

IMQ

INDICE DI QUALITÀ' MURARIA

Applicazioni nell'ambito delle NTC 2008

Antonio Borri

Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale.
Università degli Studi di Perugia
borri@unipg.it

Alessandro De Maria

Servizio Controllo Costruzioni e Protezione Civile.
Provincia di Perugia.

The paper summarizes a methodology of analysis of the masonry and its quality based on the determination of an Index of Quality of Masonry (IQM).

Some possible applications of IQM are suggested, particularly regarding the safety valuation contemplated in the recent Italian Constructions Technical Code (NTC 2008). IQM index was originally proposed in some researches carried out by the authors and others for the Regione Umbria. IQM index expresses a synthetic judgment about the mechanical quality of a masonry wall in function of the respect of the "good rule of art". In the second part of the paper some correlation functions are proposed with the aim of broaden and integrate the values actually reported in the NTC Code. The correlation functions are between IQM index and the mechanical parameters of masonry coherent with the values of these mechanical parameters which have been suggested by the NTC Code.



L'argomento "qualità muraria" è ormai riconosciuto, anche a livello normativo, come uno dei punti focali per l'analisi del comportamento strutturale di una costruzione in muratura esistente.

D'altro canto però non sono molto diffuse le conoscenze sulle diverse tipologie e sulle peculiarità derivanti proprio dalle diversità nei costituenti e nella tecnica costruttiva.

Per questo motivo è apparso opportuno proporre una metodologia che consentisse anche a persone non particolarmente esperte di qualità muraria di analizzare e classificare dal punto di vista meccanico le variegate tipologie che si incontrano nella pratica di ogni giorno.

In questa direzione, nell'ambito di ricerche condotte nella Regione dell'Umbria, gli Autori hanno introdotto un "Indice di Qualità Muraria" (IQM), la cui entità, valutata con la metodologia di seguito illustrata, può fornire indicazioni attendibili sul comportamento meccanico di quella tipologia. Negli ultimi anni, nell'ambito del Progetto ReLUIIS (Università-Dipartimento Protezione Civile) la metodologia dell'IQM è stata perfezionata, introducendo suggerimenti e contributi pervenuti dalle Unità di Ricerca del Politecnico di Milano e dello IUAV di Venezia. Ad esempio, tra i possibili metodi di valutazione dell'ingranamento fra gli elementi della muratura è stato inserita la cosiddetta "Linea di Minimo Tracciato" messa a punto allo IUAV di Venezia. Gli obiettivi del lavoro qui presentato possono essere sintetizzati nei due punti seguenti:

■ proporre un metodo per la valutazione della qualità muraria utilizzabile anche da tecnici non particolarmente esperti di murature;

■ utilizzare il metodo sopra detto per ricavare in via indiretta, ma con buona aderenza alla realtà del caso specifico, una stima dei parametri meccanici della muratura necessari per le verifiche di sicurezza richieste dalle NTC 2008 per gli edifici esistenti. Relativamente al primo punto, viene qui illustrata la metodologia dell'Indice di Qualità Muraria, valutato in modo distinto per le diverse tipologie di azioni che possono interessare il pannello murario. Come sarà mostrato di seguito, la valutazione dell'IQM viene effettuata attraverso l'osservazione della muratura, volta al riconoscimento del rispetto o meno, caso per caso, della cosiddetta "regola dell'arte", ovvero degli accorgimenti e delle tecniche del buon costruire, capaci di assicurare un corretto ed efficace comportamento meccanico.

Le risultanze delle osservazioni vengono quindi sin-

tizzate in una scheda che, attraverso opportuni coefficienti, fornisce, per la tipologia muraria esaminata e in funzione delle diverse direzioni dell'azione sollecitante, un valore di IQM (variabile fra 0 e 10) attraverso il quale è poi possibile classificare la muratura in oggetto dal punto di vista del comportamento meccanico.

Il secondo obiettivo del presente lavoro riguarda l'applicazione delle NTC 2008 per gli edifici esistenti in muratura. Ci si propone qui di ottenere, tramite l'IQM, una stima dei valori numerici dei parametri meccanici:

f_m = resistenza media a compressione;

τ_0 = resistenza media a taglio;

E = valore medio del modulo di elasticità normale.

Questi parametri sono riportati, ma solo per alcune tipologie murarie, nella appendice C8A.2 della Circolare esplicativa, con un intervallo di valori possibili (MIN-MAX).

Una volta dimostrata (come sarà fatto in seguito) la buona correlazione tra IQM ed i valori di f_m , τ_0 ed E delle tabelle della normativa, si proporrà di utilizzare l'IQM (ricavabile per qualsiasi tipologia muraria) per estendere l'applicabilità delle procedure delle NTC a tutte quelle tipologie che attualmente o non sono previste nelle tabelle della Circolare o non trovano in esse una corrispondenza adeguata.

In altri termini, si propone di avvalersi dell'IQM per ottenere una stima dei parametri meccanici in questione, stima che, data la "coerenza" (cioè la buona correlazione) tra IQM e le tabelle delle NTC sarà utilizzabile in modo analogo a quello dei valori "ufficiali" riportati nelle tabelle.

Si noti poi che, dato che la valutazione dell'IQM passa attraverso un'attenta analisi della muratura e delle peculiarità del caso specifico, il livello di conoscenza ottenuto per questa via appare, per quanto riguarda le proprietà dei materiali, del tutto analogo (anzi, per alcuni aspetti, superiore) a quello ottenibile mediante le prove attualmente previste per il livello LC2.

In sintesi, la metodologia dell'IQM si propone qui i seguenti obiettivi: 1) per le tipologie già contemplate dalle tabelle: consente di passare dal livello LC1 al livello LC2; 2) per le tipologie non presenti (o mal rappresentate) nelle tabelle: consente di ottenere valori dei parametri meccanici in accordo con le tabelle delle NTC e quindi utilizzabili per le procedure e con le medesime modalità delle tipologie attualmente previste.

Giudizio sulla qualità della muratura e metodo dei punteggi

La procedura per determinare l'indice IQM richiede al tecnico che effettua l'osservazione della muratura di esprimere un giudizio sul rispetto di sette parametri caratteristici della regola dell'arte. Il giudizio può avere tre esiti: parametro rispettato (R), parzialmente rispettato (PR) e non rispettato (NR). In base ai giudizi espressi vengono attribuiti dei punteggi (da qui il nome del metodo) e tali punteggi sono poi combinati a formare il valore dell'IQM per quella muratura. L'elemento da osservare è il singolo pannello murario. La sua qualità muraria (e quindi il suo IQM) viene valutata separatamente per le tre possibili diverse tipologie di azioni: carichi verticali, azioni orizzontali che sollecitano il pannello murario nel suo piano medio, azioni che sollecitano il pannello murario ortogonalmente al piano medio. I parametri della regola dell'arte influenzano in maniera diversa la risposta del muro ai diversi tipi di azione che lo sollecitano e per tale motivo appare corretto considerare separatamente i tre casi, ottenendo quindi tre diversi valori di IQM: IQM verticale, IQM nel piano, IQM ortogonale al piano.

Per "regola dell'arte" si intende qui l'insieme di quegli accorgimenti costruttivi che garantiscono il buon comportamento dell'elemento murario e ne assicurano la compattezza ed il monolitismo. Essa deriva dalla pratica costruttiva 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. Gli accorgimenti costruttivi presi in considerazione sono di seguito elencati, preceduti dalla sigla con cui verranno poi identificati nella scheda della qualità muraria.

■ **(MA.) Malta di buona qualità / efficace contatto fra elementi / zeppe.** Il contatto fra gli elementi, necessario per trasmettere e ripartire le azioni fra le pietre in maniera uniforme e per trasmettere le forze fino al terreno, si ottiene o per contatto diretto fra elementi squadrati o tramite la malta (nella maggior parte dei casi) o, in caso di 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, può assicurare anche una certa resistenza di natura coesiva alla muratura.

■ **(P.D.) Ingranamento trasversale / presenza di diatoni.** Questo requisito impedisce la separazione della parete in più paramenti costruiti l'uno a ridosso dell'altro e, inoltre, permette la distribuzione del cari-

co su tutto lo spessore del muro anche in quei casi in cui il carico è 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 lo spessore della parete. Ugualmente efficaci sono le connessioni trasversali 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).

■ **(F.EL.) Forma degli elementi.** La presenza di due facce orizzontali sufficientemente piane, come avviene con elementi di forma squadrata, 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 ed è massima quando le superfici di scorrimento sono ortogonali alla forza peso.

■ **(D.EL.) Dimensione degli elementi.** Elementi resistenti di dimensioni rilevanti rispetto allo spessore del muro assicurano un buon grado di monoliticità della parete. Inoltre, proprio per la loro dimensione, risultano spesso ben ingranati fra loro.

■ **(S.G.) 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 risorsa resistente delle murature: il cosiddetto "effetto incastro" legato all'ingranamento nel piano della muratura fra gli elementi resistenti.

■ **(OR.) Presenza di filari orizzontali.** Tale requisito induce una buona distribuzione dei carichi verticali data la regolarità della superficie di appoggio tra i vari elementi. Assume particolare importanza anche in occasione delle azioni sismiche, poiché consente l'oscillazione della parete attorno a cerniere cilindriche orizzontali senza danneggiare la muratura. Medesime finalità hanno i ricorsi orizzontali in mattoni (listature) che con interesse periodico regolarizzano le murature in pietre e ciottoli.

■ **(R.EL.) Resistenza adeguata degli elementi.** Questo requisito vuole tenere conto di tre possibili situazioni negative: elementi intrinsecamente deboli (caso limite: i mattoni di fango che si utilizzano in certe zone del mondo); laterizi fortemente forati; elementi degradati, ad esempio per umidità o per esposizione alle intemperie.

RINGRAZIAMENTI

L'Indice di Qualità Muraria è nato nell'ambito di ricerche svolte dagli Autori con la Regione dell'Umbria. Il lavoro è stato poi condotto tra le attività della Linea 1 - Task 3b.1 del Progetto RELUIS (2005-2008), dove, oltre alla Unità di Ricerca di Perugia hanno fornito suggerimenti e contributi per una sua migliore definizione le Unità del Politecnico di Milano (Prof.ssa Luigia Binda e Dott.ssa Giuliana Cardani) e dello IUAV di Venezia (Prof. Francesco Dogliani e Prof. Giulio Mirabella).

Per attribuire un giudizio sulla qualità della muratura, come si è detto, è indispensabile valutare, analiticamente o qualitativamente, in che misura siano rispettati questi sette parametri caratterizzanti la regola dell'arte. Dopo questa operazione preliminare, i sette giudizi parziali verranno composti tra loro in una valutazione globale sintetica. Per motivi di spazio, sono qui riportati solo gli schemi riassuntivi riportati sulla scheda di valutazione della qualità muraria (Figura 1 e 2). Nel sito www.cityproject.it alla voce "Ingegneria" sono riportate: 1) la scheda "in bianco" pronta per la compilazione; 2) un "manuale" di guida alla compilazione; 3) una serie di schede esemplificative già compilate e complete dei giudizi sul rispetto dei parametri della regola dell'arte.

Valutazione dell'indice IQM e classificazione delle murature

Nella figura 3 sono riportati i punteggi da attribuire ad ogni parametro della regola dell'arte in funzione del rispetto pieno, rispetto parziale o non rispetto ed in funzione del tipo di azione sollecitante preso in considerazione (azioni verticale, azioni ortogonali al piano della parete, azioni orizzontali complanari).

I punteggi ottenuti dalla tabella in figura 3 sono poi inseriti nella formula riportata di seguito, ottenendo un punteggio globale per ogni tipo di azione sollecitante:

$$IQM = RE.EL \times (OR + PD + F.EL + SG + D.EL + MA)$$

1. Criteri per il rispetto del parametro della regola dell'arte riguardante la malta.
2. Criteri per il rispetto dei parametri della regola dell'arte riguardanti: la forma degli elementi resistenti, l'ingranamento trasversale, l'orizzontalità dei filari, la resistenza de-

gli elementi, la dimensione degli elementi e l'ingranamento nel piano della parete.

3. Punteggi da attribuire ai parametri della regola dell'arte in funzione del grado di rispetto e della direzione dell'azione sollecitante.

1

Qualità della malta / efficace contatto fra elementi / zeppe (MA.)	
NR	Malta scadente o degradata e polverulenta e del tutto priva di coesione. Malta assente (escluso caso previsto sotto in "R"). Giunti di malta di dimensioni eccessive, paragonabili a quelle degli elementi se la malta non è di ottima qualità. Muratura di elementi porosi (es. tufo) con scarsa aderenza fra la malta e gli stessi elementi.
PR	Malta di qualità intermedia, con giunti non eccessivamente erosi. Muratura con elementi irregolari e malta degradata ma con zeppe efficacemente inserite negli spazi fra elementi.
R	Malta in buono stato e ben conservata, con giunti di dimensione non eccessiva rispetto alle pietre o ai mattoni o con giunti ampi e malta di ottima qualità. Muratura con grandi elementi quadrati 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.

3

	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 diatomi / 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
Indice IQM									

Forma degli elementi resistenti (F.EL.)

NR	Prevalenza di elementi di forma irregolare o arrotondata oppure ciottoli su entrambe le facce della parete.
PR	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.
R	Prevalenza di elementi di forma squadrata o sbazzata oppure mattoni o laterizi di forma parallelepipeda su entrambe le facce della parete.

Presenza diatoni / ingranamento trasversale (P.D.)			Orizzontalità dei filari (OR.)	
	Sezione muraria visibile	Sezione muraria non visibile (osservazione facce parete ed esecuzione di saggi interni)		
NR	LMT inferiore a 125 cm. Pietre di piccole dimensioni qualunque sia il valore di LMT.	Pietre piccole rispetto allo spessore del muro; assenza di pietre palesemente disposte in senso trasversale alla parete ("di testa").	NR	I tratti orizzontali sono interrotti o con evidenti sfalsamenti sull'intera facciata muraria.
PR	LMT compresa fra 155 cm e 125 cm.	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.	PR	Situazioni intermedie fra il rispetto e il non rispetto, compreso il caso di filari orizzontali solo su una faccia della parete.
R	LMT maggiore di 155 cm	Paramento ben tessuto; blocchi o pietre di dimensione paragonabile a quella dello spessore della parete; presenza sistematica di pietre disposte "di testa".	R	Filari orizzontali su gran parte della parete, senza presentare interruzioni di continuità e su entrambe le facce della parete. Murature listate con listature a interesse inferiore a 60 cm.

Resistenza elementi (RE.EL.)		Dimensione degli elementi (D.EL.)	
NR	Elementi degradati (> 50% del totale degli elementi). Elementi laterizi con percentuale di foratura > 70%. Mattoni in fango o argilla non cotta.	NR	Prevalenza di elementi con la loro dimensione maggiore sotto i 20 cm. Parete di soli diatoni in mattoni pieni.
PR	Elementi della muratura degradati (~ fra 10% e 50% del totale degli elementi). Elementi laterizi con foratura fra 70% e 45%. Elementi in tufo tenero (calcarenite).	PR	Prevalenza di elementi con la loro dimensione maggiore fra 20 e 40 cm. Compresenza di elementi di dimensione variabile.
R	Pietre non degradate o poco degradate. Muratura con pochi elementi degradati (< 10%). Mattoni pieni cotti. Elementi di tufo duro (vulcanico). Elementi laterizi con foratura < 45%. Blocchi in calcestruzzo (anche forati).	R	Prevalenza di elementi con la loro dimensione maggiore sopra i 40 cm.

Sfalsamento giunti verticali / Ingranamento nel piano (S.G.)

	Metodo quantitativo	Metodo qualitativo
NR	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.	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. Evidente assenza d'ingranamento su una o più linee verticali della parete.
PR	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.	Giunto verticale in posizione intermedia tra zona centrale dell'elemento inferiore e il suo bordo.
R	Parete a paramento unico: LMT > 160 Parete a doppio paramento: LMT > 160 su entrambe le facce.	Giunti verticali in corrispondenza della zona centrale dell'elemento inferiore (escluso il caso di parete in mattoni pieni disposti solo a diatoni).

Il metodo dei punteggi conduce quindi 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 carico. 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 sull'effettiva importanza dei vari elementi della regola dell'arte. La loro definizione e la loro "taratura" deriva dalla osservazione dei danni nei sismi che si sono avuti negli anni passati.

In funzione del valore di IQM, tramite la tabella 1 si può "classificare" la muratura in oggetto secondo tre categorie, dalla A (la migliore) alla C (la peggiore). Il comportamento atteso per ciascuna categoria e per ciascun tipo di azione è riportato nel manuale "scarcabile" dal sito prima indicato.

IQM e parametri meccanici nelle NTC 2008

Poiché uno degli obiettivi consiste nel valutare la possibile correlazione fra IQM ed i valori meccanici della muratura proposti dalle NTC 2008, si è pensato di utilizzare proprio le murature descritte nelle stesse NTC.

Le tipologie murature di base previste nella Circolare (Tab. C8A.2.1), se ci si limita al caso delle murature esistenti non consolidate, sono solo sei. A partire da esse, tramite la tabella C8A.2.2, si possono ottenere diverse variazioni tipologiche, fino ad arrivare ad un totale di 36 diverse tipologie murarie quando siano eseguite tutte le combinazioni possibili. Per queste 36 tipologie murarie si possono dunque ricavare, applicando i coefficienti previsti nella Circolare, i parametri f_m , τ_0 ed E con il loro intervallo (MIN-MAX).

Per ciascuna di queste 36 tipologie murarie "ufficiali" (cioè contemplate dalla Circolare delle NTC) è possibile, utilizzando la procedura prima descritta e considerando le specificità di ciascuna delle tipologie in oggetto, ricavare i valori di IQM per le diverse situazioni di carico e quindi andare ad esaminare le correlazioni:

- IQM verticale - f_m (resistenza a compressione media);
- IQM nel piano - τ_0 (resistenza a taglio media);
- IQM verticale - E (modulo elastico medio).

Ogni correlazione è stata valutata nei confronti:

- a) del valore medio del parametro meccanico indagato;
- b) del valore minimo;
- c) del valore massimo.

Ciascuna correlazione (Figure 5-11) è rappresentata su un diagramma avente in ascissa IQM (verticale o nel piano) ed in ordinata il parametro meccanico in questione (f_m , τ_0 oppure E). In tali diagrammi sono riportati i punti relativi alle 36 murature "ufficiali" e la curva di correlazione (assunta di tipo esponenziale).

Tabella 1

Metodo dei punteggi				
tipo di azione \ categoria muratura	A	B	C	
azioni verticali	$5 \leq IQ \leq 10$	$2,5 \leq IQ < 5$	$0 \leq IQ < 2,5$	
azioni orizzontali ortogonali	$7 \leq IQ \leq 10$	$4 < IQ < 7$	$0 \leq IQ \leq 4$	
azioni orizzontali complanari	$5 < IQ \leq 10$	$3 < IQ \leq 5$	$0 \leq IQ \leq 3$	

Tipologia di muratura	G.		τ_0		E		Maha buona	Giunti sovrati (< 30 mm)	Risoni o liscature	Cernere, inverte	Nucleo scadevole τ/s ampio
	(N/cm ²)	Mia	Mia	Mia	Mia	Mia					
Muratura in pietrame disordinato (tondi, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	2,0 3,2	800 1050	1,5	-	1,5	1,5	0,9		
Muratura a cordi sboccati, con paramento di limitato spessore e nucleo inteso	200 300	3,5 5,1	3,5 5,1	1020 1440	1,4	1,2	1,2	1,5	0,8		
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	5,6 7,4	1500 1980	1,5	-	1,2	1,3	0,8		
Muratura a cordi di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	2,8 4,2	900 1260	1,5	1,5	-	1,5	0,9		
Muratura a blocchi lapidei squadriati	600 800	9,0 12,0	9,0 12,0	2400 3200	1,2	1,2	-	1,2	0,7		
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	6,0 9,2	1200 1800	1,5	1,5	-	1,3	0,7		

4

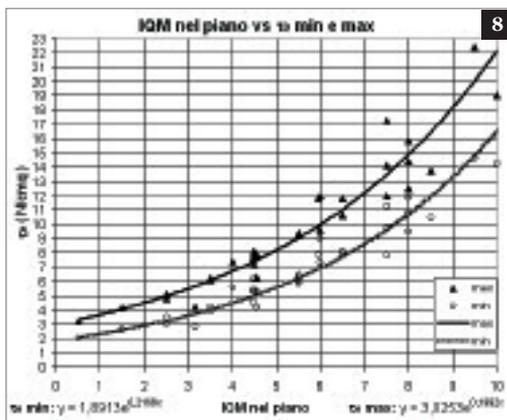
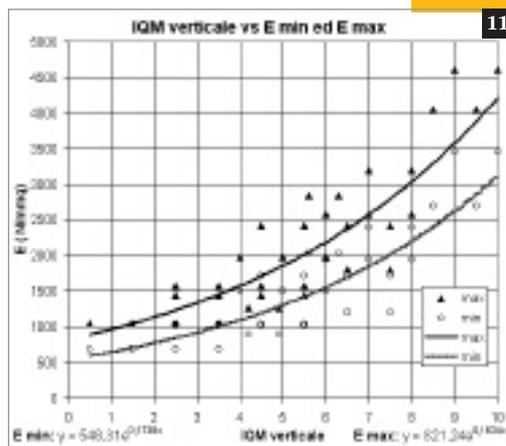
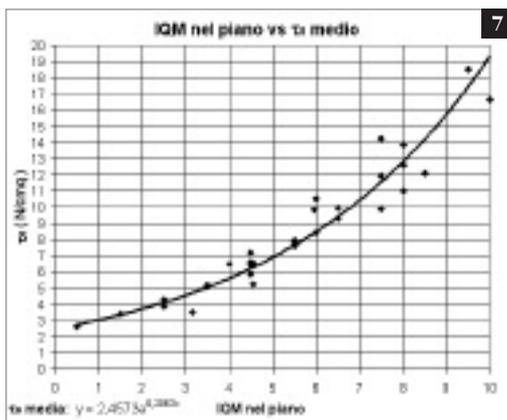
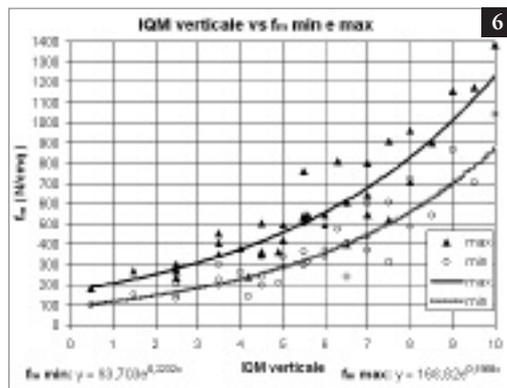
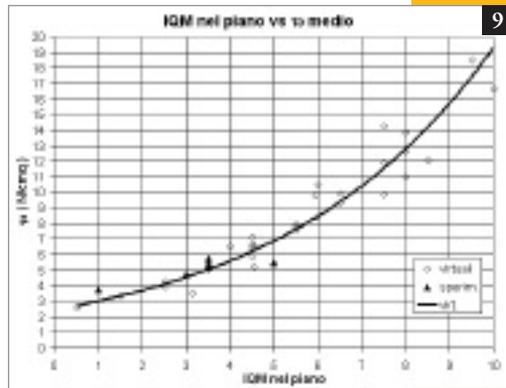
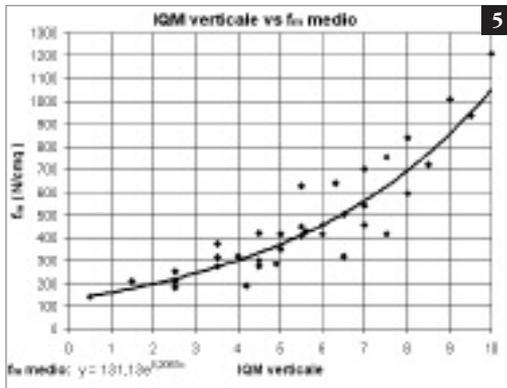
Tabella 2

	f_m	τ_0	E
curva dei valori massimi	0,85	0,91	0,78
curva dei valori medi	0,84	0,92	0,78
curva dei valori minimi	0,82	0,92	0,77

4. Sintesi delle tabelle C8A.2.1 e C8A.2.2 della Circolare relativamente alle sei tipologie murarie di base.

Tabella 1. Metodo dei punteggi: attribuzione delle categorie murarie.

Tabella 2. Indicatori R^2 per le varie correlazioni considerate.



5. Curve di correlazione fra f_m (valore medio) e IQM verticale. 6. Curve di correlazione fra f_m (valori minimo e massimo) e IQM verticale. 7. Correlazione fra τ_0 (valore medio) e IQM nel piano. 8. Correlazione fra τ_0 (valori minimo e massimo) e IQM nel piano. 9. Confronto fra la curva di correlazione IQM nel piano - τ_0 ed alcuni risultati sperimentali su murature esistenti (Regione Umbria, 2002). 10. Correlazione fra E (valore medio) e IQM verticale. 11. Correlazione fra E (valori minimo e massimo) e IQM verticale.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. AA.VV., 2002. Ricerche per la ricostruzione. Regione Umbria, Ed. DEI, Roma.
- [2]. 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.
- [3]. 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.
- [4]. Giuffrè, A., 1991. Letture sulla meccanica delle murature storiche. Ed. Kappa, Roma.
- [5]. Min. Infrastrutture, D.M. 14.01.2008, Norme Tecniche per le Costruzioni. Suppl. Ord. alla G.U. del 04.02.2008.
- [6]. 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.
- [7]. 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.

Grado di approssimazione delle leggi di correlazione

L'indicatore R^2 , di seguito descritto, fornisce una misura di quanto una curva di correlazione approssimi correttamente i valori osservati. Un indice R^2 pari ad 1 (valore massimo) corrisponde ad una perfetta coincidenza dei valori osservati con quelli forniti dalla curva. Esso è definito nel modo seguente:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

con:

$$SSE = \sum (Y_i - Y_{pi})^2$$
$$SST = \left(\sum Y_i^2 \right) - \frac{(\sum Y_i)^2}{n}$$

dove si indica con Y_i il valore del parametro meccanico in esame per la muratura i -esima; con Y_{pi} il valore dello stesso parametro meccanico previsto dalla curva di correlazione; con n il numero di valori osservati a disposizione (qui $n = 36$). Dalla **tabella 2** e dai diagrammi riportati nelle figure 5-8 appare evidente come la correlazione fra IQM nel piano e τ_0 sia più che soddisfacente ($R^2 > 0,92$) e anche quella fra IQM verticale ed f_m appare buona ($R^2 > 0,82$). Per quanto riguarda τ_0 si può aggiungere che la bontà della correlazione tra IQM per carichi orizzontali nel piano e la resistenza a taglio delle murature è stata confermata anche dal confronto con i dati disponibili per alcune prove sperimentali (vedi figura 9).

Meno soddisfacente appare invece la correlazione fra IQM verticale ed il modulo elastico E della muratura (figure 10,11) per la quale l'indice R^2 è inferiore a 0,79. Tra le motivazioni di questo minor grado di correlazione c'è sicuramente il fatto che secondo la Circolare il valore del modulo E rimane lo stesso per tipologie murarie piuttosto diverse tra loro: ad esempio, la presenza o meno di filari orizzontali della muratura o la presenza o meno di una buona connessione fra i paramenti murari non influiscono (per la Circolare) sui valori di E .

Nel caso di IQM evidentemente non è così; il rispetto o meno delle regole dell'arte prima citate (filari orizzontali e connessioni) porta a valori diversi della qualità muraria e quindi delle caratteristiche meccaniche.

Conclusioni. Possibile utilizzo di IQM

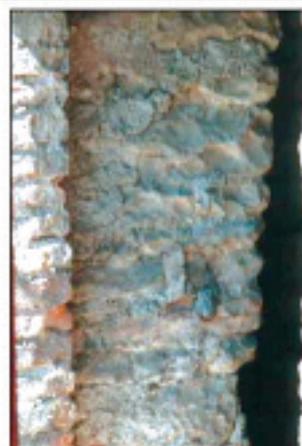
L'analisi della qualità muraria basata sull'IQM è in grado di fornire indicazioni affidabili per quanto riguarda

il comportamento meccanico del pannello murario. Pareti con un indice IQM elevato offrono buone risposte al sisma ed il loro collasso avviene per meccanismi di blocchi rigidi. Viceversa, pareti con indice IQM basso si disgregano caoticamente per azioni sismiche anche di modesta entità. Ciò può essere affermato sulla base di analisi a posteriori effettuate su un considerevole numero di casi di pareti murarie. Lo studio della correlazione fra IQM ed i valori previsti dalle NTC ha mostrato poi che tale indice può essere utilizzato per stimare i parametri meccanici che caratterizzano le diverse tipologie murarie. Infatti, le correlazioni mostrano una buona corrispondenza fra due approcci profondamente diversi: quello rappresentato dall'IQM basato sull'analisi qualitativa, ma approfondita, della tessitura muraria e della regola dell'arte e quello della sperimentazione fisica diretta (i cui risultati sono alla base delle tabelle delle NTC). Infatti, è stata trovata un'ottima correlazione fra la resistenza a taglio e l'IQM nel piano e una buona correlazione fra la resistenza a compressione e l'IQM verticale. La correlazione fra IQM verticale ed il modulo elastico E ha invece bisogno di ulteriori approfondimenti, anche a causa di quello che appare un difetto nella valutazione del modulo elastico E nelle tabelle citate. Dal punto di vista applicativo, vista l'aderenza dei risultati dell'IQM a quanto riportato nel dettato normativo, le correlazioni trovate consentono di valutare τ_0 e f_m di una muratura qualsiasi, non prevista nelle tabelle della Circolare o non ben corrispondente a quelle esistenti, ampliando così di fatto la casistica attualmente coperta dalla normativa. Un'ultima considerazione riguarda il maggiore livello di confidenza (LC2 invece di LC1) ottenibile grazie ad IQM anche in assenza di prove sperimentali, purché, ovviamente, si eseguano le "verifiche estese ed esaustive" sui dettagli costruttivi. Attualmente infatti il passaggio al livello LC2 si ottiene, per quanto riguarda le proprietà dei materiali, mediante prove sperimentali, il cui fine è però, in questo caso, solo quello di "riconoscere" la tipologia in esame tra quelle della tabella (ad esempio verificando se il valore di f_m ottenuto con i martinetti piatti doppi sta nell'intervallo min-max della tipologia "riconosciuta" nella tabella). La valutazione dell'IQM e la determinazione di τ_0 e f_m tramite la correlazione con il valore di IQM trovato consentono di ottenere lo stesso risultato (il "riscontro" con i valori della tabella) con in più la maggior sicurezza derivante dall'aver esaminato approfonditamente la muratura nei suoi variegati aspetti (e non il solo paramento esterno come avviene con i soli martinetti piatti doppi).

SCHEDA DI VALUTAZIONE DELLA QUALITA' MURARIA

AQ3

				<p>FOTO</p>														
<p style="text-align: center;">Assonometria</p>		<p style="text-align: center;">Prospetto</p>		<p style="text-align: center;">Sezione</p>		<p>SCHEMI</p>												
<p><i>Muratura di pietra di dimensioni minute, mista a ciottoli naturali o spaccati e pietrame.</i> Muratura caotica realizzata con pietre di vario tipo, laterizi, ciottoli di fiume naturali o spaccati, inserti in legno con funzione di incatenamento. Gli elementi presentano forme molto irregolari (scaglie di pietra) e dimensioni medio-piccole. La tessitura muraria è caotica, non sono rispettati i filari orizzontali, né lo sfalsamento dei giunti verticali; assenti i diatoni.</p>						<p>DESCRIZ.</p>												
<p>Ciottoli di fiume naturali e spaccati; pietre compatte e fratturate di colori vari. Laterizi (mattoni) di argilla cotta, interi, spaccati e scaglie. Malta di calce, talvolta si trova malta di argilla, ambedue di scadente qualità. Fotografie: un edificio in via Mezzaluna (AQ).</p>						<p>MATERIALI</p>												
		<p>Dimensioni e forme ricorrenti dei blocchi: $s = 8 + 12 \text{ cm}$ $h = 10 + 15 \text{ cm}$ $l = 15 + 30 \text{ cm}$</p>				<p>GEOMETRIA</p>												
P.D.	MA.	F. EL.	S. G.	R. EL.	OR.	D. EL.	Categoria	Verticali	Fuori piano	Nel piano	<p>ANALISI IQM</p>							
NR	NR	NR	NR	R	NR	NR	Metodo punteggi	C	C	C								
<p>LMT (sezione)</p>									110	110								
								<p>IQM</p>								0	0	0
																<p>Parametri meccanici: valori MIN-MAX</p>		



FOTO



Assonometria



Prospetto



Sezione

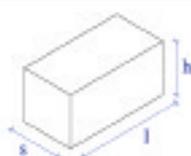
SCHEMI

Muratura di blocchi di pietra sbalzata talvolta con presenza di laterizi e ciottoli.
 Muratura in pietra calcarea bianca o rosata, talvolta sono presenti localmente laterizi o ciottoli di fiume. Tessitura muraria nel rispetto dell'orizzontalità dei filari con filari regolari di altezze diverse. Sfalsamento dei giunti verticali approssimativo e praticamente assenti i diatoni passanti.

DESCRIZ.

Ciottoli di fiume naturali e spaccati.
 Calcarei compatti e a frattura concoide, colori vari.
 Laterizi di argilla cotta.
 Malta di calce e sabbia di qualità intermedia.

MATERIALI



Dimensioni e forme ricorrenti dei blocchi:

s = 8 + 15 cm
 h = 8 + 13 cm
 l = 10 + 25 cm



GEOMETRIA

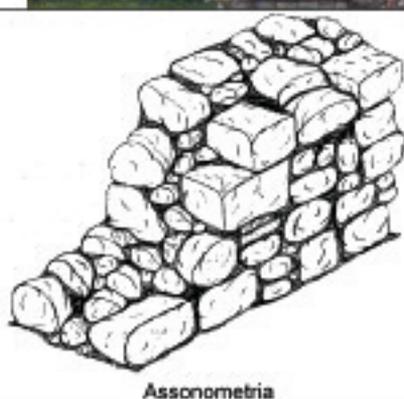
P.D.	MA.	F. EL.	S. G.	R. EL.	OR.	D. EL.	Categoria	Verticali	Fuori piano	Nel piano
NR	PR	R	PR	R	R	PR	Metodo punteggi	A	B	A

<p>N.B. L'ingranamento trasversale è assente (si veda il valore della LMT fuori piano).</p>	LMT (sezione)		119	158 -
	IQM	6,5	5,5	5,5
	Parametri meccanici: valori MIN-MAX	f_m (N/cm ²) 400-615	E (N/mm ²) 1697-2375	τ_0 (N/cm ²) 6,2-9,0

ANALISI IQM



FOTO



Assonometria



Prospetto



Sezione

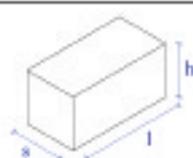
SCHEMI

Muratura di blocchi di pietra sbazzata e ciottoli con interposizione di pietrame e ciottolame.
 Muratura mista realizzata con elementi sbazzati di varie forme e dimensioni anche molto diverse tra loro, tessitura muraria non regolare; filari non sempre orizzontali e sfalsamento dei giunti verticali approssimativo. Assenza di elementi trasversali (diatoni).
 La parete esterna presenta una accuratezza maggiore nella scelta e disposizione delle pietre rispetto a quella interna.

DESCRIZ.

Ciottoli di fiume naturali e spaccati.
 Calcarci compatti e a frattura concoide, colori vari.
 Malta di graniglia di pietra e sabbia spesso polverulenta di qualità scadente.

MATERIALI



Dimensioni e forme ricorrenti dei blocchi:

s = 15 + 25 cm
 h = 8 + 15 cm
 l = 15 + 30 cm



GEOMETRIA

P.D.	MA.	F. EL.	S. G.	R. EL.	OR.	D. EL.	Categoria	Verticali	Fuori piano	Nel piano	
NR	PR	PR	NR	R	NR	PR	Metodo punteggi	B	C	C	
N.B. La presenza di zeppe fa in modo che MA e F.EL. siano parzialmente rispettate.								LMT (sezione)	110	122	
								IQM	2,5	2	2,5
								Parametri meccanici: valori MIN-MAX	f_m (N/cm ²) 164-278	E (N/mm ²) 847-1236	τ_0 (N/cm ²) 3,3-5,0

ANALISI IQM