

**ESOSCHELETRI ORTOGONALI IN ACCIAIO A BASSO
“IMPATTO ED INDUSTRIALIZZABILI” PER IL RETROFIT DI
EDIFICI IN CALCESTRUZZO ARMATO ESISTENTI: STATO
DELL’ARTE E CONCEPT STRUTTURALE**

**ORTHOGONAL STEEL EXOSKELETON FOR LOW IMPACT
AND RAPID EXECUTION RETROFITTING OF EXISTING
REINFORCED CONCRETE BUILDINGS: STATE OF THE ART
AND STRUCTURAL CONCEPT**

Gianmaria Di Lorenzo, Roberto Tartaglia,
Alessandro Prota, Raffaele Landolfo
University of Naples “Federico II”
Department of Structures for Engineering and
Architecture (DIST)
Via Forno Vecchio 36, 80134, Naples, Italy
gianmaria.dilorenzo@unina.it
roberto.tartaglia@unina.it
alessandro.prota@unina.it
landolfo@unina.it

Antonio Formisano,
University of Naples “Federico II”
Department of Structures for Engineering and
Architecture (DIST)
Piazzale Tecchio 80, 80125, Naples, Italy
antoform@unina.it

ABSTRACT

The use of exoskeletons, intended as additive structures applied in a widespread way externally to the building to be protected, constitutes a valid alternative to common intervention techniques for the seismic retrofit of existing reinforced concrete buildings. Among many typological solutions present in the literature, in the present work, the orthogonal 2D steel exoskeletons (EXO 2D \perp) have been analyzed in detail. These systems, made as truss shear walls placed orthogonally to the facade of the building, can be effectively used for the retro-fit of low-mid-rise buildings. In the present work, after a thorough state-of-the-art and a critical analysis of emblematic realizations, a kit-constructive system suitable for prefabrication, which does not limit the accessibility of the intervention, was subsequently conceived. This study provides useful design guidance to those who wish to apply such systems, moreover, it lays the foundations for the development of a specific sizing procedure to condition the high number of parameters involved in the design process.

SOMMARIO

L'utilizzo degli esoscheletri, ovvero di strutture additive applicate in modo diffuso esternamente al manufatto da proteggere, costituisce una valida alternativa alle comuni tecniche di intervento per il miglioramento o l'adeguamento sismico di edifici esistenti in calcestruzzo armato. Tra le molteplici soluzioni tipologiche presenti in letteratura, nel presente lavoro, sono stati analizzati in dettaglio gli esoscheletri 2D ortogonali (EXO 2D \perp) in acciaio. Tali sistemi realizzati con pareti di taglio reticolare poste ortogonalmente alla facciata della costruzione, consentono efficacemente di proteggere edifici con un limitato numero di piani. Eseguito un approfondito stato dell'arte e una analisi critica di realizzazioni emblematiche, è stato successivamente concepito un sistema costruttivo-kit adatto alla prefabbricazione, che non limiti l'accessibilità dell'intervento. Il presente studio, oltre a fornire utili indicazioni progettuali a coloro che volessero applicare tali sistemi, costituisce il presupposto indispensabile per la messa a punto di una specifica procedura di dimensionamento volta a condizionare l'elevato numero di parametri coinvolti nel processo progettuale.

1 INTRODUZIONE

Gli edifici esistenti in calcestruzzo armato, realizzati prima degli anni '80, costituiscono una parte rilevante del patrimonio edilizio esistente, soprattutto in ambito europeo [1-2]. Analizzandone le prestazioni strutturali, questi edifici, avendo superato ampiamente la loro vita utile, sono caratterizzati da una elevata vulnerabilità connessa alla durabilità dei materiali a cui si aggiungono, nelle aree interessate dai terremoti, carenze derivanti dall'assenza di dettami sismici. Il retrofit e la riabilitazione strutturale delle costruzioni esistenti in calcestruzzo armato dovrebbero quindi avvenire agendo simultaneamente su queste due macro-carenze, ovvero sul degrado (retrofit a durabilità) e sulla sicurezza sismica (retrofit sismico). Molteplici sono oggi le strategie e le tecniche di intervento che è possibile adottare per il miglioramento e l'adeguamento sismico delle costruzioni esistenti in c.a.. Accanto al perfezionamento delle tecniche tradizionali, i progressi compiuti sinergicamente dalla scienza dei materiali e dalla ingegneria strutturale hanno consentito il diffondersi di sistemi innovativi, molti dei quali già da tempo codificati in ambito internazionale [3-4] e nazionale [5] nelle principali norme e linee guida che si occupano di riabilitazione strutturale.

Al contempo, in una logica di sviluppo sostenibile [6], la necessità di realizzare interventi che siano sicuri e sostenibili, dal punto di vista ambientale ed economico, richiede un approccio multidisciplinare alla progettazione definita, visione olistica (Holistic Vision HV). Si parla in questo caso di retrofit integrato, strutturale, energetico, formale e funzionale, che combini la "sicurezza strutturale" ai concetti di "deep renovation". Tale integrazione è inoltre favorita da incentivi fiscali che in molti paesi, tra cui Italia, prevede recentemente la possibilità di cumulare il cosiddetto Ecobonus al Sismabonus [7]. La scelta della soluzione ottimale richiederebbe in questi casi un approccio di tipo Life Cycle Thinking (LCT) in cui analizzare le implicazioni sulle performance strutturali e a durabilità (PBD & Life-cycle engineering LCE), sui costi (Life Cycle Costs, LCC) e sugli impatti ambientali (Life Cycle Assessment, LCA) durante l'intero ciclo di vita della costruzione [8]. Data la complessità del problema sono incorso molteplici studi e ricerche volti a sviluppare metodologie di progetto/valutazione integrate [9], la cui effettiva implementazione può essere agevolata dall'avvento del Building Information Modelling (BIM).

È in questo contesto che si inseriscono gli esoscheletri, intesi come strutture additive che, applicate in modo diffuso esternamente al manufatto da proteggere, consentono di incrementarne in modo significativo il livello di sicurezza nei riguardi di tutti i principali Stati Limite. Questi sistemi, che si configurano come interventi globali, oltre alle notevoli prestazioni strutturali sono considerati a basso impatto, nel senso che possono essere posti in opera senza interrompere l'utilizzo o il funzionamento della costruzione. Sebbene tale soluzione sia già contemplata dai primi codici giapponesi

e americani che si occupavano negli anni 70-'80 di riabilitazione strutturale [10-11], l'utilizzo degli esoscheletri è oggi di grande attualità per le potenzialità connesse alla realizzazione di interventi di rapida esecuzione, basso impatto ed integrati.

Tra le molteplici soluzioni tipologiche presenti in letteratura [12], nel presente lavoro, sono analizzati in dettaglio gli esoscheletri 2D ortogonali (EXO 2D \perp) in acciaio che, realizzati con pareti di taglio reticolari poste ortogonalmente alla facciata della costruzione, consentono efficacemente di proteggere edifici con un limitato numero di piani. Questi sistemi, per la semplicità realizzativa e di posa in opera, stanno trovando un vasto campo di applicazione soprattutto per l'adeguamento sismico di edifici di modesta altezza. Eseguito lo stato dell'arte riguardante gli esoscheletri ortogonali e una analisi critica di realizzazioni emblematiche, è stato successivamente concepito un sistema costruttivo-kit adatto alla prefabbricazione, che non limiti l'accessibilità dell'intervento.

Il presente studio, oltre a fornire utili indicazioni progettuali a coloro che volessero applicare tali sistemi, costituisce il presupposto indispensabile per la messa a punto di una specifica procedura di dimensionamento volta a condizionare l'elevato numero di parametri coinvolti nel processo progettuale.

2 STATO DELL'ARTE E PREROGATIVE DEGLI ESOSCHELETRI "ORTOGONALI" IN ACCIAIO

Un incremento significativo delle prestazioni e dei livelli di sicurezza di una costruzione esistente affetta da carenze gravi, quali ad esempio l'assenza di un sistema delegato all'assorbimento di azioni orizzontali rispetto ad una o più direzioni principali, può essere conseguito con interventi globali volti alla riduzione della domanda o all'incremento della capacità del sistema [12].

Tra gli interventi globali che incrementano la capacità del sistema, aumentandone in modo significativo resistenza e rigidità laterale, rientrano certamente quelli realizzati mediante l'aggiunta di nuovi sistemi sismoresistenti applicati internamente e/o esternamente alla costruzione esistente. Utilizzando un linguaggio derivato dalla biomimesi [13], nel caso in cui le addizioni siano eseguite dall'interno si parla di endoscheletro, diversamente di esoscheletro. Per ragioni morfologiche e di corretto trasferimento delle azioni si può parlare di esoscheletro in "senso stretto" qualora esso interessi una porzione significativa del manufatto esistente e sia diffuso lungo il suo perimetro.

Uno stato dell'arte completo sugli esoscheletri in acciaio è riportato nell'articolo di Di Lorenzo et al., 2020, in cui è proposta anche una nomenclatura volta a descrivere compiutamente questi sistemi dal punto di vista del concept strutturale e della catalogazione in famiglie tipologiche. In sintesi, gli esoscheletri, denominati con la sigla EXO, possono essere classificati in tridimensionali (3D) o bidimensionali (2D). La differenza sostanziale tra queste due famiglie tipologiche è data dalla loro morfologia e dalla modalità di assorbimento delle azioni orizzontali.

Gli EXO 2D \perp , oggetto del presente lavoro, sono sostanzialmente delle pareti di taglio disposte ortogonalmente alla facciata del manufatto da proteggere. Essi traggono ispirazione dalla architettura gotica, costituendo una rivisitazione in chiave contemporanea del concetto di contrafforte realizzato a parete piena (buttress) o alleggerito con archi rampanti (flying buttress). Il principale vantaggio offerto da tali sistemi è quello svincolarsi dalla griglia strutturale, potendo così essere distribuiti lungo tutto il perimetro in modo da assorbire efficacemente le spinte e regolarizzare la risposta dinamica della costruzione esistente, anche in assenza di un impalcato infinitamente rigido. Disposti ortogonalmente alla facciata non ostacolano la movimentazione delle vetrate e dei serramenti preesistenti (involucro trasparente). In assenza di un involucro completamente opaco non limitano il passaggio della luce (analogia con le cattedrali Gotiche) e la fruizione degli spazi e delle vedute dall'interno della costruzione, prerogativa importante qualora l'edificio sorga in zone climatiche rigide e/o in località panoramiche. Realizzati a parete piena o reticolare si prestano inoltre ad essere industrializzati ovvero ad essere prodotti in modo seriale, soddisfacendo la domanda in termini di

rigidezza e resistenza globale, modificando esclusivamente il numero di pareti aggiunte. Per la loro morfologia i sistemi 2D \perp facilitano dal punto di vista strutturale l'espansione laterale della costruzione (lateral addition) favorendo l'inserimento di impalcati per le parti aggiunte e di sistemi per il trasferimento delle azioni. Qualora non sia possibile disporre le pareti lungo le due direzioni principali della costruzione è possibile combinare gli esoscheletri perpendicolari (2D \perp) con quelli paralleli (2D//) prevedendo dei sistemi di trasferimento delle azioni capaci di trasmettere azioni assiali e taglianti allo stesso tempo. A scopo esemplificativo e di comprensione delle criticità connesse all'utilizzo di questi sistemi, nel seguito sono descritte alcune realizzazioni emblematiche di EXO 2D \perp . Il primo intervento riguarda l'adeguamento sismico della palazzina per uffici dello stabilimento Magneti Marelli di Crevalcore (BO) danneggiato a seguito degli eventi sismici che hanno l'Italia nord-orientale nel 2012 (Figura 1a). L'esoscheletro è stato realizzato con profili cavi in acciaio S355J0H. Dal punto di vista tipologico l'organismo sismo resistente è stato realizzato con un sistema pareti di taglio reticolari a croce di S. Andrea disposte ortogonalmente alla facciata (EXO_2D \perp _CBF_X) nelle due direzioni principali della costruzione. Un altro esempio emblematico di applicazione degli esoscheletri ortogonali è costituito dal retrofit integrato della Scuola Primaria "La Tina" a Città di Castello (PG) (Figura 1b).



Fig. 1. Adeguamento palazzina per uffici di Magneti Marelli (a) e scuola primaria "La Tina" (b)

L'analisi delle realizzazioni mostrate in precedenza ha evidenziato prerogative e limiti di applicazione degli esoscheletri ortogonali. Le pareti di taglio sono state realizzate con controventi concentrici utilizzando aste di parete configurate a croce di S'Andrea disponendo le aste diagonali ed i montanti con frequenza multipla. Questi sistemi, nonostante siano molto performanti dal punto di vista strutturale, hanno di contro un peso più alto rispetto a soluzioni con frequenza verticale singola. Inoltre, la presenza delle diagonali non consente alle pareti di essere attraversate, impedendo parzialmente l'accessibilità degli ambienti esterni. Occorre inoltre osservare che in tutte le realizzazioni gli esoscheletri, lasciati a faccia vista, non sono stati progettati secondo una visione olistica, limitando gli interventi di retrofit alla sicurezza strutturale.

3 CONCEZIONE STRUTTURALE DI UN SISTEMA COSTRUTTIVO A BASSO IMPATTO

Lo stato dell'arte e l'analisi critica delle realizzazioni hanno evidenziato i punti di forza e di debolezza legati all'utilizzo degli esoscheletri ortogonali, fornendo inoltre utili informazioni progettuali in termini di concezione strutturale. Tale processo avviene in modo organico attraverso tre scelte consecutive e consequenziali, definite rispettivamente:

- STEP 1: Scelta tecnologica o del materiale per impiego strutturale;

- STEP 2: Scelta tipologica o dello schema resistente;
- STEP 3: Scelta dimensionale o della dimensione di primissimo tentativo (pre-dimensionamento basato su rapporti di forma globali e/o locali).

La concezione strutturale richiede come scelta preliminare quella del materiale tra le diverse alternative disponibili (scelta tecnologica esterna). Definito l'acciaio come tecnologia costruttiva, nell'ambito di questo materiale la scelta (tecnologica interna) deve essere eseguita a quattro livelli [14] che vanno dalla definizione del tipo di lega (Liv.1), del grado/resistenza (Liv.2), del sub-grado/resilienza (Liv.3) e dei requisiti speciali (Liv.4).

La necessità di contenere i costi e di utilizzare un materiale di facile reperibilità consiglia l'utilizzo degli acciai non legati per impiego strutturale (contrassegnati in ambito europeo dalla lettera S) per i quali sono disponibili una vasta gamma di prodotti siderurgici laminati a caldo. In presenza di regimi assiali di trazione e compressione, nel caso di elementi con snellezza contenuta, è consigliabile l'utilizzo di gradi medio-alti, come ad esempio l'acciaio S355. Nel caso in cui l'esoscheletro sia direttamente esposto agli agenti atmosferici, in una logica di tipo Life Cycle Thinking, è necessario concepire e progettare i sistemi di protezione atti a garantire una adeguata durabilità all'intervento. Definito il tipo d'acciaio e i sistemi di protezione, per ridurre i problemi di accessibilità presenti nelle soluzioni correntemente impiegate per gli esoscheletri ortogonali (EXO_2D_CBF_X), la scelta tipologica ha condotto, nella fase di concept, all'utilizzo di pareti di taglio a doppio portale asimmetrico o Y-shaped bracing (EXO_2D_CBF_Y).

Tale soluzione oltre ad essere leggera ed accessibile, ha di contro, rispetto a quella classica con diagonali ad X, basse prestazioni strutturali, soprattutto in termini portanza (resistenza e rigidezza) nei riguardi delle azioni laterali (Figura 3).

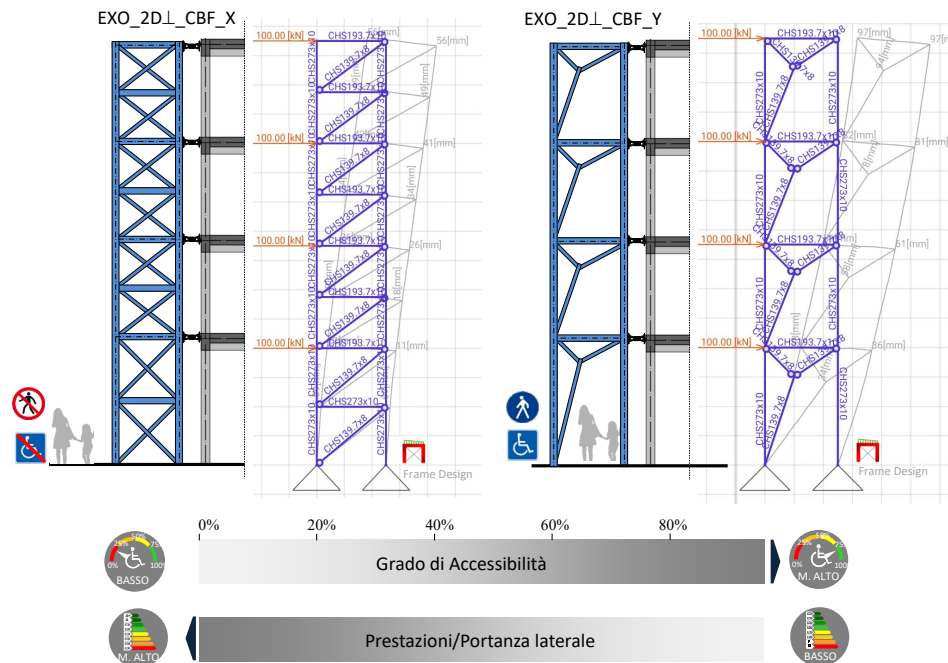


Fig. 2. Confronto CBF_X vs CBF_Y

Nasce quindi la necessità di effettuare uno studio di ottimizzazione strutturale delle pareti di taglio impiegate negli esoscheletri ortogonali. Da tale studio, le cui risultanze saranno implementate nella proposta di una specifica metodologia di progetto, è scaturito che modificando semplicemente l'inclinazione di uno dei correnti (α_c) della parete reticolare (parametro chiave del processo di ottimizzazione), è possibile incrementare fortemente la rigidezza (SLE RIG) e la resistenza laterale (SLURES) della parete, riducendone al contempo il peso (FG). La parete così ottenuta, del tipo Y-shaped bracing con profilo rastremato (Figura 4a), è alla base della scelta tipologica (esterna) del sistema definito EXO_2D \perp _CBF_TY. È interessante osservare come questi sistemi possano essere accostati, dal punto di vista formale e concettuale, ai contrafforti ad archi rampanti delle cattedrali gotiche (Figura 4b). La scelta tipologica va poi condotta a livello elementare/locale, ovvero scegliendo il tipo di membrature che compongono la generica parete e i sistemi di connessione: nodi, giunzioni e dispositivi di trasferimento. La presenza di regimi primari di sollecitazione di tipo assiale che caratterizzano le pareti reticolari rende particolarmente conveniente l'uso di profili cavi a sezione circolare (CHS), sia finiti o lavorati a caldo (HF) che formati a freddo con saldatura (CF) [15].

STEP 2

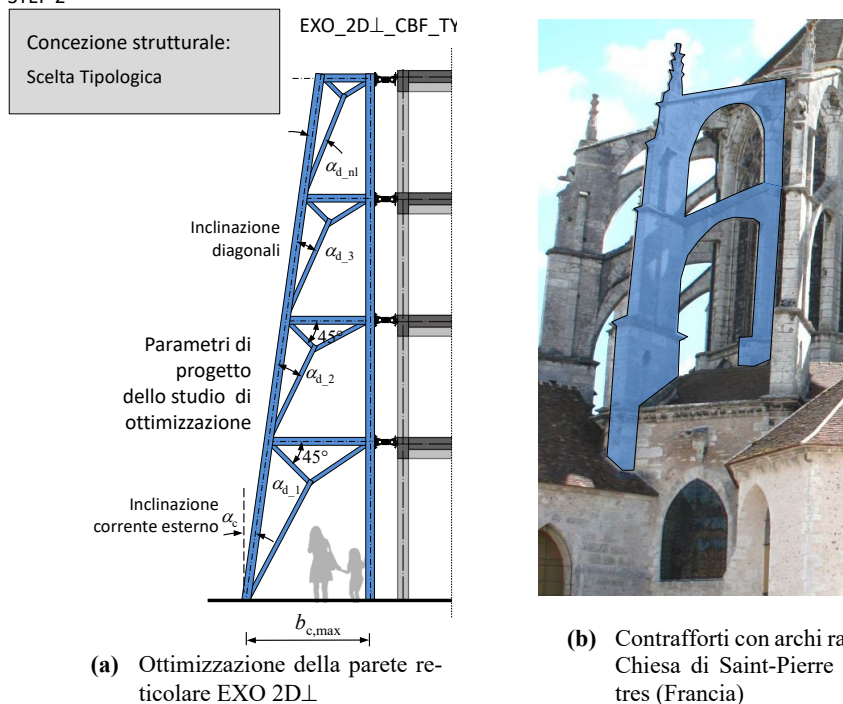


Fig. 3. Scelta tipologica globale: parete di taglio

La concezione strutturale termina con la scelta dimensionale ovvero con la definizione di una dimensione di primissimo tentativo da assegnare al sistema e ai suoi elementi componenti attraverso l'utilizzo di opportuni rapporti di forma (r). I rapporti di forma, che costituiscono una rivisitazione moderna della teoria delle proporzioni, si differenziano in globali, se riferiti all'intero sistema, elementari se riguardano membrature presenti nell'organismo strutturale e locali, se riferiti alla sezione trasversale in parete sottile. I rapporti di forma sono desunti dall'esperienza diretta o per analogia strutturale, riferendosi ad applicazioni simili, come gli esempi riportati nel §2. Tali rapporti possono

altresì essere ottenuti da prescrizioni normative o da analisi parametriche semplificate condotte su interi sistemi strutturali o su parti di essi [15].

Il sistema costruttivo-Kit proposto a basso “impatto” ed alto livello di prefabbricazione è descritto in Figura 5a per gli edifici multipiano in c.a. e in Figura 5b per gli edifici monopiano in c.a.p..

EXO 2D \perp CBF TY $f_x=1$ $f_y=1$ $f_z=1$

EXO_2D \perp \cup EXO_2D//

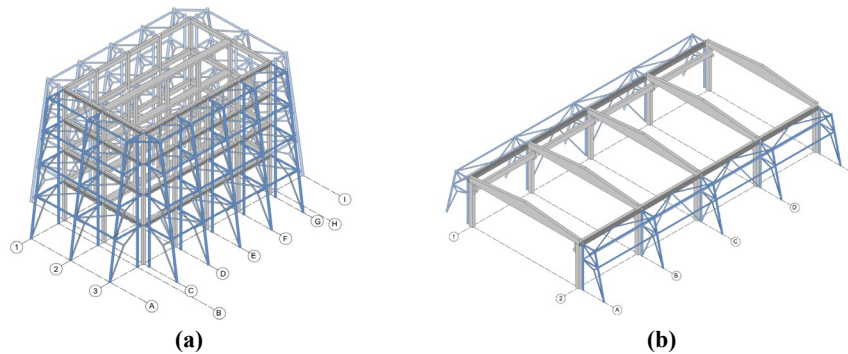


Fig. 4. Sistema costruttivo per edifici multipiano **(a)** e per edifici monopiano **(b)**

4 CONCLUSIONI

L’utilizzo degli esoscheletri, per l’adeguamento sismico degli edifici esistenti, costituisce una delle strategie di intervento di maggiore attualità, non solo perché è l’unica implementabile in maniera “sicura” senza interrompere il funzionamento/utilizzo della costruzione (interventi a basso impatto), ma anche perché può essere efficacemente adottato per il retrofit integrato, formale, energetico e funzionale dell’intera costruzione (deep renovation).

Tra le molteplici soluzioni tipologiche presenti in letteratura, nel presente lavoro, sono stati analizzati gli esoscheletri 2D ortogonali in acciaio che, realizzati con pareti di taglio reticolari poste ortogonalmente alla facciata della costruzione, consentono efficacemente di proteggere edifici con un limitato numero di piani. Lo stato dell’arte su questi sistemi ha evidenziato prerogative e limiti di applicazione degli esoscheletri ortogonali. Per ridurre tali limitazioni è stato concepito un sistema costruttivo a basso impatto e di rapida installazione che fosse coerente con il Task 1 del WP.5 del progetto di ricerca ReLUIIS 2022-24, in cui si inquadra il presente lavoro. Definito il tipo d’acciaio, la scelta tipologica ha condotto all’utilizzo di pareti di taglio a doppio portale asimmetrico del tipo Y-shaped bracing con profilo rastremato (EXO_2D \perp _CBF_TY), utilizzabili per il retrofit sia di edifici multipiano che monopiano, in abbinamento eventuale con gli esoscheletri 2D//.

Il presente studio, oltre a fornire utili indicazioni progettuali a coloro che volessero applicare tali sistemi, costituisce il presupposto indispensabile per la messa a punto di una specifica procedura di dimensionamento volta a condizionare l’elevato numero di parametri coinvolti nel processo progettuale.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il consorzio ReLUIIS ed il Dipartimento della Protezione Civile per il supporto scientifico ed economico fornito nell’ambito del “Progetto triennale ReLUIIS, DPC-ReLUIIS 2022-2024, working packages 5 (WP5): Interventi di rapida esecuzione a basso impatto ed integrati”.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Eurostat, (2001), “Owner-Occupied Dwellings by Type and Year of Construction of the Building” Eurostat, Luxembourg, 2001.
- [2] Landolfo R., Formisano A., Di Lorenzo G., Di Filippo A., Classification of european building stock in technological and typological classes, *Journal of Building Engineering*, 2022.
- [3] Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA), *Guideline for Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings*, 2001.
- [4] Comité Européen du Béton – Fédération Internationale du Béton (CEB-FIB), *Seismic assessment and retrofit of reinforced concrete buildings*, CEB-FIB, 24. State-of-art Report, Task Group 7.1, 2003.
- [5] Dolce M., Manfredi G., *Guidelines for Repairing and Strengthening of Structural Elements, Cladding and Partitioning systems*, Department of Civil Protection (DPC)/Consortium of the Network of University Laboratories of Seismic Engineering (ReLUIS), 2011.
- [6] The European Union, “Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. In Mainstreaming Sustainable Development into EU Policies: Review of the European Union Strategy for Sustainable Development”, European Union: Brussels, Belgium, 2009.
- [7] Ministero delle infrastrutture e della mobilità sostenibili (MIT), (2020), Decreto Ministeriale numero 24 del 09/01/2020: “Sisma Bonus - Linee guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni nonché le modalità per l’attestazione, da parte di professionisti abilitati, dell’efficacia degli interventi effettuati”. Modifiche al DM 58 del 28/02/2017.
- [8] Lamperti Tornaghi M., Lori A., Negro P., *Balanced evaluation of structural and environmental performances in building design*, Buildings, 2018.
- [9] Passoni C., Marini A., Belleri A., Menna C., *Redefining the concept of sustainable renovation of buildings: State of the art and an LCT-based design framework*, Sustainable Cities and Society, 2021.
- [10] Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA), *Standards for evaluation of seismic capacity and guidelines for seismic rehabilitation of existing reinforced concrete buildings*, 1977 (revised 1990) (in Japanese).
- [11] Departments of the Army, the Navy, and the Air Force (DOA-N-AF), *Seismic Design Guidelines for Upgrading Existing Buildings*, Army TM 5-809-10-2, Navy NAVFAC P-355.2, AFM 88-3, Chap. 13, Sec. B. Washington, D.C.: U.S., Government Printing Office, 1988.
- [12] Di Lorenzo G., Colacurcio E., Di Filippo A., Formisano A., Massimilla A., Landolfo R., *State-of-the-art on steel exoskeletons for seismic retrofit of existing RC buildings*, *Ingegneria Sismica*, 2020.
- [13] Benyus J. M., *Biomimicry. Innovation Inspired by Nature*, 2nd ed William Morrow and Company, 2002.
- [14] Di Lorenzo G., Formisano A., Terracciano G., Landolfo R., *Iron alloys and structural steels from XIX century until today: Evolution of mechanical properties and proposal of a rapid identification method*, *Construction and Building Materials*, 2021.
- [15] Di Lorenzo G., Formisano A., Landolfo R., *On the origin of I beams and quick analysis on the structural efficiency of hot-rolled steel members*, *The Open Civil Engineering Journal*, 2017.

KEYWORDS

Orthogonal Exoskeleton, Low impact, Accessibility, Integrated Approach, Concentric Y brace frame, Structural rehabilitation, Existing structures.