

Abaco delle Murature della Regione Toscana

Sonia Boschi^a, Saverio Giordano^a, Nicola Signorini^b, Andrea Vignoli^a

^a Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Via di Santa Marta 3, 50139 Firenze.

^b Settore Sismica, Regione Toscana, Via San Gallo 34/a, 50129 Firenze

Keywords: sperimentazione in situ, tipologie murarie, parametri meccanici, IQM, abaco, website,

SOMMARIO

La conoscenza dei parametri meccanici delle murature è un requisito essenziale ai fini delle analisi e verifiche di sicurezza per gli edifici esistenti in muratura. Assunzioni non realistiche delle caratteristiche meccaniche possono portare a risultati inaffidabili dei coefficienti di sicurezza anche a fronte di utilizzo di analisi numeriche raffinate. La normativa tecnica, in Tabella C8A.2.1 (Circ. Min. 617/2009), fornisce i valori di riferimento delle caratteristiche meccaniche per undici categorie di muratura riscontrate nel territorio nazionale. Per l'eterogeneità della muratura, per la varietà di materiali impiegati e per le molteplici tecniche costruttive, non sempre risulta immediato inquadrare le murature reali nelle categorie sopra definite.

Nella memoria viene descritto il progetto *Abaco delle Murature della Regione Toscana*, finalizzato in un database web consultabile ed in aggiornamento, contenente i risultati di prove sperimentali eseguite su pannelli murari di edifici in muratura collocati in Toscana, opportunamente catalogati, rielaborati e georeferenziati. Tali risultati sono supportati da una descrizione qualitativa completa della muratura e dalla valutazione dell'Indice di Qualità Muraria per il pannello murario sottoposto a prova. L'Abaco delle Murature è uno strumento opensource sviluppato per fornire supporto a liberi professionisti ed accademici nella scelta delle caratteristiche qualitative e meccaniche delle murature e dei loro componenti.

1 INTRODUZIONE

Il territorio italiano è caratterizzato da un'elevata pericolosità sismica e da un diffuso patrimonio edilizio prevalentemente costituito da costruzioni storiche, realizzate per la maggior parte in muratura portante di pietrame e laterizio. Ai fini di una corretta valutazione della sicurezza sull'edificato esistente occorre eseguire una fase preliminare di indagine conoscitiva delle strutture oggetto di verifica, definita *processo di conoscenza* (NTC 2008). Tale procedura è volta ad individuare in modo completo gli organismi strutturali resistenti ed interpretarne il loro comportamento per azioni gravitazionali e sismiche, in modo da eseguire modellazioni che siano quanto più fedeli al loro reale comportamento strutturale. Ogni costruzione esistente rappresenta una situazione peculiare, con caratteristiche specifiche e difficilmente inquadrabile in contesti standardizzati, sia per le incertezze legate alla difficoltà di reperire informazioni storiche sia, e soprattutto, per la definizione delle caratteristiche meccaniche dei

materiali (Cattari et al. 2015, Boschi et al. 2016b). Assunzioni non realistiche dei parametri meccanici possono portare a risultati inaffidabili dei coefficienti di sicurezza anche a fronte di utilizzo di analisi numeriche raffinate (Augenti et al. 2012, Betti et al. 2017, Salvatori et al. 2017).

L'attuale normativa tecnica nazionale per le costruzioni e relativa circolare (NTC 2008 e Circ. Min.617/2009) prevedono, all'interno del processo di conoscenza, la possibilità di eseguire saggi e prove sperimentali sulle murature che costituiscono gli edifici oggetto di verifica in modo da identificarne direttamente i parametri meccanici. Tuttavia, l'esecuzione di prove sperimentali *esaustive* sulle murature in situ (§C8A.1.A.3) risulta essere difficoltosa, sia per aspetti economici, sia per aspetti esecutivo-operativi, in modo particolare per edifici a carattere storico e/o monumentale (DPCM 2011).

Nel caso in cui non vengano effettuate prove sperimentali, le caratteristiche meccaniche delle murature da utilizzare per le verifiche strutturali possono essere desunte dalla Tabella C8A.2.1 (Circ. Min. 617/2009), la quale fornisce i valori minimi e massimi delle caratteristiche

meccaniche di resistenza e deformabilità per 11 tipologie di muratura riscontrate nel territorio nazionale. In base al rispetto o meno di alcuni parametri qualificanti le murature, tali caratteristiche possono subire variazioni attraverso l'utilizzo di coefficienti correttivi, definiti in Tabella C8A.2.2. Risulta tuttavia frequente che murature appartenenti ad ambiti omogenei si discostino dalle definizioni delle categorie murarie valide a livello nazionale; questo perché le tecniche e le tipologie costruttive e le materie prime utilizzate per la realizzazione delle costruzioni risultano fortemente influenzate dalle condizioni al contorno di ciascuna realtà locale. Tra queste si possono citare ad esempio la disponibilità di materie prime nelle vicinanze, la tradizione costruttiva della zona, l'eterogeneità dei materiali utilizzati e la disponibilità economica dei committenti.

Per completare la mancanza di specificità della caratterizzazione muraria definita a livello nazionale e considerare le peculiarità di tipologie murarie esistenti localmente, le Regioni possono sviluppare abachi murari particolareggiati, che permettano di declinare le tipologie costruttive nazionali calandole a livello locale e caratterizzandole in modo qualitativo e quantitativo, come riportato in C8A.1.A.3: «..Qualora esista una chiara, comprovata corrispondenza tipologica per materiali, pezzatura dei conci, dettagli costruttivi, in sostituzione delle prove sulla costruzione oggetto di studio possono essere utilizzate prove eseguite su altre costruzioni presenti nella stessa zona. Le Regioni potranno, tenendo conto delle specificità costruttive del proprio territorio, definire zone omogenee a cui riferirsi a tal fine..».

In questo contesto, la memoria presenta i risultati del progetto *Abaco delle Murature della Regione Toscana*, finalizzato in un database su pagina web contenente i risultati di prove sperimentali eseguite su pannelli murari di edifici in muratura collocati in Toscana. In particolare, sono descritti il campione di dati raccolto e la procedura che è stata messa a punto per la caratterizzazione sia qualitativa sia quantitativa delle murature analizzate. Nella parte finale della memoria vengono mostrati alcuni risultati ottenuti in termini di caratteristiche meccaniche e viene descritta la procedura di ricerca eseguibile dall'applicativo web.

2 DATABASE DI RIFERIMENTO

L'Abaco delle Murature è stato sviluppato per fornire supporto a ricercatori e liberi

professionisti nella scelta delle caratteristiche meccaniche delle murature e dei relativi componenti, e si configura come un database online consultabile ed in continuo aggiornamento di risultati di prove su pannelli murari di edifici in muratura portante collocati in Regione Toscana, opportunamente catalogati, rielaborati e georeferenziati.

L'Abaco delle Murature nasce per volontà e dall'accordo di collaborazione scientifica tra il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze ed il Settore Sismica della Regione Toscana. L'accordo scientifico ha riguardato inizialmente la raccolta e catalogazione di risultati di prove sperimentali esistenti su murature, successivamente la descrizione qualitativa approfondita delle strutture murarie sulle quali erano state svolte prove sperimentali, la trattazione e l'interpretazione dei dati acquisiti e, come ultimo passo, la divulgazione dei risultati ottenuti tramite la realizzazione di una piattaforma web dedicata.

I dati delle prove sperimentali provengono dalla letteratura scientifica esistente, sono il risultato di attività di collaborazione scientifiche tra il Settore Sismica della Regione Toscana ed i Laboratori di Prove dei Dipartimenti di Ingegneria e di Architettura delle Università toscane (a partire dagli anni '90) o sono dati condivisi da Laboratori di Prova privati che svolgono attività principalmente nel territorio toscano. Le prove sperimentali sono state georeferenziate se i risultati delle sperimentazioni associate erano stati già pubblicati. Per i dati delle prove non ancora resi pubblici dalla proprietà, al momento di pubblicazione dell'Abaco, la localizzazione dell'edificio ed i dati sensibili contenuti nelle prove sono stati resi anonimi.

2.1 Prove sperimentali

Il database delle prove raccolte allo stato attuale comprende 110 prove *in situ* su pannelli murari collocati in Toscana di cui 50 prove di *compressione diagonale* (CD, 45%), 5 prove di *compressione semplice* (C, 5%) e 55 prove eseguite con *martinetti piatti doppi* (MP-d, 50%) in murature di diverse tipologie. Le prove sui pannelli murari erano talvolta accompagnate da prove sui singoli componenti della muratura (elementi naturali o artificiali e/o malta), quali: prova di *compressione sui blocchi* (CB, 10%), *prova penetrometrica con DRMS* sulla malta (DRMS, 23%) o *analisi macroscopica e microscopica della malta* (AM, 11%). In alcuni casi sono state effettuate delle prove di estrazione di campioni di muratura attraverso l'esecuzione di

carote (CAR, 17%), al fine di esaminarne la stratigrafia e le caratteristiche interne delle sezioni murarie (quali la compattezza della muratura, la presenza o assenza di vuoti, etc.).

La distribuzione geografica per le prove raccolte è visibile in Figura 1, da cui si evince che la maggioranza delle prove è collocata nelle Province di Firenze, Arezzo, Lucca e Massa Carrara, nelle quali vi sono molti Comuni caratterizzati da un'elevata pericolosità sismica.

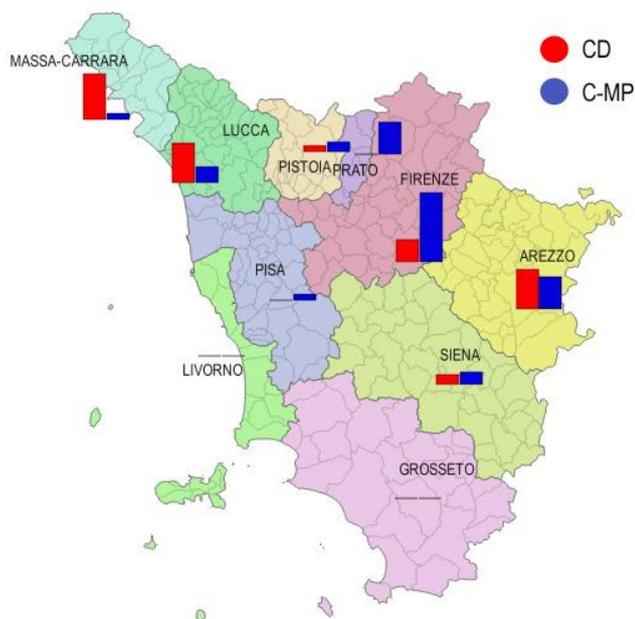


Figura 1. Localizzazione delle prove sperimentali nelle province toscane.

Il 68% delle prove totali è stato eseguito da laboratori di prova universitari (di cui il 58% dal Laboratorio Prove Strutture e Materiali del DICEA-UNIFI), il restante 32% è stato eseguito dai Laboratori privati Delta s.r.l. e Sigma s.r.l.

Circa il 75% delle prove raccolte è stato eseguito nel decennio 2005-2015 per la maggiore facilità di reperimento dei dati grazie anche all'utilizzo di strumenti digitali e per le estese campagne di caratterizzazione meccanica delle murature promosse negli edifici strategici e rilevanti a seguito del sisma del Molise (2002), mentre il restante 35% risale al decennio precedente (1995-2005).

In Figura 2 è riportato l'istogramma con la distribuzione della tipologia di edificio in cui sono state svolte le prove. In particolare, il 10% delle prove è stato svolto su edifici ordinari privati (intendendo con *ordinari* "quelli, prevalentemente per abitazioni e/o servizi, oggetto della scheda AeDES..", cit. da Zuccaro e De Gregorio 2016, ad esempio civili abitazioni), in circa l'84% si tratta di edifici ordinari pubblici (ad esempio scuole) mentre il 6% ha riguardato prove eseguite su edifici non ordinari pubblici, ad esempio torri o cupole di chiese (prove eseguite

esclusivamente da laboratori universitari). In Figura 3 è riportato l'istogramma con la distribuzione dell'anno di completa realizzazione delle costruzioni. Circa il 35% del campione riguarda costruzioni storiche (antecedenti al 1919, in parte risalenti all'epoca rinascimentale). In tali costruzioni sono state eseguite per lo più prove semi-distruttive (MP-d 31%), a riprova della quasi impossibilità di eseguire prove distruttive (compressioni diagonali o compressioni) in edifici storico-monumentali. Solo una piccola percentuale di edifici riguarda edifici "moderni", costituiti da murature in mattoni pieni o forati, mentre quasi il 60% del campione è all'incirca equamente distribuito in edifici costruiti nei periodi dal 1920-1949 al 1950-1981. È stato importante eseguire questa suddivisione poiché considerare il campione omogeneo tra edifici ordinari ed edifici non ordinari, storici e moderni, avrebbe portato a dei range di valori dei parametri meccanici di riferimento non significativi, poiché riferiti a delle classi non omogenee di strutture, anche per stesse tipologie murature.

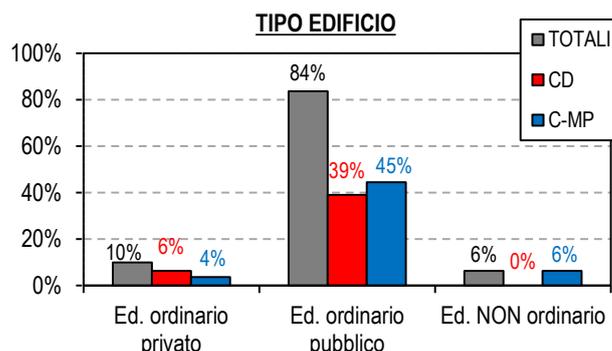


Figura 2. Classificazione degli edifici su cui sono state eseguite prove sperimentali su base tipologica.

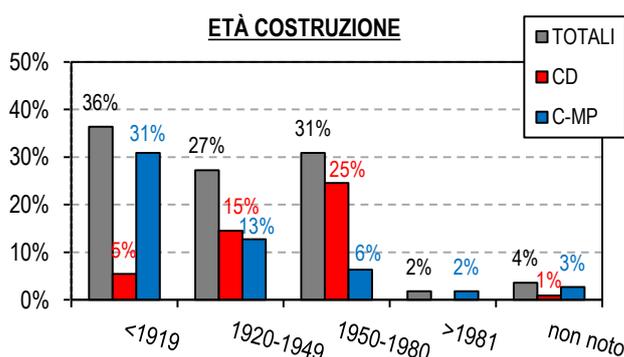


Figura 3. Anno di fine realizzazione (in alcuni casi presunto) degli edifici su cui sono state eseguite le prove.

3 METODOLOGIA

Dopo una prima fase di raccolta del materiale, è stato necessario delineare una metodologia di classificazione e catalogazione delle murature attraverso la quale si evincessero le maggiori

caratteristiche dei pannelli murari. Ciò si è reso necessario per permettere all'utente dell'*Abaco delle Murature* di avere elementi per riconoscere tipologie di murature simili e potervi associare le caratteristiche meccaniche estrapolate dal database. In parallelo, per tutte le tipologie di prove sperimentali è stato necessario delineare una procedura di prova ed una trattazione univoca dei rilievi sperimentali, per ottenere dai dati misurati durante la prova i parametri meccanici che, associati alle stesse caratteristiche di componenti, potessero essere comparati tra loro. Quest'ultimo passaggio è stato fondamentale poiché, per le prove di caratterizzazione muraria in situ, non essendovi normative codificate cogenti sulla modalità di prova (preparazione del pannello da testare, esecuzione della prova e modalità di trattazione dei dati sperimentali), i risultati erano spesso trattati in modo differente e di conseguenza non confrontabili tra loro. Ad esempio, in letteratura, per prove di compressione diagonale si può far riferimento sia alla normativa statunitense ASTM E 509-07, a raccomandazioni europee RILEM 1991, o a raccomandazioni italiane ReLUI (2009) (Brignola et al. 2008, Calderini et al. 2010, Vignoli et al. 2016).

Lo schema delle informazioni contenute nel database e l'idea dell'organizzazione del materiale presente nel sito web, sono riportate in Figura 4.

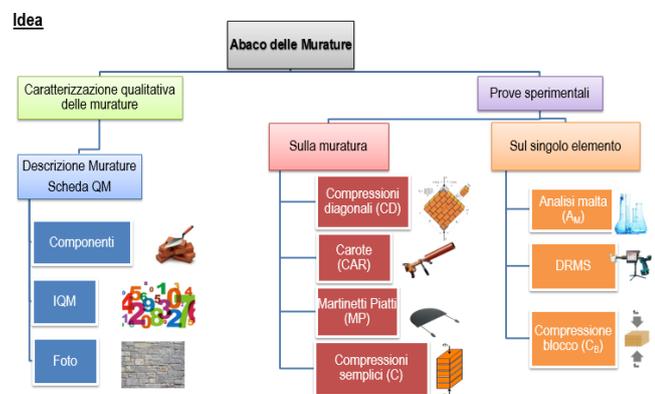


Figura 4. Schema del progetto Abaco delle Murature.

3.1 Caratterizzazione qualitativa delle murature

La caratterizzazione dettagliata della tipologia di muratura è stata effettuata compilando delle *Schede di Qualità Muraria* (nel seguito SQM) articolate su tre sezioni, implementate dal DICEA nell'ambito del progetto di ricerca DPC-ReLUI 2014-16, linea murature; le schede hanno come base la "Scheda di Qualità Muraria" proposta da Binda et al. (2009), in cui sono state apportate alcune modifiche ed integrazioni in relazione alla possibilità di catalogare murature costituite sia da

pietra naturale sia artificiale e differenti tipi di blocchi, nell'ottica di coprire con la schedatura tutte le categorie di muratura presenti in Normativa ed eventualmente integrarle con murature particolari già catalogate come presenti in Toscana (Boschi et al. 2016a). La compilazione della scheda permette una caratterizzazione completa della muratura, conduce il compilatore a porre l'attenzione su dettagli e caratteristiche specifiche della muratura e dei materiali componenti (i cosiddetti parametri della "regola dell'arte", Borri et al. 2015) e pertanto consente di facilitare la catalogazione delle murature esaminate. La Scheda di Qualità Muraria già presentata in Boschi et al. (2015), è composta da tre sezioni, come di seguito definite.

1) *parte prima*: contiene informazioni generali riguardanti l'edificio in cui è collocata la muratura e la tipologia di muratura stessa. In particolare, contiene la denominazione del pannello, l'ubicazione all'interno della struttura (il piano in cui si trova il saggio oggetto di indagine, etc...), immagini esplicative, la data del rilievo ed informazioni sul rilevatore. Contiene informazioni sulla categoria di appartenenza della muratura inquadrando, se possibile, la tipologia di muratura tra quelle presenti nelle classificazioni riportate nella Tabella C8A.2.1-2 (Circ. 617/2009) o nell'abaco delle tipologie murarie elaborato dalla Regione Toscana (AA.VV. 2003, Boschi et al. 2015). Sebbene sia riportata nella parte iniziale della scheda, l'attribuzione della categoria muraria può essere solo eseguita a valle della compilazione di tutta la scheda stessa.

2) *parte seconda*: contiene le caratteristiche macroscopiche principali del paramento murario e della sezione muraria (se valutabili). Si caratterizzano per forma, dimensioni, tipologia, provenienza, etc... gli elementi costituenti la muratura: blocchi e malta. Sono riportati in questa sezione anche degli schemi grafici rappresentanti le distribuzioni di elementi resistenti, malta e vuoti del paramento e della sezione, utili alla classificazione della muratura.

3) *parte terza*: contiene le osservazioni che emergono in seguito alla compilazione delle prime due sezioni della scheda, in rapporto alla tipologia di muratura, allo stato di conservazione della stessa. Inoltre, sulla base dei risultati ottenuti dalla compilazione, viene attribuito l'Indice di Qualità Muraria (Borri et al. 2015) alla muratura del pannello murario considerato.

L'analisi della documentazione fotografica del paramento e della sezione muraria e la compilazione delle SQM hanno permesso di inquadrare, in modo ragionato, le murature esaminate dentro le categorie della classificazione

nazionale. I risultati della classificazione delle prove secondo la tipologia muraria sono riportati nell'istogramma di Figura 5. Il campione è costituito da 108 prove totali, poiché per due prove sono stati forniti solo record numerici senza informazioni o immagini che permettessero di compilare la SQM e quindi di assegnare la categoria di muratura. L'ampio numero di categorie di muratura all'interno della classificazione nazionale, incrociando tutte le combinazioni tra le categorie della Tabella C8A.2.1 con le caratteristiche della Tabella

C8A.2.2, ha prodotto un elevato numero di classi nella suddivisione della tipologia di muratura per il campione di studio, per le quali sono disponibili risultati omogenei dei test, ma, per ora, in numero limitato. Per visualizzare con maggiore facilità i risultati del campione di dati, almeno in questa fase, è quindi stato necessario l'accorpamento tra macro-categorie in modo da avere una quantità di record statisticamente significativa per la determinazione dei parametri meccanici di riferimento (visualizzabile con le parentesi graffe in Figura 5).

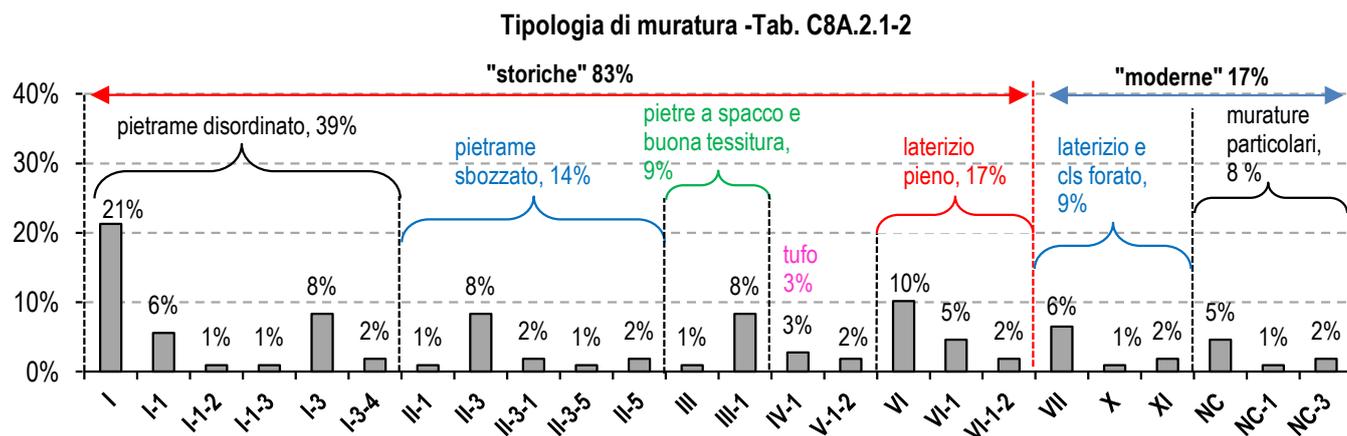


Figura 5. Classificazione delle prove sperimentali in base alla tipologia di muratura secondo la classificazione nazionale (Tabelle C8A.2.1-2. Circ. Min. 217/2009). Le 11 categorie di muratura della Tab. C8A.2.1 sono indicate attraverso numeri romani (I-XI), i coefficienti correttivi Tab. C8A.2.2 sono invece indicati con numeri arabi 1÷5.

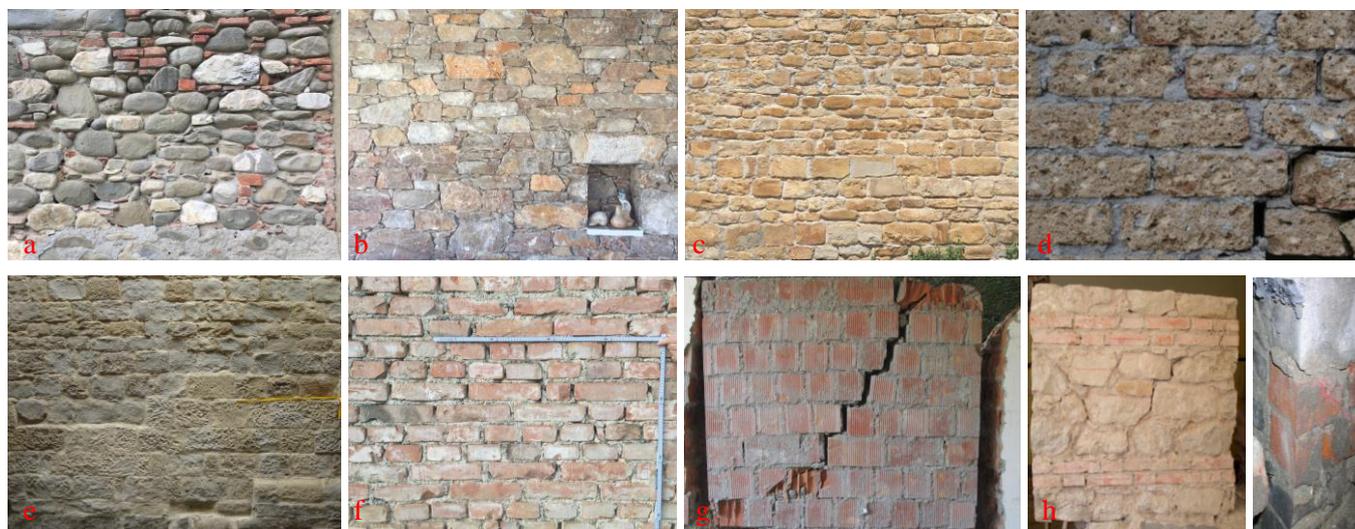


Figura 6. Esempi di tipologie di murature testate. a) Muratura in pietrame disordinato; b) muratura in pietrame sbozzato; c) muratura a spacco con buona tessitura; d) muratura in tufo; e) muratura blocchi lapidei; f) muratura in mattoni pieni; g) muratura in mattoni forati; h) muratura in pietrame sbozzato con ricorsi in mattoni pieni (prospetto e sezione).

Circa il 39% delle prove è stato eseguito su muratura di pietrame disordinato (Figura 6a), composto da pietre di varia pezzatura, in molti casi ciottoli arrotondati di fiume o pietre irregolari, generalmente male intessuto e privo di collegamento tra i due fogli. Di questa percentuale, il 10% ha ricorsi, per la maggior parte in mattoni pieni ed in alcuni casi costituiti da fasce di calcestruzzo. Nel 2% dei casi i ricorsi

in calcestruzzo garantiscono anche una buona connessione trasversale. L'8% dei casi ha malta con caratteristiche di buona qualità, ovvero è caratterizzata da distribuzione regolare sul paramento senza zone in cui risulta degradata o assente, con giunti orizzontali abbastanza ordinati, mediamente sfalsati e di consistenza non friabile al tatto. Circa il 14% è costituito da pietrame sbozzato (Figura 6b) ovvero formato da

pietre con spigoli vivi (non arrotondato) e con tessitura non regolare nel paramento. In questo caso la maggioranza (8%) delle prove raccolte è costituita da muratura con ricorsi in mattoni pieni (Figura 6h). Il 9% delle murature è costituito da muratura in pietre a spacco con buona tessitura, con pietre di medie-elevate dimensioni (tra 20-40 cm nella loro maggiore dimensione) e generalmente di forma regolare squadrata. Circa il 17% del campione è costituito da muratura in mattoni pieni, di cui il 7% con malta buona. In questo caso generalmente si tratta di pannelli estrapolati da edifici moderni in cui la malta ha componente di legante idraulico ed in alcuni casi cementizio. Le murature di tufo testate sono soltanto il 3% del campione e sono tutte caratterizzate da malta di buona qualità (“IV-1”, Figura 6d), mentre il 2% del campione è costituito da murature regolari costituite da blocchi lapidei squadrati di elevate dimensioni (anche superiori a 50 cm) con giunti molto sottili e malta di buona qualità (“V-1-2”, Figura 6e).

Per quanto riguarda le murature “moderne”, circa il 9% riguarda blocchi squadrati o in laterizio forato o in calcestruzzo forato (Figura 6g), mentre circa l’8% riguarda murature che non rientrano nelle definizioni delle categorie nazionali (NC=non classificabili). Tra queste è presente una prova in muratura *mista*, ovvero costituita da pietrame e mattoni pieni in proporzioni pressoché uguali, il 7% riguarda murature in blocchi di laterizio con percentuale di foratura maggiore del 45% (Figura 7a, Messali et al. 2017) e murature in masselli, ovvero blocchi in conglomerato cementizio costruiti a piè d’opera con inerte a granulometria e composizione variabile (Figura 7b, Boschi et al. 2016a).



Figura 7. a) blocco in laterizio forato con doppia foratura circolare (*occhialone*); b) massello.

3.2 Tipi di prove

Ad ognuno dei 110 pannelli è associata una prova sperimentale in sito o distruttiva “principale”, tra Compressione Diagonale (CD) o Compressione (C), o semi distruttiva con

martinetti piatti doppi (MP-d). Come anticipato in precedenza, in alcuni casi, assieme alle prove “principali”, sono presenti anche prove di “accompagnamento” sui materiali costituenti la muratura, come blocchi e malta. Dalle prove principali è stato possibile calcolare i parametri di resistenza e deformabilità delle murature mentre dalle prove su blocco o malta è stato possibile derivare alcune caratteristiche, principalmente qualitative, degli elementi costituenti che permettono di avere maggiore affidabilità nella scelta della classificazione della muratura. In Tabella 1 sono riportate tutte le prove sperimentali presenti nel progetto, le normative di riferimento che possono essere utilizzate per la loro esecuzione e per l’interpretazione dei dati che queste forniscono e i parametri/grandezze che permettono di calcolare. La prova di CD verrà brevemente spiegata con maggiore dettaglio nel paragrafo successivo, mentre le assunzioni fatte per le altre prove C, Mp-d, CAR, C_B, DRMS e A_M verranno descritte nel manuale dell’Abaco della Muratura e discusse in pubblicazioni future. In generale, per quanto riguarda le prove CD, C e MP-d, per la metodologia di elaborazione e trattazione dei risultati sono state osservate le disposizioni ReLUIIS riguardanti le prove in situ come prodotto finale del triennio 2014-2016 (che saranno pubblicate a breve) e che hanno come base i prodotti finali del progetto 2009 (ReLUIIS 2009).

Tabella 1. Tipologia di prove sperimentali.

Tipo di prova	Normativa/disposizione di riferimento	Grandezza derivata
CD	ASTM E 519-07	$\tau_0 G$
	RiLEM 1991	
	ReLUIIS 2009	
C	ReLUIIS 2009	$f_c E$
MP-d	ASTM C 1196-1197	$(f_c) E$
	ReLUIIS 2009	
C _B	UNI EN 772-1 2002	f_b
DRMS	Procedura definita in Del Monte e Vignoli 2008	f_{cm}
A _M	-	Descrizione macro e microscopica della malta
CAR	-	Analisi della sezione muraria

3.2.1 Compressione diagonale

La prova di CD consiste nell’applicazione di un carico di compressione lungo una diagonale di un pannello in muratura tale da provocarne la rottura a taglio per fessurazione diagonale (Figura

6g-h). Il pannello deve avere dimensioni pressoché quadrate 120x120 cm e deve essere isolato dalla restante parte della muratura attraverso quattro tagli (due laterali verticali e due centrali orizzontali): il taglio inferiore orizzontale è tale da lasciare il pannello parzialmente ancorato alla muratura, e risulta pertanto lungo circa 70 cm. Durante la prova vengono registrati il tempo (t), il carico applicato (F) ed i valori delle relative lunghezze delle basi deformometriche diagonali D1, D2, D3, D4 poste in direzione delle diagonali in entrambe le facce del pannello.

Per ciascuna prova di compressione diagonale è stato possibile calcolare il valore della resistenza a taglio τ_0 , a partire dal carico massimo registrato durante la prova e dalle caratteristiche geometriche del pannello. Il valore di resistenza al taglio è determinato attraverso la (1), in cui f_t è la resistenza a trazione della muratura, A l'area del pannello e F_u il carico massimo registrato durante la prova.

$$\tau_0 = \frac{f_t}{1.5} = \frac{F_u}{2A} \cdot \frac{1}{1.5} \quad (1)$$

A partire dalla curva di deformazione angolare (γ) e tensione tangenziale (τ) è possibile determinare il valore del modulo di taglio secante ciascun punto della curva utilizzando la Eq. (2):

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = 1.05 \frac{F}{A} \cdot \frac{1}{\gamma} \quad (2)$$

Per poter valutare l'entità del modulo di taglio al variare del livello di fessurazione del pannello, è necessario determinare un valore del modulo di taglio caratteristico della prova, costruendo una curva bilineare equivalente alla curva della prova in termini di energia dissipata (area sottesa). In particolare, il tratto orizzontale della bilineare è determinato a partire dalla tensione ultima (τ_u) della prova di carico e termina in corrispondenza della deformazione angolare ultima (γ_u). Sulla base della uguaglianza energetica del ciclo (ovvero del diagramma registrato dalla curva e della bilineare equivalente), si determina il valore della deformazione angolare media del pannello in corrispondenza della fine del tratto inclinato della bilineare (γ_y). La pendenza del tratto inclinato della bilineare rappresenta il valore del modulo di taglio. È inoltre possibile valutare i moduli di elasticità tangenziale per differenti valori di carico: il modulo secante ad un terzo o due terzi del carico ultimo od in corrispondenza del carico ultimo (in entrambi i casi utilizzando la (2)). Le formulazioni riportate sono valide sia per l'esecuzione delle prove avvenuta in modo

monotono fino a collasso (32% delle prove), sia per prove in cui il carico è stato applicato staticamente in modo ciclico (66%). In particolare, nel primo caso la trattazione dei dati è avvenuta con la curva tensione-deformazione ricavabile direttamente della prova mentre per il caso ciclico la determinazione dei moduli di elasticità trasversale è avvenuta prendendo in considerazione la curva involuppo dei vari cicli di carico.

4 RICERCA NELL'APPLICATIVO WEB

Il sito web Abaco delle Murature è composto da una pagina principale, *Home Page*, in cui si descrive come nasce il progetto e vengono delineati i contenuti del sito con specifico riferimento alle informazioni che possono essere estrapolate da esso. Dalla Home Page è possibile accedere a tre pagine successive: 1) la pagina *Metodo* descrive il campione di studio, la procedura eseguita per il reperimento, la catalogazione delle prove e la elaborazione dei dati che hanno permesso la definizione delle caratteristiche meccaniche delle prove; 2) la pagina *Ricerca* permette di eseguire la ricerca delle informazioni contenute sul sito. Lo schema ideale della ricerca è sintetizzato nella Figura 8; 3) la pagina *Contatti* contiene i riferimenti del gruppo di ricerca che ha implementato il sito.

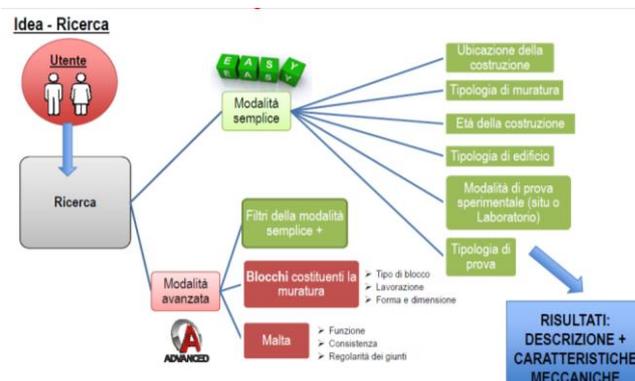


Figura 8. Schema di ricerca del sito web.

La ricerca delle informazioni qualitative e quantitative delle murature avviene mediante appositi filtri di ricerca, i quali permettono di visualizzare i risultati del campione di studio in base a determinati aspetti. L'utilizzo dei vari filtri disponibili permette una ricerca versatile, utile a trovare i dati relativi a prove sperimentali condotte su murature maggiormente associabili a quella per cui l'utente ricerca informazioni. La ricerca è svolta su base qualitativa, ed ogni parametro o caratteristica riportata nella SQM rappresenta un filtro di ricerca attraverso il quale ricercare murature simili all'interno

dell'applicativo web. È possibile svolgere la ricerca in:

- modalità *semplice*, basata sulla possibilità di filtrare i risultati in base a macro-aspetti, tra cui l'ubicazione della costruzione (comune o coordinate), la tipologia di muratura, età della costruzione, tipologia di edificio (ordinario o non ordinario), modalità di prova del test sperimentale (in situ o in laboratorio) e tipologia di prova (CD, C, MP-d, CAR, C_B, A_M, DRMS);
- modalità *avanzata*, basata oltre che sui filtri di ricerca della modalità semplice, anche sull'utilizzo di alcune chiavi di ricerca di dettaglio, che permettono di filtrare per aspetti particolari caratterizzanti la tipologia di muratura, di elemento (artificiale o naturale), di malta, come ad esempio tipologia, lavorazione e provenienza del blocco o le caratteristiche della malta.

In modalità semplice, il software fa comparire in automatico accoppiate di filtri di ricerca per i quali sono assicurati risultati: non è consentito eseguire una ricerca con risultato nullo.

I risultati forniti dal sistema sono visualizzabili in una pagina a parte che, dopo aver riepilogato i filtri di ricerca impostati nella stessa, fornisce:

- *la mappa georeferenziata* delle prove che soddisfano i filtri di ricerca impostati con l'indicazione del numero e del nome e di ciascuna prova;
- *un contatore* delle prove sperimentali trovate nel database e la loro relativa tipologia;
- *il dettaglio dei record trovati* che comprende per ciascuna prova: il nome del pannello, la tipologia di muratura, il valore dell'Indice di Qualità Muraria (per azioni normali e complanare alla sezione muraria Borri et al. 2015), ed i risultati delle prove sperimentali associati a tale prova;
- la visualizzazione dei risultati numerici (E , G , f_c , τ_0) ed il calcolo di alcune statistiche di base (media, massimo, minimo, deviazione e coefficiente di variazione) e la rappresentazione di tali risultati attraverso istogrammi.

La pagina dei risultati è interattiva: per ogni record trovato è possibile visualizzare per intero la SQM cliccando sul nome del pannello. La SQM, si ricorda, contiene immagini della muratura testata e tutte le caratteristiche qualitative che è stato possibile definire prima dell'esecuzione del test sperimentale. La

visualizzazione della SQM può rappresentare un test di prova della ricerca poiché qualora, dopo aver visualizzato per esteso la SQM, fossero riscontrate delle caratteristiche diverse da quelle che l'utente aveva intenzione di ricercare nelle murature del database, potrebbero essere eliminati dei record di prova dal campione selezionato per poter ottenere dei risultati ancora più omogenei rispetto a quelli inizialmente forniti dal Database.

Inoltre, per ogni record trovato è possibile vedere in modo dettagliato le curve tipiche dei risultati della prova, cliccando sui risultati numerici ottenuti. Sono visibili per una prova di CD, ad esempio, la curva Tempo/Forza, la curva Tempo/Deformazione, e la curva Deformazione a taglio/Tensione tangenziale. Il sistema è stato impostato in modo dinamico cosicché, nel caso che qualche utente del database volesse reinterprete in modo diverso, da quello adottato, la curva sperimentale, esso sarà libero ed in grado di poterlo fare. Questa funzionalità permette anche la possibilità ri-trattare in modo omogeneo (e rapido) di tutti i risultati presenti nell'Abaco qualora le disposizioni ReLUIS o normative fossero modificate negli anni futuri.

Infine, dal sito è possibile eseguire il download di schede riassuntive PDF contenenti tutte le informazioni estrapolate dal database, sia di tipo qualitativo (immagini, descrizione dei pannelli e SQM) sia di tipo quantitativo, per ciascuna prova sperimentale.

5 RISULTATI: MURATURA IN PIETRAMME DISORDINATO

Si riportano in questa sezione, come esempio, i risultati che si ottengono dall'Abaco delle Murature eseguendo una ricerca in modalità *semplice* inserendo all'interno dei filtri di ricerca questo settaggio:

- Regione: Toscana; Provincia: Arezzo;
- Tipologia di muratura: muratura in pietrame disordinata (categoria "I" da Tabella C8A1.1, Figura 6a);
- tipologia di edificio: ordinario privato + ordinario pubblico;
- test in situ di CD.

Tra le 110 prove totali, il software fornisce in output 4 risultati, relativi a 4 prove di CD svolte nella zona del Casentino e Pieve Santo Stefano (Figura 9), i cui risultati sono riportati per esteso in Tabella 2. Per l'ultima prova, le misure delle deformazioni non sono state considerate attendibili pertanto non è stato fornito come risultato il valore del modulo di taglio. Le

statistiche sono state eseguite sia per τ_0 (4 record) sia per G (3 record). La media dei valori della resistenza al taglio per le tre prove considerate è pari a 2.8 N/cm^2 , circa il 10% maggiore del valore medio di riferimento delle tabelle della Circolare Esplicativa (2.6 N/cm^2); 3 valori sono all'interno del range di riferimento, mentre il valore della prova 028, supera di circa il 30% il massimo del range da normativa (3.2 N/cm^2). Il modulo di taglio risulta per tutte le prove minore rispetto al valore minimo della Tabella C8A.2., pari a 230 N/mm^2 . La media dei 3 valori è pari a 191 N/mm^2 , circa il 17% inferiore rispetto al valore minimo proposto della normativa.



Figura 9. Pannelli: a) 018; b) 019; c) 028 e d) 050.

Tabella 2. Risultati per CD, muratura "I", provincia di AR.

ID Pannello	IQM (complanare)	τ_0 N/cm ²	G N/mm ²
018	2	2.4	186
019	2	2.3	184
028	1	4.2	202
050	1.5	2.3	*
Media		2.8	191
Dev.stand.		0.9	10
Coefficiente di variazione		33%	5%

* valore non attendibile

6 CONCLUSIONI

Nel corso degli ultimi anni ad opera del *DICEA* dell'Università di Firenze e del *Settore Sismica* della Regione Toscana sono state raccolte e raggruppate le prove sperimentali in situ svolte sul territorio toscano nell'ottica di descrivere e catalogare in modo dettagliato le varie tipologie di murature presenti nel territorio e parallelamente verificare la congruenza dei valori delle caratteristiche meccaniche con quelli forniti dalla Tab. C8A.2.1 (Circ.Min. 617/2009).

Nella memoria sono mostrati i risultati principali del progetto di ricerca *Abaco delle Murature* della Regione Toscana, finalizzato in un database web consultabile ed in aggiornamento, contenente i risultati di tali prove, opportunamente catalogati, rielaborati e georeferenziati. I risultati sono supportati da una descrizione qualitativa completa della muratura ed immagini esplicative e dalla valutazione dell'Indice di Qualità Muraria per il pannello murario sottoposto a prova.

L'applicativo web dell'Abaco delle Murature è uno strumento open source sviluppato per fornire supporto a liberi professionisti ed accademici nella scelta delle caratteristiche qualitative e meccaniche delle murature e dei loro componenti. La ricerca delle informazioni può essere effettuata in modalità semplice, basata sulla possibilità di filtrare i risultati in base a macroaspetti, tra cui l'ubicazione della costruzione, la tipologia di muratura, l'età della costruzione, la tipologia di edificio, la modalità e la tipologia del test di prova, oppure in modalità avanzata, in cui anche le caratteristiche peculiari di blocco e malta possono essere utilizzate come filtri di ricerca.

Allo stato attuale il database è definito per le murature toscane ma risulta in grado di accogliere i risultati di prove sperimentali eseguiti ovunque (anche in laboratorio) purché i dati vengano immessi in accordo con la procedura di catalogazione appositamente implementata nel sistema.

La possibilità di raggruppare un numero significativo di prove sperimentali per tutte le categorie murarie specifiche della Toscana, ma anche a livello nazionale, è auspicabile e permetterebbe una riformulazione peculiare delle caratteristiche meccaniche delle murature del territorio in vista di una regionalizzazione delle indicazioni normative per un più facile riconoscimento delle murature e individuazione delle caratteristiche meccaniche da adottare nel caso di esecuzione di verifiche di sicurezza negli edifici.

Se condiviso a livello nazionale ed aperto anche verso i liberi professionisti, questo strumento permetterebbe la catalogazione delle tipologie di murature maggiormente distribuite sul territorio italiano e potrebbe rappresentare la base per la riformulazione a livello nazionale delle caratteristiche meccaniche delle murature, a partire da dati sperimentali tracciabili, catalogati e soprattutto, elaborati in modo univoco.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano le Università e le Aziende Private per aver condiviso i dati sperimentali e tutte le persone che hanno preso parte al progetto, in particolare, gli Ingg. Andrea Borghini, Alberto Ciavattone, Emanuele Del Monte, Chiara Bernardini, Giovanni Menichini, Alessandro Meloni, Stefano Roveri, il Dott. Geol. Fratini ed il gruppo Della Nesta srls. Il progetto è inserito nel programma ReLUIS 2014-16, linea murature.

BIBLIOGRAFIA

- ASTM C 1196, 2014 Standard test method for in Situ Compressive Stress Within Solid Unit Masonry Estimated Using Flatjack Measurements.
- ASTM C 1197, 2014 Standard test method for in-situ measurement of masonry deformability properties using the flat jack method.
- ASTM E 519-07, 2007. "Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages". West Conshohocken, PA: ASTM International.
- AA.VV., 2003. Rilevamento della vulnerabilità sismica degli edifici in muratura. Manuale per la compilazione della Scheda GNDT/CNR di II livello - Versione modificata dalla Regione Toscana.
- Augenti, N., Parisi, F., Acconcia, E., 2012. MADA: online ex-perimental database for mechanical modelling of existing masonry assemblages. *Proceedings of the 15th World Conference of Earthquake Engineering*, Lisboa, Portugal.
- Betti, M., Borghini, A., Ciavattone, A., Boschi, S., Del Monte, Vignoli, A., 2017. Assessment of the seismic risk of the museum of Casa Vasari in Arezzo (Italy). *International Journal of Masonry Research and Innovation*. Vol.2, No.2/3, pp.107 – 133
- Binda, L., Borri, A., Cardani, G., Doglioni, F., 2009. Scheda qualità muraria: relazione finale e linee guida per la compilazione della scheda di valutazione della qualità muraria. *Report ReLUIS 2005-2008*.
- Borri, A., Corradi, M., Castori, G., De Maria, A., 2015. A method for the analysis and classification of historic masonry. *Bulletin of Earthquake Engineering* **13**(9), 2647-2665.
- Boschi, A., Bernardini, C., Borghini, A., Ciavattone, A., Del Monte, E., Giordano, S., Ortolani, B., Signorini, N., Vignoli, A., 2015. Analisi dei risultati di prove sperimentali su murature toscane. *Proceedings of XVI Convegno Nazionale ANIDIS*, L'Aquila, Italia.
- Boschi, S., Bernardini, C., Borghini, A., Ciavattone, A., Del Monte, E., Giordano, S., Signorini, N., Vignoli A., 2016a. Mechanical characterisation of particular masonry panel in Tuscany. *Proceedings of XVI International Brick and Block Masonry Conference*, Padova, Italia. ISBN 978-1-138-02999-6.
- Boschi, S., Ciavattone, A., Vignoli A., 2016b. Il processo di conoscenza e la caratterizzazione meccanica delle murature. *Atti dell'evento formativo: "La sicurezza e la conservazione: nuove tecnologie e metodiche per il corretto intervento sul patrimonio edilizio esistente"* organizzato dal Provveditorato interregionale per le OO. PP. Toscana e Umbria e ASS.I.R.C.CO., Firenze.
- Brignola, S., Frumento, S., Lagomarsino, S., Podestà, S., 2008. Identification of Shear Parameters of Masonry Panels Through the In-Situ Diagonal Compression Test. *International Journal of Architectural Heritage*. n.3: 52-73.
- Calderini, C., Cattari, S., Lagomarsino, S., 2010 The use of the diagonal compression test to identify the shear mechanical parameters of masonry. *Construction and Building Material*. n. **24**: 677-685.
- Cattari, S., Lagomarsino, S., Bosiljkov, V., D'Ayala, D., 2015. Sensitivity analysis for setting up the investigation protocol and defining proper confidence factors for masonry buildings. *Bulletin of earthquake engineering*, **13**(1), 129-151.
- Circolare Ministeriale n.° 617 del 02/02/2009. Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al D.M. 14/01/2008.
- Del Monte, E., Vignoli, A., 2008. In situ mechanical characterization of the mortar in masonry buildings with DRMS. *1st International RILEM Symposium on site assessment of concrete, masonry and timber structures*. Varenna (Co), Italia.
- DPCM, 2011. Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle NTC 2008. G. U. n. 47 del 26.02.2011 (in Italian).
- Messali, F., Metelli, G., Plizzari, G., 2017. Experimental results on the retrofitting of hollow brick masonry walls with reinforced high performance mortar coatings. *Construction and Building Material*. **141**: 619-630.
- NTC 2008. D.M. del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 14/01/2008. Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni. G.U. n. 29 del 04.02.2008, S.O. n. 30.
- Rilem TC76-Lum, 1991. Diagonal Tensile strength tests of small wall specimens.
- ReLUIS, 2009. Linea di Ricerca 1. Valutazione e riduzione della vulnerabilità di edifici in muratura. Task 3b. Indagini diagnostiche su tipologie murarie. *Report Progetto esecutivo 2005-2008*.
- Salvatori, L., Marra, A.M., Bartoli, G., Spinelli, P., 2017. Interdependence of mechanical parameters on probabilistic seismic performance of masonry towers. *International Journal of Masonry Research and Innovation*. Vol.2, No.2/3, pp.134-149.
- UNI EN 772-1 2002. Metodi di prova per elementi di muratura. Determinazione della resistenza a compressione.
- Vignoli, A., Boschi, S., Modena, C., Cescatti, E., 2016. In-situ mechanical characterization of existing masonry typologies: a research project in Italy finalized to update the structural codes. *Proceedings of XVI International Brick and Block Masonry Conference, Padova, Italia*. ISBN 978-1-138-02999-6.
- Zuccaro, G., De Gregorio, D., 2016. Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello per la CARatterizzazione Tipologico-Strutturale dei comparti urbani costituiti da edifici ordinari – CARTIS 2014". Progetto ReLUIS 2014-2016.