

**INVESTIGAZIONE NUMERICA SU UN INNOVATIVO SISTEMA
A CAPPOTTO IN LEGA DI ALLUMINIO PER IL RETROFIT
SISMICO-ENERGETICO DI EDIFICI ESISTENTI IN
MURATURA**

**NUMERICAL INVESTIGATION ON A NOVEL ALUMINIUM
ALLOY ENVELOPE SYSTEM FOR SEISMIC-ENERGY
RETROFIT OF EXISTING MASONRY BUILDINGS**

Antonio Formisano
Università di Napoli Federico II
Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura
Napoli, Italia
antoform@unina.it

ABSTRACT

Conservation and protection of the built heritage is a pressing need for designers and re-searchers to allow for the repopulation of minor historical centres, which were in the last years subjected to abandonment. Recent EU's policies are based on integrated approaches aiming at enhancing both energy and earthquake performances of the existing built-up. In this framework, some solutions for the integrated retrofit of buildings have been launched on the construction market. In this paper, a new envelope system for seismic-environmental requalification of existing masonry constructions is presented. The novel coating system is made of a cold-formed aluminium alloy pinned structure equipped with a shear wall system made of OSB panels. In the current work, after a literature review on the main integrated envelope systems used in practice, firstly, the novel seismic coat has been presented and illustrated. Secondly, the proposed seismic coating has been used as a retrofit technique of a masonry residential building typical of the Central Italy historical centres. Finally, the comparison between performances of the examined building before and after the intervention has allowed to evaluate the benefits provided by the proposed coating system under the seismic viewpoint.

SOMMARIO

La conservazione e la tutela del patrimonio costruito è un'esigenza impellente per progettisti e ricercatori per consentire il ripopolamento dei centri storici minori, che negli ultimi anni sono stati

sottoposti ad abbandono. Le recenti politiche dell'Unione Europea si basano su approcci integrati volti a migliorare le prestazioni energetiche e sismiche del costruito esistente. In questo contesto sono state lanciate sul mercato edile alcune soluzioni per il retrofit integrato degli edifici. In questa memoria viene presentato un nuovo sistema a cappotto per la riqualificazione sismico-energetica delle costruzioni in muratura esistenti. Il nuovo sistema di rivestimento è costituito da una struttura pendolare in lega di alluminio formata a freddo dotata di un sistema di pareti a taglio con pannelli OSB. Nel presente lavoro, dopo una rivisitazione della letteratura sui principali sistemi a cappotto integrati utilizzati nella pratica professionale, è stato in primo luogo presentato ed illustrato il nuovo cappotto sismico. In secondo luogo, il cappotto sismico proposto è stato utilizzato come tecnica di retrofit di un edificio residenziale in muratura tipico dei centri storici del Centro Italia. Infine, il confronto tra le prestazioni dell'edificio esaminato prima e dopo l'intervento ha permesso di valutare i benefici in ottica sismica forniti dal sistema di cappotto presentato.

1 INTRODUZIONE

La sicurezza del costruito nei confronti dei terremoti e la ricerca di soluzioni in grado di migliorare le prestazioni energetiche delle costruzioni rappresentano un'esigenza impellente per progettisti e ricercatori. La tendenza attuale è essenzialmente quella di utilizzare sistemi per ridurre le dispersioni termiche attraverso l'involucro edilizio. Al contrario, i sistemi combinati per aumentare sia la resistenza sismica che l'efficienza energetica degli edifici esistenti sono scarsamente diffusi sul mercato edile [1].

Le poche soluzioni esistenti riguardano principalmente soluzioni basate sull'impiego del c.a.. Il Geniale Cappotto Sismico [2], prodotto dalla società ECOSISM, viene applicato all'esterno dell'edificio sotto forma di lastre in c.a., gettate in sito all'interno di due pannelli isolanti che fungono da casseforme e collegate alla struttura ed alle fondazioni dell'edificio esistente. Una soluzione meno invasiva, prodotta dalla stessa azienda, è il Cappotto Sismico Karma [3], che viene utilizzato per evitare il ribaltamento fuori piano delle tamponature e, quindi, non richiede di essere collegato alle fondazioni dell'edificio. Un'altra tecnica integrata è il sistema Sisma Coat [4], che prevede l'utilizzo di profili in acciaio formati a freddo fissati mediante connettori alle facciate dell'edificio ed utilizzati come guide per ospitare pareti a taglio in c.a. gettate in opera ed armate con una rete elettrosaldata. Questo sistema viene completato collegando dei pannelli isolanti al di sopra del predetto sistema antisismico. Una soluzione diversa è rappresentata dal sistema Betontherm [5], che è un cappotto sismico realizzato con tecnologia a secco sviluppato dall'azienda Beton Wood. Esso è costituito da pareti antisismiche a taglio realizzate con lastre in legno-cemento e pannelli in fibra di legno naturale come componenti isolanti. Un'altra soluzione a secco basata sull'uso dell'acciaio è il cappotto sismico Resisto 5.9 [6], prodotto dall'azienda Progetto Sisma srl, che impiega esoscheletri in acciaio cold-formed con schema tipologico a croce di Sant'Andrea come sistema antisismico e pannelli di polistirene espanso sinterizzato come sistema di isolamento termico. Il sistema può essere o meno collegato in fondazione, fungendo rispettivamente come tecnica di miglioramento sismico o di intervento locale dell'edificio a cui è applicato.

Nella presente memoria viene presentata una soluzione integrata di cappotto sismico con il sistema antisismico integralmente in lega di alluminio costituito da un telaio realizzato con aste formate a freddo e da una sovrastante lamiera grecata, con l'intercapedine fra i due riempita da pannelli isolanti. In questo lavoro viene presentato in dettaglio il sistema e si mostra una sua applicazione progettuale per migliorare le prestazioni sismico-energetiche di un tipico edificio esistente misto in muratura-c.a. in provincia di Fermo. Vengono eseguite analisi statiche non lineari per valutare i benefici sismici derivanti dall'installazione del nuovo cappotto sismico, in grado di produrre il miglioramento sismico dell'edificio.

2 IL NUOVO CAPPOTTO SISMICO DUO SYSTEM

Il nuovo sistema di retrofit sismico-energetico oggetto della memoria è il cappotto sismico DUO SYSTEM, nato a seguito della convenzione di ricerca scientifica coordinata dall'autore con la società Irondom Srl, avente sede a Chiusano di San Domenico in provincia di Avellino.

Questo sistema è stato concepito come un esoscheletro integrato sismico-energetico per la riqualificazione di costruzioni esistenti in muratura e cemento armato. È composto da un telaio in lega di alluminio formato a freddo rivestito da lamiera grecata in lega di alluminio (spessore da 7/10 a 15/10 mm) collegate da viti autoperforanti alle membrature del telaio. Tali membrature sono realizzate con profili a C irrigiditi, di spessore variabile da 12/10 mm a 15/10 mm, aventi altezza di 100 mm, base di 45 mm ed irrigidimenti di estremità di 10 mm. Il sistema composto telaio-lamiera, che rappresenta la parte antisismica del cappotto, è collegato mediante squadrette in lega di alluminio e ancoranti chimici alla struttura di base. Nell'intercapedine tra le membrature orizzontali e verticali del telaio e la lamiera esterna in alluminio vengono posizionati pannelli aventi funzione di isolamento termico. I pannelli isolanti tipici del sistema sono realizzati in canapa, lana minerale, lana di roccia o con prodotto isolante riflettente dell'azienda Hybris. Al di sopra della lamiera viene installato lo strato di finitura del cappotto sismico (ad esempio pannelli aquapanel prodotti dall'azienda Knauf), che viene completato con rasatura finale e pitturazione. In alternativa, è possibile fissare un ulteriore strato isolante al di sopra della lamiera grecata, che richiede l'installazione di un'orditura secondaria metallica alla quale vengono collegati i pannelli di rivestimento, consentendo la realizzazione di una parete ventilata. Lo spessore totale del cappotto sismico è variabile da 146 a 170 mm. I diversi componenti del sistema implementato, unitamente alle fasi di montaggio dello stesso, sono illustrate in Figura 1.

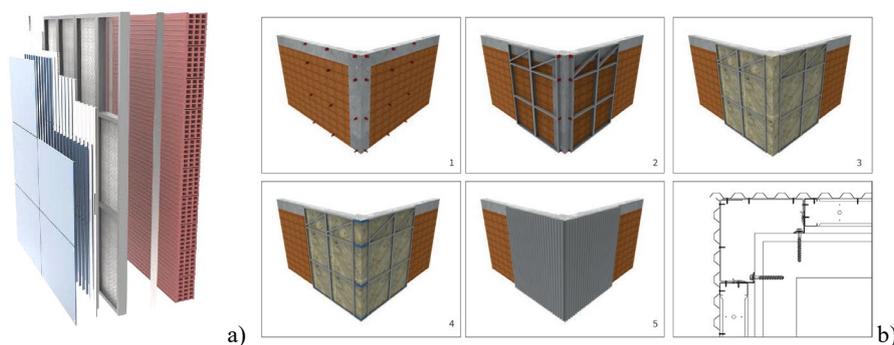


Fig. 1. Il cappotto sismico DUO SYSTEM in lega di alluminio: componenti (a) e fasi di installazione (b)

3 APPLICAZIONE AD UN CASO STUDIO

3.1 Rilievo geometrico-strutturale ed analisi delle azioni agenti

Il caso di studio in questa sede indagato per l'applicazione del cappotto sismico DUO SYSTEM è un edificio residenziale misto in muratura e cemento armato in provincia di Fermo nel Centro Italia. La costruzione ha una pianta rettangolare con dimensioni geometriche di 10,60 x 11,25 m. È composta da due corpi sviluppati su quattro livelli fuori terra, che sono posti a diversi livelli: un primo corpo, orientato a sud-est, con un'altezza massima di circa 13,00 m, e un secondo corpo,

orientato a nord-ovest, con un'altezza massima di circa 14,30 m. Una vista dell'edificio è visibile in Figura 2a.

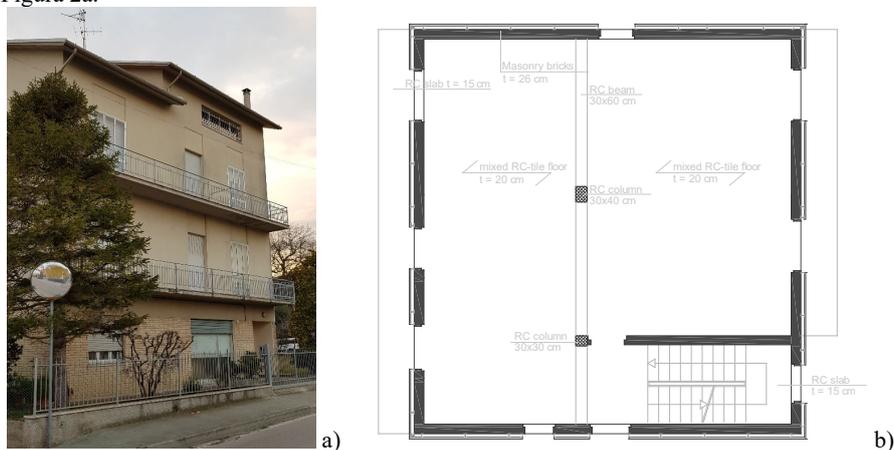


Fig. 2. Una facciata (a) e la carpenteria del piano tipo (b) dell'edificio esaminato

La struttura verticale è realizzata con muratura di mattoni semipieni sui lati perimetrali dell'edificio, mentre all'interno, in corrispondenza della trave di colmo del tetto, è presente un telaio in cemento armato. Le strutture orizzontali sono costituite da solai misti latero-cementizi. Il tetto è a falde realizzate con travetti prefabbricati in c.a. Le fondazioni sono del tipo a travi rovesce, che si sviluppano lungo il perimetro dell'edificio e al di sotto del telaio centrale. Il rilievo strutturale del piano tipo dell'edificio è riportato in Figura 2b.

In accordo alla normativa corrente NTC 2018 [7], le prove condotte sui materiali hanno consentito di attingere un livello di conoscenza limitato con un fattore di confidenza pari a 1,35. Le prove eseguite in sito ed in laboratorio hanno restituito resistenza a compressione e modulo elastico della muratura pari rispettivamente a 4,62 MPa e 10913 MPa, resistenza a compressione e modulo elastico del calcestruzzo pari rispettivamente a 18,1 MPa e 28608 MPa, e tensioni di snervamento e di rottura dell'acciaio pari rispettivamente a 336,7 MPa e 451,3 MPa. L'analisi dei carichi gravitazionali agenti (peso proprio e carichi permanenti) sulle strutture orizzontali ha fornito valori di 5,20 kN/m² per i solai, 3,50 kN/m² per la copertura e circa 5,00 kN/m² per la scala. I carichi variabili per solai e copertura sono stati invece assunti rispettivamente pari a 2,00 kN/m² e 0,50 kN/m². Per la scala ed il balcone è stato considerato un carico variabile di 4,00 kN/m². Dal punto di vista sismico, la vita nominale dell'edificio, che appartiene ad una classe d'uso II, è di 50 anni, che rappresenta anche il periodo di riferimento della struttura. Sulla base dell'indagine geologica effettuata, l'edificio si fonda su un terreno di tipo C e per esso, allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita, è stata assunta una PGA di 0,183 g.

3.2 Analisi sismiche sull'edificio nello stato di fatto

L'edificio è stato modellato mediante la tecnica ai macro-elementi utilizzando il software di analisi 3Muri sviluppato dalla società S.T.A.DATA Srl [8]. Le viste dei modelli geometrici ed ai macro-elementi dell'edificio sono riportate in Figura 3.

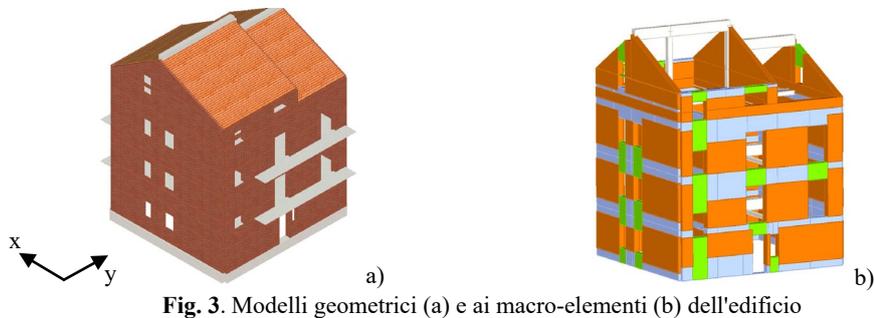


Fig. 3. Modelli geometrici (a) e ai macro-elementi (b) dell'edificio

Sono state eseguite 24 analisi statiche non lineari sull'edificio considerando due diverse direzioni di analisi (x e y), due differenti versi (+ e -) e due diverse distribuzioni di carico (proporzionali alle masse o al primo modo di vibrazione). I risultati ottenuti dalle analisi pushover in termini di curve taglio alla base (V) - spostamento in sommità (d) sono illustrati in Figura 4.

Le curve e gli stati di danno corrispondenti al caso di analisi più gravoso in ciascuna delle due direzioni dell'edificio sono riportati in Figura 5. Con riferimento a tali analisi, il fattore di sicurezza sismica, inteso come rapporto tra l'accelerazione di capacità e quella di domanda, è pari a 0,66 in direzione x e a 0,74 in direzione y.

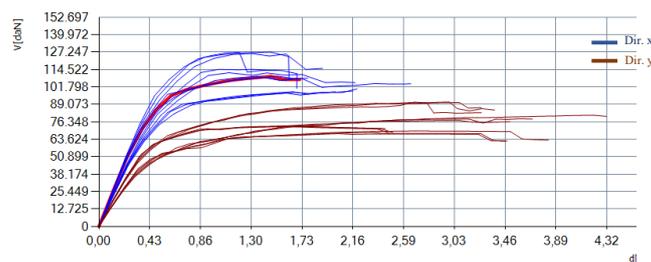


Fig. 4. Curve pushover dell'edificio nello stato di fatto

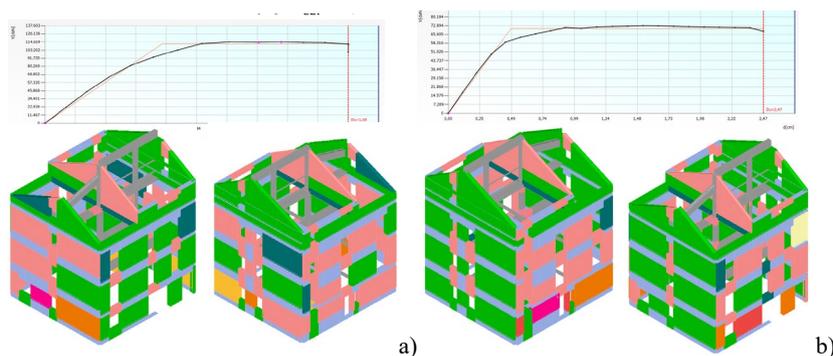


Fig. 5. Curve di pushover e stati di danno dell'edificio nello stato di fatto nei casi di analisi peggiori nelle direzioni x (a) e y (b). *Legenda: verde e grigio: nessun danno; verde scuro: plasticità incipiente; rosa: plastico a presso-flessione; magenta: crisi grave; giallo: plastico a taglio; arancione: collasso a taglio incipiente; arancione scuro: collasso a taglio.*

3.3 Progettazione del cappotto sismico

La progettazione sismica del cappotto DUO SYSTEM è stata eseguita secondo la teoria dello Stressed Skin Design [9]. L'elemento antisismico è rappresentato dalla parete di taglio realizzata con lamiera grecata in lega di alluminio, che viene installata sul telaio in alluminio con greche poste in direzione verticale. Al fine di determinare la resistenza del sistema, ne è stata considerata la suo componente più debole, ossia la connessione tra la lamiera ed il telaio in alluminio. Per la progettazione della parete a taglio, gli altri elementi sono stati sovradimensionati, in modo tale che il collasso del sistema si verifichi quando le connessioni tra la lamiera ed il telaio abbiano già raggiunto la crisi.

La capacità di taglio V della parete di taglio, rappresentata dalla lamiera grecata, è calcolata in accordo alle indicazioni dell'ECCS come segue [10]:

$$V = a/b \cdot (n_{sc} \cdot F_p) \quad (1)$$

dove a = dimensione della lamiera in direzione perpendicolare alle greche; b = dimensione della lamiera in direzione parallela alle greche; n_{sc} = numero di connessioni tra la lamiera e le colonne esterne del telaio; F_p = resistenza a rifollamento delle connessioni telaio-lamiera.

Per far sì che il collasso si verifichi nelle connessioni tra la parete di taglio ed il telaio, è necessario controllare che altre modalità di crisi, vale a dire l'instabilità locale e globale della lamiera, il collasso a taglio della lamiera e l'instabilità distorsionale dei profili, si attivino a seguito di quello governato dall'eq. (1). La rigidità della parete di taglio è l'inverso della sua deformabilità, ottenuta dal contributo di diversi fenomeni, vale a dire l'instabilità distorsionale e le deformazioni a taglio delle greche, nonché la deformabilità a taglio delle connessioni lamiera-telaio.

Il progetto del sistema è stato condotto sulla base delle indicazioni sopra riportate, selezionando come parete di taglio una lamiera grecata in alluminio con spessore di 1 mm, altezza delle greche di 21 mm e resistenza convenzionale elastica ed ultima rispettivamente di 250 MPa e 330 MPa. Il sistema viene completato con pannelli in polistirolo inseriti dietro la lamiera di alluminio che riempiono gli spazi tra i montanti ed i trasversi del telaio. Viti autofilettanti in acciaio zincato con diametro di 5,5 mm e lunghezza di 16 mm vengono utilizzate per collegare la lamiera con le aste del telaio in alluminio. Tasselli chimici con barre filettate in acciaio classe 8.8 e diametro di 10 mm sono invece impiegati sia per collegare l'involucro alle pareti in muratura, attraverso squadrette in lega di alluminio fissate agli elementi del telaio da due viti, che per connettere il cappotto sismico in fondazione. Le viste frontali e planimetriche di una parte del cappotto sismico proposto sono riportate in Figura 6.

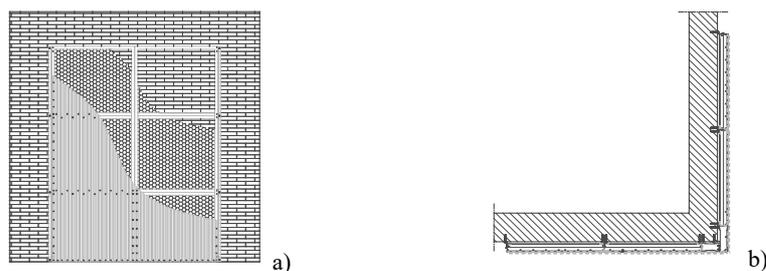


Fig. 6. Installazione del sistema sulla facciata dell'edificio: vista frontale (a) ed in pianta (b)

3.4 Analisi sismiche sull'edificio nello stato di progetto

Il cappotto sismico DUO SYSTEM è stato installato sulle facciate dell'edificio considerando la presenza delle aperture e prevedendo l'impiego di parti speciali negli angoli per creare un effetto

di confinamento utile ad evitare il ribaltamento delle pareti in caso di sisma. Una vista del telaio del sistema installato sulle pareti perimetrali dell'edificio è visibile in Figura 7.

La lamiera grecata di rivestimento è stata modellata con diagonali equivalenti in lega di alluminio aventi resistenza e rigidità definite secondo le disposizioni illustrate nel precedente paragrafo.

Una vista del modello ai macro-elementi dell'edificio nello stato di progetto implementato con il software di analisi 3Muri è visibile in Figura 8a. Come nel caso dell'edificio pre-intervento, anche in questo caso sono state effettuate 24 analisi statiche non lineari. I risultati ottenuti in termini di curve pushover sono illustrati in Figura 8b. Curve e stati di danno corrispondenti ai casi di analisi peggiori nelle due direzioni di analisi (n. 9 in direzione x e n. 6 in direzione y) sono riportati in Figura 9.

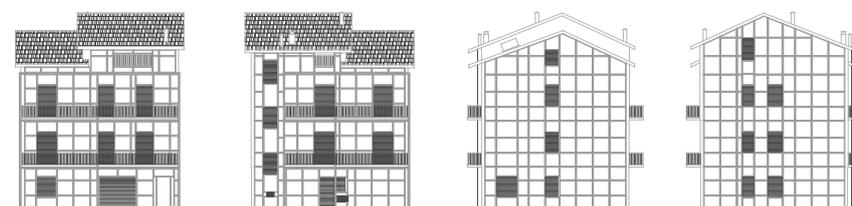


Fig. 7. Vista delle facciate con installazione della struttura a telaio del cappotto DUO SYSTEM

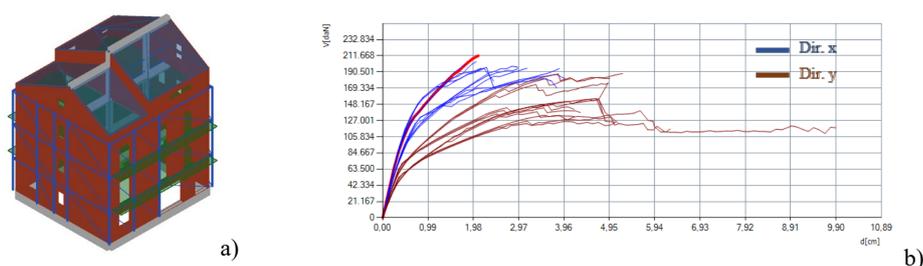


Fig. 8. Modello 3D (a) e curve di pushover (b) dell'edificio nello stato di progetto

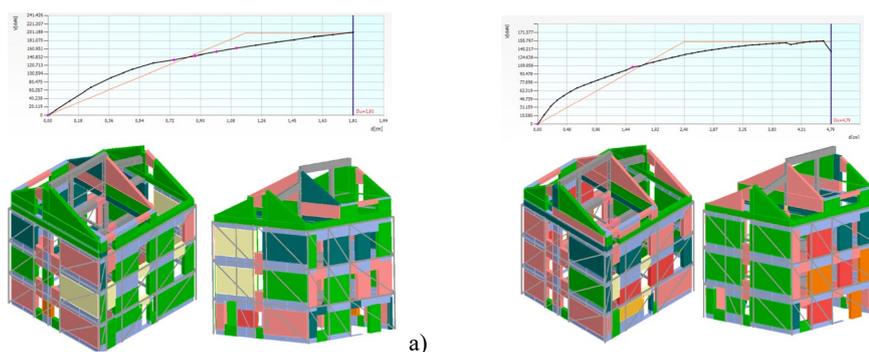


Fig. 9. Curve di pushover e stati di danneggiamento dell'edificio nello stato di progetto nei casi di analisi peggiori nelle direzioni x (a) e y (b). *Legenda: verde e grigio: nessun danno; verde scuro: plasticità incipiente; rosa: plastico a presso-flessione; magenta: crisi grave; giallo: plastico a taglio; arancione: collasso a taglio incipiente; arancione scuro: collasso a taglio.*

In questi casi di analisi il fattore di sicurezza sismica, inteso come rapporto tra l'accelerazione di capacità e quella di domanda, assume valori pari a 0,84 in direzione x e a 0,89 in direzione y. Considerando che lo stesso fattore per l'edificio nello stato di fatto aveva assunto valori di 0,66 e 0,74 nelle direzioni x e y, rispettivamente, è stato notato un aumento di sicurezza sismica di 0,18 in direzione x e di 0,15 in direzione y. Pertanto, sulla base di quanto previsto dalla normativa italiana, tali risultati hanno permesso di ottenere il miglioramento sismico dell'edificio.

CONCLUSIONI

In questa memoria è stata presentata la riqualificazione sismico-energetica di un tipico edificio in muratura in provincia di Fermo utilizzando l'innovativo cappotto sismico DUO SYSTEM e focalizzando l'attenzione esclusivamente sugli aspetti di natura sismica. L'edificio è stato analizzato mediante analisi statiche non lineari eseguite mediante il software di analisi strutturale 3Muri. Le carenze sismiche rilevate nella struttura hanno permesso di progettare una versione interamente in alluminio (telaio + lamiera grecata) del cappotto DUO SYSTEM. Il comportamento sismico dell'edificio post-intervento è stato valutato sempre mediante analisi pushover.

Confrontando il fattore di sicurezza sismica in entrambe le direzioni di analisi prima e dopo l'intervento, si è notato che è stato raggiunto un aumento del predetto fattore di 0,18 in direzione x e di 0,15 in direzione y grazie all'installazione del cappotto sismico DUO SYSTEM. Pertanto, sulla base di quanto previsto dalla normativa italiana NTC 2018, considerando che è stato registrato un aumento del fattore di sicurezza sismica superiore a 0,1 in entrambe le direzioni di analisi, l'edificio può ritenersi sismicamente migliorato. Tale risultato conferma l'efficacia di DUO SYSTEM come sistema di intervento per la riqualificazione sismico-energetica delle costruzioni miste muratura-c.a. dei centri storici italiani simili all'edificio in questa sede investigato.

RINGRAZIAMENTI

La presente attività di ricerca è stata sviluppata nell'ambito del progetto di ricerca DPC-ReLUIIS, che si ringrazia per il supporto fornito. L'Autore desidera inoltre ringraziare la società Irontom Srl per il supporto nella valutazione delle problematiche costruttive del sistema DUO SYSTEM.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Formisano, A., Vaiano, G., Fabbrocino, F., Seismic and energetic interventions on a typical south Italy residential building: Cost analysis and tax deduction. *Frontiers in Built Environment*, 5, art. no. 12, 2019, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2019.00012>
- [2] Geniale Cappotto Sismico, <https://www.ecosism.com/moduli/geniale/>, 2022
- [3] Cappotto Sismico Karma, <https://www.ecosism.com/moduli/karma/>, 2022
- [4] Cappotto Sismico Sismacoat, <https://www.sismacoat.it/>, 2022
- [5] Cappotto Sismico Betontherm, <https://www.betontherm.com/>, 2022
- [6] Cappotto Sismico Resisto 5.9, <https://www.progettosisma.it/resisto-cappotto-antisismico>, 2022
- [7] MIT, Norme Tecniche per le Costruzioni, G. U. n. 42 del 20-02-2018, Roma, 2018
- [8] S.T.A DATA Srl, 3Muri 10.9.0 – Manuale utente, 2020
- [9] Davies, J. M., Developments in stressed skin design. *Thin Wall. Struct.* 44: 1250-1260, 2006
- [10] European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), Stressed Skin Design., ECCS – Technical Committee 7, Technical Working Group 7.5, 88, 1995

PAROLE CHIAVE

Retrofit integrato, Edifici in muratura, Miglioramento sismico, Cappotto sismico, Analisi pushover.