



## In-situ Test Results on Masonry Walls of Southern Italy

Mariateresa Guadagnuolo<sup>a</sup>, Marianna Aurilio<sup>a</sup>, Anna Tafuro<sup>a</sup>, Andrea Basile<sup>b</sup>, Giuseppe Faella<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Architettura e Disegno Industriale, Università degli Studi della Campania, Abbazia di San Lorenzo ad Septimum, 81031 Aversa, Italy.

<sup>b</sup> Tecnolab S.R.L., Via S. Maria del Pianto 80, Napoli, Italy

*Keywords: Masonry, in-situ tests, mechanical properties, compressive strength, Campania.*

### ABSTRACT

The seismic safety evaluation and the retrofitting design of existing and heritage buildings require a preliminary knowledge of structure characteristics and, specifically, of material mechanical properties. The compressive strength and the modulus of elasticity of masonry walls can be determined either through in-situ tests or by using values provided by codes. In this regard, the new Italian Building Code (NTC 2018) introduces new reference values of masonry mechanical properties, depending on masonry type, and modifies some value ranges of the previous version. In this paper, a large sample data of in-situ tests performed on masonry structures are processed in order to compare the experimental values to the ones advised in the Italian Building Code. This is possible due to the availability of numerous values of compressive strength and modulus of elasticity obtained by double flat jacks tests performed on different types of masonry buildings representative of the built heritage of Campania region. The Italian Building Code assumes that flat jacks should be used predominantly to determine the elastic modulus, considering the estimation of the compressive strength to be less reliable. However, in this framework, only the data concerning the compressive strength obtained from such tests are analyzed. Initially, they are compared with the reference values provided by the Italian technical regulation. Subsequently, the experimental values are used to update the average values proposed by the code.

### 1 INTRODUZIONE

La maggior parte del patrimonio esistente è costituito da strutture in muratura con una elevata vulnerabilità in caso di eventi sismici. Per la loro conservazione e messa in sicurezza sono oggi disponibili diverse metodologie di analisi numerica, ma la validità dei risultati dipende fortemente dai valori utilizzati per le proprietà meccaniche della muratura. La determinazione di queste ultime costituisce ancora un punto debole dell'intera procedura di valutazione della sicurezza statica e sismica delle costruzioni, nonostante il forte sviluppo avuto negli ultimi decenni dalle tecniche per la loro determinazione in sito. A ciò si aggiunge anche una parziale carenza nei valori di letteratura e di norma, dipendente dalla forte eterogeneità delle strutture murarie sia in termini di materiali che di tecniche costruttive.

Le prove in sito continuano ad assumere un ruolo fondamentale nella stima delle proprietà meccaniche delle murature, attese anche le

problematiche che contraddistinguono l'esecuzione di prove in laboratorio su campioni prelevati in sito o su campioni di nuova realizzazione. Il prelievo di campioni su costruzioni esistenti è, infatti, spesso non praticabile a causa del disturbo arrecato al campione durante il prelievo ed il trasporto in laboratorio, e, nella maggior parte dei casi, impossibile quando la costruzione ha una rilevanza storica che ne impedisce qualunque forma di danneggiamento, anche a scopo diagnostico. La realizzazione di campioni ex-novo in laboratorio difficilmente consente di riprodurre le medesime caratteristiche delle murature storiche in sito. Ciò è particolarmente rilevante per le murature in pietra naturale (Corradi et al. 2003), caratterizzate da blocchi lapidei di molteplici materiali, da diverse modalità di lavorazione dei blocchi, da malte con resistenze diverse e spesso alterate dal tempo.

La maggior parte dei codici normativi recenti che trattano esplicitamente le strutture esistenti,

fanno giustamente dipendere il tipo di analisi strutturale e i parametri meccanici di calcolo dal livello di conoscenza conseguito per le strutture murarie, ovvero dal numero e tipologia di indagine sperimentale eseguite. Peraltro, l'analisi dei materiali è fondamentale per predisporre le tecniche di intervento più idonee (Binda et al. 2001; Faella et al. 2012; Guadagnuolo et al. 2014).

Ovviamente i parametri di maggiore rilevanza sono i moduli elastici e le resistenze (principalmente a compressione e a taglio, sebbene molti codici di calcolo facciano maggiormente uso di quella a trazione). Come è noto, risulta spesso difficile stimare la resistenza a compressione della muratura combinando la resistenza di malta e mattoni (Radovanovic et al. 2015).

Le tecniche diagnostiche che si possono utilizzare per la valutazione dei parametri meccanici della muratura esistente non sono particolarmente numerose, sia quelle di tipo non distruttivo (Rossi 1982, Gregorczyk e Lourenço 2009) sia quelle parzialmente o leggermente distruttive (Binda et al. 2007).

Tra i metodi di indagine non distruttivi, la metodologia sonica è quella più usata. Come è noto, la tecnica si basa sulla misura della velocità di propagazione di impulsi sonici all'interno del corpo murario. L'interpretazione dei risultati per le classiche strutture in muratura è tuttora complessa, in quanto si tratta di un materiale fortemente disomogeneo, per il quale la sola misura della velocità di propagazione del segnale sonico non è sufficiente per la determinazione di tutti i parametri meccanici di interesse, ed in particolare delle resistenze.

Tra le tecniche di indagine parzialmente distruttive, le prove con i martinetti piatti doppi (ASTM C1196/91; ASTM C1197/91; ASTM D4729) sembrano, invece, essere maggiormente affidabili, in quanto stimano le proprietà della muratura mediante una "prova di carico" in sito, senza estrarre alcun campione (Vicente et al. 2015). Ciò nonostante, l'attendibilità e rappresentatività dei risultati conseguiti dipende da molteplici fattori, come illustrato nel paragrafo che segue.

## 2 LE PROVE CON MARTINETTI PIATTI

Le prove con i martinetti piatti, originariamente utilizzate nell'ambito della

meccanica delle rocce, sono state "adattate" alle strutture murarie alla fine degli anni '70. Nel ventennio successivo sono state oggetto di una particolare attenzione per accertarne le potenzialità, valutate anche attraverso prove comparative in sito e in laboratorio. Le successive applicazioni hanno tuttavia messo in luce il grado di incertezza, talvolta elevato, che in taluni casi caratterizza l'interpretazione dei risultati e quindi i risultati stessi.

La tecnica dei martinetti piatti consente di valutare sia la tensione in sito (prova con martinetto semplice) sia le tensioni di prima fessurazione e di "rottura", oltre che i moduli di elasticità (prova con doppio martinetto).

La prova è stata principalmente impiegata, ed è maggiormente affidabile, per studiare murature in mattoni o murature in blocchi squadrati, ossia murature di buona fattura, con ricorsi di malta alquanto regolari. L'utilizzo su murature caotiche pone invece numerosi interrogativi e alcune sperimentazioni hanno evidenziato come possa condurre anche ad errori molto significativi sia nella valutazione dei parametri di deformazione che di resistenza (Andreini et al, 2014).

Per le prove con martinetti piatti non è disponibile una specifica normativa italiana di riferimento che descriva le caratteristiche dell'attrezzatura di prova, la procedura di esecuzione delle prove e le modalità di elaborazione dei risultati. Sono disponibili invece la versione italiana di alcune normative internazionali, quali le UNI EN 1052.

Come è noto, la prova con i martinetti piatti doppi si effettua eseguendo inizialmente alcuni cicli di carico e scarico, incrementando gradualmente il carico (per la stima del modulo elastico), e proseguendo l'incremento del carico fino a valori ritenuti "opportuni" a definire un diagramma tensioni-deformazioni che consenta di determinare una "resistenza a rottura" (spesso ottenuta per estrapolazione).

Alcune ricerche (Gregorczyk e Lourenço 2000; Valluzzi, 2003; Cescatti et al. 2016) basate su analisi comparative eseguite in laboratorio tra i risultati di prove di carico dirette e prove con martinetti piatti su analoghi pannelli murari mostrano che nelle murature regolari l'errore nella stima dei moduli elastici è mediamente compreso tra il 15 e il 20% (Ronca et al. 2013, Saisi et al. 2013, Noland et al. 1990). Nessuna indicazione è invece riportata relativamente all'errore relativo alla stima della resistenza. Le

ASTM (C1197-91) suggeriscono di considerare un coefficiente di variazione del 15% nella valutazione degli stati tensionali e del 24% nella valutazione dei parametri di deformabilità.

Uno dei parametri che maggiormente condiziona la valutazione della resistenza a compressione è l'area di spinta (portata in conto attraverso uno dei due coefficienti correttivi presenti in tutte le formulazioni normative). Si presume, infatti, che il carico applicato alla muratura da ciascun martinetto induca una distribuzione delle tensioni normali costante sull'area di spinta. La distribuzione effettiva per i tipici martinetti piatti (in acciaio inossidabile) è invece in genere diversa, con valori minori lungo il bordo del taglio e ciò talvolta condiziona in modo significativo la rappresentatività dei risultati. Una distribuzione più uniforme delle tensioni sarebbe conseguibile mediante l'utilizzo di martinetti in materiale polimerico, il cui impiego non è tuttavia sempre possibile. Per verificare l'influenza della effettiva distribuzione delle tensioni normali sulla valutazione dei risultati sperimentali, al fine di correggerli in modo adeguato, in (Gregorczyk e Lourenço 2000) è proposta una specifica procedura basata sull'impiego di fogli di carta carbone da posizionare tra ciascun martinetto e le facce interne dei tagli nella parete muraria.

Anche gli effetti della deformazione viscosa (dovuti all'incremento tensionale che si registra ai bordi del taglio) possono influenzare la resistenza a compressione determinata mediante i martinetti piatti. In tale ambito, i documenti R.I.L.E.M. LUM.D.2 e LUM.D.3 suggeriscono i tempi di esecuzione da rispettare per ciascuna fase della prova con martinetti doppi.

Come premesso, maggiormente complessa è l'impiego nelle murature caotiche: per una caratterizzazione "sufficiente" delle caratteristiche meccaniche di queste murature, in Porco e Uva (2007) è suggerito di incrementare l'area di prova (dimensione dei tagli e dei martinetti).

Il recente lavoro di Simões et al. (2015) si propone, invece, di definire le proprietà meccaniche della muratura secondo un approccio di aggiornamento bayesiano, arricchendo il database delle caratteristiche meccaniche delle pareti in muratura del patrimonio storico di Lisbona.

Innovativo è, infine, l'approccio proposto da (Manning et al. 2014), in fase di sviluppo presso

l'università di Minho, definito "Tube-jack testing": questo ha l'obiettivo di fornire quante più informazioni affidabili sulle caratteristiche delle murature irregolari attraverso metodi meno distruttivi, confrontando i risultati anche con quelli eseguiti con i martinetti piatti (Ramos et al. 2013).

### 3 IL CAMPIONE DI DATI

La Circolare di applicazione delle NTC 2018 (MIT 2019), nella tabella C8.5.I, identifica otto differenti tipologie di muratura con annessi valori di riferimento dei principali parametri meccanici. Tali parametri sono principalmente finalizzati alle verifiche nei riguardi delle azioni sismiche.

Nel caso in cui la malta abbia caratteristiche particolarmente scadenti, ai valori della tabella si applica un coefficiente riduttivo pari a 0.7 per le resistenze e 0.8 per i moduli elastici.

Le caratteristiche meccaniche della muratura in uno stato di fatto migliore, possono, invece, ottenersi applicando dei coefficienti migliorativi (Tabella C8.5.II), funzione di diversi fattori: malta di buone caratteristiche, presenza di ricorsi o di elementi di collegamento trasversale diffusi.

In ogni caso, le norme indicano la possibilità di specificare meglio gli intervalli in funzione delle specificità costruttive delle singole Regioni.

A tal fine, sulla base dei campioni disponibili relativi alle murature campane, sono state individuate quattro classi tipologiche, afferenti alle diverse tipologie di muratura contemplate dalla norma (Tabella 1), per ognuna delle quali è stato effettuato un confronto con i valori ottenuti mediante prove con martinetti piatti doppi.

Tabella 1. Tipologie murarie di norma considerate

Tipologia	Descrizione	$f_m$ (MPa)
A	Muratura a conci sbozzati con paramenti di spessore disomogeneo	2.0
B	Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1.4 ÷ 2.2
C	Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	2.0 ÷ 3.2
D	Muratura in mattoni pieni e malta di calce	2.6 ÷ 4.3

I dati elaborati sono relativi ad un campione molto vasto di edifici esistenti appartenenti a diverse epoche storiche e/o costruttive, localizzati su tutto il territorio campano in zone con differenti peculiarità. Sono, in particolare, relativi

a circa 600 indagini eseguite con martinetti piatti doppi, per un totale di oltre 700 prove.

I dati riguardano diverse tipologie di muratura regolari e irregolari nelle quali rientrano differenti varietà di materiali: tufo, calcarenite, arenaria, pietra a spacco, mattoni, laterizi ed infine pietrame e pietra mista (Figura 1). Essi rappresentano un campione sufficientemente esteso e significativo dal punto di vista statistico, tale da essere considerato rappresentativo delle tipologie di muratura presenti nel territorio campano, appartenenti a diverse epoche storiche e realizzate con differenti tecniche costruttive. Ciascuna prova con martinetti ha contemplato sia la valutazione dei moduli elastici sia la stima della resistenza a compressione.

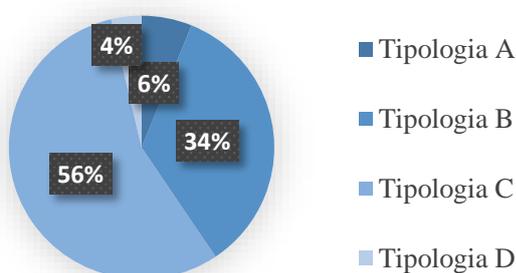


Figura 1. Percentuale di campioni per le diverse tipologie murarie della Tabella 1.

La maggior parte dei dati utilizzati per la costituzione del database di lavoro proviene dai rapporti di monitoraggio forniti da una società – la Tecnolab s.r.l – operante sul territorio campano nel settore della consulenza e diagnostica strutturale.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018 e MIT 2019) assumono che attraverso i martinetti piatti si possa determinare il modulo elastico  $E$ , ritenendo meno affidabile la stima della resistenza a compressione  $f_m$ . Sussistendo, infatti, una correlazione empirica, approssimata e di proporzionalità tra di essi, propongono una stima indiretta di  $f_m$ , utilizzando i valori di  $E$  determinati sperimentalmente.

Nell'ambito di questo lavoro sono, invece, analizzati i soli dati che riguardano la resistenza a compressione  $f_m$  ricavata dalle prove con martinetti piatti doppi, rinviando ad una fase successiva della ricerca la stima mediante le altre procedure suggerite nella vigente normativa.

#### 4 ANALISI DEI RISULTATI

Per ciascuna delle tipologie di muratura considerate sono stati eseguiti due tipi di elaborazione.

Inizialmente, sono stati diagrammati direttamente i valori della resistenza a compressione  $f_m$  ricavati dalle singole prove con i martinetti piatti doppi (in totale 800 valori). La distribuzione di tali valori è stata confrontata con i valori di riferimento forniti dalla Circolare di applicazione delle NTC 2018 (MIT, 2019).

Successivamente, i valori medi delle resistenze riportate nella Tabella C.8.5.I di tale Circolare sono stati aggiornati sulla base dei valori sperimentali, così come indicato in (MIT, 2019) al paragrafo C8.5.4.1 (aggiornamento previsto nel caso di livello di conoscenza LC3). Tale valutazione tiene conto, attraverso il coefficiente  $k$ , del rapporto tra la dispersione (varianza) della stima effettuata attraverso le prove (combinazione tra incertezza della misurazione sperimentale e dispersione dei parametri meccanici nell'ambito dell'edificio che si sta analizzando) e la varianza della distribuzione di norma.

L'aggiornamento del valore medio di norma è stato eseguito calcolando il seguente parametro:

$$\mu'' = \frac{n\bar{f}_m + k\mu'}{n + k} \quad (1)$$

in cui  $\bar{f}_m$  è la media delle  $n$  prove appartenenti a ciascuna indagine e  $\mu'$  è la media della distribuzione di norma dei valori della resistenza, riportata nei grafici a seguire con una linea continua in blu:

$$\mu' = \frac{f_{m,\min} + f_{m,\max}}{2} \quad (2)$$

Il valore da attribuire al coefficiente  $k$  è suggerito dalla norma in funzione del tipo di indagine diretta, per ciascuna delle proprietà meccaniche della muratura. Per l'aggiornamento mediante l'Equazione (1), sono stati pertanto utilizzati i valori dei parametri riportati nella Tabella 2.

Tabella 2. Parametri correttivi utilizzati nell'Eqn. (1)

Tipologia di muratura	$k$	$\mu'$
A	2.0	2.0
B	2.0	1.8
C	2.0	2.6
D	2.0	3.5

Il valore  $\mu''$  dovrebbe essere utilizzato quando non risulta molto diverso da  $\mu'$  (ma la norma non specifica quanto diverso), altrimenti il suo utilizzo deve essere adeguatamente motivato.

Tale confronto deve essere fatto per ciascuna indagine, singolarmente. In quanto segue, il confronto è effettuato solo con il valore  $\mu''$  medio dell'intero campione di dati.

#### 4.1 Muratura a conci sbazzati con paramenti di spessore disomogeneo

La figura 2 mostra le resistenze a compressione dedotte dalla prova sperimentale per la tipologia A, per la quale la tabella di norma (MIT, 2019) non prevede un intervallo di valori di resistenza ma soltanto un singolo valore, pari a 2 N/mm<sup>2</sup>. Nella Circolare del 2009 (MIT, 2009) era invece presente un intervallo da 2 a 3 N/mm<sup>2</sup>.

I risultati delle indagini eseguite sulle murature che rientrano in questa tipologia, mettono in evidenza una rilevante dispersione dei valori sperimentali rispetto al valore medio previsto dalla norma, mostrando come esso sia poco rappresentativo della realtà. In questo caso, solo il 27% dei valori rientra in un intervallo di resistenza individuato variando del 5% il valore di norma, ossia nell'intervallo 1.90÷2.10 N/mm<sup>2</sup> (riportato nella Figura 2 con un rettangolo verde). Il valore medio dei dati sperimentali è pari a 1.77 N/mm<sup>2</sup>, indicato con una linea nera tratteggiata, con una deviazione standard di 0.53 N/mm<sup>2</sup>. Ulteriori dati sono forniti nella successiva Tabella 3.

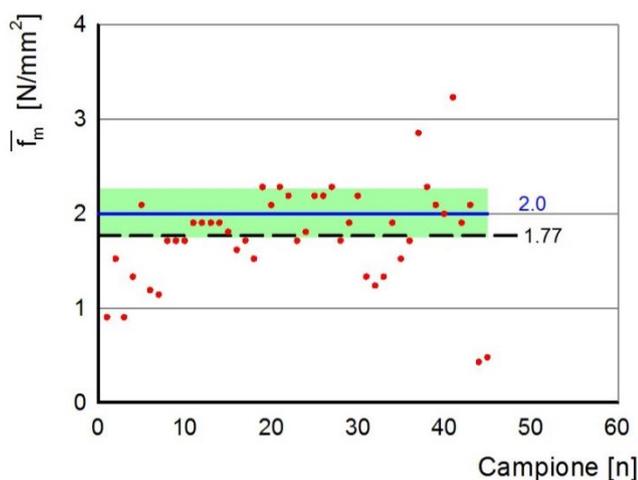


Figura 2. Valori sperimentali  $f_m$  del campione di dati relativo alla tipologia di muratura A

Come riportato in precedenza, utilizzando le resistenze sperimentali delle indagini riportate nella Figura 2, il valore di norma è stato aggiornato mediante l'Equazione (1), pervenendo ai valori  $\mu''$  mostrati nella Figura 3. Ovviamente i campioni rappresentati sono in numero minore

rispetto alla Figura 2, essendo relativi alle indagini e non alle singole prove.

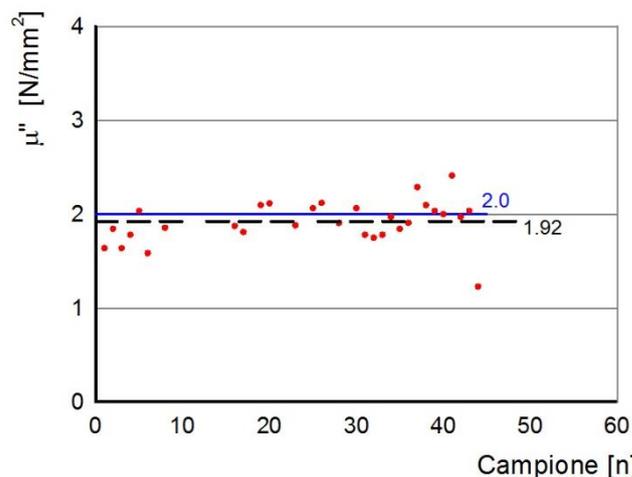


Figura 3. Tipologia di muratura A: resistenze medie di norma aggiornate utilizzando i valori sperimentali

Come prevedibile, la dispersione dei valori delle resistenze si riduce significativamente e il 40% delle resistenze rientra nell'intervallo 1.90÷2.10 N/mm<sup>2</sup>. Il valore medio delle resistenze aggiornate  $\mu''$  è pari a 1.92 N/mm<sup>2</sup>, comunque inferiore al valore proposto dalla normativa (2.00 N/mm<sup>2</sup>), ma non particolarmente distante.

#### 4.2 Muratura in pietra tenera

La Circolare n. 7 del 2019 (MIT, 2019) suddivide le murature in pietra tenera in due gruppi in funzione della tessitura irregolare (B) o regolare (C), mentre la Circolare n. 617 del 2009 (MIT, 2009) prevedeva un'unica tipologia "Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)", con valori della resistenza a compressione compresi nell'intervallo 1.40÷2.40 N/mm<sup>2</sup>.

In (Guadagnuolo et al. 2015), l'intervallo normativo proposto nella Circolare 2009 si dimostra essere abbastanza rappresentativo delle resistenze misurate sperimentalmente su pannelli in muratura di tufo giallo campano.

##### 4.2.1 Muratura irregolare in pietra tenera

La Figura 4 è relativa alla tipologia B, per la quale la tabella di norma prevede, per  $f_m$ , un intervallo di valori compreso tra 1.4 e 2.2 N/mm<sup>2</sup>, quindi pressoché coincidente con quello della Circolare del 2009 (MIT, 2009) per le murature in conci di pietra tenera.

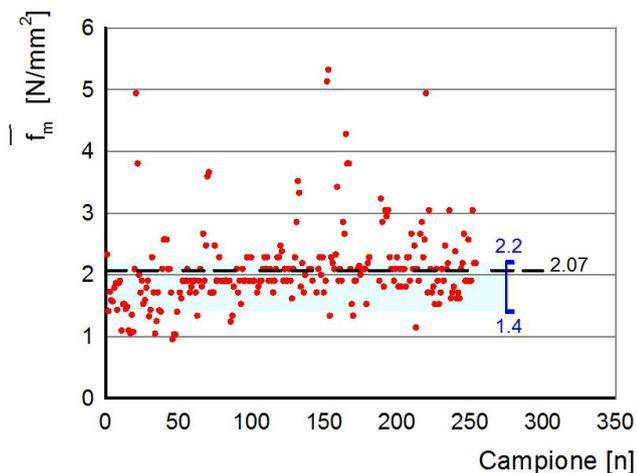


Figura 4. Valori sperimentali  $f_m$  del campione di dati relativo alla tipologia di muratura B

I valori ottenuti con i martinetti piatti sono caratterizzati da una evidente dispersione: il valore medio è pari a 2.07 N/mm<sup>2</sup>, con una deviazione standard di 0.65 N/mm<sup>2</sup>. Nella Figura 4 è riportato anche il valore medio dei dati sperimentali (con tratto nero tratteggiato) ed è evidenziato con un rettangolo azzurro l'intervallo indicato in (MIT, 2019). Una significativa percentuale di dati, il 68%, è tuttavia inclusa nell'intervallo proposto dalla Circolare, come riportato nella Tabella 3.

L'aggiornamento mediante l'Equazione (1) del valore medio dell'intervallo di resistenze di norma riduce significativamente la dispersione rispetto all'intervallo della norma stessa (Figura 5), conducendo ad un valore medio di 1.93 N/mm<sup>2</sup> (indicato con una linea tratteggiata nera nella Figura 5). Tale valore è molto prossimo al valore medio dell'intervallo di norma, pari a 1.80 N/mm<sup>2</sup>, rappresentato in figura mediante una linea blu a tratto continuo.

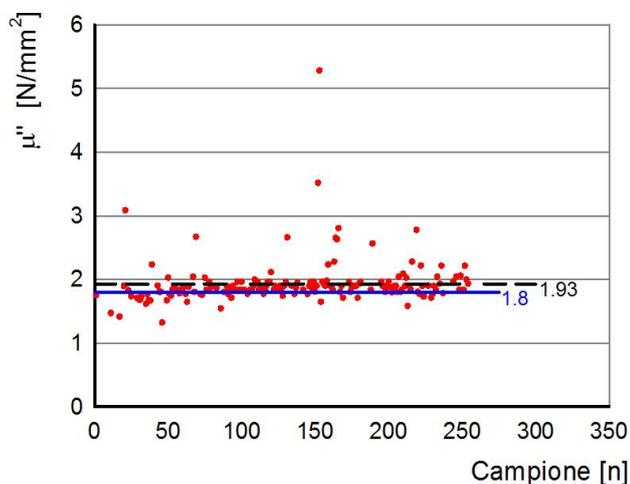


Figura 5. Tipologia di muratura B: resistenze medie di norma aggiornate utilizzando i valori sperimentali

#### 4.2.2 Muratura a conci regolare di pietra tenera

Per la tipologia muraria C, la Circolare del 2019 propone un intervallo di resistenze a compressione compreso tra 2.0 e 3.2 N/mm<sup>2</sup>, valori più elevati rispetto a quelli proposti dalla Circolare del 2009 (MIT, 2009) per tutte le murature in conci di pietra tenera.

La Figura 6 contiene i valori forniti dalle prove con martinetti piatti e mostra come un'alta percentuale sia inferiore all'intervallo della norma, nello specifico il 52%. Il valore medio dei dati sperimentali è pari a 1.95 N/mm<sup>2</sup>, con una deviazione standard pari a 0.39 N/mm<sup>2</sup>.

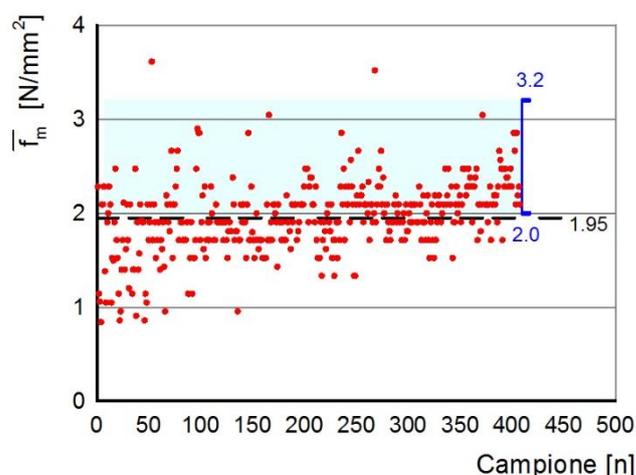


Figura 6. Valori sperimentali  $f_m$  del campione di dati relativo alla tipologia di muratura C

Il valore medio  $\mu'$  è pari a 2.6 N/mm<sup>2</sup>, e tale valore appare, per l'esperienza degli autori, abbastanza alto per la muratura in tufo campana: per esempio, la muratura in conci regolari di tufo grigio campano raggiunge poco più della metà di tale valore.

Utilizzando i suddetti dati, l'aggiornamento dei valori medi di norma della resistenza a compressione non comporta una forte dispersione, come mostrato nella Figura 7.

Il valore medio delle resistenze  $\mu''$  è, in questo caso, pari a 2.39 N/mm<sup>2</sup>, più piccolo di  $\mu'$  di una quantità che si può ritenere non trascurabile. Se tale differenza fosse riferita ad una sola indagine, l'utilizzo di  $\mu''$  dovrebbe essere adeguatamente motivato secondo la norma.

La Circolare non sembra dare indicazioni su tali circostanze: l'utilizzo di  $\mu'$ , a maggior ragione, non dovrebbe essere preso in considerazione, atteso che sembra sovrastimare le resistenze reali.

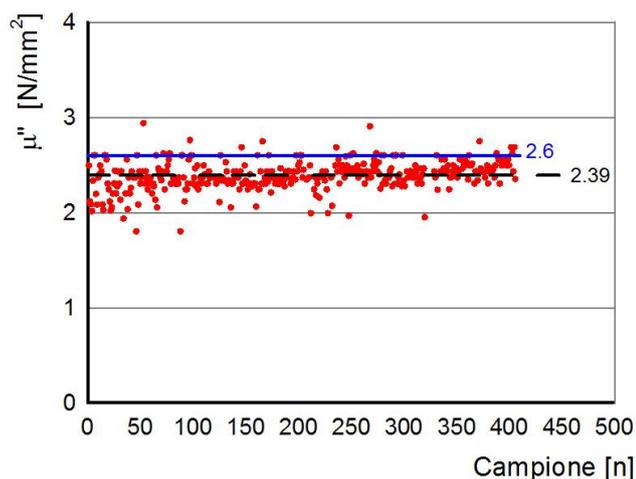


Figura 7. Tipologia di muratura C: resistenze medie di norma aggiornate utilizzando i valori sperimentali

#### 4.3 Muratura in mattoni pieni e malta di calce

I valori sperimentali determinati per la tipologia di D sono sintetizzati nella Figura 8. In questo caso l'intervallo di norma ( $2.6 \div 4.3$  N/mm<sup>2</sup>) è sufficientemente ampio da inglobare una alta percentuale dei valori sperimentali. Il valore medio di questi ultimi è pari a 3.02 N/mm<sup>2</sup>, con una deviazione standard di 0.79 N/mm<sup>2</sup>.

La forte dispersione dei valori sperimentali li rende poco affidabili, anche ai fini della correzione del valore medio di norma  $\mu'$ , pari a 3.45 N/mm<sup>2</sup>.

dei valori sperimentali, ma è distante da  $\mu'$ . Anche in questo caso, se fosse relativo ad una sola indagine, si dovrebbe utilizzare  $\mu'$ , valore molto più elevato rispetto a quello ottenuto sperimentalmente.

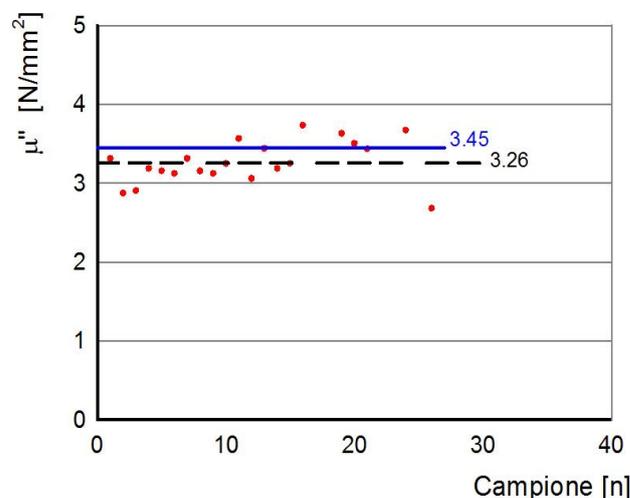


Figura 9. Tipologia di muratura D: resistenze medie di norma aggiornate utilizzando i valori sperimentali

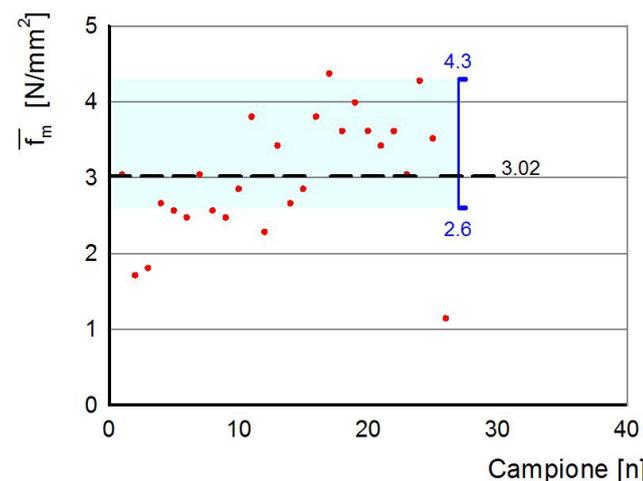


Figura 8. Valori sperimentali  $f_m$  del campione di dati relativo alla tipologia di muratura D

Nella Figura 9 sono comunque diagrammati i valori  $\mu''$  ottenuti mediante l'Equazione (1), e il cui valore medio è pari a 3.26 N/mm<sup>2</sup>. Ovviamente non è particolarmente prossimo al valore  $\mu'$ : anche per questa tipologia, come per la C, il valore aggiornato  $\mu''$  è più vicino alla media

## 5 CONCLUSIONI

La Circolare n. 7 del 2019 (MIT, 2019) ha introdotto alcune novità rispetto a quella del 2009 (MIT, 2009), tra cui la modifica del numero di tipologie murarie (dalle undici della versione 2009 alle otto della nuova versione) e dei valori proposti per le relative caratteristiche meccaniche.

Tranne che per la tipologia A, *Muratura a conci sbazzati con paramenti di spessore disomogeneo*, in tutte le altre tipologie murarie esaminate in questo lavoro, la nuova versione della Circolare definisce valori più alti rispetto alla versione precedente, così come riportato nella Tabella 3.

Tabella 3. Sintesi delle analisi dei dati sperimentali [Valori delle resistenze in N/mm<sup>2</sup>]

Tipologia	A	B	C	D
Intervallo MIT 2009	2.0-3.0	1.4-2.4	1.4-2.4	2.4-4.0
Intervallo MIT 2019	2.0	1.4-2.2	2.0-3.2	2.6-4.3
N. prove analizzate	45	241	404	26
Valori esterni inf.	66%	7%	52%	30%
Valori in intervallo	-	68%	47%	66%
Valori esterni sup.	34%	25%	1%	4%
Valore medio prove	1.77	2.07	1.95	3.02
Deviazione standard	0.53	0.65	0.39	0.79

La tipologia muraria relativa alle *Murature in conci di pietra tenera*, unica nella circolare del 2009, è stata suddivisa tra muratura a orditura regolare e muratura a orditura irregolare. Con tale suddivisione l'intervallo di valori proposto per la resistenza a compressione, individuato nel 2009 ( $1.40 \div 2.40 \text{ N/mm}^2$ ), è stato suddiviso in due intervalli: quello relativo alle murature irregolari (B), che resta pressoché coincidente con quello della versione 2009 ( $1.40 \div 2.20 \text{ N/mm}^2$ ) e quello relativo alle murature a orditura regolare (C) che invece è caratterizzato da valori più elevati ( $2.00 \div 3.20 \text{ N/mm}^2$ ).

In questo lavoro, sono riportati i valori della resistenza a compressione desunti da prove con martinetti piatti doppi. I dati elaborati sono relativi ad un campione molto vasto di edifici esistenti, appartenenti a diverse epoche storiche e/o costruttive, localizzati su tutto il territorio campano in zone con differenti peculiarità. Sono, in particolare, relativi a circa 600 indagini eseguite con martinetti piatti doppi, per un totale di oltre 700 prove.

Nella Tabella 3, per ciascuna tipologia di muratura considerata nel lavoro, sono riportati, il numero di prove con martinetti piatti utilizzate nelle analisi, le percentuali di resistenze sperimentali che sono risultate esterne all'intervallo riportato nella Circolare 2019 (inferiormente e superiormente), le percentuali di valori inclusi nell'intervallo di norma, nonché il valore medio delle resistenze sperimentali e la corrispondente deviazione standard.

Per le tipologie A (*Muratura a conci sbazzati con paramenti di spessore disomogeneo*) e D (*Muratura in mattoni pieni e malta di calce*), i risultati sperimentali rappresentano sufficientemente bene le indicazioni normative. Dalle analisi eseguite emerge, invece, che un maggiore approfondimento è necessario per le *Murature a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)*, per le quali è stata rilevata una significativa differenza tra le resistenze sperimentali e quelle di norma, soprattutto nel caso di tessitura regolare.

Nell'eseguire un'indagine con i martinetti piatti su murature regolari, i martinetti sono in genere posizionati nei letti di malta, consentendo una prova più "regolare"; nel caso di muratura irregolare, i martinetti potrebbero essere posizionati sia in corrispondenza di un letto di malta (che cambia spessore essendo la muratura irregolare), sia in corrispondenza di tagli eseguiti

sui blocchi: questo è uno dei principali motivi della maggiore dispersione rilevata per la muratura irregolare in conci di pietra tenera (Tabella 3). In tali circostanze, inoltre, incide in misura maggiore la qualità della malta, e questo motiva il valore medio della resistenza leggermente più alto di quello rilevato per murature regolari in conci della stessa tipologia.

Inoltre, il campione esaminato è relativo a un patrimonio costruito vasto, con edifici realizzati in epoche molto differenti, con l'impiego di materiali di differente qualità, con blocchi provenienti da cave e depositi diversi e con caratteristiche differenti. Tutto ciò giustifica, in parte, i valori leggermente maggiori delle resistenze delle murature irregolari rispetto a quelle di tessitura regolare.

In ogni caso, i valori delle resistenze a compressione proposti dalla Circolare del 2019 di applicazione delle NTC del 2018 per le murature regolari in conci di pietra tenera sembrano particolarmente elevati per le murature della Regione Campania. Infatti, una percentuale particolarmente elevata delle resistenze sperimentali ricade nella parte inferiore, o al di fuori inferiormente, dell'intervallo di norma.

La Circolare del 2019, nel caso di livello di conoscenza accurata LC3, consente di aggiornare i valori medi delle resistenze dell'intervallo di norma usando i valori sperimentali. Per tutte le tipologie murarie esaminate, ad eccezione della muratura irregolare in conci di pietra tenera, il valore medio delle resistenze fornite dai martinetti piatti è inferiore al valore medio dell'intervallo di norma e l'aggiornamento conduce a resistenze intermedie tra i suddetti valori medi.

L'obiettivo dovrebbe essere quello di rendere più attendibili le resistenze proposte dalla normativa, utilizzando i risultati di indagini sperimentali in sito: per le murature in conci regolari di pietra tenera esaminate, tipiche della Regione Campania, le resistenze sperimentali risultano sistematicamente inferiori a quelle di norma, anche in misura significativa, e l'utilizzo del valore di norma così aggiornato, oltre a richiedere una adeguata motivazione, può risultare poco conservativo.

## 6 RINGRAZIAMENTI

Il campione di dati oggetto del lavoro è stato elaborato sulla base dei rapporti di prova con

martinetti piatti forniti dalla società Tecnolab s.r.l. di Napoli, che si ringrazia per la collaborazione.

Il lavoro inoltre è stato possibile anche grazie al contributo dei fondi del Dottorato in Architettura, Disegno Industriale e Beni Culturali dell'Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli".

## 7 BIBLIOGRAFIA

- Andreini, M., De Falco, A., Giresini, L., Sassu, M., 2014. Mechanical Characterization of Masonry Walls with Chaotic Texture: Procedures and Results of In-Situ Tests, *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*, 8:3, 376-407.
- ASTM C1196/91. Standard test method for in-situ compressive stress within solid unit masonry estimated using flat-jack measurements.
- ASTM C1197/91. Standard test method for in-situ measurement of masonry deformability properties using the flat-jack method.
- ASTM D4729. Standard test method for in-situ stress and modulus of deformation using flat-jack method.
- Binda, L., Saisi, A., Tiraboschi, C., 2001. Application of Sonic Tests to the Diagnosis of Damage and Repaired Structures", *NDT&E International* 2001, vol. 34, n. 2, pp. 123-138.
- Binda, L., Cantini, L., Saisi, A., Tiraboschi, C., 2007. Use of flat-jack and sonic tests for the qualification of historic masonry, *Tenth North American Masonry Conference 10NAMC*, St. Louis, Missouri, USA, 3rd-6th June 2007, pp. 791-803.
- Cescatti, E., Dalla Benetta, M., Modena, C., Casarin, F., 2016. Analysis and evaluations of flat jack test on a wide existing masonry buildings sample.
- Corradi, M., Borri, A., Vignoli, A., 2003. Experimental study on the determination of strength of masonry walls. *Construction and Building Materials*, Volume 17, pp. 325-337
- EC6, Eurocode EN 1996. European Union norm on construction. Design of masonry structures.
- European Standard EN 1052-1, 2007. Methods of test for masonry. Part 1 Determination of compressive strength. European Standard.
- Faella, G., Frunzio, G., Guadagnuolo, M., Donadio, A., Ferri, L., 2012. The Church of the Nativity in Bethlehem: Non-destructive tests for the structural knowledge, *Journal of Cultural Heritage*, Elsevier, ISSN: 1296-2074.
- Guadagnuolo, M., Faella, G., Donadio, A., Ferri, L., 2014. Integrated evaluation of the Church of S.Nicola di Mira: Conservation versus safety, *NDT & E International*, Elsevier, ISSN:0963-8695.
- Guadagnuolo, M., Faella, G., Carandente, F., Basile, A., 2015. Correlazione tra parametri meccanici e velocità soniche per la muratura in tufo giallo campano, *Atti del XVI Convegno Ingegneria sismica in Italia*, L'Aquila, Italy, September 13-17.
- Gregorczyk, P., Lourenço, P.B., 2000. A review on flat-jack testing. *Eng Civ* 9:39,50.
- Manning, E.C., Ramos, L.F., Fernandes, F., 2014. Tube-jack testing: regular masonry wall testing, *SAHC2014 – 9 th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions* F. Peña & M. Chávez (eds.) Mexico City, Mexico, 14–17 October.
- MIT, 2009. Circolare n.617 del 2 febbraio 2009. Istruzioni per l'Applicazione Nuove Norme Tecniche Costruzioni; 2009.
- MIT, 2019. Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al D.M. 17.01.2018, C.S.LL.PP n. 7 21.01.2019, *Gazzetta Ufficiale* n.35 11.02.2019.
- MIT, 2018. Norme Tecniche per le Costruzioni, DM 17.01.2018, *Gazzetta Ufficiale* n. 42, 20.02.2018.
- Noland, J.L., Atkinson, R.H., Schaller, M.P., 1990. A review of the flat-jack method for Nondestructive evaluation, *Proc. Nondestructive evaluation of civil structures and Materials*, Boulder, USA.
- Porco, F., Uva, G., 2007. Alcune considerazioni sull'applicazione della tecnica dei martinetti piatti su murature caotiche., *Atti della XII Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive*, Monitoraggio, Diagnostica Milano, 11-13 Ottobre.
- Radovanović, Ž., SindićGrebović, R., Dimovska, S., Serdar, N., Vatin, N., Murgul, V., 2015. Testing of the Mechanical Properties of Masonry Walls. Determination of Compressive Strength Applied *Mechanics and Materials*, 725-726, 410-418.
- Ramos, L. F., Manning, E.C., Fernandes, F., Figueiro, R., Azenha, M., Cruz, J., Sousa, C., 2013. Tube-jack testing for irregular masonry walls: Prototype development and testing, *NDT&E International* 58, 24–35.
- RILEM, LUM.D.2, 1990 In-situ stress tests on masonry based on the flat jack.
- RILEM, LUM.D.3, 1990. In-situ strength/elasticity tests on masonry based on the flat-jack. Ramos, L. F., Manning, E., Fernandes, F., Figueiro, R., Azenha, M., Cruz, J., Sousa, C., 2012. Tube jack testing for irregular masonry walls: prototype development and testing, *NDT&E*.
- Ronca, P., Tiraboschi, C., Binda, L., 1997. In-situ flat-jack tests matching new mechanical interpretations, *11th Int. Brick/Block Mas. Conf.*, Shanghai, China.
- Rossi, P.P., 1982. Analysis of mechanical characteristics of brick masonry tested by means of non-destructive in situ tests. In: *Proceedings of the 6th international brick/block masonry conference*, Rome
- Saisi, A., Gentile, C., Cantini, L., 2013. Post-earthquake assessment of a masonry tower by on-site inspection and operational modal testing, *ECCOMAS Thematic Conference- COMPDYN 2013: 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Proceedings - An IACM Special Interest Conference, 1639-1650.
- Simoès, A., Bento, R., Gago, A., Lopes, M., 2015. Mechanical Characterization of Masonry Walls With Flat-Jack Tests, *Experimental Techniques*, Society for Experimental Mechanics, 1163 -1178.
- Valluzzi, M.R., 2003. Consolidamento e recupero delle murature, *Collana Scientifica. Reficere*, a cura del Prof. C.R. Romeo, Faenza Ed.
- Vicente, R., Ferreira, T.M., Mendes da Silva, J.A.R., Varum, H., 2015. In situ flat-jack testing of traditional masonry walls: case study of the old city Center of Coimbra, Portugal, *Int. J. Archit. Herit.* 9 (7), 794–810.