

Indice di Qualità Muraria (IQM): correlazione con le caratteristiche meccaniche e livelli di conoscenza

Masonry Quality Index (MQI): correlation with the mechanical characteristics and knowledge levels

Antonio Borri¹, Alessandro De Maria² ■

Sommario

È noto che il comportamento meccanico della muratura dipende da molti fattori, come la resistenza a compressione o a taglio dei componenti (malta e blocchi), la forma e la dimensione degli stessi blocchi e la loro tessitura. Il comportamento della muratura è il risultato dell'applicazione di una serie di accorgimenti costruttivi che costituiscono la "regola d'arte". Tenendo conto della complessità del problema a causa del gran numero di variabili, una valutazione corretta della capacità delle murature può essere ottenuta solo con prove sperimentali in situ. Poiché tali prove sono semi-distruttive (quando non completamente distruttive), una stima numerica dei parametri meccanici delle pareti può essere effettuata sulla base di criteri di valutazione qualitativi. Il metodo qui proposto, denominato metodo Indice di Qualità Muraria (IQM), consiste nel valutare la presenza, la presenza parziale o l'assenza di alcuni parametri che definiscono la "regola dell'arte", ossia di un insieme di buone regole costruttive che, se seguite durante la costruzione di un muro, garantiscono un buon comportamento del muro e la sua compattezza e monoliticità a fronte delle sollecitazioni esterne. Nella seconda parte dell'articolo è presentata una serie di correlazioni tra IQM e i parametri meccanici della muratura (resistenza a taglio e compressione e moduli elastici E e G). Tale correlazione è stimata sulla base dei valori tipici derivati dal codice italiano. La correlazione tra IQM e resistenza a taglio è convalidata grazie a diverse prove effettuate su varie tipologie di muratura. Infine viene discussa una possibile modifica dei livelli di conoscenza introducendo IQM nelle Norme italiane per le costruzioni.

Parole chiave: Indice di qualità muraria, strutture in muratura, resistenza a taglio, edifici esistenti, livelli di conoscenza.

Abstract

It is known that the mechanical behavior of masonry material depends on many factors, such as compressive or shear strength of components (mortar and blocks), blocks shape, volumetric ratio between components and wall texture, that is the result of applying a series of construction devices which form the "rule of art". Taking into account the complexity of the problem due to the great number of variables, a fair assessment of the load carrying capacity of masonries can be made only with in situ test. Being in situ test a semi-destructive methods, not always viable, a numerical estimate of the mechanical parameters of the walls can be made on the basis of a qualitative criteria evaluation. The method here proposed, called Masonry Quality Index (MQI) method, consists in evaluating the presence, the partial presence, or the absence of certain parameters that define the "rule of the art", namely a set of construction devices that, if executed during the construction of a wall, provides a good behaviour and ensure the compactness and the monolithicity. In the second part of the paper a correlation between the MQI and the mechanical parameters of masonry (shear and compressive strength and deformation capacity modulus E and G) is estimated based on the typical values derived by the Italian code. The correlation between MQI and shear strength is validated thanks to several tests carried out on various masonry typologies. Finally it is discussed a possible change to the knowledge levels by introducing MQI in Italian code.

Keywords: Masonry quality index, masonry structures, shear strength mechanism, existing buildings, knowledge levels.

¹ DI – Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Perugia - ✉ antonio.borri@unipg.it

² Servizio Geologico e Sismico, Sezione III Normativa Antisismica e Rischio Sismico, Regione Umbria - ✉ ale.dm2002@libero.it

1. Introduzione

L'elevata vulnerabilità sismica di gran parte del patrimonio edilizio esistente in Italia rappresenta la prima e più importante problematica alla base dei danni e dei lutti sofferti nei terremoti passati, e di tale patrimonio le costruzioni in muratura costituiscono indubbiamente la quota di maggior rilevanza.

Perciò, da tempo, vari studi si sono indirizzati verso l'analisi di questi aspetti, con l'obiettivo di pervenire ad una previsione del comportamento sismico delle costruzioni murarie esistenti e quindi ad una loro preventiva valutazione di sicurezza.

In molti di questi studi è stato evidenziato come, tra i diversi elementi che influenzano la risposta sismica degli edifici, la qualità delle murature, intesa in senso meccanico, rappresenti uno dei punti più rilevanti.

Per giungere ad una valutazione di tale qualità occorre tenere conto però di diversi fattori, il primo dei quali è la grande varietà delle tipologie murarie presenti sul territorio nazionale. La loro molteplicità e la loro variabilità di declinazione a livello locale complicano non poco la possibilità di un confronto tra di esse in termini di resistenza e deformabilità, impedendo di fatto di seguire la via di una semplice classificazione e suddivisione in categorie di diversa qualità meccanica. La strada delle indagini diagnostiche dirette (cioè fatte in situ) fornisce certo un importante contributo, ma al di là del loro valore effettivo (talvolta solo puntuale) bisogna osservare che raramente si ha la possibilità pratica di effettuare quelle prove che possano fornire indicazioni meccaniche basilari, come ad esempio la resistenza e la deformabilità a taglio.

D'altra parte, tali parametri sono determinanti per le analisi condotte dai programmi strutturali, soprattutto per quelli attualmente più utilizzati nella pratica professionale, che riducono (più o meno appropriatamente a seconda dei casi) l'effettiva complessità di una costruzione muraria ad uno schema strutturale costituito da travi e pilastri, in cui governano in modo assoluto parametri come moduli elastici e resistenze.

Le norme tecniche italiane hanno riconosciuto solo di recente, con le NTC 2008, l'importanza della qualità muraria, recuperando finalmente quello che, in realtà, era noto da più di duemila anni. Basta ricordare la descrizione di Vitruvio su come i greci realizzino una buona muratura e confrontarla con il paragrafo della Circolare

n. 617/2009 (esplicativa delle NTC 2008) sullo stesso argomento:

Vitruvio³: [i Greci] *“collocano le pietre in piano e alzano la struttura muraria alternandole nel senso della lunghezza e dello spessore, non riempiono la parte intermedia, ma ottengono con i rivestimenti frontali un'unica struttura solida. Inoltre a intervalli dispongono di traverso al muro da una parte all'altra una di queste pietre che chiamano diatoni con la funzione di legare e consolidare l'opera muraria”*.

Circolare n. 617/2009: *“Di particolare importanza risulta la presenza o meno di elementi di collegamento trasversali (es. diatoni), la forma, tipologia e dimensione degli elementi, la tessitura, l'orizzontalità delle giaciture, il regolare sfalsamento dei giunti, la qualità e consistenza della malta”*.

Ciò che è stato aggiunto nella Circolare n. 617/2009, in ossequio alla filosofia positivista ottocentesca e soprattutto pensando alle necessità dei modelli numerici per le analisi strutturali, è la quantificazione, per alcune tipologie murarie, dei principali parametri meccanici.

I valori riportati nelle tabelle della Circolare del 2009 derivano, in genere, dai risultati di prove sperimentali condotte nel passato da vari ricercatori. Essi rappresentano la sintesi di una valutazione di come, ad una particolare combinazione delle diverse caratteristiche di una muratura (forma, dimensione degli elementi, etc) corrispondano determinate qualità meccaniche. La proposta riportata in questo articolo, ovvero il metodo dell'Indice di Qualità Muraria (IQM), si muove nel solco delle considerazioni sin qui esposte, seguendo però un approccio di tipo euristico. La valutazione della qualità meccanica di una tipologia muraria segue infatti un percorso di conoscenza che, partendo dall'osservazione e dalla ricognizione sistematica di alcune caratteristiche geometriche e fisiche della muratura in esame, va a considerarne il rispetto o meno della cosiddetta “regola dell'arte” e si conclude con un parametro numerico di sintesi (l'IQM) valutato mediante un modello numerico empirico, calibrato e pesato sulla base dell'esperienza.

Inizialmente questo metodo era stato proposto con finalità essenzialmente qualitative (Borri, Avorio et al., 2002) ma il risultato più interessante che si è trovato successivamente (Borri, De

³ «plana collocantes et longitudines eorum alternis in crassitudinem instruunt, non media farciunt, sed e suis frontatis perpetuam et unam crassitudinem parietum consolidant. Praeterea interponunt singulos crassitudine perpetua utraque parte frontatos, quos «διατονους» appellat, qui maxime religando confirmant parietum soliditatem».

Maria, 2009) consiste nelle sue capacità di fornire anche indicazioni di tipo quantitativo, viste le buone correlazioni che sono emerse tra indici IQM e valori dei parametri meccanici delle murature ottenute da prove sperimentali.

In fin dei conti, si potrebbe dire che si è ritrovato il legame tra le regole costruttive del buon costruire, dettate più di duemila anni fa, e i “moderni” parametri che caratterizzano il comportamento strutturale delle murature.

Se si considera poi l'importanza di tali parametri ai fini della risposta dei vari software di analisi, ad esempio nelle modellazioni a telaio, si può comprendere l'utilità di uno strumento come quello proposto nel presente articolo, idoneo a stimare in modo semplice e attendibile proprio quelle caratteristiche meccaniche da inserire nei programmi che valutano la risposta sismica di una costruzione esistente.

2. Introduzione e obiettivi del lavoro

Una tipologia muraria può essere esaminata da punti di vista anche molto diversi tra loro, e così, come noto, i percorsi di analisi e di caratterizzazione delle tecniche murarie si sono posti, in genere, obiettivi strettamente connessi agli ambiti scientifici di riferimento del rilevatore/ricercatore, mai convergenti verso una prospettiva condivisa (Macinelli M.L., Negri A.; 2011).

Si sono avuti perciò esempi di schedature con approcci di tipo storico-documentario, del tutto scollegati da percorsi di conoscenza interessati ad una effettiva valutazione delle caratteristiche meccaniche della tipologia muraria.

Così, anche quando sono state previste e raccolte informazioni che riguardavano gli aspetti meccanici, queste sono rimaste inutilizzate, confinate in pure opere di rilevazione destinate all'archivio.

È vero anche il viceversa, ovvero che sono state proposte schedature con approcci strettamente meccanici, avulse da analisi di tipo estetico, cronologico e documentaristico.

È il caso del metodo qui esposto, che si pone come unico obiettivo (forse aridamente riduttivo, ma utile e subito spendibile, ad esempio, per analisi di vulnerabilità sismica) di stimare in modo semplice le caratteristiche di resistenza e deformabilità di una determinata tipologia muraria. Ovviamente nulla impedirebbe l'integrazione di questo tipo di analisi dentro schede di interesse per altri settori scientifici.

Nella direzione dell'obiettivo suddetto, l'indice per la valutazione della qualità muraria, o IQM (“Indice di Qualità Muraria”) vuole sintetizzare in un valore numerico compreso tra 0 e 10 la qualità del comportamento meccanico di una determinata tipologia muraria.

Date le sostanziali differenze (soprattutto come effetti possibili) tra azioni verticali e azioni orizzontali che possono impegnare un pannello murario, o nel proprio piano, od ortogonalmente ad esso, l'indice IQM viene valutato in modo diverso a seconda della direzione dell'azione sollecitante.

Si hanno quindi, per una stessa tipologia muraria, tre distinti indici: IQM_V per azioni verticali, IQM_{FP} per azioni orizzontali fuori piano ed IQM_{NP} per azioni orizzontali nel piano.

Tali indici, come verrà in seguito descritto, dipendono essenzialmente dal rispetto o meno dei requisiti caratteristici della corretta ed efficace messa in opera della muratura: i cosiddetti parametri della regola dell'arte muraria.

Tramite l'osservazione diretta della muratura si valuterà il grado di rispetto di ogni parametro della regola dell'arte sulla base di alcune regole che saranno definite nel seguito. Il risultato finale è costituito da tre indici IQM per la tipologia muraria esaminata, distinti in base alla direzione dell'azione sollecitante.

Per ciascuna azione, dati i valori di IQM, verrà poi individuata una “categoria” di appartenenza della muratura – A, B o C – con l'obiettivo di qualificare la muratura in esame dal punto di vista del suo comportamento strutturale atteso.

Ad una muratura di categoria A corrisponde un buon comportamento strutturale; ad una muratura di categoria B corrisponde un comportamento di media qualità; una muratura in categoria C manifesta un comportamento insoddisfacente di fronte a quelle eventuali sollecitazioni.

3. Oggetto delle analisi e direzioni di sollecitazione

Come detto, alla base della metodologia proposta per la valutazione della qualità muraria c'è la verifica, attraverso alcuni semplici criteri, del rispetto o meno di quei requisiti che costituiscono la regola dell'arte del buon costruire.

A tal fine, si pensi di estrarre dalla muratura costituente una costruzione (o parte di essa) un singolo pannello di forma parallelepipedica, considerandolo a sé, come se fosse isolato dal resto dell'edificio ed esaminare se e come, in questo elemento murario, siano rispettati i requisiti della regola dell'arte.

Dato che la risposta della muratura dipende dal tipo di azione che sollecita il pannello, è però necessario esaminare separatamente il comportamento del pannello per tre diverse categorie di azioni:

- azioni verticali. Fra di esse si hanno: forze verticali concentrate (ad esempio quella dovuta ad una trave inserita nella muratura) e forze verticali distribuite sulla faccia superio-

- re del pannello (ad esempio quelle dovute ad un solaio o ad una parete sovrastante);
- azioni orizzontali che impegnano il pannello murario nel suo piano medio. Fra di esse si ricordano: le azioni sismiche rappresentate da una forza orizzontale complanare al pannello e posta sulla sua sommità;
- azioni che impegnano il pannello murario ortogonalmente al suo piano medio. Si tratta di sollecitazioni dovute a carichi eccentrici o a spinte statiche (per esempio, il momento flettente dovuto a solai eccentrici appoggiati sul bordo della parete, o le spinte di archi, volte, coperture) ma, più spesso e più pericolosamente, si tratta delle sollecitazioni dovute al sisma. Fra esse si ricordano: le forze sismiche orizzontali (concentrate o distribuite) agenti in sommità del pannello e ad esso ortogonali; tali forze possono essere causa di pericolosi meccanismi fuoripiano quali il ribaltamento, la flessione verticale e la flessione orizzontale.

Il fatto di considerare il diverso comportamento della muratura in funzione della particolare direzione di sollecitazione non è una complicazione ma, al contrario, si accorda con la natura anisotropa della muratura più volte evidenziata sia nel corso di prove sperimentali che nel corso dell'osservazione dei danni provocati dagli eventi sismici.

4. Parametri della regola dell'arte considerati nel metodo IQM

Per regola dell'arte si intende l'insieme di tutti quegli accorgimenti costruttivi che, quando seguiti nella costruzione di un muro, ne garantiscono il buon comportamento meccanico e ne assicurano la compattezza ed il monolitismo. Essa deriva da una pratica costruttiva millenaria e dall'osservazione diretta del comportamento delle murature sia in fase statica che sotto sisma ed è stata codificata nei manuali di epoca antica e premoderna.

I parametri geometrici e le modalità costruttive che si potrebbero considerare sono molteplici (Macinelli M.L., Negri A.; 2011) ma per necessità di sintesi e a vantaggio della praticità operativa, nel metodo IQM vengono considerati solo i seguenti *sette* elementi:

- **Malta di buona qualità/efficace contatto fra elementi/zeppe.** Questo requisito, necessario per trasmettere e ripartire le azioni fra le pietre in maniera uniforme e per portare in modo uniforme le forze fino al terreno, si ottiene o per contatto diretto fra elementi squadrati (es. opus quadratum) o tramite la malta (è questa la maggior parte dei casi) o, per

muri irregolari con malta degradata, grazie a pietre di dimensione minore inserite nei giunti, le cosiddette "zeppe". La malta oltre a regolarizzare il contatto tra le pietre, se di buona qualità, assicura una certa resistenza di natura coesiva alla muratura e tale contributo può diventare importante se mancano gli altri parametri della regola dell'arte in grado di garantire la monoliticità del muro.

- **Ingranamento trasversale/presenza di diatoni.** Questo requisito impedisce la suddivisione di una parete che ha più paramenti costruiti addossati l'uno all'altro e, inoltre, permette la distribuzione del carico su tutto lo spessore del muro anche in quei casi in cui c'è un carico gravante solo su una parte della sezione (ad esempio, un solaio appoggiato solo sul bordo interno). Il requisito può essere soddisfatto grazie ai diatoni, ossia pietre disposte trasversalmente che attraversano tutto (o quasi) lo spessore della parete. Ugualmente efficaci sono legature con elementi laterizi o di pietra non completamente passanti ma in grado di interessare gran parte dello spessore della parete ed ingranati fra loro (semidiatoni).
- **Elementi resistenti di forma squadrata.** La presenza di facce orizzontali sufficientemente piane assicura la mobilitazione delle forze d'attrito, cui si deve gran parte della capacità di una parete di resistere a sollecitazioni orizzontali ad essa complanari. Infatti l'attrito si mobilita principalmente sotto l'effetto della forza peso della muratura sovrastante la superficie di scorrimento. È intuitivo che l'attrito si massimizza per le superfici di scorrimento ortogonali alla forza peso, dunque per superfici di scorrimento orizzontali.
- **Elementi resistenti di grande dimensione rispetto allo spessore del muro** assicurano, come i diatoni, un buon grado di monoliticità della parete. Inoltre, proprio in virtù della loro grande dimensione, si tratta di elementi di grande peso
- **Sfalsamento fra i giunti verticali.** Tale condizione, insieme alla forma squadrata delle pietre, permette il cosiddetto "effetto catena" che fornisce una ("pseudo") resistenza a trazione alla muratura. Inoltre, anche se le pietre non sono squadrate, se si hanno giunti regolarmente sfalsati si mobilita un'altra grande risorsa resistente delle murature: l'ingranamento nel piano della parete fra gli elementi resistenti (detto anche "effetto incastro").
- **Presenza di filari orizzontali.** Tale requisito induce una buona distribuzione dei carichi verticali in quanto si ottiene un vincolo di appoggio regolare. L'orizzontalità dei filari

assume particolare importanza in occasione delle azioni sismiche, poiché essa consente una oscillazione ciclica attorno a cerniere cilindriche orizzontali, che può avvenire senza danneggiare la muratura. Per gli stessi motivi sono importanti quelle listature (ricorsi orizzontali in mattoni con interasse periodico) inserite a regolarizzare le murature in pietrame o ciottoli.

- **Buona qualità degli elementi resistenti.** Questo requisito tende ad evitare situazioni di intrinseca debolezza degli elementi murari: si pensi ai mattoni di fango che si utilizzano in certe zone del mondo o, per rimanere in Italia, i laterizi non cotti che si ritrovano in molti edifici rurali dell'Emilia Romagna. Situazioni analoghe si possono avere per laterizi forati con percentuale di vuoti elevata o per elementi degradati, ad esempio per umidità o per esposizione alle intemperie.

5. Criteri di giudizio sul rispetto dei parametri della regola dell'arte

Per attribuire un giudizio sulla qualità della muratura, come si è detto, occorre valutare in che misura siano rispettati i sette parametri prima descritti e caratterizzanti la regola dell'arte. Solo dopo questa operazione preliminare sarà possibile combinare tra loro i giudizi parziali, pervenendo così ad una valutazione sintetica complessiva.

Per esprimere un giudizio sul rispetto di un dato elemento della regola dell'arte bisogna però conoscere la tipologia muraria che si sta valutando e quindi occorre effettuare tutti quei saggi che permettono di osservare i parametri in questione. Si tratta, in definitiva, di levare l'intonaco in alcune zone dell'edificio e di fare piccoli scassi nello spessore, per poter esaminare in modo adeguato la sezione muraria.

È evidente quindi che il presupposto fondamentale alla base del metodo di valutazione qui proposto è che i tecnici ed i progettisti incaricati di valutare la sicurezza di un fabbricato esistente in muratura svolgano queste indagini visive necessarie per conoscerne la tipologia muraria.

Per tenere poi conto, per ciascuno dei sette parametri considerati, di possibili situazioni intermedie tra il pieno rispetto e l'assoluto non rispetto della regola d'arte è stata introdotta una categoria di giudizio intermedia, denominata "parziale rispetto" della regola dell'arte.

Infine, per limitare le possibili difficoltà legate

alla discrezionalità del giudizio sul rispetto o meno della regola dell'arte da parte di ogni singolo tecnico rilevatore sono stati predisposti due strumenti di riferimento: 1) una serie di schede operative, che indicano come valutare il rispetto o meno dei requisiti della regola dell'arte; 2) una serie di schede di analisi, con esempi di valutazione di varie tipologie murarie.

Nelle schede operative riguardanti i parametri della regola dell'arte sono riportate descrizioni, immagini, schemi grafici e criteri numerici che aiutano a riconoscere la presenza della regola dell'arte in una muratura e che possono orientare il giudizio sul rispetto o meno dei vari parametri, cercando in tal modo di ridurre le possibili disomogeneità di giudizio fra tecnici diversi.

Si riportano di seguito due esempi di schede sui parametri della regola dell'arte, la tabella sintetica di tali schede e due esempi di schede sulle tipologie murarie, rimandando al sito del Centro Studi Mastrodicasa per la documentazione completa (<http://www.mastrodicasa.com>⁴).

6. Attribuzione dei punteggi ai parametri della regola dell'arte

Il criterio seguito per differenziare l'importanza di ciascun parametro della regola dell'arte sul comportamento delle murature nei confronti dei tre tipi di azione considerati consiste nell'attribuire ai sette parametri qui considerati, pesi differenti, i cui valori numerici derivano, come detto in precedenza, dalle esperienze condotte dagli Autori.

Nelle Tabelle 6a, 6b e 6c sono riportati i punteggi da attribuire ad ogni parametro della regola dell'arte in funzione del suo rispetto pieno, rispetto parziale, o non rispetto ed in funzione del tipo di azione sollecitante preso in considerazione (azioni verticali, azione ortogonale al piano della parete, azione orizzontale complanare alla parete).

6.1 Azioni verticali

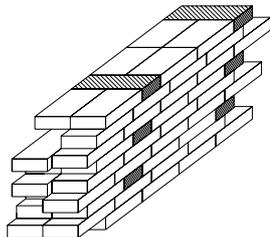
Una parete sottoposta alle sole azioni verticali può andare in crisi o per rottura a compressione o per instabilità. Dato che il metodo IQM si propone di valutare la qualità meccanica della tipologia muraria a prescindere dalle dimensioni degli elementi strutturali effettivi, saranno qui considerate principalmente le problematiche di resistenza, pur senza trascurare il fenomeno dell'instabilità, importante su tese murarie snelle ed estese.

⁴ Schede e manuale si trovano, una volta entrati nel sito, sotto la voce "documentazione".

Presenza di diatoni/ingranamento trasversale (P.D.)
(Valutazione "convenzionale" svolta senza osservare l'intera sezione muraria)

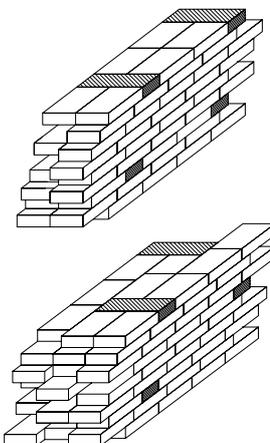
RISPETTATA

Paramento ben tessuto; blocchi o pietre di dimensione paragonabile a quella dello spessore della parete; presenza sistematica di pietre disposte di testa.



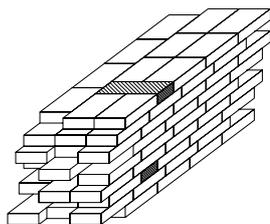
PARZIALMENTE RISPETTATA

Situazione intermedia fra il rispetto ed il non rispetto di tale parametro. Paramento ben tessuto ed ordinato almeno su una faccia; alcune pietre sono disposte di testa; spessore del muro non eccessivo rispetto alle dimensioni delle pietre (orientativamente: pietre di lunghezza massima almeno pari ai 2/3 dello spessore della parete).



NON RISPETTATA

Pietre piccole rispetto allo spessore del muro; assenza di pietre palesemente disposte in senso trasversale alla parete (di testa).



Nota sulla valutazione convenzionale

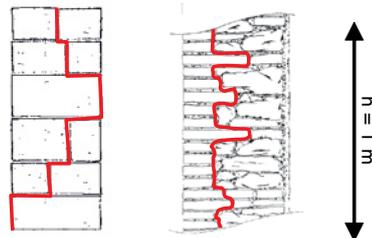
Per svolgere la valutazione convenzionale è assolutamente consigliabile eseguire uno o più saggi all'interno della muratura, in corrispondenza delle pietre che ad un esame esterno appaiono disposte di punta. Il saggio dovrà far capire se tali pietre penetrano in profondità nello spessore della parete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

La valutazione dell'ingranamento trasversale senza eseguire almeno un saggio interno può dare risultati attendibili soltanto in alcuni casi (es. per murature in laterizio o in blocchi squadrati regolari di spessore ridotto). È da notare che grazie a questo saggio si potranno desumere anche altre utili informazioni non ottenibili con il semplice esame esterno delle due facce della parete. Ad esempio si potrà valutare la consistenza della malta all'interno della muratura (spesso lo strato esterno di malta è quello più deteriorato e non indicativo del reale stato di conservazione della malta). Si potranno valutare anche la presenza di vuoti interni o la forma e dimensione delle pietre all'interno della parete.

Presenza di diatoni/ingranamento trasversale (P.D.)
(valutazione tramite la LMT⁵ trasversale – Sezione interamente osservabile)

RISPETTATA

LMT maggiore di 155 cm

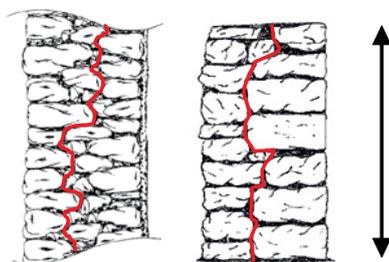


LMT = 160 cm

LMT = 176 cm

PARZIALMENTE RISPETTATA

LMT compresa fra 155 cm e 125 cm



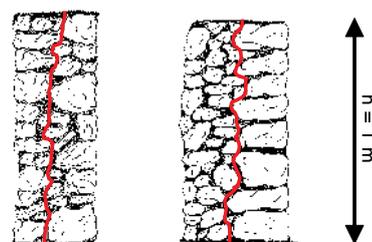
LMT = 145 cm

LMT = 126 cm

NON RISPETTATA

LMT inferiore a 125 cm

Pietre di piccole dimensioni qualunque sia il valore di LMT (es. parete con sacco interno)



LMT = 110 cm

LMT = 120 cm

Nota sulla LMT

LMT (sezione) ⇒ "Linea di Minimo Tracciato" interna alla sezione della parete. ⇒ il valore dell'LMT si ottiene misurando, su un tratto di 1 m di altezza, la lunghezza della linea centrale più breve che attraversa il nucleo murario in verticale, aderendo al lato interno dei conci dell'uno o dell'altro paramento.

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

⁵ Per l'idea originale della LMT e per una analisi più approfondita si vedano i lavori di Dogliani e altri e, nell'ambito ReLUIS, i contributi su tale argomento dell'unità di ricerca 18 (Università di Venezia).

Tabella 1 - Tabella di sintesi sul parametro "forma elementi resistenti"

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.

Tabella 2 - Tabella di sintesi sui parametri "ingranamento trasversale" e "orizzontalità dei filari"

Presenza diatoni/ingranamento trasversale (P.D.)		
Sezione muraria visibile ⁶	Sezione muraria non visibile (osservazione facce parete ed esecuzione di saggi interni)	Orizzontalità dei filari (OR.)
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 125 cm e 155 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.

Tabella 3 - Tabella di sintesi sui parametri "resistenza elementi" e "dimensione elementi"

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 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.

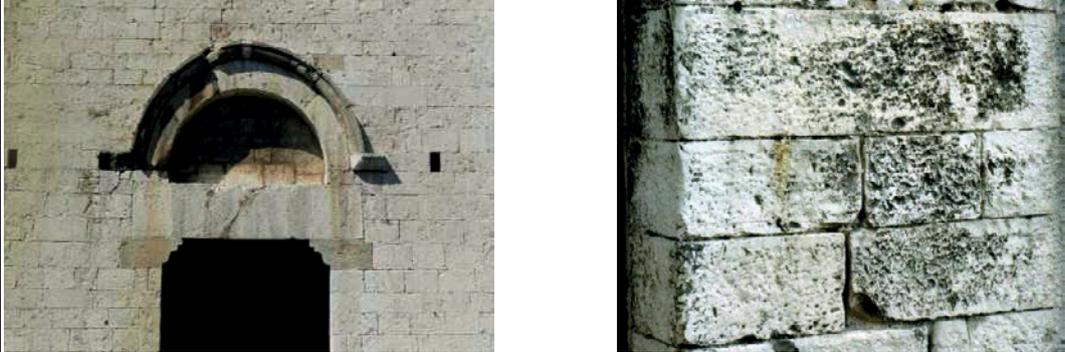
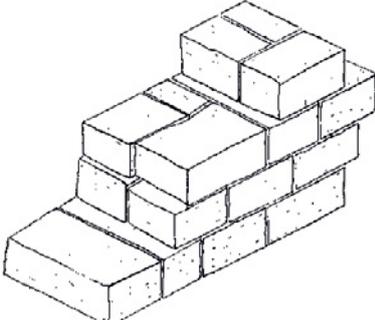
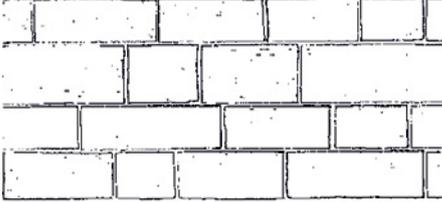
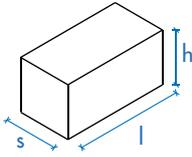
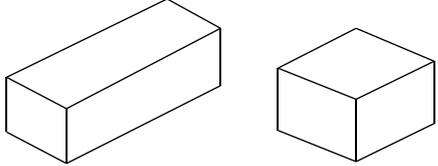
Tabella 4 - Tabella di sintesi sul parametro "sfalsamento giunti verticali"

Sfalsamento giunti verticali/Ingranamento nel piano (S.G.)	
Metodo quantitativo ⁷	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).

⁶ LMT (sezione) significa "Linea di Minimo Tracciato" (Dogliani, 2003) interna alla sezione della parete. Il valore di questo parametro si ottiene misurando, su un tratto di 1 m di altezza, la lunghezza della linea centrale più breve che attraversa il nucleo murario in verticale, aderendo al lato interno dei conci dell'uno o dell'altro paramento. La valutazione del parametro PD tramite la LMT trasversale potrà essere effettuata se è osservabile la sezione della parete. Tale condizione può non essere soddisfatta; in questo caso si svolgerà la valutazione della presenza dei diatoni tramite l'osservazione dei paramenti esterni della parete e l'esecuzione di saggi come detto in precedenza.

⁷ Si tratta di valutare la LMT "Linea di Minimo Tracciato" sulla faccia della parete, in analogia a quanto già illustrato nella nota precedente in relazione all'ingranamento trasversale. Si individuino su una porzione di muratura di 1 m x 1 m le linee di minimo tracciato più brevi che attraversano verticalmente la porzione di muratura suddetta senza mai intersecarsi e senza mai tagliare le pietre o i mattoni. La media delle loro lunghezze fornisce il valore della LMT su quella faccia della parete.

Figura 2
Esempi di schede
tipologiche.

SCHEDA DI VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ MURARIA								NUM. 01			
								FOTO			
 <p>Vista assonometrica</p>			 <p>Prospetto</p>			 <p>Sezione</p>			SCHEMI		
<p><i>Muratura di blocchi di pietra perfettamente squadrata.</i> 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).</p>											DESCRIZIONE
<p>Calcarea 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.</p>											MATERIALI
			<p>Dimensioni e forme ricorrenti dei blocchi: s = 15 ÷ 30 cm h = 15 ÷ 20 cm l = 15 ÷ 50 cm</p>						GEOMETRIA		
P.D.	MA.	F. EL.	S. G.	R. EL.	OR.	D. EL.	Categoria	Verticali	Fuori piano	Nel piano	ANALISI IQM
R	PR	R	R	R	R	R	Metodo Punteggi	A	A	A	
							LMT		160	166	
							IQM	8.5	9.5	9	
							Parametri meccanici: valori MIN-MAX	f_m (N/cm ²)	E (N/mm ²)	τ_0 (N/cm ²)	
								671-970	2554-3478	13.7-18.6	

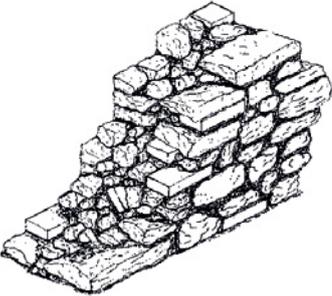
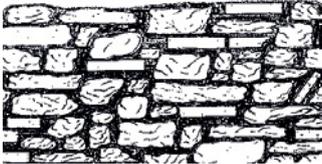
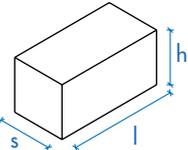
SCHEDA DI VALUTAZIONE DELLA QUALITÀ MURARIA								NUM. 11			FOTO
											
 Assonometria			 Prospetto			 Sezione			SCHEMI		
Muratura di blocchi di pietra sbazzata, ciottoli, laterizi e detriti vari. Muratura costituita da blocchi di pietra sbazzata di vario genere, ciottoli di fiume e laterizi; tessitura muraria caotica con assenza di filari orizzontali e sfalsamento dei giunti verticali. Presenza di diatoni casuale e parzialmente occupanti lo spessore murario. Malta di calce e sabbia mista a graniglia di cava, di qualità scadente.											DESCRIZIONE
Ciottoli di fiume naturali e spaccati. Calcarci compatti e a frattura concoide, colori vari. Laterizi di argilla cotta, interi o spaccati.											MATERIALI
		Dimensioni e forme ricorrenti dei blocchi: $s = 8 \div 15 \text{ cm}$ $h = 8 \div 15 \text{ cm}$ $l = 10 \div 26 \text{ cm}$						GEOMETRIA			
P.D.	MA.	F. EL.	S. G.	R. EL.	OR.	D. EL.	Categoria	Verticali	Fuori piano	Nel piano	ANALISI IQM
NR	PR	PR	NR	R	R	R	Metodo Punteggi	C	C	C	
N.B. La presenza di zeppe fa in modo che MA e F.EL. siano parzialmente rispettate. PD è non rispettata anche a causa del limitato numero di pietre passanti fra i due paramenti.							LMT		125	127	
							IQM	2	1.5	2	
							Parametri meccanici: valori MIN-MAX	f_m (N/cm ²)	E (N/mm ²)	τ_0 (N/cm ²)	
								151-259	791-1161	3.0-4.6	

Tabella 5 - Tabella di sintesi sul parametro "qualità della malta"

Qualità della malta/efficace contatto fra elementi/zeppe (MA.)	
	Malta scadente o degradata e polverulenta e del tutto priva di coesione. Malta assente (escluso caso previsto sotto in "R").
NR	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 squadrate 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.

Tabella 6a - Punteggi da attribuire ai parametri della regola dell'arte per IQM verticale.

	IQM verticale		
	NR	PR	R
OR _v	0	1	2
PD _v	0	1	1
FEL _v	0	1.5	3
SG _v	0	0.5	1
DEL _v	0	0.5	1
MA _v	0	0.5	2
REEL _v	0.3	0.7	1

Tabella 6b - Punteggi da attribuire ai parametri della regola dell'arte per IQM fuori piano.

	IQM fuori piano		
	NR	PR	R
OR _{FP}	0	1	2
PD _{FP}	0	1.5	3
FEL _{FP}	0	1	2
SG _{FP}	0	0.5	1
DEL _{FP}	0	0.5	1
MA _{FP}	0	0.5	1
REEL _{FP}	0.5	0.7	1

Tabella 6c - Punteggi da attribuire ai parametri della regola dell'arte per IQM nel piano.

	IQM nel piano		
	NR	PR	R
OR _{NP}	0	0.5	1
PD _{NP}	0	1	2
FEL _{NP}	0	1	2
SG _{NP}	0	1	2
DEL _{NP}	0	0.5	1
MA _{NP}	0	1	2
REEL _{NP}	0.3	0.7	1

La rottura per compressione, almeno per carichi ordinari, è più probabile se l'elemento resistente è intrinsecamente debole (ad esempio i laterizi forati, i mattoni di fango, etc...) oppure se la muratura è fortemente degradata (ad esempio perché sottoposta ad agenti atmosferici o ad umidità). Se si verifica una di queste due condizioni allora si è nella situazione in cui **R.EL. = NR**. In tal caso, i rimanenti parametri della regola dell'arte hanno un'importanza relativa. Per questo motivo se **R.EL. = NR**, il fattore moltiplicativo nella formula che valuta l'**IQM** è molto basso e quindi si ottiene un **IQM** molto basso.

Se la resistenza dei blocchi o delle pietre è elevata allora la rottura per compressione può essere legata a concentrazione delle tensioni all'interno della muratura.

I parametri che più di altri favoriscono una corretta diffusione delle tensioni nel solido murario sono: la presenza di blocchi squadrate (**F.EL.**), l'orizzontalità dei filari (**OR.**) e la buona qualità della malta (**MA.**). Per questo, come si può vedere dalla Tabella 6a, i parametri cui è stato attribuito maggior peso nella valutazione del comportamento di una parete soggetta a carichi verticali sono proprio **F.EL.**, **OR.** e **MA.**

Per quanto riguarda la problematica dell'instabilità, se ne è tenuto conto, in termini generali, premiando con un peso maggiore il rispetto o il rispetto parziale del parametro **P.D.** (presenza di

diatoni-ingranamento della parete) e distinguendo questi due casi da quello di totale assenza di ingranamento (non rispetto del parametro **P.D.**) in cui anche l'instabilità può diventare un motivo di crisi stante la maggiore snellezza della parete su più paramenti.

6.2 Azioni orizzontali fuori piano

Una parete sottoposta ad azioni orizzontali che tendono a deformarla a pressoflessione ortogonalmente al suo piano medio ha delle limitate porzioni di muratura soggette a forti tensioni di compressione. Si pensi, ad esempio, al caso di una parete che ribalta e alle tensioni che tendono a schiacciare gli elementi posizionati vicino alla cerniera orizzontale. In questi casi, quando la muratura ha elementi resistenti degradati o debolmente resistenti a compressione si perviene ad un **IQM** molto basso.

Il buon ingranamento interno fra i paramenti (**P.D.**) viene considerato comunque utile per la risposta delle murature ad azioni fuori piano, favorendone la monoliticità, e per questo gli è stato attribuito il peso maggiore.

Altri parametri cui è stato attribuito un peso elevato sono: la presenza di filari orizzontali (**OR.**), che favorisce l'oscillazione del muro attorno a cerniere orizzontali e la forma degli elementi resistenti (**F.EL.**). Tali considerazioni sono sintetizzate in Tabella 6b.

6.3 Azioni orizzontali complanari

Anche nel caso di azioni sollecitanti orizzontali complanari alla muratura (Tabella 6c) la presenza di elementi poco resistenti a compressione oppure molto degradati conduce ad un basso valore di **IQM**. Se invece gli elementi costituenti la muratura sono meccanicamente validi si procede alla valutazione degli altri parametri della regola dell'arte.

La resistenza di una parete per azioni orizzontali agenti nel suo piano è dovuta a molteplici fattori tra i quali:

- coesione, qualità conferita alla muratura da una malta di buona qualità (**MA.**);
- attrito; esso si esplica su superfici orizzontali (causa la verticalità della forza peso) di elementi resistenti a contatto fra loro, di qui l'importanza del parametro **F.EL.** Ma non basta: occorre anche che i giunti verticali siano sfalsati fra loro, affinché l'attrito si possa esplicitare, dunque per questo motivo si dà importanza al parametro **S.G.**;
- ingranamento ed incastro fra i blocchi; tale aspetto, oltre a mobilitare il peso proprio stabilizzante della parete, può definire la pendenza della lesione che si andrà a formare in caso di sisma. L'incastro (ingranamento) fra i blocchi è presente se si hanno blocchi squadrati (**F.EL.**) e giunti verticali sfalsati (**S.G.**).

Da quanto detto discende che i parametri della regola dell'arte ritenuti fondamentali per conferire alla muratura una buona resistenza ad azioni orizzontali complanari sono la presenza di blocchi squadrati, lo sfalsamento dei giunti verticali e la qualità della malta (**F.EL.**, **S.G.** e **MA.**).

È stato attribuito un peso maggiore anche alla presenza di diatoni (**P.D.**), importanti perché consentono alle azioni orizzontali complanari di andare a interessare l'intero spessore del muro.

7. Distinzione fra muratura in pietrame e muratura in mattoni pieni/blocchi

In base ad alcune evidenze sperimentali e ad alcune osservazioni di danni sismici anche recenti (vedi sisma in Emilia nel 2012) è emerso che nel caso delle murature in mattoni pieni (o in blocchi di dimensioni e caratteristiche paragonabili a quelle dei mattoni) la resistenza tangenziale media e quella a compressione media del pannello murario sono fortemente influenzate dalla qualità della malta.

Tale osservazione, confermata anche da analisi numeriche condotte mediante modelli ad elementi finiti (Borri, De Maria, Paci; 2011) si può spiegare come segue:

- in tali tipologie murarie spesso la tessitura è

tale che è possibile arrivare a rottura senza avere i contributi positivi dell'ingranamento fra gli elementi, a differenza di quanto avviene per le murature in pietra;

- in tali tipologie murarie la malta risulta spesso sensibilmente 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 espliciti esclusivamente sui giunti di malta nelle sue due forme: o rompendo la malta o causandone il distacco dalla superficie del mattone.

Tali fenomeni non insorgono, ad esempio, per il caso di muratura in blocchi di pietra squadrata, per le quali la funzione della malta è solamente quella di regolarizzare l'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.

Il metodo IQM tiene conto di tutto quanto sopra detto mediante un coefficiente correttivo "r", diverso a seconda dell'azione sollecitante considerata (ved. Tabella 7) che riduce adeguatamente gli indici IQM nel caso specifico di murature in mattoni pieni o a blocchi. Tali coefficienti sono stati determinati sulla base di alcune prove sperimentali svolte proprio su murature dell'Emilia Romagna (Borri, Castori, Corradi, Sisti; 2013) e sulla base di modelli numerici di simulazione di prove di compressione diagonale su pannelli di mattoni (Borri, De Maria, Paci; 2011).

8. Determinazione degli IQM

Inserendo i punteggi ottenuti dalle Tabelle 6a, 6b e 6c nelle formule riportate di seguito, si ottengono i tre IQM cercati.

Caso di murature NON in mattoni pieni o blocchi equivalenti:

$$IQM_V = REEL_V \cdot (OR_V + PD_V + FEL_V + SG_V + DEL_V + MA_V)$$

$$IQM_{FP} = REEL_{FP} \cdot (OR_{FP} + PD_{FP} + FEL_{FP} + SG_{FP} + DEL_{FP} + MA_{FP})$$

$$IQM_{NP} = REEL_{NP} \cdot (OR_{NP} + PD_{NP} + FEL_{NP} + SG_{NP} + DEL_{NP} + MA_{NP})$$

Caso di murature in mattoni pieni o blocchi equivalenti:

$$IQM_V = r_V REEL_V \cdot (OR_V + PD_V + FEL_V + SG_V + DEL_V + MA_V)$$

$$IQM_{FP} = r_{FP} REEL_{FP} \cdot (OR_{FP} + PD_{FP} + FEL_{FP} + SG_{FP} + DEL_{FP} + MA_{FP})$$

$$IQM_{NP} = r_{NP} REEL_{NP} \cdot (OR_{NP} + PD_{NP} + FEL_{NP} + SG_{NP} + DEL_{NP} + MA_{NP})$$

Il coefficiente correttivo r (distinto in r_V , r_{FP} ed r_{NP}) dipende essenzialmente dal parametro MA ed assume i valori riportati in Tabella 7:

9. Valutazione della categoria muraria

I valori trovati per gli IQM consentono una classificazione della qualità meccanica della muratura in esame che esprime, in modo qualitativo e sintetico la loro capacità di rispondere alle sollecitazioni verticali, a quelle orizzontali fuori piano o a quelle orizzontali (taglianti) nel piano. Per inciso, si può notare come la determinazione del comportamento meccanico di un pannello murario sottoposto ad azioni orizzontali è alla base dell'applicazione del metodo dell'analisi limite, recepito (finalmente) dalle NTC 2008.

La tabella 8 definisce, in funzione dei tre valori di IQM determinati attraverso la procedura prima illustrata, la classe di appartenenza della muratura in riferimento alle tre diverse possibili azioni sollecitanti.

Le categorie sono state denominate A, B e C⁸. La categoria migliore è la A, quella peggiore è la C; nella categoria B rientrano quindi le murature di qualità intermedia.

Il comportamento meccanico delle murature in base alle categorie suddette è interpretabile come segue:

Per azioni verticali:

- una muratura di categoria A difficilmente subisce lesioni e può essere considerata di buona qualità;

- una muratura di categoria B ha bassa probabilità di collassare, ma può lesionarsi; può considerarsi di media qualità;
- una muratura di categoria C ha elevata probabilità di subire lesioni o di andare fuori piano per instabilità, specie se di spessore limitato e se molto caricata, specialmente in corrispondenza di carichi concentrati. Tale categoria di muratura va considerata sempre di scarsa qualità.

Per azioni orizzontali fuori piano:

- una muratura di categoria A è in grado di mantenere un comportamento monolitico. Essa ha una probabilità 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, ma comunque non si disgrega se sottoposta ad azioni orizzontali fuori piano. Per tale categoria di murature è probabile avere lesioni o spancamenti in caso di sisma, ma è difficile che esse collassino se sono ben collegate agli orizzontamenti ed ai muri di spina. Le verifiche per meccanismi di ribaltamento 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 tende a disgre-

Tabella 7 - Coefficiente correttivo per murature in mattoni/blocchi

Parametro MA	r_V	r_{FP}	r_{NP}
NR	0.2	1	0.1
PR	0.6	1	0.7
R	1	1	1

Tabella 8 - Attribuzione delle categorie murarie

Categoria muratura di azione	Metodo dei punteggi		
	Tipo A	Tipo B	Tipo C
Azioni verticali	$5 \leq IQ \leq 10$	$2.5 \leq IQ < 5$	$0 \leq IQ < 2.5$
Azioni ortogonali	$7 \leq IQ \leq 10$	$4 < IQ < 7$	$0 \leq IQ \leq 4$
Azioni orizz. complanari	$5 < IQ \leq 10$	$3 < IQ \leq 5$	$0 \leq IQ \leq 3$

⁸ Si noti come tale classificazione delle murature riprenda quella del *Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione post-sismica degli edifici* edito dopo il sisma del 1997 in Umbria (Gurrieri, 1999) che, a sua volta, riprendeva la classificazione ideata da A. Giuffrè per il *Manuale del Recupero di Città di Castello* (Giovanetti, 1992). È da notare che le stesse lettere sono state usate in passato per identificare le classi di vulnerabilità nelle scale macrosismiche MSK ed EMS, dove però hanno un andamento opposto (da A, peggiore a C, migliore). Considerando che il metodo qui presentato può essere utilizzato anche nell'ambito del metodo per la classificazione sismica degli edifici esistenti proposta dagli stessi autori in un precedente articolo (Borri, De Maria, 2014; Borri, Casaglia, De Maria, 2014) e che in quella sede si utilizza una simbologia analoga a quella della certificazione energetica, si è mantenuto per le lettere A, B e C il significato dal migliore (A) al peggiore (C).

garsi in caso di azioni cicliche ripetute (sisma); per essa è molto probabile il collasso, anche in presenza di efficaci collegamenti. Tali murature sono da ritenersi sempre di scarsa qualità. Le verifiche per meccanismi di ribaltamento sono sostanzialmente non indicative, in quanto non sono rispettate le ipotesi di sufficiente coesione degli elementi murari.

Per azioni orizzontali nel piano:

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

10. Correlazione di IQM con i parametri meccanici della muratura

La finalità principale del metodo IQM nella sua proposizione iniziale (Borri, Avorio et al., 2002; Regione Umbria, 2003) era quella di mettere in grado tutti coloro che non avevano maturato particolari esperienze nel settore delle murature, di esprimere un giudizio sintetico sulla qualità muraria. Tenendo presente le carenze formative a questo riguardo dei corsi di studio, sia delle Facoltà di Ingegneria che di Architettura, sembrava utile fornire uno strumento operativo e semplice capace di distinguere anche solo in maniera grossolana (tre sole categorie) i diversi casi che si potevano trovare.

Successivamente alla definizione del metodo, sono state esaminate le correlazioni fra i valori di IQM e quelli dei parametri meccanici proposti dalle NTC 2008 per le diverse tipologie murarie descritte nella Circolare n. 617/2009, alla Tab. C8A.2.1., trovando risultati molto incoraggianti. Limitatamente al caso delle murature esistenti non consolidate la Circolare del 2009 riporta 6 diverse tipologie che, combinate con le possibili varianti considerate nella tabella C8A.2.2, definiscono (considerando tutte le combinazioni possibili) un totale di 36 diverse tipologie murarie. Queste tipologie murarie considerate dalla Circolare vengono qui denominate "murature di normativa". Per esse sono noti i parametri f_m , τ_0 , E e G, in quanto sono proposti nella tabella della Circolare esplicitativa nella forma di valore

minimo e valore massimo assumibili dal parametro in esame.

Tra le possibili correlazioni, quelle risultate di maggior successo sono le seguenti:

- correlazione di IQM_V con f_m ;
- correlazione di IQM_{NP} con τ_0 ;
- correlazione di IQM_V con E;
- correlazione di IQM_{NP} con G.

Ogni correlazione viene qui 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 , E oppure G, minimo, medio o massimo). In tale diagramma per ognuna delle 36 murature "di normativa" è riportato un punto; tale punto ha le coordinate individuate dall'IQM (verticale o nel piano) della muratura "di normativa" e dal valore (minimo, medio o massimo) del parametro meccanico della stessa muratura di normativa". Inoltre, sul diagramma la correlazione è rappresentata dalla curva esponenziale per la quale risulta minima la distanza rispetto ai punti rappresentativi delle murature "di normativa". L'equazione della curva è riportata sotto il diagramma.

Nelle Figure da 3 a 6 si riportano i grafici di tali correlazioni.

Come si può notare la correlazione tra G ed IQM_{NP} è la meno convincente e d'altra parte, come è noto, tale parametro risulta di problematica e discutibile misurazione. Perciò, per stimare il valore medio atteso per il modulo di taglio G è stata seguita nel metodo IQM la stessa strada delle NTC 2008, deducendo G come una frazione del modulo E.

11. Conferme sperimentali della correlazione tra IQM_{NP} e τ_0

Oltre a considerare i dati della Circolare n. 617/2009 (murature "di normativa") sono stati esaminati i risultati di varie sperimentazioni condotte negli ultimi anni da alcuni laboratori universitari, concentrandosi, data la sua importanza pratica, sulla correlazione di IQM_{NP} con la τ_0 .

Sono stati considerati i risultati di prove di compressione diagonale realizzate dall'Università di Perugia (40 prove), dall'Università di Firenze (17 prove) e dall'Università di Udine (3 prove), per un totale di 60 pannelli, di cui 55 appartenenti ad edifici reali, sottoposti a prova in situ, e 5 costruiti e sottoposti a prova in laboratorio. Le murature provate in situ sono distribuite nelle Regioni: Umbria, Abruzzo, Emilia Romagna e Toscana.

Come noto, la prova di compressione diagonale in situ consiste 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 che tendono

Figura 3
Curva di correlazione fra f_m medio ed IQM verticale.

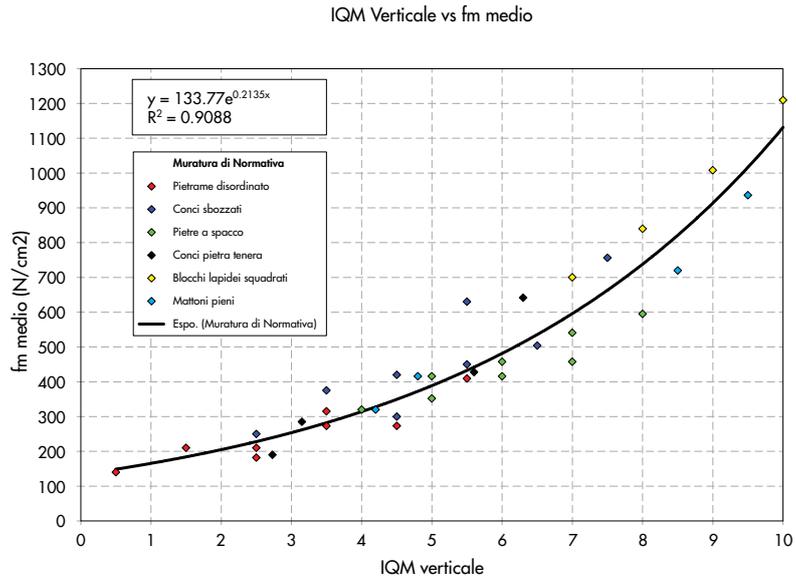


Figura 4
Correlazione fra τ_0 medio ed IQM nel piano.

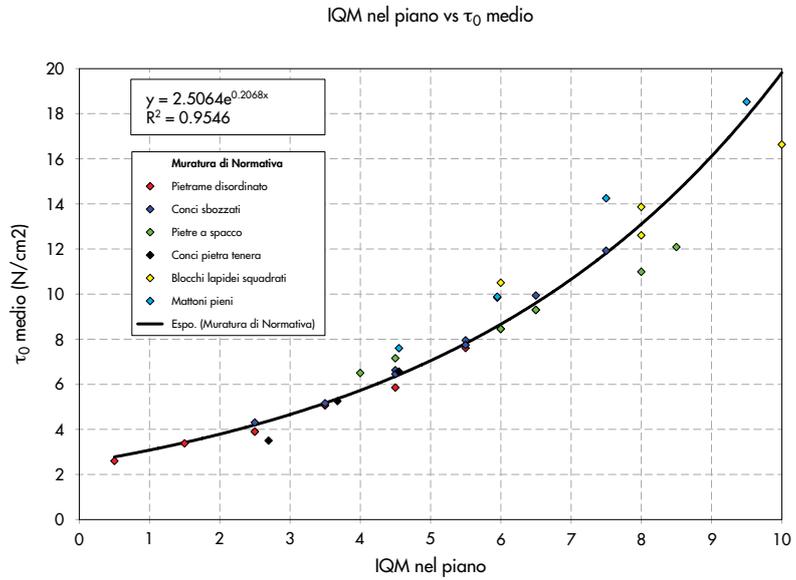
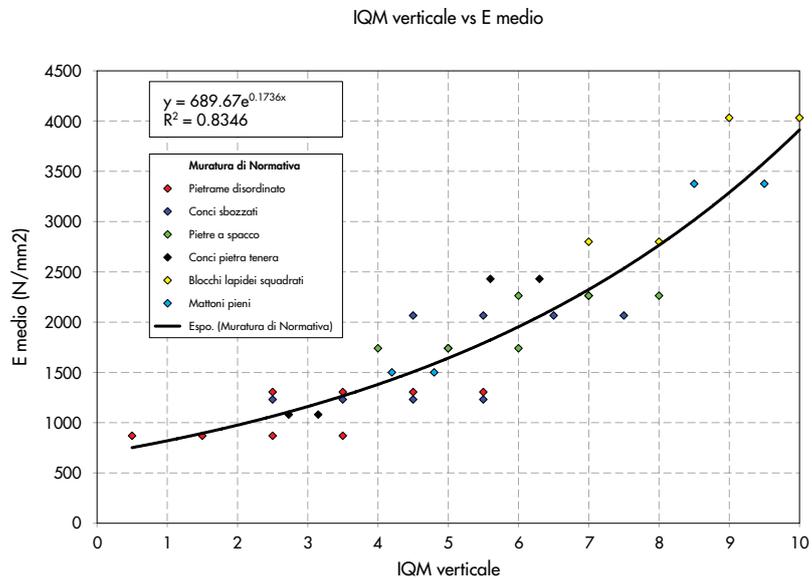


Figura 5
Correlazione fra E medio ed IQM verticale.



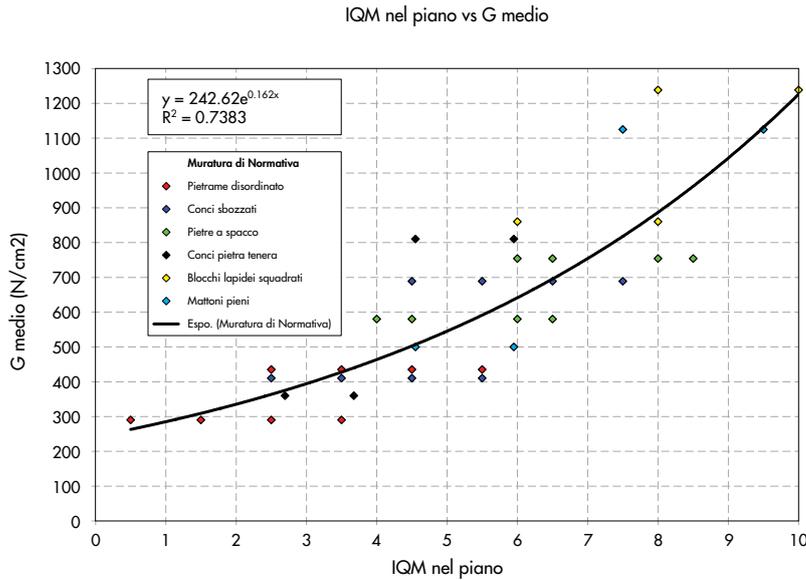


Figura 6
Correlazione fra G medio ed IQM nel piano.

a comprimerlo lungo una delle diagonali. Anche nel caso di prova in laboratorio il pannello ha forma quadrata con lato di 120 cm. Il pannello è preliminarmente strumentato con LVDT 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 n. 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:

$$\tau_0 = \frac{F_u}{3A} \tag{1}$$

dove A è la sezione orizzontale del pannello. Nelle Figure da 3 a 8 si riportano le correlazioni degli IQM_{NP} valutati per ciascuna delle tipologie murarie sperimentate, con i risultati delle prove sperimentali di compressione diagonale.

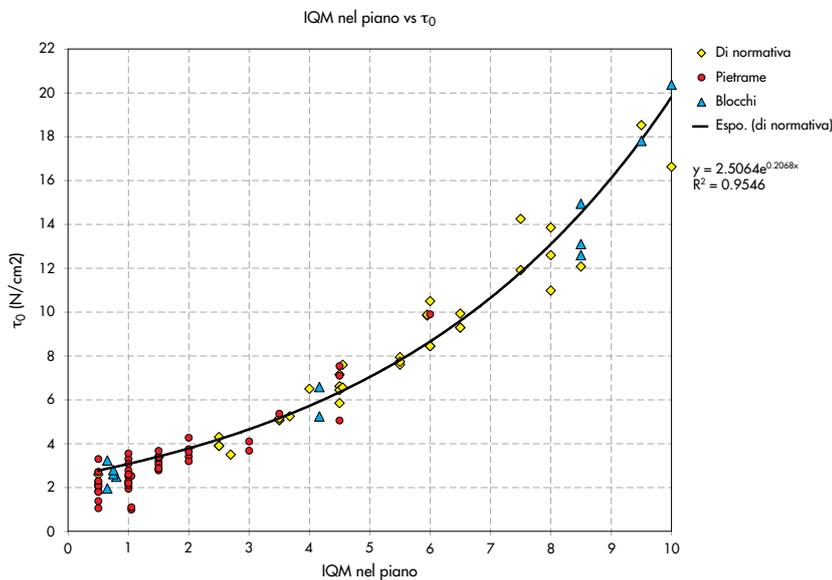
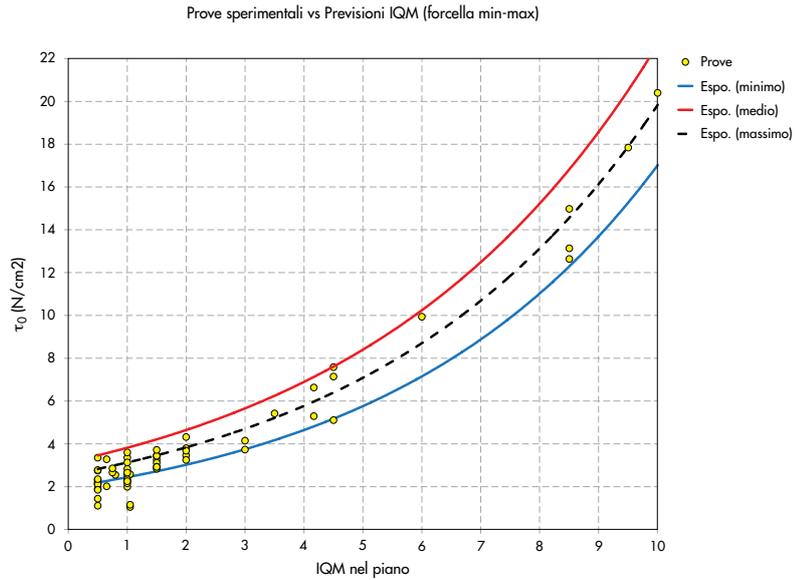


Figura 7
Diagramma di correlazione τ_0 medio vs IQM nel piano (IQM_{NP}) e punti corrispondenti alle murature "di normativa" ed alle prove di compressione diagonale (su murature reali) suddivise per murature in pietrame e murature in blocchi.

Figura 8
 Diagramma di correlazione τ_0 minimo, medio e massimo vs IQM nel piano (IQM_{NP}) e punti corrispondenti alle prove di compressione diagonale. Le curve di massimo e minimo derivano dalla correlazione tra IQM nel piano ed i valori massimo e minimo secondo le tabelle delle NTC 2008 per la resistenza media tangenziale delle murature di normativa.



12. Proposte per un uso dell'IQM in ambito normativo

Da quanto prima esposto si può comprendere come il metodo IQM si propone soprattutto come uno strumento indirizzato verso la conoscenza della qualità della muratura, che, come noto, è uno degli aspetti più importanti e significativi nel determinare la risposta statica e sismica di un edificio in muratura.

Per questo motivo sembrerebbe possibile, in occasione di prossime revisioni delle normative, considerare questo metodo all'interno nel percorso di conoscenza previsto dalle norme tecniche. In particolare, l'Indice di Qualità Muraria potrebbe essere utilizzato secondo due distinte finalità:

- A. "riconoscimento" della categoria muraria in esame fra quelle considerate nelle tabelle delle NTC 2008, in maniera analoga a quanto attualmente previsto per l'impiego dei martinetti piatti doppi e le prove di caratterizzazione della malta, ai fini della definizione del livello di conoscenza conseguito;
- B. "qualificazione" meccanica di murature che non siano ricomprese nelle tabelle della Circolare 617/2009, al fine di avere indicazioni (seppure orientative) sulle caratteristiche meccaniche in assenza di indagini sperimentali dirette.

Per quanto riguarda il primo caso si ricorda che nel dettato normativo attuale le prove coi martinetti piatti doppi servono unicamente a individuare la muratura in esame tra quelle previste nella tabella della Circolare 617.

Tale procedura nella sostanza è articolata nei seguenti passi:

- individuazione, fra le tipologie murarie previste dalla Circolare del 2009, della tipolo-

gia più aderente al caso in esame;

- esecuzione di prove di caratterizzazione della malta;
- esecuzione di una o più prove con martinetti piatti doppi e determinazione di f_m e del modulo elastico E della muratura;
- verifica se i valori trovati per f_m e per il modulo E ricadano nell'intervallo previsto dalle tabelle.

In caso positivo, il livello di conoscenza è LC2 e per i calcoli si assumono come resistenze i valori medi degli intervalli delle tabelle NTC e si dividono per un fattore di confidenza $FC = 1.2$.

In caso negativo si valuta se nella tabella delle NTC vi sia un'altra tipologia muraria la cui descrizione sia comunque simile a quella in esame; se i risultati dei martinetti rientrano in quelli della suddetta tipologia allora si potranno assumere tali valori ponendosi in LC2.

Se l'esito dei martinetti invece non corrisponde ad alcuna tipologia muraria (con descrizione compatibile con quella in esame) allora non esiste un nesso tra valori trovati per la muratura in esame e tabelle delle NTC e non si vede come uscirne se non, in modo poco onesto, dimenticandosi delle prove fatte.

Un ulteriore elemento di dubbio riguarda l'effettiva spendibilità dei risultati trovati con le prove con martinetti piatti doppi su certe tipologie murarie. Infatti, i martinetti vengono inseriti solamente sul paramento esterno della parete, per una profondità limitata e quindi ciò che viene misurato è in realtà la rigidità e la resistenza a compressione della sola parte esterna di parete.

Se lo spessore della parete è contenuto, oppure se la parete è visibilmente costituita dallo stesso materiale per tutto il suo spessore (es. parete in

mattoni o in tufo) allora i valori ottenuti con i martinetti piatti doppi sono affidabili. Se invece la parete è in pietrame a più paramenti, magari di spessore elevato, si rischia di misurare i parametri meccanici della fodera esterna di parete, solitamente più rigida e resistente della porzione interna, con una rilevante sovrastima della capacità resistente e deformativa della muratura.

Il metodo IQM potrebbe qui essere utilizzato abbandonando i martinetti piatti doppi (o in aggiunta ad essi) in una procedura così articolata:

- individuazione, fra le tipologie murarie previste dalla Circolare del 2009, della tipologia più aderente al caso in esame;
- esecuzione di prove di caratterizzazione della malta;
- osservazione accurata della muratura in esame mediante gli opportuni saggi;
- valutazione di IQM e stima del valore τ_0 medio della muratura attraverso le curve di correlazione viste in precedenza;

- verifica se il valore trovato tramite l'IQM ricada nell'intervallo previsto dalle tabelle; in caso positivo, il livello di conoscenza è LC2 e per i calcoli si assumono come resistenze i valori medi degli intervalli delle tabelle NTC e si dividono per un fattore di confidenza $FC = 1.2$.

Attraverso l'IQM, nel caso in cui non si trovi riscontro con valori della tabella, ci si può riferire ai valori dell'intervallo dato da IQM: si andrebbe comunque in LC1, però con valori "coerenti" con la muratura in esame, perché in questo caso la valutazione della muratura si basa sul riconoscimento sistematico delle sue specifiche caratteristiche.

Questa procedura, inoltre, avrebbe il vantaggio di basarsi su valutazioni relative all'intero spessore murario e non solamente ad un paramento esterno ed il "riconoscimento" della tipologia muraria sarebbe effettuato sui valori della resistenza media a taglio τ_0 che è uno dei parametri mag-

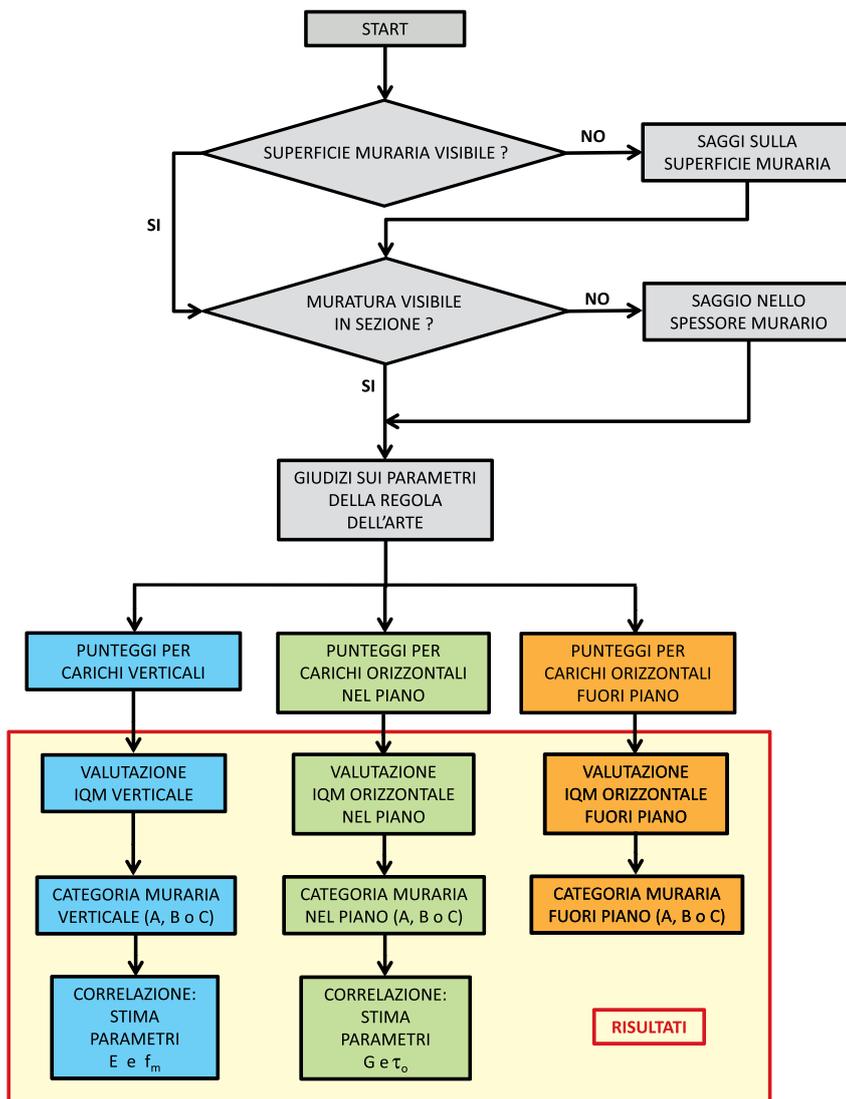


Figura 9
Diagramma di flusso sintetico per la valutazione della qualità muraria mediante IQM.

giormente significativi per il calcolo dell'edificio. Relativamente al punto B precedente ("qualificazione" meccanica), la bontà delle correlazioni tra IQM ed i parametri meccanici della muratura potrebbe consentire di utilizzare IQM per una caratterizzazione meccanica per via indiretta (cioè senza effettuare prove distruttive) di tipologie murarie non previste fra quelle di cui alle tabelle della Circolare n. 617/2009.

In particolare, per le murature in blocchi o mattoni la cui tessitura non è a regola d'arte, o per murature in elementi laterizi (o cementizi) forati, o per murature a due paramenti di tipologie murarie molto diverse tra loro o, in generale, per tipologie "non normate", si potrebbe seguire una procedura articolata nei seguenti passi:

- osservazione accurata della muratura in esame attraverso gli opportuni saggi;
- valutazione dei valori di IQM per la muratura in esame;
- adozione del livello di conoscenza LC1 (in via cautelativa) e quindi utilizzo dei valori minimi dei parametri meccanici ricavati dalle loro correlazioni con IQM_V e IQM_{NP} .

13. Conclusioni

Il metodo di analisi della qualità muraria basato sull'indice IQM può fornire alcune risposte, con un

certo grado di attendibilità, per quanto riguarda il comportamento meccanico delle diverse tipologie murarie, con una buona capacità di previsione delle caratteristiche meccaniche medie.

I risultati trovati mostrano infatti una ottima correlazione fra la resistenza a taglio e IQM nel piano, fatto questo di notevole rilievo per le possibili ricadute pratiche; si pensi alle difficoltà e all'invasività delle prove sperimentali necessarie per determinare direttamente tali resistenze.

È stata trovata anche una buona correlazione, almeno per le murature previste dalla normativa, fra la resistenza a compressione e IQM verticale. Su questo argomento è in corso di svolgimento un arricchimento dei dati della correlazione facendo riferimento ad una serie di prove sperimentali di compressione semplice e prove con i martinetti piatti doppi.

La correlazione fra IQM verticale ed il modulo elastico G mostra invece, almeno per le tipologie murarie "normate", qualche problematica in più, che appare legata però, almeno in parte, ad aspetti poco convincenti sulla definizione stessa dei valori da assumere per i moduli elastici.

Infine, la bontà delle correlazioni trovate suggerisce, per taluni casi, la possibilità di un utile impiego del metodo IQM nel percorso di conoscenza previsto dalle normative tecniche sulle costruzioni.

Bibliografia

- Borri A. et al. (2002) - La prevenzione. Studio sulla vulnerabilità sismica e proposta di interventi per un centro storico attraverso l'indagine tipologica e l'utilizzo di un database georeferenziato. Città di Castello. Tipolitografia Petrucci, Città di Castello.
- Borri A., De Maria A. (2014) - Certificazione/Qualificazione sismica: un approccio sostenibile per la classificazione degli edifici esistenti. Esempi applicativi. Structural n. 187, 2014.
- Borri A., De Maria A., Casaglia S. (2014) - Il metodo EAL-M per la classificazione sismica degli edifici in muratura esistenti: confronto tra diversi metodi proposti e prime considerazioni. Progettazione Sismica, n. 2, 2014.
- Borri A., De Maria A. (2009) - Scheda di valutazione dell'IQM (indice di qualità muraria). Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (RELUIS). Progetto esecutivo 2005-2008. Valutazione e riduzione della vulnerabilità di edifici in muratura. (Allegato 3b.1-UR06-1).
- Borri A., De Maria A. (2009) - Linee guida per la compilazione della scheda di valutazione dell'IQM. Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (RELUIS). Progetto esecutivo 2005 - 2008. Valutazione e riduzione della vulnerabilità di edifici in muratura. (Allegato 3b.1-UR06-2).
- Borri A., De Maria A. (2009) - Esempi compilati di scheda di valutazione dell'IQM. Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (RELUIS). Progetto esecutivo 2005-2008. Valutazione e riduzione della vulnerabilità di edifici in muratura. (Allegato 3b.1-UR06-3).
- Borri A., De Maria A. (2009) - Tabelle di correlazione tra IQM e tabelle delle NTC 2008. Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (RELUIS). Progetto esecutivo 2005-2008. Valutazione e riduzione della vulnerabilità di edifici in muratura. (Allegato 3b.1-UR06-4).
- 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: XIV convegno ANIDIS. L'ingegneria sismica in Italia. Sommari, relazioni ad invito, atti su dvd. Bari, 18-22 settembre 2011, Bari: Digilabs, ISBN/ISSN: 978-88-7522-040-2.
- Borri A., Castori G., Corradi M., Sisti R. (2013) - Tecniche Innovative di Rinforzo di Murature Storiche. XV Convegno ANIDIS L'Ingegneria Sismica in Italia, Padova.
- Doglion 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.

Donghi (1925) - Manuale dell'architetto. UTET, Torino.
Giovanetti F., a cura di (1992) - Manuale del recupero di Città di Castello. Ed. DEI, Roma.
Gurrieri F., a cura di (1999) - Manuale per la riabilitazione e la ricostruzione post-sismica degli edifici. Ed. DEI, Roma.
Macinelli M.L., Negri A. (2011) - Criteri di descrizione delle tecniche murarie per la predisposizione di moduli schedografici codificati. Ricognizione bi-

bliografica. ICCD - Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione, MiBACT.
Regione dell'Umbria, L. R. 23 Ottobre 2002 n° 18(2002) - Allegato tecnico pubblicato sul BUR del 30 Luglio 2003, "Norme tecniche per la progettazione degli interventi e la realizzazione delle opere di cui alla LEGGE REGIONALE 23 Ottobre 2002, n.18 finalizzate alla riduzione della vulnerabilità sismica".

Gli Autori

Prof. Ing. Antonio Borri

È Ordinario di Scienza delle Costruzioni, in servizio presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia.

Ricopre anche le cariche di:

Presidente del Centro Studi "Sisto Mastrodicasa" per il consolidamento ed il restauro.

Coordinatore del Master Universitario di II livello in "Miglioramento sismico, restauro e consolidamento del costruito storico e monumentale".

Vice Presidente del Consiglio direttivo dell'Associazione Italiana Compositi (AICO) di Venezia.

Socio fondatore e Membro del Consiglio Direttivo dell'Associazione italiana di Ingegneria Forense (AIF) di Napoli.

Responsabile del Laboratorio di prove su strutture e materiali nel Polo Scientifico Didattico di Terni.

È inoltre Membro del Consiglio Direttivo dell'Associazione per il Recupero e Consolidamento delle Costruzioni (ASS.I.R.C.CO.) con sede in Roma.

È socio "ad honorem" dell'Associazione Tecnologi dell'Edilizia (ATE) di Milano.

Ha svolto numerosissime convenzioni di ricerca con Enti pubblici e privati su argomenti di ingegneria strutturale, con particolare riferimento al consolidamento e restauro strutturale di edifici monumentali e all'analisi di vulnerabilità e monitoraggio del costruito storico (monumenti, centri storici, musei).

Ha fatto parte di gruppi di lavoro ministeriali e del CNR per la scrittura di normative tecniche.

Dal 2003/2004 dirige il Master di II livello in "Miglioramento sismico, restauro e consolidamento del costruito storico e monumentale".

Ha organizzato e continua ad organizzare, con il Centro Studi Mastrodicasa, numerosissimi corsi di aggiornamento professionale rivolti agli Ordini degli Ingegneri e/o degli Architetti di varie regioni italiane.

Ha fatto parte del gruppo di specialisti che ha condotto per la Galleria della Accademia di Firenze le indagini strutturali diagnostiche sulla statua del David di Michelangelo (2003-2006).

È stato responsabile scientifico per la diagnosi strutturale del Portico della Gloria nella Cattedrale di Santiago di Compostela (Spagna) e coordinatore delle indagini strutturali su tale monumento (2009-2010).

Ha condotto le analisi di vulnerabilità sismica relative all'affresco di Piero della Francesca "La resurrezione" nel Museo civico di Sansepolcro (2014-2015).

Si interessa principalmente di comportamento meccanico delle costruzioni storiche e di tecniche innovative per il loro consolidamento.

È autore di più di 300 pubblicazioni su volumi e riviste scientifiche, sia italiane che straniere.

Alessandro De Maria

Ingegnere civile strutturista, nel 1999 ha lavorato presso lo Studio Tecnico di Ingegneria Umbrioprogetti di Umbertide. Dal 2000 al 2015 ha lavorato al Servizio Controllo Costruzioni e Protezione Civile della Provincia di Perugia; dal 2015 lavora al Servizio Geologico e Sismico della Regione Umbria svolgendo attività di controllo e vigilanza su progetti e cantieri, consulenze strutturali e redazione di piani di protezione civile. Ha collaborato a numerosi lavori di ricerca, alcuni presentati ai convegni Anidis fra il 2004 ed il 2015.

Per la Provincia di Perugia ha partecipato al censimento danni del sisma abruzzese del 2009, del sisma di Marsciano del 2009 e del sisma in Emilia del 2012.

Dal 1999 collabora con la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia su tematiche riguardanti il comportamento delle costruzioni in muratura e la loro vulnerabilità sismica. È coautore di libri, articoli e pubblicazioni su tali argomenti, ma anche correlatore di alcune tesi di laurea e docente del Centro Studi Mastrodicasa.