

EDIFICI IN MURATURA DI PIETRA: PREVENZIONE SISMICA, PRESTAZIONI ACUSTICHE ED ENERGETICHE

STONE MASONRY BUILDINGS: SYNERGY ASPECTS BETWEEN SEISMIC SAFETY, ACOUSTIC AND ENERGY PERFORMANCES

Alessandro Schiavi ¹, Gianfranco Cellai ², Simone Secchi ², Paolo Caggiano ³,
Alessandro Grazzini ⁴, Andrea Prato ¹

¹ INRiM - Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Torino

² Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Firenze

³ Architetto, Presidente OAPPC della Provincia di Pistoia

⁴ Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica, Politecnico di Torino

* Indirizzo dell'autore di riferimento - Corresponding author's address:

Strada delle Cacce, 91 - 10135, Torino, Italia

e-mail: a.schiavi@inrim.it

(Ricevuto il 08/12/2017, accettato il 19/02/2018)

RIASSUNTO

Le murature portanti realizzate con materiali lapidei naturali costituiscono una risorsa per la ricostruzione di aree devastate da eventi sismici nell'ottica di recuperare, oltre ad una maggiore sicurezza antisismica, anche un'identità storico-tipologica del tessuto urbano, unitamente alla possibilità di rilanciare le attività edilizie artigianali delle economie locali.

Nella memoria si indagano sinteticamente le tecnologie costruttive in muratura ammesse dalle normative antisismiche, alla luce del fatto che le stesse offrono interessanti prestazioni acustiche ed energetiche, grazie all'elevata massa ed inerzia termica, aspetti anch'essi oggetto di specifiche normative cogenti.

ABSTRACT

Natural stone masonry is a fundamental resource for buildings reconstruction or renovation in areas devastated by seismic events, in order to recover the historical-typological identity of Central Italy urban landscape. As a matter of facts, this kind of building material, united with the new seismic safety technologies, allows to relaunch local handcrafts.

In this paper, the building technology based on natural stone masonry, allowed by the seismic prevention regulations, are synthetically investigated in terms of both structural and technological properties, such as seismic safety, acoustic and energy performances, according to the recent building standards and regulations.

Parole chiave: Edilizia in pietra, acustica, termica, sismica

Keywords: Stone buildings, acoustics, thermal, seismic safety

1. Costruzioni in muratura portante

Le più recenti manifestazioni sismiche che hanno colpito territori collinari e montani del centro Italia hanno, nuovamente, rivelato la vulnerabilità del patrimonio edilizio a fronte di tali eventi. Fatta salva la complessità dei fenomeni in esame, il cui studio esula dalla presente memoria, talvolta l'opinione pubblica e la stampa si sorprendono di come edifici antichi costruiti con muratura portante, tipicamente in pietrame o mista, abbiano resistito meglio alle sollecitazioni sismiche (Figura 1) rispetto ad edifici realizzati con tecnologie costruttive più moderne, teoricamente molto più performanti (Figura 2).

Questi fatti non sorprendono, tuttavia, storici e ricercatori, i cui studi, anche in anni recenti, hanno portato in evidenza la necessità di ripensare all'uso di tecnologie costruttive che si erano affermate ed evolute sin dall'antichità e che storicamente sono state utilizzate in Italia fin dal '600 con la cosiddetta "opera beneventana" uno dei primi esempi di muratura intelaiata adoperata in seguito al terremoto del 1627 in Campania.



Figura 1 - Amatrice (Rieti): muratura in pietrame di un ex Convento; torre civica; casa in muratura in pietrame, sostanzialmente intatta - Amatrice (Rieti): Basically intact natural stone masonry buildings after the earthquake (magnitude 6.2 ± 0.016 Mw) in 2016: a-former monastery; civic tower; private home.



Figura 2 - Amatrice (Rieti): edifici in c.a. crollati - Amatrice (Rieti): Examples of reinforced concrete buildings collapsed.

Da una ricerca effettuata nelle regioni colpite dal sisma, soprattutto nell'Irpinia, è emerso che la tipologia costruttiva della muratura alla beneventana ha avuto un comportamento tecnologicamente efficace; il punto di forza consiste nel dividere le pareti in piccoli campi, separati da aste in legno ben connesse ai pilastri principali, entro cui è consentito che si creino fratture. È possibile che, talvolta, alcune parti della parete collassino, ma la zona di collasso è limitata e resta comunque circoscritta all'interno delle parti diagonali in legno. A partire dal 1700 si afferma la cosiddetta tecnica della muratura baraccata che viene ulteriormente perfezionata dal R.D. 18 aprile 1909 n. 193, emanato dopo il sisma che colpì Reggio Calabria e Messina nel 1908. Queste tecniche spesso erano influenzate nella loro evoluzione proprio dalla necessità di minimizzare l'impatto dei terremoti sulla costruzione; la tecnologia, quindi, è la fonte ispiratrice di tale costante attenzione dei costruttori per la riduzione del rischio sismico, dimostrando da subito come la vera strada maestra per la prevenzione sismica del costruito sia la buona regola nel fabbricare, andando oltre le verifiche numeriche necessarie ma consequenziali. Sulla scorta delle esperienze passate, il CNR-IVALSA ha ricostruito un modello di parete con tale tecnica costruttiva (Figura 3), rilevando un comportamento antisismico eccellente. Il progetto prevede una serie di prove cicliche su una parete costituita da muratura rinforzata da un'intelaiatura lignea che rappresenta una riproduzione di una parete del palazzo vescovile di Mileto, ricostruito dopo il 1783 [1,2]. Tutto ciò conferma il giudizio già espresso in passato da studiosi della materia [3], recentemente riaffermato [4] ed evidenzia come "abbandonando ogni sorta di demonizzazione sull'uso della muratura portante, si può affermare che le cause principali dei danni prodotti da un terremoto sono piuttosto da ricercare nella povertà dei materiali impiegati e nel loro stato di degrado, nella mancata applicazione della corretta «regola d'arte», ovvero nella cattiva esecuzione dei dettagli costruttivi."



Figura 3 - Ricostruzione di parete antisismica in muratura baraccata, presso i laboratori del CNR-IVALSA - Reconstruction of an "ancient" seismic safety masonry building technology at the CNR-IVALSA laboratories.

Tra le tecnologie più recenti, basate sull'analogo principio meccanico per il consolidamento delle strutture in muratura lapidea e per l'azione antisismica, l'impiego di maglie di acciaio o in fibra a reticolo, risulta molto interessante. Ad esempio, la tecnica di rinforzo chiamata "Reticulatus", proposta da ricercatori dell'Università di Perugia [5], consiste nell'inserimento nei giunti di malta, di una maglia continua realizzata con funi di acciaio inox, secondo uno schema a quinconce irregolari. In Figura 4, sono riportati alcuni esempi del sistema di consolidamento.

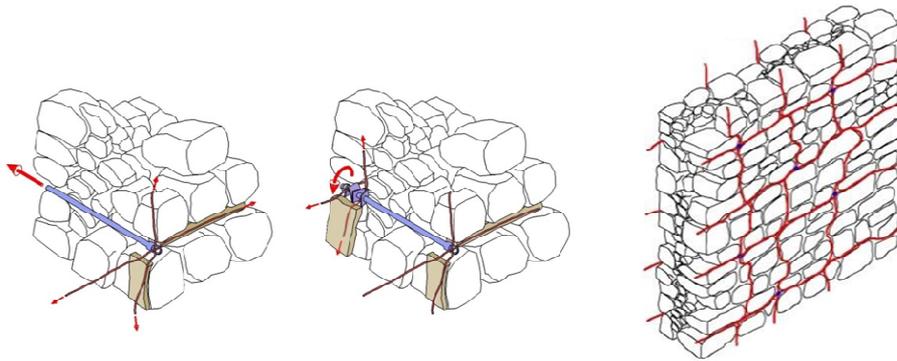


Figura 4 - Sistema "Reticulatus" (fonte UNIPG) - The "Reticulatus" method for shear strengthening of fair-faced masonry (University of Perugia).

Gli ingenti danni agli edifici provocati dagli eventi sismici, se da un lato sono da addebitare alla pericolosità ed all'esposizione del territorio, dall'altro sono causati dall'elevata vulnerabilità del patrimonio edilizio, costruito di frequente con materiali di qualità scadenti e tecniche inadatte, come abbiamo potuto riscontrare negli edifici di Amatrice e dei borghi circostanti, esaminati in questa trattazione (Figura 5).



Figura 5 - Esempi di muratura in pietrame a doppio paramento priva di malta e scollegata - Examples of double layer stone masonry with lack of mortar and poorly connected.

Possiamo pertanto sintetizzare la suddetta situazione con le parole di un noto studioso di scienza delle costruzioni dicendo che in fondo "nulla vi è di nuovo se non quello che si è dimenticato" [6].

Le immagini delle costruzioni distrutte dal sisma dell'agosto 2016 nel Comune di Amatrice e nei borghi circostanti confermano ancora una volta quanto già noto, considerato che sono crollate case costruite con le più svariate tecniche, ma tutte aventi come denominatore comune la scarsa qualità dei materiali e delle tecnologie costruttive adottate, rese evidenti dalle immagini nelle Figure 2 e 5.

Anche nel campo normativo si è assistito ad un importante ripensamento: si è passati da una rigida concezione della modellazione strutturale, che ha spinto addirittura a trasformare gli edifici esistenti per rendere le strutture più rispondenti alle ipotesi di calcolo [7], ai contenuti del D.M. 14 gennaio 2008 [8], con il quale sono state approvate le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008), che hanno portato ad una revisione soprattutto culturale sull'uso di tecniche costruttive mediante murature costituite dall'assemblaggio organizzato ed efficace di elementi naturali ricavati da materiale lapideo non friabile o sfaldabile e malta.

Ricapitolando in breve questa evoluzione normativa, si può affermare che “nella vecchia normativa tecnica il legislatore si è ispirato molto alla scienza delle costruzioni e forse troppo poco alla tradizione costruttiva, che se non è scienza è comunque conoscenza, espressione di un sapere antico che si è lentamente perfezionato con un'attenzione marcata al problema della prevenzione sismica”[7].



Figura 6 - Località Retrosi (Amatrice), tipici stipiti e architravi in pietra locale intatti - Retrosi (Amatrice), typical undamaged window jambs and lintels made with local stone.

In linea con questi nuovi aspetti culturali è l'indirizzo seguito dal MiBAC a partire dalla Direttiva sui Beni Culturali [9] che si allinea sostanzialmente alle norme tecniche generali; l'approccio all'analisi di un edificio storico ordinario d'ora in avanti potrà essere assimilato a quello degli edifici monumentali, riconoscendo all'edilizia storica un valore intrinseco considerato che nel complesso essa conferisce il carattere di monumentalità universalmente riconosciuto agli antichi borghi e centri storici anche minori.

Il ricorso all'uso della muratura portante appare inoltre interessante anche sotto i seguenti aspetti:

- prestazioni acustiche elevate specie alle basse frequenze;
- caratteristiche di elevata inerzia termica particolarmente efficace in regime estivo ma anche invernale che consentono di abbassare i picchi dei carichi termici ricorrendo così a impianti più piccoli e alimentati da fonti rinnovabili quali, ad esempio, pompe di calore con terminali a bassa temperatura;
- possibilità di recupero del materiale lapideo crollato e di buona qualità, tra cui anche pregevoli stipiti e architravi di porte e finestre, altrimenti destinato alle discariche come rifiuto solido urbano (Figura 6);
- possibilità di ricostruire come erano e dove erano interi isolati o parti di essi intorno ai pochi monumenti ancora esistenti, nonché piccoli borghi, con tecniche costruttive tradizionali, che possono rilanciare le attività artigianali e le economie locali.

1.1. Tecnologia costruttiva e requisiti prestazionali

In base alle NTC 2008, le costruzioni con struttura portante verticale, in grado di sopportare azioni verticali ed orizzontali, sono realizzate con sistemi di muratura collegati tra di loro da strutture di impalcato, orizzontali ai piani ed eventualmente inclinate in copertura, e da opere di fondazione. Gli edifici devono avere regolarità sia in pianta che in altezza e le strutture costituenti orizzontamenti e coperture non devono essere spingenti. I solai devono assolvere funzione di ripartizione delle azioni orizzontali tra le pareti strutturali, pertanto devono essere ben collegati ai muri e garantire un adeguato funzionamento a diaframma, con interasse massimo tra due solai successivi non superiore a 5 m. Le piante delle costruzioni debbono essere quanto più possibile compatte e simmetriche rispetto ai due assi ortogonali.

Si cerca quindi di conferire al fabbricato nel suo complesso un comportamento scatolare, migliorando le connessioni, senza alterare il rapporto masse/rigidezze, mediante ammorsature, cordoli e incatenamenti[10].

I principi base di una corretta progettazione in zona sismica sono la semplicità strutturale e la regolarità, tenendo particolarmente in conto la duttilità, cioè il comportamento elasto-plastico della struttura.

Ai fini delle diagnosi di staticità di edifici danneggiati a seguito di eventi sismici, le murature portanti realizzate con materiali lapidei naturali sono classificate tenendo conto di due fattori principali:

- a) la qualità e lo stato di conservazione dei blocchi resistenti e della malta, ovvero le caratteristiche dei materiali utilizzati;
- b) la tessitura e apparecchiatura muraria, ossia l'omogeneità di pezzatura e regolarità nella disposizione dei blocchi, in modo tale che questi risultino il più possibile squadrati, ben ingranati l'uno con l'altro e disposti alternati in strati regolari.

Le classi, caratterizzate da diversa vulnerabilità, sono le seguenti:

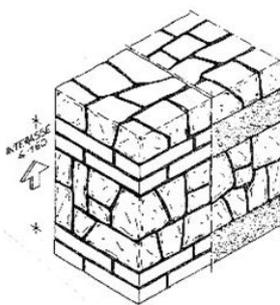
- classe A - muratura in pietra da taglio costituita da elementi omogenei, ben squadrati e lavorati, con buona apparecchiatura muraria e malta di buona qualità;
- classe B - muratura in pietrame squadrato con elementi non omogenei, ma ben ingranati in senso longitudinale e trasversale e con malta di buona qualità;
- classe C - murature in pietrame non squadrato o in pietra arrotondata, in presenza di ricorsi continui (in mattoni o CLS) estesi a tutto lo spessore murario, con discreta apparecchiatura muraria e malta di discreta qualità;

- classe D - murature in pietrame non squadrato o tufo grossolanamente squadrato, con difettosa apparecchiatura muraria, assenza di collegamenti tra paramenti esterni e malta di scarsa qualità, dovuta anche al cattivo stato di manutenzione [11-13].

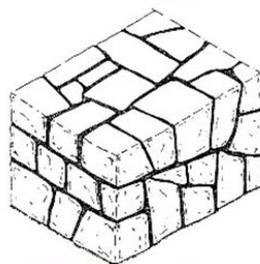
La difficoltà dell'esame a vista consiste nel fatto che non sempre un paramento che appare ben organizzato e con elementi ben squadrati è indice di muro ben fatto: potrebbe essere solo il paramento esterno di una muratura a sacco o a doppio paramento, come la maggioranza dei casi di Amatrice e dei borghi circostanti, con all'interno una muratura di pessima fattura. Occorre pertanto valutare anche la presenza di elementi di connessione trasversali (diatoni), che impediscono lo scorrimento di superfici interne e garantiscono la distribuzione omogenea, su tutto lo spessore del muro, dei carichi verticali provenienti dai solai.

Nel caso di nuove costruzioni in muratura lapidea portante, le NTC 2008 prevedono che queste possano essere poste in opera formando tre diverse tipologie riconducibili rispettivamente alle classi A, B e C suddette (Figura 7) e per le quali sono date limitazioni in altezza e spessore:

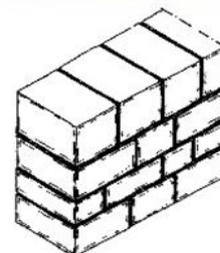
- murature di pietra squadrata mediante pietre di geometria pressoché parallelepipedica disposte in strati regolari;
- murature di pietra non squadrata, mediante l'impiego di materiale di cava grossolanamente lavorato, purché posto in opera in strati pressoché regolari;
- muratura in pietra listata non squadrata se la muratura è intercalata, ad interasse non superiore a 1,6 m e per tutta la lunghezza e lo spessore del muro, da fasce di calcestruzzo semplice o armato oppure da ricorsi orizzontali costituiti da almeno due filari di laterizio pieno.



Muratura in pietra listata non squadrata (sp. ≥ 40 cm)



Muratura in pietra non squadrata (sp. ≥ 50 cm)



Muratura in pietra squadrata (sp. ≥ 24 cm)

Figura 7 - Tipologie di murature portanti in materiale lapideo naturale (NTC 2008) - Typologies of bearing stone masonries (NTC 2008).

Dal punto di vista acustico il comportamento di murature in pietra è fondamentalmente affidato alla massa ma anche alla disomogeneità della struttura che riduce la trasmissione delle vibrazioni, come meglio specificato al paragrafo successivo.

Il comportamento termico, per quanto riportato nelle norme tecniche [14,15], è invece caratterizzato da conducibilità termiche equivalenti piuttosto elevate, variando le rispettive proprietà in funzione della tecnica costruttiva utilizzata, della natura delle pietre

(conducibilità termica e densità), della malta e del loro spessore.

Di seguito si esemplifica una possibile modalità costruttiva per edifici nuovi o riqualificati in muratura portante valida dai punti di vista sismico, acustico ed energetico.

Nella Figura 8 è rappresentato un tipico solaio in legno dove la funzione irrigidente è assicurata dalla cappa in c.a. alleggerita ammortata agli spinotti, sopra alla quale si può realizzare il classico pavimento anticalpestio con eventuale pavimento radiante o isolamento termico nel caso di separazione tra unità immobiliari distinte. In alternativa è possibile irrigidire il solaio mediante la posa di doppio o triplo tavolato ligneo incrociato (connesso con le travi principali mediante connettori) oppure, per contenere i pesi, mediante applicazione di lamine in FRP disposte in modo incrociato [16].

Il collegamento alle murature perimetrali può avvenire puntualmente mediante spinotti o bandelle in acciaio disposti a coda di rondine (al fine di non demolire porzioni continue di muratura), oppure mediante cordoli continui in c.a. o in acciaio come indicato in Figura 9 [16,17].

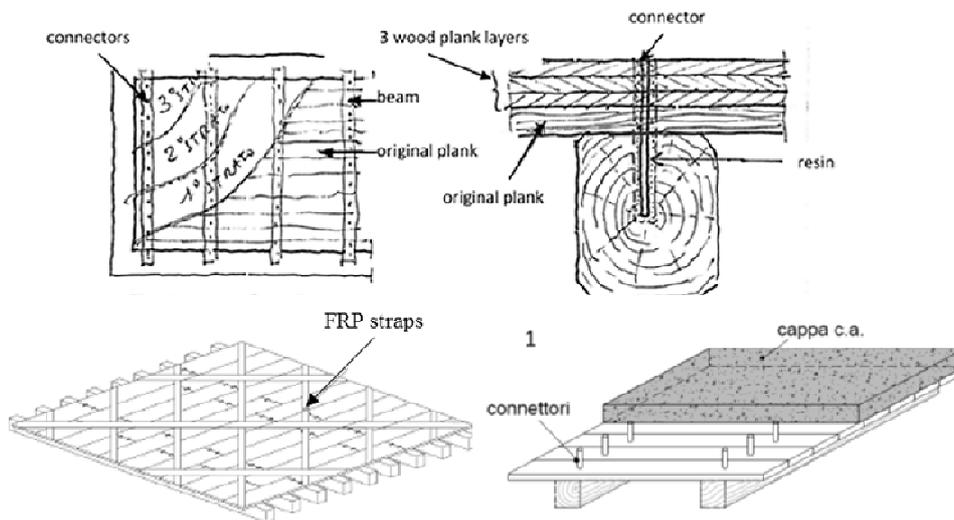


Figura 8 - Differenti soluzioni tecniche per il rinforzo di un solaio in legno con funzione di diaframma - Various solutions for the reinforcement of timber floors with diaphragm function.

Nel caso di cordolo perimetrale in acciaio, tra questo e la muratura può essere inserito un materiale smorzante elastomerico che riduce anche l'effetto ponte termico.

Per quanto attiene alle prestazioni energetiche dell'involucro, le soluzioni di facciata che si prospettano sono essenzialmente due in funzione della finitura esterna:

- con faccia vista, isolamento interno con placcaggio in cartongesso;
- con finitura a intonaco, isolamento a cappotto.

Le prestazioni richieste dalle norme in materia d'inerzia termica sono assicurate facilmente in entrambi i casi dalla massa muraria, mentre i valori di trasmittanza dipendono dallo spessore dell'isolante sempre necessario se si vuole ridurre sensibilmente la trasmittanza termica delle murature tipicamente molto elevata. Per le

pareti di separazione tra alloggi il placcaggio con materiali fonoisolanti, anche su un solo lato delle murature, può normalmente assicurare anche il rispetto dei criteri energetici.

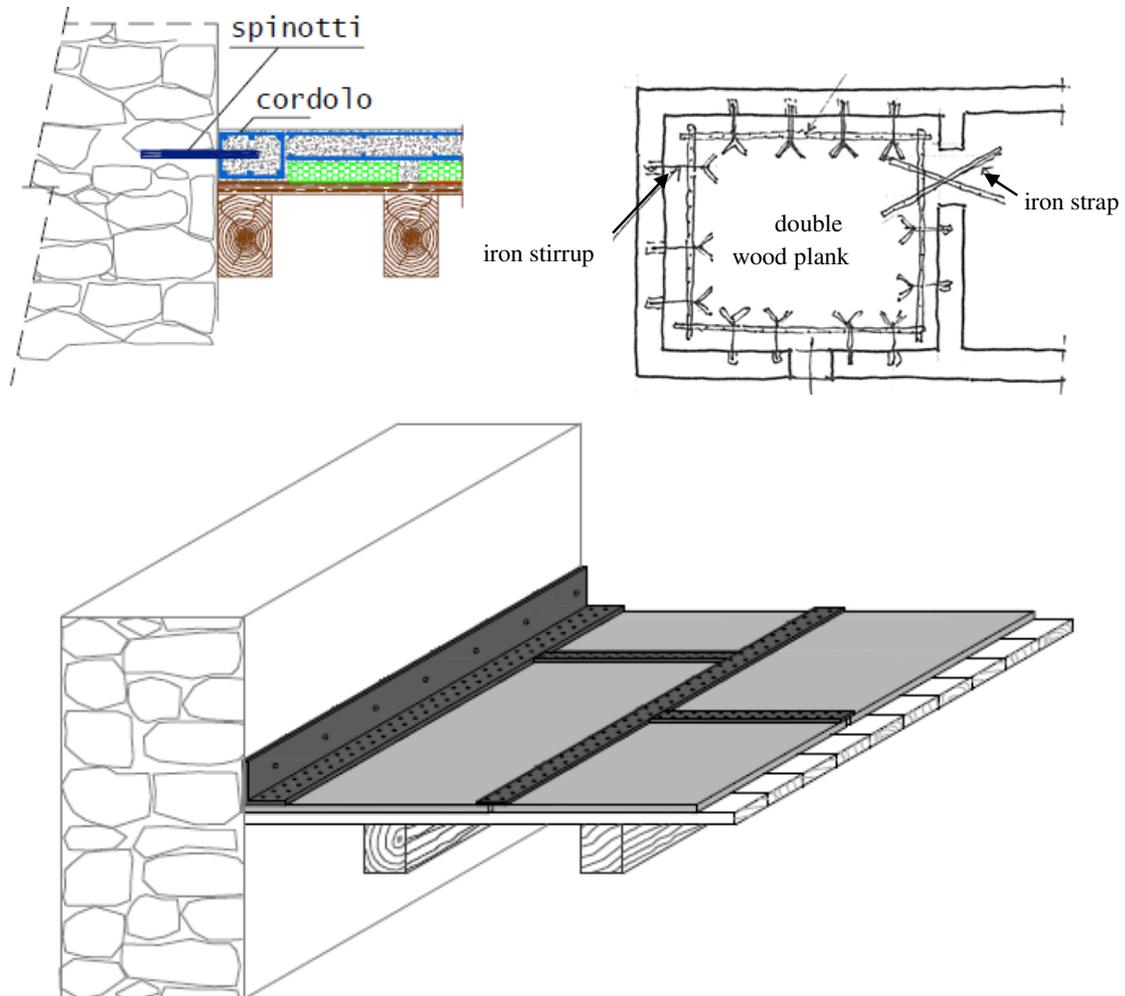


Figura 9 - Solaio in legno con funzione di diaframma: collegamenti alle murature; consolidamento con cordolo perimetrale in acciaio chiodato al pannello e spinottato alla muratura - Timber floor with diaphragm function: connection to the walls; reinforcement with lateral steel beam riveted to the panel and to the wall.

2. Prestazioni acustiche e di attenuazione alle vibrazioni

Un aspetto tecnologico particolarmente interessante delle costruzioni basate sull'utilizzo di materiale lapideo è l'attitudine ad attenuare la trasmissione di suoni e vibrazioni.

In prima analisi, i due fattori che maggiormente concorrono a tale prestazione si possono individuare nell'elevata massa per unità di superficie dei materiali lapidei e nella discontinuità strutturale tra gli elementi. Il fitto insieme degli elementi lapidei e del materiale di collegamento tra essi (malta) costituisce infatti un significativo ostacolo

alla libera propagazione di vibrazioni e riduce il campo di onde flessionali che principalmente concorre alla radiazione sonora di una partizione. Come noto, in una partizione omogenea e isotropa, il campo di onde elastiche (e in particolare delle onde flessionali) si propaga liberamente in funzione delle proprietà elastiche e inerziali della partizione stessa. Al contrario, la presenza di discontinuità strutturali, nonché le variazioni d'impedenza tra elemento lapideo e malta, contrastano la libera propagazione delle onde elastiche (e delle onde flessionali) riducendo sia la trasmissione acustica che la trasmissione di vibrazioni [18]. Si può altresì supporre che utilizzando particolari malte, caratterizzate da bassi moduli elastici, ma al contempo in grado di garantire l'adeguata stabilità strutturale dell'edificio, sia possibile incrementare ulteriormente le prestazioni di isolamento acustico e delle vibrazioni di un edificio in muratura di pietra.

2.1 Isolamento acustico

In termini puramente indicativi è possibile effettuare una valutazione preliminare delle prestazioni acustiche, in termini di isolamento acustico per via aerea, di tali tipologie di partizioni. Qui per semplicità è stato utilizzato il modello di calcolo di Sharp [19], ipotizzando in prima analisi la partizione come monolitica ed omogenea, per cui il potere fonoisolante R è determinato tramite le seguenti relazioni:

$$(1) \quad R = 20 \log \frac{\pi f m'}{\rho_0 c_0} - 5.5 \quad \text{per } f \leq f_c/2 \quad [\text{dB}]$$

$$(2) \quad R = 20 \log \frac{\pi f m'}{\rho_0 c_0} - 10 \log \frac{2\eta f}{\pi f_c} \quad \text{per } f \geq f_c \quad [\text{dB}]$$

in cui m' [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$] è la massa areica della partizione, $\rho_0 c_0$ [$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1} \text{m}^{-2}$] è l'impedenza caratteristica dell'aria ($\approx 415 \text{kg}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$), η [-] è il fattore di perdita totale e f_c [Hz] è la frequenza di coincidenza, che è un modo risonante del campo di onde flessionali nella partizione.

La frequenza di coincidenza f_c è calcolata tramite la seguente nota relazione:

$$(3) \quad f_c = \frac{c^2}{1.8 \cdot t} \cdot \sqrt{\frac{\rho(1-\nu^2)}{E}} \quad [\text{Hz}]$$

In cui c [m/s] è la velocità del suono nell'aria, t [m] è lo spessore della partizione, ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] la densità del materiale della partizione, ν il coefficiente di Poisson e E [MPa] il modulo di Young.

A titolo esemplificativo si considerano tre tipologie di muratura lapidea: muratura in pietra non squadrata, muratura in pietra tenera e muratura a blocchi lapidei squadrate, tipiche della tradizione costruttiva mediterranea. Le proprietà meccaniche dei materiali lapidei sono molto varie, per tale ragione in questa analisi illustrativa sono tenuti in considerazione valori medi indicativi (con margini anche superiori al 20%).

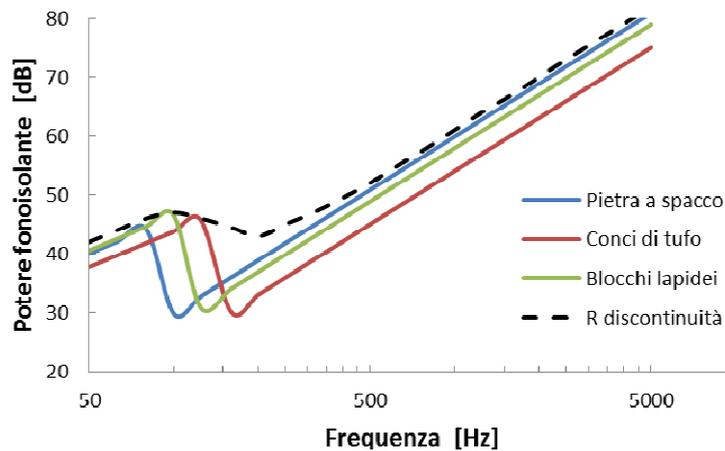
In tabella I sono riportate le proprietà medie fondamentali di queste tipologie di materiali, utili per il calcolo del potere fonoisolante.

Tabella 1 - Proprietà meccaniche delle murature lapidee - Mechanical properties of typical masonry stone.

Muratura	Spessore (min)* t [m]	Densità ρ [kgm ⁻³]	Massa areica m' [kgm ⁻²]	Modulo di Young E [MPa]	Coefficiente di Poisson ν [-]	Fattore di perdita η [-]
Muratura in pietra non squadrata	0.50	2100	1050	1700	0.15	0.015
Conci di pietra tenera squadrati	0.24	1600	380	1100	0.15	0.015
Blocchi lapidei squadrati	0.24	2200	530	2500	0.15	0.015

* La massa areica è stata calcolata a seconda degli spessori minimi ammissibile, per tipologia di muratura, sulla base delle indicazioni riportate nel D.M. 14 gennaio 2008 - The mass per unit area is calculated according to the minimum admissible thickness, according to the Ministerial Decree, January 14, 2008.

Utilizzando i valori riportati in Tabella 1 è possibile stimare il potere fonoisolante delle tre partizioni tramite i modelli empirici definiti dalle relazioni (1) e (2). Nel grafico di Figura 10 si riportano gli andamenti stimati del potere fonoisolante, in funzione della frequenza, delle partizioni murari e in pietra a spacco (linea blu), in conci di tufo (linea rossa) e in blocchi lapidei (linea verde). Le linee continue rappresentano il comportamento del potere fonoisolante di partizioni “monolitiche” e omogenee, mentre la linea nera tratteggiata rappresenta il comportamento ipotizzato in presenza di discontinuità strutturali (ossia di blocchi lapidei e malta).


Figura 10 - Stima empirica del potere fonoisolante delle tre partizioni in materiale lapideo - Empirical evaluations of the transmission loss of three stone masonry partitions.

L'ipotesi di potere fonoisolante rappresentato dalla linea nera tratteggiata è basata sul fatto che le discontinuità strutturali e le variazioni d'impedenza tra elemento lapideo e malta attenuino l'effetto della coincidenza come schematizzato in Figura 11. La perdita

di isolamento dovuto alla frequenza di coincidenza, calcolata tramite la relazione (3) intorno a 140 Hz per le partizioni in pietra non squadrata, 300 Hz per i conci di tufo, e intorno a 250 Hz per la partizione in blocchi lapidei, si suppone mitigata proprio dall'attenuazione del campo di onde flessionali nelle partizioni [18]; il grafico di Figura 11 mostra qualitativamente come tale attenuazione sia maggiormente favorita da discontinuità caratterizzate da differenti dimensioni geometriche.

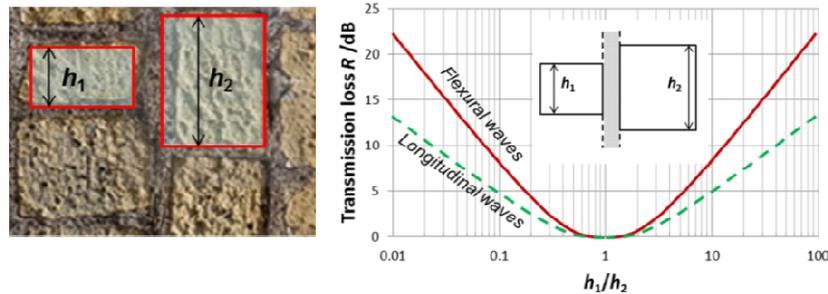


Figura 11 - Attenuazione della trasmissione sonora attraverso una discontinuità strutturale tra due differenti blocchi lapidei, in funzione del rapporto di differenti dimensioni geometriche - Attenuation of sound transmission through a structural discontinuity between two different stone blocks, depending on the ratio of different geometric dimensions.

I valori di potere fonoisolante, pur se indicativi, mostrano elevate prestazioni in termini di protezione dal rumore, in particolare anche a bassa frequenza. Difatti le prestazioni acustiche delle partizioni lapidee qui esaminate, in termini di indice di valutazione del potere fonoisolante risultano essere $R_w = 53$ dB, per la pietra a spacco di spessore 50 cm, $R_w = 48$ dB, per i conci di tufo di spessore 24 cm e $R_w = 51$ dB, per i blocchi lapidei di spessore 24 cm. L'indice di valutazione del potere fonoisolante ipotizzato per la partizione con discontinuità strutturali mostra un incremento della prestazione acustica nell'ordine di 4÷6 dB, rispetto alle partizioni monolitiche ed omogenee.

2.2 Attenuazione delle vibrazioni e shock

Una muratura in materiale lapideo è un sistema meccanico complesso a molti gradi di libertà [20], composto da un insieme di corpi rigidi (pietre) interconnessi tra loro tramite malta. L'azione di una forza su tale sistema pone in accelerazione i corpi rigidi e si propaga, in forma di vibrazione, attraverso l'intero sistema. Tuttavia, proprio l'insieme delle discontinuità del sistema è un primo ostacolo alla libera propagazione delle vibrazioni. I molteplici "salti" d'impedenza tra una pietra e la pietra adiacente riducono l'ampiezza della vibrazione trasmessa, inoltre la malta agisce come ulteriore elemento di discontinuità. In tale sistema la malta può essere considerata come un insieme di molle e smorzatori interconnessi, come mostrato schematicamente in Figura 12.

Una forza, impulsiva o continua, che agisca sulla massa m_1 , si trasmette alle masse adiacenti attraverso la malta, rappresentata come sistema interconnesso di molle k_n e smorzatori c_n ; in virtù delle proprietà elastiche e di smorzamento della malta, parte dell'energia cinetica si dissipa in forma di calore e, di conseguenza, il moto vibratorio

che raggiunge la massa m_n risulterà significativamente attenuato. Inoltre, anche l'insieme di pietre di diverse dimensioni (quindi differenti masse) agisce da "filtro in frequenza" del moto oscillatorio della vibrazione, in quanto le frequenze proprie di tutti i vari sottoinsiemi di massa-molla-smorzatore risultano differenti tra loro.

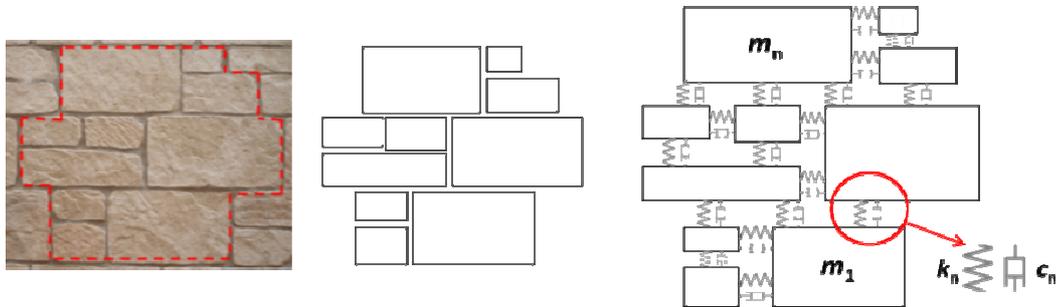


Figura 12 - Schematizzazione di una muratura in pietra come un sistema meccanico a molti gradi di libertà - Stone masonry represented as a multi-degree of freedom mechanical system.

Le proprietà elastiche e di smorzamento della malta risultano pertanto particolarmente rilevanti, in termini di attenuazione delle vibrazioni e shock. Impiegando malte strutturali caratterizzate da opportune proprietà meccaniche, come bassi moduli elastici (per esempio $< 8\text{GPa}$, rispetto alle malte tradizionali $\sim 12\text{GPa}$) ed elevati coefficienti di smorzamento interno, si può supporre un'ulteriore attenuazione dell'energia cinetica trasmessa.

L'impiego di tali malte, unitamente a sistemi per il consolidamento delle strutture in muratura lapidea, come le maglie di acciaio o fibra a reticolo [5] mostrate in Figura 13, può risultare anche molto interessante per incrementare le prestazioni dell'azione antisismica.

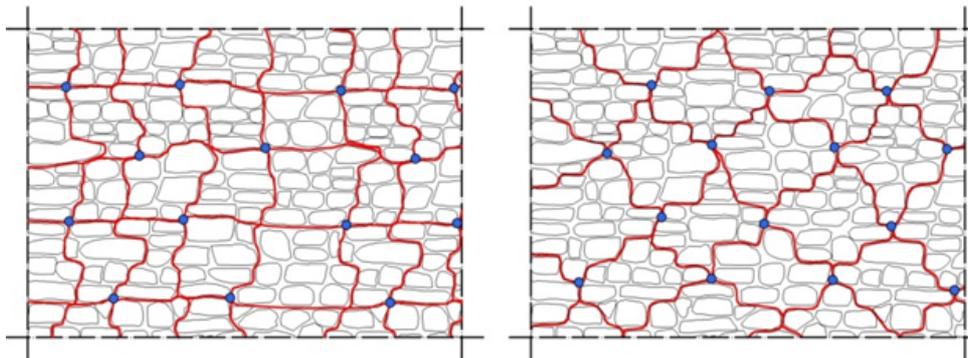


Figura 13 - Schematizzazione del sistema di rinforzo con funi metalliche "Reticulatus". Fonte: Università di Perugia - Example of the reinforcement system with steel cords in the repointing mortar, named "Reticulatus" method. Source: University of Perugia.

3. Prestazioni energetiche delle murature

Le prestazioni termiche delle murature in pietra sono normalmente caratterizzate dai seguenti due aspetti salienti:

- scarsa resistenza termica dovuta all'elevata conduttività termica di pietre e malte;
- elevata capacità termica legata alla notevole massa areica delle pareti a sua volta dovuta all'elevata densità dei materiali (pietre e malte) e agli spessori rilevanti delle murature.

Il primo aspetto assume valenza negativa nel caso di pareti di frontiera tra ambienti climatizzati e non. A questo riguardo, le più recenti disposizioni legislative in materia di contenimento dei consumi energetici per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici pongono valori limite alle prestazioni termiche degli elementi di involucro che impediscono di fatto la realizzazione di pareti in muratura prive di strati termoisolanti addizionali. Anche nel caso di interventi di riqualificazione di edifici esistenti, l'esistenza di incentivi fiscali per la loro riqualificazione energetica induce molto spesso all'applicazione di rivestimenti termoisolanti alle pareti esterne.

Il secondo aspetto può invece assumere valenza positiva per pareti sia esterne che interne. Infatti la capacità termica esprime la capacità di una muratura di accumulare energia termica in funzione della differenza di temperatura subita. Una parete che, a parità di variazione di temperatura, accumula maggiore calore è in grado di cedere successivamente questo calore contribuendo a mantenere più stabili le temperature dell'ambiente riscaldato (o raffrescato) nel corso della giornata e delle stagioni. D'altra parte, un'elevata inerzia termica degli elementi murari di un edificio comporta maggiore tempo per raggiungere la temperatura di comfort a partire dall'accensione dell'impianto di riscaldamento o raffrescamento. Va sottolineato che, per quanto riguarda le murature di involucro, l'applicazione di strati addizionali isolanti non altera significativamente la capacità termica areica interna. In linea di massima, l'applicazione di strati isolanti dal lato interno della muratura riduce la capacità termica, mentre l'applicazione sul lato esterno (cappotto termico) l'aumenta.

L'effetto utile dell'inerzia termica va posto in relazione al periodo dell'anno ed al contesto climatico (sia come temperature medie giornaliere sia come escursione termica giorno – notte): una maggiore inerzia è particolarmente apprezzata in regime estivo spostando i maggiori carichi termici verso le ore notturne, mentre sono attenuati i picchi di temperatura contribuendo così alla riduzione dei carichi termici e conseguentemente ricorrendo a impianti di potenza inferiore. Viceversa, in periodo invernale, specie per le seconde case, può essere utile avere una minore inerzia termica poiché in questi casi si raggiunge più rapidamente la temperatura di comfort nell'ambiente a partire dall'accensione dell'impianto.

Maggiore o minore inerzia devono poi essere poste in relazione anche con le tipologie impiantistiche: ad esempio con pannelli radianti è apprezzata una maggiore inerzia. È interessante notare come anche le murature interne dell'edificio possano contribuire ad incrementare l'inerzia termica della porzione di fabbricato di cui fanno parte. Infine va ricordato che i più recenti dispositivi legislativi (DM 26/6/2015), nel caso di nuove costruzioni o per riqualificazione energetica dell'involucro di primo e secondo livello, pongono limiti rispettivamente anche alla massa superficiale o alla trasmittanza termica periodica (indicatore dell'inerzia termica) delle murature esterne di edifici (per facciate non esposte a Nord, Nord-Ovest o Nord Est, di edifici siti in località

con irradianza sul piano orizzontale nel mese di maggiore insolazione $\geq 290 \text{ W/m}^2$). In particolare, si deve soddisfare almeno una delle seguenti condizioni: la massa superficiale m' dovrà essere maggiore di 230 kg/m^2 (escluso l'intonaco) oppure la trasmittanza termica periodica, YIE, dovrà essere $\leq 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ ($0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ per le coperture).

La tabella 2 pone a confronto i principali parametri termici di pareti in muratura di pietrame di diversa tipologia.

I parametri assunti per i calcoli, fatti ai sensi della UNI EN ISO 13786 [21], sono:

- spessore minimo in funzione del tipo di muratura da NTC 2008;
- muratura a faccia vista isolata all'interno (12 cm in fibra poliestere per ottenere il limite di legge dal 1/1/2021);
- intonaco a malta di calce interno spesso 2 cm;
- valori delle proprietà termofisiche delle murature da UNI TR 11552 [14], UNI TS 11300-1[22] e UNI 10351[15].

In merito al regime estivo, il fattore di ritardo può essere giudicato medio-buono se compreso tra 8 e 12 ore, ottimo se maggiore di 12 ore¹ [23]. Come si evince dai dati di Tabella 2, le murature portanti in pietra assolvono egregiamente la funzione di inerzia termica assicurata dalla massa superficiale elevata, mentre l'introduzione di un isolamento interno per assicurare prestazioni a termine di legge, fatto per la muratura listata, non peggiora né il fattore di ritardo né la capacità termica interna, ma solo lievemente la trasmittanza termica periodica.

Per le pareti in materiale poroso come il tufo, si deve considerare che tipicamente gli spessori murari si aggirano sui 40 cm e quindi, di norma, sono molto migliori sia il fattore di ritardo che gli altri parametri termofisici.

Va anche sottolineato che nel caso di recupero di edifici esistenti, i valori limite di riferimento per la trasmittanza si riducono e per il patrimonio storico vincolato è possibile, peraltro, derogare dai limiti molto stringenti di isolamento termico.

Tabella 2 - Prestazioni termiche di tipiche tipologie in muratura - Thermal performance of typical stone masonry.

Muratura	Spessore t^* [cm]	Densità ρ [kgm ⁻³]	Massa areica (senza malta) M_s [kgm ⁻²]	Trasmittanza termica U [Wm ⁻² K ⁻¹]	Trasmittanza termica periodica YIE** [Wm ⁻² K ⁻¹]	Fattore di ritardo [h]	Capacità termica interna K _i [kJm ⁻² K ⁻¹]
Muratura in pietra listata con mattoni	42	2000	828 (792)	1,555	0,167	12h 01'	66,2
Muratura in pietra non squadrate	52	2400	1278 (1242)	2,458	0,267	12h 44'	76,0
Muratura in pietra squadrate in Blocchi di tufo	26	1600	412 (374)	1,575	0,488	9h 20'	65,6
Muratura in pietra listata isolata all'interno	54	2000	808	0,244	0,189	13h 37'	68,6

* Per le pareti in pietrame si considerano 2 cm di intonaco interno
 ** Per le pareti opache verticali il valore della massa superficiale, escluso intonaco, deve essere $m' \geq 230 \text{ kg/m}^2$, oppure deve essere $YIE \leq 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$

¹ Il più recente DM 26.06.2015 per il regime estivo ha sostituito la valutazione del fattore di ritardo con riferimenti all'area soleggiata.

Conclusioni

Le buone prestazioni termiche ed acustiche delle costruzioni in materiale lapideo, unitamente alla rivalutazione di tale tecnica costruttiva anche sotto il profilo strutturale, specie dove si ritenga prioritario recuperare anche un'identità storico-tipologica e tecnologica del tessuto urbano da ricostruire, danno un rinnovato interesse a tale tecnica costruttiva sia per la costruzione di nuovi edifici che per il recupero di complessi esistenti.

Nella memoria sono state esaminate le proprietà strutturali, termiche ed acustiche degli edifici in muratura di pietre mediante analisi della normativa tecnica, della letteratura scientifica ed utilizzando modelli di calcolo semplificati ma appropriati al caso specifico. I risultati di queste analisi indicano che le murature in pietra possono offrire prestazioni spesso superiori a quelle che normalmente gli si attribuiscono.

Per lo studio delle prestazioni acustiche e di riduzione delle vibrazioni è stato analizzato il comportamento delle murature valutando l'effetto delle discontinuità strutturali create dai giunti di malta tra i blocchi e dalla diversa tessitura dell'apparato murario. Questa analisi verrà approfondita nel seguito degli studi sia mediante sperimentazioni in laboratorio (sia sui materiali che sui componenti) che mediante modelli di calcolo agli elementi-finiti sul sistema blocchi in pietra – giunti di malta.

Conclusions

The good thermal and acoustic performance of stone-based buildings and the revaluation of this structural constructive technology, in particular where it is a priority to retrieve the historical identity of the urban landscape, allow to reconsider the use of natural stone masonry united with new technological supports and materials, as a promising “new trend” for both newly developed buildings and existing buildings renovation.

In the paper, structural, thermal and acoustic properties of stone masonry buildings are investigated and discussed on the basis of current technical standards and scientific literature. Moreover, physical-technical and structural engineering performances are evaluated by means of simplified but accurate calculation models. The results show that stone masonry can offer often higher performance than those normally attributed to it.

For the study of acoustic performance and vibration reduction, the masonry behaviour is analyzed by evaluating the effect of the structural discontinuities, due to the mortar joints between the blocks. This analysis will be further developed, in the following studies, both from laboratory experiments (on materials and components) as well as by FEM analysis on the stone block - mortar joints system.

Bibliografia

- [1] CNR IVALSA <http://www.ivalsa.cnr.it/foto-e-video/foto/il-sistema-antisismico-borbonico.html>. Last accessed on: 18/08/2017.
- [2] Ceccotti, A., Massari, M., Pozza, L. (2016). Procedures for seismic characterization of traditional and modern wooden building types. *International Journal for Quality Research* 10(1).
- [3] Latina, C. (1994). *Muratura portante in Laterizio*. Tecnologia Progetto Architettura, Roma: Edizioni Laterconsult.
- [4] Tempesta, G. (2012). *La muratura portante*. Costruire in Laterizio n°149, Milano: Edizioni Tecniche Nuove.

- [5] Corradi, M., Borri, A., Castori, G., Sisti, R. (2016). The Reticulatus method for shear strengthening of fair-faced masonry. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14(12) pp. 3547-71.
- [6] Di Pasquale, S. (1986). *Architettura e Terremoti. Il caso di Parma*. Ed. Pratiche, Parma.
- [7] Cangi, G. (2009). Murature tradizionali e terremoto - Analisi critica del danno come presupposto per il recupero e la ricostruzione dell'edilizia storica danneggiata dal sisma in Abruzzo. In: *Atti del seminario Restaurare dopo il Terremoto*, Università G. D'Annunzio, Pescara.
- [8] Decreto Ministero Infrastrutture 14 Gennaio 2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni" su S.O. della G.U. del 04.02.2008.
- [9] Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni. 12 Ottobre 2007. S.O. della G.U. del 29.01.2008.
- [10] Grazzini, A. (2014). Il comportamento statico degli edifici in pietra, la "struttura scatolare", le fondazioni. Il miglioramento statico strutturale. In: *Manuale per il recupero del patrimonio architettonico di pietra tra Verbano Cusio Ossola e Canton Ticino* (a cura di M. Zerbinatti), Provincia Verbano-Cusio-Ossola, Baveno.
- [11] Ferrini, M., Decanini, L., Pagliuzzi, A., Scarparolo S. (2004). *Edifici in muratura in zona sismica, rilevamento delle carenze strutturali. Manuale per la compilazione delle schede delle Carenze*. Regione Toscana, Dir. Gen. politiche territoriali e ambientali - Settore Servizio Sismico regionale, Firenze, 2004.
- [12] Caleca, L., De Vecchi, A. (1999). *Tecnologie di consolidamento delle strutture murarie*. Palermo: Dario Flaccovio Editore.
- [13] A.A. V.V. (2009). In: *Manuale per la compilazione della scheda di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (AeDES)*. Roma: Editrice italiani nel mondo srl.
- [14] UNI (2014). UNI/TR 11522:2014. *Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici - parametri termofisici*.
- [15] UNI (1994). UNI 10351:1994 - *Materiali da costruzione. Conduttività termica e permeabilità al vapore*.
- [16] Grazzini, A., Quagliarini, E. (2014). *Dry stone masonry: mechanical characteristics and seismic retrofit*. In: *Proceedings of the 9th International Masonry Conference*, Guimaraes, Portugal.
- [17] Marini, A. (1978). *Il comportamento delle strutture in muratura sotto sisma - meccanismi di danno*. Lezione - Università degli Studi di Bergamo.
- [18] Cremer, L., Heckl, M. (1988). *Structure-borne sound: Structural vibrations and sound radiation at audio frequencies*. Berlin and New York: Springer-Verlag.
- [19] Sharp, BH. (1978). *Prediction methods for the sound transmission of building elements*. *Noise Control Engineering*, 11(2), pp 53-63.
- [20] Crafton, PA. (1961). *Shock and vibration in linear systems*. New York: Harper & Brothers.
- [21] UNI (2008). UNI EN ISO 13786:2008 - *Prestazione termica dei componenti per edilizia - Caratteristiche termiche dinamiche - Metodi di calcolo*.
- [22] UNI (2008). UNI TS 11300-1:2008 - *Prestazioni energetiche degli edifici - Determinazione del fabbisogno di energia termica dell'edificio per la climatizzazione estiva ed invernale*.
- [23] *Linee Guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici*. All. A al DM 26.06.2009.