Il metodo IQM per la stima delle caratteristiche meccaniche delle murature: allineamento alla circolare n. 7/2019

Antonio Borri[a], Alessandro De Maria[b]
[a] *Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia, via Goffredo Duranti 93, Perugia*
[b] *Servizio Rischio Sismico, Regione Umbria, via Palermo 86, Perugia*

Keywords: Qualità muraria, metodo IQM, caratteristiche meccaniche delle murature, risposta sismica, costruzioni esistenti in muratura.

ABSTRACT
L'articolo illustra l'aggiornamento, alla luce delle modifiche introdotte dalle NTC 2018 (MIT, 2018) con la relativa Circolare esplicativa (Cons. Sup. LL.PP., 2019) della procedura per la determinazione dell'Indice di Qualità Muraria IQM. Tale metodo di valutazione è nato nel 2000 in Umbria e si è perfezionato nel corso degli anni successivi grazie anche alle ricerche condotte in ambito ReLUIS. Esso consiste nell'attribuire un giudizio di rispetto (completo o parziale, o mancato rispetto) per alcuni parametri tipici della regola dell'arte muraria. Sulla base dei giudizi espressi si perviene ad un indice numerico, variabile tra zero e dieci, correlato con la qualità muraria e correlabile con i parametri meccanici più significativi per le murature.
Nell'articolo, dopo aver ricordato l'importanza ed il ruolo della qualità muraria nel comportamento strutturale delle costruzioni in muratura esistenti (in particolare ai fini di una adeguata risposta sismica) ed aver brevemente riassunto il metodo per la determinazione dell'IQM, vengono mostrate le modifiche che sono state necessarie per allinearlo alle nuove e più dettagliate indicazioni normative introdotte dalla Circolare n. 7/2019.

1 INTRODUZIONE

I sismi che hanno colpito l'Italia centrale nel 2016 hanno ancora una volta confermato l'importanza, dal punto di vista della risposta strutturale di un edificio, della qualità meccanica dei suoi elementi murari verticali, o "qualità muraria" tout court, intesa come l'insieme di quelle caratteristiche tipologiche-costruttive (materiali impiegati, tessitura, organizzazione della sezione, ecc.) che ne influenzano in modo determinante il comportamento strutturale.

Si è visto infatti come, nelle zone vicino agli epicentri, la maggior parte delle costruzioni costituite da murature caotiche ed irregolari abbiano subìto crolli totali o parziali per disgregazione, e come, al contrario, edifici realizzati con muratura tessuta a regola d'arte e ben costruiti abbiano risposto positivamente, in generale, alle ripetute sollecitazioni indotte da quella sequenza sismica.

Molte delle costruzioni vicine all'epicentro del 24 agosto 2016 (magnitudo 6.1 R), in massima parte di scarsa o scarsissima qualità muraria e costruttiva, sono infatti crollate, mentre quelle più direttamente interessate dai sismi del 26 ottobre 2016 (magnitudo 5.3 R e 5.9 R) e del 30 ottobre 2016 (magnitudo 6.5 R), con epicentri vicino a Norcia, hanno fornito risposte diversificate proprio in funzione delle differenze in termini di qualità muraria: le costruzioni ordinarie del centro storico di Norcia, consolidate negli anni '80 e successivi, o ricostruite con muratura in blocchi laterizi, hanno subìto solo danni limitati, più o meno significativi, mentre nel resto di quel territorio le costruzioni in pietrame irregolare non consolidate hanno avuto numerosi crolli (Borri e altri, 2018a), (Borri e altri, 2018b).

Da ricordare poi il disastroso comportamento delle chiese in tutta la Valnerina (ma non solo), crollate o gravemente danneggiate (Borri e Sisti, 2017), (Borri ed altri, 2017a) tutte costituite da murature in pietrame caotico e non rispettoso di alcuna regola dell'arte, sulle quali, in genere, mai

si era intervenuti in modo significativo dal punto di vista strutturale, a causa dei vincoli di "tutela".

Le situazioni sono varie e la realtà è certamente complessa e difficilmente inquadrabile in schemi precostituiti; perciò, in generale, non si può dire che l'unica causa dei crolli sia stata la cattiva qualità muraria. In molti casi, a queste carenze si sono associate mancanze nei collegamenti, presenza di elementi spingenti e di altri elementi di vulnerabilità. Tuttavia, l'osservazione effettuata nei luoghi colpiti dai sismi passati in occasione della compilazione delle schede di rilievo del danno per gli edifici ordinari ha mostrato che sui grandi numeri, considerando cioè, per l'analisi del danno, un campione numericamente significativo di edifici, il fattore "qualità muraria" risulta molto significativo (fig. 1).

Appare quindi confermata l'opportunità di considerare questo aspetto al primo posto, quando si è chiamati ad esprimere valutazioni di sicurezza o a progettare interventi di consolidamento per un edificio in muratura.

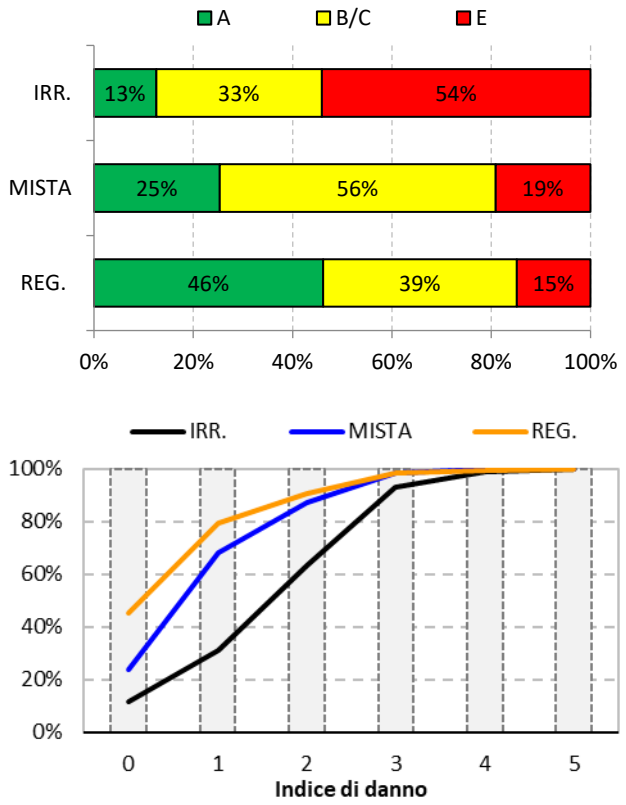


Figura 1. Edifici del centro storico di Norcia a seguito degli eventi sismici del 2016: influenza della tipologia di muratura sull'agibilità degli edifici (a) e sulla percentuale cumulata di edifici con indice di danno inferiore al valore riportato sull'asse delle ascisse (b). Le tessiture murarie sono distinte in regolari, irregolari e miste. Per l'agibilità si hanno i seguenti esiti: A = agibile; B / C = temporaneamente/parzialmente inagibile; E = inagibile. I livelli di danno vanno da 0 = assenza di danno a 5 = crollo (figura tratta da (Borri ed altri, 2017b)).

2 LA "GERARCHIA DELLE RESISTENZE" PER GLI EDIFICI ESISTENTI IN MURATURA

Si ricordano qui, brevemente, alcune delle particolarità più significative, dal punto di vista della risposta sismica, delle costruzioni murarie.

Come noto, la muratura tradizionale, categoria nella quale ricade gran parte delle murature esistenti, non è un materiale nel senso moderno del termine, cioè il risultato di un processo industriale, controllato e codificato. Si tratta, invece, di un prodotto artigianale, che può presentarsi con varianti e declinazioni dipendenti dal luogo, dall'epoca di realizzazione, dall'importanza dell'edificio, dalla porzione dell'edificio in esame, dall'abilità delle maestranze impegnate per la sua realizzazione, ecc.

L'assemblaggio, più o meno ordinato e razionale, di elementi distinti, con l'interposizione di un legante, la malta, che quasi mai ha avuto una funzione vera e propria di legante, ma serviva solo a regolarizzare le superfici di appoggio tra gli elementi, ha dato luogo ad un materiale con caratteristiche molto particolari, tra cui la non resistenza a trazione, la non linearità nei suoi comportamenti, la disomogeneità e l'anisotropia.

Ma per poter condurre analisi strutturali in termini meccanici bisogna poter escludere la possibilità (spesso, purtroppo, assai concreta) che la costruzione non riesca a fornire alcun tipo di risposta strutturale, perché qualsiasi comportamento meccanico viene anticipato dal fenomeno della disgregazione muraria.

Tale evento si presenta spesso, durante i sismi, nelle costruzioni con muratura di scadente qualità (ad esempio: malta povera, elementi di forma irregolare e dimensioni medio-piccole, paramenti scollegati tra loro); sotto l'effetto di azioni dinamiche e cicliche rilevanti la muratura è incapace di "tenere insieme" gli elementi che la costituiscono e si disgrega.

Perché avvenga la disgregazione muraria possono essere più che sufficienti le componenti orizzontali di tali accelerazioni, ma se poi, oltre alle componenti orizzontali, ci sono anche rilevanti componenti verticali del sisma (come accade quando ci si trova in prossimità degli epicentri) è evidente che la precarietà di quelle situazioni murarie, già problematiche, si aggrava ulteriormente.

Questo fenomeno viene considerato in un modo marginale dalle norme tecniche: nella Circolare 2019 la parola "disgregazione" è presente, con questa accezione, solo una sola

volta (nel par. C8.7.1.2.1 - Analisi dei meccanismi locali di corpo rigido). Questo perché si dà per scontato ciò che, nella realtà del nostro patrimonio edilizio, non lo è affatto, ovvero che un edificio esistente possieda sempre la capacità di fornire una qualche risposta di tipo meccanico alle azioni sismiche.

Purtroppo così non è, e la maggior parte delle vittime dei passati terremoti è dovuta proprio a crolli avvenuti per fenomeni di tipo disgregativo.

Questo tipo di comportamento non lo si scopre certo adesso; lo hanno messo in evidenza vari ricercatori; solo per citarne alcuni: Antonino Giuffrè (Giuffrè, 1991 e Giuffrè, 1993), Baggio e Carocci in (Bernardini, 2000), Domenico Liberatore (che introduce anche le gerarchie dei meccanismi) (Liberatore, 2004), Antonio Borri e Alessandro De Maria (Borri e De Maria, 2004).

Il problema principale consiste nella mancanza, allo stato attuale, di modelli di analisi e di previsione di questo fenomeno, che non può essere affrontato con gli usuali metodi dell'analisi strutturale. Il metodo IQM, come si vedrà in seguito, propone un criterio per valutare la maggiore o minore predisposizione a disgregarsi di una muratura in caso di sisma, ma si tratta comunque di un approccio di tipo euristico che necessita ancora di opportuni approfondimenti.

In tutti questi casi, quelli cioè in cui una insufficiente qualità meccanica della muratura non consente di avere una risposta di tipo strutturale, il comportamento delle costruzioni può essere chiamato "di tipo disgregativo".

Se invece la muratura, grazie alla coesione e all'ingranamento derivante dalla tessitura e dalla tipologia costruttiva, ha qualità meccaniche sufficienti per rispondere - senza disgregarsi - all'azione sismica che la sollecita, allora possono instaurarsi meccanismi resistenti e/o movimenti reciproci di porzioni murarie che si mantengono integre.

In particolare, possono formarsi delle catene cinematiche fra elementi che, in genere, si sconnettono in corrispondenza di punti deboli della muratura (finestre, lesioni preesistenti, riseghe di pareti, innesti di solai, etc…). Tali porzioni murarie hanno la possibilità di ruotare o scorrere reciprocamente, ed il moto si attiva quando è superato quel determinato valore dell'azione sismica che trasforma la struttura in un cinematismo. Si parla, in questi casi, di un comportamento per meccanismi "di tipo locale" (fig.2).

Figura 2. Comportamento di tipo disgregativo di una muratura di pessima qualità in un edificio vicino ad Accumuli (RI) dopo il sisma del 24 agosto 2016 e comportamento di tipo locale, con innesco di un cinematismo di ribaltamento della facciata di un edificio a Tempera (AQ) dopo il sisma del 6 aprile 2009.

Se la qualità muraria è come prima descritta, cioè tale da poter confidare su un comportamento meccanico sufficiente, e se, in aggiunta a quanto sopra, i collegamenti sono efficaci e diffusi nell'intero edificio, allora (e solo allora) si può parlare di comportamento per meccanismi "di tipo complessivo", o "di tipo globale", della struttura.

Esso consiste nella capacità delle pareti murarie di opporsi all'azione sismica mediante un meccanismo d'insieme, dove ciascun elemento fornisce un proprio contributo. Ad esempio, se nel sistema di pareti si ha la rottura di un maschio murario o di una fascia di piano, il carico sismico portato dall'elemento collassato viene ridistribuito sugli altri maschi e sulle fasce costituenti il sistema resistente. In tal modo non si ha più un comportamento di tipo locale, ma si ha

una risposta globale, caratterizzata, a sua volta, dal grado di rigidezza e della capacità di ripartizione degli impalcati.

In sintesi, e con riferimento specifico al comportamento sismico di un edificio in muratura, si possono presentare i casi di seguito descritti.

Da quanto appena detto discende, in linea generale, una strategia di analisi e progettazione degli interventi per gli edifici esistenti in muratura, che può essere denominata (in analogia con quanto fatto per gli edifici in c.a.) "gerarchia delle resistenze" per le costruzioni murarie.

Essa è sintetizzata nella tabella 1 ed è costituita da una serie di controlli (e di azioni conseguenti) ciascuno dei quali risponde ad una determinata problematica. Controlli ed interventi da attuare sono gerarchizzati in funzione della loro importanza, così da poter conseguire, alla fine, un soddisfacente comportamento della costruzione.

In altri termini: ogni passo è propedeutico al passo successivo e realizzare un intervento senza aver prima garantito il soddisfacimento del requisito precedente può vanificare l'effetto dell'intervento stesso.

In base a questa gerarchia, la prima cosa da fare per la valutazione e la modellazione di un edificio murario è l'osservazione della qualità muraria. Se questa è insufficiente, allora è del tutto inutile e velleitario analizzare con modelli numerici l'edificio, in quanto la risposta più probabile alle azioni sismiche sarà quella della disgregazione muraria e non quella dei meccanismi locali, né, tanto meno, quella di un comportamento globale.

Questo concetto è stato ben chiarito, ad esempio, nell'Ordinanza Commissariale n. 44 del 2018 (Ordinanza Commissariale, 2018) relativa alla ricostruzione leggera per il sisma del 2016, nella quale, al punto 3.1, è scritto: "*Come primo punto occorre considerare la capacità o meno della tipologia muraria dell'edificio in esame di avere un comportamento strutturale vero e proprio. Infatti, nel caso in cui la muratura tenda a disgregarsi e decomporsi sotto azioni cicliche ripetute, viene vanificato qualsiasi tipo di intervento che non sia capace anche di ostacolare tale disgregazione; in queste situazioni perdono significato sia i valori delle caratteristiche di resistenza e deformabilità di cui alle NTC e alla Circolare, sia i metodi di analisi ivi previsti*".

Nella stessa direzione va anche la Circolare 2019, al C8.7.1.2.1, laddove si legge: "*la rappresentazione della struttura come catena cinematica di corpi rigidi è attendibile solo se la parete non è vulnerabile nei riguardi di fenomeni di disgregazione*".

Tabella 1. "Gerarchia delle resistenze" e sue implicazioni per gli edifici esistenti in muratura.

STEP	**Situazione strutturale**		**Comportamento sismico**	**Analisi più adatta**	**Intervento prioritario**
0	Muratura di qualità meccanica insufficiente		Disgregazione muratura	Valutazione qualità muraria	Migliorare la qualità della muratura e la sua coesione interna
1	Muratura di sufficiente qualità Assenza di collegamenti efficaci		Locale (formazione di cinematismi)	Analisi cinematica dei meccanismi di collasso Analisi per carichi verticali (solai, copertura) Ricognizione delle vulnerabilità locali	Inserire vincoli (catene, collegamenti, etc…) Rinforzare solai e coperture (ove necessario) Eliminare vulnerabilità
2	Muratura di sufficiente qualità e presenza di collegamenti efficaci e diffusi sull'intera costruzione	Impalcati deformabili	Complessivo (risposta d'insieme e carichi per zone d'influenza) Assenza di effetti torcenti globali	Analisi non lineare con modello 3D Analisi non lineare per allineamenti	Migliorare resistenza e capacità deformativa degli elementi resistenti
		Impalcati rigidi	Globale (risposta d'insieme e carichi proporzionali alle rigidezze) Presenza di effetti torcenti globali	Analisi non lineare con modello 3D	Migliorare resistenza e capacità deformativa degli elementi resistenti

3 ANALISI DELLA QUALITÀ MURARIA MEDIANTE L'INDICE IQM

Accertata l'importanza che assume questo argomento, sorge il problema di come fare a valutare la migliore o peggiore qualità meccanica di una muratura.

Uno strumento che può risultare utile per questo tipo di analisi è costituito dal metodo dell'Indice di Qualità Muraria IQM, proposto dagli Autori già nel 2002-2003, in una ricerca per la Regione Umbria (Regione Umbria, 2003) perfezionato poi in ambito ReLUIS (Borri e De Maria, 2009 a-d) presentato in vari convegni e pubblicato su alcune riviste (Borri e De Maria, 2009 e-f), (Borri e altri, 2011), (Borri e altri, 2014 a-b), (Borri e De Maria, 2015), (ReLUIS, 2015), (Borri e De Maria, 2018).

Le novità normative introdotte dalle NTC 2018 attraverso la Circolare esplicativa n.7 del 2019 (in seguito chiamata, per brevità, "Circolare 2019") hanno comportato la necessità di un aggiornamento del metodo IQM. Le novità introdotte sono state illustrate in un recente articolo (Borri e De Maria, 2019) di cui il presente lavoro costituisce una versione aggiornata ed ampliata.

La Circolare del 2019 ha modificato, in modo significativo, le modalità di determinazione dei parametri meccanici per le murature esistenti. In primo luogo, nella tabella C8.5.I, che riporta i valori di riferimento dei parametri meccanici delle murature, sono state introdotte alcune nuove tipologie e sono stati modificati alcuni valori dei parametri di resistenza e dei moduli elastici.

Anche la tabella C8.5.II (quella con i coefficienti correttivi) è stata modificata, riducendo a tre i possibili coefficienti (malta di buona qualità, presenza di ricorsi/listature, connessione trasversale) prevedendo comunque, anche quando fossero presenti tutte e tre le condizioni, l'applicazione contemporanea di due soli coefficienti (quelli più elevati).

C'è poi l'introduzione di un nuovo criterio di rottura a taglio, cosiddetto "a scaletta", che prevede la conoscenza e l'utilizzo di un nuovo parametro: la resistenza media tangenziale f_{V0}, relativa a tale modalità di rottura.

Non sono cambiamenti trascurabili neppure l'introduzione, per le murature in mattoni, di un fattore moltiplicativo di resistenze e moduli, nel caso di malta buona (resistenza della malta $f_m > 2$ N/mm^2), e l'utilizzo di coefficienti riduttivi diversificati per resistenze e moduli per tutte quelle murature in cui la malta sia invece di qualità molto scarsa ($f_m < 0{,}7$ N/mm^2) , in seguito chiamata "pessima" (come indicato al paragrafo C8.5.3.1 della Circolare 2019).

Queste novità normative derivano, evidentemente, dalle maggiori conoscenze acquisite in questa ultima decade e dal desiderio di affinare le analisi quanto più possibile.

Per ciò che riguarda la procedura per il calcolo dell'IQM, come vedremo, bastano alcune piccole modifiche, mentre più significative sono le variazioni nelle espressioni analitiche delle curve di correlazione tra gli IQM ed i parametri meccanici delle murature.

Infatti, le tipologie murarie che si possono ricavare dalla combinazione delle due citate tabelle della Circolare 2019 sono aumentate in modo rilevante rispetto alla circolare precedente (74 invece di 36) ed inoltre alcuni dei valori dei parametri meccanici, stanti le nuove limitazioni introdotte, risultano inferiori a quelli indicati dalle norme precedenti.

Si può notare comunque che la nuova circolare contiene indicazioni che sembrano avvalorare ed incoraggiare l'utilizzo di metodologie come quella dell'IQM nel percorso progettuale o di valutazione della sicurezza. Ad esempio, il paragrafo C8.5.3.1 si apre con l'affermazione: "*La muratura in una costruzione esistente è il risultato dell'assemblaggio di materiali diversi, in cui la tecnica costruttiva, le modalità di posa in opera, le caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti e il loro stato di conservazione, determinano il comportamento meccanico dell'insieme*".

Tale frase, posta proprio in apertura dei paragrafi relativi alle costruzioni esistenti in muratura, amplia l'orizzonte delle analisi di qualità muraria, affermando, in definitiva, che i comportamenti meccanici delle costruzioni murarie – ed anche i valori delle resistenze e delle deformabilità da utilizzare nelle analisi - dipendono dalle caratteristiche tipologiche e costruttive degli elementi murari.

Un altro punto nel quale vengono promossi metodi per la valutazione della qualità muraria si trova, sempre al punto C.8.5.3.1 della Circolare 2019, laddove si parla delle prove sperimentali utilizzate per la conoscenza della muratura: "*A seguito delle indagini, è necessario valutare, per ogni prova, il grado di rappresentatività sia della classe tipologica attribuita al materiale, sia dei valori medi delle caratteristiche meccaniche dell'edificio da utilizzare nelle modellazioni. A questo scopo possono essere utili metodi che, avvalendosi della lettura visiva dei paramenti e della sezione, consentano di ottenere delle stime di tali caratteristiche attraverso indicatori di*

qualità muraria, purché elaborati con procedure di comprovata affidabilità".

Con questa frase si assegna a metodi come quello dell'IQM (o simili, purché "di comprovata affidabilità") il compito di valutare la credibilità di quanto emerso dalle prove sperimentali, che talvolta, proprio per le particolarità delle murature, possono fornire indicazioni da esaminare con spirito critico.

Il metodo IQM, qui riassunto ed aggiornato alle ultime indicazioni normative, ha certamente carattere di affidabilità, avendo avuto conferme da numerose campagne sperimentali ed essendo stato sottoposto più volte al vaglio sia della comunità scientifica che del mondo professionale.

A tal proposito, oltre ai vari convegni ed articoli prima richiamati, si può ricordare la già citata Ordinanza Commissariale n. 44 del 2018, nella quale è scritto: "*per valutare, in modo comunque qualitativo, la propensione di una qualsiasi tipologia muraria a disgregarsi possono essere utili metodi di analisi della qualità muraria che si avvalgono della lettura visiva dei paramenti e della sezione*", e poi, in nota, viene citato proprio il metodo IQM.

4 PARAMETRI DELLA REGOLA DELL'ARTE E GIUDIZI RELATIVI AL LORO RISPETTO

In questo paragrafo vengono riassunte le principali caratteristiche della metodologia IQM, rimandando, per necessità di sintesi, ai manuali riportati in (ReLUIS, 2015) contenenti le definizioni più dettagliate dei parametri della regola dell'arte ed i criteri di giudizio sul loro rispetto (salvo, ovviamente, le variazioni e le novità introdotte con il presente articolo).

Il metodo proposto conduce ad un indice numerico di qualità muraria (IQM) distinto in base alle tre possibili direzioni dell'azione sollecitante il generico pannello murario; gli indici di qualità muraria di una muratura sono quindi tre: IQM_V per azioni verticali, IQM_{FP} per azioni orizzontali fuori piano ed IQM_{NP} per azioni orizzontali nel piano.

I valori numerici di tali indici dipendono dal rispetto o meno di alcune condizioni relative alla corretta ed efficace messa in opera della muratura: i cosiddetti parametri della "regola dell'arte".

I parametri considerati sono: 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.

Tramite l'osservazione dei paramenti e della sezione muraria si valuta il grado di rispetto di ciascun parametro della regola dell'arte, basandosi su alcune regole definite nell'ambito della procedura e riassunte nella tabella 2. I possibili giudizi sul rispetto della regola dell'arte per ciascun parametro individuato sono: R. = parametro rispettato; P.R. = parametro parzialmente rispettato; N.R. = parametro non rispettato.

Come vedremo nei paragrafi successivi, i giudizi attribuiti ai parametri della regola dell'arte si trasformeranno in punteggi che, composti tra di loro, condurranno ai tre valori cercati, ovvero gli IQM distinti in base alla direzione dell'azione sollecitante: IQM_V, IQM_{FP} e IQM_{NP}.

Attraverso tali valori avremo la possibilità di classificare la muratura in esame in una "categoria" delle tre supposte possibili: A, B o C, avendo così un'indicazione – seppur sommaria - sulla sua qualità meccanica. Da una muratura di categoria A ci si può attendere un buon comportamento strutturale; da una muratura di categoria B un comportamento di media qualità; da una muratura in categoria C è logico attendersi una risposta alle sollecitazioni di tipo insoddisfacente, che facilmente può voler dire: disgregazione muraria.

Ma il metodo IQM non è solo di tipo qualitativo; come vedremo, grazie alle correlazioni che sono state osservate tra valori IQM e i principali parametri meccanici delle murature, sono possibili alcune applicazioni di tipo semi-quantitativo dell'indice IQM.

Tabella 2. Giudizi attribuibili ai parametri della regola dell'arte.

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 sbozzata 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[1]	**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 (per tratti lunghi circa 100 cm) e su entrambe le facce della parete. Murature listate con listature a interasse inferiore a 100 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 (un solo paramento, elementi tutti in direzione trasversale).
PR	Elementi della muratura degradati (~ fra 10% e 50% del totale degli elementi). Elementi laterizi con foratura fra 70% e 55%. 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 < 55%. Blocchi in calcestruzzo (anche forati).	**R**	Prevalenza di elementi con la loro dimensione maggiore sopra i 40 cm.

Qualità della malta / efficace contatto fra elementi / zeppe (MA.)	
NR/ PESSIMA*	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.

* la malta sarà giudicata "pessima" se le caratteristiche riportate in tabella sono molto accentuate oppure sono diffuse sulla quasi totalità del paramento murario.

[1] LMT (nella sezione) significa "Linea di Minimo Tracciato" (Doglioni e Mirabella Roberti, 2003) considerata qui nella sezione della parete (figura 3). Il valore dell'LMT si ottiene misurando, su un tratto di 1m di altezza, la lunghezza della linea più breve che attraversa (internamente) il nucleo murario in verticale, aderendo al lato interno dei conci dell'uno o dell'altro paramento. La valutazione del parametro P.D. 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.

Sfalsamento giunti verticali / Ingranamento nel piano (S.G.)		
	Metodo quantitativo[2]	**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).

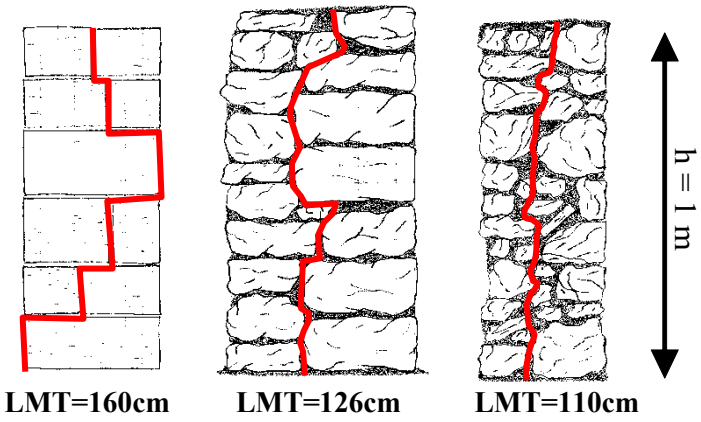


Figura 2. Esempi di linea di minimo tracciato trasversale.

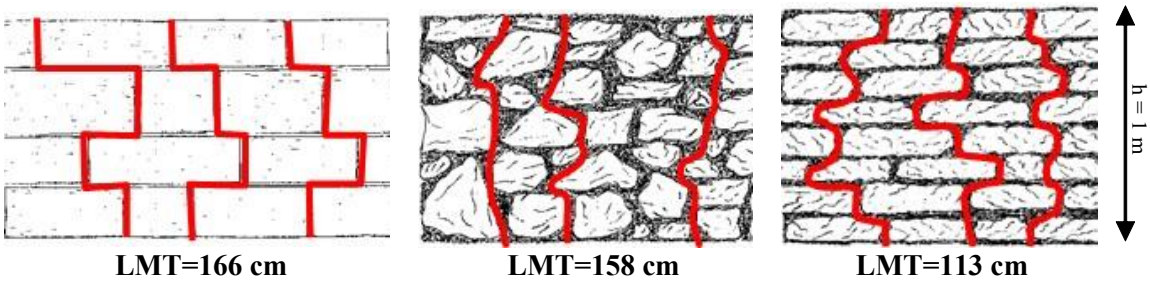


Figura 3. Esempi di linea di minimo tracciato nel piano.

[2] LMT (sulla faccia della parete) significa "Linea di Minimo Tracciato" (Doglioni e Mirabella Roberti, 2003) e viene valutata, in questo caso, sul paramento murario (figura 4). Scelta una porzione di muratura di 1m x 1m si tracciano le linee più brevi che attraversano verticalmente la porzione di muratura suddetta passando, senza intersecarsi, attraverso i giunti di malta. La media delle loro lunghezze fornisce il valore della LMT su quella faccia della parete.

Tabella 3. Punteggi da attribuire ai parametri della regola dell'arte per il calcolo di IQM_V, IQM_{FP} e IQM_{NP}.

	Punteggi								
	IQM_V (azioni verticali)			IQM_{FP} (azioni fuori piano)			IQM_{NP} (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. Ingranamento trasversale / presenza dei diatoni	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 4. Coefficienti correttivi r_V, r_{FP} e r_{NP} in funzione del parametro MA.

Parametro MA	r_V	r_{FP}	r_{NP}
NR	0,2	1	0,1
PR	0,6	1	0,85
R	1	1	1

Tabella 5. Attribuzione delle categorie murarie in base ai valori di IQM.

Direzione azione	**Categoria della muratura**		
	A	**B**	**C**
IQM_V (azioni verticali)	$5 \leq IQM_V \leq 10$	$2,5 \leq IQM_V < 5$	$0 \leq IQM_V < 2,5$
IQM_{FP} (azioni ortogonali)	$7 \leq IQM_{FP} \leq 10$	$4 < IQM_{FP} < 7$	$0 \leq IQM_{FP} \leq 4$
IQM_{NP} (azioni complanari)	$5 < IQM_{NP} \leq 10$	$3 < IQM_{NP} \leq 5$	$0 \leq IQM_{NP} \leq 3$

5 DISTINZIONE FRA MURATURA IN MATTONI PIENI/BLOCCHI E MURATURA IN PIETRAME

Prima di esaminare come si calcolano gli indici IQM, occorre considerare il particolare comportamento che hanno le murature in mattoni pieni (o in blocchi di analoghe proporzioni) in funzione della qualità della malta: la resistenza tangenziale media e quella a compressione media del pannello murario sono infatti fortemente influenzate da essa.

Tale osservazione, confermata anche da alcune analisi con modelli ad elementi finiti (Borri e altri, 2011), si può spiegare col fatto che, per tali tipologie murarie:

- spesso la tessitura è tale che è possibile arrivare a rottura senza avere fenomeni di ingranamento o incastro fra gli elementi, a differenza di quanto avviene per le murature in pietra;
- la malta, anche se di elevata qualità, risulta in genere meno resistente dei blocchi o poco aderente ad essi. Ciò fa in modo che l'intero fenomeno fessurativo, dalla sua insorgenza sino alla rottura. si esplichi esclusivamente nei giunti di malta (rottura all'interno della malta o distacco dalla superficie del mattone).

Tali fenomeni non insorgono, ad esempio, nel caso di murature in blocchi di pietra squadrata, per le quali la funzione della malta è essenzialmente quella di regolarizzare la superficie di appoggio fra una pietra e l'altra e dove i letti di malta hanno dimensioni esigue, e

pertanto prevalgono fenomeni di ingranamento o incastro fra le pietre.

Nelle formule che seguiranno si terrà conto di questa differenza tra le murature in mattoni pieni o blocchi e tutte le altre tipologie murarie, attraverso un coefficiente correttivo "r" che riduce adeguatamente il valore numerico dell'IQM. Quindi, per quanto detto, tale coefficiente va applicato solamente nel caso di murature in mattoni pieni o in blocchi.

6 DETERMINAZIONE DI IQM

I punteggi ottenuti dalla tabella 3 vanno inseriti nelle formule sotto riportate, ottenendo così i valori numerici dei tre indici IQM.

In tali formulazioni, a seguito delle novità contenute nella Circolare 2019, sono stati introdotti due nuovi coefficienti (non presenti quindi nella precedente versione di IQM) definiti nel seguito:

- m (coefficiente correttivo per malta di pessima qualità; vale per tutti i tipi di muratura);
- g (coefficiente correttivo per giunti ampi; vale solo per murature di mattoni pieni o in blocchi).

Murature NON in mattoni pieni o in blocchi:

$$IQM_V = m \times RE.EL._V \times (OR_V + P.D._V + F.EL._V + S.G._V + D.EL._V + MA_V)$$

$$IQM_{FP} = m \times RE.EL._{FP} \times (OR_{FP} + P.D._{FP} + F.EL._{FP} + S.G._{FP} + D.EL._{FP} + MA_{FP})$$

$$IQM_{NP} = m \times RE.EL._{NP} \times (OR_{NP} + P.D._{NP} + F.EL._{NP} + S.G._{NP} + D.EL._{NP} + MA._{NP})$$

Murature in mattoni pieni o blocchi:

$$IQM_V = m \times g \times r_V \times RE.EL._V \times (OR_V + P.D._V + F.EL._V + S.G._V + D.EL._V + MA_V)$$

$$IQM_{FP} = m \times g \times r_{FP} \times RE.EL._{FP} \times (OR_{FP} + P.D._{FP} + F.EL._{FP} + S.G._{FP} + D.EL._{FP} + MA_{FP})$$

$$IQM_{NP} = m \times g \times r_{NP} \times RE.EL._{NP} \times (OR_{NP} + P.D._{NP} + F.EL._{NP} + S.G._{NP} + D.EL._{NP} + MA_{NP})$$

Il coefficiente correttivo r (distinto in r_V, r_{FP} e r_{NP}) dipende dal parametro MA., ed assume i valori riportati in tabella 4.

Il coefficiente correttivo "m" vale:

m = 0.7 in caso di malta "pessima" (f_m < 0,7 N/mm$_2$);

m = 1.0 in tutti gli altri casi.

Il coefficiente correttivo "g" vale:

g = 0.7 in caso di muratura in mattoni pieni con giunti di malta ampi (spessore > 13 mm);

g = 1.0 in tutti gli altri casi.

I coefficienti m e g sono stati introdotti nella procedura di determinazione di IQM per tener conto di analoghe riduzioni imposte dalla Circolare 2019 sui valori dei parametri meccanici delle murature; grazie a questi coefficienti la correlazione fra IQM ed i parametri meccanici murari risulta quindi più aderente ai valori previsti dalla Circolare 2019 per gli stessi parametri meccanici.

La procedura conduce quindi a tre valori di IQM (tutti compresi comunque fra 0 e 10) uno per ogni direzione di sollecitazione, secondo le espressioni relative alla tipologia di elemento resistente (mattoni pieni/blocchi o altra tipologia muraria).

7 VALUTAZIONE DELLA CATEGORIA MURARIA E COMPORTAMENTI ATTESI

Determinati i valori di IQM_V, IQM_{FP} e IQM_{NP}, attraverso la tabella 5 si può ricavare la categoria di appartenenza della muratura in riferimento alle tre azioni sollecitanti (verticali, orizzontali fuori piano ed orizzontali nel piano).

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

La categoria muraria ora introdotta consente di passare da una descrizione ed un indice basati sulle caratteristiche intrinseche della muratura ad una predizione del loro più probabile comportamento meccanico, influenzato quindi dalla direzione dell'azione sollecitante.

Nel seguito si descrivono i comportamenti meccanici che è logico attendersi da ciascuna delle tre categorie murarie, in base alle azioni sollecitanti, ipotizzando che siano di entità corrispondente a quelle attese per la costruzione e per il sito in cui si trova (quindi: carichi ordinari e sisma di progetto).

Per azioni verticali:

- una muratura di categoria A difficilmente subisce lesioni significative;
- una muratura di categoria B può lesionarsi, ma con scarsa probabilità di collassare;
- una muratura di categoria C ha elevata probabilità di lesionarsi, di andare fuori piombo e, in situazioni di carico elevato, di collassare.

Per azioni orizzontali fuori piano:

- una muratura di categoria A è in grado di mantenere un comportamento monolitico; 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. 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 ed è probabile avere lesioni o spanciamenti in caso di sisma, ma è difficile che collassi se è ben collegata agli orizzontamenti ed ai muri di spina. 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 ha elevata probabilità di disgregarsi in caso di sisma; per essa è probabile il collasso, a prescindere dai collegamenti (comunque inefficaci, data la cattiva qualità muraria). Le verifiche per meccanismi di collasso risultano irrealistiche ed improponibili, non essendo rispettata l'ipotesi di monoliticità delle porzioni murarie costituenti i cinematismi.

Per azioni orizzontali nel piano:

- una muratura di categoria A ha scarsa probabilità di lesionarsi;
- una muratura di categoria B, in caso di sisma, ha buone probabilità di lesionarsi, specialmente se le pareti sono sottili o se sono insufficienti rispetto all'area coperta dall'edificio; tuttavia tali lesioni saranno di entità limitata;
- una muratura di categoria C ha elevata probabilità di lesionarsi, ed in modo rilevante, nel piano delle pareti.

8 CORRELAZIONE DI IQM CON I PARAMETRI MECCANICI DELLA MURATURA

Per determinare la correlazione fra gli indici IQM ed i valori meccanici della muratura proposti dalle NTC 2018 sono state considerate le tipologie murarie previste nella Tab. C8.5.I della Circolare 2019, limitatamente al caso delle murature esistenti non consolidate. A partire da esse, considerando le possibili variazioni considerate dalla tabella C8.5.II, con tutte le possibili combinazioni, le tipologie murarie previste dalla Circolare 2019 sono in tutto 74, e vengono qui denominate, per brevità, "murature virtuali".

Per ciascuna di esse sono noti, in quanto proposti dalle tabelle della Circolare stessa, i valori minimo e massimo (e quindi anche medio) dei parametri f, τ_0, f_{V0}, G ed E.

È stato quindi possibile mettere in relazione i diversi IQM (in particolare IQM_V e IQM_{NP}) con i parametri meccanici di queste 74 tipologie murarie, considerando le seguenti correlazioni:

- IQM_V con f
- IQM_{NP} con τ_0
- IQM_{NP} con f_{V0}
- IQM_{NP} con G
- IQM_V con E.

Ogni correlazione è stata analizzata nei confronti del valore minimo, medio e massimo del parametro meccanico considerato, rappresentandola su un diagramma cartesiano avente in ascissa il valore dell'IQM (verticale o nel piano) della muratura in esame, e in ordinata il parametro meccanico considerato (f, τ_0, f_{V0}, G o E; valori minimo, medio o massimo, a seconda del grafico) per la stessa muratura.

Nelle figure da 5 a 9 sono riportati i grafici delle correlazioni relative al caso dei valori medi dei parametri meccanici; le correlazioni sono di tipo esponenziale oppure parabolico, a seconda di quale sia quella di migliore approssimazione (minimi quadrati). Di seguito sono riportate le leggi di correlazione esaminate ed i relativi valori del parametro R^2, che fornisce una misura di quanto la curva approssimi bene i valori puntuali ($R^2 = 1$ corrisponde ad una correlazione perfetta).

IQM_V con i valori minimi, medi e massimi di f (resistenza media a compressione)

f min = 1.036e0.1961x	$R^2 = 0.8034$
f med = 1.4211e0.1844x	$R^2 = 0.8229$
f max = 1.8021e0.1775x	$R^2 = 0.8244$

(con x = IQM_V)

IQM_{NP} con i valori minimi, medi e massimi di τ_0 (resistenza media tangenziale - criterio di Turnsek e Cacovic)

τ_0 min = $0.0003x^2 + 0.0066x + 0.0143$ $R^2 = 0.8274$

τ_0 med = $0.0005x^2 + 0.0086x + 0.0189$ $R^2 = 0.9129$

τ_0 max = $0.0006x^2 + 0.0107x + 0.0234$ $R^2 = 0.8413$

(con x = IQM_{NP})

IQM_{NP} con i valori minimi, medi e massimi di f_{V0} (resistenza media tangenziale – criterio di rottura a scaletta)

f_{V0} min = $0.03x^{0.9093}$ $R^2 = 0.8929$

f_{V0} med = $0.0475x^{0.8536}$ $R^2 = 0.9277$

f_{V0} max = $0.0654x^{0.8219}$ $R^2 = 0.9176$

(con x = IQM_{NP})

IQM_{NP} con i valori minimi, medi e massimi di G (modulo di elasticità tangenziale medio)

G min = $204.5e^{0.1464x}$ $R^2 = 0.6529$

G med = $247.62e^{0.1457x}$ $R^2 = 0.6808$

G max = $290.56e^{0.1452x}$ $R^2 = 0.6953$

(con x = IQM^{NP})

IQM_V con i valori minimi, medi e massimi di modulo di E (modulo di elasticità normale medio)

E min = $599.03e^{0.1567x}$ $R^2 = 0.7104$

E med = $731.51e^{0.1548x}$ $R^2 = 0.7208$

E max = $863.74e^{0.1535x}$ $R^2 = 0.7240$

(con x = IQM_V)

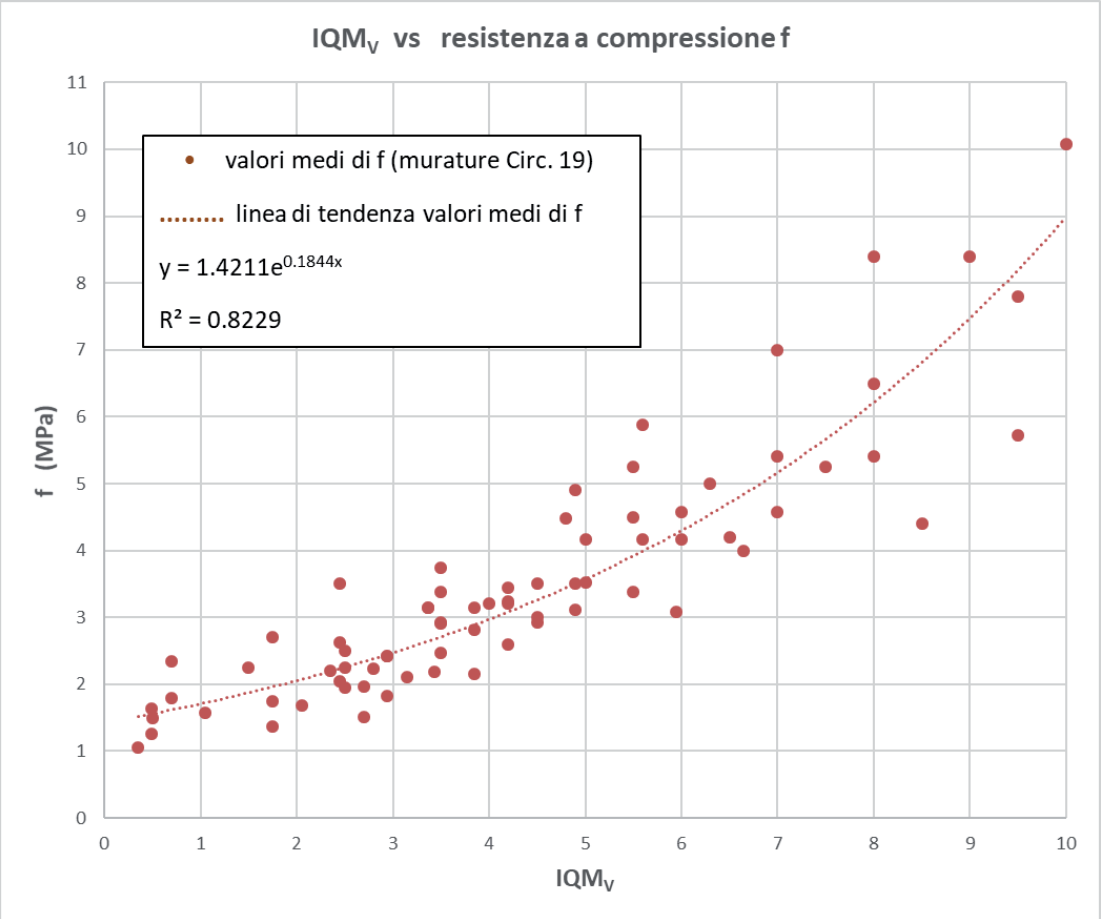


Figura 5. Curve di correlazione fra il valore medio di f (secondo le tabelle della Circolare 2019) e IQM_V.

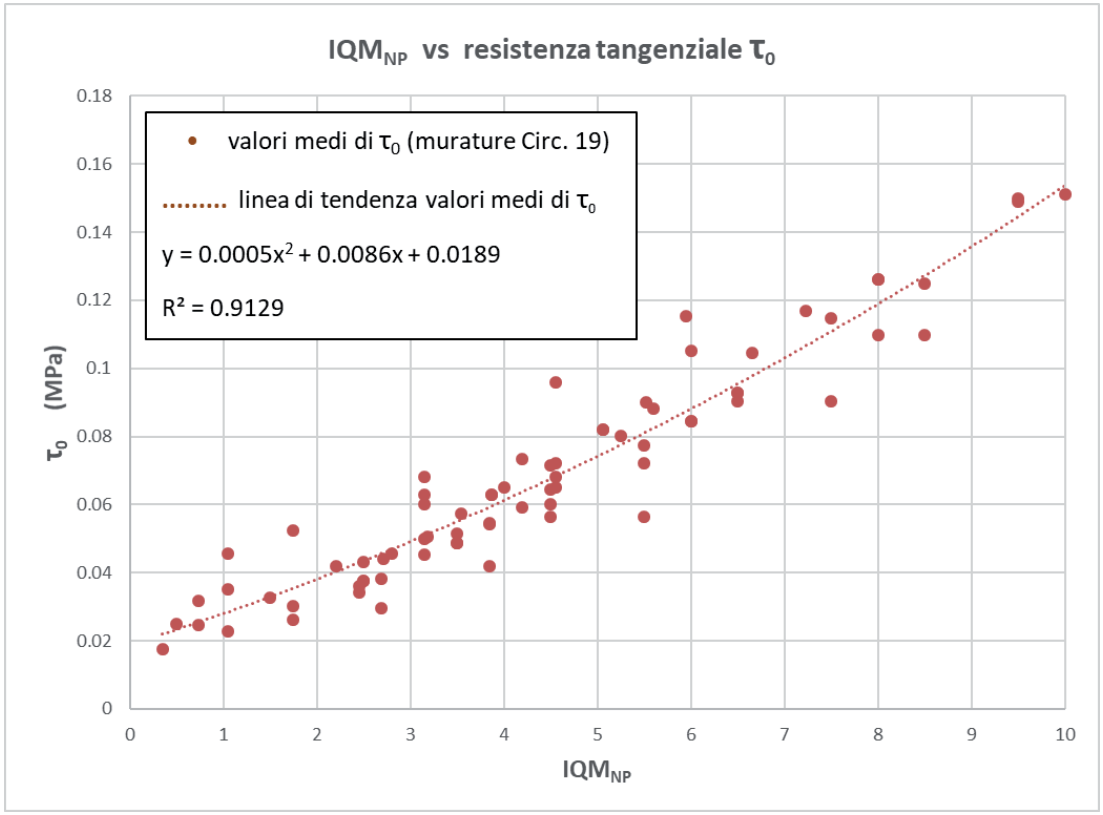


Figura 6. Curve di correlazione fra il valore medio di τ_0 (secondo le tabelle della Circolare 2019) e IQM$_{NP}$.

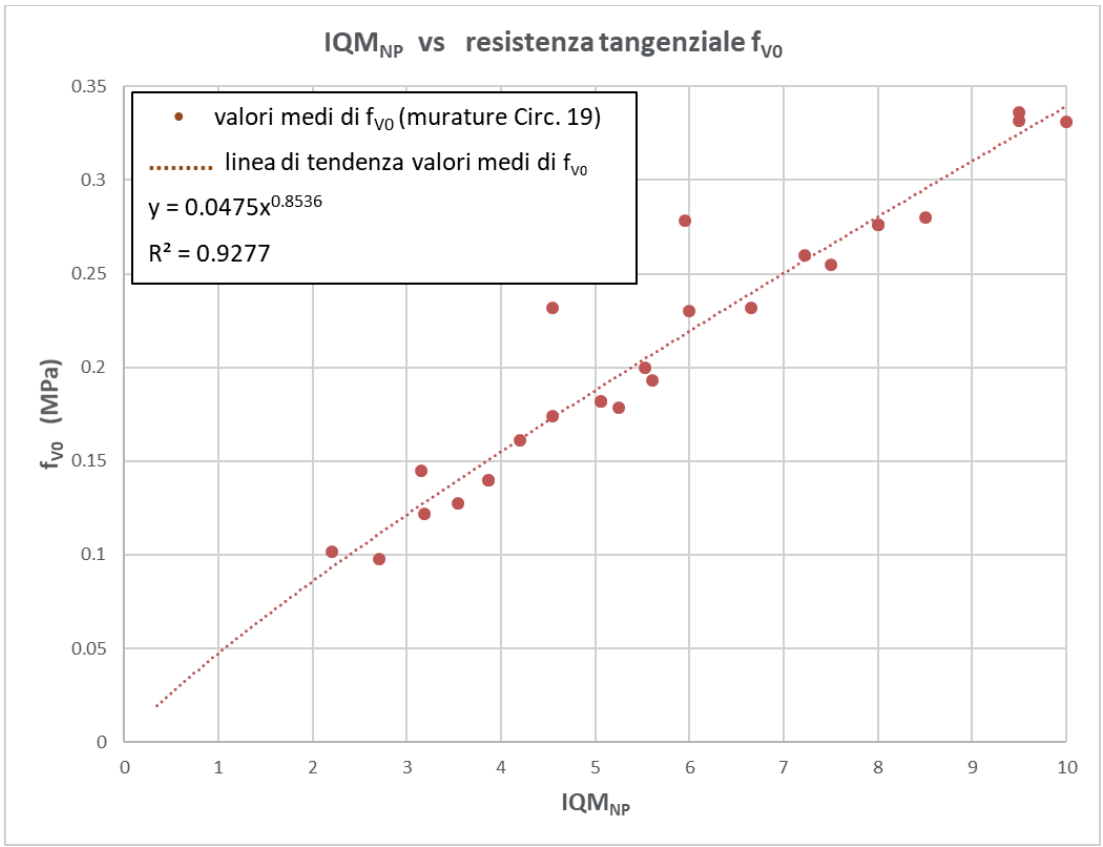


Figura 7. Curve di correlazione fra il valore medio di f_{V0} (secondo le tabelle della Circolare 2019) e IQM$_{NP}$.

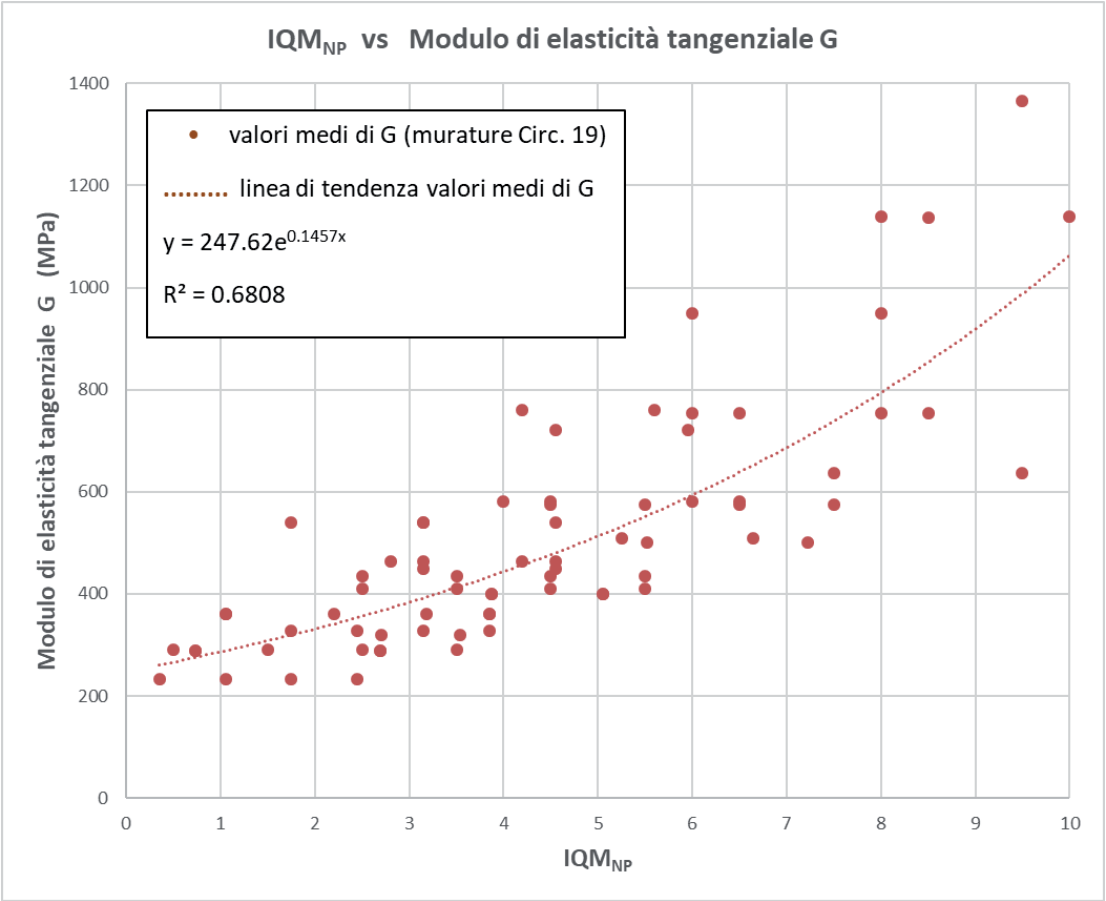


Figura 8. Curve di correlazione fra il valore medio di G (secondo le tabelle della Circolare 2019) e IQM_{NP}.

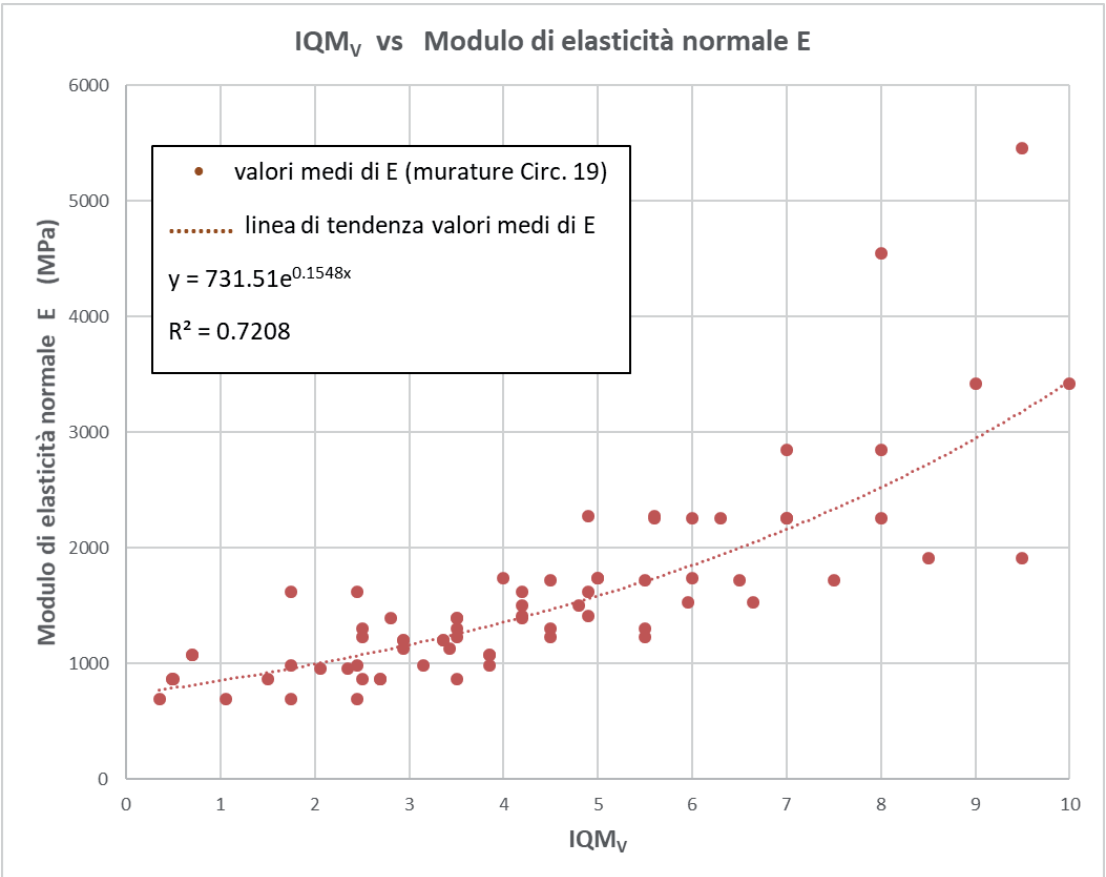


Figura 9. Curve di correlazione fra il valore medio di E (secondo le tabelle della Circolare 2019) e IQM_{V}.

9 CONFERME SPERIMENTALI PER LA CORRELAZIONE TRA IQM E τ_0

Per avere indicazioni in merito alla validità delle correlazioni illustrate in precedenza si è fatto riferimento alle prove sperimentali condotte negli anni passati. In particolare, è stata esaminata la correlazione fra IQM_{NP} e la resistenza tangenziale media τ_0 della muratura, vista la rilevanza e l'influenza di questo parametro nelle analisi strutturali che di norma vengono eseguite (push-over).

Inoltre, date le difficoltà operative per la sua determinazione sperimentale (certamente superiori rispetto, ad esempio, a quelle per la resistenza media a compressione f, desumibile "semplicemente" attraverso prove con martinetti piatti doppi) la possibilità di ottenere una stima della τ_0 attraverso una semplice curva di correlazione invece che attraverso una prova sperimentale è, senza dubbio, di interesse.

Sono stati quindi esaminati i risultati di 60 diverse prove di compressione diagonale condotte su pannelli murari, di cui 55 appartenenti a edifici reali sottoposti a prova in situ, e 5 costruiti e sottoposti a prova in laboratorio. Tali test sono stati realizzati dall'Università di Perugia (40 prove), dall'Università di Firenze (17 prove) e dall'Università di Trieste (3 prove). Le murature provate in situ sono distribuite in quattro regioni: Umbria, Abruzzo, Emilia-Romagna e Toscana.

Nella figura 10 è riportato un diagramma che riassume i risultati (confortanti) di tali prove: per ciascuna sperimentazione è riportato il valore dell'IQM_{NP} della muratura testata e la resistenza a taglio ottenuta dalla prova sperimentale.

Come si può notare, i risultati di gran parte delle prove sperimentali ricadono entro l'intervallo delimitato dai valori minimo e massimo della resistenza tangenziale τ_0. Tale osservazione, che vale sia per murature di qualità scadente o intermedia, sia per quelle migliori, fornisce indicazioni confortanti in merito all'attendibilità della correlazione fra IQM_{NP} e τ_0.

10 SCHEDE ESEMPLIFICATIVE

Sono state aggiornate, sulla base di quanto sin qui illustrato, le schede descrittive relative alle tipologie murarie particolarmente frequenti, presentate in precedenti lavori (ReLUIS, 2015).

A titolo di esempio si riportano, in figura 11, due di queste schede.

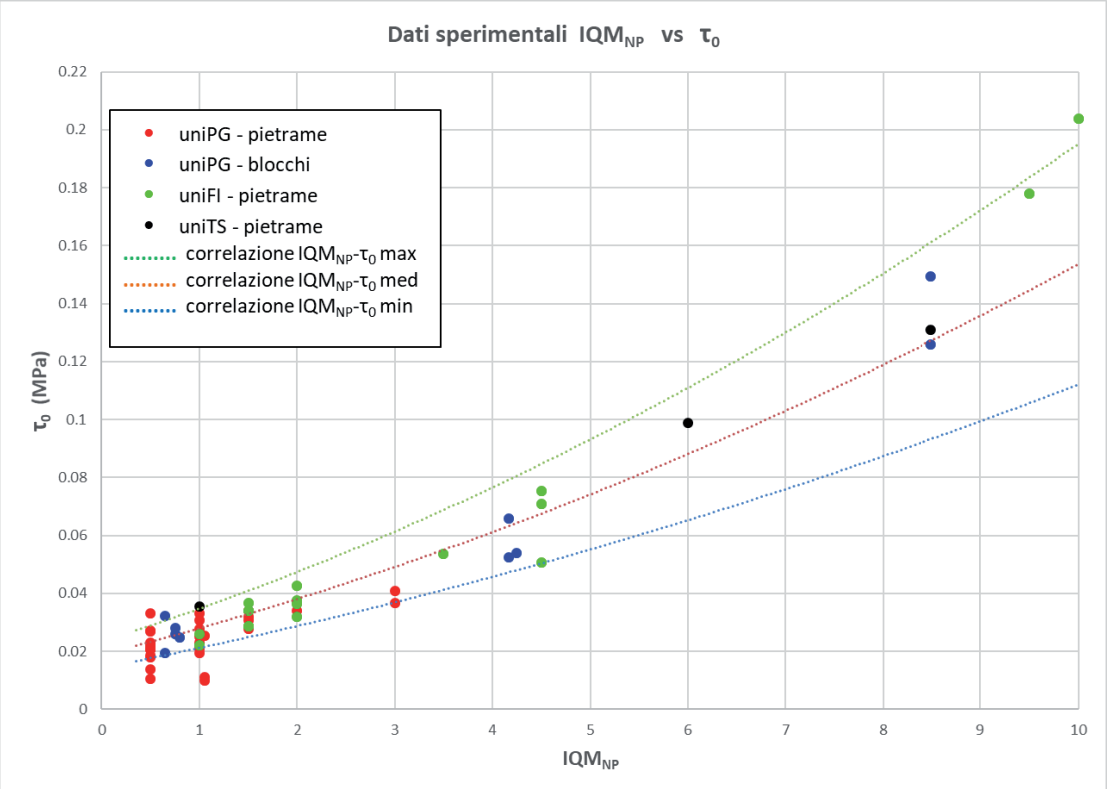
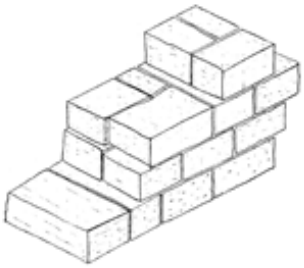


Figura 10. Curve di correlazione tra τ_0 (valore minimo, medio e massimo secondo le tabelle della Circolare 2019) e IQM_{NP} e punti corrispondenti alle prove di compressione diagonale condotte dalle Università di Perugia, di Firenze e di Trieste.

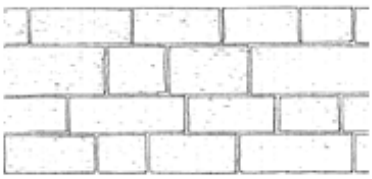
SCHEDA DI VALUTAZIONE DELLA QUALITA' MURARIA — **NUM. 01**

FOTO

SCHEMI



Vista assonometrica



Prospetto

Sezione

DESCRIZIONE

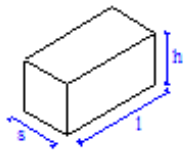
Muratura di blocchi di pietra perfettamente squadrata.

I paramenti sono costituiti da conci lavorati di pietra calcarea bianca o rosa e talvolta arenaria. La tessitura muraria regolare presenta corsi orizzontali di altezze diverse ed un buon sfalsamento dei giunti verticali.
Vi è presenza di elementi disposti ortogonalmente al piano della muratura (diatoni).

MATERIALI

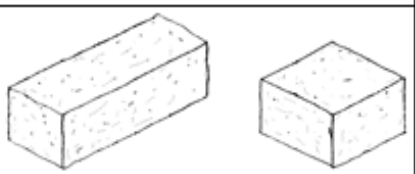
Calcare bianco e rosato di Gubbio: compatto a frattura concoide.
Calcari compatti di Perugia: biancastri o rossastri dal bianco al grigio nero, al roseo al rosso.
Calcari del Subasio (Assisi): calcari bianchi e rossi, duri e compatti.
Macigno di Scheggia e Gubbio: grigio, simile alla pietra serena toscana.
Pietra serena del Trasimeno e dell'altotevere: colore grigiastro, con talvolta infiltrazioni giallo marronastre.
Malta di calce e sabbia spesso polverulenta ma sufficiente ad assicurare un contatto uniforme tra i blocchi.

GEOMETRIA



Dimensioni e forme ricorrenti dei blocchi:

s = 15 ÷ 30 cm
h = 15 ÷ 20 cm
l = 15 ÷ 50 cm



ANALISI IQM

P.D.	MA.	F. EL.	S. G.	R. EL.	OR.	D. EL.	Categoria	Verticali	Fuori piano	Nel piano
R	PR	R	R	R	R	R	Metodo Punteggi	A	A	A
							LMT		160	166
							IQM	8,5	9,5	9

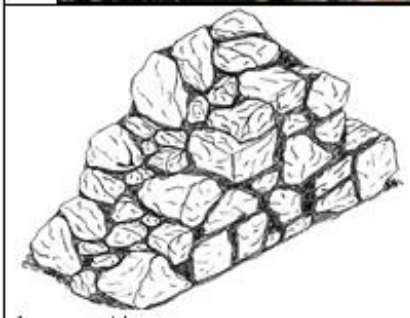
Parametri meccanici	f (N/mm²)	τ_0 (N/mm²)	f_{v0} (N/mm²)	E (N/mm²)	G (N/mm²)
Valore minimo	5.49	0.098	0.221	2269	764
Valore medio	6.81	0.137	0.310	2727	919
Valore massimo	8.15	0.168	0.398	3184	1073

Figura 11a. Esempio di scheda di valutazione della qualità muraria.

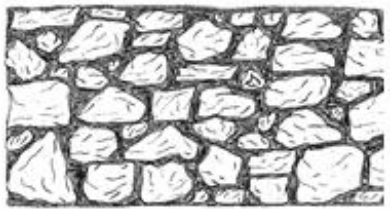
SCHEDA DI VALUTAZIONE DELLA QUALITA' MURARIA — **NUM. 14**

FOTO

SCHEMI



Assonometria



Prospetto

Sezione

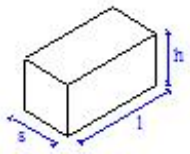
DESCRIZIONE

Muratura di pietra calcarea con elementi di forma e dimensione irregolare.
Muratura realizzata con calcare massiccio di colore bianco, doppio paramento con interposizione interna casuale di scaglie e pietre piccole.
Paramento esterno realizzato con blocchi di pietra di medie dimensioni e forma non regolare, inzeppati con scaglie della stessa pietra. La tessitura muraria si presenta irregolare senza il rispetto dei filari orizzontali né lo sfalsamento dei giunti verticali; diatoni assenti. Il paramento interno ricalca le caratteristiche di quello esterno ma con minor accuratezza nella scelta e disposizione delle pietre.

MATER.

Calcari compatti e a frattura concoide, colori vari.
Malta di calce e sabbia di scarsa qualità.

GEOMETRIA



Dimensioni e forme ricorrenti dei blocchi:

s = 8 ÷ 15 cm
h = 8 ÷ 25 cm
l = 10 ÷ 35 cm

ANALISI IQM

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
							LMT (sezione)		118	116
							IQM	2,5	2	2,5

N.B. La presenza di zeppe fa in modo che **MA** e **F.EL.** siano parzialmente rispettate.

Parametri meccanici	f (N/mm²)	τ_0 (N/mm²)	f_{v0} (N/mm²)	E (N/mm²)	G (N/mm²)
Valore minimo	1.69	0.033	0.069-	886-	295-
Valore medio	2.25	0.044	0.104	1077	356
Valore massimo	2.81	0.054	0.139	1268	418

Figura 11b. Esempio di scheda di valutazione della qualità muraria.

11 CONCLUSIONI

Nel presente articolo è stato illustrato il metodo di valutazione della qualità muraria IQM tenendo conto delle modifiche introdotte dagli Autori per allineare la procedura alle novità presenti nella recente Circolare esplicativa delle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni NTC 2018.

Tali modifiche sono lievi, non alterano la metodologia sulla quale è basato IQM, e servono solo per allineare la metodologia alle ultime novità normative, soprattutto per quanto riguarda l'affinamento della capacità previsionale dei parametri meccanici delle murature.

Il metodo può trovare una utile applicazione pratica come strumento di ausilio ai professionisti nel definire le caratteristiche delle tipologie murarie non ricomprese nelle tabelle delle Normative o nel confermare e validare i valori letti nelle tabelle o derivanti da prove sperimentali.

Le correlazioni fra IQM ed i parametri meccanici delle murature sono state confortate anche da una ottima congruenza fra IQM ed i valori determinati per mezzo di numerose campagne sperimentali, orientate prevalentemente alla determinazione della resistenza tangenziale media con prove di compressione diagonale in sito.

Ulteriori futuri sviluppi del metodo potranno riguardare la sua applicazione a tipologie murarie particolari, specifiche di determinate zone geografiche ed il suo confronto con dati provenienti da sperimentazioni su edifici reali.

BIBLIOGRAFIA

Bernardini, A., (a cura di), 2000. La vulnerabilità degli edifici: valutazione a scala nazionale della vulnerabilità sismica degli edifici ordinari. CNR-Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti – Roma.

Borri, A., De Maria, A., 2004. *Alcune considerazioni in materia di analisi e di interventi sugli edifici in muratura in zona sismica*. In: Atti dell'XI Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia", Genova 25-29 gennaio 2004.

Borri, A., De Maria, A., 2009a. Scheda di valutazione dell'IQM (indice di qualità muraria) (Allegato 3b.1-UR06-1). Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (RELUIS). Progetto esecutivo 2005 – 2008.

Borri, A., De Maria, A., 2009b. Linee guida per la compilazione della scheda di valutazione dell'IQM (Allegato 3b.1-UR06-2). Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (RELUIS). Progetto esecutivo 2005 – 2008.

Borri, A., De Maria, A., 2009c. Esempi compilati di scheda di valutazione dell'IQM (Allegato 3b.1-UR06-3). Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (RELUIS). Progetto esecutivo 2005 – 2008.

Borri, A., De Maria, A., 2009d. Tabelle di correlazione tra IQM e tabelle delle NTC 2008 (Allegato 3b.1-UR06-4). Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (RELUIS). Progetto esecutivo 2005 – 2008.

Borri, A., De Maria, A., 2009e. L'indice di qualità muraria (IQM): evoluzione ed applicazione nell'ambito delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008. In: Atti del XIII Convegno ANIDIS. Sommari, relazioni ad invito, atti su dvd. Bologna, 28 giugno - 2 luglio 2009. Ed. Imready, ISBN/ISSN: 978-88-904292-0-0.

Borri, A., De Maria, A., 2009f. IMQ - Indice di Qualità Muraria. Applicazioni nell'ambito delle NTC 2008. Su: *L'edilizia*, n. 160/2009, Ed. De Lettera.

Borri, A., De Maria, A., Paci, G., 2011. Resistenza a taglio delle murature: prove diagonali e correlazione con l'Indice di Qualità Muraria IQM. In: Atti del XIV Convegno ANIDIS. Sommari, relazioni ad invito, atti su dvd. Bari, 18-22 settembre 2011. Ed. Digilabs, ISBN/ISSN: 978-88-7522-040-2

Borri, A., Castori, G., Corradi, M., De Maria, A., 2014a . A method for the analysis and classification of historic masonry. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2014, Vol. 13 (2015), pp. 2647–2665.

Borri, A., De Maria, A., Marino, M., Neri, F., 2014b. Experimental data of friction coefficient for some types of masonry and its correlation with an index of quality masonry (IQM). Second European Conference of Earthquake Engineering and Seismology, Istanbul 25-29 August, 2014.

Borri, A., De Maria, A., 2015. Indice di Qualità Muraria (IQM): correlazione con le caratteristiche meccaniche e livelli di conoscenza. *Progettazione sismica* Vol. 6, n. 2/2015.

Borri, A., Sisti, R., 2017. Crolli di chiese causati dai sismi in Italia. Prime considerazioni su alcuni recenti casi in Valnerina. *Structural*, n. 210, DOI 10.12917/Stru210.08.

Borri, A., Sisti, R., Castori, G., Corradi, M., 2017a. Crolli causati dagli eventi sismici in Italia. Analisi di due casi recenti in Valnerina. *Structural,* n. 213, DOI 10.12917/Stru213.27.

Borri, A., Sisti, R. , Prota, A., Di Ludovico, M., Costantini, S., Barluzzi, M., De Maria, A., Aisa, E., Bragetti, A., Savi, F., Fagotti, G., Baldi, L., 2017b. Analisi del danno degli edifici ordinari nel centro storico di Norcia a seguito dei sismi del 2016. Atti del XVII Convegno ANIDIS - L'Ingegneria Sismica in Italia. Pistoia 17-21 settembre 2017. Pisa University Press srl.

Borri, A., De Maria, A., 2018. Il metodo IQM per la valutazione della qualità muraria. *Bollettino Ingegneri*, Collegio degli Ingegneri della Toscana.

Borri, A., Sisti, R., Prota, A., Di Ludovico, M., Costantini, S., Barluzzi, M., De Maria, A., Aisa, E., Bragetti, A., Savi F., Fagotti, G., Baldi, L., 2018a. La risposta strutturale egli edifici ordinari del centro storico di Norcia alla sequenza sismica del 2016. *Structural*, n. 216 – marzo/aprile 2018, paper 07, DOI 10.12917/STRU216.07.

Borri, A., Sisti, R., Zaroli, A., Prota, A., Di Ludovico, M., 2018b. Gli edifici di Campi Alto di Norcia nel sisma del

2016. Diversità nella risposta sismica di costruzioni consolidate in anni recenti. *Structural* n. 218 – luglio/agosto 2018 – paper 17 – ISSN 2282-3794, DOI 10.12917/STRU218.17
https://doi.org/10.12917/STRU218.17

Borri, A., De Maria, A., 2019. Qualità muraria secondo il metodo IQM: aggiornamento alla circolare esplicativa n. 7/2019. *Structural* n. 222. DOI10.12917/STRU222.06
https://doi.org/10.12917/STRU222.06.

Cons. Sup. LL. PP., 2019. Circolare n. 7 del 21 gennaio 2019. *Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018*. Supplemento ordinario alla G.U. n. 35 del 11.02.2019.

Doglioni F., Mirabella Roberti G., 2003. Prove sperimentali speditive e valutazioni di vulnerabilità delle murature. In Ministero per i Beni e le Attività Culturali, Istituto Centrale del Restauro, Monumenti e terremoti. Nuove esperienze di analisi di vulnerabilità-pericolosità sismica. Risultati del programma ENEA-MIUR, *MondoGIS,* Roma 2003, pp. 93-106.

Giuffrè, A., 1991. Lettura sulle meccanica delle murature storiche. Ed. Laterza.

Giuffrè, A., 1993. Sicurezza e conservazione dei centri storici. Il caso di Ortigia. Ed. Laterza.

Liberatore, D., 2004. Slide disponibili all'indirizzo:
http://www.crisbasilicata.it/admin\allegatidocumenti\upload\liberatore01245205138772.pdf

MIT, Min. Infrastrutture e Trasporti, 2018. D.M. 17.01.2018, *Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni*. Suppl. Ord. alla G.U. n. 42 del 20 febbraio 2018.

Ordinanza Commissariale, 2018. Testo disponibile all'indirizzo: https://sisma2016.gov.it/wp-content/uploads/2017/12/Allegato-ordinanza-n.-44-del-15-dicembre-2017.pdf

Regione Umbria, 2003. Allegato tecnico al B.U.R. del 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*.

ReLUIS, 2015. Report WP1_1-1_2015UNlPG disponibile sul sito ReLUIS all'indirizzo: http://www.reluis.it/images/stories/divulgazione/WP1_1-1_2015UNIPG_IQM_Report.pdf
http://www.reluis.it/images/stories/divulgazione/WP1_1-1_2015UNIPG_IQM_Allegati .pdf