



Resistenza a taglio delle murature: prove diagonali e correlazione con l'Indice di Qualità Muraria IQM

Antonio Borri, Giuseppe Paci

DICA – Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale. Università degli Studi di Perugia. Via G. Duranti 93, 06125 Perugia

Alessandro De Maria

Servizio Controllo Costruzioni e Protezione Civile. Provincia di Perugia. Via Palermo 106, 06129 Perugia

Keywords: muratura, resistenza a taglio, IQM, prove diagonali

ABSTRACT (STYLE ABSTRACT TITLE)

Il presente articolo espone gli sviluppi di un lavoro svolto dagli autori per il progetto ReLUI S I, nel quale si proponeva un metodo per la valutazione della qualità muraria, basato sulla determinazione di un Indice di Qualità Muraria (IQM) correlato al valore di alcuni parametri meccanici della muratura, in particolare della resistenza media a taglio, in modo tale da fornirne una stima numerica. Si è valutato il livello di attendibilità dei metodi suggeriti per la stima della resistenza a taglio media della muratura grazie ad alcuni test basati su risultanze di sperimentazioni eseguite su murature reali dell'Italia centrale (oltre trenta prove diagonali in situ su murature umbre ed abruzzesi). Ciò ha consentito di tarare la procedura proposta dagli autori, come anche di definire il campo di validità e di applicabilità. Viene proposta inoltre una suddivisione tipologica delle murature tipiche dell'Umbria, con il fine di associare ad ogni tipologia muraria omogenea un range di valori assumibili dai parametri meccanici della muratura, come suggerito dalla Circolare esplicativa delle NTC 2008. Infine, per alcune tipologie murarie (in mattoni e malta) si presenta un modello numerico di interpretazione delle prove diagonali che consente una migliore comprensione dei risultati sperimentali e del comportamento di tale categoria muraria, con particolare riferimento all'influenza dello sforzo normale verticale sui risultati delle prove diagonali.

1 L'INDICE DI QUALITÀ MURARIA IQM

Nelle ricerche svolte negli scorsi anni dagli autori per la Regione dell'Umbria (si vedano i riferimenti bibliografici) era stato messo a punto un indice numerico denominato Indice di Qualità Muraria (IQM), variabile fra 0 e 10 e dipendente dalla tipologia muraria esaminata e dalla direzione dell'azione sollecitante (azioni verticali, azioni orizzontali fuori piano ed azioni orizzontali nel piano).

Tale indice numerico era stato inserito, seppure in una versione semplificata, in una legge regionale, la L.R. Umbria n. 18 del 2002 sulla "Prevenzione Sismica".

Successivamente l'IQM fu perfezionato nell'ambito del Progetto ReLUI S 2008-2008 con il contributo delle Unità di Ricerca ReLUI S del Politecnico di Milano e dello IUAV di Venezia.

Nelle ricerche per ReLUI S 2005-2008 gli Autori avevano ottenuto, basandosi sull'indice IQM, una stima dei valori numerici dei seguenti parametri (riportati nella Circolare Esplicativa delle NTC 2008):

f_m = resistenza media a compressione della muratura;

τ_0 = resistenza media a taglio della muratura;

E = valore medio del modulo di elasticità normale della muratura.

La metodologia proposta per stimare tali parametri meccanici della muratura si basa, sostanzialmente, sulla correlazione che è stata osservata tra l'indice di qualità IQM ed i valori di f_m , τ_0 ed E riportati nella tabella in appendice C8A.2 della Circolare Esplicativa 617 del 14 febbraio 2009.

La determinazione di IQM richiede una conoscenza delle tecniche costruttive in grado di assicurare la corretta ed efficace messa in opera della muratura: i cosiddetti parametri della "regola dell'arte". Il tecnico rilevatore che

effettua l'osservazione della muratura dovrà esprimere un giudizio sul rispetto di sette parametri caratteristici della Regola dell'arte. Il giudizio può assumere tre forme: parametro rispettato (indicato con "R"), parametro parzialmente rispettato (indicato con "PR") e parametro non rispettato (indicato con "NR"). In base ai giudizi espressi sono attribuiti dei punteggi ad ogni parametro della regola dell'arte e tali punteggi sono poi combinati a formare il valore di IQM.

L'elemento da osservare è il singolo pannello murario. La sua qualità muraria viene valutata per ciascuna delle tre possibili direzioni dell'azione sollecitante: carichi verticali, azioni orizzontali che impegnano il pannello murario nel suo piano medio, azioni che impegnano il pannello murario ortogonalmente al suo piano medio.

La "regola dell'arte" è l'insieme di tutti gli 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 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 aspetti costruttivi che saranno presi in considerazione, e che, se ben eseguiti, nel loro insieme costituiscono la regola dell'arte, sono di seguito elencati.

- (MA.) Malta / contatto fra elementi.
- (P.D.) Ingranamento trasversale / diatoni.
- (F.EL.) Forma degli elementi.
- (D.EL.) Dimensione degli elementi.
- (S.G.) Sfalsamento fra i giunti verticali.
- (OR.) Presenza di filari orizzontali.
- (R.EL.) Resistenza adeguata degli elementi.

Per attribuire un giudizio sulla qualità della muratura, come si è detto, è indispensabile valutare (analiticamente o qualitativamente) in

che misura siano rispettati tali parametri della regola dell'arte. Solo dopo questa operazione preliminare sarà possibile comporre i sette giudizi parziali in una valutazione globale sintetica.

Nel lavoro conclusivo presentato per il progetto triennale ReLUIS 2005-2008 sono state riportate numerose schede analitiche con criteri di giudizio sul rispetto di ognuno dei sette parametri della regola dell'arte, con l'obiettivo di limitare la discrezionalità di giudizio dei singoli osservatori. Alla messa a punto di tali criteri hanno partecipato anche le UR ReLUIS del Politecnico di Milano e dell'IUAV di Venezia. Qui, per motivi di spazio, sarà possibile riprodurre solo gli schemi riassuntivi riportati sulla scheda di valutazione della qualità muraria (figure da 1 a 5), rimandando al lavoro citato per eventuali approfondimenti.

Nella figura 6 sono riportati i punteggi da attribuire ad ogni parametro della regola dell'arte in funzione del rispetto, parziale rispetto o non rispetto ed in funzione della direzione dell'azione sollecitante presa in considerazione. I punteggi ottenuti dalla tabella in figura 6 sono poi inseriti nella formula riportata di seguito, ottenendo un punteggio globale, chiamato IQM (Indice di Qualità Muraria) per ogni tipo di azione sollecitante.

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

Dunque tale procedura conduce a tre valori di IQM compresi fra 0 e 10: uno per ogni direzione di sollecitazione. Ciò rispecchia il diverso comportamento che lo stesso pannello murario può avere in funzione della direzione di sollecitazione: una muratura può essere ottimale per resistere ai carichi verticali e totalmente inadatta a sopportare azioni orizzontali nel piano o fuori piano.

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.

Figura 1. Criteri per il rispetto dei parametri della regola dell'arte riguardanti la resistenza e la dimensione degli elementi.

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.

Figura 2. Criteri per il rispetto del parametro della regola dell'arte riguardante la forma degli elementi resistenti.

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 interasse inferiore a 60 cm.

Figura 3. Criteri per il rispetto dei parametri della regola dell'arte riguardanti l'ingranamento trasversale e l'orizzontalità dei filari.

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).

Figura 4. Criteri per il rispetto dei parametri della regola dell'arte riguardanti l'ingranamento nel piano della parete.

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. Murature 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 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.

Figura 5. Criteri per il rispetto dei parametri della regola dell'arte riguardanti la qualità della malta.

	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
Indice IQM									

Figura 6. Punteggi da attribuire ai parametri della regola dell'arte in funzione del grado di rispetto e della direzione dell'azione sollecitante.

2 CORRELAZIONE DI IQM CON I PARAMETRI MECCANICI DELLA MURATURA

Per determinare una correlazione fra IQM ed i valori meccanici della muratura proposti dalle NTC 2008 si sono utilizzate le murature descritte nelle stesse NTC. Le murature previste nella Circolare (Tab. C8A.2.1) limitatamente al caso delle murature esistenti non consolidate sono date da 6 tipologie di base. A partire da tali tipologie, tramite la tabella C8A.2.2, la Circolare Esplicativa consente di modificare alcune caratteristiche della muratura e di derivare altre diverse tipologie murarie, fino ad arrivare ad un totale di 36 tipologie murarie quando siano eseguite tutte le combinazioni possibili. Queste 36 tipologie murarie desunte dalla Circolare verranno qui denominate "murature virtuali". Per esse, naturalmente, sono noti i parametri f_m , τ_0 ed E in quanto sono proposti nella tabella della Circolare Esplicativa nella forma di valore minimo e valore massimo assumibili dal parametro in esame.

Le correlazioni studiate sono le seguenti:

- correlazione di IQM verticale con f_m ;
- correlazione di IQM nel piano con τ_0 ;
- correlazione di IQM verticale con E.

Ogni correlazione è stata eseguita tre volte:

1. nei confronti del valore medio del parametro meccanico indagato (cioè la media aritmetica dei valori minimo e massimo suggeriti dalla Circolare esplicativa alle NTC 2008);
2. nei confronti del suo valore minimo riportato nella tabella citata;
3. nei confronti del suo valore Massimo riportato nella tabella citata.

Ogni correlazione è rappresentata su un diagramma cartesiano avente in ascissa IQM (verticale o nel piano) ed in ordinata il parametro meccanico d'interesse (f_m , τ_0 oppure E, minimo, medio o massimo). In tale diagramma per ognuna delle 36 murature virtuali è riportato un punto; tale punto avrà le coordinate individuate dall'IQM (verticale o nel piano) della muratura virtuale e dal valore (minimo, medio o massimo) del parametro meccanico della stessa muratura virtuale. Inoltre sul diagramma la correlazione è rappresentata dalla curva esponenziale per la quale risulta minima la distanza rispetto ai punti rappresentativi delle murature virtuali. L'equazione della curva è riportata sotto il diagramma. Nelle figure da 7 a 9 si riportano alcuni grafici di tali correlazioni.

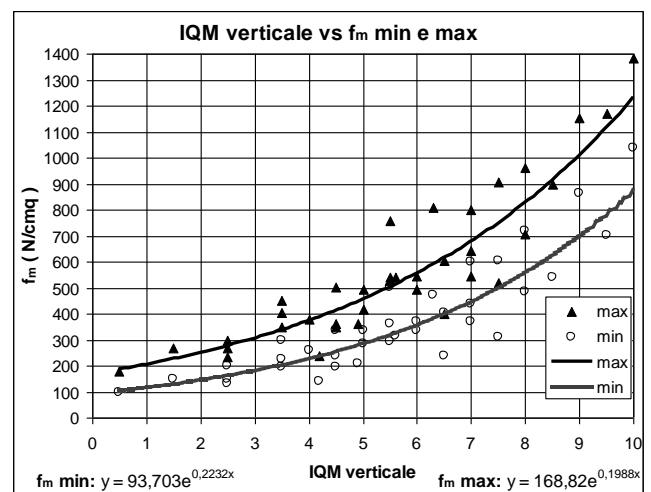


Figura 7. Curve di correlazione fra f_m (valori minimo e massimo) ed IQM verticale.

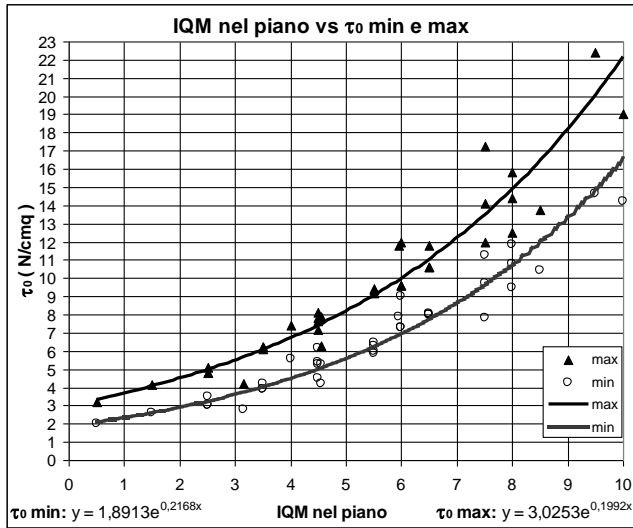


Figura 8. Correlazione fra τ_0 (valori minimo e massimo) ed IQM nel piano.

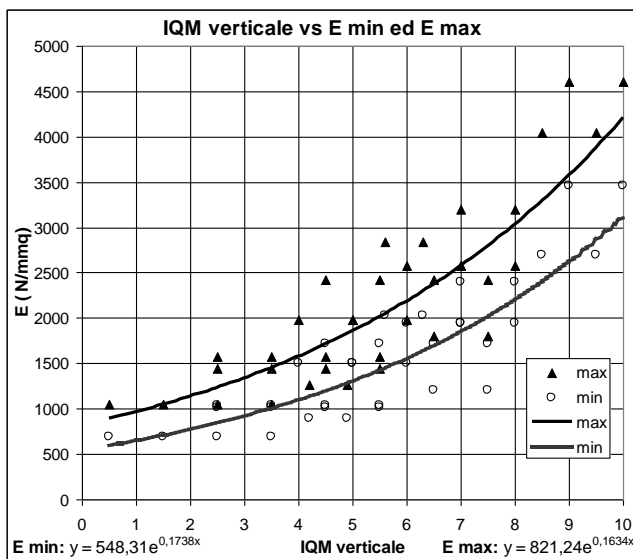


Figura 9. Correlazione fra E (valori minimo e massimo) ed IQM verticale.

3 LE PROVE SPERIMENTALI

Al fine di valutare la correttezza delle correlazioni illustrate in precedenza si è pensato di ricorrere a delle prove sperimentali su murature facenti parte di edifici esistenti. In particolare si è studiata la correlazione fra IQM (nel piano) e la resistenza tangenziale media τ_0 della muratura in quanto essa è, con ogni evidenza il parametro meglio correlato con IQM.

Le sperimentazioni sono state svolte mediante prove di compressione diagonale in quanto esse sono citate nella Circolare 617 del 14.02.2009.

I pannelli considerati appartengono a murature di edifici reali pertanto le prove di compressione diagonale sono prove in situ. Il motivo di tale scelta (che ha portato a scartare prove analoghe

su murature costruite in laboratorio¹) va ricercato nell'esigenza di stimare la resistenza dei pannelli murari realmente presenti sul territorio e quindi di ridurre quanto più possibile il disturbo all'oggetto della sperimentazione. Tale cura, oltre ad essere esplicitamente richiesta dalla Circolare 617 (appendice C8A.1.A.3), consentirà di iniziare la compilazione di un database regionale delle tipologie murarie, possibilità prevista dalle stesse NTC 2008.

La prova di compressione diagonale in situ consiste, in sintesi, nell'isolare un pannello di muratura integra di forma quadrata con lato circa di 120 cm, tramite quattro tagli e nell'applicare sugli spigoli di tale pannello delle forze diagonali che tendono a comprimerlo lungo una delle diagonali. Il pannello è preliminarmente strumentato con degli estensimetri applicati lungo le diagonali che misurano l'allungamento e l'accorciamento delle stesse diagonali. Ciò consente di valutare il diagramma costitutivo della muratura che compone il pannello mettendo in relazione la tensione tangenziale τ e la deformazione a taglio γ . Portando il pannello a rottura è possibile determinare la resistenza tangenziale media della muratura τ_0 . La procedura di determinazione di τ_0 a partire da tale tipologia di prova è illustrata al paragrafo C8.7.1.5 della Circolare 617/2009 ed è la procedura seguita nel presente lavoro. In base a tale procedura, il valore della resistenza tangenziale della muratura a partire dal carico diagonale massimo F_u applicato al pannello durante la prova la forza diagonale di compressione, è dato da:

$$\tau_0 = \frac{F_u}{3A}$$

dove A è la sezione orizzontale del pannello.

4 ELENCO DELLE MURATURE SPERIMENTATE

I pannelli murari per cui sono disponibili prove diagonali sono 34 (tabella 1) e se ne considereranno 32 in quanto due di essi (formati da mattoni pieni tessuti per soli diatoni) porteranno a svolgere considerazioni particolari.

Le prove di compressione diagonale sono state eseguite negli anni dal 1999 al 2011 da personale tecnico diverso per ogni campagna di prova ed in

¹ Uno dei problemi principali che si deve risolvere quando si sperimentano pannelli murari costruiti in laboratorio è la presa della malta e, se necessario, la simulazione del suo invecchiamento.

siti distinti, per gran parte ricadenti in Umbria. Tali circostanze, lungi dal costituire un punto debole del presente lavoro, consentono di cogliere

in una visione complessiva le caratteristiche ricorrenti delle tipologie murarie più diffuse sul territorio.

Tabella 1. Tipologie murarie sottoposte a prova e risultati in termini di τ_0 ed IQM.

N.	Sito	Pannello	Note	IQM nel piano	τ_0 (N/cm ²)
Pietrame listato (listatura di due filari di mattoni pieni)				1,30	2,93
1	Belfiore (Fo)	B-D-01-OR	Pietrame - listatura	2	3,4
2	Foligno	Scuole 2	Pietrame – ricorsi -malta scarsa	1	2,78
3	Foligno	Scuole 4	Pietrame – ricorsi in mattoni	1,5	3,06
4	Foligno	Scuole 5	Pietrame – ricorsi -malta scarsa	1	3,08
5	L'Aquila	XX Settembre	Pietrame scadente. Listatura	1	2,30
Mattoni pieni disposizione di soli diatoni				/	/
6	Belfiore (Fo)	B-D-02-OR	Soli diatoni – malta scadente	5	3,23
7	Foligno	Scuole 1	Soli diatoni - cemento	7	14,94
Laterizi forati, malta di discreta qualità				5,25	5,91
8	Gualdo Tadino	CD-07-G-ORI	Forati	5,25	5,24
9	Foligno	Palazzo Barnabò	Occhialoni	5,25	6,58
Blocchi di tufo tenero, malta scarsamente aderente ai blocchi				2,4	2,5
10	Foligno	TufoFo	Tufo, malta scarsa	2,4	2,5
Pietra semiorganizzata con prevalenza di pietre sbazzate ed inserti di mattoni				2,5	3,73
11	Cagli	Cagli 3	Pietre, spess.67cm, malta scarsa	3	4,10
12	Sellano	S-D-09-OR	Pietre semiorganizzate	1,5	3,39
13	Foligno	Scuole 3	Pietrame e mattoni, malta buona	3	3,68
Muratura di pietre non lavorate né sbazzate disposte caoticamente				0,57	2,03
14	Sellano	M-D-08-OR	Pietrame caotico, zeppe, malta scarsa, due paramenti	1	2,22
15	Farnetta	CD-03-F-ORI	Pietrame caotico, malta scarsa, due paramenti	0,5	2,17
16	Farnetta	CD-04-F-ORI	Pietrame caotico, malta scarsa, due paramenti	0,5	2,26
17	Montefalco	CD-23-M-ORI	Pietrame caotico, malta scarsa, due paramenti	0,5	1,85
18	Trevi	CD-25-T-ORI	Pietrame caotico, malta scarsa, due paramenti	0,5	1,38
19	Trevi	CD-26-T-ORI	Pietrame caotico, malta scarsa, due paramenti	0,5	2,05
20	L'Aquila	S. Maria Misericordia	Pietrame caotico. Malta scadente	0,5	2,30
Pietrame vario non organizzato; presenza di qualche elemento sbazzato				1,38	2,97
21	Sellano	S-D-10-OR	Pietrame vario, zeppe, malta scarsa, due paramenti	1,5	3,21
22	Sellano	G-D-11-OR	Pietrame vario, zeppe, debole ammorsatura	1	2,5
23	Sellano	P-D-13-OR	Pietrame vario, debole ammorsatura	1,5	2,78
24	L'Aquila	Palazzo Farinosi	Pietrame vario. Zeppe	1,5	3,40
Pietrame a sacco, paramenti esterni sottili ma organizzati, spess. 60-70cm				0,72	2,48
25	Foligno	Ospedale 1	Pietrame a sacco, malta scarsa	0,5	2,11
26	Foligno	Ospedale 2	Pietrame a sacco, mattoni, malta scarsa	0,5	2,70
27	Foligno	Ospedale 3	Pietrame a sacco, malta scarsa	1	1,94
28	Foligno	Ospedale 4	Pietrame a sacco, malta scarsa	0,5	2,72
29	Foligno	Ospedale 5	Pietrame a sacco, malta scarsa, intonaco	1	3,30
30	Foligno	Ospedale 6	Pietrame a sacco, malta scarsa, rivestimento	0,5	2,06
31	Foligno	Comune, pann. 30	Mattoni esterni e nucleo interno	1,05	2,53
Muratura in pietrame lesionato o di qualità scadente				0,87	1,05
32	Foligno	Comune, pann. 28	Pietrame -mattoni esterni -malta scarsa	1,05	1
33	Foligno	Comune, pann. 29	Pietrame -mattoni esterni -malta scarsa	1,05	1,10
34	Pale	Pale, pann. 1	Pietrame caotico, malta scarsa	0,5	1,05

La tabella 1 indica la denominazione dei pannelli, il sito dell'edificio di appartenenza, una descrizione generale della tipologia muraria, il valore di IQM nel piano ed il valore sperimentale di τ_0 . Inoltre, nella stessa tabella, è riportato il valore medio per tipologia muraria sia per IQM nel piano che per τ_0 sperimentale. La tabella presentata può costituire un riferimento per un

aggiornamento del database delle murature su base regionale come previsto dalla Circolare n. 617 del 14 febbraio 2009 dove, al punto C8A.1.A.3, si legge: “qualora esista una chiara, comprovata corrispondenza tipologica per materiali, pezzatura dei conci, dettagli costruttivi, in sostituzione delle prove sulla costruzione oggetto di studio possono essere utilizzate prove

eseguite su altre costruzioni presenti nella stessa zona. Le Regioni potranno, tenendo conto delle specificità costruttive del proprio territorio, definire zone omogenee a cui riferirsi a tal fine”.

Dunque tale possibilità consente il raggiungimento del livello di conoscenza LC3 senza svolgimento di prove sperimentali.

5 PRIMA DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Per ogni muratura su cui è disponibile una prova sperimentale di compressione diagonale con il valore di τ_0 , è stato valutato anche l'indice IQM nel piano. In tal modo ogni muratura sperimentata è rappresentata da un punto nel piano cartesiano IQM- τ_0 . Disponendo i punti relativi a tutte le 34 murature sperimentate in tale piano si coglie immediatamente un soddisfacente livello di precisione della correlazione determinata in precedenza (figura 10). La figura 11 mostra la correlazione fra IQM nel piano e la τ_0 e i risultati sperimentali aggregati per tipologie murarie con caratteristiche omogenee. Da entrambe le figure 10 ed 11 risulta una soddisfacente conferma sperimentale della legge di correlazione ipotizzata fra IQM nel piano e τ_0 .

Bisogna anche evidenziare che la conferma sperimentale di tale correlazione è avvenuta per murature di qualità medio-scarso (non sono finora state sperimentate murature di buona qualità).

Inoltre si è notata una tipologia muraria particolare per la quale la correlazione ipotizzata

non sembra funzionare: la muratura in mattoni pieni disposti con tessitura di soli diatoni.

Infatti per i due pannelli murari (nelle figure 12 e 13) denominati 6 e 7 appartenenti a tale tipologia si sono ottenuti dei risultati diversi pur se tali pannelli appaiono pressoché uguali per tessitura, forma e dimensioni degli elementi, spessore dei giunti di malta. L'unica differenza riguarda la qualità della malta che, nel caso del pannello n. 6 (Belfiore) è malta di calce di cattiva qualità e nel caso del pannello n. 7 (Foligno) è malta cementizia di buona qualità.

L'ipotesi in grado di spiegare le discrepanze fra le previsioni fatte con IQM ed i risultati sperimentali delle prove diagonali è che, per questo tipo di muratura, IQM sottostima l'influenza della malta quando questa è di buona qualità. Infatti nella procedura IQM il massimo valore assumibile dal parametro “qualità della malta” è pari a 2 (su un totale di 10 punti).

Nella tipologia di muratura di mattoni con soli diatoni le dimensioni della base minore e dell'altezza del mattone sono tali che i giunti verticali di malta consentono la formazione di una lesione a 45 gradi passante esclusivamente per i giunti di malta senza che sia interessato alcun elemento laterizio. Poiché nella prova di compressione diagonale la modalità di rottura dei pannelli è la formazione di una lesione per taglio inclinata di 45 gradi, risulta evidente come i risultati di tale prova siano fortemente influenzati dalla resistenza e qualità della malta.

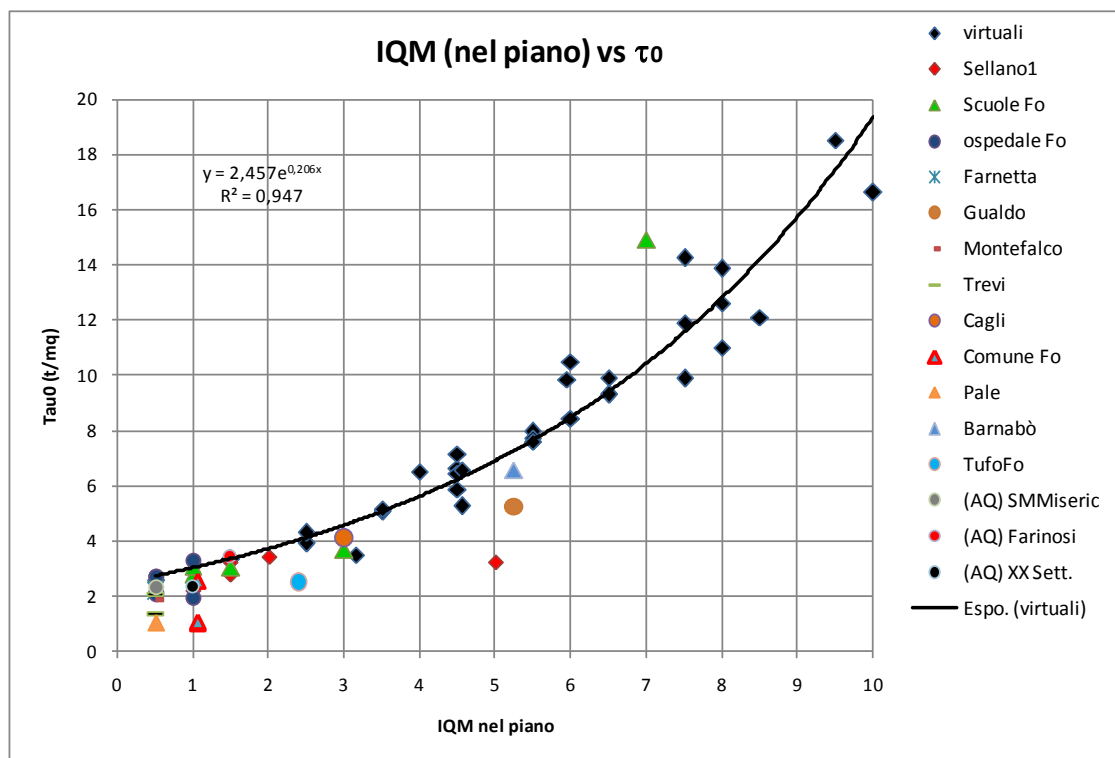


Figura 10. Correlazione fra IQM (nel piano) e τ_0 e valori sperimentali di tale correlazione riportati per le 34 murature sperimentate. Si notano i due pannelli numero 6 e 7 la cui τ_0 non è in linea con le previsioni tramite IQM.

IQM (nel piano) vs τ_0 - per classi di murature (esclusa muratura soli diatoni)

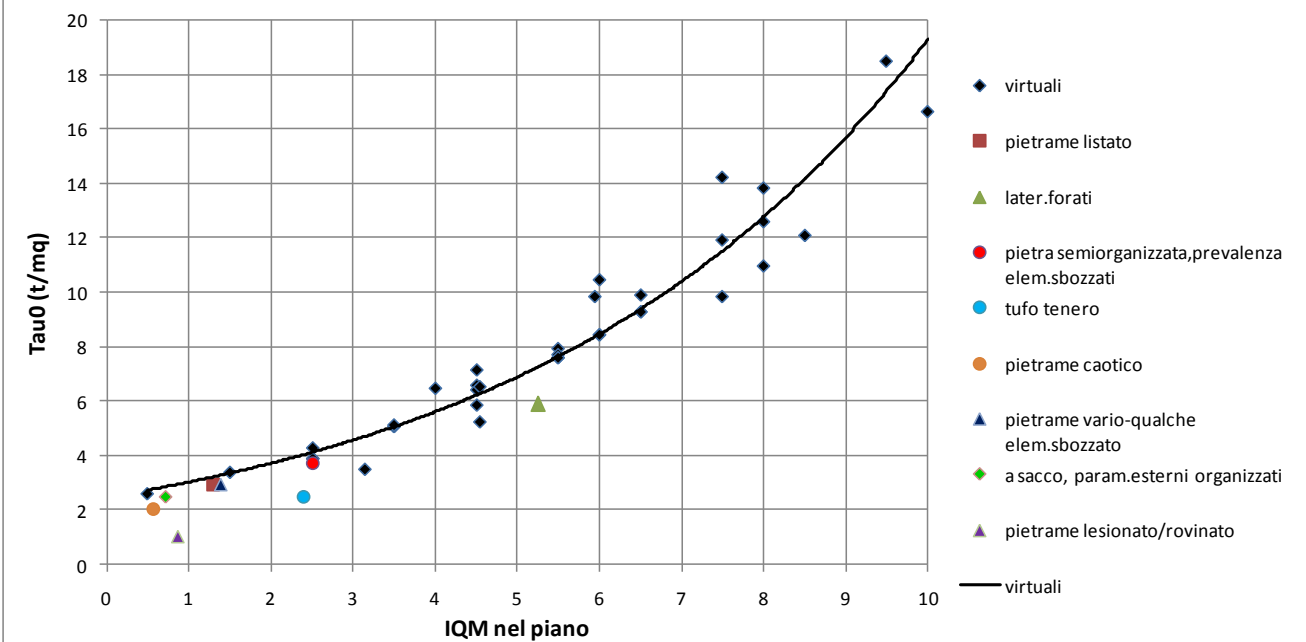


Figura 11. Correlazione fra IQM (nel piano) e τ_0 e valori sperimentali di tale correlazione per tipologie murarie.



Figura 12. Pannello n. 6 a Belfiore (Foligno) in muratura di mattoni tessuta per soli diatoni con malta di qualità scadente. Per tale pannello si ha $IQM = 5$ e la prova diagonale ha fornito: $\tau_0 = 3,3 \text{ N/cm}^2$.



Figura 14. Comportamento di una parete in muratura di soli diatoni dopo il sisma abruzzese del 6 aprile 2009.



Figura 13. Pannello n. 7 a Foligno. Muratura di mattoni tessuta per soli diatoni con malta cementizia. Per tale pannello si ha $IQM = 7$ e la prova diagonale ha fornito: $\tau_0 = 15,3 \text{ N/cm}^2$.

Gli altri parametri della regola dell'arte sono poco influenti, in particolare quelli relativi alla tessitura (che comunque sono fissati dalla scelta della particolare tipologia muraria) ed alla resistenza dei mattoni. In questo caso tali parametri non entrano in gioco: la grande dimensione dei giunti di malta (circa 3 cm sia per quelli orizzontali che per quelli verticali) rispetto alle dimensioni della faccia più piccola del mattone (5,5 cm x 12 cm) unitamente al fatto che la lesione a 45 gradi passa unicamente per la malta, fanno sì che l'unico parametro che determina la resistenza a taglio dell'intero pannello murario sia la resistenza della malta. In altri termini: non appena si forma una lesione nella malta per questa tipologia muraria si è già raggiunta la massima resistenza possibile, non ci sono altre risorse resistenti.

Non sarebbe così, per esempio, se i mattoni fossero disposti con una tessitura diversa, per

esempio se fossero più allungati. In tal caso si troverebbe una τ piuttosto bassa in corrispondenza della prima fessurazione della malta ma, per giungere al collasso del pannello murario occorrerebbe una τ_0 molto più elevata perché si dovrebbe rompere l'elemento in laterizio.

6 MODELLAZIONE DELLA PROVA DI COMPRESSIONE DIAGONALE SU PANNELLI DI SOLI DIATONI

Per valutare la correttezza di quanto affermato al paragrafo precedente è stato implementato un modello al computer della prova di compressione diagonale su un pannello di soli diatoni. Il software utilizzato per la modellazione è Ansys. L'elemento finito impiegato è lo shell 181 a cui è stato attribuito uno spessore di 25 cm pari a quello dei due muri sperimentati nella realtà.

Il modello ha le seguenti caratteristiche: il muro è di soli diatoni perfettamente tessuti (giunti verticali che ricadono esattamente al centro del lato del mattone superiore e di quello inferiore); è modellato come un unico oggetto solido, dunque i mattoni non possono scorrere né staccarsi. Tale tecnica di modellazione condurrà alla crisi del modello non appena si supera la resistenza a trazione della malta² (o quella a compressione della stessa malta o quella a trazione o compressione dei mattoni, ma tale evenienza, come si vedrà, non si verificherà). I giunti di malta hanno spessore 3 cm sia in orizzontale sia in verticale. Lo spessore del muro è di 25 cm ed ogni mattone ha dimensioni 25x12x5,5 cm. Non s'è considerato l'attrito. Sono stati modellati anche gli elementi ripartitori in acciaio.

Sono stati realizzati 4 modelli in cui cambia unicamente la qualità della malta tramite variazioni delle resistenze e del modulo E riassunte nella tabella 2, dove sono state riportate anche le caratteristiche dei mattoni. Per definire tali parametri ed il loro campo di variabilità s'è fatto riferimento principalmente al database

² L'opzione è funzionale all'obiettivo della modellazione, infatti come si è detto per un muro in soli diatoni si ha una sostanziale coincidenza tra la formazione di una lesione sulla malta e la crisi dell'intero pannello (ciò è quanto emerge dall'osservazione dei risultati sperimentali sui pannelli portati a rottura). Se si volesse studiare con un modello simile una muratura con tessitura diversa, tale da non consentire la formazione di una lesione a 45 gradi passante solo per i giunti di malta, allora si dovrebbe introdurre l'opzione dello spostamento imposto in quanto la rottura del pannello non coinciderebbe più con la formazione delle prime lesioni sulla malta.

messo a punto nell'ambito del Progetto ReLUIS 2005-2008 (Augenti, 2008).

Tabella 2. Caratteristiche dei mattoni e della malta utilizzate nel modello.

Prova	Malta (N/mm ²)			Mattoni (N/mm ²)		
	σ_{TRAZ}	σ_{COMP}	E	σ_{TRAZ}	σ_{COMP}	E
1	0,125	1,25	500	3	30	20000
2	0,25	2,5	1000	3	30	20000
3	1	10	4000	3	30	20000
4	2	20	8000	3	30	20000

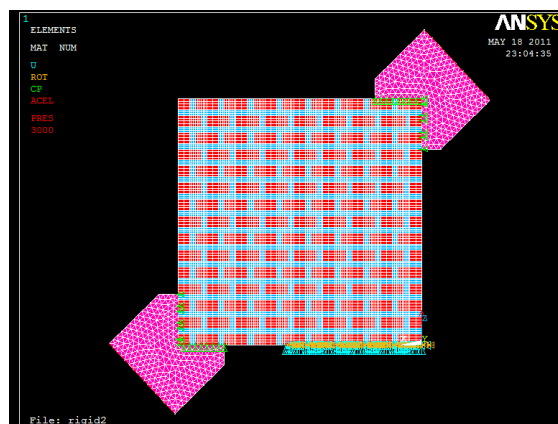


Figura 15. Il modello agli elementi finiti della prova di compressione diagonale su un pannello di soli diatoni.

7 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE

Si riportano in tabella 3 i risultati ottenuti dalla modellazione del pannello di soli diatoni per i quattro tipi di malta definiti in precedenza, sia in forma tabellare sia in forma grafica. Come si può notare, sebbene sarebbe auspicabile aumentare il numero delle modellazioni introducendo altri valori di resistenza a trazione della malta, si profila una dipendenza lineare della τ_0 del pannello murario rispetto alla resistenza a trazione della malta.

Tabella 3. Risultati della modellazione

Prove	σ_{TRAZ} malta (MPa)	F_u (kN)	τ_0 (N/cm ²)
1	0,125	36,75	3,9
2	0,25	88,20	9,3
3	1	401,80	42,5
4	2	641,90	67,9

Inoltre, nel caso del pannello 6 si ottiene anche una buona corrispondenza in termini numerici fra modello e prova sperimentale in quanto la τ_0 ottenuta dalla prova di tale pannello (con malta di scarsa qualità) è 3,3 N/cm², un valore molto vicino a quelli ottenuti nella modellazione per malte di scarsa qualità (prova 1).

Invece il pannello 7, dotato di malta cementizia, ha manifestato nella prova sperimentale una τ_0 inferiore rispetto a quanto

8 RINGRAZIAMENTI

Ricerca eseguita con il contributo DPC-ReLUIS (Progetto triennale 2010-2013; Task 1.1.1).

previsto nel modello. Ciò può essere imputato alla particolare modalità di rottura del pannello 7 dove si può notare che si è avuto il distacco della malta dal mattone e non la rottura della malta per trazione (figura 16); infatti la malta all'interno dei giunti verticali del pannello 7 appare integra, ma probabilmente non aderiva bene ai mattoni.

Si può sintetizzare affermando che per i pannelli murari dove non si riesce ad attivare la resistenza degli elementi ma solo quella della malta, la prova di compressione diagonale in realtà misura la resistenza della malta e non quella a taglio della muratura. Quando viene meno anche la resistenza della malta allora la stessa prova risulta difficilmente realizzabile. Ciò è rappresentato dal modello meccanico in figura 18: in un pannello privo di legante e del confinamento dei muri circostanti (che sono stati tagliati per eseguire la prova) lo svolgimento stesso della prova risulta non possibile.



Figura 16. Modalità di rottura del pannello 7: distacco della malta dalla superficie dei mattoni.

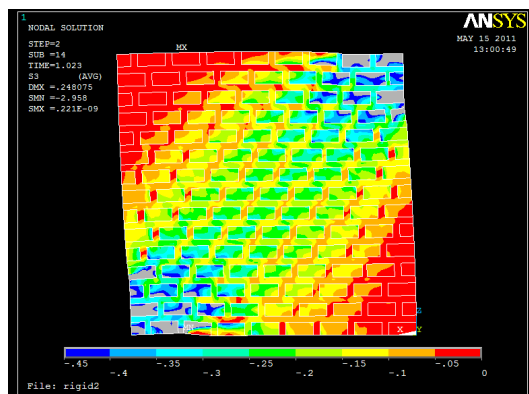


Figura 17. Tensioni principali di compressione ottenute dal modello Ansys.

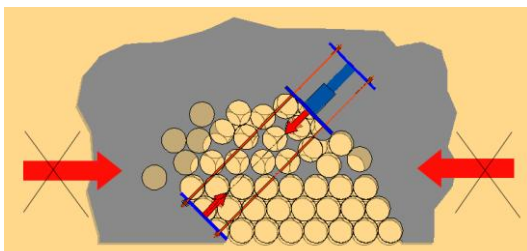


Figura 18. Modello meccanico per la prova di compressione diagonale su pareti prive di confinamento e con legante non sufficientemente resistente (figura di Giovanni Cangi).

REFERENCES

- Augenti, N. Raccolta dati esistenti sui parametri meccanici ed elastici delle murature. Progetto ReLUIS 2005/2008 - Linea di ricerca 1. <http://www.reluis.it/dbuninadist/>
- 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 georeferenziato. Ed. Petrucci, Città di Castello.
- AA.VV., 2002. Ricerche per la ricostruzione. DEI Tipografia del Genio Civile, Roma.
- AA.VV., Borri, A. (direttore scientifico), 2011. Manuale delle Murature Storiche. DEI Tipografia del Genio Civile, Roma.
- 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., 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.
- Borri, A., De Maria, A., 2009. L'indice di Qualità Muraria (IQM): Evoluzione ed Applicazione nell'Ambito delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008. *Atti del XIII Convegno Nazionale L'ingegneria Sismica in Italia*, 28.06.2009-02.07.2009, Bologna.
- Borri, A., De Maria, A., 2009. Scheda di valutazione dell'IQM (indice di qualità muraria). ReLUIS 3rd year report, Annex 3b.1-UR06-1.
- Borri, A., De Maria, A., 2009. Esempi compilati di scheda di valutazione dell'IQM. ReLUIS 3rd year report, Annex 3b.1-UR06-3.
- Borri, A., De Maria, A., 2009. Linee guida per la compilazione della scheda di valutazione dell'IQM. ReLUIS 3rd year report, Annex 3b.1-UR06-2.
- Borri, A., De Maria, A., 2009. Tabelle di correlazione tra IQM e tabelle delle NTC 2008. ReLUIS 3rd year report, Annex 3b.1-UR06-4.
- 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.
- Giuffrè, A., 1991. Letture sulla meccanica delle murature storiche. Ed. Kappa, Roma.
- Min. Infrastrutture, D.M. 14.01.2008, Norme Tecniche per le Costruzioni. Suppl. Ord. alla G.U. del 04.02.2008
- 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.