratura (per adesione) è funzione del contenuto d'acqua dei mattoni al momento della posa.



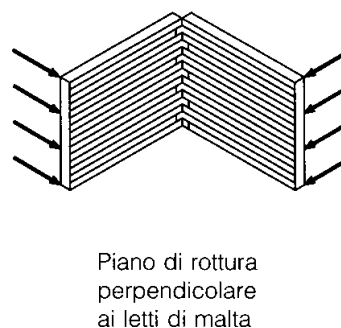
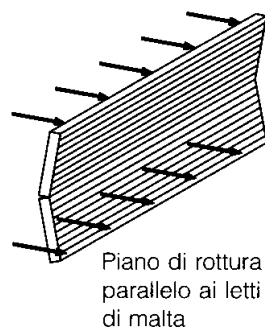
(Immagine tratta da Hendry *et al.*, *op. cit.*)

Proprietà meccaniche della muratura: resistenza a flessione

La Normativa Italiana non considera la resistenza a flessione della muratura, a differenza dell'Eurocodice che ne richiede la determinazione, per la muratura non armata, mediante prove sperimentali.

Si prescrive che la resistenza a flessione, f_{xk} , venga determinata separatamente su provini che diano il piano di rottura parallelo al letto di malta (fornendo in questo modo il valore f_{xk1}) e su provini che diano il piano di rottura perpendicolare ai letti di malta e forniscono il valore f_{xk2} .

La resistenza a flessione f_{xk1} dovrebbe essere utilizzata solo per il progetto di muri sottoposti ad azioni accidentali agenti in direzione normale alla loro superficie. Il valore di f_{xk1} deve essere assunto nullo quando (i) la rottura del muro può condurre a un maggiore collasso o alla perdita di stabilità dell'intera struttura; (ii) nella progettazione antisismica.



Resistenze a flessione f_{xk1} e f_{xk2} .

(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Proprietà meccaniche della muratura: proprietà deformative (1/6)

Nelle murature le deformazioni sono prodotte dall'applicazione dei carichi (effetti elastici), da variazioni di temperatura e dall'assorbimento di umidità (effetti anelastici).

Il comportamento elastico va inteso in senso peculiare nel caso di murature, soprattutto di murature storiche. Si ha infatti che:

- le curve sforzo-deformazione sono lineari solo nel caso di malte cementizie e comunque per valori bassi o moderati di tensione;
- quasi sempre si rilevano deformazioni residue alla rimozione del carico (per lo meno fra il primo ciclo e i cicli successivi);
- le deformazioni sotto carico (viscose) hanno notevole importanza.

Per murature moderne, eseguite con malte di composizione costante ed elementi di produzione regolare, si ha comportamento che può essere ricondotto all'ambito elastico o elasto-plastico.

Nell'ambito di comportamento elastico si può dare interpretazione tipica di un materiale bifasico:

$$E = E_b(\alpha + 1)/(\alpha + \beta)$$

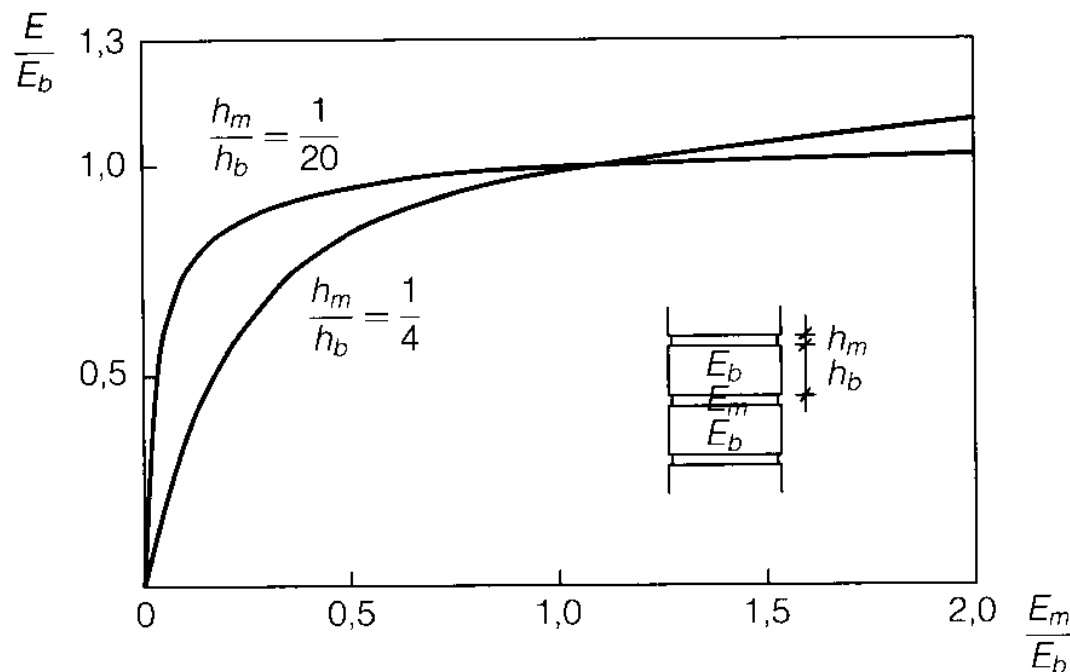
dove $\alpha = h_b/h_m$ è il rapporto fra spessore del mattone (h_b) e del letto di malta (h_m);

$\beta = E_b/E_m$ è il rapporto fra i moduli elastici del mattone (E_b) e del letto di malta (E_m).

L'espressione vale per murature con malte a elevato modulo elastico (malte cementizie) e soggetti a carichi medio - bassi, tali da produrre uno stato di confinamento poco sensibile.

Proprietà meccaniche della muratura: proprietà deformative (2/6)

Diagramma, in forma adimensionale, del modulo elastico della muratura in funzione del modulo elastico della malta, per diversi valore dello spessore giunto/mattone.



Modulo elastico della muratura, E , in funzione del modulo elastico della malta, E_m .
(Immagine tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Proprietà meccaniche della muratura: proprietà deformative (3/6)

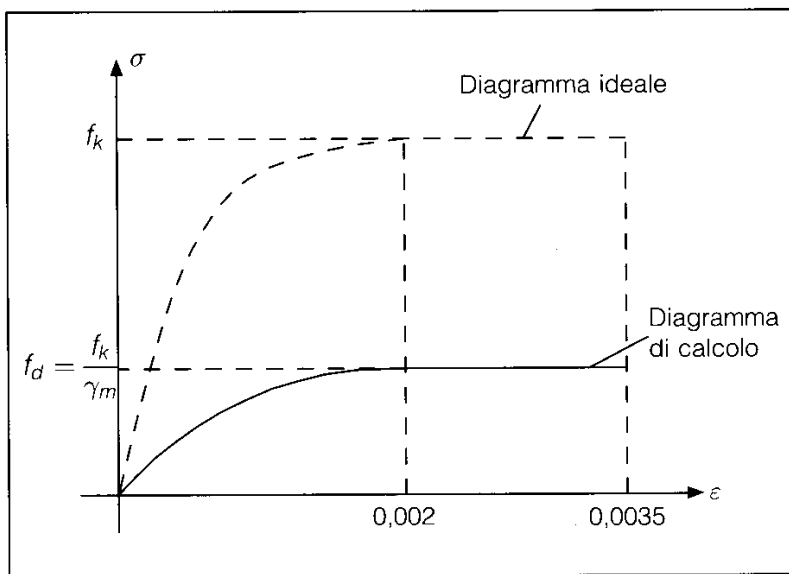
Controlli sperimentali della deformabilità della murature con tracciamento della curva sforzo - deformazione e ricerca della correlazione fra modulo elastico iniziale alla resistenza evidenziano per nuove murature che:

- Il modulo elastico varia in funzione del livello di carico diminuendo al crescere di questo;
- Le curve sforzo-deformazione presentano un tratto iniziale poco non-lineare cui segue un tratto in cui si ha marcato comportamento plastico: ne è stata proposta una modellazione a parabola;
- Il tratto iniziale corrisponde alla fase in cui la muratura è soggetta a carichi di esercizio; la fase plastica a sollecitazioni che la muratura non dovrebbe mai raggiungere nel corso della sua vita;
- Un'idealizzazione del comportamento ricorre a una rappresentazione mediante una spezzata bilatera;
- Il modulo elastico iniziale risulta correlato alla resistenza della muratura mediante un coefficiente di valore variabile nell'intervallo $400 \div 1000$.
- Misure di deformazione viscosa suggeriscono valori dell'ordine $\varepsilon_{c,\infty} = 2 \div 4 \varepsilon_{el}$, dove $t_{\infty} \sim 1$ anno.

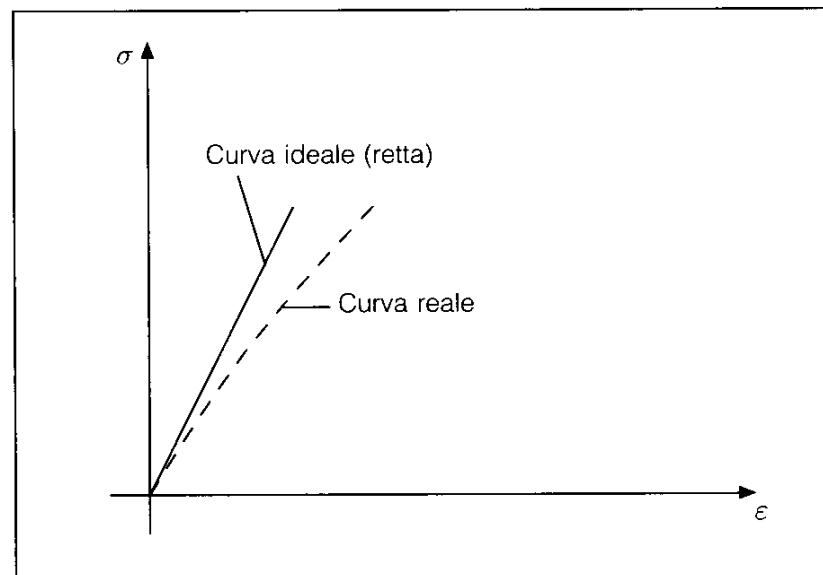
Proprietà meccaniche della muratura: proprietà deformative (4/6)

La Normativa Italiana e l'Eurocodice fanno riferimento a diagrammi sforzo-deformazione idealizzati, come il diagramma parabola-rettangolo (simile a quello del calcestruzzo), con l'ulteriore semplificazione in un diagramma rettangolare (bilatera).

L'Eurocodice evidenzia che per blocchi a fori grandi la rottura può essere di tipo fragile, senza fase plastica.



Relazione tensioni-deformazioni per il calcolo della muratura a flessione e compressione (fonte: Eurocodice).



Rottura fragile (per esempio in murature realizzate con blocchi a fori grandi).

(Immagini tratte da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Proprietà meccaniche della muratura: proprietà deformative (5/6)

Agli effetti del calcolo vengono utilizzati i moduli elastici entro intervalli di applicazione ben definiti.

Per l'Eurocodice il valore "nelle condizioni di carico di esercizio" è quello corrispondente a 1/3 del carico massimo sostenibile dalla muratura.

In alternativa si può assumere un modulo elastico secante $E = 1000 f_k$.

In ogni caso nei calcoli relativi allo stato limite di esercizio è raccomandato di applicare un coefficiente pari a 0.60 al valore del modulo elastico, per tenere conto di effetti di lungo termine e prevenire effetti indesiderati legati a una deformabilità della muratura maggiore di quella assunta per il calcolo.

La Normativa Italiana indica di assumere, in caso di determinazione sperimentale il valore del modulo elastico nell'intervallo fra 1/10 e 4/10 della tensione di rottura della muratura:

$$E = (0.4 f_k - 0.1 f_k) / (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$$

dove $\varepsilon_2 = \varepsilon (0.4 f_k)$; $\varepsilon_1 = \varepsilon (0.1 f_k)$;

oppure di assumere $E = 1000 f_k$

Per il modulo di elasticità tangenziale, G , sia la Normativa Italiana, sia l'Eurocodice suggeriscono di assumere:

$$G = 0.40 E$$

Per i dati relativi a deformazione viscosa, ritiro e dilatazione termica l'Eurocodice rinvia a un'apposita tabella.

Proprietà meccaniche della muratura: proprietà deformative (6/6)

Proprietà di deformazione della muratura non armata realizzata con malta ordinaria (tabella 3.8 dell'Eurocodice)

Tipologia dell'elemento murario	Coefficiente di deformazione viscosa finale ϕ_{∞} (v. nota 1)		Deformazione finale dovuta all'umidità o al ritiro (v. nota 2) mm/m		Coefficiente di dilatazione termica $10^{-6}/K$	
	Intervallo	Valore di calcolo	Intervallo	Valore di calcolo	Intervallo	Valore di calcolo
Laterizio	da 0,5 a 1,5	1	da -0,2 a + 1,0	(v. nota 3)	da 4 a 8	6
Silicato di calcio	da 1,0 a 2,0	1,5	da -0,4 a - 1,0	-0,2	da 7 a 11	9
Calcestruzzo normale e pietra squadrata	da 1,0 a 2,0	1,5	da -0,6 a - 0,1	-0,2	da 6 a 12	10
Calcestruzzo alleggerito	da 1,0 a 3,0	2,0	da -1,0 a - 0,2	-0,4 (v. nota 4) -0,2 (v. nota 5)	da 8 a 12	10
Calcestruzzo aerato in autoclave	da 1,0 a 2,5	1,5	da -0,4 a + 0,2	-0,2	da 7 a 9	8
Pietra naturale	(v. nota 6)	0	da -0,4 a + 0,7	+0,1	da 3 a 12	7

Note

1. Coefficiente di deformazione viscosa finale $\phi_{\infty} = \varepsilon_{C\infty} / \varepsilon_{el}$, dove $\varepsilon_{C\infty}$ è la deformazione finale dovuta alla deformazione viscosa e $\varepsilon_{el} = \sigma / E$.
2. Il valore finale di deformazione dovuta all'umidità o al ritiro indica un accorciamento se rappresentato con un valore negativo e un allungamento se rappresentato con un valore positivo.
3. I valori dipendono dalla tipologia del materiale applicato e non può essere indicato un unico valore di calcolo.
4. Il valore indicato riguarda gli aggregati di pomice e di argilla espansa.
5. I valori dati riguardano gli aggregati alleggeriti diversi dalla pomice e dall'argilla espansa.
6. Normalmente i valori sono molto bassi.

(Tabella tratta da Carbone *et al.*, *op. cit.*)

Riferimenti bibliografici e iconografici

- L. Boscotrecase, F. Piccarreta, *Edifici in muratura in zona sismica*, Flaccovio: Palermo, 2006.
- M. Como, *Statica delle costruzioni storiche in muratura. Archi, volte, cupole, architetture monumentali, edifici sotto carichi verticali e sotto sisma*, Aracne: Roma, 2010.
- I.V. Carbone, A. Fiore, G. Pistone, *Le costruzioni in muratura*, Hoepli: Milano, 2001.
- A.W. Hendry, P.B. Sinha, S.R. Davies *Progetto di strutture in muratura (II ed.)*, Pitagora: Bologna, 2002.
- F. Iacobelli, *Progetto e verifica delle costruzioni in muratura in zona sismica (IV ed.)*, EPC Libri: Roma, 2006.
- R. S. Olivito, *Statica e Stabilità delle Costruzioni Murarie*, Pitagora: Bologna, 2009².
- S. Sbacchis, *Elementi strutturali negli edifici in muratura*, Grafill: Palermo, 2001.