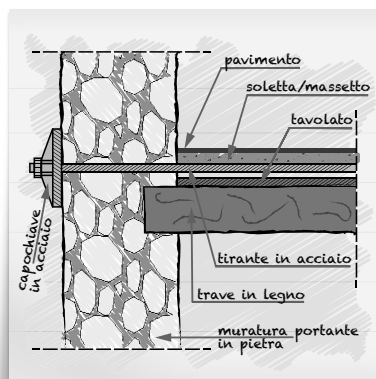


Giuliano Vecchi – Marco Giovannelli

CONSOLIDAMENTO STRUTTURE IN MURATURA

**METODI E TECNICHE DI INTERVENTO
PER EDIFICI ESISTENTI IN MURATURA PORTANTE**

AGGIORNATO ALL'ORDINANZA C.D.P.C. 20 FEBBRAIO 2013, N. 52
RELATIVA AI CONTRIBUTI PER GLI INTERVENTI DI PREVENZIONE DEL RISCHIO SISMICO



SOFTWARE INCLUSO

PRINCIPALI NORME DI RIFERIMENTO

Glossario (principali termini tecnico-normativi), **F.A.Q.** (domande e risposte sui principali argomenti),
Test iniziale (verifica della formazione di base), **Test finale** (verifica dei concetti analizzati)



GRAFILL

Giuliano Vecchi, Marco Giovannelli
CONSOLIDAMENTO STRUTTURE IN MURATURA

ISBN 13 978-88-8207-542-2
EAN 9 788882 075422

Manuali, 152
Prima edizione, maggio 2014

Vecchi, Giuliano <1972->
Consolidamento strutture in muratura / Giuliano Vecchi, Marco Giovannelli.
– Palermo : Grafill, 2014.
(Manuali ; 152)
ISBN 978-88-8207-542-2
1. Strutture in muratura – Consolidamento. I. Giovannelli,
Marco <1972->.
693.1 CDD-22 SBN Pa0266342
CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Il presente volume è **disponibile anche in versione eBook** (formato *.pdf) compatibile con **PC, Macintosh, Smartphone, Tablet, eReader**.

Per l'acquisto di eBook e software sono previsti pagamenti con conto corrente postale, bonifico bancario, carta di credito e paypal. Per i pagamenti con carta di credito e paypal è consentito il download immediato del prodotto acquistato.

Per maggiori informazioni inquadra con uno smartphone o un tablet il codice QR sottostante.



I lettori di codice QR sono disponibili gratuitamente su Play Store, App Store e Market Place.

© **GRAFILL S.r.l.**

Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo
Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313
Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail grafill@grafill.it

Finito di stampare nel mese di maggio 2014
presso **Officine Tipografiche Aiello & Provenzano S.r.l.** Via del Cavaliere, 93 – 90011 Bagheria (PA)

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

a Valeria e Lorenzo

INDICE

PREFAZIONE	p.	1
1. IL MATERIALE MURATURA	"	3
1.1. Introduzione.....	"	3
1.2. La classificazione delle tipologie murarie.....	"	3
1.3. Le caratteristiche meccaniche della muratura in genere.....	"	7
1.4. Le caratteristiche meccaniche delle murature esistenti secondo le NTC 2008 e relative circolari attuative.....	"	13
1.5. Conclusioni.....	"	18
2. CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE E MORFOLOGICHE DEGLI EDIFICI IN MURATURA	"	19
2.1. Introduzione.....	"	19
2.2. Edifici in muratura della prima classe.....	"	20
2.3. Edifici della seconda classe.....	"	30
2.3.1. Edifici della seconda classe con pareti ben ammorsate.....	"	37
2.3.2. Comportamento nel piano della parete.....	"	38
2.3. Edifici della terza classe.....	"	42
2.4. Conclusioni.....	"	46
3. I DISSESTI NEGLI EDIFICI ESISTENTI IN MURATURA	"	47
3.1. Introduzione.....	"	47
3.2. Lesioni da schiacciamento.....	"	47
3.3. Lesioni di distacco.....	"	53
3.4. Dissesti dovuti alle spinte.....	"	57
3.5. Dissesti dovuti a cedimenti in fondazione.....	"	59
3.6. Dissesti dovuti alle azioni sismiche.....	"	63
3.6.1. Meccanismi di I modo.....	"	63
3.6.2. Meccanismi di II modo.....	"	69
4. GLI INTERVENTI CLASSIFICABILI COME MIGLIORAMENTO O ADEGUAMENTO SISMICO	"	76
4.1. Introduzione.....	"	76
4.2. Miglioramento sismico.....	"	78
4.3. Adeguamento (o miglioramento) sismico ottenuto passando da un meccanismo di I modo ad uno di II modo.....	"	86

4.4.	Adeguamento sismico.....	p.	93
4.5.	Ulteriori interventi che possono consentire di raggiungere il miglioramento o l'adeguamento sismico di una struttura esistente.....	"	98
4.5.1.	Cambio dei carichi agenti da sollecitanti a resistenti	"	98
4.5.2.	Modifica della muratura portante ordinaria in muratura armata ..	"	99
4.5.3.	Inserimento di nuove strutture	"	99
4.5.4.	Incremento della capacità aggregante delle masse murarie	"	99
4.5.5.	Isolamento sismico alla base	"	100
4.6.	Conclusioni	"	100
5.	GLI INTERVENTI CLASSIFICABILI COME LOCALI	"	102
5.1.	Introduzione	"	102
5.2.	Inserimento di nuove strutture collegate all'esistente.....	"	103
5.3.	Apertura di nuovi vani nella muratura portante.....	"	105
5.4.	Rifacimento di solai di interpiano o di copertura con cordolo sommitale...	"	109
5.4.1.	Caso n. 1	"	114
5.4.2.	Caso n. 2.....	"	118
5.5.	Incatenamenti metallici.....	"	122
5.6.	Rifacimento architravi con profili metallici.....	"	125
5.7.	Realizzazione di balconi, gronde e sbalzi.....	"	127
5.8.	Perforazioni armate nelle croci di muro e scuci e cucì locale	"	128
5.9.	Conclusioni	"	129
6.	FONDI PER IL RISCHIO SISMICO	"	130
6.1.	Introduzione	"	130
6.2.	Ordinanza del C.D.P.C. 20 febbraio 2013, n. 52 (Contributi per gli interventi di prevenzione del rischio sismico per l'anno 2012).....	"	131
6.3.	Il calcolo del punteggio per la priorità di intervento sugli edifici privati	"	140
6.4.	Esempio pratico	"	141
6.5.	Conclusioni	"	142
	APPENDICE A – NATURA DEI TERREMOTI	"	144
	APPENDICE B – CLASSIFICAZIONE SISMICA STORICA	"	150
	APPENDICE C – PIANO RIGIDO E PIANO DEFORMABILE.....	"	157
	APPENDICE D – LA LEGGE DI HOOKE	"	163
	INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE ALLEGATO	"	166
	Introduzione	"	166
	Requisiti minimi hardware e software	"	166
	Download del software e richiesta della password di attivazione	"	166
	Installazione ed attivazione del software	"	167

PREFAZIONE

Il testo è rivolto a tutti coloro che vogliono approfondire la conoscenza degli edifici in muratura portante, tra cui certamente i professionisti del settore civile (ingegneri, architetti, geometri, periti edili ecc.) e nasce dalla volontà di due colleghi prima universitari e poi professionali che hanno maturato esperienza nel settore, e che hanno voluto rileggere in chiave critica il delicato e sempre più attuale argomento degli edifici esistenti in muratura portante. Il libro è stato concepito per fornire a chiunque le nozioni base per esaminare le caratteristiche costruttive delle varie tipologie di edifici (capitoli 1 e 2) e per esaminare e cercare di capire le possibili insorgenze di quadri fessurativi (capitolo 3). In particolare, con riferimento a questi ultimi, è stata focalizzata l'attenzione sulle varie tipologie di lesioni possibili, al fine di capire il motivo della loro presenza ed individuare il criterio più appropriato di intervento di consolidamento che si può eseguire sulla struttura.

Infine sono state esaminate le varie tipologie previste dalla norma vigente per intervento locale, miglioramento o adeguamento sismico, con lo scopo di cercare di capire quali siano i casi in cui lo stesso possa essere classificato come locale e non "globale", ovvero i casi in cui l'intervento strutturale comporti una sostanziale modifica del comportamento dell'edificio nei confronti delle azioni sismiche. Questa distinzione è molto importante, non solo dal lato analitico-computazionale, infatti gli interventi di miglioramento e adeguamento prevedono l'esecuzione dell'analisi sismica (lineare o non lineare) dell'intera struttura in oggetto, ma anche dal punto di vista dell'iter amministrativo, infatti per l'intervento classificato dal D.M. 14 gennaio 2008 come "locale" non è obbligatoria la redazione del collaudo statico (capitoli 4 e 5).

Infine viene dedicato un intero capitolo all'esame dell'Ordinanza del Capo del Dipartimento della Protezione Civile del 2014, che prevede lo stanziamento di fondi per la mitigazione del rischio sismico del patrimonio immobiliare esistente che include anche gli edifici privati.

Dopo il terremoto che ha colpito la Regione Abruzzo il 6 aprile 2009, è stato emanato il D.L. n. 39 del 28 aprile 2009, il quale, all'articolo 11, prevede un fondo per il finanziamento di interventi di mitigazione del rischio sismico su tutto il territorio nazionale.

La spesa autorizzata è di 44 milioni di euro per l'anno 2010, di 145,1 milioni di euro per il 2011, di 195,6 milioni di euro per ciascuno degli anni 2012, 2013 e 2014, di 145,1 milioni di euro per l'anno 2015 e di 44 milioni di euro per il 2016 per una cifra complessiva di quasi un miliardo di euro.

L'attuazione del fondo è affidata al Dipartimento della Protezione Civile ed è regolata attraverso ordinanze del Presidente del Consiglio dei Ministri, tra cui la prima è stata l'Ordinanza del Capo del Dipartimento della Protezione Civile n. 52 del 2013, pubblicata nella *Gazzetta Ufficiale* il 28 febbraio 2013, relativa ai fondi per l'annualità 2013, e poi la 2014, che regola le modalità di finanziamento degli interventi di mitigazione del rischio sismico riguardanti anche il finanziamento di interventi su edilizia privata.

Per l'accesso al contributo occorre presentare una domanda presso il Comune di appartenenza che ha redatto il relativo bando e dove devono essere indicate le caratteristiche dell'edificio e la tipologia di intervento che si chiede venga finanziato. Sulla base delle informazioni reperibili da tale documento, le Regioni stilano una graduatoria di priorità per l'erogazione dei finanziamenti. Nel caso in cui venga concesso il contributo, il beneficiario deve provvedere a far redigere un progetto di ristrutturazione, coerente con la richiesta presentata, entro il termine di **novanta giorni** per gli interventi di rafforzamento locale e di **centottanta giorni** per gli interventi di miglioramento sismico o demolizione e ricostruzione. La scelta della tipologia di intervento indicata nella domanda va fatta con molta cautela in quanto, qualora il progetto non risulti coerente con la richiesta, nel caso di intervento che aumenti la sicurezza della costruzione, la relativa maggiore spesa rispetto al contributo assegnato, rimane a carico del soggetto proponente, invece nel caso di intervento in diminuzione della sicurezza, la Regione procede alla revoca del contributo concesso ed alla cancellazione del soggetto dalla graduatoria.

Per la compilazione corretta della domanda è opportuno allora che il privato sia assistito da un professionista che abbia delle specifiche capacità che gli permettano di capire quale sia la tipologia più opportuna di intervento nell'edificio in oggetto, senza preliminarmente alcun tipo di indagine, ma solo a seguito di un esame visivo della struttura.

IL MATERIALE MURATURA

› 1.1. Introduzione

Il materiale “muratura” è sostanzialmente un materiale composito, o aggregato più o meno organizzato, di elementi resistenti lapidei tenuti insieme da un legante, la malta, in genere di calce o cementizia.

La muratura si può presentare in molte forme, tipologie e tecniche diverse che possono essere distinte in funzione di diversi aspetti:

- secondo il materiale lapideo utilizzato ed il tipo di malta;
- secondo la modalità di assemblaggio dei componenti;
- secondo l’epoca storica di realizzazione del manufatto;
- secondo l’area geografica di appartenenza (tutte le murature venivano realizzate con il materiale che era più facilmente reperibile nelle vicinanze della zona di realizzazione del manufatto).

Sulla base di tali criteri, si possono individuare una quantità elevata di tipologie murarie, pertanto è opportuno cercare di stabilire dei criteri che permettano di classificare le varie tipologie murarie in determinate categorie che abbiano delle caratteristiche comuni dal punto di vista delle proprietà meccaniche, al fine di creare una catalogazione che sia la più semplice possibile.

› 1.2. La classificazione delle tipologie murarie

Le prime classificazioni della muratura risalgono ai primi anni ’80, periodo in cui terremoti del Friuli e dell’Irpinia, risvegliarono l’interesse della comunità scientifica verso questo materiale importante.

In effetti fino ad allora, nonostante la muratura fosse uno dei più antichi materiali da costruzione, i principi dell’Ingegneria strutturale e quindi le normative tecniche che si andavano sviluppando non se ne sono occupate, dando più importanza all’acciaio ed al cemento armato, in quanto rispecchiano maggiormente i criteri della Scienza delle Costruzioni.

Una prima distinzione si basava principalmente su due elementi:

- il tipo di materiale lapideo utilizzato (pietra dura, pietra tenera e laterizi);
- la tecnologia di posa in opera degli elementi e la loro disposizione all’interno del paramento murario (irregolare, semi regolare, regolare).

Così facendo si ottennero circa una decina di tipologie murarie che contemplavano anche le murature moderne realizzate con blocchi di calcestruzzo pieni e semipieni, e blocchi di laterizi forati.

Quello che è interessante osservare è che per le murature, per così dire “antiche”, la classificazione può essere ricondotta comunque a tre tipologie:

- 1) **muratura irregolare**, costituita da elementi informi, che si possono presentare o come ciottoli di fiume, di piccole o medie dimensioni, levigati e con spigoli dalla forma de-

cisamente arrotondata (provenienti dalle alluvioni o da letti di torrenti e fiumi) o come scapoli di cava, scaglie, etc.;

- 2) **muratura sbazzata o semi-regolare** costituita da elementi sommariamente lavorati, dal taglio non perfettamente squadrato, che si presentano in forma pseudo-regolare;
- 3) **muratura regolare**, realizzata con elementi dal taglio regolare quasi perfettamente squadrato, quale viene consentito dal tufo e da talune pietre, nonché naturalmente dal laterizio.

Passando dalle murature irregolari a quelle più regolari, migliora il comportamento delle stesse nei confronti della resistenza alle azioni orizzontali sismiche, nonché le loro caratteristiche meccaniche.

Infatti la muratura di peggiore fattura, con elementi poco lavorati, molto spesso a spigoli arrotondati, o proprio con forma arrotondata, può produrre gli effetti riportati in figura 1.1, ossia in caso di evento sismico si può arrivare alla disgregazione del paramento murario che quindi può perdere la sua monoliticità (mentre per i soli carichi verticali questo di norma non succede).

Per evitare tale fenomeno in realtà, nonostante la fattura della muratura, potrebbe bastare la presenza di qualche collegamento trasversale, ed il muro, durante o appena dopo l'evento sismico, anche se crolla, può conservare la sua configurazione geometrica e monolitica.



Figura 1.1

Analizzando la sezione verticale di muri con diverso spessore, ma realizzati con pietre della stessa pezzatura si possono ottenere delle murature con diversi comportamenti. Con riferimento alla figura 1.2, si vede che nel caso del muro di spessore S1, le pietre prendono praticamente tutto lo spessore, quindi si ha una muratura sicuramente monolitica. Aumentando lo spessore a S2 o

S3, invece, ecco che il muro diventa a due paramenti, ottenendo una vera e propria muratura a sacco nel caso del muro di spessore maggiore (S3).

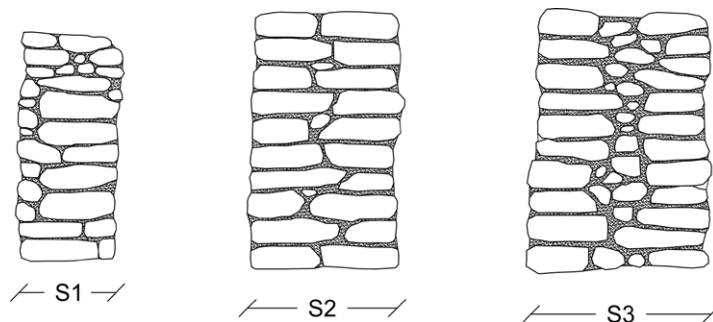


Figura 1.2

Questo significa che in uno stesso edificio, se si riscontrano muri di diverso spessore, si potrebbero avere murature con caratteristiche meccaniche diverse anche se sono realizzate con elementi lapidei della stessa fattura e dimensioni.

Un miglioramento si può sicuramente avere se sono presenti di tanto in tanto dei “*diatoni*”, ossia degli elementi di collegamento trasversale, oppure ancora meglio delle listature in mattoni pieni; infatti se i paramenti del muro sono ben collegati, esso conserva forma e monoliticità, ed ha sicuramente un comportamento migliore nei confronti delle azioni perpendicolari al suo piano.

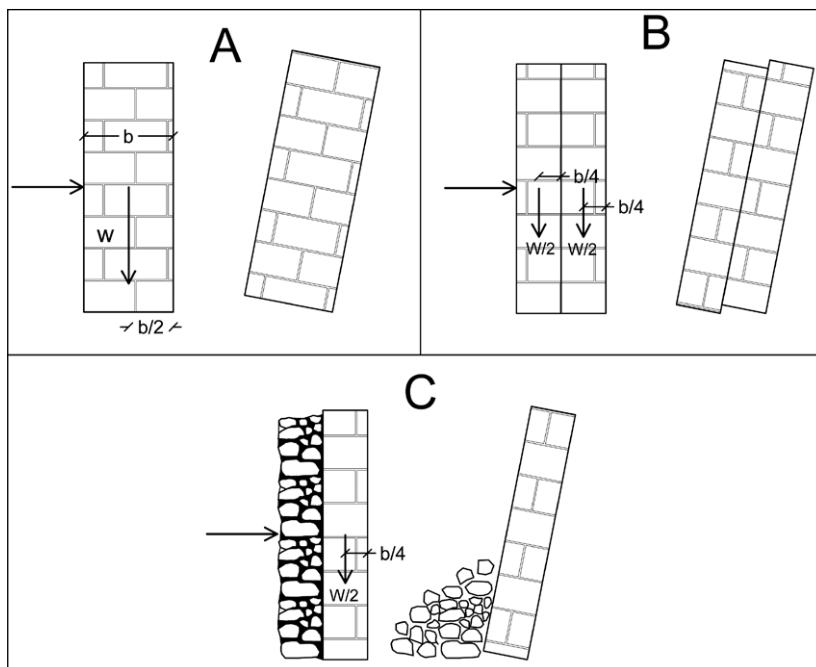


Figura 1.3

Nel caso A della figura 1.3, il muro si comporta come un corpo rigido e quindi si avrà il massimo del momento delle azioni stabilizzanti:

$$M_S = W \cdot \frac{b}{2}$$

Nel caso B, il muro si separa in due ed il momento stabilizzante diminuisce anche se il peso è lo stesso in quanto diminuisce il braccio:

$$M_S = 2 \cdot \frac{W}{2} \cdot \frac{b}{4} = W \cdot \frac{b}{4}$$

Se invece un paramento si sgretola, caso C, la situazione peggiora ancora di più:

$$M_S = \frac{W}{2} \cdot \frac{b}{4} = W \cdot \frac{b}{8}$$

Quindi passando dal caso A al caso C, il momento stabilizzante si riduce di $\frac{1}{4}$.

La cosa che maggiormente viene influenzata dalla qualità e tessitura muraria è la resistenza alle azioni ortogonali al piano della parete.

In linea generale lavorando con pietre tenere (tufo, calcarenite) è più facile ottenere dei pezzi squadrati, mentre con le pietre dure i conci avranno una forma più arrotondata perché sono meno lavorabili.

In questo secondo caso, se il muro è costituito da pietre piccole ed irregolari, negli angoli di norma venivano usati dei pezzi speciali con pezzatura maggiore e che soprattutto erano squadrati per permettere la migliore connessione possibile tra muri ortogonali.

Attualmente, la classificazione che è riportata sulle norme tecniche per le costruzioni D.M. 14 gennaio 2008, o meglio sulla sua Circolare esplicativa n. 617/2009, come abbiamo già visto per le altre in precedenza, si riferisce sostanzialmente al tipo di elementi lapidei utilizzati, ed in particolare al livello di lavorazione degli stessi, nonché alla cura della loro posa in opera (si parla infatti di muratura disordinata o con buona tessitura):

	Tipologia di muratura
A	Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)
B	Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno
C	Muratura in pietre a spacco con buona tessitura
D	Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)
E	Muratura a blocchi lapidei squadrati
F	Muratura in mattoni pieni e malta di calce
G	Muratura in mattoni semipieni e malta cementizia (es.: doppio UNI foratura $\leq 40\%$)
H	Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura $< 45\%$)
I	Muratura in blocchi laterizi semipieni con giunti verticali a secco (perc. foratura $< 45\%$)
L	Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)
M	Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (perc. foratura $< 45\%$)

La tabella precedente si può idealmente dividere in due parti:

- 1) le categorie da A ad F si riferiscono a murature più antiche;
- 2) le categorie da G ad M sono murature nate nell'ultimo secolo.

Per le murature antiche abbiamo quindi sei tipologie che si possono ridurre anche a 3 (A, B e C) inglobando le D, E ed F nella categoria C (passando da A a C si hanno delle murature sempre migliori):

- nella categoria A rientrano le **Murature Irregolari**, ossia quelle realizzate con pietre piccole (in relazione allo spessore del muro), a sacco e male intessute;
- nella categoria B rientrano le **Murature Semi-Regolari**, che sono quelle realizzate con conci sbozzati, a sacco con diatoni, ben intessute;
- nella categoria C rientrano le **Murature Regolari**, realizzate con pietra a spacco e pietre tenere, con le quali posso ottenere conci più regolari, e buona tessitura.

In sostanza, quando ci si trova di fronte ad una muratura antica, dobbiamo cercare di capire se la stessa è riconducibile ad una muratura irregolare, semi regolare o regolare, perché questa caratteristica influenza direttamente la resistenza a compressione e a taglio.

1.3. Le caratteristiche meccaniche della muratura in genere

La muratura è costituita da due componenti, gli elementi lapidei e la malta, con la caratteristica che qualunque sia la sua tipologia, regolare o irregolare, ha sempre una resistenza a compressione di gran lunga maggiore della resistenza a trazione ed a taglio.

La resistenza a trazione è bassa ma non nulla, comunque nelle applicazioni numeriche conviene sempre trascurarla. Questo fatto, osservando le tipologie strutturali adottate nel tempo per le costruzioni in muratura, sembra noto da sempre, infatti sono sempre disposte in modo che la sollecitazione dominante sia quella di compressione.

La costruzione in muratura è sempre costituita da elementi strutturali molto estesi, collegati tra loro a formare delle strutture scatolari, in modo che la scarsa resistenza a trazione è aiutata dal peso della muratura stessa adottando una sorta di precompressione naturale (un muro resiste a trazione fino a quando la forza di trazione non supera il peso del muro).

La conseguenza di ciò è che in un edificio in muratura, quasi tutte le pareti devono essere portanti e solo poche rimanenti possono essere costituite da tramezzi. Ciò differenzia notevolmente una struttura moderna da una struttura in muratura, infatti in una costruzione in muratura gran parte del peso è dovuto alla struttura, mentre in una struttura intelaiata in calcestruzzo armato o in acciaio il peso proprio è ben poca cosa rispetto ai carichi portati (permanententi non strutturali e carichi variabili).

La conseguenza diretta della non resistenza a trazione, è che necessariamente la curva delle pressioni deve essere interna alla struttura per far sì che ci sia ovunque una sollecitazione di compressione, campo in cui la muratura risponde in genere in modo soddisfacente.

Vediamo allora da cosa è influenzata la resistenza a compressione della muratura; è un materiale formato da due elementi pertanto iniziamo preliminarmente ad occuparci della resistenza dei suoi componenti, ossia degli elementi lapidei e della malta, poi vedremo come combinare queste due resistenze per ottenere quella della muratura.

La resistenza della pietra si può valutare facendo delle prove di compressione su provini ricavati dalla roccia, il risultato è riportato nella sottostante tabella in cui si vede che la resistenza delle varie pietre da costruzione è molto varia, infatti si passa dai 70 kg/cm² del tufo agli oltre 3.000 kg/cm² dei basalti; i due valori differiscono quindi di quasi 2 ordini di grandezza (10²).

Rocce	Resistenza a compressione f_c (MPa)	Resistenza a trazione f_t (MPa)	f_t / f_c
<i>Graniti</i>	163	3,7	1/40
<i>Porfidi</i>	191	6	1/30
<i>Trachiti</i>	150	3,6	1/40
<i>Tufi</i>	7	0,8	1/10
<i>Calcari</i>	84	5	1/20
<i>Dolomie</i>	110	2,1	1/50
<i>Arenarie</i>	79	1,9	1/40
<i>Marmo</i>	111	4	1/30
<i>Serpentino</i>	156	8	1/20
<i>Basalti</i>	324	8	1/40

Se guardiamo invece la resistenza a trazione si nota che la variabilità si attenua moltissimo, infatti per le rocce più tenere il rapporto tra la resistenza a trazione e quella a compressione è circa un decimo; man mano che aumenta la resistenza a compressione il rapporto si abbassa fino ad arrivare ad un cinquantesimo per la pietra più resistente a compressione. Non esiste quindi una proporzionalità diretta tra la resistenza a compressione e quella a trazione.

Passiamo ora alla malta; il D.M. 14 gennaio 2008 prevede che le prestazioni meccaniche di una malta siano definite mediante la sua resistenza media a compressione f_m . La categoria di una malta è definita da una sigla costituita dalla lettera M seguita da un numero che indica la resistenza f_m espressa in MPa. In particolare sono previste diverse classi di resistenza da M2,5 a M20. Si passa da malte cementizie con resistenza di 20 Mpa (200 kg/cm²) a malte di calce con resistenza a compressione di 2,5 MPa (25 kg/cm²).

Ovviamente tutto questo è riferito a malte nuove, questo significa che un edificio nuovo in muratura non può essere costruito con una malta con resistenza inferiore a 25 kg/cm².

Se osserviamo di malte esistenti o “antiche” si può tranquillamente asserire che hanno una resistenza inferiore a 2,5 MPa, in quanto sono malte di calce idraulica o pozzolanica, con resistenza media a compressione che può variare tra 10 e 20 kg/cm².

Vediamo ora come si ottiene la resistenza a compressione della muratura come materiale composito, partendo da quella dei suoi componenti, tenendo conto che sono state messe a punto delle teorie che si basano sulle osservazioni qualitative di quello che accade nella realtà. Alla base di queste formulazioni ci sono le ipotesi di comportamento lineare dei materiali e di “perfetta aderenza” tra mattone e malta.

A livello qualitativo, con riferimento al diagramma di figura 1.4, si vede che la muratura ha un comportamento intermedio tra quello degli elementi e quello della malta. Sappiamo inoltre che quando la muratura si rompe a compressione, si creano delle fessure verticali, ossia nella stessa direzione del carico in quanto nascono nella direzione ortogonale a quella del carico, delle tensioni di trazione. Fissiamo l’attenzione per semplicità su una muratura di mattoni.

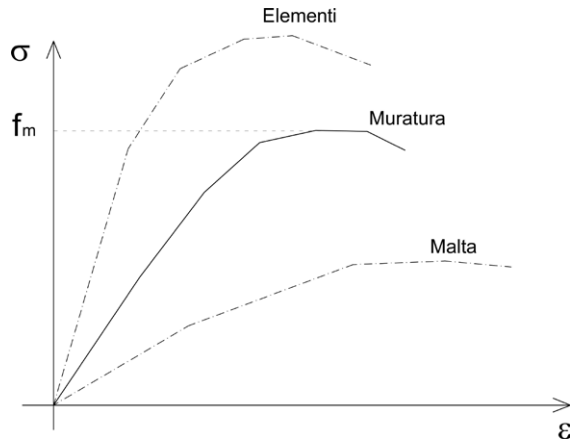


Figura 1.4

Le tensioni di trazione nella direzione ortogonale al carico nascono a causa delle interazioni tra la malta ed il mattone. Queste interazioni sono dovute al fatto che la malta ha una deformabilità maggiore di quella dei blocchi. Se la malta fosse libera di scorrere su questi, tenderebbe ad avere delle deformazioni orizzontali maggiori per effetto del minore modulo elastico e del diverso coefficiente di Poisson (Fig. 1.5).

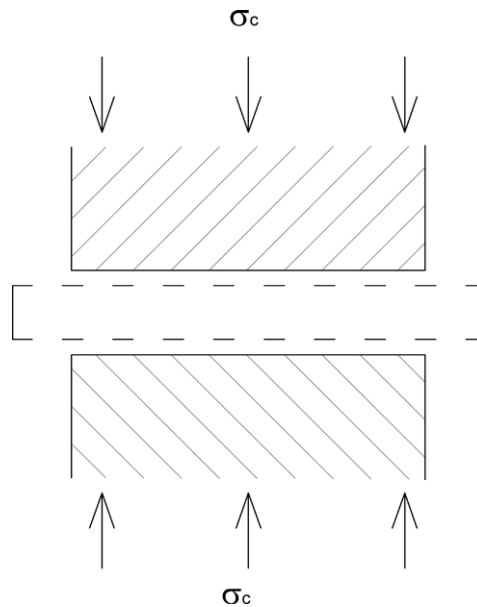


Figura 1.5

Queste deformazioni sono però impedito dall'attrito tra malta e blocchi che si manifestano con tensioni tangenziali all'interfaccia malta-blocco che ripristinano la congruenza delle defor-

mazioni tra i materiali (Fig. 1.6). Queste tensioni tangenziali risultano essere tensioni orizzontali di compressione nella malta (che ne incrementano la resistenza a compressione in quanto si creano per la malta delle azioni di confinamento) e tensioni orizzontali di trazione sui blocchi (che ne diminuiscono la resistenza a compressione).

Questo spiega il motivo per il quale la muratura ha una resistenza intermedia tra malta e blocchi.

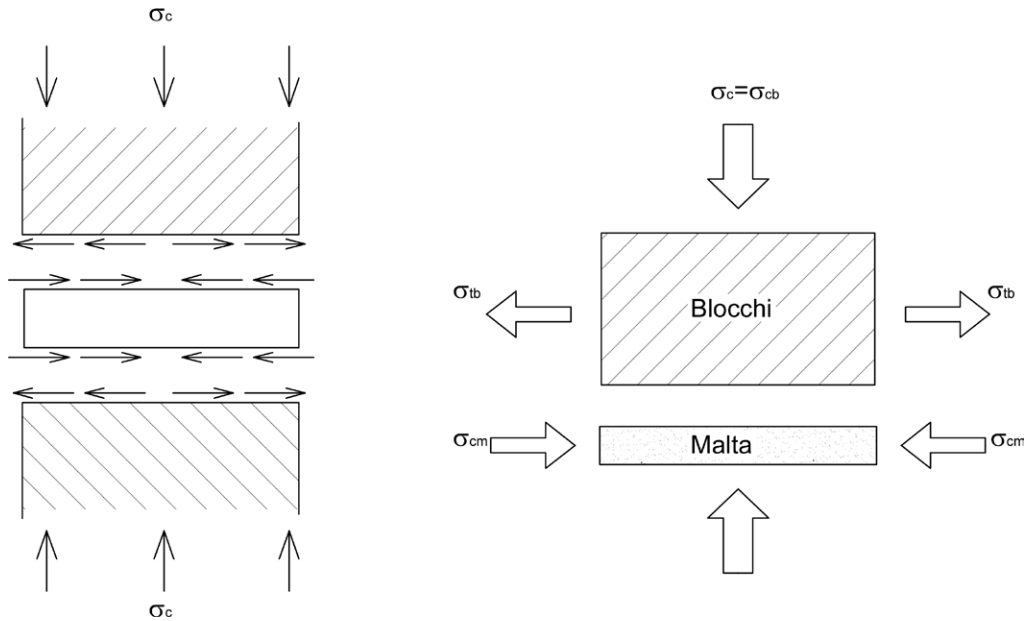


Figura 1.6

Sulla base di quanto detto in precedenza, si può ricavare una relazione che esprime il valore della tensione di trazione sui blocchi e che dipende dal rapporto tra i moduli elastici, dai coefficienti di Poisson e dal rapporto tra gli spessori dei blocchi e del giunto di malta. In particolare notiamo che maggiore è lo spessore della malta, maggiore sarà la trazione sui blocchi.

Queste formulazioni vengono proposte al solo scopo di far capire quali sono i parametri che influenzano la resistenza a compressione della muratura e per trarre, come verrà proposto nel seguito, delle conclusioni a livello qualitativo.

$$\sigma_{tb} = \frac{\alpha(\nu_m - \beta\nu_b)}{1 + \alpha\beta - \nu_m - \alpha\beta\nu_b} \sigma_{cb}$$

Dove:

$\alpha = t_m/t_b$ è il rapporto tra lo spessore del giunto di malta t_m e lo spessore del blocco t_b ;

$\beta = E_m/E_b$ è il rapporto tra i moduli elastici della malta E_m e dei blocchi E_b ;

ν_m è coefficiente di Poisson della malta;

ν_b è coefficiente di Poisson dei blocchi.

A questo punto si fissano dei criteri di resistenza per i blocchi e per la malta, che tengano conto del confinamento, nel caso della malta, e della presenza della trazione in direzione orizzontale nel caso dei blocchi (non siamo in condizioni di compressione monoassiale).

Per i blocchi

$$\frac{\sigma_{cb}}{f_{cb}} + \frac{\sigma_{tb}}{\lambda f_{bc}} \leq 1$$

Per la malta

$$\frac{\sigma_c}{f_{mc}} - 4,1 \frac{\sigma_{cm}}{f_{mc}} \leq 1$$

Dove:

- f_{bc} è la resistenza a compressione dei blocchi;
- $\lambda f_{bc} = f_{bt}$ è la resistenza a trazione dei blocchi espressa come percentuale di quella a compressione;
- f_{mc} è la resistenza a compressione della malta.

Combinando i due criteri di rottura si arriva ad una formulazione che esprime la resistenza a compressione della muratura tenendo conto di tutti i parametri in gioco.

L'Eurocodice 6 propone una formulazione semi empirica della resistenza a compressione della muratura, in quanto questa è influenzata da vari fattori empirici come i giunti verticali, la tessitura degli elementi, l'esecuzione della malta e la qualità dei giunti.

$$f_k = K f_b^{0,65} f_m^{0,25}$$

Dove:

- f_k è la resistenza a compressione della muratura;
- f_b è la resistenza a compressione dei blocchi in MPa;
- f_m è la resistenza a compressione della malta in MPa;
- K è la costante tabulata in funzione del tipo di blocchi.

Si possono quindi trarre delle conclusioni da queste teorie che abbiamo esposto in modo qualitativo:

- la resistenza a compressione della muratura aumenta all'aumentare della resistenza dei componenti, ma in modo non proporzionale: se raddoppia la resistenza della malta non raddoppia la resistenza della muratura;
- se la malta è buona, l'aumento di resistenza degli elementi fa aumentare velocemente la resistenza della muratura, cosa che non succede invece con malta scadente;
- la resistenza della muratura aumenta molto più lentamente all'aumentare della resistenza della malta, a parità di resistenza degli elementi;

- la resistenza della muratura diminuisce all'aumentare della dimensione dei giunti a causa dell'aumentare delle tensioni di confinamento, e questo è tanto più vero quanto più scadente è la malta.

La formulazione riportata nell'Eurocodice 6 tiene conto proprio di questi fattori mentre nella norma italiana al posto della formulazione matematica c'è una tabella che rispecchia esattamente quanto illustrato sino ad ora.

Resistenza caratteristica a compressione f_{bk} dell'elemento	Tipo di malta			
	M15	M10	M5	M2,5
2	1	1	1	1
3	2.2	2.2	2.2	2
5	3.5	3.4	3.3	3
7.5	5	4.5	4.1	3.5
10	6.2	5.3	4.7	4.1
15	8.2	6.7	6	5.1
20	9.7	8	7	6.1
30	12	10	8.6	7.2
≥ 40	14.3	12	10.4	/

Tabella estratta dalle NTC 2008 e relativa ai valori di f_k per murature in elementi naturali (valori in N/mm²)

Guardando la tabella per righe, se prendo degli elementi scadenti (2, 3, 5 MPa), qualsiasi tipo di malta usi come legante, non ho incrementi significativi di resistenza della muratura. Solo se ho degli elementi lapidei buoni (> 7.5 MPa) allora la resistenza della malta influenza la resistenza della muratura in modo sostanziale.

Guardando la tabella per colonne invece vediamo che se la malta è buona (M15), aumentando la resistenza dell'elemento passo da 1 a 12 MPa, mentre se la malta è scadente M2.5, passo da 1 a 7 MPa, con malta scadente ho una variazione minore della resistenza della muratura.

Quindi per una muratura nuova, (la tabella si riferisce a murature nuove) a seconda della resistenza degli elementi e della malta posso andare da un minimo di resistenza di 1 MPa, ad un massimo di 14,3 MPa.

Prendendo come riferimento la stessa tabella per le murature esistenti, considerando che la malta sarà sicuramente scadente (per edifici esistenti "antichi" la malta usata sarà sicuramente una malta di calce idraulica o pozzolanica), avremo delle resistenze a compressione della malta di circa 1-2 MPa, di conseguenza si avranno delle variazioni di resistenza della muratura molto contenute abbondantemente comprese tra 1 e 5 MPa.

Con degli elementi lapidei che hanno una resistenza compresa tra i 5 e i 10 MPa, la resistenza della muratura sarà compresa tra 3 e 4 MPa (naturalmente si parla in questo caso di resistenze caratteristiche che sono circa il 70% delle resistenze medie). Tutto questo per dire che il range di variazione della resistenza a compressione delle murature esistenti è molto limitato.

Se guardiamo la resistenza a taglio le differenze sono ancora più attenuate, infatti con elementi di media resistenza inferiore a 15 MPa, possiamo ottenere solo due valori di resistenza a taglio in assenza di carichi verticali (0,1 e 0,2 MPa). Solo con elementi di resistenza >15 MPa e malte di resistenza > 10 MPa posso arrivare a 0,3 MPa.

Tipo di elemento resistente	Resistenza caratteristica a compressione f_{bk} dell'elemento	Classe di malta	f_{vk0} (N/mm ²)
Laterizio pieno o semipieno	$f_{bk} > 15$	M10 ≤ M ≤ M20	0.3
	$7.5 < f_{bk} \leq 15$	M5 ≤ M ≤ M10	0.2
	$f_{bk} \leq 7.5$	M2.5 ≤ M ≤ M5	0.1
Calcestruzzo; Silicato di calcio; Cemento autoclavato; Pietra naturale squadrata	$f_{bk} > 15$	M10 ≤ M ≤ M20	0.2
	$7.5 < f_{bk} \leq 15$	M5 ≤ M ≤ M10	0.15
	$f_{bk} \leq 7.5$	M2.5 ≤ M ≤ M5	0.1

Tabella estratta dalle NTC 2008 e relativa ai valori di resistenza caratteristica a taglio in assenza di tensioni normali f_{vk0} (valori in N/mm²)

Prendendo come riferimento questa tabella anche per le murature esistenti, così come abbiamo fatto per la resistenza a compressione, considerando la scarsa resistenza della malta, possiamo intuire che per le murature si hanno dei valori di resistenza al taglio sicuramente inferiori a 0,1 Mpa (1 kg/cm²).

1.4. Le caratteristiche meccaniche delle murature esistenti secondo le NTC 2008 e relative circolari attuative

Per conoscere la resistenza a compressione della muratura di un edificio esistente si potrebbe decidere di studiarla nel dettaglio, ad esempio si può estrarre una pietra ed eseguire delle prove di compressione, prendere dei campioni di malta per ricavare dei provini (anche se questo di norma non è facilmente realizzabile in quanto non si riuscirà mai a trovare una quantità di malta sufficiente per realizzare un provino); meglio sarebbe se possibile, prendere un campione abbastanza grande di muro per eseguire su di esso delle prove di resistenza a compressione; tale metodo potrebbe essere il più opportuno in quanto si troverebbe la resistenza della muratura e non delle singole pietre o della malta.

Il problema però è che per avere un campione di muro che sia significativo della tessitura muraria, questo dovrebbe avere delle dimensioni dipendenti dalle dimensioni degli elementi lapidei, ed in generale non dovrebbero essere inferiori ad 1 m per 1 m.

Tutto ciò comporta enormi difficoltà tecniche, oltre al fatto che si creerebbe un danno significativo alla struttura portante.

Inoltre, per quanto sia grande il numero di campioni che potrebbero essere prelevati, questi non potranno mai essere completamente rappresentativi di tutto l'edificio, anche perché possono esserci rilevanti variabilità di resistenza da zona a zona. In generale ed in teoria tale tecnica è la migliore ma probabilmente va adottata per determinati casi specifici, potendo invece nella maggior parte dei casi, riferirsi ai valori dei parametri meccanici che la norma stessa, nella parte specifica della C.M. n. 617/2009 – Tab. C8A.2.1, indica come significativi.

Tipologia di muratura	f_m	t_0	E	G	w (kN/m ³)
	(N/cm ²)	(N/cm ²)	(N/mm ²)	(N/mm)	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche irregolari)	min-max	min-max	min-max	min-max	19
	100 180	2.0 3.2	690 1050	230 350	

segue »

Tipologia di muratura	f_m	t_0	E	G	w (kN/m ³)
	(N/cm ²)	(N/cm ²)	(N/mm ²)	(N/mm)	
	min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200	3.5	1020	340	20
	300	5.1	1440	480	
Muratura in pietrame a spacco con buona tessitura	260	5.6	1500	500	21
	380	7.4	1980	660	
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140	2.8	900	300	16
	240	4.2	1260	420	
Muratura a blocchi lapidei squadrati	600	9.0	2400	780	22
	800	12.0	3200	940	
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240	6.0	1200	400	18
	400	9.2	1800	600	
Muratura in mattoni semipieni e malta cementizia (es. doppio UNI foratura ≤ 40%)	500	24	3500	875	15
	800	32	5600	1400	
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. di foratura < 45%)	400	30	3600	1080	12
	600	40	5400	1620	
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. di foratura < 45%)	300	10	2700	810	11
	400	13	3600	1080	
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. di foratura tra 45% e 65%)	150	9.5	1200	300	12
	200	12.5	1600	400	
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300	18	2400	600	14
	440	24	3520	880	

Tabella estratta dalle NTC 2008 relativa ai valori di riferimento dei parametri meccanici (minimi e massimi) e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura, riferiti alle seguenti condizioni: malta di caratteristiche scarse, assenza di ricorsi (listature), paramenti semplicemente accostati o mal collegati, muratura non consolidata, tessitura (nel caso di elementi regolari) a regola d'arte; f_m = resistenza media a compressione della muratura, t_0 = resistenza media a taglio della muratura, E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio della muratura.

Osservando le prime 4 tipologie murarie, che poi di fatto sono in generale le più comuni per gli edifici esistenti in muratura, si ritrovano dei valori coerenti con quanto detto in precedenza, ovvero ci sono murature con resistenze a compressione che vanno da un minimo di 1 MPa ad un massimo di 3,8 MPa (da 10 a 38 kg/cm²), mentre le resistenze a taglio sono sempre inferiori a 0,1 MPa (1 kg/cm²). In realtà, nelle applicazioni numeriche, questi valori vanno corretti con opportuni coefficienti, nel caso in cui ricorrano le condizioni indicate nella seguente tabella:

Tipologia di muratura	Malta buona	Giunti sottili (< 10 mm)	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Nucleo scadente e/o ampio	Iniezione di miscele leganti	Intonaco armato*
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche irregolari)	1.5	–	1.3	1.5	0.9	2	2.5

segue »

Tipologia di muratura	Malta buona	Giunti sottili (< 10 mm)	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Nucleo scadente e/o ampio	Iniezione di miscele leganti	Intonaco armato*
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	1.4	1.2	1.2	1.5	0.8	1.7	2
Muratura in pietrame a spacco con buona tessitura	1.3	–	1.1	1.3	0.8	1.5	1.5
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1.5	1.5	–	1.5	0.9	1.7	2
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1.2	1.2	–	1.2	0.7	1.2	1.2
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	1.5	1.5	–	1.3	0.7	1.5	1.5
<i>* Valori da ridurre convenientemente nel caso di pareti di notevole spessore (p. es. > 70 cm)</i>							

Tabella estratta dalle NTC 2008 relativa ai coefficienti correttivi dei parametri meccanici da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone o ottime; giunti sottili; ricorsi o listature; sistematiche connessioni trasversali; nucleo interno particolarmente scadente e/o ampio; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato.

Anche in questo caso, coerentemente con quanto esposto in precedenza, si osserva che:

- nel caso di malta buona si ha un incremento della resistenza (ma è difficile ricadere in questo caso!);
- nel caso di giunti sottili si ha un incremento di resistenza in quanto diminuiscono le tensioni di confinamento sulla malta e di conseguenza diminuisce la trazione sui blocchi;
- la presenza di ricorsi, listature o connessione trasversale incrementa la resistenza in quanto migliora la regolarità e la monoliticità della muratura.

Come si vede dalla tabella C8.A.2.1 della C.M. n. 617/2009, per ogni tipologia di muratura vengono forniti due valori delle sue caratteristiche meccaniche; la scelta del valore da usare nel calcolo computazionale dipende dal livello di conoscenza raggiunto per la struttura in esame, in particolare (vedi Circolare n. 617/2009, cap. C8A.1.A.4):

- nel caso di conoscenza limitata, LC1: si adottano i valori minimi degli intervalli riportati in tabella, adottando un fattore di confidenza $FC = 1.35$;
- nel caso di conoscenza adeguata, LC2: si adottano i valori medi degli intervalli riportati in tabella, adottando un fattore di confidenza $FC = 1.20$;
- nel caso di conoscenza accurata, LC3: si adottano dei valori che sono funzione del numero di valori sperimentali che si hanno a disposizione, con un fattore di confidenza $FC = 1.0$, ossia:
 - caso a), nel caso siano disponibili tre o più valori sperimentali di resistenza si prende la media dei risultati delle prove;
 - caso b), nel caso siano disponibili due valori sperimentali di resistenza e se il valore medio delle resistenze è compreso nell'intervallo riportato nella Tabella C8A.2.1 per la tipologia muraria in considerazione si assumerà il valore medio dell'intervallo, se