PROGETTO CONSTRAIN (Interreg Italia–Slovenia): CONDIVISIONE E APPLICAZIONE DI STRATEGIE INNOVATIVE PER LA PROTEZIONE SISMICA DI EDIFICI IN MURATURA

AUTORI: Natalino Gattesco[1], Emanuele Rizzi[1], Alessia Bez[1], Matija Gams[2], Allen Dudine[3]
[1] Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Trieste, via A. Valerio, 6/1, 34127 - Trieste
[2] Facoltà di Ingegneria Civile e Geotecnica, Università di Lubiana, Jamova Cesta 2, 1000 Ljubljana, Slovenia
[3] Fibre Net S.p.a., via Jacopo Stellini, 3 – Z.I.U., 33050 Pavia di Udine (Ud)

Parole chiave: Edifici esistenti; Materiali compositi; Costruzioni in muratura; Vulnerabilità sismica; Rinforzo strutturale

SINTESI DEL PROGETTO

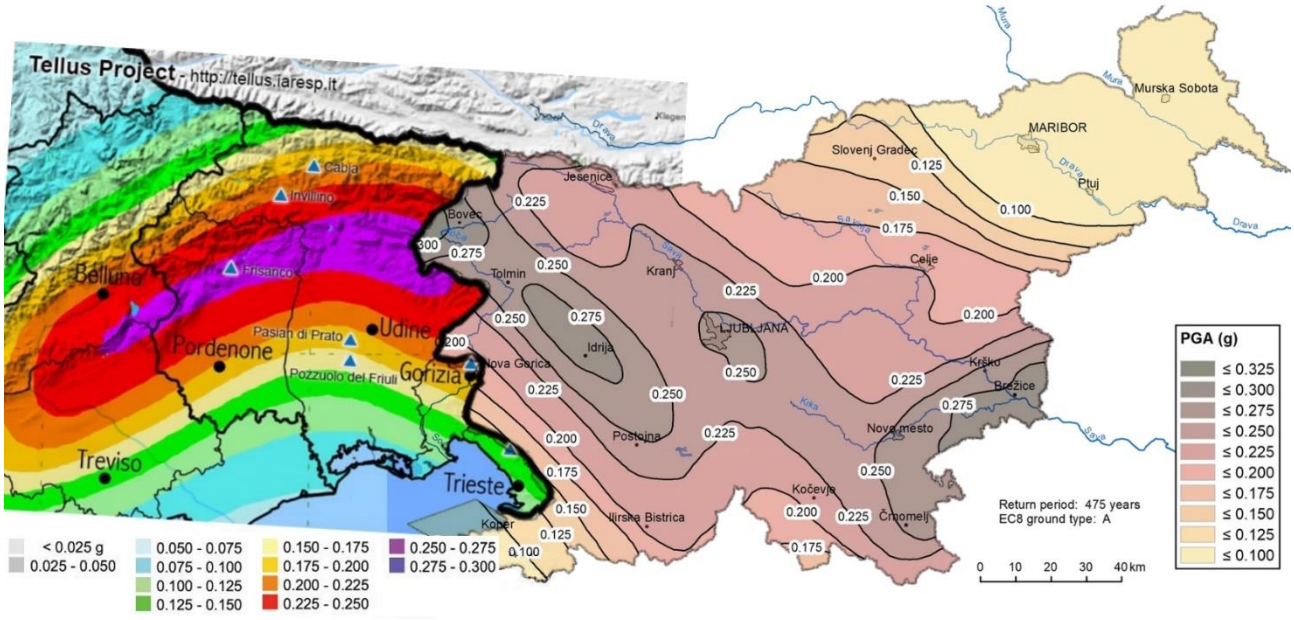
Il progetto CONSTRAIN ha sviluppato nuovi metodi di consolidamento per edifici esistenti in muratura che possono essere applicati intervenendo solo dall'esterno degli edifici stessi. La tecnica di rinforzo proposta si basa sull'applicazione da un solo lato della muratura di malte rinforzate con materiali compositi (sistema CRM – Composite Reinforced Mortar) e ancoraggi innovativi (diatoni artificiali). Per verificare l'efficacia della tecnica proposta, è stata condotta un'ampia campagna sperimentale, che ha riguardato prove cicliche, su elementi murari così rinforzati, di taglio-compressione (maschi murari), di taglio flessione (fasce di piano) e di flessione fuori piano (pareti). Nelle prove sono stati considerati tre tipi di muratura: in pietrame a due paramenti e in mattoni a singolo e a doppio paramento.
Infine, è stata eseguita un prova su un edificio in scala reale, di due piani fuori terra in muratura di pietra a doppio paramento per verificare l'efficacia della tecnica in condizioni reali. I risultati delle prove evidenziano chiaramente che il rafforzamento proposto consente di migliorare notevolmente le prestazioni sismiche. Con i risultati sperimentali sono stati quindi calibrati dei modelli numerici; eseguendo infine simulazioni numeriche sul comportamento di un significativo edificio in muratura, per evidenziare il livello di prestazioni sismiche che si raggiungerebbero con il rinforzo applicato solo dal lato esterno delle murature perimetrali o su entrambi i lati di tutte le murature portanti.

MOTIVAZIONE DELLO STUDIO

I numerosi eventi sismici che si sono verificati negli ultimi decenni hanno comportato per la collettività enormi costi sociali, in termini di vittime e di costi economici; negli ultimi 50 anni in Italia e Slovenia si valutano circa 5000 vittime, centinaia di migliaia di sfollati e costi per emergenza e ricostruzione di oltre 200 miliardi di euro.
Il progetto CONSTRAIN, finanziato dal programma di cooperazione Interreg Italia-Slovenia 2014-2020, comprende cinque province italiane (Trieste, Udine, Pordenone, Gorizia, Venezia) e cinque regioni statistiche slovene (Primorsko-notranjska, Osrednjeslovenska, Gorenjska, Obalno-kraška, Goriška). Quest'area è particolarmente suscettibile agli eventi sismici, in quanto risulta diffusamente interessata da sismicità moderata ed elevata, per la presenza di numerose faglie attive, e per il fatto che gran parte del patrimonio edilizio è costituito da edifici in muratura (pietra naturale, laterizi). Inoltre, gli edifici sono stati costruiti per la maggior parte senza criteri antisismici (Figure 1 e 2).
In queste zone, quindi, assume un notevole rilievo la protezione sismica degli edifici, per salvaguardare la sicurezza delle persone, delle costruzioni e dei beni contenuti nelle stesse. Il progetto CONSTRAIN è inquadrato in particolare sugli edifici esistenti in muratura, maggiormente vulnerabili all'eccitazione sismica.

(a) (b) (c)

Figura 1 *Friuli, 1976 – Venzone (a); Emilia, 2012 – Duomo di Mirandola (b); Posočje, 1998 – Bovec (c).*



(b)

Figura 2 *Mappa di pericolosità sismica del FVG (INGV) e della Slovenia (Slovenia Seismology Office).*

CRITICITÀ DEGLI EDIFICI IN MURATURA

Lo studio dei danni successivo agli eventi sismici ha dimostrato che ci sono diverse carenze tipiche degli edifici in muratura:

- collegamento inadeguato tra elementi strutturali;
- disposizione inadeguata degli elementi strutturali (in pianta e in elevazione);
- resistenza inadeguata della muratura;
- problemi legati alla fondazione e al suolo.

Gli edifici con connessioni inadeguate tra gli elementi strutturali tendono a scomporsi in singoli elementi in seguito all'eccitazione sismica (Figura 3). Diversamente, se le connessioni tra gli elementi sono adeguate, tutte le pareti contribuiscono assieme alla resistenza, garantendo un comportamento scatolare. Inoltre, l'inadeguata resistenza della muratura comporta rotture dei vari elementi per disgregazione (pietre tondeggianti), separazione degli strati (murature a più paramenti), fessurazione diagonale, scorrimento o pressoflessione (Figura 4).

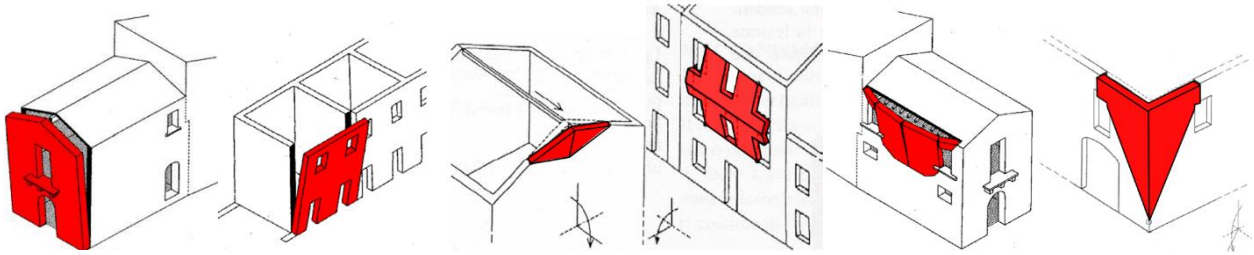


Figura 3 *Modi di collasso muratura: ribaltamento della parete di testa, di quella longitudinale, del timpano, flessione fuori piano orizzontale, verticale, ribaltamento del cantonale (da sinistra a destra).*

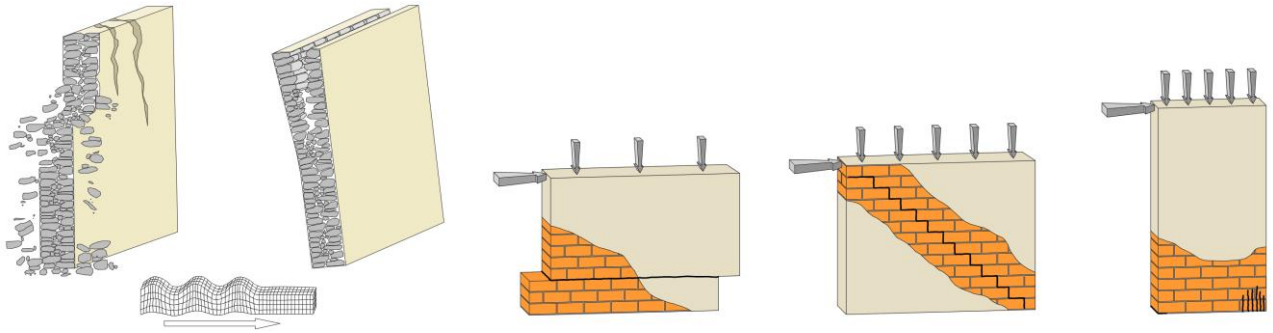


Figura 4 *Modi di collasso della muratura: disgregazione, sfogliamento (separazione paramenti), fessurazione diagonale, scorrimento e pressoflessione (da sinistra a destra).*

OBIETTIVI DEL PROGETTO

Il progetto è basato sulla sinergia di competenze nel campo del settore produttivo, esecutivo e della ricerca, per promuovere l'innovazione nell'ambito degli interventi di consolidamento strutturale e diffondere le conoscenze ed esperienze acquisite, per aumentare il know-how e la competitività degli operatori nel settore dell'edilizia.
La maggior parte delle tecniche proposte in passato per l'adeguamento sismico degli edifici in muratura risultano generalmente invasive, prevedendo lo sgombero dell'edificio durante l'intervento di consolidamento. In questo senso il progetto ha sviluppato una tecnica d'intervento ad elevata efficacia e a basso impatto sui residenti e sulle attività che hanno luogo negli edifici, prevedendo di intervenire dall'esterno con un intonaco armato con rete in materiale composito adeguatamente connessi, in caso di murature a più paramenti, con diatoni artificiali opportunamente ammorsati al rinforzo, per evitare la separazione dei paramenti/disgregazione della parete (Figura 5).

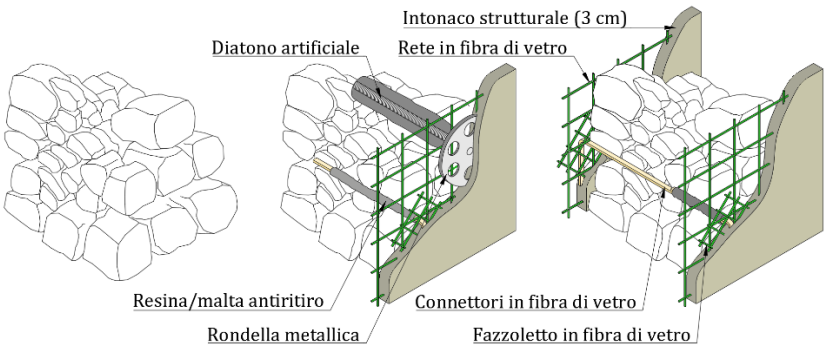


Figura 5 *Muratura non rinforzata; rinforzata su un solo lato; rinforzata su entrambi i lati (da sinistra a destra).*

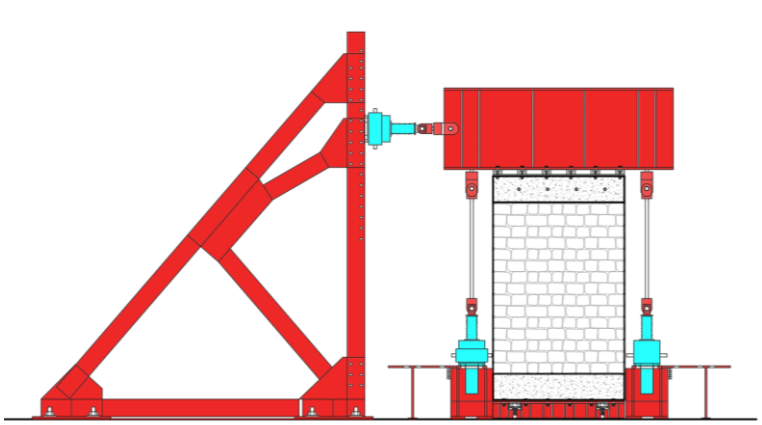
PROVE SPERIMENTALI

Vista la mancanza di evidenze sperimentali riguardanti la tecnica proposta, è stata eseguita un'ampia campagna sperimentale per comprenderne l'efficacia (Gattesco e Boem, 2017, Gattesco et al., 2022). Il comportamento dell'intonaco armato è stato studiato in un precedente studio di *Gattesco e Boem (2017)* mentre in questo studio vengono curati i dettagli costruttivi per un'applicazione efficace della tecnica dell'intonaco armato (CRM) da un solo lato.
La campagna comprende prove su singoli elementi murari in scala reale, sollecitati sia nel piano che fuori dal piano e una prova ciclica quasi-statica su un edificio in muratura di pietra di due piani. Tutte le prove eseguite sono state di tipo ciclico quasi-statico, per consentire di evidenziare anche la capacità di dissipare energia ad ogni ciclo. Oltre alle misure dirette dei vari spostamenti relativi, è stato utilizzato un sistema di lettura ottica degli spostamenti sulla superficie della parete, che ha consentito di rilevare la formazione ed estensione delle fessure nella muratura.

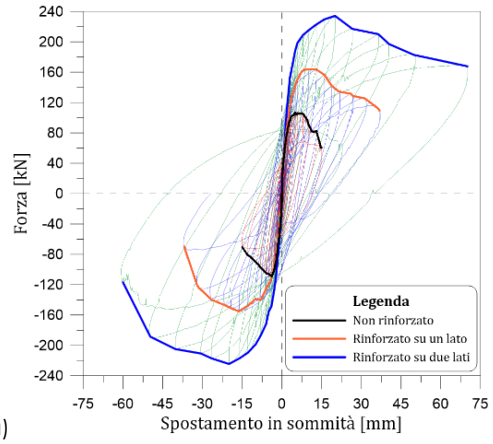
Prove di taglio-compressione su maschi murari

Le prove di taglio-compressione simulano lo stato di sollecitazione di un maschio murario (Figura 6a). I risultati

diagrammati in Figura 6b riguardano campioni in pietra a doppio paramento in configurazione non rinforzata (curva nera), rinforzata da un solo lato (curva arancio) e rinforzata da entrambi i lati (curva blu); evidenziano chiaramente la maggiore resistenza (60%-120%) e capacità di spostamento (150%-400%) delle murature rinforzate, rispettivamente per rinforzo da un la to e da entrambi i lati.



(a)



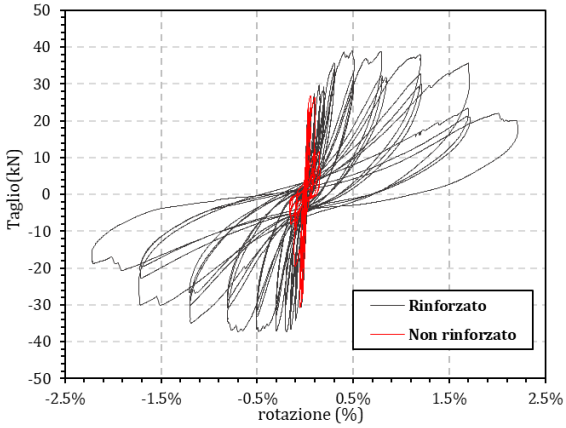
(b)

Figura 6 *Prova di taglio-compressione (a); Confronto tra campione non rinforzato e campioni rinforzati (b), per una muratura in pietra a doppio paramento.*

Prove di taglio-flessione sulle traverse sopra finestra / fasce di piano

Le prove di taglio-flessione simulano lo stato di sollecitazione nelle traverse soprafinestra di una parete di muratura con aperture (Figura 7a). I risultati diagrammati in Figura 7b riguardano campioni di mattoni pieni a due teste in configurazione non rinforzata (curva rossa) e rinforzata da un solo lato (curva nera). Si evidenzia un significativo incremento di resistenza (maggiore al 30%) e una sostanziale maggiorazione della capacità in termini di spostamento (quasi decuplicata) nella muratura rinforzata.

(a)



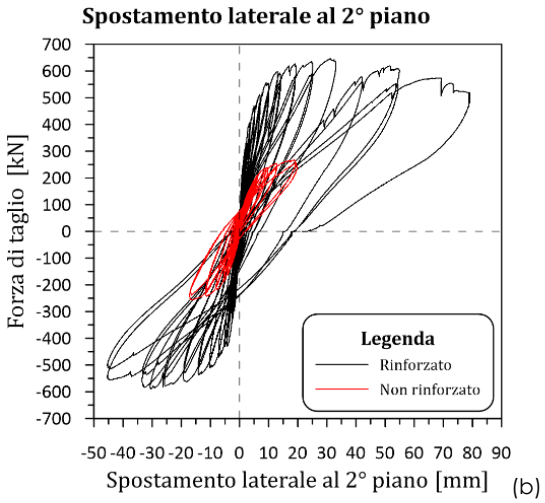
(b)

Figura 7 *Foto prova di taglio-flessione su traversa soprafinestra (a); Confronto tra campione non rinforzato e campione rinforzato in (b), per una muratura in mattoni pieni a due teste a singolo paramento.*

Prove sull'edificio pilota

Le prove sull'edificio pilota di Figura 8a hanno mostrato un significativo incremento di prestazioni fra il caso non rinforzato e il caso rinforzato. La resistenza è aumentata di più del 100% e la capacità di spostamento è quasi quadruplicata; anche la capacità dissipativa al ciclo risulta notevolmente superiore nell'edificio rinforzato, come chiaramente evidenziato dal diagramma di Figura 8b.

(a)

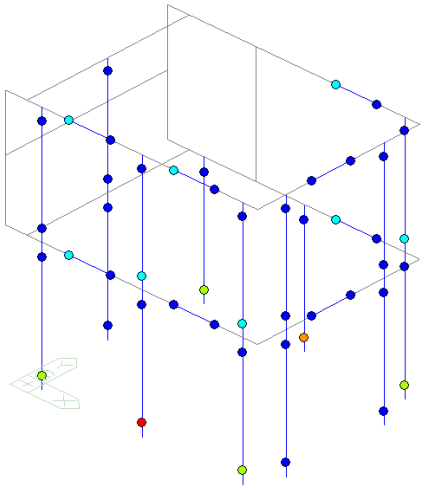


(b)

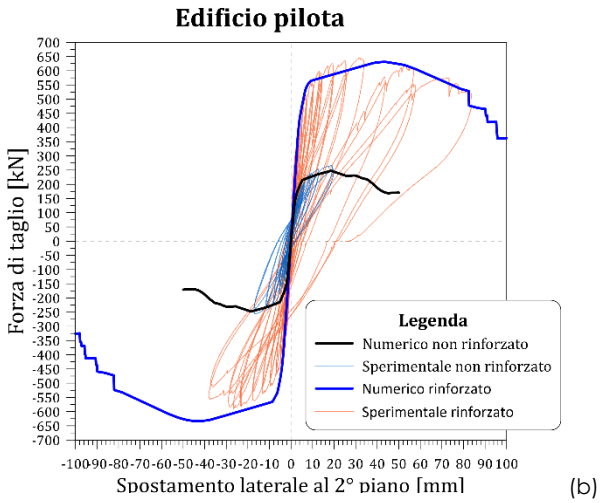
Figura 8 *Edificio pilota sottoposto a prova sperimentale: vista (a) e diagramma carico-spostamento in sommità (b).*

SIMULAZIONI NUMERICHE

I risultati delle prove sperimentali, eseguite sui singoli elementi strutturali, hanno permesso lo sviluppo di correlazioni analitiche che sono state utilizzate per simulate il comportamento dell'edificio pilota attraverso una modellazione a telaio equivalente (Figura 9a). Tali correlazioni consentono di stimare la resistenza a pressoflessione/flessione delle sezioni dei maschi/fasce, considerando la rete come elemento di rinforzo a trazione della muratura analogamente a quanto avviene nel calcestruzzo armato (*Gattesco, Boem, 2021, CNR-DT 215/2018*). La resistenza a taglio è stata valutata utilizzando una tensione tangenziale equivalente che tiene conto della presenza dell'intonaco armato. Nella figura seguente si osservano i confronti tra i diagrammi delle prestazioni (curve di capacità) dei modelli numerici con le curve sperimentali; è evidente una buona corrispondenza numerico-sperimentale del comportamento globale dell'edificio (Figura 9b).



(a)



(b)

Figura 9 *Simulazioni numeriche dell'edificio pilota: stato delle cerniere plastiche a collasso nell'edificio rinforzato (a) e confronto tra i diagrammi carico-spostamento in sommità dei modelli numerici e le prove sperimentali (b).*

APPLICAZIONE DEI RISULTATI DELLO STUDIO

Le correlazioni analitiche e le simulazioni numeriche sviluppate per prevedere il comportamento degli elementi rinforzati, hanno permesso di estendere lo studio a casi di edifici più articolati, evidenziando l'efficacia di questo tipo di intervento in zone a sismicità medio-alta. Nella figura 10a è illustrato il modello numerico che simula l'edificio "Grande Albergo Terme di Comano" e nella Figura 10b sono riportate le curve di capacità ottenute con l'analisi numerica considerando i casi di edificio non rinforzato (curva nera), edificio con pareti esterne rinforzate da un solo lato (curva verde) ed edificio con tutte le pareti portanti rinforzate da entrambi i lati (curva rossa). È chiara la significativa maggiorazione della resistenza (60%-120%) e della capacità di spostamento (120%-150%) degli edifici rinforzati rispettivamente da un lato delle murature perimetrale e da entrambi i lati

delle murature portanti. Questi strumenti numerici ricavati dallo studio consentono ai progettisti di individuare la soluzione ottimizzata per raggiungere le prestazioni sismiche richieste, permettendo anche soluzioni molto meno invasive e più economiche.

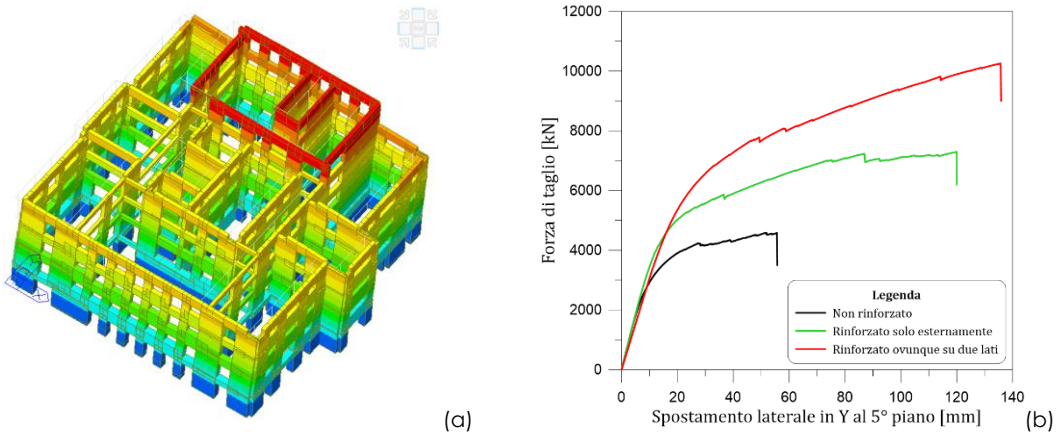


Figura 10 *Simulazione numerica Grande Albergo Terme di Comano: rappresentazione del modello numerico (a) e confronto tra le prestazioni dell'edificio non rinforzato, con le pareti perimetrali rinforzate solo all'esterno e con tutte le pareti portanti rinforzate su entrambi i lati (b).*

RICADUTE SUL TERRITORIO

Per trasferire e diffondere le conoscenze acquisite durante tutte le fasi del progetto, della durata complessiva di 30 mesi, e favorire interventi di rinforzo ragionati e ottimizzati, volti alla riduzione della vulnerabilità sismica delle costruzioni esistenti in muratura nonché all'aumento del grado di sicurezza dei fabbricati e di concerto dei cittadini, è stata eseguita un'ampia attività promozionale di comunicazione, destinata alle scuole del settore costruzioni, ambiente e territorio, agli ordini professionali e agli enti preposti al controllo della sicurezza ed efficienza delle costruzioni (ATER, Protezione Civile, Soprintendenze, ecc.), in modo da raggiungere il maggior numero di addetti coinvolti negli interventi per la riduzione della vulnerabilità sismica delle costruzioni. L'innovazione proposta con lo studio è stata quindi veicolata fino al cantiere, con importanti ricadute sul territorio, quali l'ottimizzazione dei costi necessari per interventi miglioramento delle prestazioni sismiche delle costruzioni esistenti. Attraverso convegni tecnici specifici sull'argomento e pubblicazioni su riviste nazionali e internazionali del settore, le conoscenze acquisite con lo studio sono state divulgate a un'ampia platea transnazionale di tecnici e specialisti della riabilitazione strutturale di costruzioni esistenti in zona sismica.

RINGRAZIAMENTI

Lo studio è stato sviluppato nell'ambito del progetto CONSTRAIN, finanziato dal Programma di Cooperazione Interreg Italia-Slovenia 2014-2020; coordinato dall'Università di Trieste (Italia) e con l'Università di Lubiana (Slovenia), Fibre Net S.p.A., Igmat d.d., Veneziana Restauri Costruzioni S.r.l., Kolektor CPG d.o.o.

BIBLIOGRAFIA

Gattesco N., Boem I., Rizzi E., Bez A., Gams M., Farič M., Pučnik V., Dudine A., "THE EXPERIMENTAL CAMPAIGN AND NUMERICAL SIMULATIONS OF THE CONSTRAIN PROJECT", Technical report, Progetto standard co-finanziato dal Fondo europeo per lo sviluppo regionale CONSTRAIN, 2022

Boem I. e Gattesco N., «Rehabilitation of Masonry Buildings with Fibre Reinforced Mortar: Practical Design Considerations Concerning Seismic Resistance», Key Eng. Mater., vol. 898, pag. 1–7, ago. 2021

Gattesco N., Boem I., «Characterization tests of GFRM coating as a strengthening technique for masonry buildings», Composite Structures, 2017

CNR-DT 215/2018, 'Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a Matrice Inorganica'. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, Italia, (2019).