IQM (INDICE DI QUALITÀ MURARIA): DEFINIZIONE E LINEE GUIDA PER LA COMPILAZIONE DELLA SCHEDA

(A. Borri, A. De Maria)

1. Introduzione ed obiettivi del lavoro

Nel presente lavoro vengono fornite le indicazioni per valutare la qualità di una tipologia muraria attraverso il metodo IQM (Indice di Qualità Muraria) proposto dagli autori (Borri, De Maria, 2001). Tale indice è distinto in base alla possibile direzione dell'azione sollecitante il generico pannello murario. Dunque, per ciascuna tipologia si avranno tre indici di qualità muraria: IQM per azioni verticali, IQM per azioni orizzontali fuori piano ed IQM per azioni orizzontali nel piano.
Nella valutazione dell'IQM entrano in gioco alcuni parametri caratteristici della corretta ed efficace messa in opera della muratura: i cosiddetti parametri della "regola dell'arte". Tramite l'osservazione della muratura viene infatti valutato il grado di rispetto di ogni parametro della regola dell'arte sulla base di alcune regole che saranno definite nel seguito.
Il risultato finale è così costituito da tre valori, variabili fra 0 e 10, associati alla tipologia muraria e dipendenti dalla direzione dell'azione sollecitante.
A ciascuno di questi valori verrà poi associata una "categoria" di appartenenza della muratura – A, B o C: ad una muratura di categoria A corrisponde un buon comportamento strutturale; ad una muratura di categoria B corrisponde un comportamento di media qualità; una muratura in categoria C manifesta un comportamento insoddisfacente di fronte alle sollecitazioni ipotizzate.

2. Giudizio sulla qualità della muratura

In questo capitolo si individuano i fattori che costituiscono la "regola dell'arte" nell'ambito delle costruzioni di muratura. Successivamente saranno indicati alcuni semplici criteri per verificare, caso per caso, la presenza, la presenza parziale o l'assenza dei parametri della regola dell'arte. Sarà poi valutata la risposta di un pannello murario ad una serie di azioni sollecitanti e si studierà, per ogni azione, come varia la risposta di tale pannello a seconda della presenza, della parziale presenza o dell'assenza dei vari parametri della regola dell'arte, e quindi in funzione della tipologia della muratura. Si potrà, in tal modo, individuare quali sono i parametri della regola dell'arte che, se presenti, garantiscono una buona qualità della muratura. Si perverrà, infine, ad un giudizio sintetico della qualità muraria per ogni tipologia muraria e per ogni tipo di azione cui il pannello è sottoposto.

2.1. Ipotesi di base

L'IQM viene valutato facendo riferimento al generico elemento murario verticale (un pannello). Tale elemento viene considerato sottoposto a diversi tipi di azione classificabili in tre categorie:
Carichi verticali. Fra di essi si hanno la forza verticale concentrata (ad esempio quella dovuta ad una trave infilata nella muratura) e la forza verticale distribuita sulla faccia superiore del pannello (ad esempio quella dovuta ad un solaio o ad una parete sovrastante).
Azioni orizzontali che impegnano il pannello murario nel suo piano medio. Fra di esse si ricordano le azioni sismiche rappresentate da una forza orizzontale complanare al pannello e posta sulla sua sommità. Solitamente tali azioni sono dovute ai terremoti e riescono ad impegnare i pannelli murari in questa direzione solo se la concezione globale dell'edificio è scatolare.
Azioni che impegnano il pannello murario ortogonalmente al suo piano medio. Si tratta di sollecitazioni dovute a carichi eccentrici (es. il momento flettente dovuto a solai eccentrici

appoggiati sul bordo della parete) ma, più spesso e più pericolosamente, si tratta di sollecitazioni dovute al sisma. Fra esse si ricordano: una forza orizzontale (concentrata o distribuita) agente in sommità del pannello e ad esso ortogonale; un momento flettente rappresentato da un vettore verticale (responsabile del cosiddetto "effetto arco" o flessione orizzontale della parete); un momento flettente rappresentato da un vettore orizzontale (responsabile della flessione verticale della parete).
I parametri della regola dell'arte influiscono in maniera diversa sulla risposta del muro a seconda del tipo di azione che sollecita il pannello. Per tale motivo appare opportuno studiare separatamente i tre casi.

2.2. La "regola dell'arte"

La "regola dell'arte" è l'insieme degli accorgimenti costruttivi che, se eseguiti durante la costruzione di un muro, ne garantiscono il buon comportamento e ne assicurano la compattezza ed il monolitismo. Essa deriva da una pratica costruttiva millenaria e dall'osservazione diretta del comportamento delle murature sia in fase statica che sotto sisma ed è codificata nei manuali di epoca antica e premoderna[1]. Nel seguito si darà una sintetica descrizione degli elementi che, tutti insieme, definiscono la regola dell'arte.
Gli accorgimenti costruttivi che saranno presi in considerazione, e che nel loro insieme costituiscono la regola dell'arte, sono di seguito elencati.

- Malta di buona qualità / efficace contatto fra elementi / zeppe. Questo requisito, necessario per trasmettere e ripartire le azioni fra le pietre in maniera uniforme e per portare le forze fino al terreno, si ottiene o per contatto diretto fra elementi squadrati (es. opus quadratum) o tramite la malta (è questa la maggior parte dei casi) o, per muri irregolari con malta degradata, grazie a pietre di dimensione minore inserite nei giunti, le cosiddette "zeppe". La malta oltre a regolarizzare il contatto tra le pietre, se di buona qualità, assicura una certa resistenza di natura coesiva alla muratura e tale contributo può diventare importante se mancano gli altri parametri della regola dell'arte in grado di garantire la monoliticità del muro.
- Ingranamento trasversale / presenza di diatoni. Questo requisito impedisce la suddivisione della parete in più paramenti semplicemente costruiti l'uno a ridosso dell'altro e, inoltre, permette la distribuzione del carico su tutto lo spessore del muro anche in quei casi in cui c'è un carico gravante sul bordo della parete (ad es. un solaio appoggiato solo sull'interno). Il requisito può essere soddisfatto grazie ai "diatoni", ossia pietre passanti attraverso tutto lo spessore della parete. Ugualmente efficaci sono legature con elementi laterizi o di pietra non completamente passanti ma in grado di interessare gran parte dello spessore della parete ed ingranati fra loro ("semidiatoni").
- Elementi resistenti di forma squadrata. La presenza di due facce orizzontali sufficientemente piane assicura la mobilitazione delle forze d'attrito, cui si deve gran parte della capacità di una parete di resistere a sollecitazioni orizzontali ad essa complanari. Infatti l'attrito si mobilita principalmente sotto l'effetto della forza peso della muratura sovrastante la superficie di scorrimento. È intuitivo che l'attrito si massimizza per le superfici di scorrimento ortogonali alla forza peso, dunque per superfici di scorrimento orizzontali. Da quanto detto consegue che questo è uno dei requisiti necessari per ottenere un buon ingranamento fra gli elementi della parete.
- Elementi resistenti di grande dimensione rispetto allo spessore del muro assicurano, come i diatoni, un buon grado di monoliticità della parete. Inoltre, proprio in virtù della loro grande

[1] Si veda al riguardo la bibliografia. Qui sia consentito citare solo *De Architectura* di Vitruvio Pollione, notissimo trattato di epoca romana di cui purtroppo sono andate perdute le tavole grafiche.

dimensione, si tratta di elementi di grande peso e spesso ben ingranati fra loro e difficili da muovere.

- Presenza di sfalsamento fra i giunti verticali. Tale condizione, insieme alla forma squadrata delle pietre, permette "l'effetto catena" che fornisce una certa resistenza a trazione alla muratura. Inoltre, anche se le pietre non sono squadrate, se si hanno giunti regolarmente sfalsati si mobilita un'altra grande risorsa resistente delle murature: l'ingranamento fra gli elementi resistenti (anche detto "effetto incastro").
- Presenza di filari orizzontali. Tale requisito induce una buona distribuzione dei carichi verticali in quanto si ottiene un vincolo di appoggio regolare. Ma l'orizzontalità dei filari assume importanza anche in occasione delle azioni sismiche poiché essa consente l'oscillazione attorno a cerniere cilindriche orizzontali senza danneggiare la muratura. Per gli stessi motivi sono importanti anche i ricorsi orizzontali in mattoni che con interasse periodico regolarizzano le murature in pietre e ciottoli.
- Buona qualità degli elementi resistenti. Questo requisito tende ad evitare tre situazioni: che gli elementi siano intrinsecamente deboli (ad esempio i mattoni di fango che si utilizzano in certe zone del mondo); che essi siano mattoni fortemente forati; che essi siano degradati, ad esempio per umidità o per esposizione alle intemperie.

2.3. Criteri per definire la presenza, la presenza parziale o l'assenza dei requisiti della regola dell'arte

Per attribuire un giudizio sulla qualità della muratura, come si è detto, è indispensabile valutare (analiticamente o qualitativamente) in che misura sono rispettati i sette parametri caratterizzanti la regola dell'arte. Solo dopo questa operazione preliminare sarà possibile comporre i sette giudizi parziali in una valutazione sintetica.
Esprimere un giudizio sul rispetto di un dato elemento della regola dell'arte è difficile per vari motivi.
In primo luogo esiste la problematica, non affrontata in questa breve nota, che per conoscere occorre osservare e certi parametri da giudicare sono difficilmente osservabili senza effettuare indagini o saggi. Tuttavia una operazione di valutazione della qualità muraria è certamente difficile (ed in molti casi impossibile) se non si accetta di dover eseguire le necessarie indagini. Si tenga conto che ci si sta riferendo a saggi e non a prove: si tratta di levare l'intonaco in alcune zone dell'edificio e di fare saggi in profondità. Per tale motivo, il presupposto fondamentale alla base del metodo di valutazione indicato in questo capitolo è che i tecnici ed i progettisti incaricati di intervenire su un fabbricato esistente in muratura svolgano le necessarie indagini volte a caratterizzare la muratura, investendo le risorse economiche che occorrono. I costi aggiuntivi di tali indagini nella fase del "processo diagnostico" possono consentire, nel breve periodo, un risparmio sugli interventi e, nel lungo termine, un risparmio sui costi di ricostruzione (che certamente si renderebbero necessari domani se oggi, per mancanza di conoscenza, si progettassero interventi inadeguati) in caso di danneggiamento dell'immobile.
Un secondo problema è il seguente: è semplice riconoscere le due situazioni limite, di rispetto e di non rispetto di un dato parametro della regola dell'arte. Le osservazioni sul campo delle murature presenti in casi reali hanno però mostrato che esistono anche situazioni intermedie, non riferibili né al rispetto né al mancato rispetto della regola dell'arte. Perciò è stata introdotta, per ogni parametro considerato, una categoria di giudizio denominata "parziale rispetto" della regola dell'arte.
Nelle schede seguenti sono riportati alcuni parametri che aiutano a riconoscere la presenza della regola dell'arte in una muratura.

Si anticipa sin da ora il significato di alcune abbreviazioni utilizzate:

Parametri della regola dell'arte:
MA. = qualità della malta / efficace contatto fra elementi / zeppe;
P.D. = ingranamento trasversale / presenza dei diatoni;
F.EL. = forma degli elementi resistenti;
D.EL. = dimensione degli elementi resistenti;
S.G. = sfalsamento dei giunti verticali / ingranamento nel piano della parete;
OR. = orizzontalità dei filari;
RE.EL. = resistenza degli elementi.

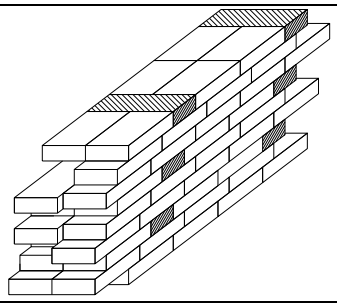
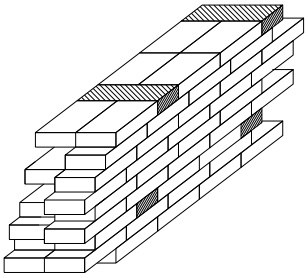
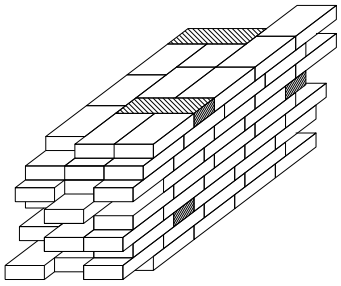
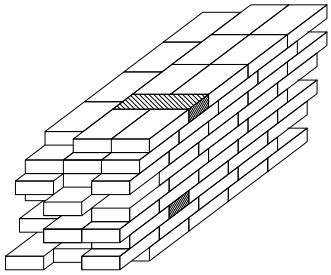
Giudizio sul rispetto dei parametri della regola dell'arte:
R. = parametro rispettato;
P.R. = parametro parzialmente rispettato;
N.R. = parametro non rispettato.

QUALITÀ DELLA MALTA / EFFICACE CONTATTO FRA ELEMENTI / ZEPPE[2] **(MA.)**	
RISPETTATA a) Malta in buono stato e ben conservata, con giunti di dimensione non eccessiva rispetto alle pietre o ai mattoni oppure con giunti ampi ma di malta di ottima qualità (es. murature romane o bizantine); b) Muratura con grandi elementi squadrati e priva di malta o con strato di malta sottilissimo. In tal caso si intende "rispettato" il requisito di un efficace contatto fra le pietre.	
PARZIALMENTE RISPETTATA a) Malta di qualità intermedia, con giunti non eccessivamente erosi. b) Murature con elementi irregolari e malta degradata ma con zeppe efficacemente inserite negli spazi fra gli elementi.	
NON RISPETTATA a) Malta scadente o degradata e polverulenta e del tutto priva di coesione. b) Malta assente (escluso il caso di muratura di grossi elementi squadrati). c) Giunti di malta di dimensioni eccessive, paragonabili a quelle degli elementi se la malta non è di ottima qualità. d) Muratura di elementi porosi (es. tufo) con scarsa aderenza fra la malta e gli stessi elementi.	

Nota sulla valutazione convenzionale

Per la corretta valutazione della qualità della malta è necessario eseguire un saggio per valutare le caratteristiche della muratura in profondità. Infatti spesso una malta degradata in superficie (nei primi 6 cm orientativamente) può risultare di buona qualità all'interno della muratura. In tal caso l'efficacia della malta è tanto maggiore quanto più è spessa la parete.

[2] La tematica della qualità della malta è stata svolta con il contributo del Politecnico di Milano (Prof.ssa L. Binda, Arch. G. Cardani).

PRESENZA DI DIATONI / INGRANAMENTO TRASVERSALE (P.D.) **(VALUTAZIONE "CONVENZIONALE" SVOLTA SENZA OSSERVARE L'INTERA SEZIONE MURARIA)**	
RISPETTATA Paramento ben tessuto; blocchi o pietre di dimensione paragonabile a quella dello spessore della parete; presenza sistematica di pietre disposte di testa.	
PARZIALMENTE RISPETTATA Situazione intermedia fra il rispetto ed il non rispetto di tale parametro. Paramento ben tessuto ed ordinato almeno su una faccia; alcune pietre sono disposte di testa; spessore del muro non eccessivo rispetto alle dimensioni delle pietre (orientativamente: pietre di lunghezza massima almeno pari ai 2 / 3 dello spessore della parete).	 
NON RISPETTATA Pietre piccole rispetto allo spessore del muro; assenza di pietre palesemente disposte in senso trasversale alla parete (di testa).	

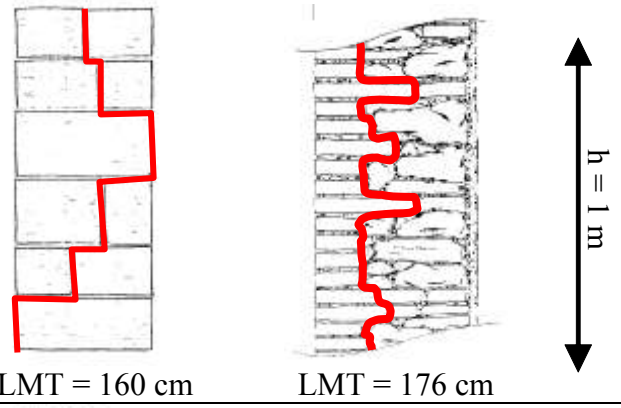
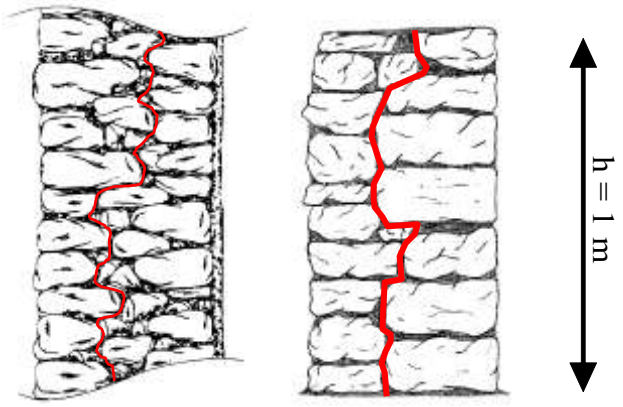
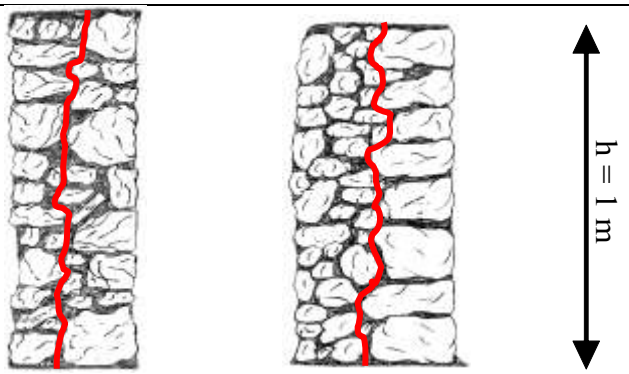
Nota sulla valutazione convenzionale

Per svolgere la valutazione convenzionale è assolutamente consigliabile eseguire uno o più saggi all'interno della muratura, in corrispondenza delle pietre che ad un esame esterno appaiono disposte di punta. Il saggio dovrà far capire se tali pietre penetrano in profondità nello spessore della parete e se effettivamente possono essere ingranate con le pietre disposte sulla faccia opposta della parete.

La valutazione dell'ingranamento trasversale senza eseguire almeno un saggio interno può dare risultati attendibili soltanto in alcuni casi (es. per murature in laterizio o in blocchi squadrati regolari di spessore ridotto).

È da notare che grazie a questo saggio si potranno desumere anche altre utili informazioni non ottenibili con il semplice esame esterno delle due facce della parete. Ad esempio si potrà valutare la consistenza della malta all'interno della muratura (spesso lo strato esterno di malta è quello più deteriorato e non indicativo del reale stato di conservazione della malta).

Si potranno valutare anche la presenza di vuoti interni o la forma e dimensione delle pietre all'interno della parete.

PRESENZA DI DIATONI / INGRANAMENTO TRASVERSALE (P.D.) **(VALUTAZIONE TRAMITE LA LMT[3] TRASVERSALE – SEZIONE INTERAMENTE OSSERVABILE)**	
RISPETTATA LMT maggiore di 155 cm	 LMT = 160 cm LMT = 176 cm
PARZIALMENTE RISPETTATA LMT compresa fra 155 cm e 125 cm	 LMT = 145 cm LMT = 126 cm
NON RISPETTATA LMT inferiore a 125 cm Pietre di piccole dimensioni qualunque sia il valore di LMT (es. parete con sacco interno)	 LMT = 110 cm LMT = 120 cm

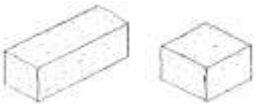
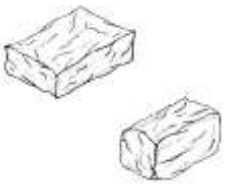
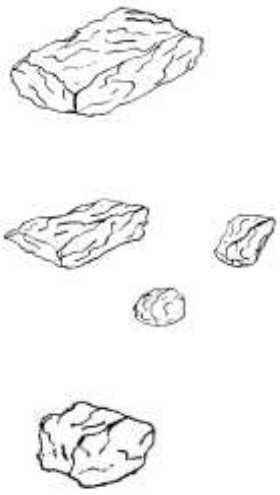
Nota sulla LMT

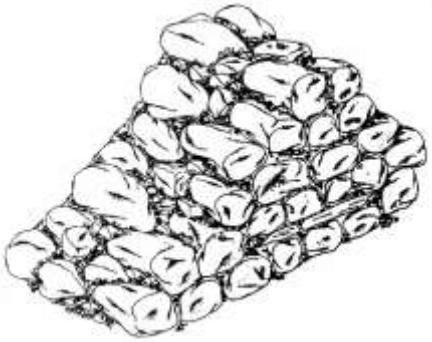
LMT (sezione) → "Linea di Minimo Tracciato" interna alla sezione della parete.

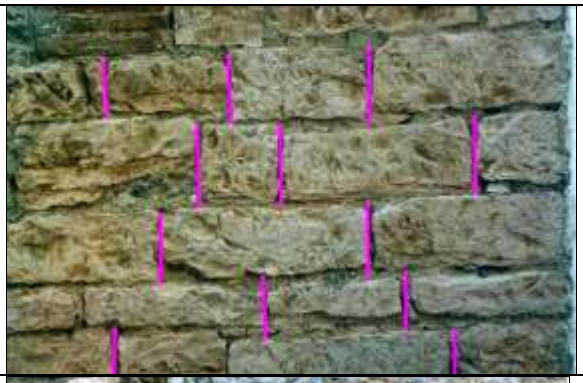
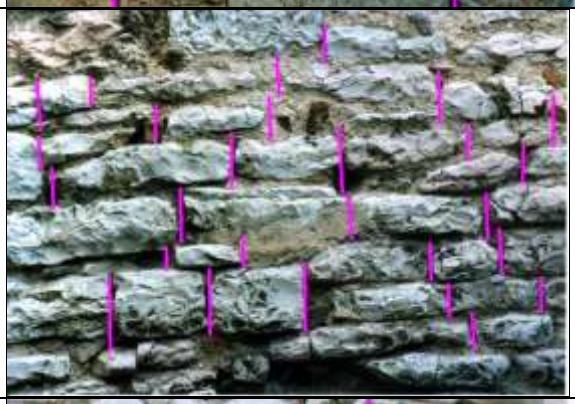
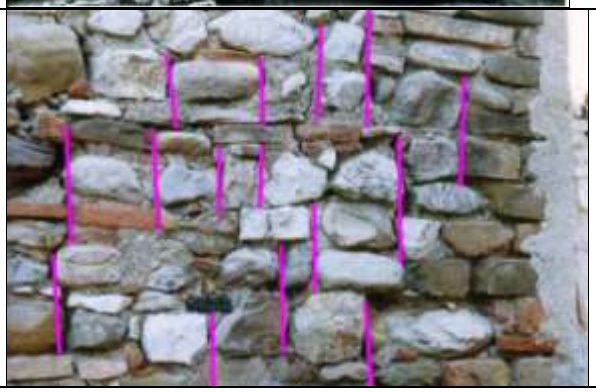
→ il valore dell'LMT si ottiene misurando, su un tratto di 1m di altezza, la lunghezza della linea centrale più breve che attraversa il nucleo murario in verticale, aderendo al lato interno dei conci dell'uno o dell'altro paramento.

La valutazione del parametro PD tramite la LMT trasversale potrà essere effettuata se è osservabile la sezione della parete. Tale condizione può non essere soddisfatta; in questo caso si svolgerà la valutazione della presenza dei diatoni tramite l'osservazione dei paramenti esterni della parete e l'esecuzione di saggi come spiegato in precedenza.

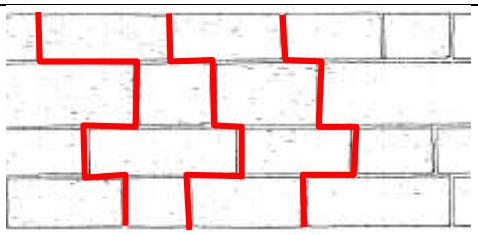
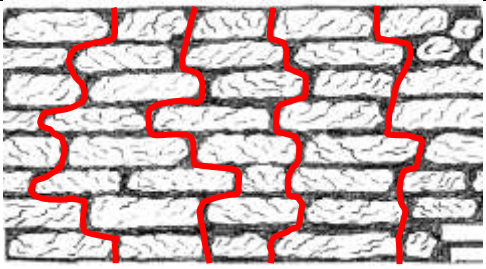
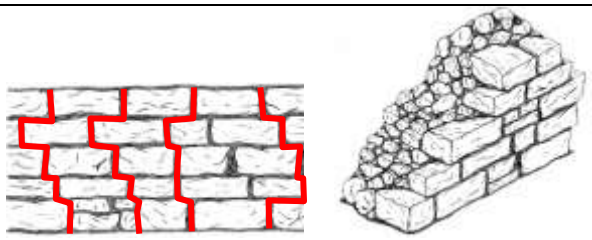
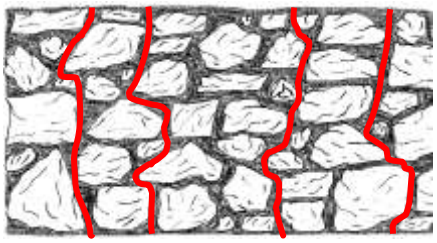
[3] Per l'idea originale della LMT e per una analisi più approfondita si vedano i lavori di Doglioni e altri.

FORMA DEGLI ELEMENTI RESISTENTI (F.EL.)		
RISPETTATA Prevalenza di elementi di forma squadrata o sbozzata oppure mattoni o laterizi di forma parallelepipeda su entrambe le facce della parete.	 Blocchi squadrati  Blocchi sbozzati	
PARZIALMENTE RISPETTATA Compresenza di elementi irregolari o ciottoli e blocchi di forma squadrata o mattoni. Pareti con una faccia di blocchi di forma regolare o mattoni e l'altra faccia di ciottoli od elementi di forma irregolare. Elementi arrotondati o irregolari ma con interstizi riempiti di zeppe ben inserite.		
NON RISPETTATA Prevalenza di elementi di forma irregolare o arrotondata oppure ciottoli su entrambe le facce della parete.	Blocchi di forma irregolare, arrotondata o ciottoli.	

DIMENSIONE DEGLI ELEMENTI RESISTENTI (D.EL.)	
RISPETTATA Prevalenza di elementi con la loro dimensione maggiore sopra i 40 cm. In tali pareti i blocchi solitamente sono così grossi da interessare gran parte dello spessore della parete e quindi essi possono svolgere anche la funzione di diatoni.	
PARZIALMENTE RISPETTATA Prevalenza di elementi con la loro dimensione maggiore fra 20 e 40 cm. Compresenza di elementi di dimensione variabile.	
NON RISPETTATA Prevalenza di elementi con la loro dimensione maggiore sotto i 20 cm. Parete di soli diatoni in mattoni pieni.	

SFALSAMENTO FRA I GIUNTI VERTICALI / INGRANAMENTO NEL PIANO (S.G.) **(VALUTAZIONE QUALITATIVA)**	
RISPETTATO Giunti verticali in corrispondenza della zona centrale dell'elemento inferiore. Va escluso il caso di parete in mattoni pieni disposti solo a diatoni.	
PARZIALMENTE RISPETTATO Giunto verticale in posizione intermedia tra zona centrale dell'elemento inferiore e il suo bordo.	
NON RISPETTATO Giunti verticali allineati. Giunti allineati verticalmente su due o più elementi in ampie porzioni della parete. Parete di soli diatoni di mattoni pieni, anche con giunti verticali sfalsati[4]. Evidente assenza di ingranamento nel piano della parete.	

[4] La parete con tessitura di mattoni disposti tutti di testa è particolarmente vulnerabile alle azioni sismiche nel piano in quanto ha dei percorsi preferenziali per la formazione delle lesioni a 45°. Queste infatti seguirebbero l'andamento dei giunti senza mai interessare i mattoni e tale comportamento causa una sostanziale inefficacia dell'ingranamento nel piano della parete. Dal punto di vista dello "sfalsamento dei giunti verticali" si potrebbe affermare che questi risultano sfalsati di una distanza troppo piccola per essere efficaci (circa 3 cm di sfalsamento fra un giunto verticale ed i due giunti del filare sottostante).

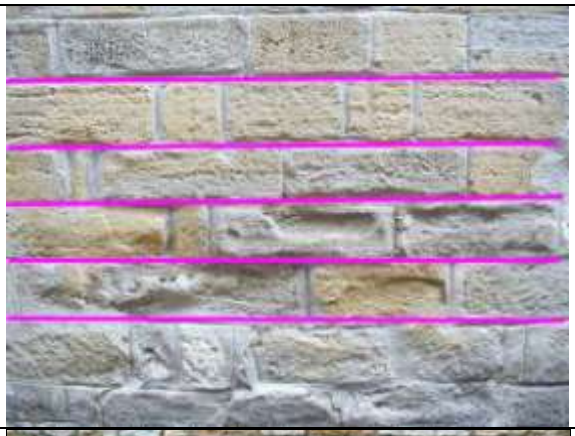
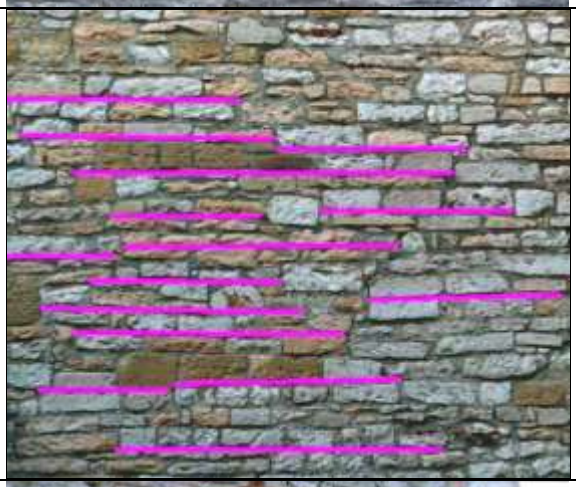
SFALSAMENTO FRA I GIUNTI VERTICALI (S.G.) **(VALUTAZIONE QUANTITATIVA TRAMITE LA LMT[5] NELLE FACCE DELLA PARETE)**	
RISPETTATO Parete a paramento unico: LMT > 160 Parete a doppio paramento: LMT > 160 su entrambe le facce.	 LMT = 166 ; h muro = 1 m. Paramento unico.
PARZIALMENTE RISPETTATO Parete a paramento unico: LMT fra 140 e 160. Parete a doppio paramento: a) entrambi i paramenti con LMT fra 140 e 160. b) LMT rispettato su una faccia e non rispettato sull'altra faccia. c) LMT rispettato su una faccia e parzialmente rispettato sull'altra faccia.	 LMT = 158 su entrambe le facce h muro = 1 m.
NON RISPETTATO Parete a paramento unico: LMT < 140 Parete a doppio paramento: LMT < 140 su una faccia e LMT < 160 sull'altra faccia. Parete di soli diatoni di mattoni pieni, qualunque sia il valore di LMT. Parete con pietre di piccole dimensioni qualunque sia il valore di LMT. Evidente assenza d'ingranamento su una o più linee verticali della parete qualunque sia il valore di LMT[6].	 LMT faccia esterna = 146 ; LMT faccia interna < < 140 → SG non è rispettato. h muro = 1 m  LMT = 113 – h muro = 1 m.

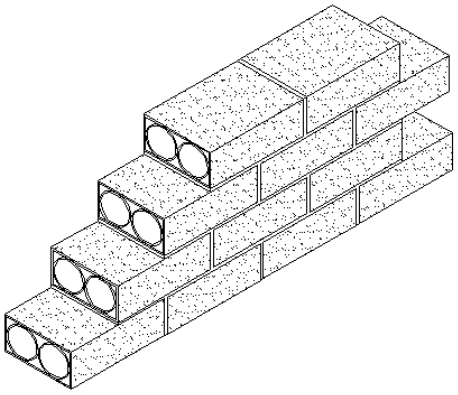
Nota sulla LMT

LMT (sulla faccia della parete) → "Linea di Minimo Tracciato" sulla faccia della parete.
→ si individuino su una porzione di muratura di 1m x 1m le linee di minimo tracciato più brevi che attraversano verticalmente la porzione di muratura suddetta senza mai intersecarsi e senza mai tagliare le pietre o i mattoni. La media delle loro lunghezze fornisce il valore della LMT su quella faccia della parete.

[5] Per l'idea originale della LMT e per una analisi più approfondita si vedano i lavori di Doglioni e altri .

[6] È il caso, ad esempio, di linee LMT che passano su percorsi formati da pietre molto arrotondate che quindi non sono in grado di fornire il necessario ingranamento in quanto non riescono ad incastrarsi fra loro.

PRESENZA DI FILARI ORIZZONTALI (OR.)	
ORIZZONTALITÀ RISPETTATA Filari orizzontali su gran parte della parete, senza presentare interruzioni di continuità e su entrambe le facce della parete. Murature listate con listature a interasse inferiore a 60 cm.	
PARZIALMENTE RISPETTATA Situazioni intermedie fra il rispetto e il non rispetto, compreso il caso di filari orizzontali solo su una faccia della parete.	
NON RISPETTATA I tratti orizzontali sono interrotti o con evidenti sfalsamenti sull'intera facciata muraria.	

QUALITÀ DEGLI ELEMENTI RESISTENTI (RE.EL.)	
RISPETTATA Pietre non degradate o poco degradate Muratura con pochi elementi degradati (orientativamente meno del 10%) Mattoni pieni cotti Elementi di tufo duro vulcanico Elementi laterizi con foratura < 45% Blocchi in calcestruzzo (anche forati)	
PARZIALMENTE RISPETTATA Alcuni elementi della muratura sono degradati (orientativamente fra il 10% ed il 50%) Elementi laterizi con foratura fra 70% e 45% Elementi in tufo tenero (calcarenite)	
NON RISPETTATA Elementi degradati in misura superiore al 50%. Elementi laterizi con percentuale di foratura > 70% Mattoni in fango o argilla non cotta	

2.5. Valutazione dell'indice IQM

Vengono qui forniti i valori numerici necessari per determinare IQM, ricavati da una lunga ed approfondita serie di osservazioni casi e di successive "tarature".
In via preliminare, come detto, occorre valutare i parametri della regola dell'arte, esprimendo, per ognuno di essi, un giudizio sul suo rispetto (rispettato **"R"**, parzialmente rispettato "**PR**" oppure non rispettato "**NR**"). I giudizi sul rispetto dei parametri della regola dell'arte sono espressi in base ai criteri riportati in precedenza.
Nella tabella 1 sono riportati i punteggi da attribuire ad ogni parametro della regola dell'arte in funzione del suo rispetto, parziale rispetto o non rispetto ed in funzione del tipo di azione sollecitante preso in considerazione (azione verticale, azione ortogonale al piano della parete, azione orizzontale complanare alla parete).

	Azioni verticali			**Azioni fuori piano**			**Azioni nel piano**		
	NR	**PR**	**R**	**NR**	**PR**	**R**	**NR**	**PR**	**R**
OR. Orizzontalità dei filari	0	1	2	0	1	2	0	0.5	1
P.D. Presenza dei diatoni / ingranamento trasversale	0	1	1	0	1.5	3	0	1	2
F.EL. Forma degli elementi resistenti	0	1.5	3	0	1	2	0	1	2
S.G. Sfalsamento dei giunti verticali / ingranamento nel piano	0	0.5	1	0	0.5	1	0	1	2
D.EL. Dimensione degli elementi resistenti	0	0.5	1	0	0.5	1	0	0.5	1
MA. Qualità della malta / efficace contatto fra elementi / zeppe	0	0.5	2	0	0.5	1	0	1	2
RE.EL. Resistenza degli elementi	0.3	0.7	1	0.5	0.7	1	0.3	0.7	1

Tabella 1. Punteggi da attribuire ai parametri della regola dell'arte.

I punteggi ottenuti dalla tabella 1 sono poi inseriti nella formula riportata di seguito, ottenendo un punteggio globale, chiamato **IQM** (Indice di Qualità Muraria) per ogni tipo di azione sollecitante.

$$IQM = RE.EL. \times (OR. + P.D. + F.EL. + S.G. + D.EL. + MA.)$$

Dunque tale procedura conduce a tre valori di IQM compresi fra 0 e 10: uno per ogni direzione di sollecitazione.
Ciò che distingue i tre valori di IQM è il diverso peso attribuito ai parametri della regola dell'arte per le tre situazioni di sollecitazione.
I pesi attribuiti indicano l'importanza di un dato parametro per una buona risposta della parete nei confronti del tipo di azione sollecitante considerata. Essi derivano dalle considerazioni sul rispetto o meno della regola dell'arte per ciascuno degli elementi considerati.

2.6. Criteri utilizzati per l'attribuzione dei pesi

Il criterio seguito per differenziare il comportamento delle murature nei confronti dei tre tipi di azione considerati consiste nell'attribuire ai vari parametri della regola dell'arte pesi differenti. Dunque un aspetto della regola dell'arte può risultare più o meno importante in funzione del tipo di sollecitazione considerata.
Naturalmente ciò non significa che gli aspetti della regola dell'arte che hanno un peso minore in tabella 1 non abbiano alcuna influenza sul comportamento di una muratura nei confronti dell'azione considerata. Si sottolinea, pertanto, la convenzionalità del metodo il cui scopo non è quello – evidentemente irrealistico – di fornire una caratterizzazione certa del comportamento meccanico di una data tipologia muraria, bensì quello di dare una indicazione orientativa.

Azioni verticali
Una parete sottoposta ad un carico verticale (e solo ad esso) solitamente ha motivo di andare in crisi o per instabilità oppure rottura per compressione.
Poiché il metodo di analisi qui illustrato si basa sull'ipotesi di analizzare pannelli murari osservabili solo per una limitata estensione (1 metro quadro nell'ipotesi peggiore) si darà nel seguito maggior peso all'evenienza di una rottura per compressione, pur non trascurando il fenomeno dell'instabilità, importante su tese murarie snelle ed estese.
Affinché avvenga la rottura per compressione (almeno per carichi ordinari) è necessario che l'elemento resistente sia intrinsecamente debole (ad esempio i laterizi forati, i mattoni di fango, etc…) oppure che la muratura sia fortemente degradata (ad esempio perché sottoposta ad agenti atmosferici o ad umidità). Se si verifica una di queste due condizioni allora si è nella situazione in cui **R.EL. = NR**. In tal caso i rimanenti parametri della regola dell'arte perdono di importanza; per questo motivo se **R.EL. = NR**. il fattore moltiplicativo nella formula che dà **IQM** è molto basso e si ottiene un **IQM** basso.
Se la qualità dei blocchi o delle pietre è elevata allora la rottura per compressione può essere facilitata da concentrazione delle tensioni all'interno della muratura.
I parametri che più di altri impediscono delle errate diffusioni delle tensioni nel solido murario sono la presenza di blocchi squadrati (**F.EL.**), l'orizzontalità dei filari (**OR.**) e la buona qualità della malta (**MA.**).
Come si può vedere dalla tabella 1, i parametri cui è stato attribuito maggior peso nella valutazione del comportamento di una parete soggetta a carichi verticali sono proprio **F.EL.** , **OR.** e **MA.**
Per quanto riguarda il fenomeno dell'instabilità, esso è tenuto in conto premiando con 1 punto il rispetto o il rispetto parziale del parametro **P.D.** (presenza di diatoni-ingranamento della parete) e distinguendo questi due casi dal caso di totale assenza di ingranamento (non rispetto del parametro P.D.) in cui anche l'instabilità può diventare un motivo di crisi in quanto la snellezza della parete su più paramenti aumenta rispetto al caso della stessa parete monolitica.

Azioni orizzontali fuori piano
Una parete sottoposta ad azioni orizzontali che tendono a deformarla fuori dal suo piano ha delle limitate porzioni di muratura che sono soggette a forti tensioni di compressione. Si pensi ad esempio al caso di una parete che ribalta ed alle tensioni che tendono a schiacciare le pietre posizionate vicino alla cerniera orizzontale. Per questo motivo si perviene ad un **IQM** molto basso se la muratura ha elementi resistenti degradati o debolmente resistenti a compressione.
In caso contrario si valuta positivamente l'aspetto ritenuto fondamentale per la risposta delle murature ad azioni fuori piano, ossia la loro monoliticità dovuta al buon ingranamento interno fra i paramenti (**P.D.**). A tale parametro, infatti, è stato attribuito il peso maggiore.
Altri parametri cui è stato attribuito un peso elevato sono: la presenza di filari orizzontali (**OR.**), che favoriscono l'oscillazione del muro attorno a cerniere orizzontali e la forma degli elementi resistenti (**F.EL.**). Infatti la presenza di elementi resistenti squadrati favorisce l'ingranamento interno fra i paramenti della parete.

Azioni orizzontali complanari
Anche nel caso di azioni sollecitanti orizzontali complanari alla muratura la presenza di elementi non resistenti a compressione oppure molto degradati conduce ad un basso valore di **IQM**. Se gli elementi resistenti della muratura sono adeguati si procede alla valutazione degli altri parametri della regola dell'arte.

La resistenza di una parete nel suo piano è dovuta a:
- coesione, aspetto conferito alla muratura da una malta di buona qualità (**MA.**);
- attrito; esso si esplica su superfici orizzontali (causa la verticalità della forza peso) di elementi resistenti a contatto fra loro, di qui l'importanza del parametro **F.EL.** Ma non

basta: occorre anche che i giunti verticali siano sfalsati fra loro affinché l'attrito si possa esplicare, dunque per questo motivo si dà importanza al parametro **S.G.**;
- ingranamento ed incastro fra i blocchi; tale aspetto può addirittura definire la pendenza della lesione che si andrà a formare in caso di sisma e si capisce bene come tale lesione sia tanto più facilitata a formarsi quanto più la sua pendenza sia verticale (specie nei meccanismi di rotazione di cunei di muratura triangolari). L'incastro fra i blocchi è presente se si hanno blocchi squadrati (**F.EL.**) e giunti verticali sfalsati (**S.G.**).

Da quanto detto discende che i tre parametri della regola dell'arte ritenuti fondamentali per conferire alla muratura una buona resistenza ad azioni complanari sono la presenza di blocchi squadrati, lo sfalsamento dei giunti verticali e la qualità della malta (**F.EL.**, **S.G.** e **MA**).
È stato attribuito un peso maggiore anche alla presenza di diatoni (**P.D.**), importanti perché consentono alle azioni orizzontali complanari di interessare l'intero spessore del muro e non solo il paramento dove esse si esercitano direttamente.

2.7. Valutazione della categoria muraria (verifiche per cinematismi di collasso)

Il metodo illustrato in questa nota è indicato anche per una classificazione delle murature in funzione della loro risposta a sollecitazioni verticali, orizzontali fuori piano ed orizzontali nel piano. Per inciso si nota che la determinazione del comportamento meccanico di un pannello murario sottoposto ad azioni orizzontali (sia nel suo piano che fuori piano) è alla base dell'applicazione del metodo dell'analisi limite, finalmente recepito dalla normativa nazionale sulle costruzioni (il recente DM 14.01.2008).

Nella tabella 2 si entra con i tre valori di **IQM** determinati grazie alla tabella 1 e si legge direttamente la categoria di appartenenza della muratura in riferimento alle tre azioni sollecitanti.

Metodo dei punteggi			
Tipo di azione \ **Categoria muratura**	**C**	**B**	**A**
Azioni verticali	$0 \leq IQ < 2{,}5$	$2{,}5 \leq IQ < 5$	$5 \leq IQ \leq 10$
Azioni ortogonali	$0 \leq IQ \leq 4$	$4 < IQ < 7$	$7 \leq IQ \leq 10$
Azioni orizz. complanari	$0 \leq IQ \leq 3$	$3 < IQ \leq 5$	$5 < IQ \leq 10$

Tabella 2. Metodo dei punteggi: attribuzione delle categorie murarie.

Le categorie possibili sono tre e sono state denominate A, B e C[7]. La categoria migliore è la A, la peggiore è la C. Nella categoria B rientrano le murature di qualità intermedia.

Nel seguito si caratterizzano le categorie murarie in base alla tipologia di azione sollecitante.

Per azioni verticali:
- una muratura di categoria A difficilmente subisce lesioni e può essere considerata di buona qualità;
- una muratura di categoria B ha bassa probabilità di collassare ma essa può lesionarsi; può quindi considerarsi di media qualità;
- una muratura di categoria C ha elevata probabilità di subire lesioni o di andare fuoripiombo per il fenomeno dell'instabilità, specie se di spessore limitato e se molto caricata e

[7] Si noti come tale classificazione delle murature riprende quella ideata da A. Giuffrè.

specialmente in corrispondenza di carichi concentrati. In condizioni estreme risulta possibile il collasso. Tale categoria di murature va considerata di scarsa qualità.

Per azioni orizzontali fuori piano:

- una muratura di categoria A è in grado di mantenere un comportamento monolitico. Essa ha una probabilità molto bassa di lesionarsi o di collassare per azioni fuori piano se le pareti sono ben collegate fra loro e ai solai; la muratura di categoria A è da ritenersi di buona qualità. Le verifiche per meccanismi di collasso possono essere svolte ipotizzando un comportamento monolitico delle pareti.
- una muratura di categoria B non è in grado di mantenere un comportamento monolitico ma comunque neanche si disgrega se sottoposta ad azioni orizzontali fuori piano. Per tale categoria di murature è probabile avere lesioni o spanciamenti in caso di sisma, ma è difficile che esse collassino se sono ben collegate agli orizzontamenti ed ai muri di spina; tali murature sono di media qualità. Le verifiche per meccanismi di collasso possono essere svolte, in favore di sicurezza, ipotizzando che la muratura sia formata da due paramenti distinti e non efficacemente connessi.
- una muratura di categoria C si disgrega in caso di sisma; per essa è molto probabile il collasso, anche in presenza di efficaci collegamenti. Tali murature sono da ritenersi di scarsa qualità. Le verifiche per meccanismi di collasso sono sostanzialmente non indicative in quanto non sono rispettate le ipotesi di sufficiente coesione degli elementi murari.

Per azioni orizzontali nel piano:

- una muratura di categoria A ha basse probabilità di lesionarsi; essa può definirsi come una muratura di buona qualità;
- una muratura di categoria B, in caso di sisma, ha buone probabilità di lesionarsi, specialmente se le pareti sono sottili o se sono poche rispetto all'area coperta dall'edificio; tuttavia tali lesioni saranno di scarsa entità; tale categoria definisce le murature di media qualità;
- una muratura di categoria C ha molte probabilità di lesionarsi nel piano delle pareti e le lesioni che subirà saranno ampie; pertanto nella categoria C rientrano le murature di scarsa qualità.

Bibliografia

AA.VV., 2002. Studio sulla vulnerabilità sismica e proposta di interventi per un centro storico attraverso l'indagine tipologica e l'utilizzo di un database georeferenziati. Ed. Petruzzi, Città di Castello.

AA.VV., 2002. Ricerche per la ricostruzione. Ed. DEI, Roma.

Alberti, L.B. L'architettura (De Re Aedificatoria). Ed. Il Polifilo, Milano, 1966.

Angeletti, P., Borri, A., Longhi, F., Nasini, U., Severi, A., 2004. La legge 18/2002 della Regione dell'Umbria sulla prevenzione sismica. *Atti del XI Convegno Nazionale L'ingegneria Sismica in Italia*, 25-29.01.2004, Genova, pp. 61-72.

Borri, A., 2003. La riduzione della vulnerabilità sismica nei centri storici: dalla esperienza di Città di Castello alla Legge 18/2002 della Regione Umbria. *Conv. Naz. "Rischio Sismico e Pianificazione a Scala Urbana: Metodi di Analisi e Strumenti di Intervento"*, 5-6- giugno 2003, Roma, Atti del Conv. pp 255-287

Borri, A., 2004. Vulnerabilità e riduzione del rischio sismico del costruito nei centri storici della Regione dell'Umbria. *Rischio Sismico, Territorio e Centri Storici atti Convegno Nazionale*. 2-3 luglio 2004, Sanremo.

Borri, A., Cangi, G., De Maria, A., 2007. Vulnerabilità sismica del centro storico di Gubbio. *Atti del XII Convegno Nazionale L'ingegneria Sismica in Italia*, 10-14.06.2007, Pisa.

Breymann, A.G., 1885. Muri – Costruzioni in mattoni ed in pietre artificiali e naturali, Editrice Librerie Dedalo, Roma, 1985.

Cairoli, F.G., 2006. L'edilizia nell'antichità. Ed. Carocci.

Cangi, G., 2005. Manuale del recupero strutturale e antisismico. Ed. DEI, Roma.

Cavalieri di San Bartolo, N., 1840. Istituzioni di architettura statica ed idraulica.

Cons. Sup. LL. PP., Circolare n. 617 del 02.02.2009. Istruzioni per l'applicazione delle 'Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni' di cui al decreto ministeriale del 14.01.2008. G.U. del 26.02.2009 n. 47, supplemento ordinario n. 27.

Donghi, D., 1925. Manuale dell'architetto. UTET, Torino.

Giovanetti F. (a cura di), AA.VV., 1992. Manuale del recupero di Città di Castello. Ed. DEI, Roma.

Giovanetti, F., Marconi, P. (a cura di), 1994. Manuale del recupero della città di Palermo. Flaccovio Editore.

Giuffrè, A., 1988. Monumenti e terremoti. Aspetti statici del restauro. Multigrafica editrice, Roma.

Giuffrè, A., 1991. Letture sulla meccanica delle murature storiche. Ed. Kappa, Roma.

Giuffrè A. (a cura di), AA.VV., 1993. Sicurezza e conservazione nei centri storici. Il caso Ortigia. Ed. Laterza

Giuffrè, A., Carocci, C., 1999. Codice di pratica per la sicurezza e la conservazione del centro storico di Palermo. Ed. Laterza.

Gurrieri, F. (a cura di), AA.VV., 1999. Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione post-sismica degli edifici. Ed. DEI, Roma.

Lugli, G., 1957. La tecnica edilizia romana.

Mastrodicasa, S. Dissesti statici delle strutture edilizie. Hoepli

Milani, G.B., 1901. L'ossatura murale. Torino.

Min. Infrastrutture, D.M. 14.01.2008, Norme Tecniche per le Costruzioni. Suppl. Ord. alla G.U. del 04.02.2008

Min. LL. PP. Circolare n. 21745 del 30.07.1981. Istruzioni per l'applicazione della Normativa tecnica per la riparazione e il rafforzamento degli edifici danneggiati dal sisma.

Palladio, A., 1570. I quattro libri dell'architettura.

Quatremere de Quincy, 1842 (trad. italiana). Dizionario storico dell'architettura.

Regione dell'Umbria, Allegato tecnico al B.U.R., 30.07.2003. Norme tecniche per la progettazione degli interventi e la realizzazione delle opere di cui alla L.R. 23.10.2002 n°18 finalizzate alla riduzione della vulnerabilità sismica.

Rondelet, J., 1802. Traité theorique et pratique de l'art de batir. Paris.

Scamozzi, V., 1615. L'idea dell'architettura universale, Parte II, libro VIII, capi VIII e IX.

Vitruvio Marco Pollione, I sec. A.C. De Architectura.