



# Caratterizzazione sperimentale di una malta innovativa duttile per il miglioramento delle prestazioni sismiche di sistemi di muratura non rinforzata

Vittoria Laghi<sup>a</sup>, Michele Palermo<sup>a</sup>, Andrea Incerti<sup>b</sup>, Giada Gasparini<sup>a</sup>, Tomaso Trombetti<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna, Viale del Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italy

<sup>b</sup> CIRI Edilizia & Costruzioni, Via del Lazzaretto 15/5, 40131 Bologna, Italy

*Keywords: Muratura, Risposta sismica, Miglioramento sismico, Test sperimentali.*

## ABSTRACT

Il lavoro proposto presenta i risultati di una campagna sperimentale volta alla valutazione delle prestazioni di sistemi di muratura non rinforzata realizzati mediante l'impiego di una malta innovativa, caratterizzata da un comportamento di tipo duttile. La migliore risposta meccanica della malta innovativa comporta un significativo miglioramento nella resistenza dei pannelli murari soggetti ad azioni taglianti, quindi incrementando la loro risposta sismica. La campagna sperimentale descritta nella memoria è parte del progetto di ricerca "Zero Environmental Risks in Our buildings" (ZERO), finanziato dal bando PORFESR 2014-2020 della regione Emilia-Romagna, con l'obiettivo finale di introdurre nel mercato una nuova classe di materiali sia da costruzione che decorativi, caratterizzati da un alto profilo di compatibilità ambientale (VOC-free e ADR-free) e prestazioni superiori in termini di proprietà chimiche e meccaniche.

Uno degli obiettivi di ZERO è stato l'incremento della duttilità dei sistemi murari non rinforzati. A questo proposito, è stata condotta una intensa campagna sperimentale presso il CIRI Edilizia & Costruzioni dell'Università di Bologna. Le prove sperimentali hanno avuto lo scopo di caratterizzare sia le proprietà del materiale stesso, mediante provini di malta, che la risposta meccanica della muratura realizzata utilizzando la malta innovativa accoppiata a diverse tipologie di blocchi di laterizio. Nella presente memoria sono presentati i risultati preliminari della campagna sperimentale di caratterizzazione dei provini di malta innovativa sottoposti a flessione su tre punti e a compressione centrata. Gli stessi test sono stati condotti anche su campioni di malta tradizionale, comunemente reperibile sul mercato, ed i risultati presi come valori di riferimento. Dalla risposta sperimentale si è riscontrato come la malta innovativa presenti migliori prestazioni in termini di resistenza a trazione e valori di duttilità nettamente al di sopra dei campioni realizzati con malta attualmente presente sul mercato.

## 1 INTRODUZIONE

In Italia gran parte del patrimonio del costruito è realizzato in muratura non rinforzata o in struttura intelaiata in calcestruzzo armato e tamponamenti di muratura non rinforzata (ISTAT 2001).

Gli edifici in muratura non rinforzata tipicamente risentono dell'azione tagliante quando sottoposti a importanti azioni orizzontali generate dallo scuotimento sismico (Tomazevic 1990, Bruneau 1994). Le modalità di collasso di pannelli singoli sotto azione tagliante di piano possono

essere classificati come: (i) crisi per trazione diagonale oppure (ii) crisi per scorrimento (Anthoine et al. 1994, Mages e Calvi 1997, Salmanpour et al. 2015). I meccanismi di rottura sono principalmente influenzati dalla qualità dei componenti (malta e blocco), dal rapporto tra lunghezza e spessore, e dal livello di sforzo assiale presente (Corradi et al. 2003, Alecci et al. 2013). Al fine di predire la resistenza a taglio della muratura non rinforzata, sono state elaborate anche formulazioni semplificate, come quelle presenti nei lavori di (Vermelfoort 2004, Yi et al. 2004). La resistenza a taglio dei pannelli murari è tipicamente valutata mediante differenti tipologie

di prove sperimentali: (i) prove a taglio su ridotti campioni di muratura (“triplette”) (EN 1052-3); (ii) prove a compressione diagonale su pannelli regolari (ASTM E519-10, Calderini et al. 2010, Incerti et al. 2016); (iii) prove a taglio di pannelli murari sottoposti a carico verticale e orizzontale. Atkinson et al. (1989) hanno condotto specifiche prove a taglio al fine di valutare la resistenza dei corsi di malta e caratterizzare la modalità di rottura e il comportamento taglio-spostamento del provino. Sono stati impiegati sia blocchi antichi di argilla che blocchi di nuova realizzazione. Le prove sperimentali sono state condotte con differenti valori nominali di sforzo assiale. I valori di resistenza a taglio per blocchi antichi sono risultati dell’ordine di 0.1-0.2 MPa, mentre i blocchi di nuova realizzazione hanno registrato valori superiori (attorno a 0.8 MPa). I risultati della campagna sperimentale sono stati confrontati con altri ottenuti da studi in letteratura, che riportavano valori tra i 0.2 MPa e i 0.6 MPa. Ulteriori campagne sperimentali devote a caratterizzare la resistenza a taglio di muratura di nuova costruzione tipicamente impiegata su suolo italiano sono disponibili nel lavoro condotto da (Alecci et al. 2013). Gli studi sperimentali fanno riferimento sia ai casi di muratura convenzionale realizzata con blocchi di argilla non rettificati e connessi da giunti di malta spessi (dell’ordine di 1-1.5 cm), sia con blocchi di argilla rettificati, connessi mediante sottili giunti di malta (dell’ordine di qualche millimetro). Quest’ultimo caso è comunemente impiegato nelle costruzioni dove si richiedono superiori prestazioni di isolamento termico. Gli studi sperimentali condotti hanno indicato come la presenza di giunti sottili associati all’assenza di giunti verticali di malta abbia conseguito una significativa riduzione della resistenza tagliante, con valori dell’ordine di 0.1-0.2 MPa. I meccanismi di rottura identificati sono principalmente di tipo fragile. In presenza di giunti verticali di malta, la resistenza ad azione tagliante aumenta fino a valori intorno a 1.0 MPa.

Quando i pannelli di muratura non rinforzata sono impiegati come tamponamenti per strutture a telaio in calcestruzzo armato, si innesca una complessa interazione tra i pannelli e il telaio circostante. Infatti, dal momento che la muratura è caratterizzata da valori molto superiori di rigidità laterale rispetto alla struttura intelaiata, inizialmente sono chiamati ad assorbire gran parte dell’energia indotta dallo scuotimento sismico, mantenendo l’integrità della struttura circostante,

la quale rimane sostanzialmente scarica durante tutto l’evento sismico (Murty and Jain 2000). Tuttavia, quando i pannelli di tamponamento raggiungono il loro valore ultimo di resistenza, le ridotte capacità di deformazione e di dissipazione energetica inducono una rottura improvvisa con conseguente istantaneo trasferimento dell’azione orizzontale sul telaio in calcestruzzo armato, il quale risente significativamente di danneggiamento e in ultimo rottura (Tasligedik et al. 2011). Esempi di questo particolare comportamento sono stati riscontrati anche nelle modalità di danneggiamento post-sisma registrate durante il terremoto a L’Aquila nel 2009 e in Emilia nel 2012 (Kaplan et al. 2010, Verderame et al. 2011, Uva et al. 2012, Liel and Lynch 2012, Manfredi et al. 2014).

## 2 STRATEGIE PER LA RESISTENZA SISMICA DI SISTEMI IN MURATURA NON RINFORZATA

I tradizionali sistemi di muratura collassano tipicamente sotto azione tagliante per via della debole resistenza dell’interfaccia blocco-malta, oltre a un comportamento tipicamente fragile (Turnsek and Sheppard 1980, Abrams 1992). I principali meccanismi di rottura delle strutture in muratura sottoposte ad azione sismica, con riferimento a norme tecniche nazionali ed internazionali (FEMA 273, Eurocodes 6, NTC 2018) sono le seguenti: (i) crisi per “rocking”, dovuta alla fessurazione dei giunti di malta, mentre l’azione tagliante è assorbita dalla muratura compressa; (ii) crisi per fessurazione a taglio, dove il picco di resistenza è governato dalla formazione di crepe diagonali, solitamente in corrispondenza dei giunti orizzontali e verticali (a seconda della resistenza di ciascun componente); (iii) crisi per scorrimento, dato dalla formazione di fessure orizzontali a trazione lungo i giunti di malta. L’innesco di un determinato meccanismo di rottura dipende dalle proprietà meccaniche dei due componenti: l’unità muraria e il giunto di malta (Magenes and Calvi 1992).

Al fine di incrementare la resistenza sismica del sistema murario, si possono seguire due strategie di progetto: (i) aumentare la resistenza complessiva del sistema incrementando la resistenza dei singoli componenti; (ii) aumentare la duttilità complessiva incrementando la duttilità del giunto di malta (Francis et al. 1971). Facendo

riferimento al grafico qualitativo carico-deformazione come illustrato nella Figura 1, tipicamente il componente blocco presenta valori superiori di resistenza, ma comportamento fragile, mentre al contrario il componente malta risulta avere valori di resistenza inferiori, ma comportamento più tendenzialmente duttile. Pertanto, al fine di incrementare la risposta complessiva del sistema murario sottoposto ad azione sismica, è possibile agire secondo due strade: (i) aumentando la resistenza del blocco (Figura 1a); (ii) aumentando la duttilità dei giunti di malta (Figura 1b).

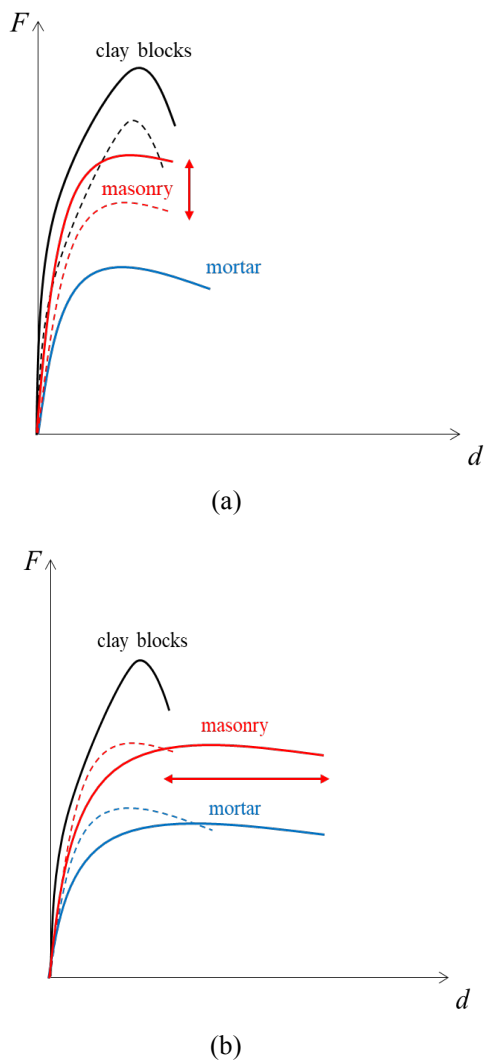


Figura 1: Rappresentazione qualitativa della risposta carico-deformazione di un sistema murario: (a) aumentando la resistenza dei blocchi di argilla; (b) aumentando la duttilità dei giunti di malta.

### 3 IL PROGETTO DI RICERCA “ZERO”

Il settore edile rappresenta una delle maggiori risorse dell'intera Industria italiana. Nel 2008, il 10.9% del Prodotto Interno Lordo italiano (con

circa 2 milioni di impiegati) è risultato dall'edilizia. Tuttavia, a seguito della crisi economica che ha gravato sul territorio a partire dal 2009, il settore edile ha registrato un severo calo dell'occupazione. Al fine di agevolare l'Industria italiana a uscire dalla crisi, il Ministero dello Sviluppo Economico ha promosso un programma di ricerca (Industria 2015) per finanziare proposte di nuove tecnologie ed innovazione nell'Industria italiana. Oltre a questo, le istituzioni regionali hanno stabilito programmi di ricerca finanziati a livello regionale (PORFESR 2014-2020) focalizzati sulla promozione della ricerca, sviluppo e promozione delle industrie locali, mediante la collaborazione di istituzioni di ricerca e laboratori.

All'interno del programma Industria 2015, il progetto ITALICI ha sviluppato un innovativo sistema di tamponamento murario con una migliorata efficienza energetica e strutturale. Il consorzio prevedeva l'affiancamento di partner accademici, aziende e istituzioni di ricerca nei settori dei materiali ceramici, nanomateriali, prodotti decorativi e adesivi. In particolare, uno degli obiettivi specifici del progetto era lo sviluppo di una malta strutturale innovativa dalle alte prestazioni in termini di duttilità. Il risultato di questa collaborazione ha portato uno dei partner del progetto (Litokol SpA) a brevettare nel 2016 una nuova malta strutturale, nota con il nome commerciale di “Maltablock” (Brevetto n° BO2014A000649).

A partire dai risultati del progetto ITALICI, è stato finanziato il progetto di ricerca “Zero Environmental Risks in Our buildings” (ZERO) all'interno del bando PORFESR 2014-2020 della regione Emilia-Romagna.

#### 3.1 Obiettivi principali del progetto

Il progetto di Ricerca ZERO, coordinato da Litokol SpA (<https://www.litokol.it/it/>), ha l'obiettivo di sviluppare una nuova generazione di materiali quali resine, additivi e catalizzatori, oltre che di prodotti sia decorativi che di finitura per l'edilizia, come colle, primer per pavimenti e malte strutturali, caratterizzati da superiori prestazioni sia chimiche che meccaniche.

In particolare, tra i diversi prodotti sviluppati all'interno del progetto, è stata realizzata da Litokol SpA anche una versione VOC-free della malta duttile Maltablock. Al fine di testare le prestazioni della nuova formulazione della malta

Maltablock impiegata per realizzare pannelli di muratura non rinforzata, è stata condotta un'intensa campagna sperimentale presso il laboratorio CIRI Edilizia & Costruzioni dell'Università di Bologna tra il 2017 e il 2018. Il presente lavoro illustra i primi risultati dell'attività sperimentale svolta all'interno del progetto di ricerca ZERO e volta allo sviluppo del sistema murario innovativo duttile.

### 3.2 Linea di ricerca strutturale

L'obiettivo iniziale della linea di ricerca mirata a caratterizzare il pannello murario innovativo era quello di sviluppare un sistema murario con giunti di malta sottili (FASE 1). Infatti, i notevoli vantaggi in termini di efficienza energetica di tale soluzione hanno portato a una vasta applicazione sul suolo italiano negli ultimi decenni. Tuttavia, a seguito delle scosse sismiche verificatesi recentemente sul territorio nazionale (nel 2012 in Emilia e la sequenza sismica del 2016-2017 nel centro Italia) ha mostrato un significativo danneggiamento dei sistemi murari non rinforzati realizzati con giunti sottili, dovuto a rottura fragile dei giunti di malta (Liberatore et al. 2011, Verderame et al. 2013, Manfredi et al. 2014). Pertanto, nell'ultima versione nelle Norme Tecniche delle Costruzioni (NTC2018) sono state introdotte severe limitazioni nell'uso di pannelli di muratura non rinforzata rettificata a giunti sottili, che ha ristretto il suo campo di applicazione sostanzialmente alle sole zone del territorio italiano a bassa sismicità.

Alla luce di queste recenti modifiche, è stata effettuata nel 2018 una seconda campagna sperimentale (FASE 2) su pannelli murari realizzati con giunti standard di malta Maltablock (spessore di 5-10 mm).

La campagna sperimentale è stata elaborata nelle seguenti attività: (i) caratterizzazione della nuova formulazione della malta Maltablock, per verificare il comportamento duttile e la resistenza a trazione e compressione; (ii) caratterizzazione del sistema murario non rinforzato innovativo, realizzato con blocchi di argilla di diverse tipologie (di tipo strutturale per pareti portanti o non strutturale per tamponamenti ad alte prestazioni termiche) e giunti di malta Maltablock. Per la prima parte delle attività, sono state effettuate prove a flessione su tre punti e a compressione centrata di provini di malta. Per la seconda parte, invece, sono state effettuate prove a compressione diagonale su muretti di 1 m<sup>2</sup>, oltre a

prove a taglio diretto su "triple" e prove a compressione centrata su muretti.

I risultati della linea strutturale del progetto di ricerca ZERO, conclusosi a Luglio 2018, saranno presentati in maniera esaustiva in un articolo scientifico per una rivista di settore. Per ragioni di sintesi, nella presente memoria sono presentati i risultati della prima parte delle attività, devolute alla caratterizzazione della malta innovativa Maltablock nelle due formulazioni (per giunti sottili e per giunti standard).

## 4 LA MALTA DUTTILE "MALTABLOCK"

Maltablock è una malta strutturale caratterizzata da prestazioni meccaniche superiori in termini di resistenza, duttilità, coesione e resistenza a taglio quando accoppiata a blocchi di argilla. Grazie alle sue proprietà chimiche e meccaniche, Maltablock può essere impiegata per realizzare pannelli di muratura non rinforzata sia come muri portanti che come sistemi di tamponamento in strutture intelaiate. Al fine di sviluppare una formulazione di Maltablock VOC-free, è stata condotta una intensa campagna sperimentale presso i laboratori Litokol SpA dal 2016 al 2018. Le prestazioni della nuova formulazione di malta duttile sono poi state verificate presso il laboratorio del CIRI Edilizia & Costruzioni dell'Università di Bologna.

### 4.1 Design of Experiment presso il laboratorio Litokol

La nuova formulazione della malta duttile Maltablock in versione VOC-free è stata sviluppata usando la tecnica del "Design of Experiment (DoE)", che permette di valutare sistematicamente ed efficientemente gli effetti e le interazioni mutue di diversi fattori agenti nella prestazione di uno specifico processo (Montgomery 2017).

Per il caso in esame, le variabili prese in considerazione nel DOE sono le quantità nel mix della malta di: cellulosa, metacaolino, fibre, cemento e polimeri. Si sono valutate le prestazioni in termini dei seguenti parametri meccanici: resistenza a compressione, modulo elastico, resistenza a trazione, resistenza a taglio e duttilità. In particolare, è stato fissato un valore minimo di resistenza a compressione pari a 5 MPa, mentre la massimizzazione della duttilità è stata presa come

obiettivo di riferimento. A questo proposito, in aggiunta alle prove standard di flessione e compressione (UNI EN 1015-11, 2007), è stata eseguita anche una prova aggiuntiva di flessione su tre punti su sottili strati di malta aventi spessore nominale di 3 mm, lunghezza di 200 mm e larghezza di 200 mm.

Il valore di duttilità è stato ottenuto per ciascuna prova sui provini sottili di malta calcolando la risposta equivalente elasto-plastica. Da questa, la duttilità è stata valutata come rapporto tra la deformazione ultima equivalente e la deformazione equivalente di snervamento,  $\mu = d_{u,eq} / d_{y,eq}$ . Il punto di snervamento del sistema elasto-plastico equivalente è ottenuto secondo il criterio energetico di uguaglianza delle aree sottese dalle due curve (quella reale e quella equivalente).

## 5 LA CAMPAGNA SPERIMENTALE PRESSO IL LABORATORIO CIRI

### 5.1 Set-up di prova

La prima parte della campagna sperimentale condotta presso CIRI Edilizia & Costruzioni dell'Università di Bologna è stata orientata alla verifica delle prestazioni migliorate della nuova formulazione Maltablock VOC-free.

A tal fine, sono state effettuate prove di caratterizzazione standard a flessione su tre punti e a compressione centrata (EN 1015-11) su provini prismatici aventi dimensioni nominali  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ . Le prove sono state realizzate impiegando una macchina servoidraulica capace di applicare un carico verticale sul provino, equipaggiata con una cella di carico da 100 kN (precisione Classe 0.5) e un sensore di spostamento lineare. Le prove sono state condotte su un totale di 30 provini prismatici, 21 dei quali realizzati con la formulazione di Maltablock per giunti sottili (FASE 1), e i rimanenti 9 realizzati con la formulazione per giunti standard (FASE 2). Analogamente, per ciascuna formulazione, sono state testate anche due tipologie di malta tradizionale comunemente reperibile in commercio, una da impiegare per la realizzazione di giunti sottili e una per giunti standard. I risultati delle prove su malte tradizionali sono stati presi come valori di riferimento per le prove su Maltablock.

I campioni prismatici sono stati prima testati a flessione su tre punti (Sezione 5.2), poi le due metà sono state successivamente testate a compressione centrata (Sezione 5.3).

### 5.2 Prove a flessione su tre punti

Il comportamento della malta a trazione è stato ricavato dalle prove a flessione su tre punti realizzate secondo la procedura indicata nella norma EN 1015-11. I risultati in termini di resistenza a trazione media sono presentati in Tabella 1. Quattro tipologie di campioni sono stati testati: la formulazione Maltablock per giunti sottili (codice "FI-M-t"), il benchmark di riferimento per giunti sottili (codice "FI-B-t"), la formulazione Maltablock per giunti standard (codice "FI-M-T") e il relativo benchmark di riferimento per giunti standard (codice "FI-B-T").

Dalla sintesi dei risultati in termini di resistenza a trazione e deformazione ultima (Figura 2) si può notare come, nonostante il comportamento a trazione della malta sia sostanzialmente fragile, i campioni Maltablock evidenziano risultati superiori in termini di deformazione rispetto ai provini realizzati con malta tradizionale (presi come "benchmark").

I provini di Maltablock per giunti sottili hanno registrato valori di resistenza a trazione intorno ai 2.3-3.5 MPa, mentre la formulazione per giunti spessi ha raggiunto valori oltre i 5-6 MPa. Tali valori sono superiori rispetto a quelli mostrati dai campioni di benchmark, soprattutto per la formulazione per giunti standard.

Tabella 1: Sintesi dei risultati della prova a flessione su tre punti in termini di resistenza a flessione media.

Provino	Tipologia	$f_{t,m}$ [MPa]	COV $f_{t,m}$
FI-M-t	Innovativa Sottile	2.85	0.16
FI-B-t	Benchmark Sottile	2.16	0.23
FI-M-T	Innovativa Spessa	5.35	0.07
FI-B-T	Benchmark Spessa	1.61	0.07

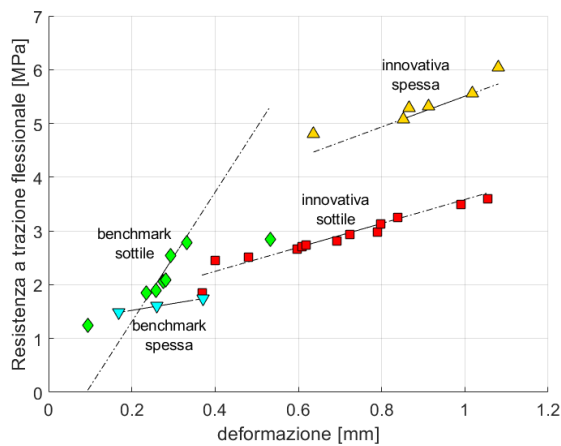


Figura 2: Sintesi dei risultati in termini di resistenza a trazione – deformazione.

### 5.3 Prove a compressione centrata

Il comportamento della malta sottoposta a carico verticale è stato ricavato dai risultati delle prove a compressione centrata effettuate sulle due metà dei provini prismatici precedentemente testati a flessione, secondo la procedura descritta nella EN 1015-11.

In Tabella 2 sono presentati i risultati in termini di resistenza media a compressione delle quattro tipologie di provini testati (analogamente alle prove a flessione su tre punti precedentemente descritte). In Tabella 3 sono presentati i risultati in termini di duttilità, calcolata secondo la procedura descritta nella Sezione 4.1. Gli alti valori di deformazione ultima sono visibili anche nella Figura 3 di riepilogo dei valori di resistenza assiale e deformazione ultima di ciascun campione testato. La capacità deformativa della malta Maltablock risulta infatti fino a 5-6 volte maggiore rispetto a quella della malta tradizionale, comunemente reperibile sul mercato odierno. Inoltre, i provini di Maltablock nella formulazione per giunti standard hanno registrato valori di resistenza a compressione oltre i 10 MPa, mentre quelli realizzati con la formulazione per giunti sottili sono nell'ordine dei 4-6 MPa.

Tabella 2: Sintesi dei risultati della prova a compressione centrata in termini di resistenza a compressione media.

Provino	Tipologia	$f_{fc,m}$ [MPa]	COV $f_{fc,m}$
Fc-M-t	Innovativa Sottile	4.89	0.10
Fc-B-t	Benchmark Sottile	7.60	0.29
Fc-M-T	Innovativa Spessa	10.18	0.10
Fc-B-T	Benchmark Spessa	4.65	0.04

Tabella 3: Sintesi dei risultati della prova a compressione centrata in termini di duttilità media.

Specimen	Type	$\mu_c$ [-]	COV $\mu_c$
Fc-M-t	Innovative Thin	3.24	0.36
Fc-B-t	Benchmark Thin	/	/
Fc-M-T	Innovative Thick	5.32	0.07
Fc-B-T	Benchmark Thick	/	/

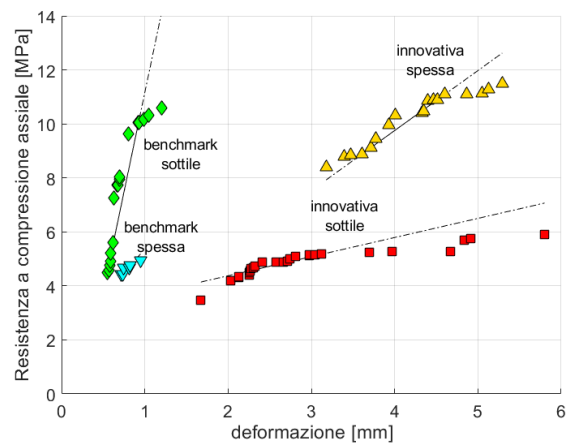


Figura 3: Sintesi dei risultati in termini di resistenza a compressione – deformazione.

## 6 CONCLUSIONI

Nella memoria sono presentati i risultati ottenuti dalla campagna sperimentale condotta tra il 2017 e il 2018 presso CIRI Edilizia & Costruzioni dell'Università di Bologna per la caratterizzazione di un innovativo sistema murario non rinforzato realizzato con una malta dalle prestazioni duttili migliorate.

L'obiettivo principale del progetto di ricerca ZERO, finanziato dal bando della Regione Emilia-Romagna PORFESR 2014-2020, prevede la formulazione di diversi materiali e prodotti per l'edilizia, dalle caratteristiche migliorate in termini di impatto ambientale e risposta strutturale. In particolare, la linea di ricerca strutturale ha l'obiettivo di caratterizzare una nuova formulazione VOC-free della malta Maltablock realizzata dalla ditta Litokol SpA dalle migliorate prestazioni in termini di duttilità, sia come materiale singolo che in accoppiamento a blocchi

di argilla per la realizzazione di sistemi murari non rinforzati.

La prima parte della campagna sperimentale è stata volta alla caratterizzazione della resistenza a trazione e compressione di tale nuova formulazione, con riferimento alle prestazioni di malte comunemente reperibili sul mercato e considerate come benchmark. Le prove a flessione su tre punti e a compressione centrata hanno dato risultati di maggiore resistenza della malta innovativa rispetto al benchmark, oltre ad elevati valori di deformazione ultima, indice di un buon comportamento duttile.

Accoppiata a blocchi di argilla di diverse tipologie, strutturali per realizzare pareti portanti o non strutturali per tamponamenti ad alte prestazioni termiche, la malta Maltablock aumenta la resistenza a taglio del sistema murario, come confermato dalle prove a compressione diagonale e a taglio iniziale effettuate su provini di muratura non rinforzata.

La presentazione completa dell'attività sperimentale del progetto ZERO sarà oggetto di una prossima pubblicazione scientifica su rivista di rilievo.

## RIFERIMENTI

- Abrams, D.P., 1992. Strength and behavior of unreinforced masonry elements, *10<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain.
- Alecci, V., Fagone, M., Rotunno, T., De Stefano, M. 2013. Shear strength of brick masonry walls assembled with different types of mortar. *Construction and Building Materials*, **40**, 1038-1045.
- Anthoine, A., Magenes, G., Magonette, G. 1994. Shear compression testing and analysis of brick masonry walls. *10<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*, Vienna, Austria.
- ASTM E519-2010. 2010. Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages. *American society for testing material*.
- Atkinson, R.H., Amadei, B.P., Saeb, S., Sture, S. 1989. Response of masonry bed joints in direct shear. *Journal of Structural Engineering*, **115**(9), 2276-2296.
- Bruneau, M. 1994. State-of-the-art report on seismic performance of unreinforced masonry buildings. *Journal of Structural Engineering*, **120**(1), 230-251.
- 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 Materials*, **24**, 677-685.
- Corradi, M., Borri, A., Vignoli, A. 2003. Experimental study on the determination of strength of masonry walls. *Construction and Building Materials*, **17**, 325-337.
- EC6. Eurocode EN 1996. Design of masonry structures. *European union norm on construction*.
- FEMA 273. 1997. NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings.
- Francis, A., Horman, C., Jerrems, L. 1971. The effect of joint thickness and other factors on the compressive strength of brickwork. *2<sup>nd</sup> International Brick/Block Masonry Conference*, Stoke-on-Trent, UK.
- Kaplan, H., Bilgin, H., Yilmaz, S., Binici, H., Oztas, A. 2010. Structural damages of L'Aquila (Italy) earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **10**(3), 499-507.
- Incerti, A., Rinaldini, V., Mazzotti, C. 2016. The evaluation of masonry shear strength by means of different experimental techniques: a comparison between full-scale and laboratory tests. *16<sup>th</sup> International Brick and Block Masonry Conference*.
- Liel, A.B., Lynch, K.P. 2012. Vulnerability of reinforced-concrete-frame buildings and their occupants in the 2009 L'Aquila, Italy, earthquake. *Natural hazards review*, **13**(1), 11-23.
- Magenes, G., Calvi, G.M. 1992. Cyclic behavior of brick masonry walls. *10<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Madrid, Spain.
- Magenes, G., Calvi, G.M. 1997. In-plane seismic response of brick masonry walls. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **26**(11), 1091-1112.
- Manfredi, G., Prota, A., Verderame, G.M., De Luca, F., Ricci, P. 2014. 2012 Emilia earthquake, Italy: reinforced concrete building response. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **12**: 2275-2298.
- Montgomery, D.C. 2017. Design and analysis of experiments. *John Wiley & Sons*.
- Murty, C.V.R., Jain, S.K. 2000. Beneficial influence of masonry infill walls on seismic performance of RC frame buildings. *12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*.
- Norme Tecniche per le Costruzioni. Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni. N.8 decreto del 17 gennaio 2018.
- Salmanpour, A.H., Mojsilovic, N., Schwartz, J. 2015. Displacement capacity of contemporary unreinforced masonry walls: an experimental study. *Engineering Structures*, **89**, 1-16.
- Tasligedik, A.S., Pampanin, S., Palermo, A. 2011. Damage mitigation strategies of "non-structural" infill walls: concept and numerical-experimental validation program. *9<sup>th</sup> Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand.
- Tomazevic, M. 1990. Masonry structures in seismic areas – a state-of-art report. *9<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering*, Moscow, Russia.
- Turnsek, V., Sheppard, P. 1980. The shear and flexural resistance of masonry walls. *International Research Conference on Earthquake Engineering*, Skopje, Macedonia.
- UNI EN 1052-3. 2007. Metodi di prova per muratura – parte 3: determinazione della resistenza iniziale a taglio. *Ente Italiano di Normazione*.
- UNI EN 1015-11. 2007. Metodi di prova per malte per opera murarie – parte 11: determinazione della resistenza a flessione e compressione della malta indurita. *Ente Italiano di Normazione*.
- Uva, G., Porco, F., Fiore, A. 2012. Appraisal of masonry infill walls effect in the seismic response of RC framed buildings: a case study. *Engineering Structures*, **34**, 514-526.
- Verderame, G.M., De Luca, F., Ricci, P., Manfredi, G. 2010. Preliminary analysis of a soft-storey mechanism after the

- 2009 L'Aquila earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **40**(8), 925-944.
- Vermelfoort, A.T. 2004. Shear, bond and 2D compressive properties of thin bed mortar masonry. *13<sup>th</sup> International Brick & Block Masonry Conference*.
- Web source: <https://www.litokol.it/it/>
- Yi, W.-H., Oh, S.-H., Lee, J.-H. 2004. Shear capacity assessment of unreinforced masonry wall. *13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada.