



Progetto DPC-ReLUIS 2022-2024

Wp5: Interventi di rapida esecuzione a basso impatto ed integrati

APPLICAZIONE DI INTERVENTI CONDOTTI DALL'ESTERNO AD UN CASO STUDIO - EDIFICIO RESIDENZIALE IN MURATURA DI MATTONI FORATI

UR: UNIBG, prof. Alessandra Marini

Gruppo di lavoro: Simone Labò, Chiara Passoni, Jacopo Zanni, Michele Milesi, Andrea Belleri
Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate, Università degli studi di Bergamo

UR: UNINA, prof. Giuseppe Brandonisio

Gruppo di lavoro: Bruno Calderoni, Gaetana Pacella, Antonio Sandoli, Clelia Esposito
*Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli studi di Napoli
"Federico II"*

SOMMARIO

1. Introduzione.....	3
2. Descrizione dell'edificio di riferimento	6
Geometria dell'edificio di riferimento.....	6
Sistema strutturale e proprietà dei materiali.....	7
Modellazione ad elementi finiti dell'edificio esistente.....	9
Valutazione della vulnerabilità sismica dell'edificio esistente	13
Valutazione delle prestazioni energetiche dell'edificio esistente	18
3. Strategie di intervento integrate tramite esoscheletri	19
SOLUZIONE 1	25
SOLUZIONE 2	33
SOLUZIONE 3	42
SOLUZIONE 4	50
Confronto tra le differenti soluzioni strutturali	60
4. Strategie di intervento integrate tramite isolamento alla base.....	68
Premessa.....	68
Interventi proposti.....	68
Progetto del sistema di isolamento	70
Modellazione ed analisi lineare con il software MidasGen dell'edificio sismicamente isolato alla base	
71	
Verifiche di sicurezza e funzionalità dell'edificio isolato alla base	74
Vulnerabilità sismica e classe di rischio dell'edificio isolato alla base	78
Messa in opera del sistema di isolamento sismico.....	79
5. Considerazioni conclusive	87
6. Bibliografia	88
Appendice A1	90

Premessa

Questo report documenta la ricerca condotta dalle Unità di Ricerca dell'Università degli Studi di Bergamo e dell'Università degli Studi di Napoli relativamente al Progetto ReLUIS-DPC 2019–2021-WP5 “Interventi di rapida esecuzione di basso impatto e integrati”.

La ricerca è finalizzata a proporre e valutare soluzioni alternative per la riqualificazione integrata di edifici esistenti, condotta dall'esterno, nel rispetto dei principi Life Cycle Thinking (quali ad esempio facilità di montaggio e smontaggio, perdite ridotte e riparabilità, riciclabilità e riuso). Tali aspetti sono critici nel determinare la fattibilità di un intervento e nella transizione verso un approccio più sostenibile alla ristrutturazione del patrimonio edilizio esistente.

1. Introduzione

Il recupero degli edifici esistenti rappresenta una priorità nel panorama europeo, dove si stima che gli edifici odierni rappresentino l'85% del patrimonio edilizio del 2050 [1]. Tali edifici presentano oggi molteplici carenze di tipo architettonico, energetico, strutturale e funzionale. La maggior parte di essi ha esaurito la loro vita utile nominale (50 anni) e necessita urgentemente di interventi di riqualificazione. L'approccio tradizionale al recupero delle strutture esistenti consiste solitamente in un approccio non coordinato e settoriale, che porta a soluzioni di dubbia efficacia: con un solo recupero energetico ed architettonico si rischia il danneggiamento, o addirittura il crollo, delle strutture in caso di sisma, come mostrato negli ultimi eventi sismici italiani; allo stesso modo, un solo recupero strutturale non abbinato ad un intervento energetico, rappresenta un'occasione sprecata in una società che vede tra i suoi obiettivi primari la riduzione delle emissioni di carbonio [2].



Figura 1 - Effetti di un approccio non coordinato e settoriale alla riqualificazione.

Nell'ambito del *Progetto ReLUIS-DPC 2019–2021-WP5*, questo studio è finalizzato a proporre degli esempi di soluzioni di recupero integrato per gli edifici in muratura del secondo dopoguerra che combinino i benefici degli interventi antisismici ed energetici e che permettano di sfruttare al massimo i benefici derivanti da un cantiere condiviso, quali la gestione delle risorse e dei noleggi dell'attrezzatura da cantiere, il costo delle finiture, ecc.

Al fine di proporre soluzioni che fossero di rapida esecuzione e “a basso impatto” sulla vita degli abitanti, tutte le soluzioni proposte sono state concepite per essere applicate dall'esterno, senza necessitare della rilocazione degli abitanti. Nel **Capitolo 3** sono stati quindi proposti dall'Università degli Studi di Bergamo degli interventi ad esoscheletro realizzati con materiali differenti e con due diverse concezioni strutturali: a setti o a guscio. Nel primo caso, elementi sismo resistenti discreti, o setti, sono stati disposti lungo il perimetro dell'edificio; nel secondo caso, si è sfruttata l'estensione della facciata per applicare un sistema resistente diffuso, con funzionamento a guscio, lungo tutto lo sviluppo della facciata. Il fatto di considerare sistemi a guscio rispetto a sistemi a pareti comporta una riduzione dello spessore degli elementi aggiuntivi e del sistema di fondazione, poiché viene sfruttata l'estensione del guscio per ridurre l'entità dei flussi di sforzi ai piani e in fondazione. In

questo caso, sono solitamente richiesti dei pali aggiuntivi in corrispondenza dei soli spigoli dell'edificio [2]. Nel **Capitolo 4** è invece proposto dall'Università degli Studi di Napoli un intervento di isolamento alla base.

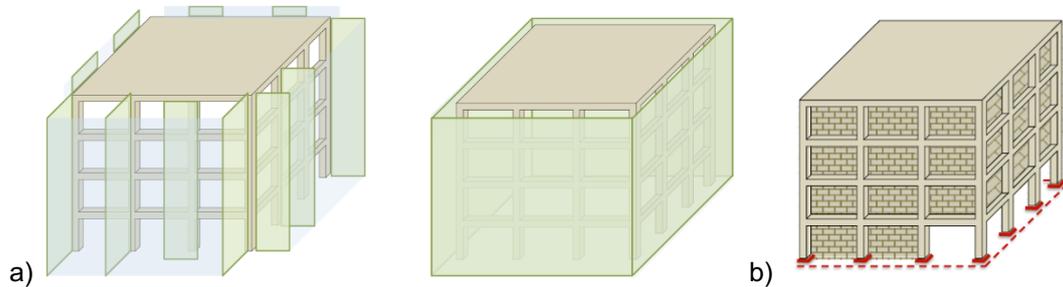


Figura 2 - Esoscheletri a pareti e a guscio (a), isolamento alla base (b).

Per quanto riguarda invece gli impatti ambientali ed economici delle soluzioni, in questo report si è voluto mettere in evidenza l'efficacia di una progettazione basata sui principi del Life Cycle Thinking (LCT), cioè di principi progettuali che, se applicati in fase di concezione iniziale delle soluzioni di rinforzo, permettano di ridurre gli impatti dell'edificio lungo tutta la sua vita utile, a partire dall'approvvigionamento del materiale, alla costruzione, fino alla fase di utilizzo e fine vita [3, 4].

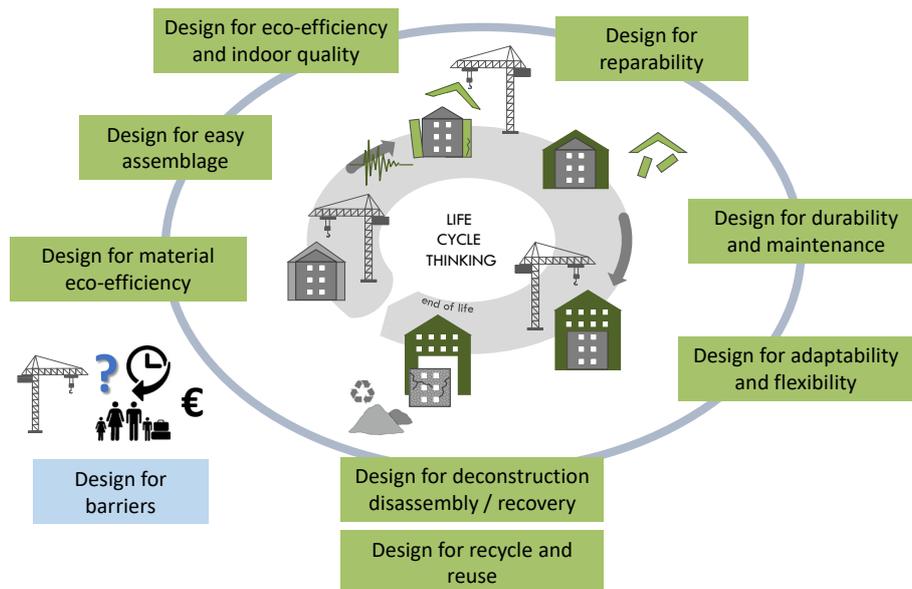


Figura 3 - Approccio Life Cycle Thinking per la progettazione di interventi di recupero sostenibili ed a basso impatto.

Alcuni di questi principi consistono nell'utilizzare materiali eco-efficienti, ad esempio rinnovabili, riciclati o riutilizzati; nel considerare soluzioni facilmente montabili e smontabili che permettano una decostruzione controllata a fine vita con il riutilizzo degli elementi applicati, ad esempio impiegando soluzioni a secco, prefabbricate, con elementi e connessioni standardizzate; e nel prevedere sistemi con ridotta manutenzione e che siano facilmente adattabili nel corso della vita dell'edificio. Per quanto riguarda i danni da terremoto o altre calamità naturali è possibile prevedere già in fase di progettazione dei sistemi in grado di limitare i danni agli elementi strutturali e non strutturali. Questo tipicamente è possibile considerando due possibili strategie: 1- progettare elementi strutturali che siano in grado di concentrare il danno e siano facilmente riparabili o sostituibili a valle di un terremoto, ricorrendo ad esempio a connessioni dissipative collocate tra i nuovi elementi sismo resistenti e

l'edificio esistente; 2- considerare target prestazionali molto stringenti per la struttura che permettano agli edifici di rimanere in campo elastico anche per sollecitazioni sismiche di grande entità (es. all'SLV o all'SLC). Per valutare l'efficacia dell'applicazione di un approccio LCT, sono state proposte diverse soluzioni ispirate ai principi del LCT, e se ne è effettuata una valutazione comparativa sia in termini economici che di impatti ambientali. È stata inoltre introdotta una procedura semplificata per il calcolo degli impatti ambientali degli interventi strutturali basata sulle Etichette ambientali di prodotto (EPD – Environmental Product Declaration) [5].

Nel report vengono dunque proposte cinque differenti soluzioni di intervento integrato energetico e strutturale. **Tutte le soluzioni sono concepite per essere realizzate dall'esterno, evitando così la rilocalizzazione degli abitanti. Per un confronto efficace delle diverse tecniche, tutte le soluzioni sono applicate allo stesso edificio caso studio in muratura del dopoguerra e sono progettate per avere le stesse prestazioni strutturali ed energetiche (*iso-performance*)** (fatta eccezione per la Soluzione 1 che è caratterizzata da diverse prestazioni strutturali a causa di particolari esigenze architettoniche).

Dal confronto fra le tecniche di retrofit alternative, il report si prefigge di rappresentare un utile riferimento per affiancare professionisti nella transizione verso un processo di ristrutturazione che favorisca sicurezza, sostenibilità e resilienza. A tal fine, come compendio del presente report, sono state anche allegate delle schede che mettono in rilievo le principali criticità strutturali della tipologia edilizia considerata e forniscono informazioni pratiche e riferimenti bibliografici per la modellazione analitica e numerica di tali criticità e per la loro risoluzione (**Allegato 1**).

2. Descrizione dell'edificio di riferimento

Il caso studio in oggetto è un edificio residenziale in muratura costruito negli anni '50 in provincia di Bergamo e rappresenta un tipico esempio di edilizia popolare del II dopoguerra. Le viste prospettiche dell'edificio allo stato di fatto sono mostrate in Figura 4. Tutte le assunzioni fatte in seguito si basano su informazioni ottenute tramite la documentazione disponibile e sopralluoghi condotti in situ.

Dal punto di vista sismico, la struttura si trova in una zona sismica di media intensità ($a_g=0.109$ g), con categoria di sottosuolo "C" e categoria topografica "T1" [6].

In accordo con l'attuale normativa [6], dato l'uso residenziale dell'edificio, si considerano una vita utile nominale (V_N) di 50 anni e una classe d'uso "II"; di conseguenza, per la definizione dello spettro di risposta si considera un periodo di riferimento (V_R) pari a 50 anni (NTC 2018). La PGA (accelerazione massima su suolo di riferimento) prevista a SLV è pari a 0.158 g.



Figura 4 - a) Ortofoto con localizzazione dell'edificio (©GoogleMaps) (in alto), b) viste prospettiche (©GoogleMaps).

Geometria dell'edificio di riferimento

La struttura ha pianta simmetrica di forma rettangolare (20.8x9.5) m e presenta una sporgenza di 1 m nella parte centrale della facciata nord. In elevazione presenta un piano seminterrato adibito a cantine, tre piani fuori terra (con altezza interpiano di 3.2 m e altezza in gronda di 10.6 m) che ospitano due appartamenti ciascuno, un piano sottotetto non accessibile con altezza media di 1.40 m. L'accesso ai piani avviene dal vano scala posto in posizione centrale sul lato nord. Sul lato sud ogni piano ospita un balcone lungo 7 m con sbalzo di 1 m. La superficie totale è pari a circa 179 mq per piano. La geometria dell'edificio è riportata in Figura 5.

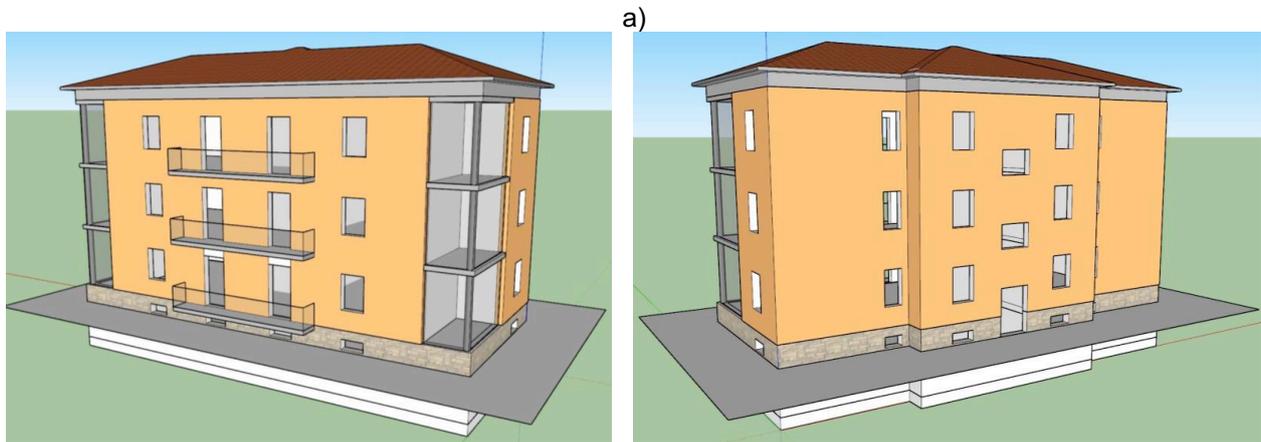
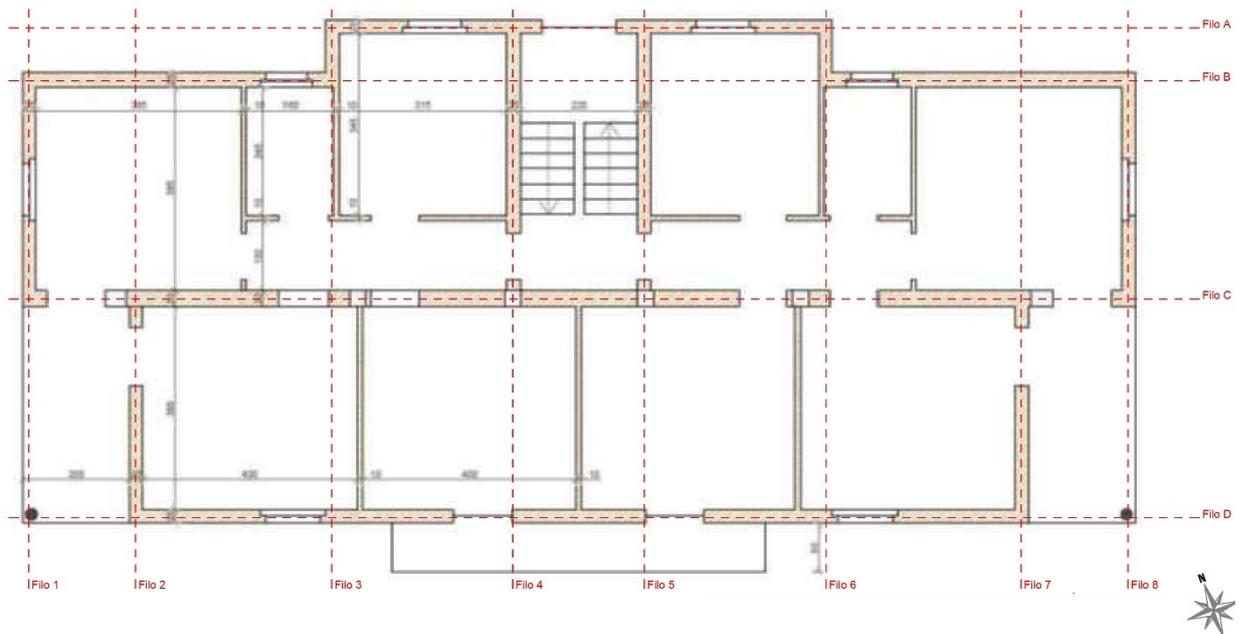


Figura 5 - a) Pianta dell'edificio; b) Viste 3D dell'edificio (da modello architettonico in SketchUp).

Sistema strutturale e proprietà dei materiali

La struttura portante, progettata per i soli carichi verticali, è costituita da un sistema misto di murature perimetrali con mattoni forati (disposti in orizzontale) legati con malta a q.li 2 di cemento R500 e due telai di spina in c.a. (con pilastri 30x30cm e travi 30x40cm) interrotti in corrispondenza del vano scala da una parete in muratura portante; il piano seminterrato è invece costituito esclusivamente da muri perimetrali e di spina in calcestruzzo debolmente armato di spessore medio 40-50 cm. I solai di piano sono in laterocemento con travetti prefabbricati per un'altezza totale di 16.5 cm, con cordoli perimetrali in c.a. da (40x20) cm; la copertura a padiglione non controventata è realizzata con orditura lignea; il vano scala è costituito da due pareti parallele (3.6m x 0.25m) in muratura a sostegno delle rampe in c.a. In corrispondenza dei loggiati negli angoli sud-est e sud-ovest sono presenti colonne realizzate con profili tubolari in acciaio (CHS-CF 219.1X10).

È opportuno sottolineare che in Italia i mattoni forati con fori orizzontali e malta cementizia sono stati ampiamente utilizzati per la costruzione di edifici di piccola o media altezza (fino a tre piani) dagli anni '50 alla fine degli anni '60. In quel periodo, il cosiddetto "boom economico", vennero rapidamente erette ampie porzioni della periferia cittadina con riferimento a protocolli di edilizia sociale, sviluppati per sostenere immobili a basso costo. Tali edifici, spesso costruiti con materiali di scarsa qualità, sono stati progettati per raggiungere prestazioni strutturali piuttosto elementari, senza tener conto della sicurezza e della resilienza sismica (che non erano contemplate dalle normative

dell'epoca in gran parte del territorio europeo e nazionale). Ricerche recenti hanno anche evidenziato che, oltre che per il patrimonio immobiliare di social housing, questa tecnica è stata adottata anche per velocizzare la fase di costruzione in molti altri interventi dell'epoca [7, 8, 9].

La presenza di muratura portante realizzata con mattoni forati disposti con fori orizzontali rappresenta sicuramente la particolarità principale dal punto di vista strutturale dell'edificio in oggetto; tale caratteristica verrà valutata con particolare attenzione in fase di definizione della capacità dell'edificio nello stato di fatto. I rilievi effettuati successivamente ai recenti terremoti (es. terremoto di Salò (BS) del 2004) hanno infatti mostrato che gli edifici costruiti con questa tipologia costruttiva hanno manifestato frequentemente un pessimo comportamento quando soggetti ad azioni sismiche. In particolare, le pareti realizzate con questa tecnica costruttiva hanno esibito un meccanismo di rottura estremamente fragile, dovuto allo schiacciamento del piede del maschio stesso con conseguente perdita di capacità nei confronti dei carichi verticali [9].

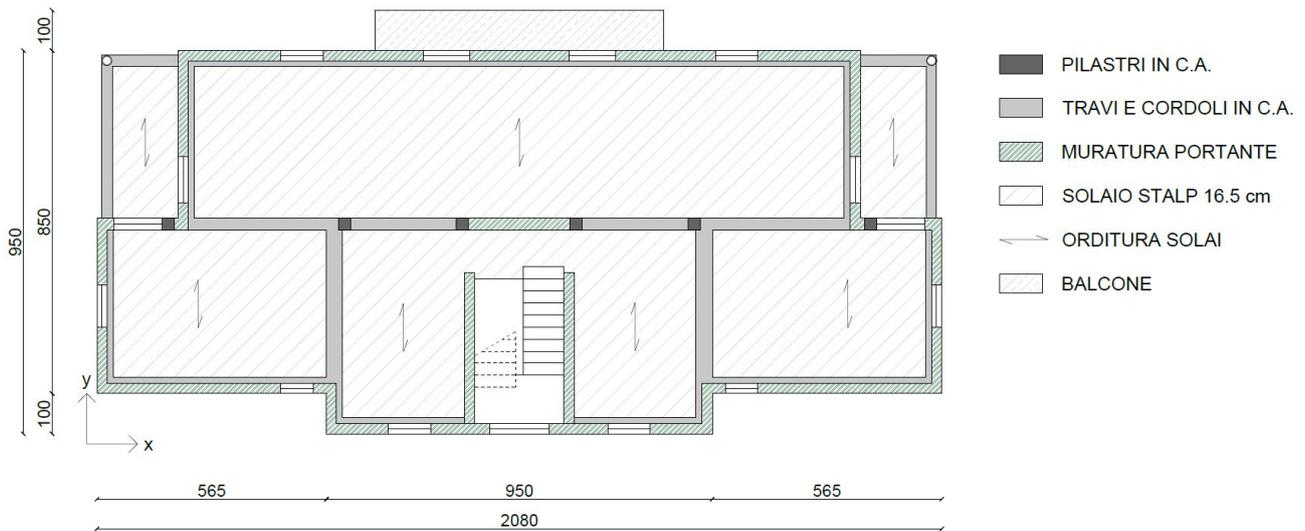


Figura 6-Pianta del piano tipo con indicata l'organizzazione strutturale

Dal punto di vista energetico l'edificio è sprovvisto di isolamento termico e sia le chiusure opache che quelle trasparenti offrono scarse prestazioni in termini di conduttività e trasmittanza, oltre che la presenza di numerosi ponti termici. Gli appartamenti dispongono di sistemi di riscaldamento autonomi con caldaie a metano e radiatori.

Sulla base delle prove condotte in situ, della documentazione di riferimento e della prassi costruttiva dell'epoca, le strutture in c.a. (travi, cordoli, pilastri, muri del seminterrato) si ipotizzano realizzate in calcestruzzo C20/25 armato con acciaio FeB32k.

Data la discreta conoscenza di geometrie, materiali e dettagli strutturali, nell'analisi della struttura in esame è possibile assumere un Livello di conoscenza LC2, cui è associato un fattore di confidenza (FC) pari a 1.20 da adottare per la modellazione e le verifiche degli elementi strutturali [6].

Modellazione ad elementi finiti dell'edificio esistente

Il modello agli elementi finiti è stato sviluppato con il software MidasGen [10] (Figura 8), sulla base delle indicazioni sintetizzate in Figura 7; le schede citate in Figura 7 fanno riferimento all'**Allegato 1** al presente report.

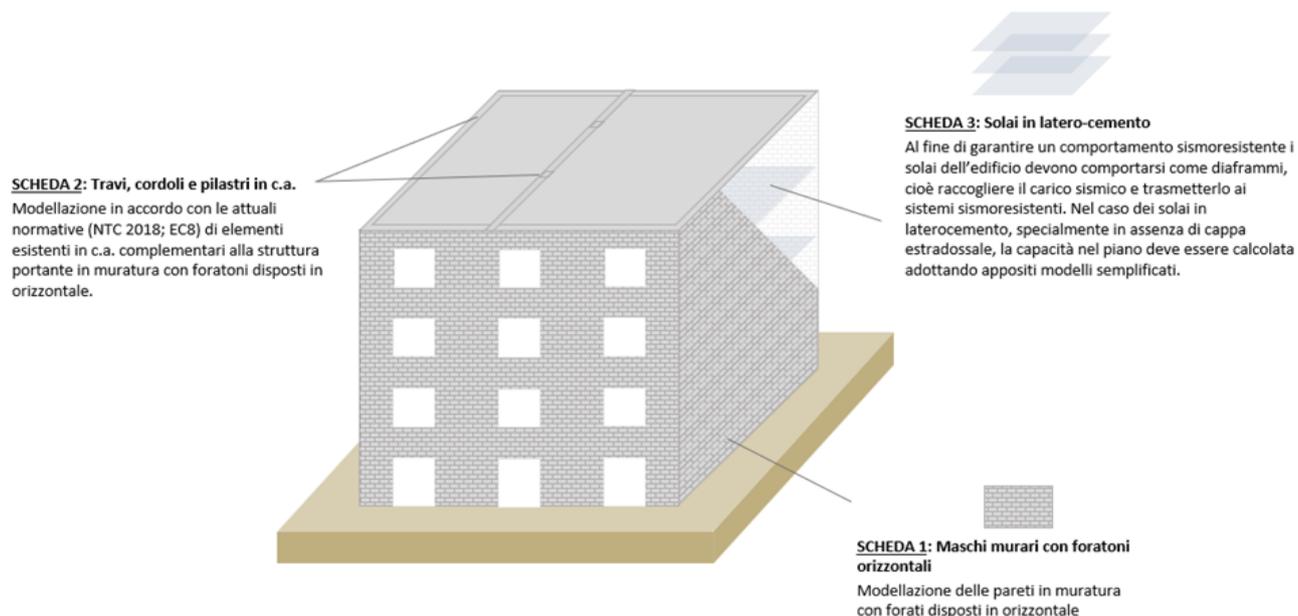


Figura 7 - Inquadramento delle schede realizzate per la modellazione del caso studio nello stato di fatto. Le schede fanno riferimento all'**Allegato 1** al presente report.

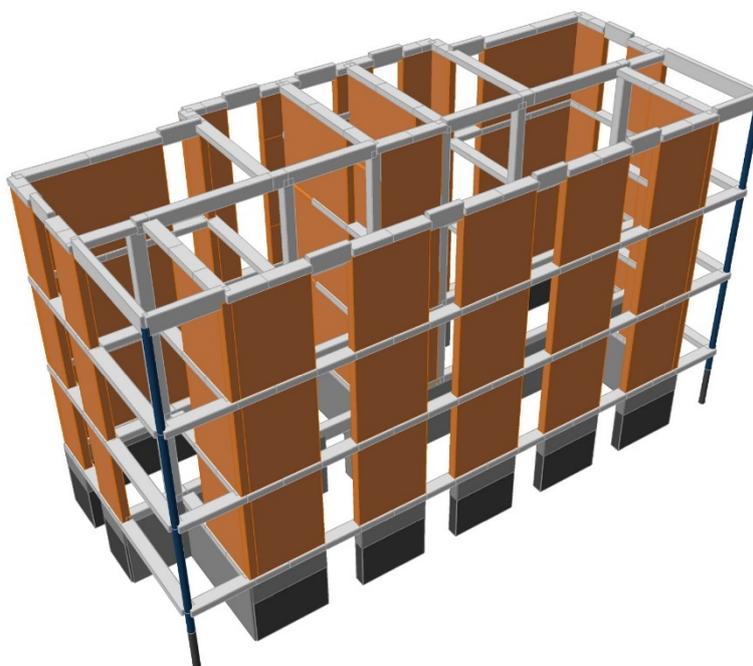


Figura 8 - Modello ad elementi finiti dell'edificio esistente.

Data la regolarità in pianta ed in elevazione della struttura, per la modellazione delle pareti in muratura è stato adottato un approccio a telaio equivalente.

Sia gli elementi in muratura che quelli in calcestruzzo armato sono stati modellati come elementi tipo *Beam* con deformabilità a flessionale e a taglio.

Per quanto concerne i maschi murari, il comportamento non-lineare a taglio e a pressoflessione è stato modellato per mezzo di cerniere plastiche a plasticità concentrata tipo FEMA. Per la caratterizzazione dei legami di comportamento si è fatto riferimento alla procedura descritta nella **Scheda 1 dell'Allegato 1**.

Lo studio del comportamento a presso-flessione nel piano dei maschi murari realizzati con elementi con fori orizzontali ha richiesto un approfondimento con ricorso a prove sperimentali volte a verificare la reale duttilità dei maschi murari [9]. Le prove sperimentali hanno mostrato una significativa riduzione della duttilità delle pareti rispetto alle indicazioni fornite dalle NTC, con rottura quasi-fragile e perdita di stabilità anche per i carichi verticali.

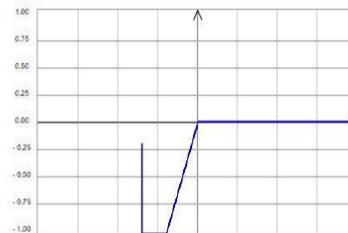
In Figura 9 vengono sintetizzate le proprietà della muratura adottate per la modellazione della rigidezza elastica nonché per la calibrazione dei legami di comportamento non lineare a taglio scorrimento, compressione e presso-flessione delle pareti.

Proprietà della muratura		
Resistenza a compressione	f_m	1,5 Mpa
Resistenza a taglio	τ_0	0,1 Mpa
Modulo elastico	E	2300 Mpa
Modulo di taglio	G	690 Mpa
Peso	w	12 kN/m ³
Resistenza a taglio piano primo	$\tau_{0\text{-piano1}}$	0,18 Mpa
Resistenza a taglio piano secondo	$\tau_{0\text{-piano2}}$	0,14 Mpa
Resistenza a taglio piano terzo	$\tau_{0\text{-piano3}}$	0,12 Mpa
Coefficiente di distribuzione verticale dello sforzo	K	0,85 Mpa

Legame non lineare a compressione e trazione

$$N_{rd} = \begin{cases} f_m L T & \text{compressione} \\ 0 & \text{trazione} \end{cases}$$

a)



Legame non lineare a taglio scorrimento

$$V_{t-s} = l' T t_0 = l' T (\tau_0 + 0.4 \sigma_n)$$

b)



Legame non lineare a pressoflessione

$$M_u = \frac{PL}{2} \left(1 - \frac{p}{k f_m} \right)$$

drift = 0.0025

c)

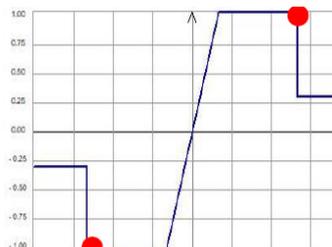


Figura 9 - a) Cerniera plastica assiale (solo compressione), b) Cerniera plastica a taglio, c) Cerniera plastica a flessione.

Nella modellazione a telaio equivalente il contributo resistente delle fasce murarie sopra e sottofinestra è stato trascurato, a favore di sicurezza, considerato lo spessore ridotto di queste ultime, necessario per l'alloggiamento dei corpi radianti e dei cassonetti per le tapparelle. È stata

invece considerata la presenza dei cordoli di piano in c.a. che collegano le pareti murarie forzandone l'accoppiamento e favorendo un comportamento di tipo fascia forte e maschio debole.

Per quanto riguarda i vincoli delle pareti in muratura, per tenere in considerazione l'esigua resistenza alle azioni fuori dal piano, è stato inserito un *Beam End Release* per svincolare le rotazioni della parete stessa nel fuori piano. Inoltre, data la presenza del piano seminterrato con pareti in c.a., con rigidezza molto superiore a quello della struttura in elevazione, è possibile assumere l'ipotesi di vincolo di incastro alla base delle strutture di elevazione.

Il vano scale, costituito da due pareti parallele in muratura portante a sostegno delle rampe in c.a., è stato modellato analogamente alle pareti perimetrali.

Il comportamento non-lineare di travi e pilastri è anch'esso rappresentato mediante cerniere plastiche a plasticità concentrata ed è stato modellato secondo la formulazione suggerita dall'Eurocodice 8 come indicato nella **Scheda 2 dell'Allegato 1** [11].

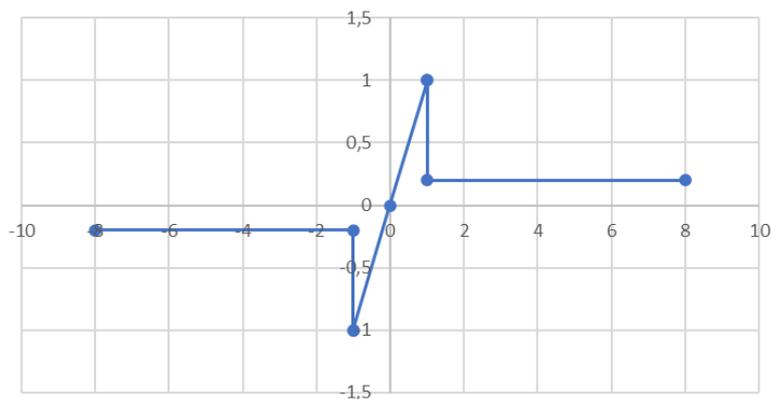
Si riporta a titolo esemplificativo il caso della trave di spina (30x40) cm del primo impalcato, che giace sul Filo C e si estende dal Filo 2 al Filo 4, armata con barre lisce longitudinali (4φ12 e 6φ16) e staffe φ6/15cm (Figura 10a,b).

	F/FY	D/DY
-E	-0,2	-8
-D	-0,2	-1,01
-C	-1	-1,01
-B	-1	-1
A	0	0
B	1	1
C	1	1,01
D	0,2	1,01
E	0,2	8

Yield Strength (FY)	
(+)	(-)
90,66853	90,66853

Yield Strain (DY)	
(+)	(-)
7,26E-05	7,26E-05

Cerniera plastica a taglio



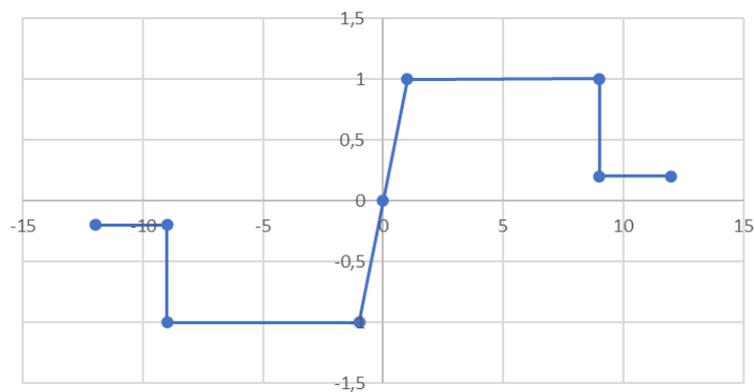
a)

	M/MY	D/DY
-E	-0,2	-12
-D	-0,2	-9
-C	-1,001	-9
-B	-1	-1
A	0	0
B	1	1
C	1,001	9
D	0,2	9
E	0,2	12

Yield Strength (MY)	
(+)	(-)
68,345	101,096

Yield Rotation (DY)	
(+)	(-)
0,007247	0,007247

Cerniera plastica a momento



b)

Figura 10 - a) Cerniera plastica a taglio, b) Cerniera plastica a flessione.

Per quanto concerne gli impalcati, è stata condotta una valutazione della loro resistenza nel piano in accordo al modello arco-catena proposto nella **Scheda 3 dell'Allegato 1**.

Si considera che l'impalcato sia in grado di esercitare un'efficace azione a diaframma grazie alla formazione del meccanismo arco-catena tra i maschi murari, come esemplificato nella Figura 11 per la direzione Y della sollecitazione sismica.

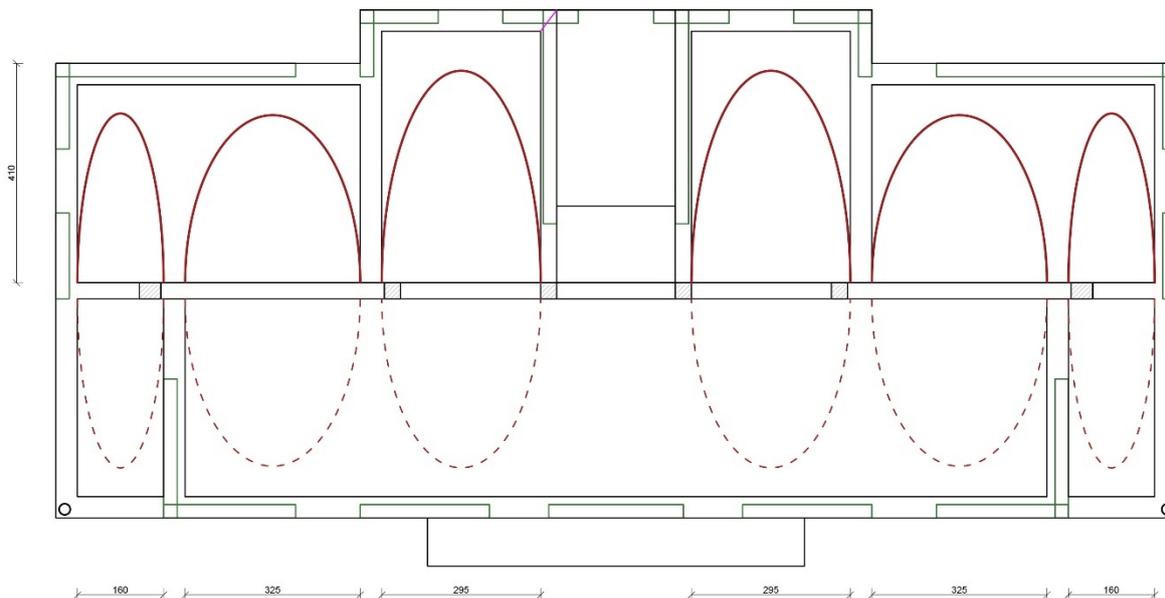


Figura 11 - Rappresentazione degli archi resistenti nel piano per la direzione Y (pre-intervento).

In particolare, sulla base della metodologia sviluppata nella scheda in allegato, la valutazione della capacità del solaio è stata condotta utilizzando i valori indicati nella Tabella 1.

Tabella 1 - Valori utilizzati nella valutazione della resistenza nel piano del solaio associata alla formazione di un meccanismo arco-catena.

$f_{c,b\perp}$	18	MPa	τ_{ud}	1.72	MPa
t_{eq}	35	mm	β	1.3	-
b^*	875	mm	G_c	15000	MPa
A_b	30625	mm ²	G_b	6800	MPa
E_{cappia}	23000	MPa	τ_{cd}	2	MPa
E_b	15000	MPa	f_t	1.47	MPa
A_{cappia}	35000	mm ²	α_1	0.33	-
f_c	20	MPa	α_2	1	-
A_{cord}	80000	mm ²	E_{cord}	30000	MPa
A_s	314	mm ²	E_s	210000	MPa
f_{yd}	391	MPa	A_{Tie}	0	mm ²

L'analisi ha evidenziato come il meccanismo che si manifesta per primo sia il meccanismo, associato al raggiungimento della capacità a taglio all'imposta dell'arco. L'azione massima sopportabile al piano risulta pari a 108.4 kN/m.

Per questo motivo, gli impalcato sono stati considerati rigidi nel loro piano e modellati come diaframmi infinitamente rigidi con verifica ex post dell'azione di taglio massima.

Valutazione della vulnerabilità sismica dell'edificio esistente

La risposta strutturale dell'edificio esistente viene valutata mediante analisi statica non lineare e l'analisi di vulnerabilità dello stesso viene condotta attraverso il metodo N2 [12, 6].

Le curve di capacità dell'edificio nelle direzioni principali X e Y sono rappresentate e descritte in Figura 12 e Figura 14. In particolare, In Figura 12 e Figura 14 sono rappresentate le domande di spostamento relative allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV con periodo di ritorno pari a 475 anni) e allo Stato Limite di Prevenzione del Collasso (SLC con periodo di ritorno pari a 2475 anni). Secondo la normativa vigente [6], la capacità dell'edificio esistente allo Stato Limite di Prevenzione del Collasso (SLC) si ottiene in corrispondenza dello spostamento laterale associato al raggiungimento della capacità di rotazione ultima di un elemento portante o all'innesco di un meccanismo di collasso (es. meccanismo di piano debole). La capacità dell'edificio a SLV è considerata raggiunta invece a $\frac{3}{4}$ del valore ricavato per SLC. Sia in direzione X che in direzione Y, la struttura esistente non soddisfa la domanda di spostamento a SLV e a SLC; pertanto, si rende necessario un intervento di rinforzo.

L'evoluzione della attivazione delle cerniere plastiche è riportata graficamente in Figura 13, dove viene rappresentato lo stato di danno dell'edificio per i punti significativi indicati nelle curve di capacità. Nel seguito viene riportata unicamente la curva associata alla distribuzione uniforme proporzionale alle masse, che è risultata la più gravosa tra quelle applicate.

Per il sisma agente in direzione X si osserva (Figura 13) che in corrispondenza di spostamenti molto ridotti avviene la plasticizzazione per taglio-scorrimento del maschio murario centrale al piano terra, seguita dalla progressiva plasticizzazione a taglio di tutti i maschi murari del filo D al piano terra e successivamente dalla plasticizzazione dei due maschi murari del filo B al piano terra, a questo punto si ha la formazione di un piano debole che porta al collasso della struttura per drift molto ridotti a causa della scarsa duttilità offerta dalla muratura. Si osserva inoltre che i maschi murari del filo A, essendo molto snelli, sono gli unici a plasticizzarsi per pressoflessione al piano terra.

Per il sisma agente in direzione Y si osserva (Figura 15) che in corrispondenza di spostamenti molto ridotti avviene la plasticizzazione a flessione dei maschi murari lungo i fili 1 e 8 al piano terra e a taglio-scorrimento dei maschi murari lungo i fili 2 e 7 al piano terra, seguita dalla plasticizzazione a taglio delle pareti del vano scale al piano terra, a questo punto, analogamente a quanto visto per la direzione X, si ha la formazione di un piano debole che porta al collasso della struttura per drift molto ridotti a causa della scarsa duttilità offerta dalla muratura.

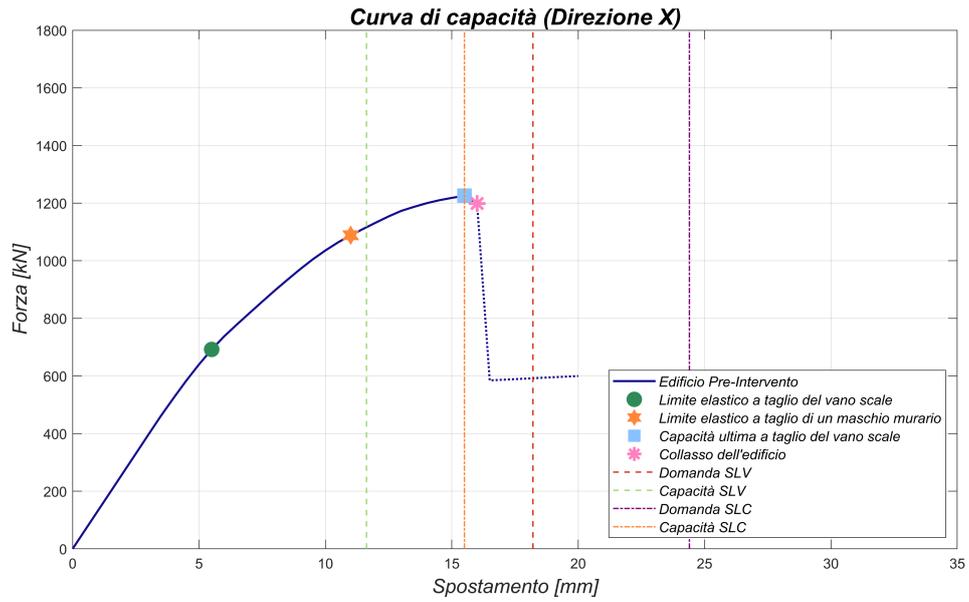


Figura 12-Curva di capacità per la direzione X con riportati in legenda i punti notevoli e le domande di spostamento a SLV e SLC.

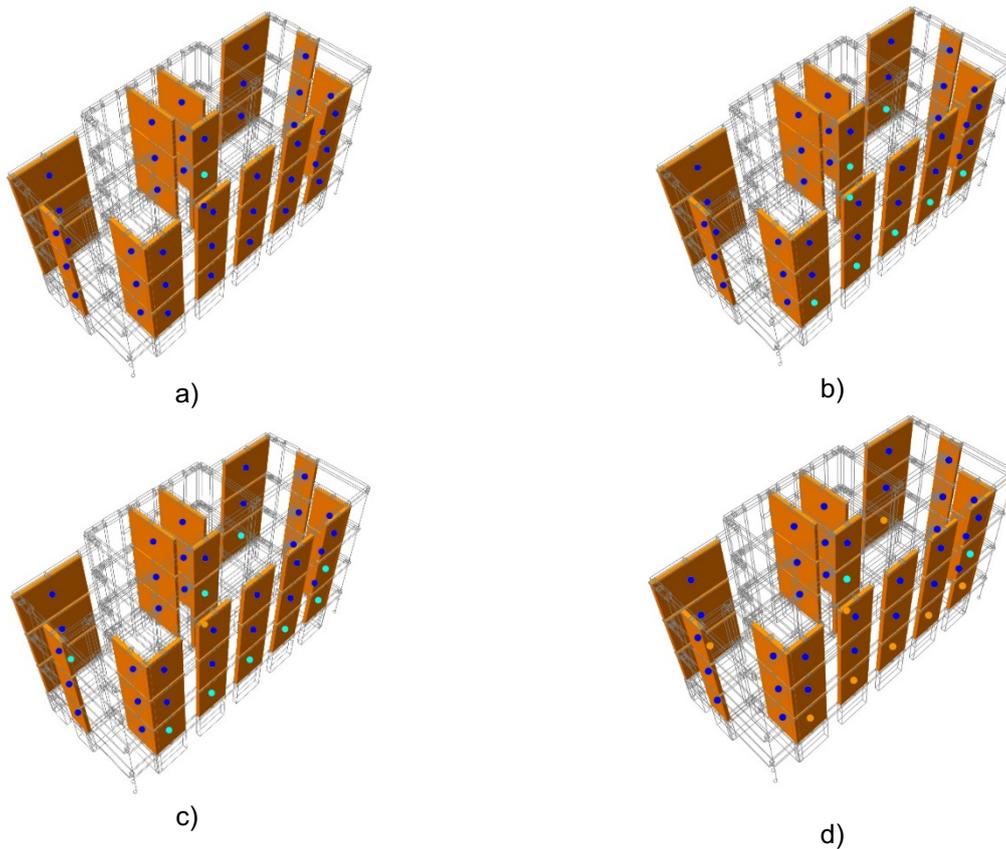


Figura 13-a) Limite elastico a taglio del vano scale, b) Limite elastico a taglio di un maschio murario, c) Raggiungimento della capacità ultima a taglio del vano scale, d) Collasso dell'edificio.

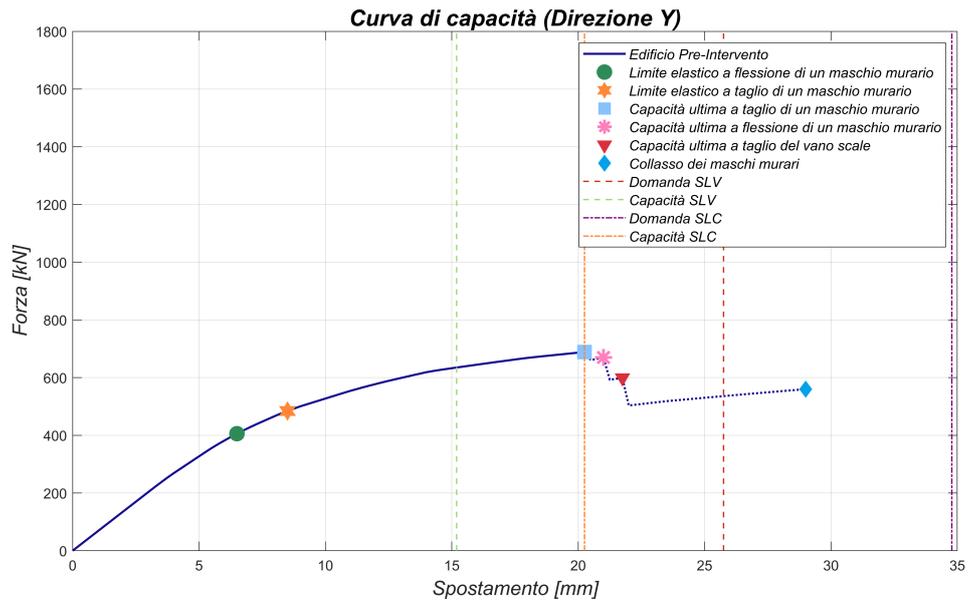


Figura 14- Curva di capacità per la direzione Y con riportati in legenda i punti notevoli e le domande di spostamento a SLV e SLC.

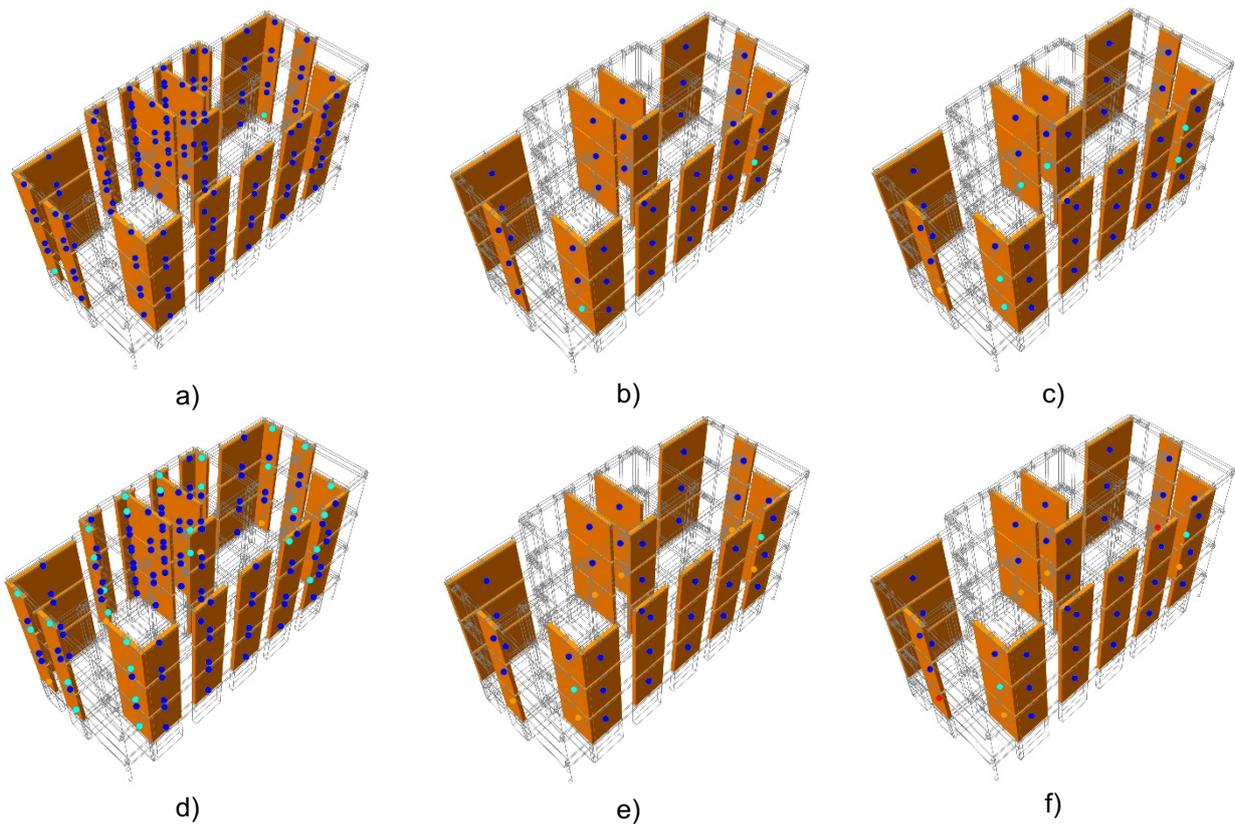


Figura 15-a) Limite elastico a flessione di un maschio murario, b) Limite elastico a taglio di un maschio murario, c) Raggiungimento della capacità ultima a taglio di un maschio murario, d) Raggiungimento della capacità ultima a pressoflessione di un maschio murario.

Si riporta infine la classificazione sismica, in accordo con il DM n.58 del 28/02/2017 – “Linee guida per la classificazione del rischio sismico nelle costruzioni”, con riferimento alla curva più sfavorevole tra quelle riportate, ovvero quella relativa alla direzione Y.

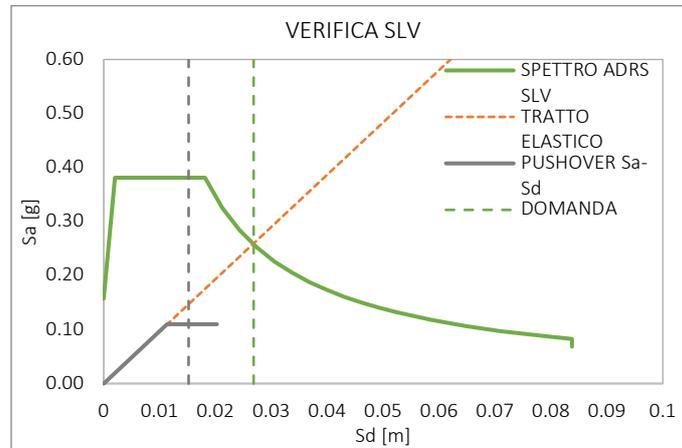


Figura 16-Rappresentazione grafica della verifica a SLV per l'edificio allo stato di fatto in direzione Y.

Stato Limite	d_{max}^* [m]	d_{SL}^* [m]	d_{max}^*/d_{SL}^*
SLV	0.0268	0.0152	1.77
SLD	0.0083	0.0114	0.73

Stato Limite	$S_e(T^*)$ [g]	F^*/m^* [g]	q^*
SLV	0.259	0.110	2.36

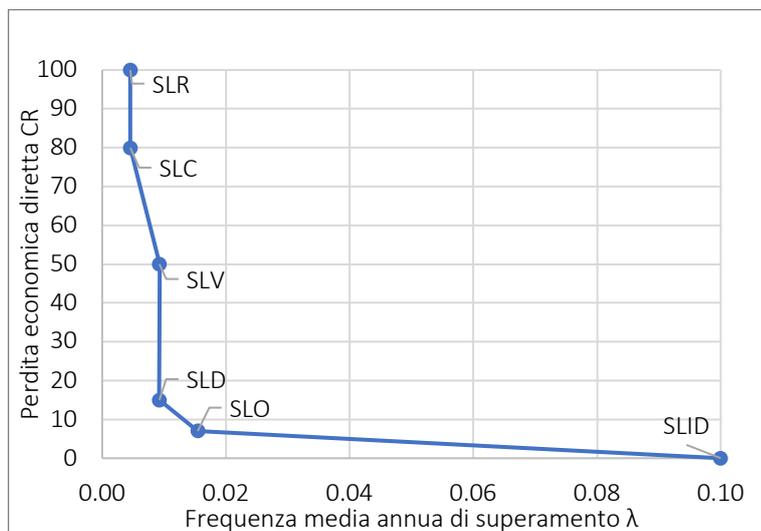
A SLV la verifica sarebbe soddisfatta per un sisma avente tempo di ritorno pari a 142 anni e $a_g=0.062$ g.

- indice di sicurezza a SLV: $\zeta_E = \frac{a_{g,SLV}}{a_{g(T_R,PvT=10\%)}^S} = \frac{0.093 \text{ g}}{0.158 \text{ g}} = 0.59$
- indice di sicurezza a SLD: $\zeta_E = \frac{a_{g,SLD}}{a_{g(T_R,PvT=63\%)}^S} = \frac{0.072 \text{ g}}{0.056 \text{ g}} = 1.30$

Assumendo il minore tra gli indici ricavati, ovvero quello per l'SLV, è possibile associare all'edificio nelle condizioni pre-intervento la classe di rischio sismico secondo la classificazione IS-V, ovvero la classe **C**.

IS-V	Classe IS-V
100%<IS-V	A+
100%<IS-V<80%	A
80%<IS-V<60%	B
60%<IS-V<45%	C
45%<IS-V<30%	D
30%<IS-V<15%	E
IS-V<15%	F

Si procede infine a calcolare l'indice associato alle perdite annue medie (PAM), dato dall'area sottesa dalla curva che mette in relazione le perdite economiche dirette (rapportate al costo di ricostruzione) e la frequenza media annua di superamento (λ).



SL	CR [%]	λ	PAM
SLR	100	0.0045	0.45
SLC	80	0.0045	0.45
SLV	50	0.0093	0.76
SLD	15	0.0092	0.76
SLO	7	0.0154	0.83
SLID	0	0.1	1.12

Figura 17-Curva delle perdite economiche dirette rapportate alla frequenza media annua di superamento. Nella tabella di destra sono riportati i valori utilizzati per la costruzione della curva.

L'indice PAM calcolato è pari a **1.12**, cui corrisponde la classe di rischio **B**.

PAM	Classe PAM
PAM < 0.5%	A+
0.5% < PAM < 1%	A
1% < PAM < 1.5%	B
1.5% < PAM < 2.5%	C
2.5% < PAM < 3.5%	D
3.5% < PAM < 4.5%	E
4.5% < PAM < 7.5%	F
7.5% < PAM	G

In conclusione, la classe di rischio per la struttura nelle condizioni pre-intervento, per azioni sismiche agenti in direzione Y, in accordo con le linee guida, corrisponde alla classe **C**.

Valutazione delle prestazioni energetiche dell'edificio esistente

(a cura dell'arch. Ettore Curto) [13]

La procedura di diagnosi energetica richiede una valutazione dell'edificio nel suo complesso, tenuto conto di tutti i servizi energetici ed impianti in esso presenti [13]. Il rilievo delle caratteristiche dell'edificio è stato effettuato con riferimento sia alle strutture disperdenti esterne sia ai sottosistemi impiantistici. L'analisi è stata eseguita applicando le specifiche tecniche UNI/TS 11300 ed adottando la modalità di valutazione A3 (Tailored Rating).

Dall'analisi effettuata risulta che l'edificio allo stato di fatto può essere classificato in classe **F**, con una prestazione energetica globale di 233.43 kWh/m²anno.

Tabella 2 - Prestazioni energetiche dello stato di fatto.

Indice di prestazione energetica globale non innovabile	EP _{gl,nren}	233,43	kWh _p /m ² anno
Classe energetica		F	
Spesa globale annua	S _{gl}	8166,73	€/anno

Tabella 3 -Costo di ogni servizio presente nell'edificio esistente.

Servizio	S [€]
Riscaldamento (H)	6871,05
Acqua calda sanitaria (W)	1295,69
Raffrescamento (C)	0
Ventilazione (V)	0
Illuminazione (L)	0
Trasporto (T)	0
Globale (G)	8166,73

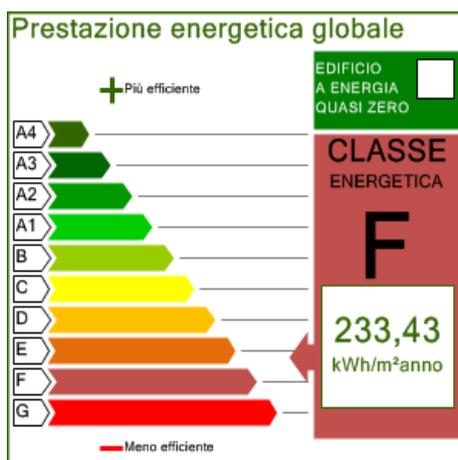


Figura 18 - Classe energetica (EP_{gl,nren}) dell'edificio esistente.

Nota: classe energetica indicativa, avente valenza di riferimento ed obiettivo, valutata, coerentemente con il calcolo di diagnosi, secondo la modalità di valutazione A3.

3. Strategie di intervento integrate tramite esoscheletri

(A cura dell'Università degli Studi di Bergamo)

Constatata la necessità di intervento, vengono di seguito illustrate brevemente le soluzioni di recupero integrato proposte.

Per quanto riguarda il retrofit strutturale, vengono progettate quattro differenti soluzioni:

- **Soluzione 1 – Esoscheletro composto da pareti sismo-resistenti di diversa tipologia:** il retrofit consiste in tre diverse tipologie di pareti sismo resistenti, concepite per rispondere a diverse esigenze funzionali ed architettoniche [13].
- **Soluzione 2 – Esoscheletro composto da pareti sismo-resistenti reticolari:** viene adottata una soluzione più tradizionale, che implementa nuove pareti sismo-resistenti installate in prossimità delle facciate dell'edificio. In particolare, vengono adottate pareti controventate in acciaio.
- **Soluzione 3 – Esoscheletro composto da pareti sismo-resistenti in profili di acciaio e pannello d'anima in lamiera:** la soluzione è simile alla soluzione 2, salvo che in questo caso si adottano pareti con pannelli d'anima in lamiera d'acciaio.
- **Soluzione 4 – Esoscheletro a guscio in legno:** viene adottato un nuovo guscio in legno che si estende su tutta la facciata, realizzato con pannelli XLAM e rinforzato con telai in acciaio in prossimità delle aperture. La tecnica è stata inizialmente sviluppata nell'ambito del Progetto di Ricerca Industriale "AdESA: una nuova soluzione per la riqualificazione energetica-strutturale-architettonica dell'edificio esistente". La progettazione di questo intervento si basa sull'applicazione del metodo di predimensionamento descritto in [14].

Per quanto riguarda le misure di efficientamento energetico, vengono previsti il posizionamento di uno strato di isolamento termico sulle pareti e in copertura e la sostituzione dei serramenti. Queste misure consentono di ridurre i consumi energetici dell'edificio ristrutturato, i suoi impatti ambientali e i costi durante la fase di utilizzo dell'edificio.

Tutte le soluzioni sono concepite come iso-prestazionali sia dal punto di vista strutturale che dal punto di vista dell'efficienza energetica. Tutte le soluzioni sono state inoltre concepite in accordo con i principi del Life Cycle Thinking (LCT), cioè adottano materiali rinnovabili (legno) o riciclati (acciaio) e tecnologie a secco, sono prefabbricate, facilmente montabili e smontabili e adottano sistemi di connessione standardizzate che permettono la riparabilità, lo smontaggio e il riutilizzo degli elementi a fine vita. Vengono infine considerati target prestazionali stringenti in termini di drift per ridurre il danno agli elementi strutturali e non strutturali a valle del terremoto.

Per quanto riguarda la modellazione dell'edificio post-intervento ed il predimensionamento degli esoscheletri, si è fatto riferimento alle indicazioni sintetizzate in Figura 19; le schede citate in Figura 19 fanno riferimento all'**Allegato 1** al presente report.

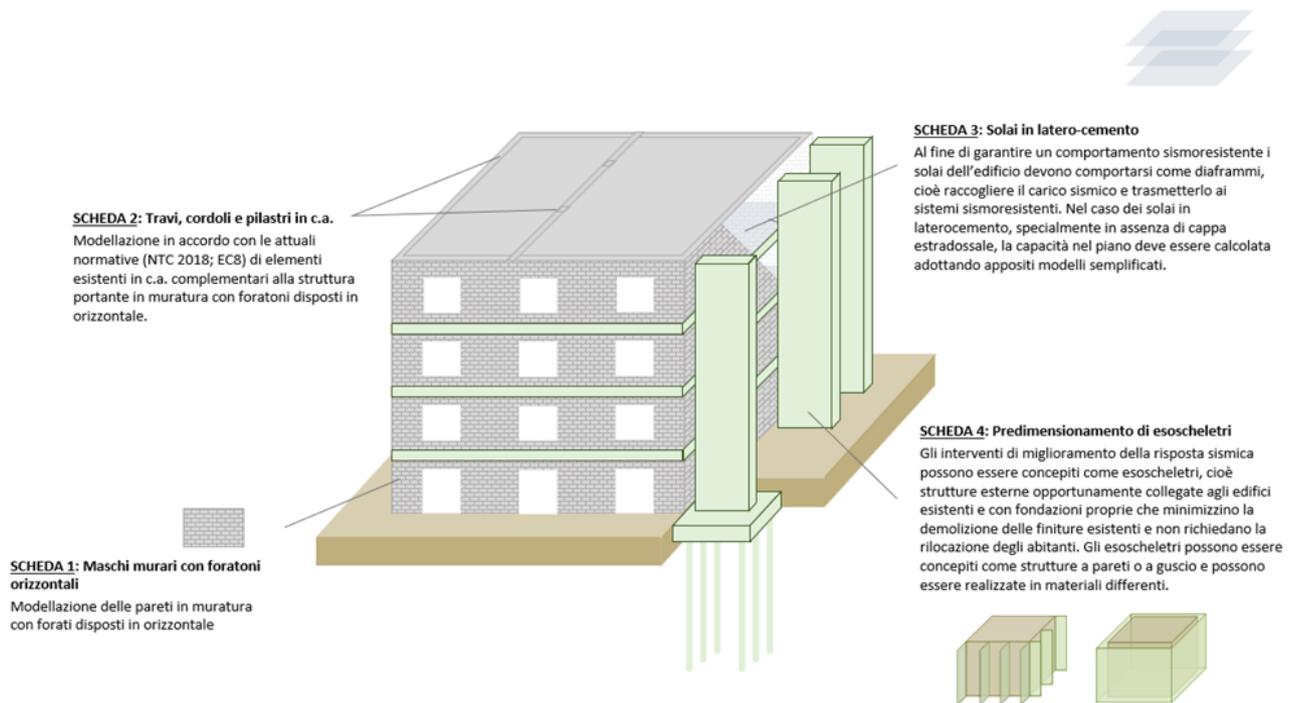


Figura 19 - Inquadramento delle schede realizzate per il predimensionamento dell'intervento e della modellazione del caso studio post intervento. Le schede fanno riferimento all'Allegato 1 al presente report.

Per tutte le soluzioni (ad eccezione della Soluzione 1, progettata da Prof. Ing. Paolo Riva [13] e vincolata da particolari esigenze architettoniche), si è adottato il metodo di predimensionamento illustrato nella **Scheda 4 dell'Allegato 1**, basato sugli spettri di progetto proposti in [15]. Attraverso l'impiego di tali spettri, che plottano la duttilità richiesta $\mu = \frac{\delta_{MAX}}{\delta_{y,1}}$ (rapporto tra lo spostamento massimo di progetto (δ_{MAX}) e lo spostamento a snervamento dell'edificio esistente ($\delta_{y,1} = \frac{F_{y,1}}{k_1}$)), in funzione del rapporto di rigidezze tra sistema di rinforzo e edificio esistente ($\tilde{\lambda} = \frac{\tilde{k}}{k_1}$) per determinati η , si stabilisce la rigidezza (\tilde{k}) del sistema rinforzato (edificio esistente + esoscheletro) e, pertanto, del solo esoscheletro ($k_2 = \tilde{k} - k_1$) (Figura 20).

Si riportano in Tabella 4 i dati di input per il caso in oggetto ed in Tabella 5 i dati di output dell'approccio semplificato.

È fondamentale notare che i parametri in Tabella 5 sono parametri che esprimono la rigidezza e la resistenza minima dell'esoscheletro, necessaria per il conseguimento dei target di progetto, e sono comuni a tutte le soluzioni di rinforzo strutturale. Gli elementi costituenti i singoli interventi proposti per il caso studio sono stati poi dimensionati in funzione della tipologia di esoscheletro impiegato, ad esempio a setti o a guscio, in legno o in acciaio, ecc. (come spiegato allo Step 2b della **Scheda 4 dell'Allegato 1**). A valle dello step 2b le rigidezze ottenute sono rimaste invariate rispetto allo step 2a.

I risultati di tale approccio sono stati poi verificati mediante un modello ad elementi finiti. Le curve di capacità così ottenute sono riportate in Figura 21. Le Soluzioni 2, 3, e 4 esibiscono le stesse prestazioni strutturali mentre la Soluzione 1 ha prestazioni strutturali maggiori.

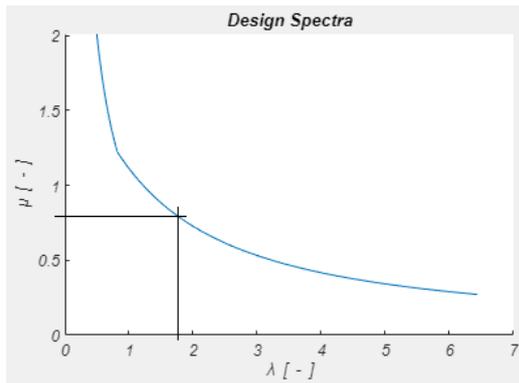


Figura 20 – Step 1: Applicazione degli spettri di predimensionamento per la direzione X [15].

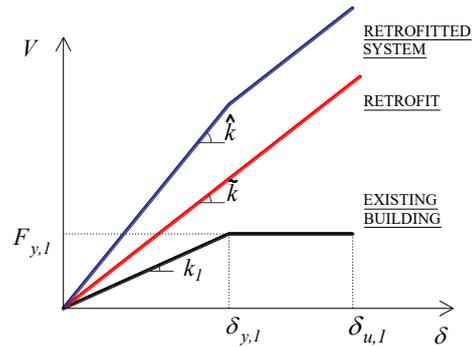
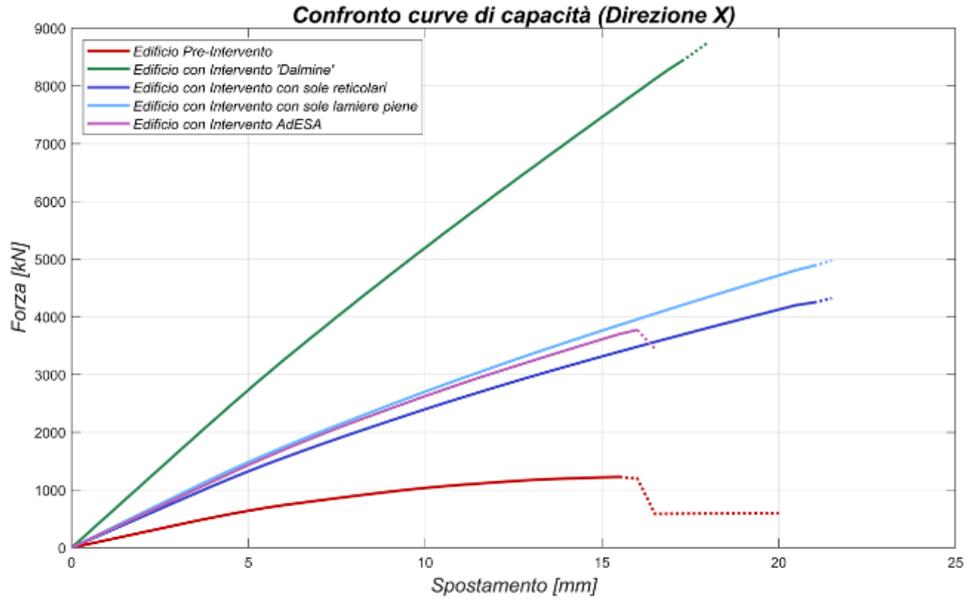


Tabella 4 -Parametri del sistema SDOF per l'edificio allo stato di fatto [6].

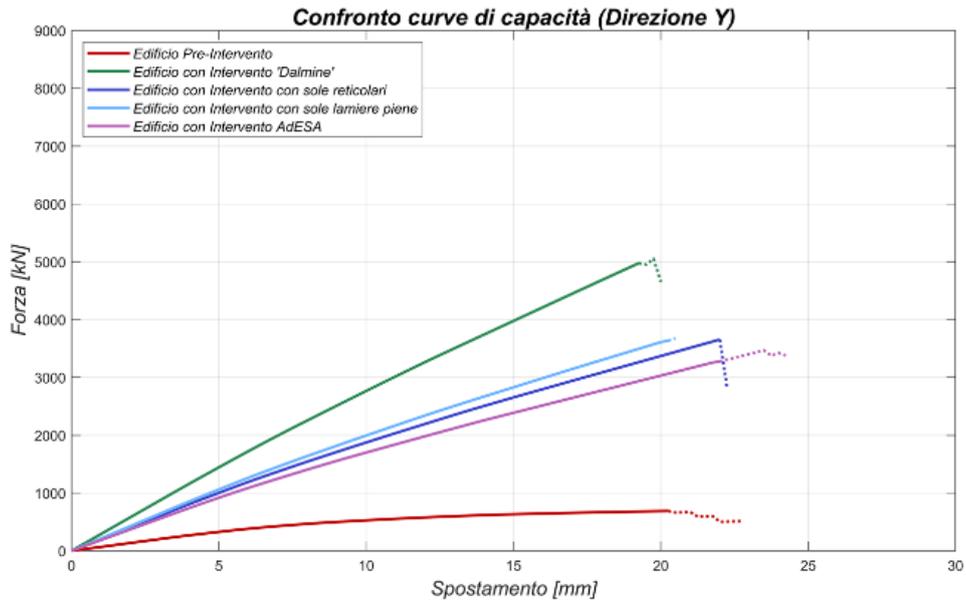
SDOF equivalente Stato di fatto (Step 0)				
	Masse +X		Masse +Y	
m_1	602	[kN/g]	602	[kN/g]
k_1	123133	[kN/m]	61892	[kN/m]
F_{y1}	1122	[kN]	623	[kN]
δ_{y1}	9.12	[mm]	10.06	[mm]
Γ	1	[-]	1	[-]
η	0.50	[-]	0.39	[-]

Tabella 5 -Parametri di output ottenuti dal metodo di predimensionamento proposto nella Scheda 4 dell'Allegato 1 [15].

Retrofit (Step 1 e Step 2)				
	Dir. +X		Dir. +Y	
\tilde{k}	225922	[kN/m]	159096	[kN/m]
	1.8 k_1	[-]	2.6 k_1	[-]
k_2	102790	[kN/m]	97204	[kN/m]
	0.8 k_1	[-]	1.6 k_1	[-]
\tilde{V}	2310	[kN]	2310	[kN]



a)



b)

Figura 21 - Confronto tra le curve di capacità pre-intervento e post intervento per la direzione X (a) e per la direzione Y (b). Si noti come le soluzioni 2-3-4 siano Iso-Prestazionali.

Sulla base di quanto presentato nella nella **Scheda 3 dell'Allegato 1**, a seguito dell'introduzione dell'esoscheletro, in accordo con [16], si assume che il meccanismo resistente arco-catena si imponi in corrispondenza delle pareti dell'esoscheletro. In tale scenario infatti, l'impalcato deve trasferire alle pareti sismoresistenti dell'esoscheletro le azioni di piano. In Figura 22, è illustrato il meccanismo resistente per la direzione Y della sollecitazione sismica.

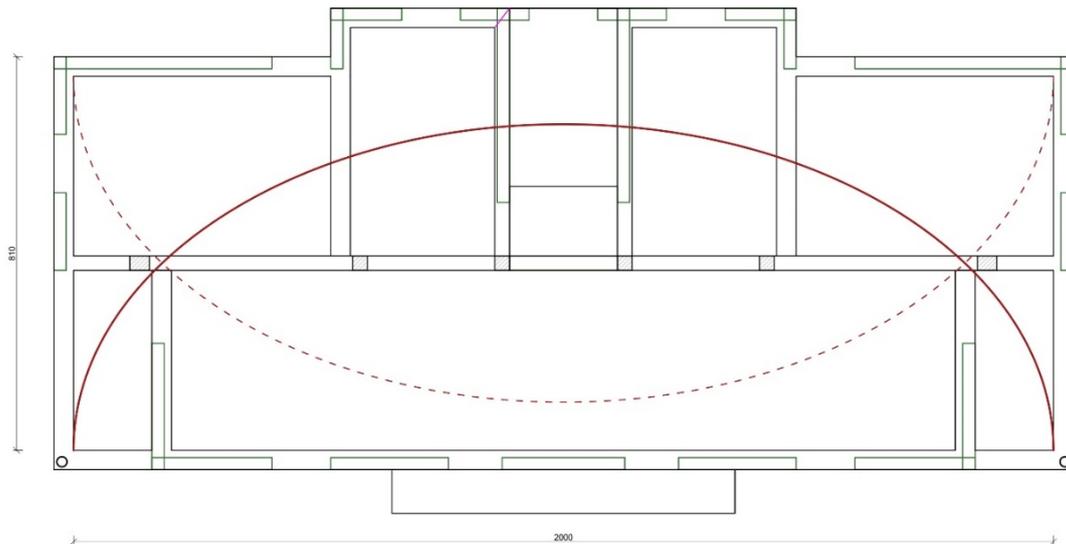


Figura 22-Rappresentazione degli archi resistenti nel piano per la direzione Y (post-intervento).

Per la valutazione della capacità del solaio si sono utilizzati i valori indicati nella Tabella 6 - Valori utilizzati nella valutazione della resistenza nel piano del solaio associata alla formazione di un meccanismo arco-catena.

Tabella 6 - Valori utilizzati nella valutazione della resistenza nel piano del solaio associata alla formazione di un meccanismo arco-catena post-intervento.

$f_{c,b\perp}$	18	MPa	τ_{ud}	1.72	MPa
t_{eq}	35	mm	β	1.3	-
b^*	875	mm	G_c	15000	MPa
A_b	30625	mm ²	G_b	6800	MPa
E_{cappia}	23000	MPa	τ_{cd}	2	MPa
E_b	15000	MPa	f_t	1.47	MPa
A_{cappia}	35000	mm ²	α_1	0.33	-
f_c	20	MPa	α_2	1	-
A_{cord}	80000	mm ²	E_{cord}	30000	MPa
A_s	314	mm ²	E_s	210000	MPa
f_{yd}	391	MPa	A_{Fascia}	1500	mm ²

L'analisi ha evidenziato come il meccanismo che si manifesta per primo sia il associato al raggiungimento della capacità a taglio all'imposta dell'arco. Si osserva inoltre la crisi a trazione della catena dell'arco. A tal fine si predispone l'inserimento di una fascia marcapiano 150x10mm di rinforzo .

La sollecitazione massima che il piano riesce a sopportare è pari a 696 kN.

Ipotizzando una distribuzione proporzionale alle masse della sollecitazione sismica, si ottiene una sollecitazione massima di piano pari a 578 kN, inferiore alla capacità del diaframma. Per questo motivo è lecito considerare gli impalcati come rigidi nel piano.

Si sottolinea come, in assenza di una fascia marcapiano, il meccanismo debole sarebbe stato associato alla rottura del cordolo debolmente armato (costituito dal cordolo in c.a. armato con 4Φ10) e la capacità del diaframma sarebbe stata inferiore alla domanda.

Segue ora una accurata descrizione di ogni soluzione strutturale, con la relativa analisi dei costi di costruzione e sul ciclo di vita (Life Cycle Costs) e degli impatti ambientali nelle fasi di produzione e fine vita. Per quanto riguarda i Life Cycle Costs, vengono riportate considerazioni qualitative circa la manutenzione e la gestione delle fasi di fine vita di ciascuna soluzione.

SOLUZIONE 1

Descrizione della soluzione strutturale

La prima soluzione di intervento, progettata dal Prof. Ing. Paolo Riva, consiste in [13]:

- Esoscheletro in acciaio assemblato all'esterno dell'edificio esistente (Figura 23), con tre diverse tipologie di pareti sismo-resistenti:
 - *Tipo 1* – n. 2 Pareti sismo-resistenti controventate: pareti sismo-resistenti realizzate con profili commerciali a sezione circolare cava (montanti: 219.1mm, sp.20mm; diagonali: $\Phi 139.7$ mm, sp.16mm). Fondazione realizzata con trave in CA ($0.6 \times 1 \times 7 \text{m}^3$) e 7 micropali ($\Phi 150$ mm, L=15m, N=243kN). Connessioni tra esoscheletro ed edificio esistente realizzate con spinotti $\Phi 20$ mm/30cm a ogni impalcato, dove viene introdotta una fascia marcapiano in acciaio (150x10) mm con funzione di ripartitore e di rinforzo del diaframma di piano. Gli spinotti vengono inseriti in fori praticati con la carotatrice e fissati tramite ancoraggio chimico.
 - *Tipo 2* – n. 2 Pareti sismo-resistenti con lamiera d'acciaio macroforata: montanti e correnti realizzati con profili cavi a sezione circolare (verticale: 219.1 mm, sp.20 mm; orizzontale: $\Phi 139.7$ mm, sp.16 mm); pannelli d'anima dei setti realizzati con lamiere di acciaio macroforate (sp.8mm; 50% percentuale di foratura). Sistema di fondazione come nel tipo 1. Connessioni tra esoscheletro ed edificio esistente realizzate con spinotti $\Phi 20$ mm/30cm a ogni impalcato, dove viene introdotta una fascia marcapiano in acciaio. Le pareti sono posizionate a 1 m dalla facciata esistente al fine di creare nuovi balconi in continuità con quelli esistenti lungo la facciata sud.
 - *Tipo 3* – n. 2 Pareti sismo-resistenti con lamiera d'acciaio piena: stessi montanti e correnti del tipo 2; pannelli d'anima invece realizzati in lamiera piena sp. 4 mm. Sistema di fondazione come nel tipo 1. Connessioni tra esoscheletro ed edificio esistente realizzate con spinotti $\Phi 20$ mm/30 a ogni impalcato dove viene introdotta una fascia marcapiano in acciaio.

In totale sono dunque introdotte 4 pareti sismo resistenti per la direzione X e 2 per la direzione Y, tutte dotate di un nuovo sistema di fondazione con trave in c.a. e un totale di 42 micropali.

Tutti gli elementi dell'esoscheletro sono realizzati con profili e piastre in acciaio S235 e sono verniciati contro la corrosione, considerando una categoria di corrosione C3 (ISO 12944) e con una durata prevista da 5 a 15 anni.

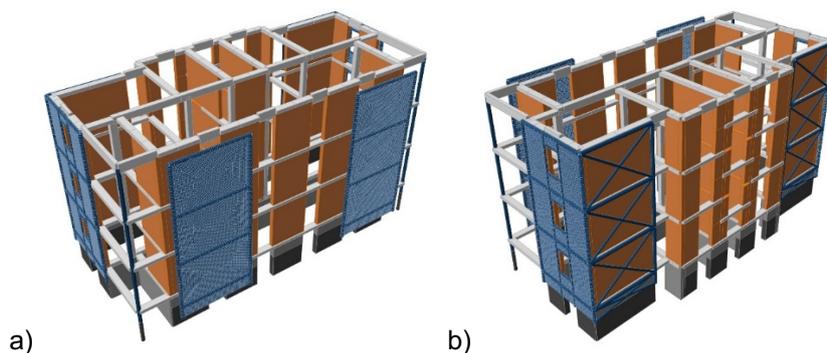
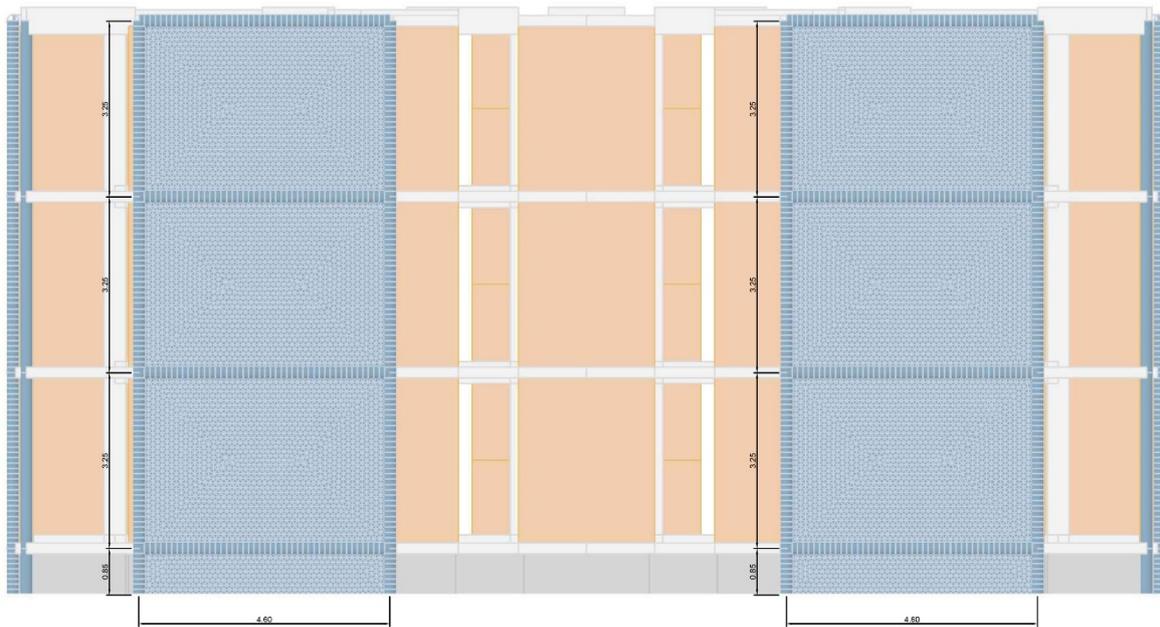
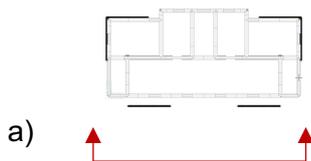


Figura 23 - Modello ad elementi finiti della Soluzione 1, a) vista sud-ovest; b) vista nord-est.

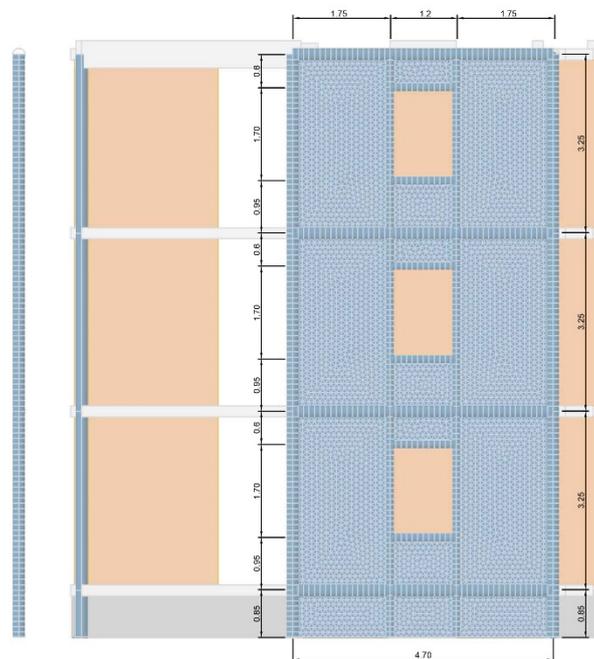
Geometria dell'esoscheletro



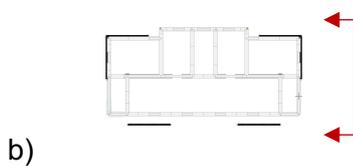
Elementi:



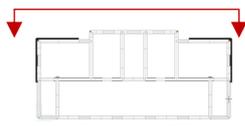
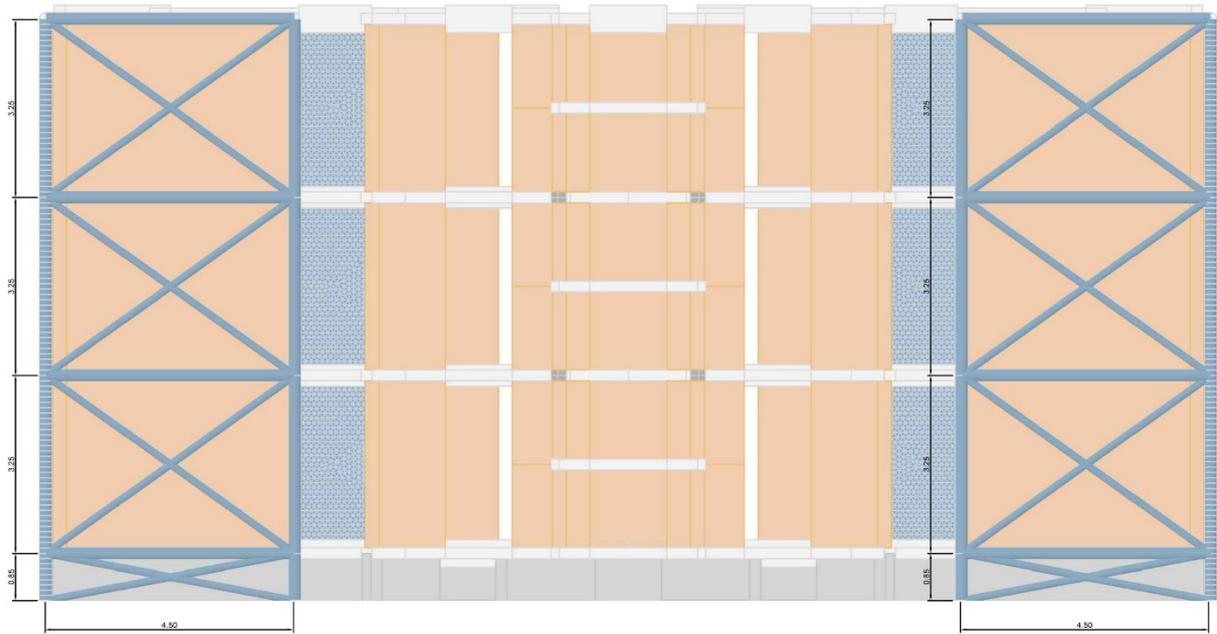
Tipo	Sezione
Elementi verticali	Ø219.1mm sp.20mm
Elementi orizzontali	Ø139.7mm, sp.16mm
Pannello d'anima	Lamiere di acciaio macro forate al 50%, spessore 8mm



Elementi:



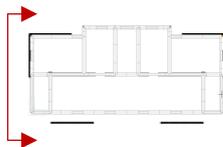
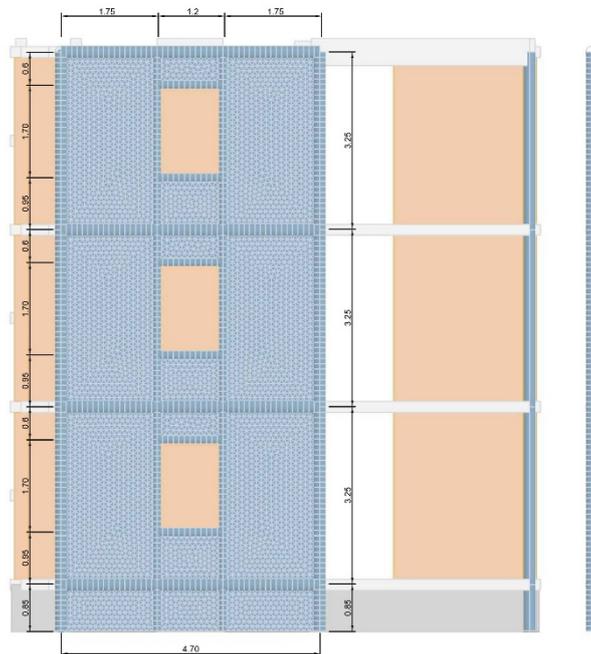
Tipo	Sezione
Elementi verticali	Ø219.1mm sp.20mm
Elementi orizzontali	Ø139.7mm, sp.16mm
Pannello d'anima	Lamiere piena d'acciaio sp.4mm



c)

Elementi:

Tipo	Sezione
Elementi verticali	Φ219.1mm sp.20mm
Elementi orizzontali	Φ219.1mm sp.20mm
Elementi diagonali	Φ139.7mm sp.16mm



d)

Elementi:

Tipo	Sezione
Elementi verticali	Φ219.1mm sp.20mm
Elementi orizzontali	Φ 139.7mm, sp.16mm
Pannello d'anima	Lamiera piena d'acciaio sp.4mm

Figura 24 - Geometria dell'esoscheletro della soluzione 1 (a,b,c,d)

Sistema di fondazione

L'esoscheletro è sostenuto da un nuovo sistema di fondazione realizzato con travi in ca (60x100) cm e micropali.

Per ogni setto vengono inseriti 7 micropali $\Phi 150$ L>15m (Capacità ± 243 kN) per un totale di 42 micropali).

SETTO 2 - DETTAGLI COLLEGAMENTO CON FONDAZIONI

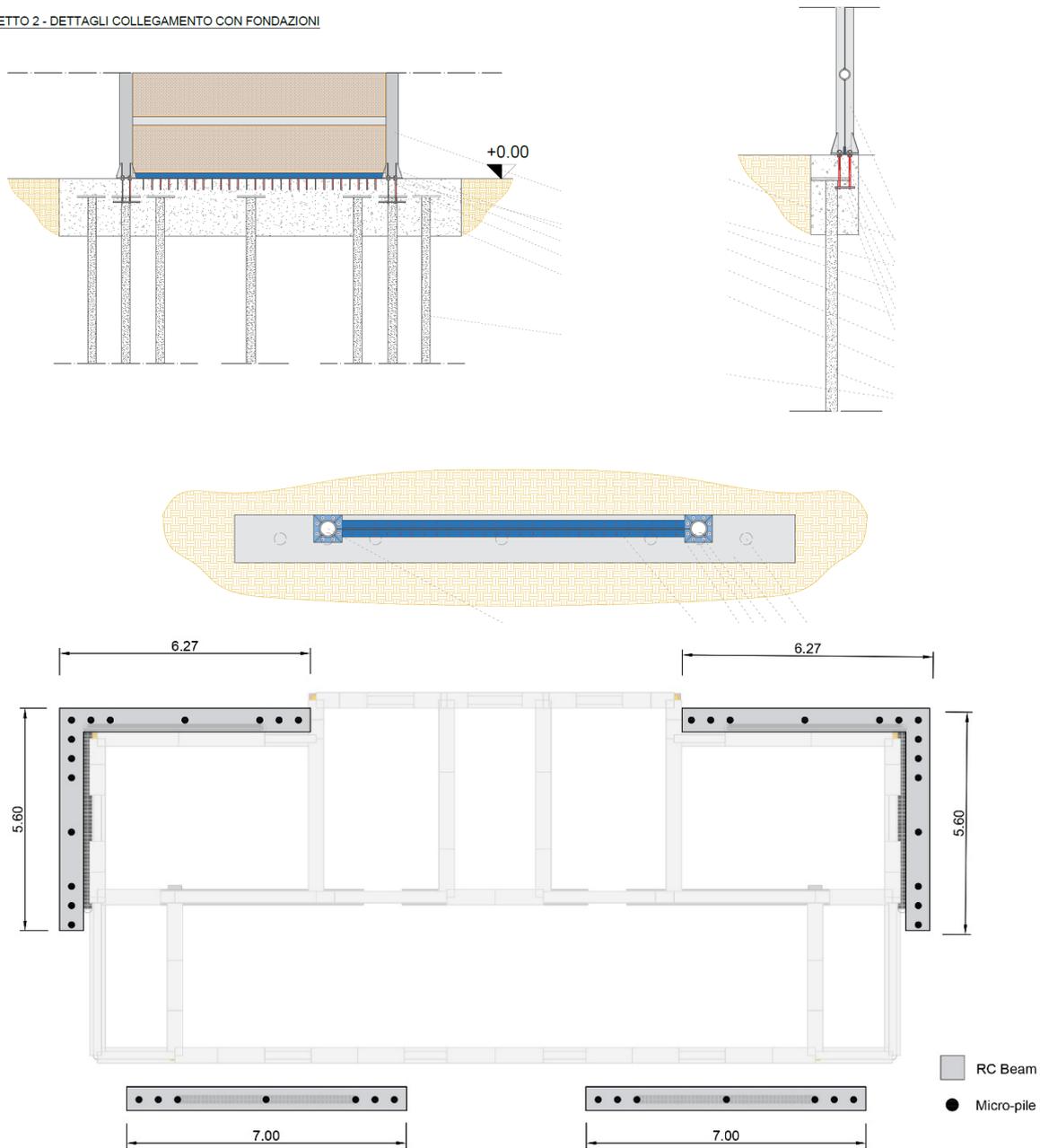


Figura 25 - Sistema di fondazione dell'intervento di rinforzo (Soluzione 1).

Descrizione delle misure di riqualificazione energetica

A livello energetico si sceglie di lavorare sull'involucro, così da ridurre le dispersioni e, di conseguenza, il fabbisogno energetico del fabbricato. L'intervento consiste nella coibentazione degli elementi opachi verticali mediante l'aggiunta di un rivestimento termoisolante e nella sostituzione dei serramenti esterni con nuovi elementi ad alta efficienza energetica. Per quanto riguarda le chiusure verticali, lungo le pareti viene aggiunto uno strato di pannelli in stiferite di spessore 14 cm (facciata nord 8 cm).

Le nuove prestazioni dell'edificio consentono un risparmio economico annuo conseguibile pari a 4.550 euro, che permette di rientrare dei costi dell'intervento energetico in circa 16 anni.

La classe energetica conseguibile attraverso gli interventi ipotizzati è la **B**.

Tabella 7 - Prestazioni energetiche dell'edificio riqualificato.

Costo stimato	C	73427,88	€
Risparmio economico conseguibile	ΔS_{gl}	4550	€/anno
Tempo di ritorno semplice	t_r	16,1	anni
Risparmio energetico conseguibile	$\Delta EP_{gl,nren}$	149,48	kWh _p /m ² anno
Classe energetica raggiungibile		B	

Pertanto, le prestazioni raggiungibili e la classe energetica ($EP_{gl,nren}$) sono:

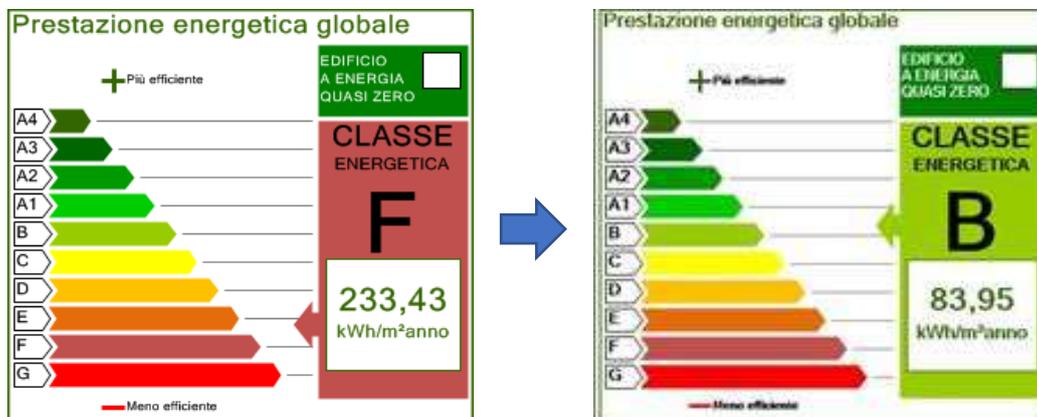


Figura 26 - Confronto fra classe energetica dell'edificio esistente e di quello riqualificato.

Nota: classi energetiche indicative, aventi valenza di riferimento ed obiettivo, valutate, coerentemente con il calcolo di diagnosi, secondo la modalità di valutazione A3.

Costi di costruzione

Per la Soluzione 1 il costo totale di realizzazione è pari a € 470.476,82, mentre il costo di realizzazione per il rinforzo strutturale è pari a € 215.784,90, il 46% del costo totale.

Di seguito viene riportato il rendiconto delle voci della parte strutturale dell'intervento.

Tabella 8 - Costi di intervento per la parte strutturale (Soluzione 1).

COMPOSIZIONE DEI COSTI DELLE PRINCIPALI CATEGORIE DI INTERVENTO STRUTTURALE					
VOCE DI COSTO	COSTO [€]	% COSTO TOTALE	€/mq in Sup. Lat.	COSTO UNITARIO	QUANTITA'
0 FONDAZIONI	72.430,60 €	33,57	114,65 €	135,03 €	536 m2 in pianta
1 Scavo e riempimento	565,00 €		0,89 €	25,00 €	22,6 m3
2 Magrone	226,00 €		0,36 €	100,00 €	2,26 m3
3 Calcestruzzo	2.938,00 €		4,65 €	130,00 €	22,60 m3
4 Casseforme	1.350,00 €		2,14 €	18,00 €	75 m2
5 Armatura in acciaio	4.351,60 €		6,89 €	1,10 €	3956 kg
6 Micropali	63.000,00 €		99,72 €	100,00 €	630 ml
9 PARETI DI TAGLIO IN ACCIAIO	122.589,44 €	56,81	194,04 €	228,54 €	536 m2 in pianta
10 Carpenteria metallica (Tubi Tenaris)	103.092,00 €		163,18 €	4,00 €	25773,00 kg
11 Carpenteria metallica (lamiera forata)	14.610,00 €		23,13 €	150,00 €	97,40 m2
12 Carpenteria metallica (lamiera piena)	4.370,00 €		6,92 €	50,00 €	87,40 m2
13 Scrostamento di intonaco	517,44 €		0,82 €	7,00 €	73,92 m2
14 CONNESSIONI	19.310,46 €	8,95	30,57 €	36,00 €	536 m2 in pianta
15 Spinotti	10.606,38 €		16,79 €	42,94 €	247 unità
16 Fascia marcapiano	8.704,08 €		13,78 €	4,00 €	2176,02 kg
17 ALTRE SPESE	1.454,40 €	0,67	2,30 €	2,71 €	536 m2 in pianta
18 Smaltimento	569,40 €		0,90 €	18,98 €	30 t
19 Riparazioni localizzate o generalizzate	885,00 €		1,40 €	59,00 €	15 m2
20 TOTALE COSTO DI COSTRUZIONE	215.784,90 €	100		402,28 €	€/m2 in pianta
				113,87 €	€/m3
				341,56 €	€/m2 sup. lat.

I costi vengono riassunti nella Figura 27.

COSTI	[€]		
1 FONDAZIONI	72431	33,6%	
2 TUBI TENARIS	103092	47,8%	
3 LAMIERA	19497	9,0%	
4 CONNESSIONI	19310	8,9%	
5 ALTRO	1454	0,7%	

Costo totale intervento	215785	100%
Costo a m ² in pianta	402,6	€/m ²
Costo a m ³	113,9	€/m ³
Costo a m ² in facciata	341,5	€/m ²

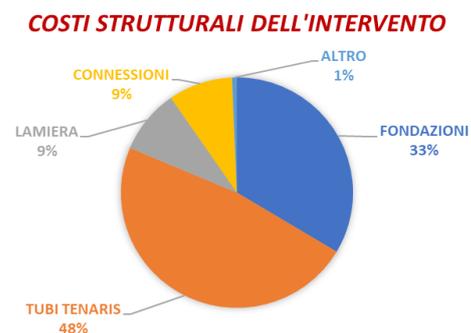


Figura 27 - Costi per la parte strutturale dell'intervento (Soluzione 1).

Per quanto concerne invece l'intero intervento, di seguito viene riportato il computo per macroaree.

Tabella 9 - Costi di intervento per macroaree (Soluzione 1).

ANALISI DEI COSTI					
TIPO DI STIMA: STIMA A LIVELLO DI PROGETTO PRELIMINARE					
VOCE DI COSTO	COSTO [€]	COSTO TOTALE	€/mq in Sup. Lat.	COSTO UNITARIO	QUANTITA'
PREPARAZIONE DEL CANTIERE	5.283,89 €	1,12	8,36 €	9,85 €	536 m2 in pianta
Allestimento di cantiere	2.100,00 €	0,45	3,32 €	2.100,00 €	
Recinzione di cantiere	70,95 €	0,02	0,11 €	14,19 €	
Costi aggiuntivi per la sicurezza	1.220,00 €	0,26	1,93 €	1.220,00 €	
Ponteggio	1.892,94 €	0,40	3,00 €	8,69 €	217,83 mq
DEMOLIZIONI	1.861,45 €	0,40	2,95 €	3,47 €	536 m2 in pianta
Apertura porte finestre	424,80 €	0,09	0,67	236,00 €	1,80 €
Rimozione di serramenti in legno o ferro, inferiate, parapetti, cancelli	1.436,65 €	0,31	2,27	17,03 €	84,36 €
SMALTIMENTO RIFIUTI	1.144,90 €	0,24	1,81 €	2,13 €	536 m2 in pianta
Conferimento di rifiuti a discariche	1.144,90 €	0,24	1,81	9,60 €	119,26 €
FINITURE FACCIATE	60.926,85 €	12,95	96,44 €	113,58 €	536 m2 in pianta
Intonaco rasato facciata nord	4.233,95 €	0,90	6,70	30,57 €	138,50 €
Pannelli di fibrocemento ecologico posati con idonea struttura di supporto	51.630,40 €	10,97	81,72 €	230,00 €	224,48 mq
Pannelli in legno idrorepellente per esterni	5.062,50 €	1,08	8,01 €	135,00 €	37,5 mq
RETROFIT ENERGETICO	73.427,88 €	15,61	116,23 €	136,89 €	536 m2 in pianta
Isolante tipo la Stiferite GT sp. 8 cm facciata nord	12.465,00 €	2,65	19,73 €	90,00 €	138,5 mq
Isolante tipo la Stiferite GT sp. 7+7 cm facciata sud est ovest	22.890,50 €	4,87	36,23 €	85,00 €	269,3 mq
Serramenti in PVC	28.800,00 €	6,12	45,59 €	450,00 €	64 mq
Davanzali	4.962,70 €	1,05	7,86 €	135,89 €	36,52 mq
Imbotti finestre	2.407,68 €	0,51	3,81 €	60,00 €	
Zoccolo edificio	1.902,00 €	0,40	3,01 €	75,00 €	
RETROFIT STRUTTURALE	215.784,90 €	45,87	341,56 €	402,28 €	536 m2 in pianta
Sistema di fondazione	72.430,60 €	15,40	114,65 €	135,03 €	
Sovra-struttura	122.589,44 €	26,06	194,04 €	228,54 €	
Connessioni	19.310,46 €	4,10	30,57 €	36,00 €	
Altro	1.454,40 €	0,31	2,30 €	2,71 €	
SICUREZZA DEL CANTIERE	15.000,00 €	3,19	23,74 €	27,96 €	536 m2 in pianta
VARIE ED EVENTUALI	11.202,90 €	2,38	17,73 €	20,89 €	536 m2 in pianta
TASSE	38.463,28 €	8,18	60,88 €	71,71 €	536 m2 in pianta
SPESE TECNICHE PER LA PROGETTAZIONE	37.342,99 €	7,94	59,11 €	69,62 €	536 m2 in pianta
TASSE PER LE SPESE DI PROGETTAZIONE	10.037,79 €	2,13	15,89 €	18,71 €	536 m2 in pianta
TOTALE COSTO DI COSTRUZIONE	470.476,82 €	100		877,10 €	€/m2 in pianta
				248,27 €	€/m3
				744,71 €	€/m2 sup. lat.

Analisi preliminari dei costi sul ciclo di vita – Life Cycle Costs (LCC)

I costi Life Cycle sono costi che possono verificarsi lungo il ciclo di vita dell'edificio, anche a seguito della costruzione, come i costi di manutenzione, di riparazione e/o ricostruzione a valle di un terremoto, o di fine vita (demolizione, trattamento rifiuti, ecc.) Questi costi vengono solitamente quantificati per mezzo di analisi di Life Cycle Costing (LCC), che devono tenere conto anche dei tassi di inflazione e di sconto per attualizzare i costi futuri. In questa sezione vengono riportate tuttavia solo alcune considerazioni qualitative in merito ai possibili costi di Life Cycle della soluzione proposta:

1. Fase di costruzione: l'intervento viene effettuato per la maggior parte dall'esterno dell'edificio. Le operazioni di costruzione sono organizzate in modo da evitare il trasferimento degli abitanti. Questo aspetto riduce notevolmente i costi di costruzione dell'intervento. Il sistema adotta una tecnica a secco in acciaio, che può essere facilmente assemblata in cantiere in ogni condizione climatica. Gli elementi sono in gran parte preassemblati in fabbrica e devono solo essere montati in cantiere. L'adozione di elementi modulari riduce il taglio richiesto in fabbrica, riducendo l'esaurimento delle materie prime, producendo meno rifiuti durante la costruzione. Si considera un costo per la sovrastruttura pari a 4€/kg. Il montaggio della sovrastruttura richiede circa 1 mese (considerando una squadra di 4 persone, 1 gru da 40 tonnellate, 1 piattaforma elevatrice, 1 sollevatore telescopico, 2 piattaforme aeree). Per questa soluzione è necessaria una manodopera specializzata (circa 35€/ora). Ulteriori 15 giorni devono essere considerati per il sistema di collegamento (considerando 2 squadre di 4 persone). Poiché l'intervento strutturale è accoppiato alle misure di miglioramento energetico, alcuni costi di costruzione condivisi legati alla sicurezza (es. ponteggi) e all'organizzazione del cantiere sono ottimizzati. Anche i costi di finitura possono essere considerati una spesa condivisa.
2. Fase di funzionamento: le misure di riqualificazione energetica permettono di ridurre la domanda di energia e i consumi energetici, riducendo i costi di funzionamento.
3. Fase di manutenzione: per questa soluzione si considerano i profili S235 in acciaio verniciato con una durata da 5 a 15 anni. Tuttavia, in questo caso, essendo l'esoscheletro strutturale completamente incassato nello strato di isolamento termico, si presume che non si debbano considerare futuri costi di manutenzione aggiuntivi per la riparazione/sostituzione degli elementi strutturali. I dettagli delle finiture devono solo permettere l'ispezionabilità (l'ispezione è raccomandata ogni 5 anni, considerando un costo di circa 2500€ ad ispezione).
4. Fase post-sisma: le soluzioni di retrofit sismico sono tutte progettate per minimizzare il danno negli elementi strutturali e non strutturali anche per terremoti ad alta intensità. Nella fase post-terremoto, non ci si aspetta alcun danno negli elementi strutturali esistenti e aggiuntivi né negli elementi non strutturali drift-sensitive. Per tali soluzioni rigide, tuttavia, ci si può aspettare qualche danno negli elementi non strutturali sensibili all'accelerazione (mobili, oggetti che potrebbero ribaltarsi e cadere, e impianti idrici, di raffreddamento e di riscaldamento).
5. Fase di fine vita: questo intervento strutturale adotta una tecnica a secco in acciaio, che permette un facile smontaggio del sistema strutturale a fine vita dell'edificio (tranne il sistema di fondazione). Essendo gli elementi prefabbricati e modulari, il tempo di smontaggio è abbastanza basso. Il livello di riutilizzo degli elementi è maggiore per i controventi ad X rispetto ai controventi in lamiera, essendo essa saldata sulle cornici di acciaio. Gli elementi di acciaio non riutilizzabili saranno inviati ad un impianto di riciclaggio. Le ipotesi per il fine vita dei vari materiali impiegati nella soluzione sono riportate in **Appendice A1**.

Durata dell'intervento

Per quanto riguarda i tempi di costruzione, sono stati stimati 6 mesi (GG lavorativi con una squadra tipo) per la realizzazione di tutti gli interventi previsti (energetico e strutturale).

SOLUZIONE 2

Descrizione della soluzione strutturale

La seconda soluzione di retrofit consiste in:

- Esoscheletro in acciaio assemblato all'esterno dell'edificio esistente (Figura 28), che consiste in 8 setti reticolari realizzati con profili HEA e UPN.
- Ad ogni piano è fissata una fascia marcapiano alle travi perimetrali dell'impalcato. Si tratta di una piastra in acciaio (150x10)mm, collegata alla struttura esistente con spinotti $\Phi 20/50$.
- Alla base dell'esoscheletro in acciaio viene introdotto un nuovo sistema di fondazione, costituito da travi in c.a. (60x100)cm. Vengono introdotti un totale di 28 micropali ($\Phi 150$, $L > 15$ m, capacità ± 243 kN).
- Tutti gli elementi dell'esoscheletro sono realizzati con profili in acciaio S235 verniciati contro la corrosione, considerando una categoria di corrosione C3 (ISO 12944) e con una durata prevista da 5 a 15 anni.

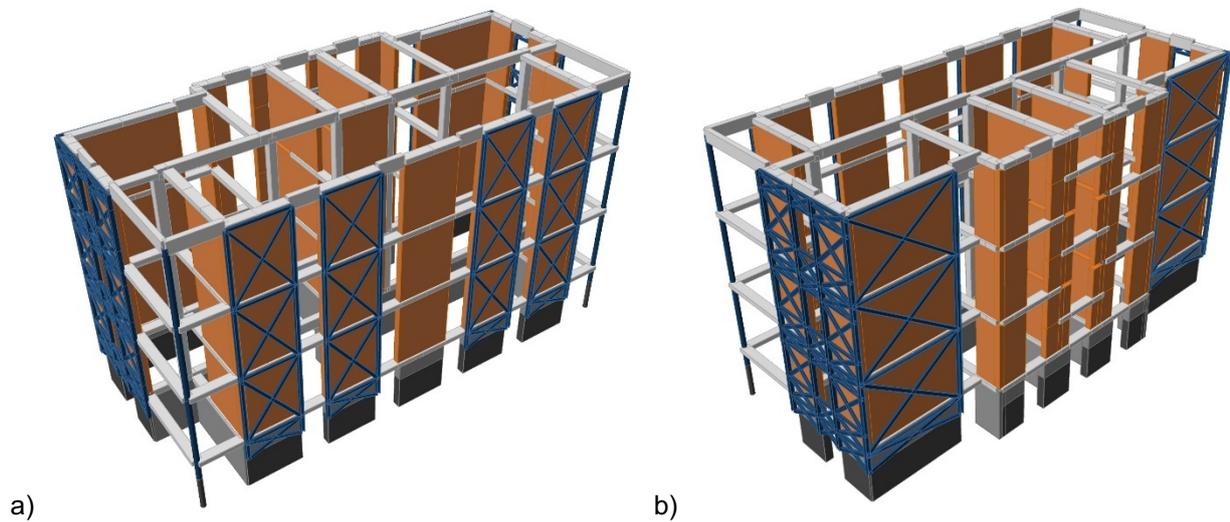
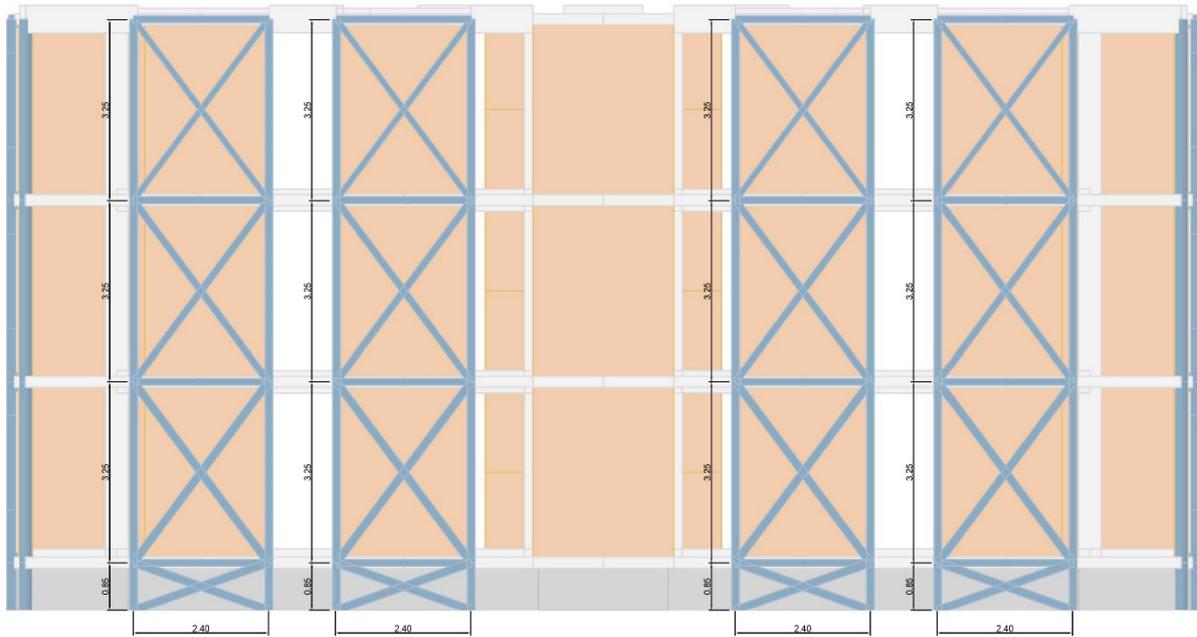


Figura 28 - Modello ad elementi finiti della Soluzione 2, a) vista sud-ovest; b) vista nord-est.

Geometria dell'esoscheletro



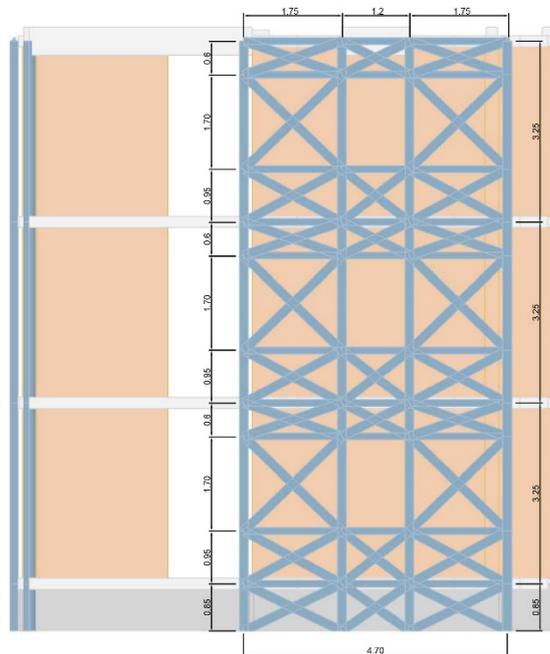
Elementi:



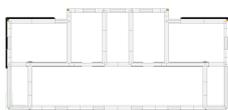
a)



Tipo	Sezione
Elementi verticali	HEA140
Elementi orizzontali	UPN120
Elementi diagonali	UPN140 (PT-P1) UPN120 (P2) UPN100 (P3)



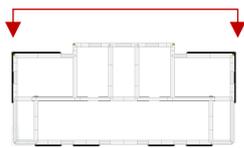
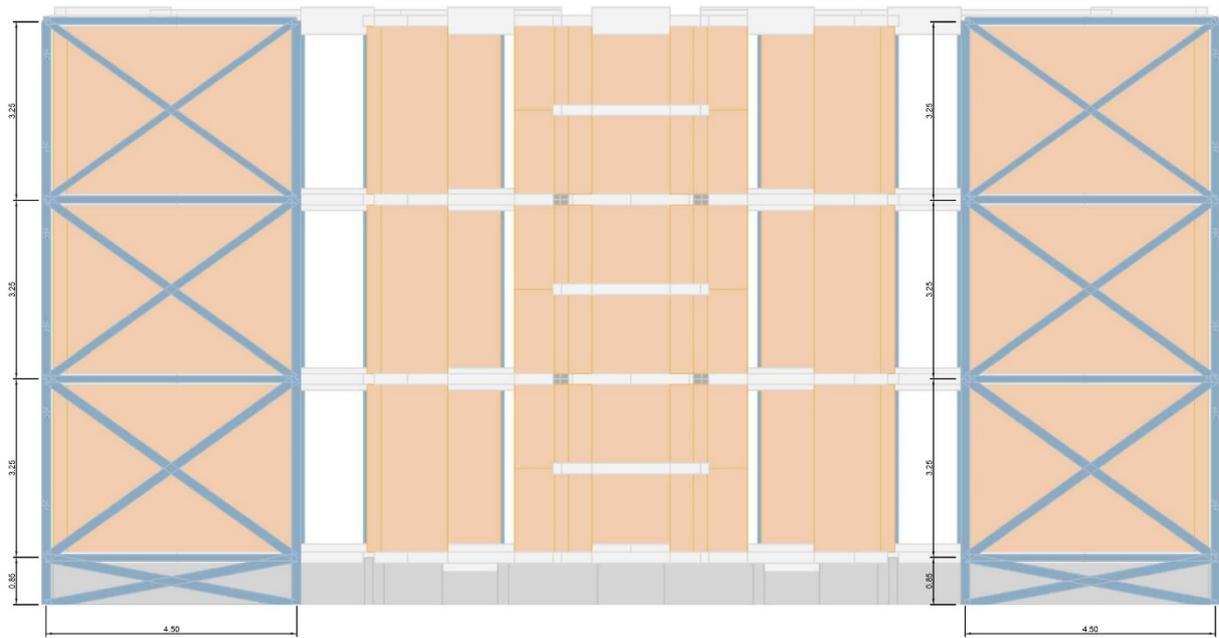
Elementi:



b)



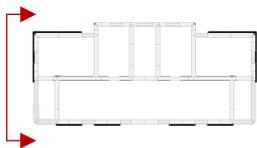
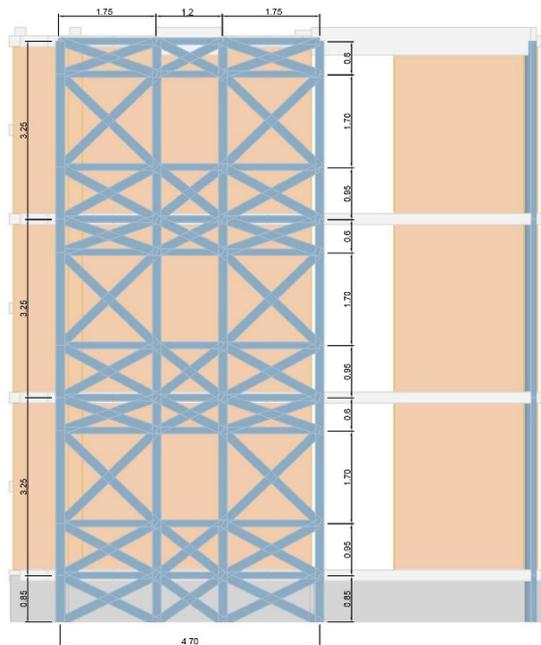
Tipo	Sezione
Elementi verticali	HEA160
Elementi orizzontali	UPN120
Elementi diagonali	UPN160 (PT-P1-P2-P3)



c)

Elementi:

Tipo	Sezione
Elementi verticali	HEA160
Elementi orizzontali	UPN120
Elementi diagonali	UPN160 (PT-P1) UPN140 (P2) UPN120 (P3)



d)

Elementi:

Tipo	Sezione
Elementi verticali	HEA160
Elementi orizzontali	UPN120
Elementi diagonali	UPN160 (PT-P1-P2-P3)

Figura 29 - Geometria dell'esoscheletro della soluzione 2 (a, b, c, d).

Sistema di fondazioni

L'esoscheletro è sostenuto da un nuovo sistema di fondazione realizzato con travi in ca (60x100) cm e micropali.

Alla base di ciascuna fondazione vengono introdotti 4 micropali $\Phi 150$ $L > 15m$ (Portata $\pm 243kN$) sulle facciate nord e sud, 6 micropali sulle facciate est e ovest, per un totale di 28 micropali. Il progetto della fondazione segue gli stessi principi della Soluzione 1; tuttavia, essendo progettato per sollecitazioni minori, presenta un numero complessivo di micropali inferiore.

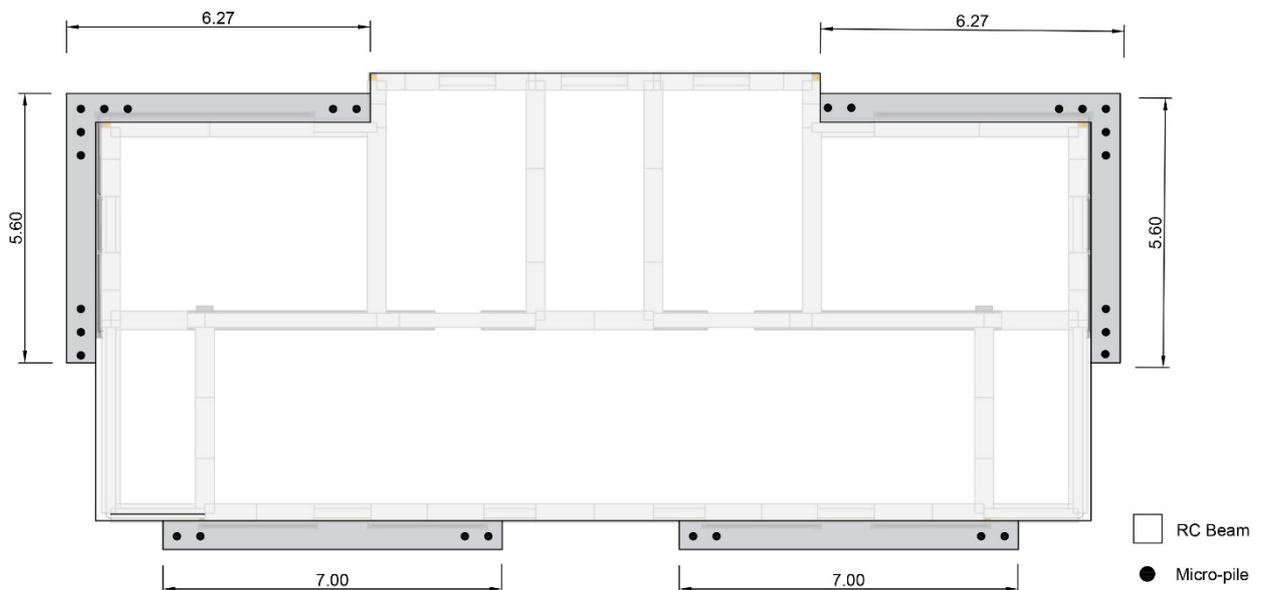


Figura 30 - Sistema di fondazione dell'intervento di rinforzo (Soluzione 2).

Descrizione delle misure di riqualificazione energetica

Le misure di retrofit energetico sono le stesse descritte per la Soluzione 1.

Costi di costruzione

Per la Soluzione 2 il costo totale di realizzazione è pari a € 362.034,03 mentre il costo di realizzazione per il rinforzo strutturale è pari a € 129.711,00, corrispondente al 36% del costo totale.

Di seguito viene riportato il rendiconto delle voci della parte strutturale dell'intervento.

Tabella 10 -Costi di intervento per la parte strutturale (Soluzione 2).

COMPOSIZIONE DEI COSTI DELLE PRINCIPALI CATEGORIE DI INTERVENTO STRUTTURALE					
VOCE	COSTO [€]	% SUL COSTO TOTALE [%]	€/mq in Sup. Lat.	COSTO UNITARIO	QUANTITA'
0 FONDAZIONI	51431,04	39,65	81,41 €	95,88 €	536 m2 in pianta
1 Scavo e riempimento	565,00		0,89 €	25,00 €	22,6 m3
2 Magrone	226,00		0,36 €	100,00 €	2,26 m3
3 Calcestruzzo	2938,00		4,65 €	130,00 €	22,60 m3
4 Casseforme	1350,00		2,14 €	18,00 €	75 m2
5 Armatura in acciaio	4352,04		6,89 €	1,10 €	3956,4 kg
6 Micropali	42000,00		66,48 €	100,00 €	420 ml
9 PARETI DI TAGLIO IN ACCIAIO	58717,44	45,27	92,94 €	109,47 €	536 m2 in pianta
10 Carpenteria metallica (reticolare)	58200,00		92,12 €	4,00 €	14550,00 kg
11 Scrostamento di intonaco	517,44		0,82 €	7,00 €	73,92 m2
12 CONNESSIONI	18108,12	13,96	28,66 €	33,76 €	536 m2 in pianta
13 Spinotti	9404,04		14,89 €	42,94 €	219 units
14 Fascia marcapiano	8704,08		13,78 €	4,00 €	2176,02 kg
15 ALTRE SPESE	1454,40	1,12	2,30 €	2,71 €	536 m2 in pianta
16 Smaltimento	569,40		0,90 €	18,98 €	30 t
17 Riparazioni localizzate o generalizzate	885,00		1,40 €	59,00 €	15 m2
18 TOTALE COSTO DI COSTRUZIONE	129711,00	100		241,82 €	€/m2 in pianta
				68,45 €	€/m3
				205,32 €	€/m2 sup. lat.

I costi vengono riassunti nella Figura 31.

	COSTI	[€]		
1	FONDAZIONI	51431	39,7%	
2	PROFILI	58717	45,3%	
3	CONNESSIONI	18108	14,0%	
4	ALTRO	1454,40	1,1%	

Costo totale intervento	129711	100%
Costo a m ² in pianta	242,0	€/m ²
Costo a m ³	68,4	€/m ³
Costo a m ² in facciata	205,3	€/m ²

COSTI STRUTTURALI DELL'INTERVENTO

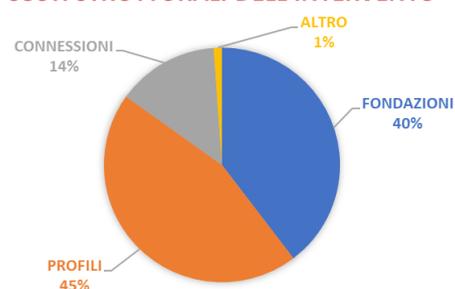


Figura 31 - Costi per la parte strutturale dell'intervento (Soluzione 2).

Per quanto concerne invece l'intero intervento, di seguito viene riportato il computo per macroaree.

Tabella 11 -Costi di intervento per macroaree (Soluzione 2).

ANALISI DEI COSTI					
TIPO DI STIMA: STIMA A LIVELLO DI PROGETTO PRELIMINARE					
VOCE DI COSTO	COSTO [€]	% SUL COSTO TOTALE [%]	€/mq in Sup. Lat.	COSTO UNITARIO	QUANTITA'
PREPARAZIONE DEL CANTIERE	5.283,89 €	1,46	8,36 €	9,85 €	536 m2 in pianta
Allestimento di cantiere	2.100,00 €	0,58	3,32 €	2.100,00 €	
Recinzione di cantiere	70,95 €	0,02	0,11 €	14,19 €	
Costi aggiuntivi per la sicurezza	1.220,00 €	0,34	1,93 €	1.220,00 €	
Ponteggio	1.892,94 €	0,52	3,00 €	8,69 €	217,83 mq
DEMOLIZIONI	1.861,45 €	0,51	2,95 €	3,47 €	536 m2 in pianta
Apertura porte finestre	424,80 €	0,12	0,67	236,00 €	1,80 €
Rimozione di serramenti in legno o ferro, inferiate, parapetti, cancelli	1.436,65 €	0,40	#DIV/0!	17,03 €	84,36 €
SMALTIMENTO RIFIUTI	1.144,90 €	0,32	1,81 €	2,13 €	536 m2 in pianta
Conferimento di rifiuti a discariche	1.144,90 €	0,32	1,81	9,60 €	119,26 €
FINITURE FACCIATE	60.926,85 €	16,83	96,44 €	113,58 €	536 m2 in pianta
Intonaco rasato facciata nord	4.233,95 €	1,17	6,70	30,57 €	138,50 €
Pannelli di fibrocemento ecologico posati con idonea struttura di supporto	51.630,40 €	14,26	81,72 €	230,00 €	224,48 mq
Pannelli in legno idrorepellente per esterni	5.062,50 €	1,40	8,01 €	135,00 €	37,5 mq
RETROFIT ENERGETICO	73.427,88 €	20,28	116,23 €	136,89 €	536 m2 in pianta
Isolante tipo la Stiferite GT sp. 8 cm facciata nord	12.465,00 €	3,44	19,73 €	90,00 €	138,5 mq
Isolante tipo la Stiferite GT sp. 7+7 cm facciata sud est ovest	22.890,50 €	6,32	36,23 €	85,00 €	269,3 mq
Serramenti in PVC	28.800,00 €	7,96	45,59 €	450,00 €	64 mq
Davanzali	4.962,70 €	1,37	7,86 €	135,89 €	36,52 mq
Imbotti finestre	2.407,68 €	0,67	3,81 €	60,00 €	
Zoccolo edificio	1.902,00 €	0,53	3,01 €	75,00 €	
RETROFIT STRUTTURALE	129.711,00 €	35,83	205,32 €	241,82 €	536 m2 in pianta
Sistema di fondazione	51.431,04 €	14,21	81,41 €	95,88 €	
Sovra-struttura	58.717,44 €	16,22	92,94 €	109,47 €	
Connessioni	18.108,12 €	5,00	28,66 €	33,76 €	
Altro	1.454,40 €	0,40	2,30 €	2,71 €	
SICUREZZA DEL CANTIERE	15.000,00 €	4,14	23,74 €	27,96 €	536 m2 in pianta
IMPREVISTI	8.620,68 €	2,38	13,65 €	16,07 €	536 m2 in pianta
TASSE	29.597,66 €	8,18	46,85 €	55,18 €	536 m2 in pianta
SPESE TECNICHE PER LA PROGETTAZIONE	28.735,60 €	7,94	45,48 €	53,57 €	536 m2 in pianta
TASSE PER LE SPESE DI PROGETTAZIONE	7.724,13 €	2,13	12,23 €	14,40 €	536 m2 in pianta
TOTALE COSTO DI COSTRUZIONE	362.034,03 €	100		674,93 €	€/m2 in pianta
				191,05 €	€/m3
				573,06 €	€/m2 sup. lat.

Analisi preliminare dei costi sul ciclo di vita – Life Cycle Costs (LCC)

L'analisi qualitativa dei costi sul ciclo di vita (LCC) può essere considerata analoga a quella della Soluzione 1.

Analisi degli impatti sul ciclo di vita – Life Cycle Assessment (LCA)

Per le Soluzioni 2, 3 e 4, iso-performance da un punto di vista sismico, è stata fatta una valutazione degli impatti ambientali in termini di:

- Emissioni di CO₂ equivalenti (GWP - Global Warming Potential) (kgCO₂eq)
- Consumo di risorse di energia primaria rinnovabile (PERT) (MJ)
- Consumo di risorse di energia primaria non rinnovabile (PENRT) (MJ)
- Consumo di acqua (FW) (m³)
- Produzione di rifiuti non pericolosi (NHSD) (kg)

Tali impatti sono stati calcolati considerando come limiti del sistema le fasi di inizio vita, cioè estrazione del materiale, trasporto e produzione degli elementi costruttivi (Moduli A1, A2, A3 del quadro di riferimento della EN15978-2011), fine vita, cioè lavorazione dei rifiuti e discarica (Moduli C3 e C4 del quadro di riferimento della EN15978-2011) e possibili benefit oltre alla vita dell'edificio, nel caso in cui tali elementi fossero riutilizzati, recuperati o riciclati (Modulo D del quadro di riferimento della EN15978-2011) (Figura 32).

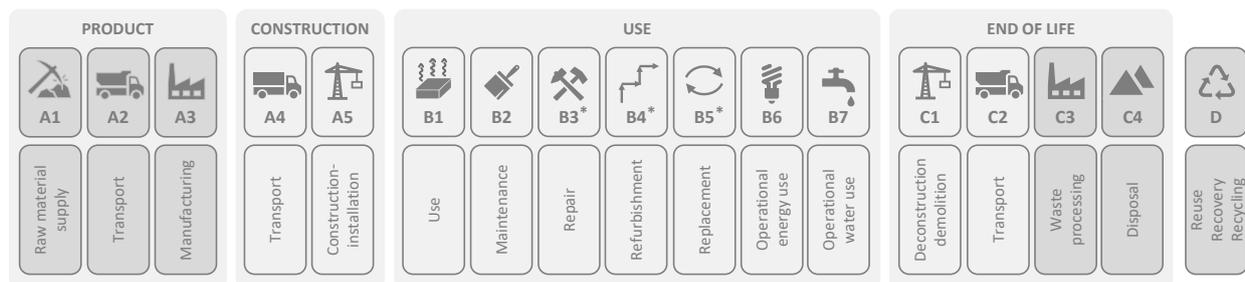


Figura 32 - Fasi del ciclo di vita di un edificio in accordo con il quadro di riferimento definito dalla EN15978 (2011). In figura sono evidenziate in grigio più scuro le fasi che sono state considerate per il presente studio (Moduli A1-3, C3-4, D). Adattata da [5].

Metodologia

Per il calcolo degli impatti ambientali si è fatto riferimento ad una metodologia semplificata di LCA (Life Cycle Assessment), basata sulle Etichette Ambientali di Prodotto (in inglese, EPD- Environmental Product Declaration) [5]. Tali etichette, normate dalla EN 15804:2012+A2:2019, sono delle dichiarazioni rilasciate dai produttori e certificate da un ente terzo che contengono dei dati in merito agli impatti ambientali di un particolare prodotto. Questi dati, riferiti ad una Unità Funzionale di prodotto dichiarata (es. 1m³, 1ton, ecc.), sono basati sui consumi e gli impatti specifici di un determinato stabilimento produttivo e sono quindi caratterizzati da un grado di specificità maggiore rispetto a quelli che possono essere generalmente contenuti nei database delle analisi LCA tradizionali. Tali impatti vengono calcolati per le diverse fasi del ciclo di vita in accordo con il quadro di riferimento definito dalla EN15978-2011. Si deve notare, tuttavia, che frequentemente nelle EPD sono riportati solo i dati riferiti all'inizio e al fine vita del prodotto. Ciò è dovuto al fatto che la prima EN 15804 richiedeva come obbligatori i soli Moduli A1-3, mentre, più recentemente, nella revisione del 2019, sono stati resi obbligatori anche i Moduli C1-4-D. Tutti gli altri moduli rimangono tuttora facoltativi e spesso sono dunque omessi.

La metodologia per la valutazione degli impatti ambientali degli interventi di recupero strutturale sulla base di EPD è costituita da pochi semplici passi [5]:

- 1- Progetto preliminare della soluzione strutturale, definizione dei limiti del sistema (parti di edificio e fasi della vita che si vogliono considerare nel calcolo) e stima delle quantità dei materiali. Si noti che se si vogliono effettuare delle valutazioni comparative tra soluzioni differenti, gli stessi limiti del sistema devono essere considerati e le soluzioni comparate devono essere isoperformance (cioè la stessa risposta dell'edificio deve essere ottenuta a seguito della loro applicazione).
- 2- Scelta delle EPD: le EPD possono essere trovate sui portali autorizzati - il portale italiano di riferimento è *EPD Italy* (<https://www.epditaly.it/>), quello europeo è invece *Envirodec* (<https://www.envirodec.com/>). Le EPD considerate dovrebbero riferirsi all'esatto prodotto che si intende impiegare nel progetto; in caso l'EPD del prodotto selezionato non fosse disponibile, è necessario considerare il prodotto più simile in termini di prestazioni e località di produzione. In quest'ultimo caso, i risultati rappresentano una stima approssimativa degli impatti reali.
- 3- Scelta e calcolo degli impatti: il calcolo degli impatti viene effettuato semplicemente moltiplicando l'impatto unitario riportato nelle EPD per la quantità di materiale. La quantità di materiale deve essere dunque espressa con la stessa unità di misura dell'unità funzionale dichiarata nell'EPD.
- 4- Analisi ed interpretazione dei risultati

In questo studio, per il calcolo degli impatti si è sempre preferito considerare EPD di prodotti italiani. Nel caso in cui non fossero disponibili EPD italiane, si è fatto ricorso ad EPD europee. Nel caso invece in cui fossero presenti EPD italiane, ma che includessero i soli Moduli A1-3, gli impatti dei Moduli C3-4-D sono stati desunti a partire da EPD europee di prodotti equivalenti scalando i valori proporzionalmente rispetto agli impatti dei Moduli A1-3 dei prodotti italiani, cioè applicando la seguente formula:

$$Impatti (C3 - C4 - D)_{Italiani} = \frac{Impatti (A1 - A3)_{Italiani}}{Impatti (A1 - A3)_{Europei}} \cdot Impatti (C3 - C4 - D)_{Europei}$$

Calcolo degli impatti per la Soluzione 2

Come limiti del sistema viene scelta la sola soluzione strutturale, senza considerare gli impatti connessi alla struttura esistente, all'intervento energetico e alle finiture architettoniche. Le sole fasi di inizio e fine vita, ed in particolare i Moduli A1-3, C3-4, D sono considerati nell'analisi, poiché quelli attualmente più facilmente reperibili dalle EPD.

Con riferimento alla Soluzione 2, presentata nel dettaglio nei paragrafi precedenti, vengono riportate in Tabella 12 i materiali e le quantità di riferimento e le EPD selezionate per il calcolo.

Tabella 12 - Materiali, quantità ed EPD considerate (Soluzione 2).

Categoria elementi	Materiali	unità	quantità	EPD
Fondazioni	Calcestruzzo C25/30	m ³	38.05	UNICAL + BETON
	Casseforme	m ³	1.14	PANGUANETA
	Barre armatura	ton	3.96	ALFA ACCIAI
	Micropali ghisa	m	420	TIROLER
Sovrastruttura	Profili acciaio	ton	14.55	BELTRAME + ARCELOR
Conessioni	Profili acciaio (spinotti)	ton	0.22	BELTRAME + ARCELOR
	Profili acciaio (marcapiano)	ton	2.18	BELTRAME + ARCELOR

Come precedentemente anticipato, i soli impatti GWP, PERT, PENRT, FW, NHWD sono stati considerati nell'analisi, poiché ritenuti quelli di più immediata comprensione e facile comunicazione per tutti gli attori coinvolti nel processo di riqualificazione. In Tabella 13, Tabella 14 e Tabella 15 vengono riportati gli impatti della soluzione considerata in fase di produzione (Moduli A1-3), fine vita (Moduli C3-4 D) e totali (Moduli A1-3 C3-4 D), rispettivamente.

In questi calcoli sono state considerate condizioni di fine vita differenti per ogni materiale, in accordo con le EPD considerate. Tali ipotesi e i riferimenti alle EPD utilizzate sono riportate in **Appendice A1**.

Tabella 13 - Impatti nella fase di produzione (Moduli A1-3) (Soluzione 2).

Categoria elementi	Materiali	GWP (kgCO ₂ eq)	PERT (MJ)	PENRT (MJ)	FW (m ³)	NHWD (kg)
Fondazioni	Calcestruzzo C25/30	3.81E+04	2.78E+03	4.45E+05	1.39E+02	3.40E+02
	Casseforme	5.68E+02	2.76E+04	4.06E+03	2.02E+01	2.37E+02
	Barre armatura	3.05E+03	2.23E+03	5.06E+04	2.62E+02	6.37E+02
	Micropali	9.37E+03	9.28E+03	1.22E+05	0.00E+00	0.00E+00
Sovrastruttura	Profili acciaio	1.06E+04	5.59E+03	1.83E+05	6.03E+01	1.31E+03
Conessioni	Profili acciaio (spinotti)	1.57E+02	8.30E+01	2.71E+03	8.95E-01	1.95E+01
	Profili acciaio (marcapiano)	1.58E+03	8.36E+02	2.73E+04	9.01E+00	1.96E+02
TOTALE		6.34E+04	4.84E+04	8.35E+05	4.91E+02	2.74E+03

Tabella 14 - Impatti a fine vita (Moduli C3-4-D) (Soluzione 2).

Categoria elementi	Materiali	GWP (kgCO ₂ eq)	PERT (MJ)	PENRT (MJ)	FW (m ³)	NHWD (kg)
Fondazioni	Calcestruzzo C25/30	-2.72E+03	-2.95E+02	-2.85E+04	-9.39E+00	1.49E+04
	Casseforme	-7.49E+00	-1.27E+01	-4.86E+01	4.79E+01	-8.80E+00
	Barre armatura	-4.43E+03	-3.28E+03	-5.28E+04	-8.21E+00	0.00E+00
	Micropali	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sovrastruttura	Profili acciaio	2.31E+01	-5.59E+02	-2.04E+04	-6.34E+00	2.26E+03
Conessioni	Profili acciaio (spinotti)	-1.79E+01	-8.31E+00	-3.02E+02	-9.41E-02	3.35E+01
	Profili acciaio (marcapiano)	-1.81E+02	-8.37E+01	-3.05E+03	-9.48E-01	3.38E+02
TOTALE		-7.34E+03	-4.24E+03	-1.05E+05	2.29E+01	1.75E+04

Tabella 15 - Impatti totali (Moduli A1-3, C3-4, D) (Soluzione 2).

Categoria elementi	Materiali	GWP (kgCO ₂ eq)	PERT (MJ)	PENRT (MJ)	FW (m ³)	NHWD (kg)
Fondazioni	Calcestruzzo C25/30	3.54E+04	2.48E+03	4.17E+05	1.29E+02	1.53E+04
	Casseforme	5.60E+02	2.76E+04	4.01E+03	6.80E+01	2.28E+02
	Barre armatura	-1.39E+03	-1.05E+03	-2.21E+03	2.54E+02	6.37E+02
	Micropali	9.37E+03	9.28E+03	1.22E+05	0.00E+00	0.00E+00
Sovrastruttura	Profili acciaio	1.06E+04	5.03E+03	1.62E+05	5.39E+01	3.57E+03
Conessioni	Profili acciaio (spinotti)	1.39E+02	7.47E+01	2.41E+03	8.01E-01	5.30E+01
	Profili acciaio (marcapiano)	1.40E+03	7.52E+02	2.43E+04	8.06E+00	5.34E+02
TOTALE		5.61E+04	4.41E+04	7.30E+05	5.21E+02	2.03E+04

Durata dell'intervento

Per quanto riguarda i tempi di costruzione, sono stati stimati 4,5 mesi (GG lavorativi con una squadra tipo) per la realizzazione di tutti gli interventi previsti (energetico e strutturale).

SOLUZIONE 3

Descrizione della soluzione strutturale

La terza soluzione di retrofit consiste in:

- 8 pareti sismo-resistenti in lamiera d'acciaio piena (sp.var. tra 1.5-2.5mm) assemblate all'esterno dell'edificio esistente (Figura 33).
- Ad ogni piano è fissata una fascia marcapiano alle travi perimetrali dell'impalcato. Si tratta di una piastra in acciaio (150x10)mm, collegata alla struttura esistente con spinotti $\Phi 20/50$;
- Alla base dell'esoscheletro in acciaio viene introdotto un nuovo sistema di fondazione, costituito da travi in ca (60x100)cm con un totale di 28 micropali ($\Phi 150$, $L > 15m$, capacità $\pm 243kN$).
- Tutti gli elementi dell'esoscheletro sono realizzati con profili in acciaio S235 verniciati contro la corrosione, considerando una categoria di corrosione C3 (ISO 12944) e con una durata prevista da 5 a 15 anni.

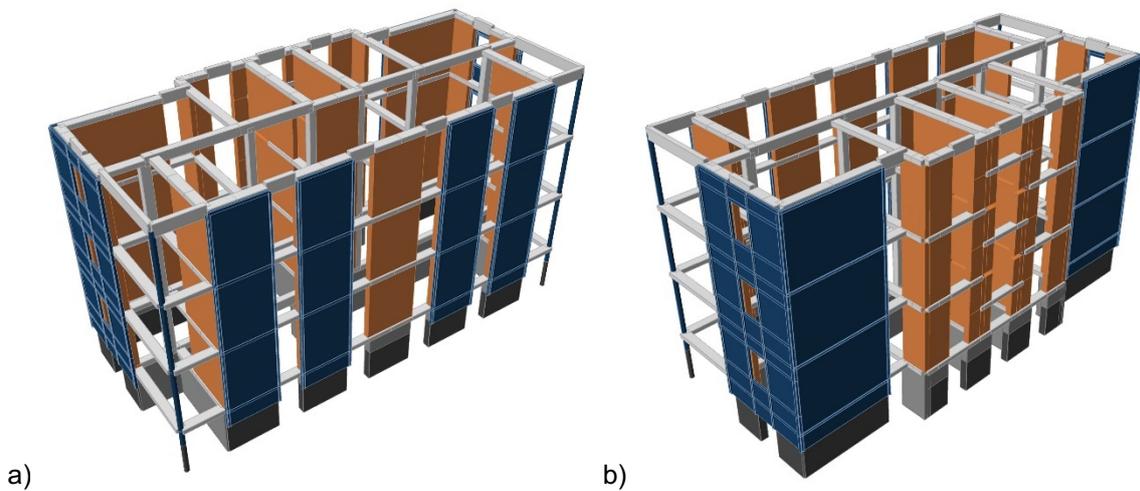
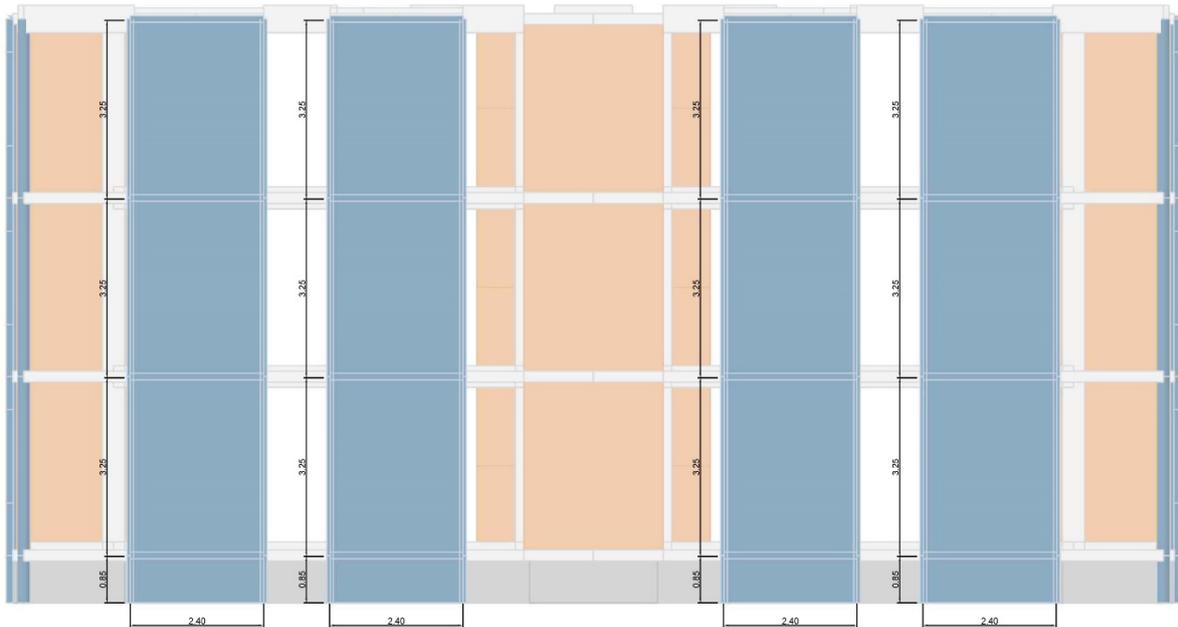
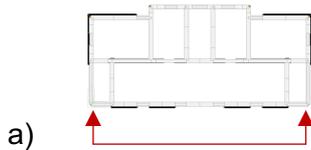


Figura 33 - Modello ad elementi finiti della Soluzione 3, a) vista sud-ovest; b) vista nord-est.

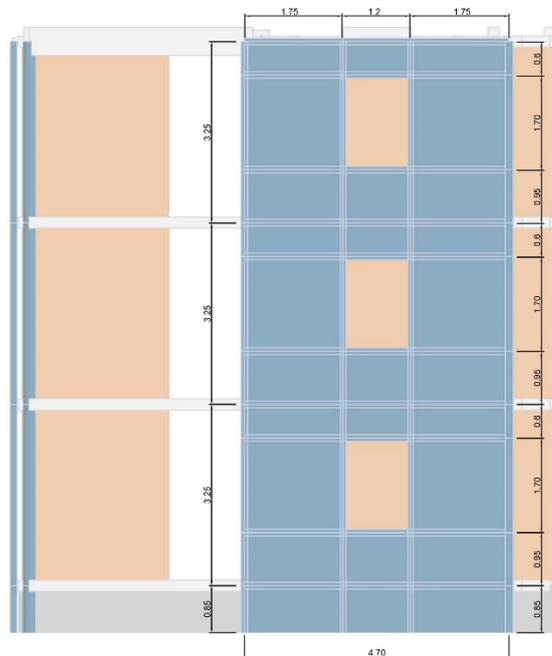
Geometria dell'esoscheletro



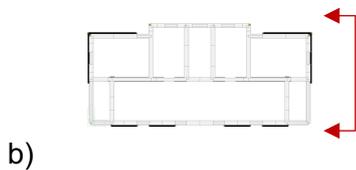
Elementi:



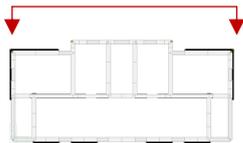
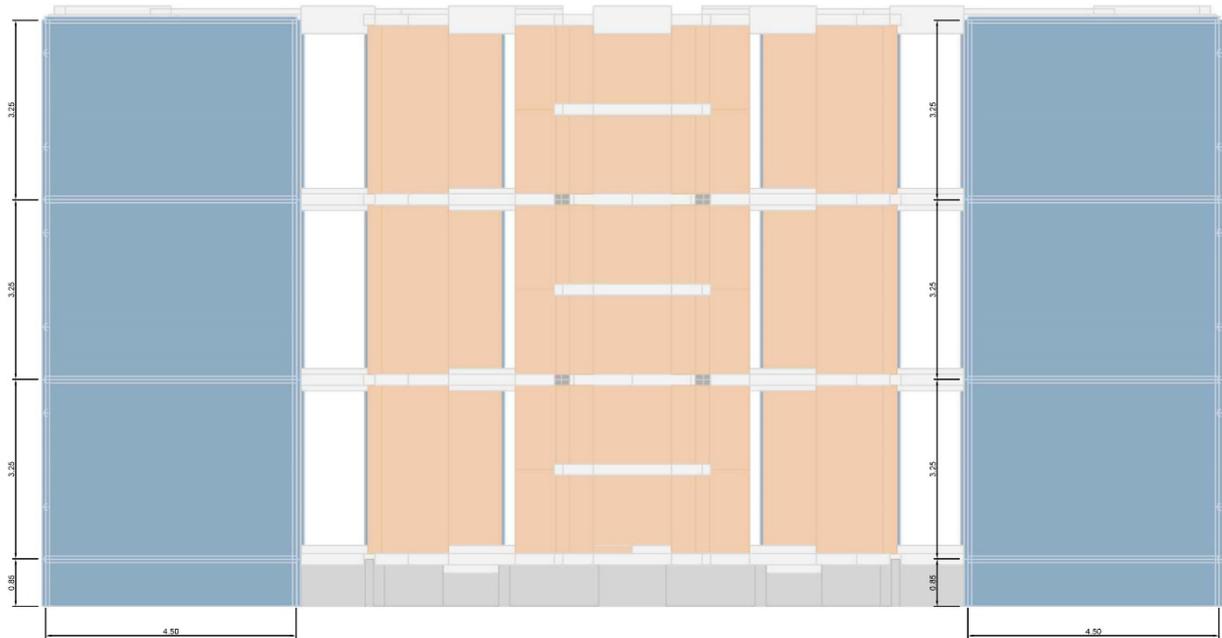
Tipo	Sezione
Elementi verticali	HEA120
Elementi orizzontali	UPN120
Pannello d'anima	Piatto spessore 1.5mm



Elementi:



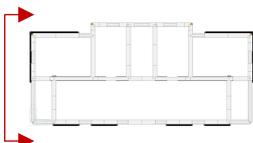
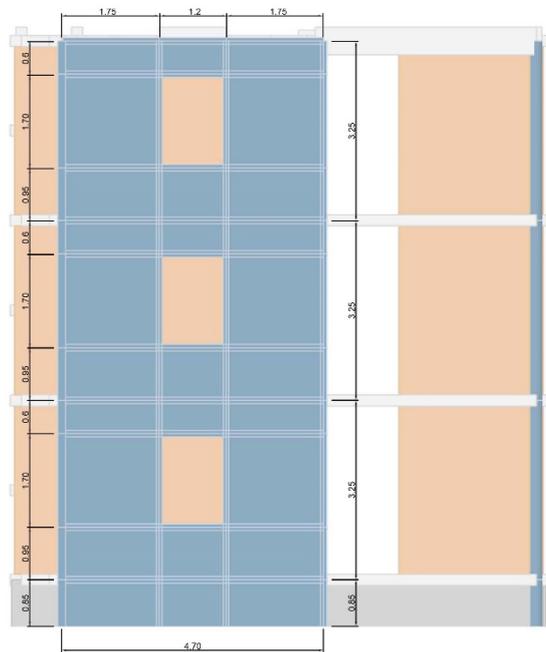
Tipo	Sezione
Elementi verticali	HEA120
Elementi orizzontali	UPN120
Pannello d'anima	Piatto spessore 2.5mm



c)

Elementi:

Tipo	Sezione
Elementi verticali	HEA140
Elementi orizzontali	UPN120
Pannello d'anima	Piatto spessore 1.5mm



d)

Elementi:

Tipo	Sezione
Elementi verticali	HEA120
Elementi orizzontali	UPN120
Pannello d'anima	Piatto spessore 2.5mm

Figura 34 - Geometria dell'esoscheletro della soluzione 3 (a, b, c, d)

Sistema di fondazioni

L'esoscheletro è sostenuto da un nuovo sistema di fondazione realizzato con travi in ca (60x100) cm e micropali, come per la Soluzione 2.

Alla base di ciascuna fondazione vengono introdotti 4 micropali $\Phi 150$ $L > 15m$ (Portata $\pm 243kN$) sulle facciate nord e sud, 6 micropali sulle facciate est e ovest, per un totale di 28 micropali. Essendo questa soluzione iso-performance con quella precedente (Soluzione 2) il numero di micropali rimane invariato.

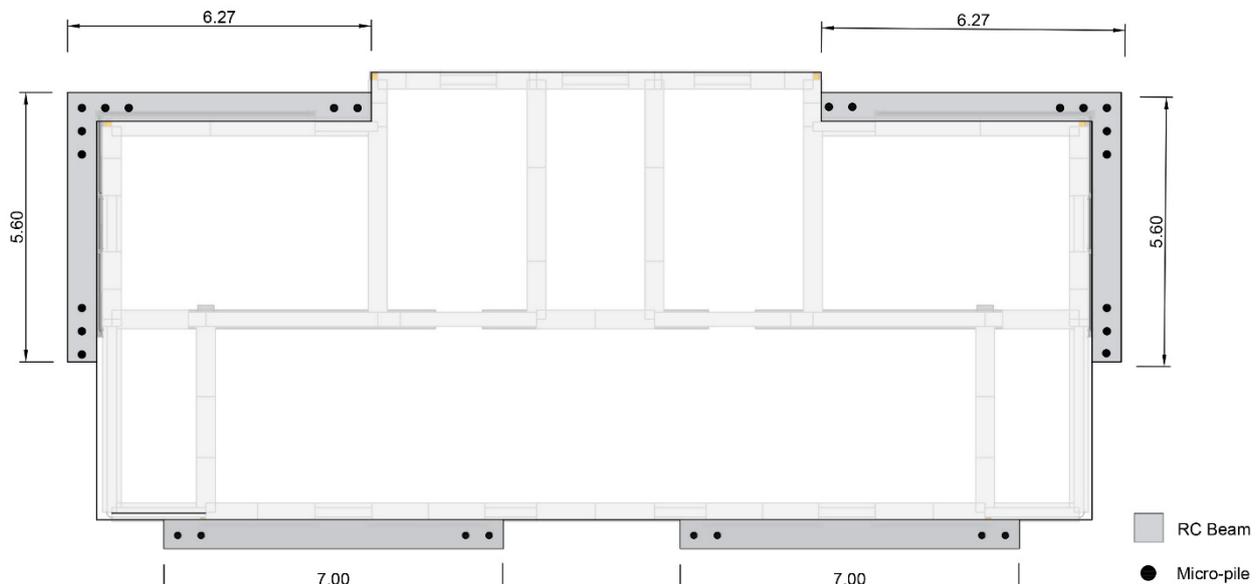


Figura 35 - Sistema di fondazione dell'intervento di rinforzo (Soluzione 3).

Descrizione delle misure di riqualificazione energetica

Le misure di retrofit energetico sono le stesse descritte per la Soluzione 1.

Costi di costruzione

Per la Soluzione 3 il costo totale di realizzazione è pari a € 337.708,40 mentre il costo di realizzazione per il rinforzo strutturale è pari a € 110.403,10, corrispondente al 33% del costo totale.

Di seguito viene riportato il rendiconto delle voci della parte strutturale dell'intervento.

Tabella 16 - Costi di intervento per la parte strutturale (Soluzione 3).

COMPOSIZIONE DEI COSTI DELLE PRINCIPALI CATEGORIE DI INTERVENTO STRUTTURALE						
VOCE	COSTO [€]	% SUL COSTO TOTALE [%]	€/mq in Sup. Lat.	COSTO UNITARIO	QUANTITA'	
0 FONDAZIONI	51.431,04 €	46,58	81,41 €	95,88 €	536 m2 in pianta	
1 Scavo e riempimento	565,00 €		0,89 €	25,00 €	22,6	m3
2 Magrone	226,00 €		0,36 €	100,00 €	2,26	m3
3 Calcestruzzo	2.938,00 €		3,68 €	130,00 €	22,60	m3
4 Casseforme	1.350,00 €		1,69 €	18,00 €	75	m2
5 Armatura in acciaio	4.352,04 €		6,89 €	1,10 €	3956,4	kg
6 Micropali	42.000,00 €		52,63 €	100,00 €	420	ml
7 PARETI DI TAGLIO IN ACCIAIO	39.408,44 €	35,70	60,68 €	73,47 €	536 m2 in pianta	
8 Carpenteria metallica (Elementi verticali e orizzontali di contorno)	24.656,00 €		37,97 €	4,00 €	6164,00	kg
9 Carpenteria metallica (Lamiere)	14.235,00 €		17,84 €	50,00 €	284,70	m2
10 Scrostamento di intonaco	517,44 €		0,65 €	7,00 €	73,92	m2
11 CONNESSIONI	18.109,22 €	16,40	27,89 €	33,76 €	536 m2 in pianta	
12 Spinotti	9.405,14 €		14,48 €	42,95 €	219	units
13 Fascia marcapiano	8.704,08 €		10,91 €	4,00 €	2176,02	kg
14 ALTRE SPESE	1.454,40 €	1,32	2,24 €	2,71 €	536 m2 in pianta	
15 Smaltimento	569,40 €		0,88 €	18,98 €	30	t
16 Riparazioni localizzate o generalizzate	885,00 €		1,36 €	59,00 €	15	m2
17 TOTALE COSTO DI COSTRUZIONE	110.403,10 €	100		205,82 €	€/m2 in pianta	
				58,26 €	€/m3	
				174,75 €	€/m2 sup. lat.	

I costi vengono riassunti nella Figura 36.

COSTI [€]			
1	FONDAZIONI	51431	46,6%
2	LAMIERA	39408	35,7%
3	CONNESSIONI	18109	16,4%
4	ALTRO	1454,40	1,3%

Costo totale strutture	110404	100%
Costo a m ² in pianta	206,0	€/m²
Costo a m ³	58,3	€/m³
Costo a m ² in facciata	174,7	€/m²

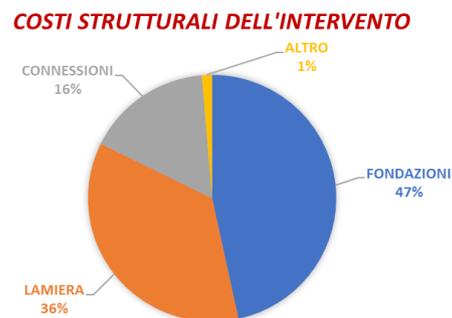


Figura 36 - Costi per la parte strutturale dell'intervento (Soluzione 3).

Per quanto concerne invece l'intero intervento, di seguito viene riportato il computo per macroaree.

Tabella 17 - Costi di intervento per macroaree (Soluzione 3).

ANALISI DEI COSTI					
TIPO DI STIMA: STIMA A LIVELLO DI PROGETTO PRELIMINARE					
VOCE DI COSTO	COSTO [€]	% SUL COSTO TOTALE [%]	€/mq in Sup. Lat.	COSTO UNITARIO	QUANTITA'
PREPARAZIONE DEL CANTIERE	5.283,89 €	1,56	8,36 €	9,85 €	536 m2 in pianta
Allestimento di cantiere	2.100,00 €	0,62	3,32 €	2.100,00 €	
Recinzione di cantiere	70,95 €	0,02	0,11 €	14,19 €	
Costi aggiuntivi per la sicurezza	1.220,00 €	0,36	1,93 €	1.220,00 €	
Ponteggio	1.892,94 €	0,56	3,00 €	8,69 €	217,83 mq
DEMOLIZIONI	1.861,45 €	0,55	2,95 €	3,47 €	536 m2 in pianta
Apertura porte finestre	424,80 €	0,13	0,67	236,00 €	1,80 €
Rimozione di serramenti in legno o ferro, inferiate, parapetti, cancelli	1.436,65 €	0,43	#DIV/0!	17,03 €	84,36 €
SMALTIMENTO RIFIUTI	1.144,90 €	0,34	1,81 €	2,13 €	536 m2 in pianta
Conferimento di rifiuti a discariche	1.144,90 €	0,34	1,81	9,60 €	119,26 €
FINITURE FACCIATE	60.926,85 €	18,04	96,44 €	113,58 €	536 m2 in pianta
Intonaco rasato facciata nord	4.233,95 €	1,25	6,70	30,57 €	138,50 €
Pannelli di fibrocemento ecologico posati con idonea struttura di supporto	51.630,40 €	15,29	81,72 €	230,00 €	224,48 mq
Pannelli in legno idrorepellente per esterni	5.062,50 €	1,50	8,01 €	135,00 €	37,5 mq
RETROFIT ENERGETICO	73.427,88 €	21,74	116,23 €	136,89 €	536 m2 in pianta
Isolante tipo la Stiferite GT sp. 8 cm facciata nord	12.465,00 €	3,69	19,73 €	90,00 €	138,5 mq
Isolante tipo la Stiferite GT sp. 7+7 cm facciata sud est ovest	22.890,50 €	6,78	36,23 €	85,00 €	269,3 mq
Serramenti in PVC	28.800,00 €	8,53	45,59 €	450,00 €	64 mq
Davanzali	4.962,70 €	1,47	7,86 €	135,89 €	36,52 mq
Imbotti finestre	2.407,68 €	0,71	3,81 €	60,00 €	
Zoccolo edificio	1.902,00 €	0,56	3,01 €	75,00 €	
RETROFIT STRUTTURALE	110.403,10 €	32,69	174,75 €	205,82 €	536 m2 in pianta
Sistema di fondazione	51.431,04 €	15,23	81,41 €	95,88 €	
Sovra-struttura	39.408,44 €	11,67	62,38 €	73,47 €	
Conessioni	18.109,22 €	5,36	28,66 €	33,76 €	
Altro	1.454,40 €	0,43	2,30 €	2,71 €	
SICUREZZA DEL CANTIERE	15.000,00 €	4,44	23,74 €	27,96 €	536 m2 in pianta
VARIE ED EVENTUALI	8.041,44 €	2,38	12,73 €	14,99 €	536 m2 in pianta
TASSE	27.608,95 €	8,18	43,70 €	51,47 €	536 m2 in pianta
SPESE TECNICHE PER LA PROGETTAZIONE	26.804,81 €	7,94	42,43 €	49,97 €	536 m2 in pianta
TASSE PER LE SPESE DI PROGETTAZIONE	7.205,13 €	2,13	11,40 €	13,43 €	536 m2 in pianta
TOTALE COSTO DI COSTRUZIONE	337.708,40 €	100		629,58 €	€/m2 in pianta
				178,21 €	€/m3
				534,55 €	€/m2 sup. lat.

Analisi preliminare dei costi sul ciclo di vita – Life Cycle Costs (LCC)

L'analisi qualitativa dei costi sul ciclo di vita (LCC) può essere considerata analoga a quella della Soluzione 1.

Analisi dei costi Lyfe Cycle (LCA)

Per le Soluzioni 2, 3 e 4, iso-performance da un punto di vista sismico, è stata fatta una valutazione degli impatti ambientali in termini di:

- Emissioni di CO₂ equivalenti (GWP - Global Warming Potential) (kgCO₂eq)
- Consumo di risorse di energia primaria rinnovabile (PERT) (MJ)
- Consumo di risorse di energia primaria non rinnovabile (PENRT) (MJ)
- Consumo di acqua (FW) (m³)
- Produzione di rifiuti non pericolosi (NHSD) (kg)

Tal impatti sono stati calcolati considerando come limiti del sistema le fasi di inizio vita, cioè estrazione del materiale, trasporto e produzione degli elementi costruttivi (Moduli A1, A2, A3 del quadro di riferimento della EN15978-2011), fine vita, cioè lavorazione dei rifiuti e discarica (Moduli C3 e C4 del quadro di riferimento della EN15978-2011) e possibili benefit oltre alla vita dell'edificio, nel caso in cui tali elementi fossero riutilizzati, recuperati o riciclati (Modulo D del quadro di riferimento della EN15978-2011) (Figura 32).

Per il calcolo degli impatti è stata condotta un'analisi LCA basata su Etichette Ambientali di Prodotto (in inglese, EPD- Environmental Product Declaration) secondo la metodologia descritto a **Pagina 39 - Metodologia** [5].

Calcolo degli impatti per la Soluzione 3

Come limiti del sistema viene scelta la sola soluzione strutturale, senza considerare gli impatti connessi alla struttura esistente, all'intervento energetico e alle finiture architettoniche. Le sole fasi di inizio e fine vita, ed in particolare i Moduli A1-3, C3-4, D sono considerati nell'analisi, poiché quelli attualmente più facilmente reperibili dalle EPD.

Con riferimento alla Soluzione 3, presentata nel dettaglio nei paragrafi precedenti, vengono riportate in Tabella 18 i materiali e le quantità di riferimento e le EPD selezionate per il calcolo.

Tabella 18 - Materiali, quantità ed EPD considerate (Soluzione 3).

Categoria elementi	Materiali	unità	quantità	EPD
Fondazioni	Calcestruzzo C25/30	m ³	38.05	UNICAL + BETON
	Casseforme	m ³	1.14	PANGUANETA
	Barre armatura	ton	3.96	ALFA ACCIAI
	Micropali ghisa	m	420	TIROLER
Sovrastruttura	Profili acciaio	ton	6.16	BELTRAME + ARCELOR
	Lamiera acciaio	ton	8.94	HYUNDAI
Conessioni	Profili acciaio (spinotti)	ton	0.22	BELTRAME + ARCELOR
	Profili acciaio (marcapiano)	ton	2.18	BELTRAME + ARCELOR

Come precedentemente anticipato, i soli impatti GWP, PERT, PENRT, FW, NHWD sono stati considerati nell'analisi, poiché ritenuti quelli di più immediata comprensione e facile comunicazione per tutti gli attori coinvolti nel processo di riqualificazione. In Tabella 19, Tabella 20 e Tabella 21 vengono riportati gli impatti della soluzione considerata in fase di produzione (Moduli A1-3), fine vita (Moduli C3-4 D) e totali (Moduli A1-3 C3-4 D), rispettivamente.

In questi calcoli sono state considerate condizioni di fine vita differenti per ogni materiale, in accordo con le EPD considerate. Tali ipotesi e i riferimenti alle EPD utilizzate sono riportate in **Appendice A1**.

Tabella 19 - Impatti nella fase di produzione (Moduli A1-3) (Soluzione 3).

Categoria elementi	Materiali	GWP (kgCO₂eq)	PERT (MJ)	PENRT (MJ)	FW (m³)	NHWD (kg)
Fondazioni	Calcestruzzo C25/30	3.81E+04	2.78E+03	4.45E+05	1.39E+02	3.40E+02
	Casseforme	5.68E+02	2.76E+04	4.06E+03	2.02E+01	2.37E+02
	Barre armatura	3.05E+03	2.23E+03	5.06E+04	2.62E+02	6.37E+02
	Micropali	9.37E+03	9.28E+03	1.22E+05	0.00E+00	0.00E+00
Sovrastruttura	Profili acciaio	4.49E+03	2.37E+03	7.74E+04	2.55E+01	5.55E+02
	Lamiera acciaio	1.90E+04	2.82E+03	2.91E+05	4.52E+01	1.98E+02
Conessioni	Profili acciaio (spinotti)	1.57E+02	8.30E+01	2.71E+03	8.95E-01	1.95E+01
	Profili acciaio (marcapiano)	1.58E+03	8.36E+02	2.73E+04	9.01E+00	1.96E+02
TOTALE		7.63E+04	4.80E+04	1.02E+06	5.02E+02	2.18E+03

Tabella 20 - Impatti a fine vita (Moduli C3-4-D) (Soluzione 3).

Categoria elementi	Materiali	GWP (kgCO₂eq)	PERT (MJ)	PENRT (MJ)	FW (m³)	NHWD (kg)
Fondazioni	Calcestruzzo C25/30	-2.72E+03	-2.95E+02	-2.85E+04	-9.39E+00	1.49E+04
	Casseforme	-7.49E+00	-1.27E+01	-4.86E+01	4.79E+01	-8.80E+00
	Barre armatura	-4.43E+03	-3.28E+03	-5.28E+04	-8.21E+00	0.00E+00
	Micropali	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sovrastruttura	Profili acciaio	9.81E+00	-2.37E+02	-8.63E+03	-2.68E+00	9.57E+02
	Lamiera acciaio	-1.14E+04	7.63E+03	-1.03E+05	1.59E+01	1.73E+03
Conessioni	Profili acciaio (spinotti)	-1.79E+01	-8.31E+00	-3.02E+02	-9.41E-02	3.35E+01
	Profili acciaio (marcapiano)	-1.81E+02	-8.37E+01	-3.05E+03	-9.48E-01	3.38E+02
TOTALE		-1.87E+04	3.71E+03	-1.97E+05	4.24E+01	1.80E+04

Tabella 21 - Impatti totali (Moduli A1-3, C3-4, D) (Soluzione 3).

Categoria elementi	Materiali	GWP (kgCO₂eq)	PERT (MJ)	PENRT (MJ)	FW (m³)	NHWD (kg)
Fondazioni	Calcestruzzo C25/30	3.54E+04	2.48E+03	4.17E+05	1.29E+02	1.53E+04
	Casseforme	5.60E+02	2.76E+04	4.01E+03	6.80E+01	2.28E+02
	Barre armatura	-1.39E+03	-1.05E+03	-2.21E+03	2.54E+02	6.37E+02
	Micropali	9.37E+03	9.28E+03	1.22E+05	0.00E+00	0.00E+00
Sovrastruttura	Profili acciaio	4.50E+03	2.13E+03	6.88E+04	2.28E+01	1.51E+03
	Lamiera acciaio	7.57E+03	1.05E+04	1.88E+05	6.11E+01	1.92E+03
Conessioni	Profili acciaio (spinotti)	1.39E+02	7.47E+01	2.41E+03	8.01E-01	5.30E+01
	Profili acciaio (marcapiano)	1.40E+03	7.52E+02	2.43E+04	8.06E+00	5.34E+02
TOTALE		5.75E+04	5.17E+04	8.25E+05	5.47E+02	2.01E+04

Durata dell'intervento

Per quanto riguarda i tempi di costruzione, sono stati stimati 4 mesi (GG lavorativi con una squadra tipo) per la realizzazione di tutti gli interventi previsti (energetico e strutturale).

SOLUZIONE 4

Descrizione della soluzione strutturale

La soluzione 4 consiste nei seguenti interventi:

- Esoscheletro a guscio in legno che si estende su tutta la facciata, realizzato con pannelli XLAM di spessore variabile tra 80mm e 180mm. I pannelli adiacenti sono collegati tra loro con piastra di coprigiunto in acciaio e chiodi $\Phi 4/4$ cm (Figura 37);
- Nuovi telai in acciaio HEA140 per cerchiare le aperture al fine di irrigidire e diffondere gli sforzi che altrimenti si localizzerebbero negli spigoli;
- Ad ogni piano viene fissata una fascia marcapiano in acciaio ai cordoli perimetrali dell'impalcato e vengono introdotti dei tiranti all'intradosso del tetto e del solaio per migliorare la capacità del diaframma di piano. La fascia è costituita da piastre in acciaio (150x10)mm, ed è collegata alla struttura esistente con spinotti $\Phi 16/70$ cm;
- Alla base dell'esoscheletro viene introdotto un nuovo sistema di fondazione, costituito da travi in c.a. (60x100)cm; le nuove fondazioni sono collegate all'edificio esistente con spinotti $\Phi 16/35$ cm. Vengono introdotti agli angoli dell'esoscheletro un totale di 8 micropali ($\Phi 150$, $L > 15$ m, capacità ± 243 kN).

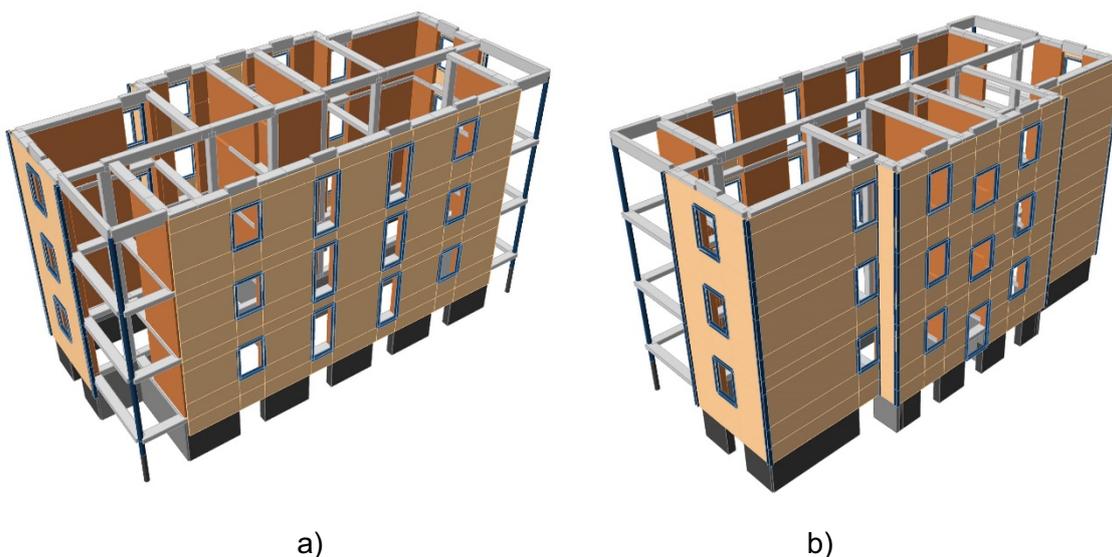
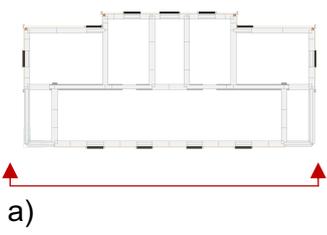
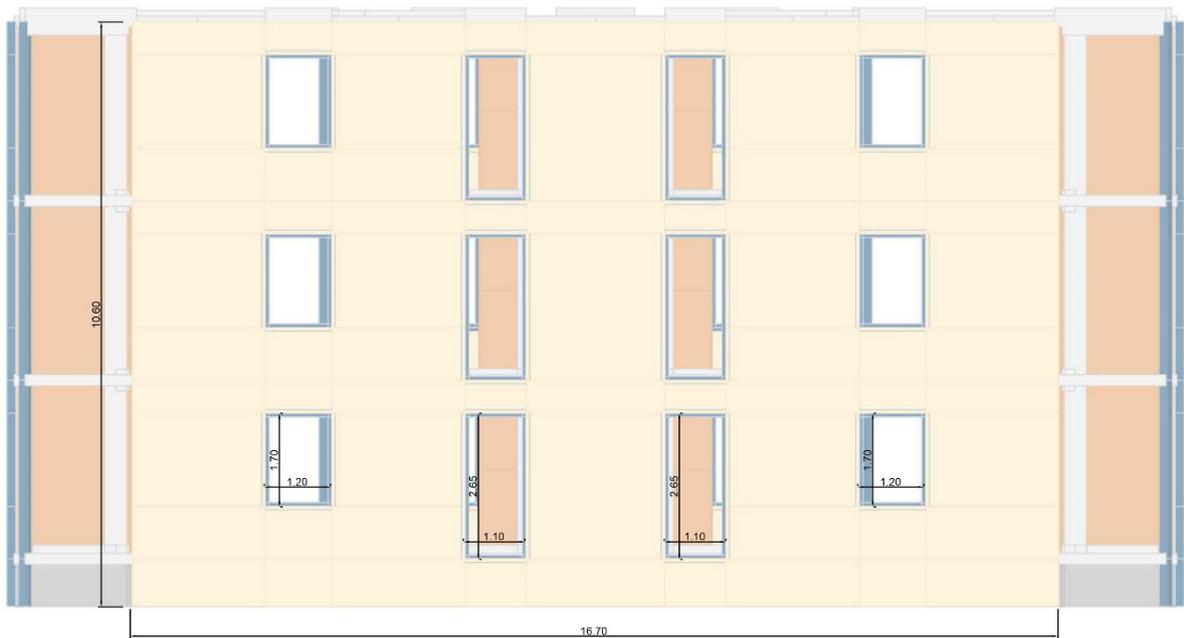


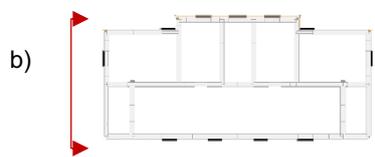
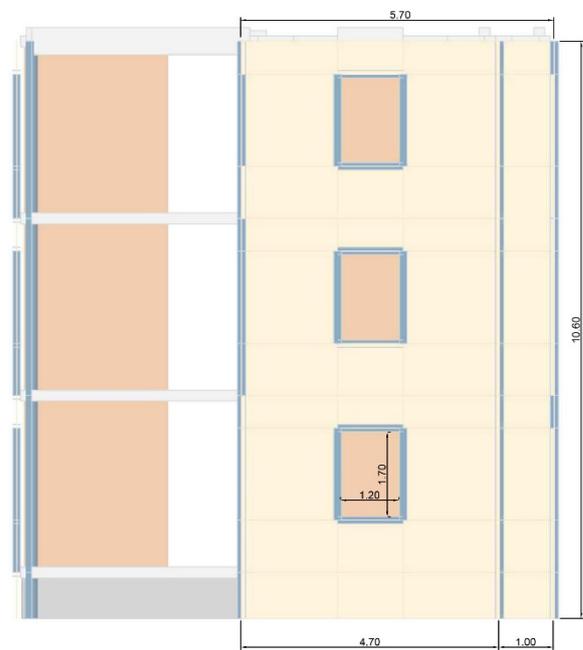
Figura 37 - Modello ad elementi finiti della Soluzione 4, a) vista sud-ovest; b) vista nord-est.

Descrizione della soluzione strutturale



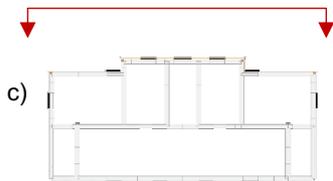
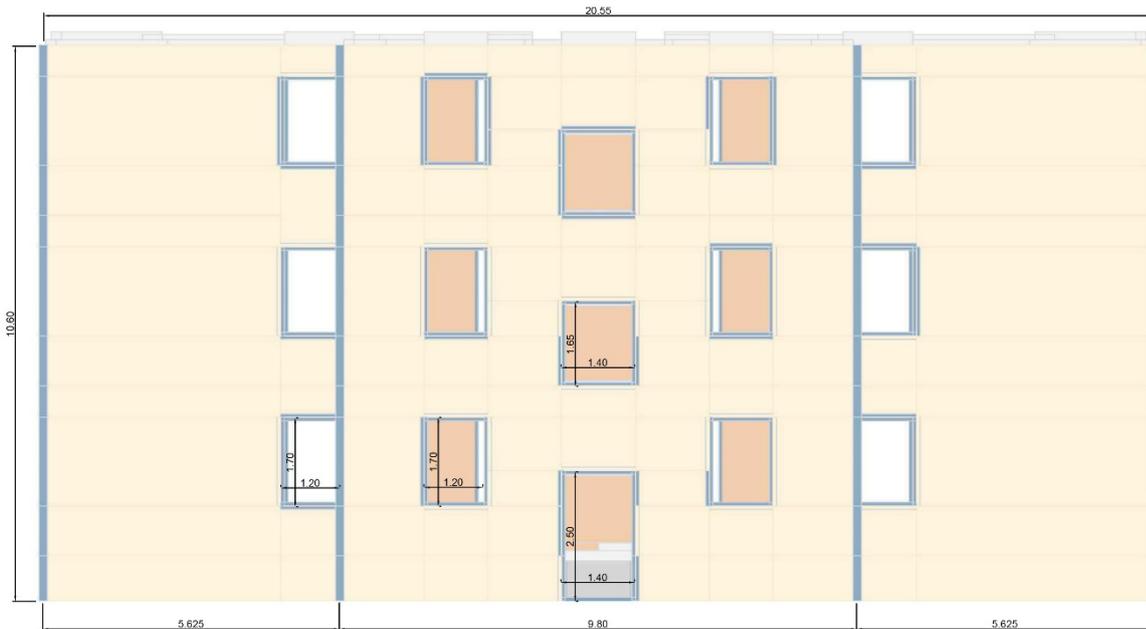
Elementi:

Tipo	Sezione
Pannelli X-LAM	80 mm
Elementi in acciaio	UPN140



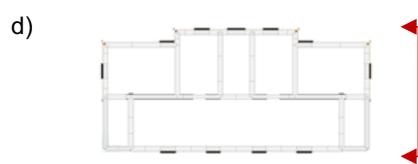
Elementi:

Tipo	Sezione
Pannelli X-LAM	180 mm
Elementi in acciaio	UPN140
Elementi verticali in acciaio	HEA160



Elementi:

Tipo	Sezione
Pannelli X-LAM	80 mm
Elementi in acciaio	UPN140
Elementi verticali in acciaio	HEA160



Elementi:

Tipo	Sezione
Pannelli X-LAM	180 mm
Elementi in acciaio	UPN140
Elementi verticali in acciaio	HEA160

Figura 38 - Geometria dell'esoscheletro della soluzione 4 (a, b, c, d).

Dettagli e connessioni

e)

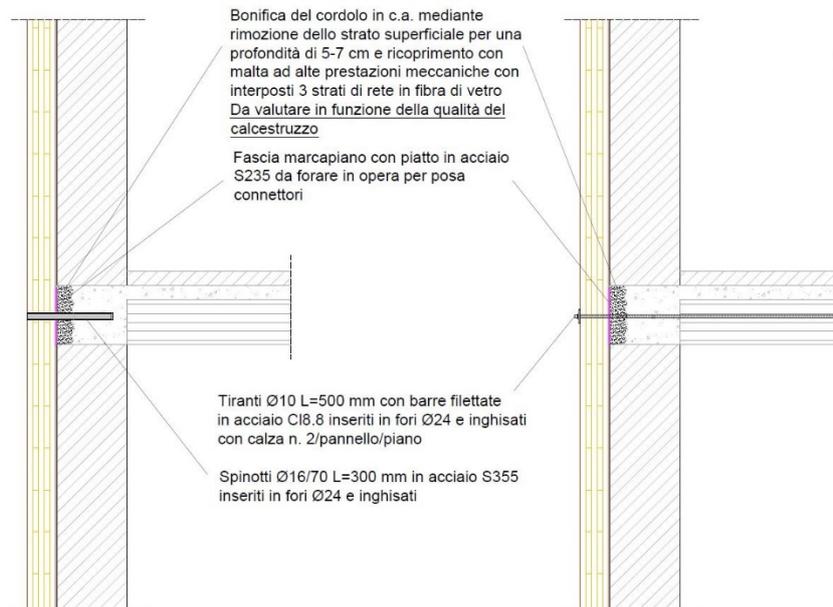


Figura 32 (e) - Sistema di connessione del retrofit (Soluzione 4).

Sistema di fondazione

Alla base dell'esoscheletro in legno in adiacenza all'edificio esistente viene realizzato un nuovo sistema di fondazione in travi in ca (60x100) cm. Le nuove fondazioni sono collegate all'edificio esistente e sono finalizzate a resistere al solo momento flettente causato dalle azioni sismiche. Le azioni di taglio alla base dell'esoscheletro esterno vengono invece trasferite al sistema di fondazione esistente mediante spinotti $\varnothing 16/35$ cm.

Alla base della fondazione vengono inseriti un totale di 8 micropali $\varnothing 150$ L>15m (Capacità ± 243 kN). La posizione di questi elementi è riportata in Figura 39.

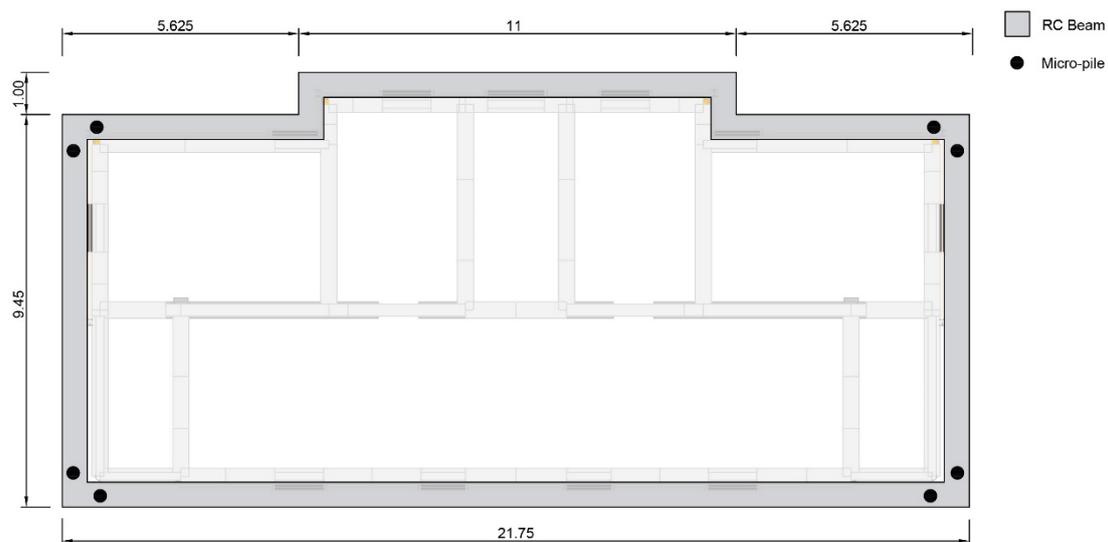


Figura 39 - Sistema di fondazione dell'intervento di rinforzo (Soluzione 4).

Descrizione delle misure di riqualificazione energetica

Le misure di retrofit energetico sono le stesse descritte per la Soluzione 1.

Costi di costruzione

Per la Soluzione 4 il costo totale di realizzazione è pari a € 383.501,95, mentre il costo di realizzazione per il rinforzo strutturale è pari a € 146.750,65, corrispondente al 38% del costo totale.

Di seguito viene riportato il rendiconto delle voci della parte strutturale dell'intervento.

Tabella 22 -Costi di intervento per la parte strutturale (Soluzione 4).

COMPOSIZIONE DEI COSTI DELLE PRINCIPALI CATEGORIE DI INTERVENTO STRUTTURALE					
VOCE	COSTO [€]	% COSTO TOTALE	€/mq in Sup. Lat.	COSTO UNITARIO	QUANTITA'
0 FONDAZIONI	26698,39	18,19	42,26	49,77	536 m2 in pianta
1 Scavo e riempimento	924,00		1,46	25	36,96 m3
2 Magrone	369,00		0,58	100	3,69 m3
3 Calcestruzzo	4804,80		6,02	130	36,96 m3
4 Casseforme	2217,60		2,78	18	123,2 m2
5 Armatura in acciaio	6382,99		10,10	1,1	5802,72 kg
6 Micropali	12000,00		15,04	100	120 ml
9 GUSCIO IN LEGNO	100488,64	68,48	154,74	187,34	536 m2 in pianta
10 Pannelli XLAM	69619,20		87,24	156,8	444,00 m2
11 Cerchiature e irrigidimenti	30352,00		38,04	4	7588,00 kg
12 Scrostamento di intonaco	517,44		0,65	7	73,92 m2
13 CONNESSIONI	18109,22	12,34	27,89	33,76	536 m2 in pianta
13 Spinotti	9405,14		14,48	43	219 units
14 Fascia marcapiano	8704,08		10,91	4	2176,02 kg
16 ALTRE SPESE	1454,40	0,99	2,24	2,71	536 m2 in pianta
16 Smaltimento	569,40		0,88	18,98	30 t
17 Riparazioni localizzate o generalizzate	885,00		1,36	59	15 m2
19 TOTALE COSTO DI COSTRUZIONE	146750,65	100		274	€/m2 in pianta
				77	€/m3
				232	€/m2 sup. lat.

I costi vengono riassunti nella Figura 40.

COSTI [€]	
1 FONDAZIONI	26698 18,2%
2 XLAM	100489 68,5%
3 CONNESSIONI	18109 12,3%
4 ALTRO	1454 1,0%

Costo totale intervento	146752	100%
Costo a m ² in pianta	273,8	€/m ²
Costo a m ³	77,4	€/m ³
Costo a m ² in facciata	232,3	€/m ²

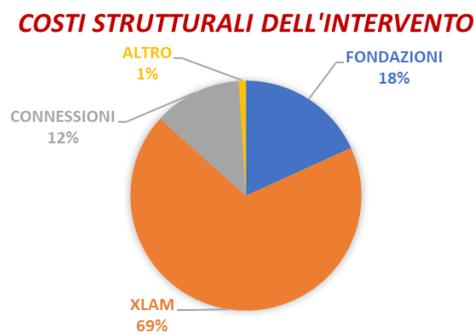


Figura 40 - Costi per la parte strutturale dell'intervento (Soluzione 4).

Per quanto concerne invece l'intero intervento, di seguito viene riportato il computo per macro-aree.

Tabella 23 - Costi di intervento per macroaree (Soluzione 4).

ANALISI DEI COSTI					
TIPO DI STIMA: STIMA A LIVELLO DI PROGETTO PRELIMINARE					
VOCE DI COSTO	COSTO [€]	% COSTO TOTALE	€/mq in Sup. Lat.	COSTO UNITARIO	QUANTITA'
PREPARAZIONE DEL CANTIERE	5.283,89 €	1,38	8,36 €	9,85 €	536 m2 in pianta
Allestimento di cantiere	2.100,00 €	0,55	3,32 €	2.100,00 €	
Recinzione di cantiere	70,95 €	0,02	0,11 €	14,19 €	
Costi aggiuntivi per la sicurezza	1.220,00 €	0,32	1,93 €	1.220,00 €	
Ponteggio	1.892,94 €	0,49	3,00 €	8,69 €	217,83 mq
DEMOLIZIONI	1.861,45 €	0,49	2,95 €	3,47 €	536 m2 in pianta
Apertura porte finestre	424,80 €	0,11	0,67	236,00 €	1,80 €
Rimozione di serramenti in legno o ferro, inferiate, parapetti, cancelli	1.436,65 €	0,37	#DIV/0!	17,03 €	84,36 €
SMALTIMENTO RIFIUTI	1.144,90 €	0,30	1,81 €	2,13 €	536 m2 in pianta
Conferimento di rifiuti a discariche	1.144,90 €	0,30	1,81	9,60 €	119,26 €
FINITURE FACCIATE	60.926,85 €	15,89	96,44 €	113,58 €	536 m2 in pianta
Intonaco rasato facciata nord	4.233,95 €	1,10	6,70	30,57 €	138,50 €
Pannelli di fibrocemento ecologico posati con idonea struttura di supporto	51.630,40 €	13,46	81,72 €	230,00 €	224,48 mq
Pannelli in legno idrorepellente per esterni	5.062,50 €	1,32	8,01 €	135,00 €	37,5 mq
RETROFIT ENERGETICO	73.427,88 €	19,15	116,23 €	136,89 €	536 m2 in pianta
Isolante tipo la Stiferite GT sp. 8 cm facciata nord	12.465,00 €	3,25	19,73 €	90,00 €	138,5 mq
Isolante tipo la Stiferite GT sp. 7+7 cm facciata sud est ovest	22.890,50 €	5,97	36,23 €	85,00 €	269,3 mq
Serramenti in PVC	28.800,00 €	7,51	45,59 €	450,00 €	64 mq
Davanzali	4.962,70 €	1,29	7,86 €	135,89 €	36,52 mq
Imbotti finestre	2.407,68 €	0,63	3,81 €	60,00 €	
Zoccolo edificio	1.902,00 €	0,50	3,01 €	75,00 €	
RETROFIT STRUTTURALE	146.750,65 €	38,27	232,29 €	273,58 €	536 m2 in pianta
Sistema di fondazione	26.698,39 €	6,96	42,26 €	49,77 €	
Sovra-struttura	100.488,64 €	26,20	159,06 €	187,34 €	
Connessioni	18.109,22 €	4,72	28,66 €	33,76 €	
Altro	1.454,40 €	0,38	2,30 €	2,71 €	
SICUREZZA DEL CANTIERE	15.000,00 €	3,91	23,74 €	27,96 €	536 m2 in pianta
VARIE ED EVENTUALI	9.131,87 €	2,38	14,45 €	17,02 €	536 m2 in pianta
TASSE	31.352,75 €	8,18	49,63 €	58,45 €	536 m2 in pianta
SPESE TECNICHE PER LA PROGETTAZIONE	30.439,56 €	7,94	48,18 €	56,75 €	536 m2 in pianta
TASSE PER LE SPESE DI PROGETTAZIONE	8.182,15 €	2,13	12,95 €	15,25 €	536 m2 in pianta
TOTALE COSTO DI COSTRUZIONE	383.501,95 €	100		714,96 €	€/m2 in pianta
				202,38 €	€/m3
				607,04 €	€/m2 sup. lat.

In questa sezione vengono riportate alcune considerazioni qualitative in merito ai possibili costi di Life Cycle della soluzione proposta:

1. Fase di costruzione: l'intervento viene effettuato per la maggior parte dall'esterno dell'edificio. Le operazioni di costruzione sono organizzate in modo da evitare il trasferimento degli abitanti. Questo aspetto riduce notevolmente i costi di costruzione dell'intervento. Il sistema adotta una tecnica a secco, che può essere facilmente assemblata in cantiere. I macro-elementi prefabbricati sono preassemblati in fabbrica e devono solo essere montati in cantiere, con conseguenti tempi di costruzione ridotti. La sovrastruttura richiede circa 1 mese per essere montata (considerando una squadra di 3 persone, una gru di 18 metri e l'impalcatura). Per questa soluzione è necessaria una manodopera specializzata (circa 30€/ora). Inoltre, lo strato di isolamento termico può essere preinstallato sui pannelli XLAM fuori sede, riducendo ulteriormente i tempi di costruzione. Poiché l'intervento strutturale è accoppiato all'intervento di riqualificazione energetica, con un alto livello di integrazione, si ottimizzano non solo i costi di costruzione condivisi legati alla sicurezza (es. ponteggi) e all'organizzazione del cantiere, ma anche i costi condivisi di materiale, trasporto e manodopera. Anche i costi delle finiture possono essere considerati condivisi.
2. Fase operativa: le misure di riqualificazione energetica permettono di ridurre la domanda di energia e i consumi energetici, riducendo i costi operativi.
3. Fase di manutenzione: per questa soluzione si considerano i pannelli di legno prefabbricati. In questo caso, l'esoscheletro strutturale in legno è completamente rivestito dallo strato di isolamento termico, quindi si può ritenere che la soluzione non implichi futuri costi di manutenzione aggiuntivi per la riparazione/sostituzione degli elementi strutturali aggiuntivi. Tuttavia, i dettagli delle finiture devono permettere l'ispezionabilità (l'ispezione è raccomandata ogni 5 anni).
4. Fase post-sisma: le soluzioni di retrofit sismico sono tutte progettate per minimizzare il danno negli elementi strutturali e non strutturali anche per terremoti di alta intensità. Nella fase post-terremoto, non ci si aspetta alcun danno negli elementi strutturali esistenti e aggiuntivi né negli elementi non strutturali drift-sensitive. Per tali soluzioni rigide, tuttavia, ci si può aspettare qualche danno negli elementi non strutturali sensibili all'accelerazione (mobili, oggetti che potrebbero ribaltarsi e cadere, e impianti idrici, di raffreddamento e di riscaldamento).
5. Fase di fine vita: questo intervento strutturale adotta una tecnica a secco in legno, che permette un facile smontaggio del sistema di retrofit strutturale a fine vita dell'edificio (tranne il sistema di fondazione). Essendo gli elementi prefabbricati, il tempo di smontaggio è piuttosto basso. Il livello di riutilizzo degli elementi è solitamente basso. Dopo lo smontaggio, i pannelli di legno saranno quindi inviati a un impianto di riciclaggio/downcycling e/o utilizzati per il recupero energetico. Vari scenari per il recupero dei pannelli XLAM sono discussi nella sezione seguente. Le ipotesi per il fine vita dei vari materiali impiegati nella soluzione sono inoltre riportate in **Appendice A1**.

Analisi dei costi Lyfe Cycle (LCA)

Per le Soluzioni 2, 3 e 4, tra loro iso-performance da un punto di vista sismico, è stata fatta una valutazione degli impatti ambientali in termini di:

- Emissioni di CO₂ equivalenti (GWP - Global Warming Potential) (kgCO₂eq)
- Consumo di risorse di energia primaria rinnovabile (PERT) (MJ)
- Consumo di risorse di energia primaria non rinnovabile (PENRT) (MJ)
- Consumo di acqua (FW) (m³)
- Produzione di rifiuti non pericolosi (NHSD) (kg)

Tal impatti sono stati calcolati considerando come limiti del sistema le fasi di inizio vita, cioè estrazione del materiale, trasporto e produzione degli elementi costruttivi (Moduli A1, A2, A3 del quadro di riferimento della EN15978-2011), fine vita, cioè lavorazione dei rifiuti e discarica (Moduli C3 e C4 del quadro di riferimento della EN15978-2011) e possibili benefit oltre alla vita dell'edificio, nel caso in cui tali elementi fossero riutilizzati, recuperati o riciclati (Modulo D del quadro di riferimento della EN15978-2011) (Figura 32).

Per il calcolo degli impatti è stata condotta un'analisi LCA basata su Etichette Ambientali di Prodotto (in inglese, EPD- Environmental Product Declaration) secondo la metodologia descritto a **Pagina 39 - Metodologia** [5].

Calcolo degli impatti per la Soluzione 4

Come limiti del sistema viene scelta la sola soluzione strutturale, senza considerare gli impatti connessi alla struttura esistente, all'intervento energetico e alle finiture architettoniche. Le sole fasi di inizio e fine vita, ed in particolare i Moduli A1-3, C3-4, D sono considerati nell'analisi, poiché quelli attualmente più facilmente reperibili dalle EPD.

Con riferimento alla Soluzione 4, presentata nel dettaglio nei paragrafi precedenti, vengono riportate in Tabella 24 i materiali e le quantità di riferimento e le EPD selezionate per il calcolo.

Tabella 24 - Materiali, quantità ed EPD considerate (Soluzione 4).

Categoria elementi	Materiali	unità	quantità	EPD
Fondazioni	Calcestruzzo C25/30	m ³	44.42	UNICAL + BETON
	Casseforme	m ³	1.87	PANGUANETA
	Barre armatura	ton	5.80	ALFA ACCIAI
	Micropali ghisa	m	120	TIROLER
Sovrastruttura	XLAM	ton	53.28	STORA ENSO
	Profili acciaio	ton	7.59	BELTRAME + ARCELOR
Connessioni	Profili acciaio (spinotti)	ton	0.22	BELTRAME + ARCELOR
	Profili acciaio (marcapiano)	ton	2.18	BELTRAME + ARCELOR

Come precedentemente anticipato, i soli impatti GWP, PERT, PENRT, FW, NHWD sono stati considerati nell'analisi, poiché ritenuti quelli di più immediata comprensione e facile comunicazione per tutti gli attori coinvolti nel processo di riqualificazione. In Tabella 25, Tabella 26 e Tabella 27 vengono riportati gli impatti della soluzione considerata in fase di produzione (Moduli A1-3), fine vita (Moduli C3-4 D) e totali (Moduli A1-3 C3-4 D), rispettivamente.

In questi calcoli sono state considerate condizioni di fine vita differenti per ogni materiale, in accordo con le EPD considerate. Tali ipotesi e i riferimenti alle EPD utilizzate sono riportate in **Appendice A1**. In questa soluzione, per il guscio in legno era possibile effettuare diversi scenari di fine vita dal momento che l'EPD considerata non riportava dati riferiti ad uno scenario fisso, ma riferiti a 4 diversi scenari: 100% riutilizzo, 100% riciclo, 100% recupero energetico e 100% discarica. In questo modo,

molteplici combinazioni potevano essere considerate per valutare diversi scenari di fine vita. Nel presente studio sono stati considerati 4 scenari differenti:

- Scenario 1: 0% riutilizzo, 55% riciclo, 44% recupero energetico, 1% discarica
- Scenario 2: 90% riutilizzo, 0% riciclo, 10% recupero energetico, 0% discarica
- Scenario 3: 52.5% riutilizzo, 0% riciclo, 17.5% recupero energetico, 30% discarica
- Scenario 4: 0% riutilizzo, 0% riciclo, 0% recupero energetico, 100% discarica

I risultati di tutti gli scenari sono riportati in Figura 41.

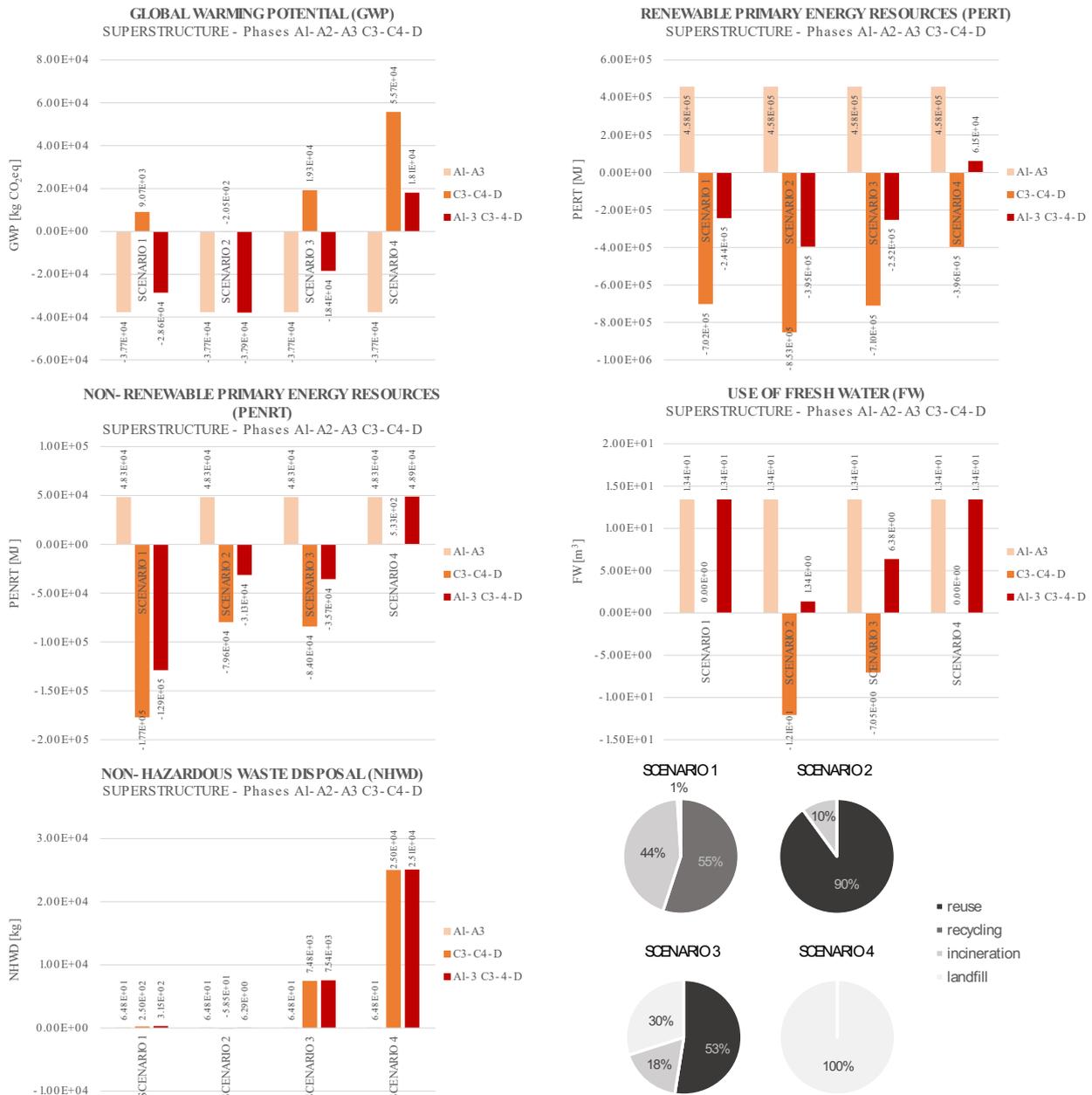


Figura 41 - Analisi di diversi scenari di fine vita per i pannelli XLAM della sovrastruttura.

In Tabella 32, Tabella 33 e Tabella 34 e per la comparazione finale (pag. 63) è stato considerato alla voce XLAM lo Scenario 1, che è lo scenario più utilizzato attualmente e che comporta le prestazioni maggiori in termini di PENRT (poiché l'energia recuperata limita l'utilizzo di ulteriore energia non rinnovabile). Per tutti gli altri indicatori lo scenario migliore sarebbe il secondo, in cui si ha il riutilizzo di nuovo materiale. Lo Scenario 4 ha invece le prestazioni peggiori sotto ogni punto di vista.

Tabella 25 - Impatti nella fase di produzione (Moduli A1-3) (Soluzione 4).

Categoria elementi	Materiali	GWP (kgCO₂eq)	PERT (MJ)	PENRT (MJ)	FW (m³)	NHWD (kg)
Fondazioni	Calcestruzzo C25/30	4.45E+04	3.24E+03	5.20E+05	1.62E+02	3.97E+02
	Casseforme	9.33E+02	4.53E+04	6.67E+03	3.31E+01	3.90E+02
	Barre armatura	4.47E+03	3.27E+03	7.43E+04	3.85E+02	9.34E+02
	Micropali	2.68E+03	2.65E+03	3.49E+04	0.00E+00	0.00E+00
Sovrastruttura	XLAM	-3.77E+04	4.58E+05	4.83E+04	1.34E+01	6.48E+01
	Profili acciaio	5.52E+03	2.92E+03	9.53E+04	3.14E+01	6.84E+02
Connessioni	Profili acciaio (spinotti)	1.57E+02	8.30E+01	2.71E+03	8.95E-01	1.95E+01
	Profili acciaio (marcapiano)	1.58E+03	8.36E+02	2.73E+04	9.01E+00	1.96E+02
TOTALE		2.21E+04	5.16E+05	8.09E+05	6.35E+02	2.68E+03

Tabella 26 - Impatti a fine vita (Moduli C3-4-D) (Soluzione 4).

Categoria elementi	Materiali	GWP (kgCO₂eq)	PERT (MJ)	PENRT (MJ)	FW (m³)	NHWD (kg)
Fondazioni	Calcestruzzo C25/30	-4.45E+03	-4.83E+02	-4.65E+04	-1.53E+01	2.44E+04
	Casseforme	-1.23E+01	-2.08E+01	-7.98E+01	7.86E+01	-1.45E+01
	Barre armatura	-6.50E+03	-4.81E+03	-7.75E+04	-1.20E+01	0.00E+00
	Micropali	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Sovrastruttura	XLAM	9.07E+03	-7.02E+05	-1.77E+05	0.00E+00	2.50E+02
	Profili acciaio	-6.30E+02	-2.92E+02	-1.06E+04	-3.30E+00	1.18E+03
Connessioni	Profili acciaio (spinotti)	-1.79E+01	-8.31E+00	-3.02E+02	-9.41E-02	3.35E+01
	Profili acciaio (marcapiano)	-1.81E+02	-8.37E+01	-3.05E+03	-9.48E-01	3.38E+02
TOTALE		-2.72E+03	-7.07E+05	-3.15E+05	4.69E+01	2.62E+04

Tabella 27 - Impatti totali (Moduli A1-3, C3-4, D) (Soluzione 4).

Categoria elementi	Materiali	GWP (kgCO₂eq)	PERT (MJ)	PENRT (MJ)	FW (m³)	NHWD (kg)
Fondazioni	Calcestruzzo C25/30	4.00E+04	2.76E+03	4.73E+05	1.47E+02	2.48E+04
	Casseforme	9.20E+02	4.53E+04	6.59E+03	1.12E+02	3.75E+02
	Barre armatura	-2.03E+03	-1.54E+03	-3.23E+03	3.73E+02	9.34E+02
	Micropali	2.68E+03	2.65E+03	3.49E+04	0.00E+00	0.00E+00
Sovrastruttura	XLAM	-2.86E+04	-2.44E+05	-1.29E+05	1.34E+01	3.15E+02
	Profili acciaio	4.89E+03	2.62E+03	8.47E+04	2.81E+01	1.86E+03
Connessioni	Profili acciaio (spinotti)	1.39E+02	7.47E+01	2.41E+03	8.01E-01	5.30E+01
	Profili acciaio (marcapiano)	1.40E+03	7.52E+02	2.43E+04	8.06E+00	5.34E+02
TOTALE		1.94E+04	-1.91E+05	4.94E+05	6.82E+02	2.89E+04

Durata dell'intervento

Per quanto riguarda i tempi di costruzione, sono stati stimati 5 mesi (GG lavorativi con una squadra tipo) per la realizzazione di tutti gli interventi previsti (energetico e strutturale).

Confronto tra le differenti soluzioni strutturali

Considerazioni sui costi di costruzione delle differenti soluzioni strutturali

Viene ora riportato un confronto tra i costi di costruzione delle diverse soluzioni di intervento; il costo totale è riportato nella Tabella 28, mentre nella Tabella 29 si riporta il costo scervo della voce legata alle tasse, varie ed eventuali, nonché alle spese di progettazione, in maniera da rendere maggiormente paragonabile la soluzione proposta con altre presenti sul mercato da un punto di vista dell'economicità.

Tabella 28 - Costo totale di costruzione delle differenti soluzioni (comprensivo di tasse, varie ed eventuali).

INTERVENTI	Totale	€/m2 in pianta	€/m3	€/m2 facciata
SOLUZIONE 1	470.477 €	877	248	745
SOLUZIONE 2	362.034 €	675	191	573
SOLUZIONE 3	337.708 €	630	178	535
SOLUZIONE 4	383.502 €	715	202	607

Tabella 29 - Costo totale di costruzione delle differenti soluzioni (escluse tasse, varie ed eventuali).

INTERVENTI	Totale	€/m2 in pianta	€/m3	€/m2 facciata
SOLUZIONE 1	373.430 €	696	197	591
SOLUZIONE 2	287.356 €	536	152	455
SOLUZIONE 3	268.048 €	500	141	424
SOLUZIONE 4	304.396 €	567	161	482

Escludendo la soluzione di tipo 1 che è stata realizzata con precisi vincoli architettonici per quanto riguarda l'intervento di retrofit, si nota dal confronto come le altre soluzioni (Soluzione 2, 3 e 4), progettate come iso-prestazionali, abbiano costi di costruzione di fatto simili; i risultati variano al massimo di $\pm 15\%$. Le stesse considerazioni possono essere condotte osservando i costi della sola parte strutturale dell'intervento nella Tabella 31.

Di seguito vengono mostrati (Figura 42 e Tabella 30) i costi a metro quadrato in pianta delle principali macro-voci di cui si compone il costo complessivo dell'opera.

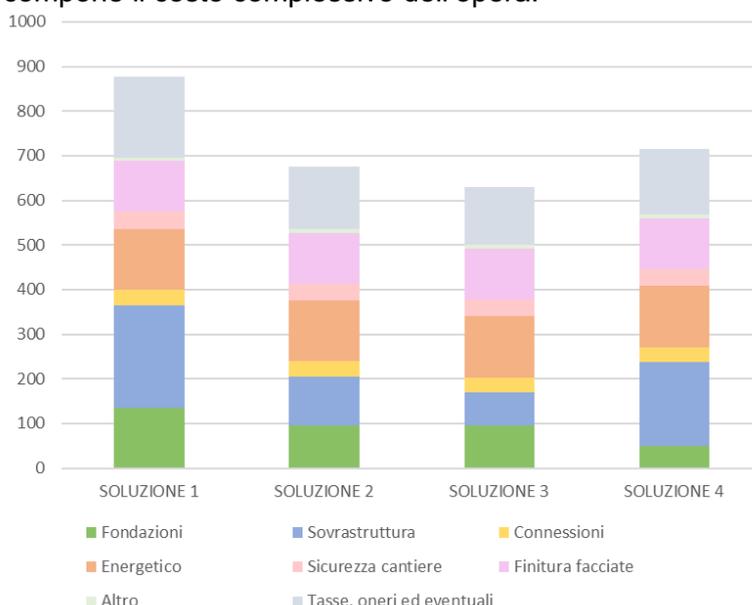


Figura 42 - Costo di costruzione delle differenti soluzioni diviso per macro-aree (€/m² in pianta).

Tabella 30 -Costi a €/m² in pianta delle principali macro-voci dei diversi interventi strutturali.

	SOLUZIONE 1	SOLUZIONE 2	SOLUZIONE 3	SOLUZIONE 4
	€/m2	€/m2	€/m2	€/m2
TOTALE	877	675	630	715
Fondazioni	135	96	96	50
Sovrastruttura	229	109	73	187
Connessioni	36	34	34	34
Energetico	137	137	137	137
Sicurezza cantiere	38	38	38	38
Finitura facciate	114	114	114	114
Altro	8	8	8	8
Tasse, oneri ed eventuali	181	139	130	147

È utile precisare che all'interno della categoria 'Altro' vengono ricomprese le voci relative alle demolizioni e allo smaltimento dei rifiuti.

La macro-voce 'Tasse, oneri ed eventuali' viene calcolata come somma di diverse componenti:

1. *Varie ed eventuali*: 3% del costo dei lavori;
2. *Tassazione*: 10% di costo dei lavori maggiorato delle varie ed eventuali;
3. Spese tecniche per la progettazione: 10% del costo dei lavori
4. *Tassazione per le spese di progettazione*: 26.88% delle spese tecniche di progettazione.

Si evidenzia inoltre come nel computo metrico realizzato per le varie soluzioni, non siano inserite voci di costo relative ad opere che è necessario realizzare per completare l'intervento, tra cui ripristini, opere interne, elettricista, idraulico e linea vita.

Da ultimo è utile sottolineare come la macro-voce relativa alla finitura delle facciate risulti particolarmente elevata, per via della scelta di una particolare soluzione di pregio architettonico che prevede l'installazione di pannelli di fibrocemento ecologico e pannelli in legno idrorepellente. Qualora si volesse ottimizzare il costo di realizzazione dell'opera, tale opzione potrebbe essere sostituita con soluzioni alternative a basso costo, presenti attualmente sul mercato.

Si passa ora all'analisi dei costi relativi al solo intervento di rinforzo strutturale. I costi, illustrati in Tabella 31 e nella Figura 43, non comprendono la quota relativa alle voci di costo di tasse od oneri per la progettazione. A differenza della Soluzione 1, così concepita per specifiche esigenze architettoniche, le altre 3 soluzioni iso-performance differiscono per meno del 15% dal prezzo medio attorno a 240 €/m² in pianta.

Tabella 31 - Costo della parte strutturale dell'intervento delle differenti soluzioni (escluse tasse, varie ed eventuali).

TOTALE	Strutturale	€/m2 in pianta	€/m3	€/m2 facciata
SOLUZIONE 1	215.785 €	402	114	342
SOLUZIONE 2	129.711 €	242	68	205
SOLUZIONE 3	110.403 €	206	58	175
SOLUZIONE 4	146.751 €	274	77	232

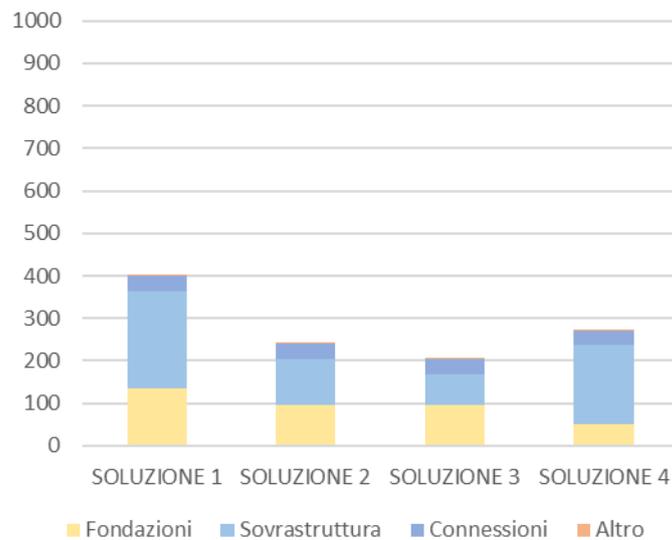


Figura 43 - Costo di costruzione della sola parte strutturale diviso per macro-categorie (€/m² in pianta).

Analizzando la scomposizione dei costi strutturali per macro-categorie, è utile sottolineare come, per le Soluzioni 1, 2 e 3, un'importante quota del costo totale sia determinata dal sistema di fondazione, mentre nella Soluzione 4, la maggior parte è dovuta alla sovrastruttura (Figura 43). Negli esoscheletri a guscio (Soluzione 4), estendendo l'intervento a tutta la facciata, si ha una sollecitazione inferiore sul sistema di fondazione; al contrario, negli esoscheletri a setti (Soluzione 1, 2 e 3) è richiesto un maggior numero di micropali per resistere all'elevato carico trasferito alla fondazione dalle pareti di taglio.

Considerazioni sugli impatti ambientali delle differenti soluzioni strutturali

Viene riportato un confronto delle soluzioni iso-performance 2, 3 e 4 in termini di impatti ambientali, considerando i seguenti indicatori:

- Emissioni di CO₂ equivalenti (GWP - Global Warming Potential) (kgCO₂eq)
- Consumo di risorse di energia primaria rinnovabile (PERT) (MJ)
- Consumo di risorse di energia primaria non rinnovabile (PENRT) (MJ)
- Consumo di acqua (FW) (m³)
- Produzione di rifiuti non pericolosi (NHSD) (kg)

In Tabella 32, Tabella 33 e Tabella 34 vengono riportati gli impatti delle diverse soluzioni in fase di produzione (Moduli A1-3), fine vita (Moduli C3-4 D) e totali (Moduli A1-3 C3-4 D), rispettivamente. Gli stessi risultati sono riportati graficamente in Figura 44. Dall'analisi dei risultati è possibile notare come i contributi maggiori degli impatti si abbiano nella fase di produzione per tutti gli indicatori tranne che per la produzione di rifiuti. Per gli altri indicatori, i benefici del Modulo D dominano la risposta al fine vita, annullando gli impatti presenti nelle fasi C3 e C4 e abbattendo gli impatti totali delle soluzioni.

Analizzando i valori degli impatti totali (Tabella 34 e Figura 44), la soluzione più sostenibile è quella in legno quando vengono considerate le emissioni, i consumi energetici (PERT e PENRT) e la produzione di rifiuti nella versione modificata ('NHWD modified'), in cui vengono conteggiati i pali come rifiuti; considerando invece il consumo di acqua e i rifiuti al netto dei pali ('NHWD'), come indicato nella EPD di riferimento, le soluzioni migliori sono quelle in acciaio (soluzioni 2 e 3), che hanno impatti tra loro analoghi.

Per meglio interpretare i risultati, in Figura 45 gli impatti totali sono stati analizzati dividendo i risultati per macro-categorie: fondazioni, sovrastruttura e connessioni. Come atteso, l'incidenza delle connessioni sull'impatto totale è praticamente nulla. Il ruolo delle fondazioni è invece determinante e ciò è legato principalmente al largo uso di calcestruzzo nella realizzazione dei pali (soprattutto nelle soluzioni a pareti in acciaio – soluzione 2 e 3) e del cordolo di fondazione (che incide maggiormente nella soluzione a guscio in legno – soluzione 4). Andrebbero dunque privilegiate soluzioni tese a ridurre l'impatto delle fondazioni e il consumo di calcestruzzo o che impieghino un calcestruzzo più sostenibile. L'utilizzo di accorgimenti per aumentare ulteriormente il tasso di riutilizzo degli elementi a fine vita permetterebbe di aumentare ulteriormente i benefici nel Modulo D, riducendo quindi gli impatti totali. L'adozione di materiale riutilizzato permetterebbe invece di abbattere gli impatti nella fase di produzione.

Tabella 32 - Impatti nella fase di produzione (Moduli A1-3)

INTERVENTI	GWP (kgCO ₂ eq)	PERT (MJ)	PENRT (MJ)	FW (m ³)	NHWD (kg)
SOLUZIONE 2	6.34E+04	4.84E+04	8.35E+05	4.91E+02	2.74E+03
SOLUZIONE 3	7.63E+04	4.80E+04	1.02E+06	5.02E+02	2.18E+03
SOLUZIONE 4	2.21E+04	5.16E+05	8.09E+05	6.35E+02	2.68E+03

Tabella 33 - Impatti a fine vita (Moduli C3-4-D)

INTERVENTI	GWP (kgCO ₂ eq)	PERT (MJ)	PENRT (MJ)	FW (m ³)	NHWD (kg)
SOLUZIONE 2	-7.34E+03	-4.24E+03	-1.05E+05	2.29E+01	1.75E+04
SOLUZIONE 3	-1.87E+04	3.71E+03	-1.97E+05	4.24E+01	1.80E+04
SOLUZIONE 4	-2.72E+03	-7.07E+05	-3.15E+05	4.69E+01	2.62E+04

Tabella 34 - Impatti totali (Moduli A1-3, C3-4, D)

INTERVENTI	GWP (kgCO ₂ eq)	PERT (MJ)	PENRT (MJ)	FW (m ³)	NHWD (kg)
SOLUZIONE 2	5.61E+04	4.41E+04	7.30E+05	5.14E+02	2.03E+04
SOLUZIONE 3	5.75E+04	5.17E+04	8.25E+05	5.44E+02	2.01E+04
SOLUZIONE 4	1.94E+04	-1.91E+05	4.94E+05	6.82E+02	2.89E+04

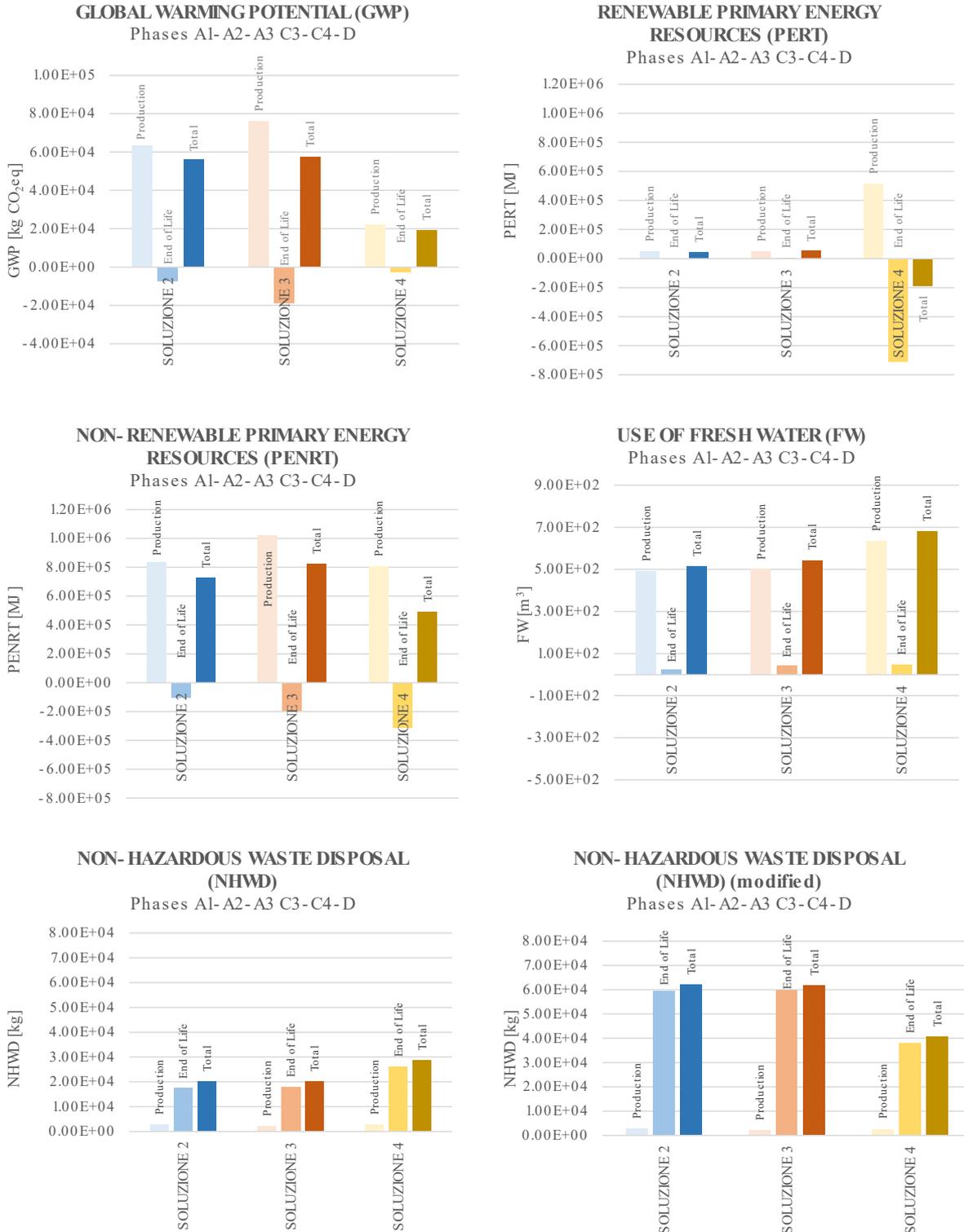


Figura 44 - Impatti della sola parte strutturale nelle fasi di produzione, fine vita e totali.

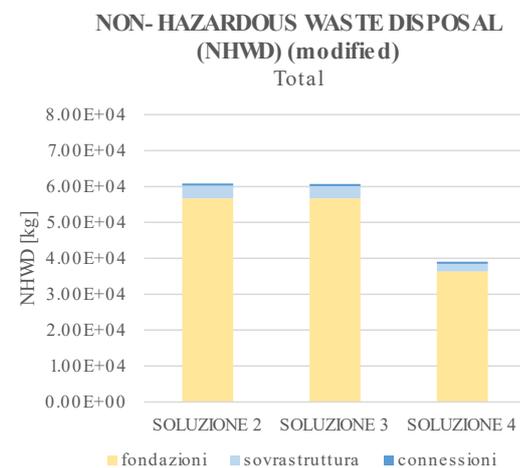
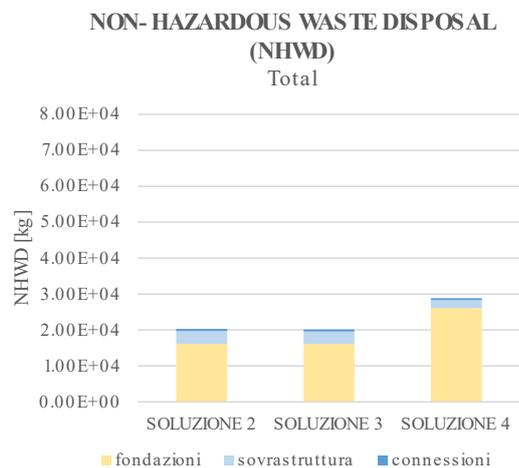
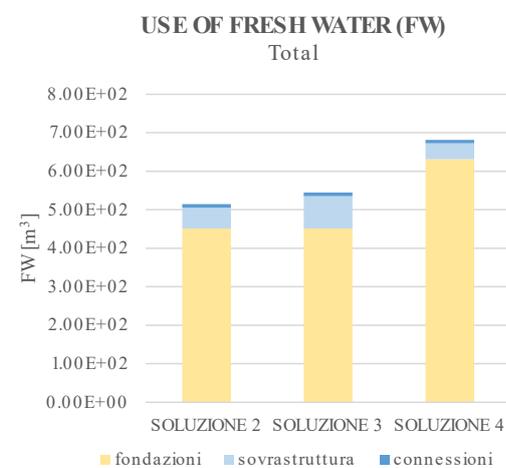
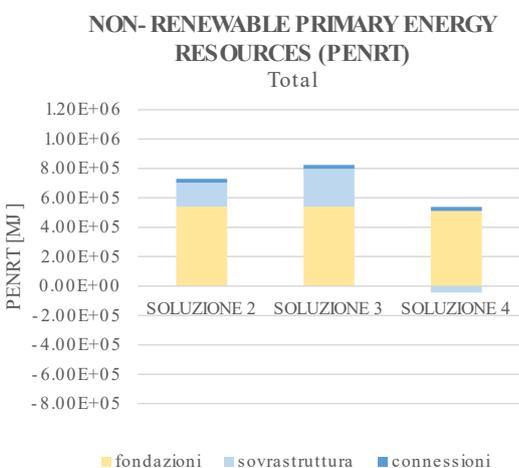
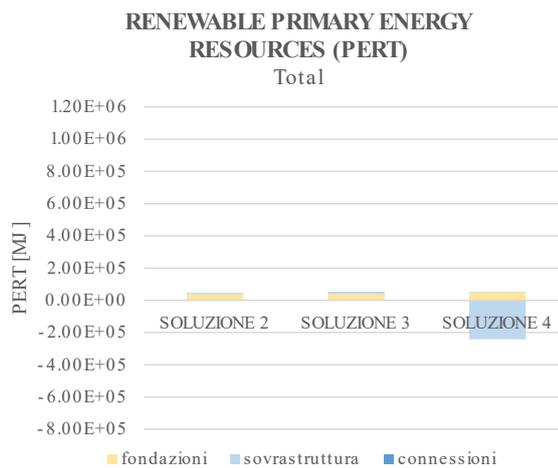
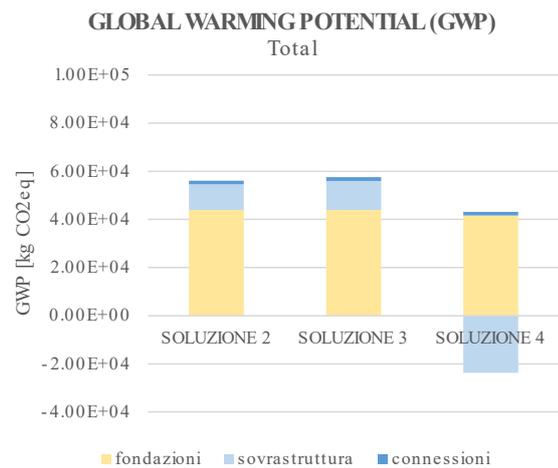


Figura 45 - Impatti totali della sola parte strutturale divisi per macro-categorie.

Valutazione della sicurezza sismica per gli interventi iso-performance

In seguito alle analisi condotte si riporta la classificazione sismica, in accordo con il DM n.58 del 28/02/2017 – “Linee guida per la classificazione del rischio sismico nelle costruzioni”, con riferimento alla curva più sfavorevole tra quelle riportate, ovvero quella relativa alla direzione X.

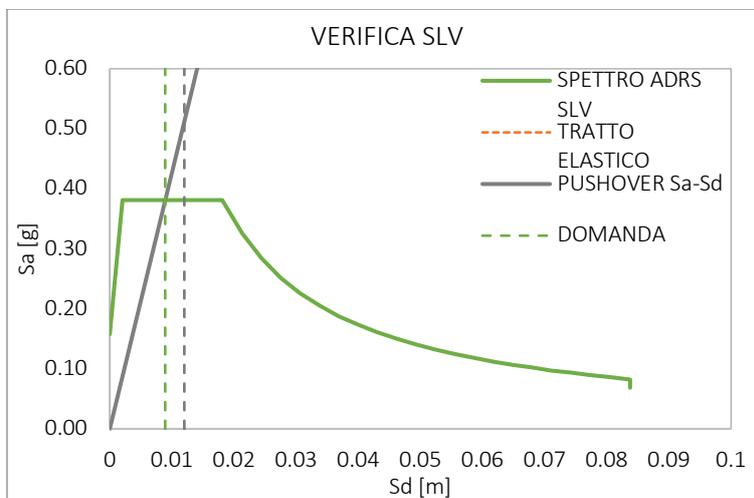


Figura 46 - Rappresentazione grafica della verifica a SLV dell'edificio post-intervento per la direzione X.

Stato Limite	d_{max}^* [m]	d_{SL}^* [m]	d_{max}^* / d_{SL}^*
SLV	0.0089	0.0120	0.74
SLD	0.0032	0.0143	0.22

Stato Limite	$S_e(T^*)$ [g]	F^*/m^* [g]	q^*
SLV	0.381	0.613	0.62

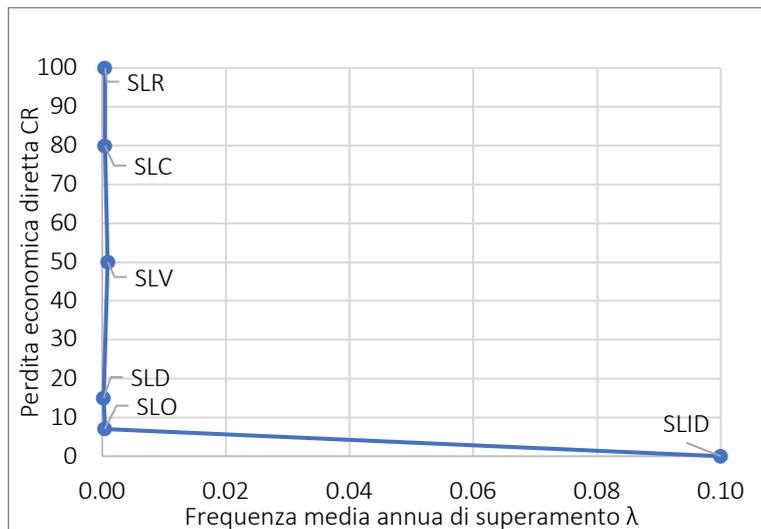
Le verifiche risultano soddisfatte.

- indice di sicurezza a SLV: $\zeta_E = \frac{a_{g,SLV}}{a_{g(T_R,P_{Vr}=10\%)}^S} = \frac{0.212 \text{ g}}{0.158 \text{ g}} = 1.35$
- indice di sicurezza a SLD: $\zeta_E = \frac{a_{g,SLD}}{a_{g(T_R,P_{Vr}=63\%)}^S} = \frac{0.247 \text{ g}}{0.056 \text{ g}} = 4.45$

Assumendo il minore tra gli indici ricavati, ovvero quello per l'SLV, è possibile associare all'edificio nelle condizioni post-intervento la classe di rischio sismico secondo la classificazione IS-V, ovvero la classe **A+**.

IS-V	Classe IS-V
100%<IS-V	A+
100%<IS-V<80%	A
80%<IS-V<60%	B
60%<IS-V<45%	C
45%<IS-V<30%	D
30%<IS-V<15%	E
IS-V<15%	F

Si procede infine a calcolare l'indice associato alle perdite annue medie (PAM), dato dall'area sottesa dalla curva che mette in relazione le perdite economiche dirette (rapportate al costo di ricostruzione) e la frequenza media annua di superamento (λ).



SL	CR [%]	λ	PAM
SLR	100	0.0004	0.04
SLC	80	0.0004	0.04
SLV	50	0.0009	0.08
SLD	15	0.0002	0.05
SLO	7	0.0004	0.06
SLID	0	0.1	0.40

Figura 47 - Curva delle perdite economiche dirette rapportate alla frequenza media annua di superamento. Nella tabella di destra sono riportati i valori utilizzati per la costruzione della curva.

L'indice PAM calcolato è pari a **0.40**, cui corrisponde la classe di rischio **A+**.

PAM	Classe PAM
$PAM \leq 0.5\%$	A+
$0.5\% < PAM < 1\%$	A
$1\% < PAM < 1.5\%$	B
$1.5\% < PAM < 2.5\%$	C
$2.5\% < PAM < 3.5\%$	D
$3.5\% < PAM < 4.5\%$	E
$4.5\% < PAM < 7.5\%$	F
$7.5\% \leq PAM$	G

In conclusione, la classe di rischio per la struttura nelle condizioni post-intervento sollecitata in direzione X, in accordo con le linee guida, corrisponde alla classe **A+**.

4. Strategie di intervento integrate tramite isolamento alla base

(A cura dell'Università degli Studi di Napoli)

Premessa

L'Università degli Studi di Napoli (UR UNINA) ha analizzato per l'edificio caso studio ha proposto ed analizzato un intervento di adeguamento sismico mediante isolamento sismico alla base dell'edificio, da realizzare mediante 13 scivolatori e 12 isolatori HDRB tipo SI-N-300/100.

Occorre evidenziare che l'intervento proposto è poco invasivo potendosi eseguire evitando lo sgombero degli occupanti durante buona parte delle fasi di intervento.

L'edificio è stato analizzato utilizzando il programma di calcolo MidasGEN, confrontando i risultati delle analisi numeriche condotte sull'edificio a base fissa (modello fornito dall'Università degli Studi di Bergamo (UR UNIBG)) e sull'edificio isolato alla base. Si sono quindi esaminati i risultati delle analisi modale per entrambi i modelli mettendoli a confronto.

Sono altresì state condotte analisi non lineare in direzione longitudinale e trasversale finalizzate a valutare le rispettive capacità ed evoluzione del danno dopo la prima plasticizzazione e l'efficacia del sistema d'isolamento proposto. È stata anche ricavata la classe sismica di appartenenza sia per la struttura a base fissa (pre intervento) sia per la struttura a base isolata (post intervento).

L'efficacia dell'intervento proposto si può misurare attraverso la sensibile riduzione delle accelerazioni sulla struttura, rispetto alla configurazione a base fissa, con conseguente forte abbattimento delle forze di inerzia (e quindi delle sollecitazioni) prodotte dal sisma sulla struttura, tale da evitare il danneggiamento degli elementi strutturali (travi, pilastri, ecc.) anche sotto terremoti violenti.

Grossa attenzione è stata posta anche alla messa in opera del sistema di isolamento proposto, dettagliando la strategia di intervento che si intende perseguire per l'installazione dei dispositivi sotto il piano di fondazione. A tal fine si sono definite le fasi di scavo e le fasi di taglio delle pareti in c.a. presenti alla base dell'edificio necessarie per ottenere la separazione netta tra la sottostruttura e la sovrastruttura.

Interventi proposti

Il primo intervento proposto da UR UNINA è finalizzato all'irrigidimento dei solai privi di cappa di completamento mediante l'utilizzo di controventi metallici intradossati e di strisce discontinue in FRP (Figura 48). Questo è un intervento abbastanza comune nell'ambito del consolidamento dei solai in quanto il ruolo dei solai, nel comportamento sismico delle costruzioni in muratura, è quello di trasferire le azioni orizzontali alle pareti disposte nella direzione parallela al sisma (ai muri di controventamento). I solai deformabili sono totalmente incapaci di ripartire le azioni sismiche per questo bisogna irrigidirli.

Viene dapprima predisposto un profilo d'acciaio ad E che viene ancorato al cordolo delle pareti perimetrali in muratura tramite dei fisher. Successivamente vengono ancorati al profilo metallico i controventi ad x. I solai contigui vengono suddivisi in porzioni prestando attenzione a non avere poi delle luci troppo grandi laddove vanno montati poi i controventi; essendo degli elementi in acciaio abbastanza snelli va sempre tenuto presente il problema dell'inflessione sotto carico.

Il tutto viene poi rafforzato dall'utilizzo di strisce discontinue in FRP, incollate sopra i controventi metallici. I materiali fibro-rinforzati a matrice polimerica (FRP –Fiber Reinforced Polymer) a fibre continue hanno un comportamento elastico lineare fino al collasso e, se utilizzate nel piano, contribuiscono ad aumentare la resistenza sia a flessione che a taglio.

Nei compositi fibro-rinforzati le fibre svolgono il ruolo di elementi portanti sia in termini di resistenza che di rigidità, mentre la matrice, oltre a proteggere le fibre, funge da elemento di trasferimento

degli sforzi tra le fibre e tra queste ultime e l'elemento strutturale a cui il composito è stato applicato. Le fibre possono essere disposte in tutte le direzioni, secondo i dati di progetto, in maniera tale da ottimizzare le proprietà meccaniche del composito nelle direzioni desiderate.

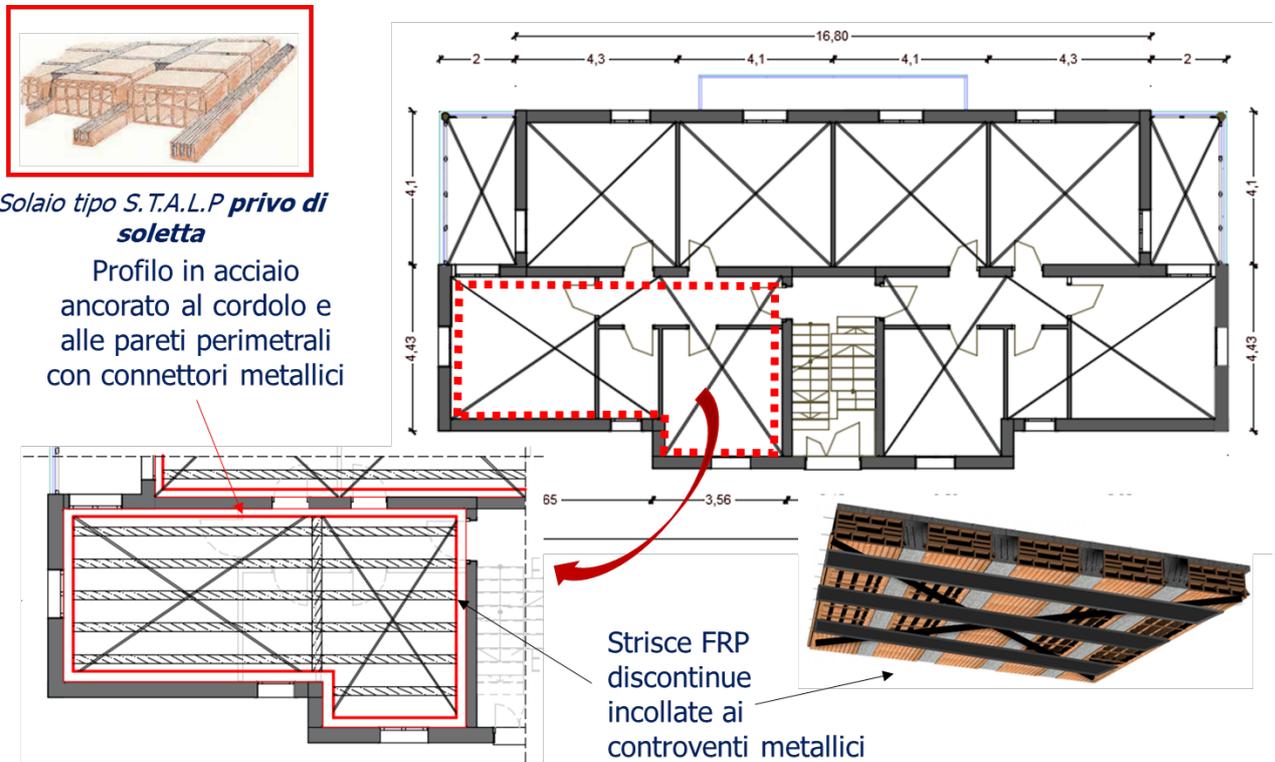


Figura 48 - Irrigidimento solai con strisce in FRP e controventi metallici intradossati.

Il *secondo intervento* proposto, che poi è quello che è stato approfondito e sviluppato dalla UR UNINA, è un intervento di adeguamento sismico mediante isolamento sismico. Si è pensato di isolare nella parte basamentale dell'edificio, in corrispondenza del piano di fondazione, sfruttando la presenza del piano seminterrato dell'edificio adibito a cantina, quindi disabitato (Figura 49).

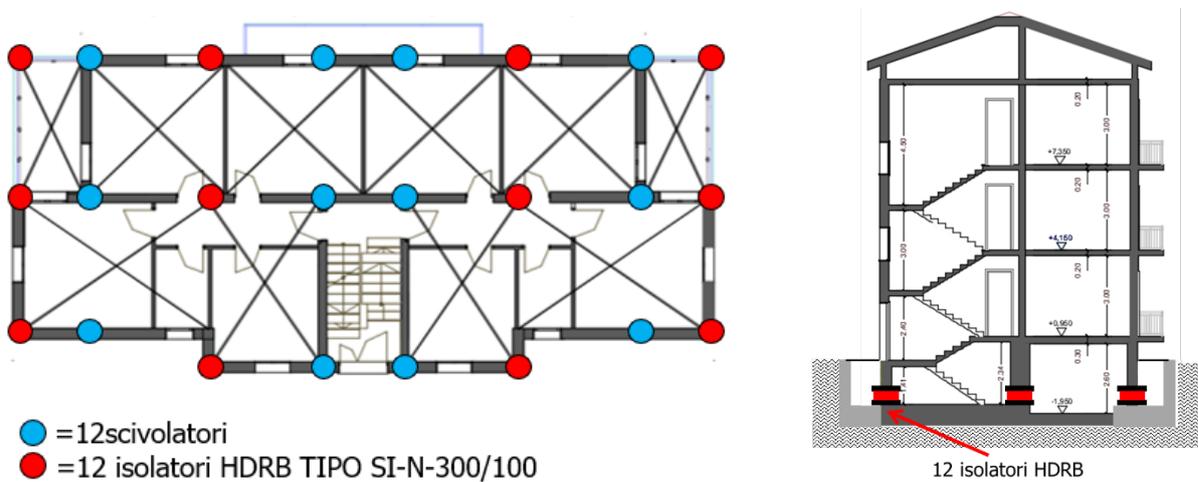


Figura 49 – Layout dei dispositivi elastomerici alla base dell'edificio.

Progetto del sistema di isolamento

Per dimensionare il sistema di isolamento, è necessario individuare la coppia periodo-smorzamento (T_{is} , ξ_{esi}), che determina il giusto compromesso tra un soddisfacente abbattimento degli effetti sismici, rispetto alla configurazione di struttura a base fissa, e spostamenti orizzontali della sovrastruttura. A tale scopo può essere applicato il metodo dell'analisi statica lineare (§7.10.5.3.1 – NTC 2018) che consente in maniera approssimata, di determinare e mettere a confronto le grandezze fondamentali della risposta del sistema di isolamento per diverse coppie periodo – smorzamento (T_{is} , ξ_{esi}).

Per la struttura a base fissa, il periodo corrispondente al modo principale di vibrazione è stato precedentemente determinato da UR UNIBG tramite un'analisi modale e vale $T_{BF} = 0,53$ sec.

Per una progettazione ottimale la struttura a base isolata deve essere scelta con un periodo T_{is} compreso tra $3 T_{BF}$ e 3 sec. In questo caso il periodo scelto è $T_{is} = 2$ sec, essendo $3T_{BF} = 1,6$ sec; mentre il fattore di smorzamento è stato assunto pari $\xi_{esi} = 10\%$, valore tipico degli edifici isolati con isolatori HDRB.

Assumendo che la sovrastruttura (edificio da isolare) sia un solido rigido che trasla al di sopra del sistema di isolamento in cui si concentra, tutta la deformabilità laterale, è possibile stimare il periodo equivalente di traslazione pari a:

$$T_{IS} = 2\pi \sqrt{\frac{M_{ISO}}{k_{esi}}}$$

essendo $M_{ISO}=645,6t$ la massa totale della sovrastruttura, K_{esi} la rigidezza equivalente orizzontale minima, in relazione alla variabilità delle proprietà meccaniche del sistema d'isolamento.

La rigidezza totale del sistema di isolamento è pari alla somma delle rigidezze dei singoli dispositivi (7.10.5.2 NTC 2018), per cui una volta calcolata la rigidezza totale è sufficiente ripartirla per i 12 dispositivi previsti (si veda Figura 49) per calcolare la rigidezza orizzontale equivalente del singolo isolatore (K_e).

Nel caso in esame di ha:

$$K_{esi} = \left(\frac{2\pi}{T_{IS}}\right)^2 \cdot M_{ISO} = \left(\frac{2\pi}{2sec}\right)^2 \cdot 645,6t = 6365,36kN/m$$

$$K_e = \frac{K_{esi}}{N_{isolatori}} = \frac{6365,36kN/m}{12} = 530,45kN/m$$

Determinata la rigidezza orizzontale equivalente del singolo isolatore K_e è possibile selezionare la tipologia di isolatore da adoperare. Per il caso in esame si scelgono dispositivi FIP SI-N 300/100 con uno spostamento massimo di 200mm (Figura 50). Ciò vuol dire che lo spostamento massimo consentito all'SLC per ogni isolatore dovrà essere inferiore a 200mm.

SPOSTAMENTO 200 mm										
SI-N	V kN	F _{zd} kN	K _e kN/mm	K _v kN/mm	D _g mm	t _e mm	h mm	H mm	Z mm	W kg
SI-N 300/100	210	1350	0.57	457	300	100	188	238	350	100
SI-N 350/100	510	2100	0.77	597	350	100	178	228	400	128
SI-N 400/100	1180	3720	1.01	912	400	100	178	228	450	166
SI-N 450/102	1810	4990	1.25	1082	450	102	190	240	500	220
SI-N 500/102	2840	7780	1.54	1494	500	102	190	240	550	270

Figura 50 – Tabella FIP caratteristiche isolatori scelti.

Dall'estratto della tabella FIP, si osserva che possono essere utilizzate le seguenti caratteristiche per i 12 isolatori elastomerici da inserire sotto il fabbricato in esame:

- Rigidezza orizzontale $K_e = 0,57 \text{ kN/mm}$;
- Rigidezza verticale $K_v = 457 \text{ kN/mm}$;
- Rapporto $K_v / K_e = 801,75 > 800$;
- Coefficiente di smorzamento viscoso equivalente $\xi_{esi} = 10\%$;
- Modulo di elasticità tangenziale $G = 0,8 \text{ MPa}$; miscela normale;
- Spostamento massimo = 200 mm

Per il calcolo della rigidezza verticale degli isolatori si è utilizzata la seguente equazione:

$$K_v = \frac{E_c A}{t_e}$$

dove:

- A è l'area dello strato di gomma
- t_e è lo spessore totale degli strati di gomma
- E_c è il modulo elastico equivalente dato da $E_c = 6 \cdot 0,8 \cdot S^2$
- S_1 è il fattore di forma primario dato dal rapporto tra il raggio dello strato di gomma (R) e due volte lo spessore del singolo strato di gomma (t)

Per limitare la deformabilità verticale degli isolatori, è bene che S_1 non sia minore di 12, pertanto:

$$K_{v,si} = 457 \text{ kN/mm} \cdot 12 \text{ isolatori} = 5484 \text{ kN/mm} > 800 \cdot K_{esi} = 800 \cdot (0,57 \text{ kN/mm} \cdot 12 \text{ isolatori}) = 5472 \text{ kN/mm}$$

Inoltre risulta che il periodo calcolato in direzione verticale:

$$T_V = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{v,si}}} = 2\pi \sqrt{\frac{645,6t}{5484000 \text{ kN/m}}} = 0,07s < 0,1s$$

Il sistema di isolamento sismico è stato pertanto dimensionato in accordo alle indicazioni progettuali suggerite nel § 11.9.7 delle NTC 2018.

Modellazione ed analisi lineare con il software MidasGen dell'edificio sismicamente isolato alla base

Partendo dal modello FEM tridimensionale dell'edificio fornito da UNIBG, i dispositivi elastomerici sono stati modellati in MidasGen tramite "Elastic link" con rigidezza SD_x , SD_y , SD_z date dalla tabella di Figura 50 che sono stati inseriti alla base dei setti dove sono stati previsti i 12 isolatori (Figura 49).

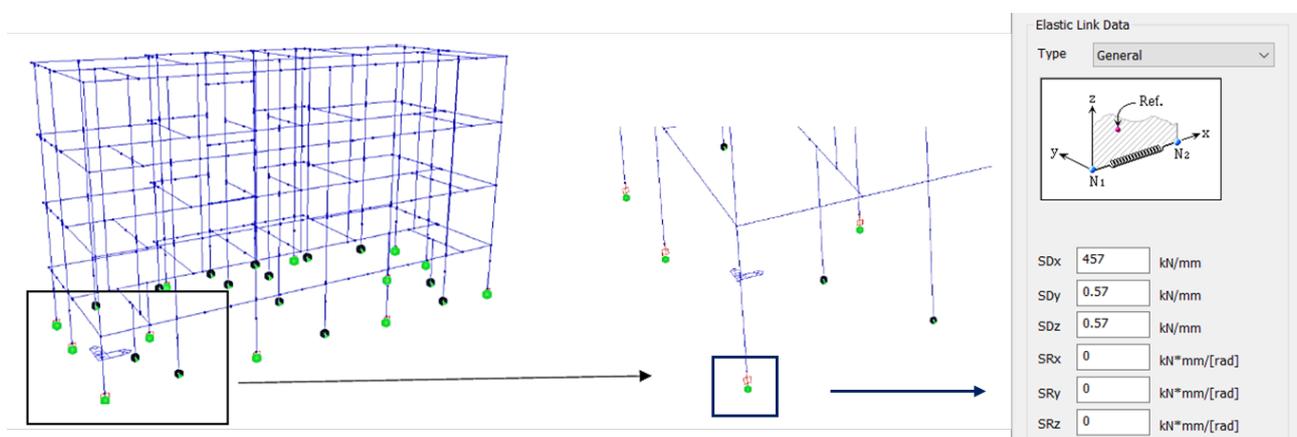


Figura 51 – Modellazione isolatori HDRB con MidasGen.

Alla base dei “rigid link” sono stati aggiunti dei vincoli incastro per simulare la sottostruttura. I dispositivi multidirezionali, invece, sono stati modellati con un vincolo carrello, per simulare lo scivolatore.

In Figura 51 viene riportata una vista globale di tutti i dispositivi applicati al modello FEM della struttura con il dettaglio della schermata utilizzata per inserire i parametri di rigidità degli isolatori HDRB adottati.

Nelle figure che seguono sono riportati i primi 3 modi di vibrare dell’edificio ottenuti dal software per l’edificio isolato alla base. Oltre alle deformate modali vengono indicate le masse partecipanti nelle due direzioni, nonché la massa rotazionale. I modi di vibrare sono rappresentati nei 3 piani.

È possibile notare come la presenza del sistema di isolamento sismico alla base regolarizza il comportamento dinamico dell’edificio. Infatti i primi due modi sono di tipo puramente traslazionale, rispettivamente lungo y e lungo x, presentano una percentuale di masse traslazionali prossime al 100% con totale disaccoppiamento dei modi. Inoltre i periodi del modo 1 e 3 sono pari a circa 2sec, ovvero uguali al periodo fissato in sede di dimensionamento degli isolatori.

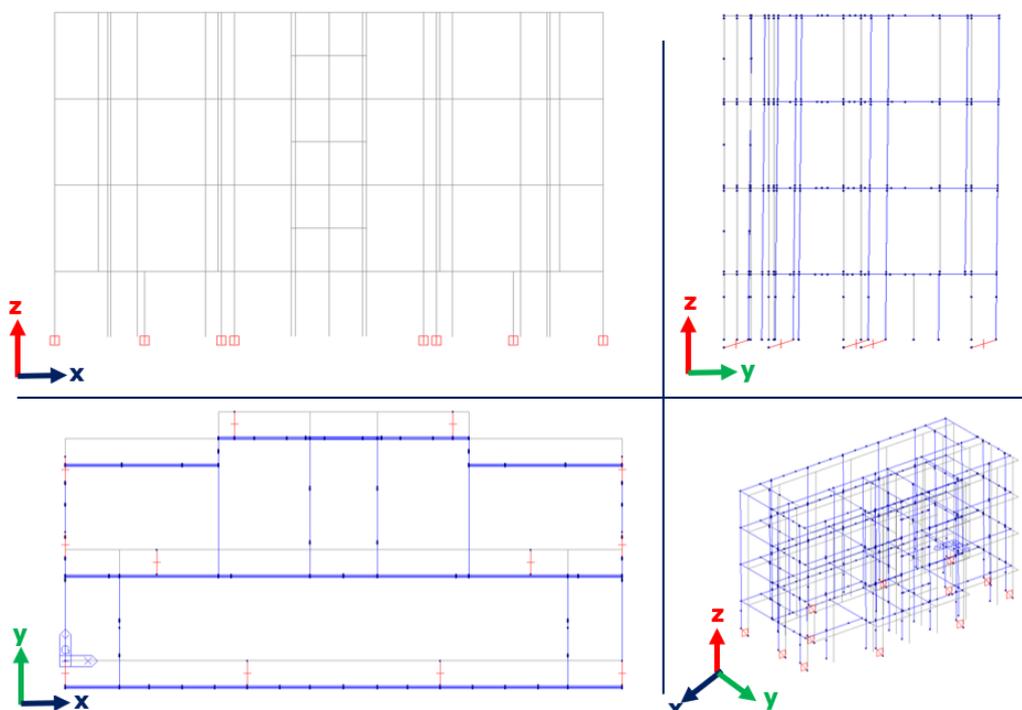


Figura 52 – Primo modo di vibrare: $T=1,99s$; $M_x=0$; $M_y= 99,8\%$; $M_z=0$.

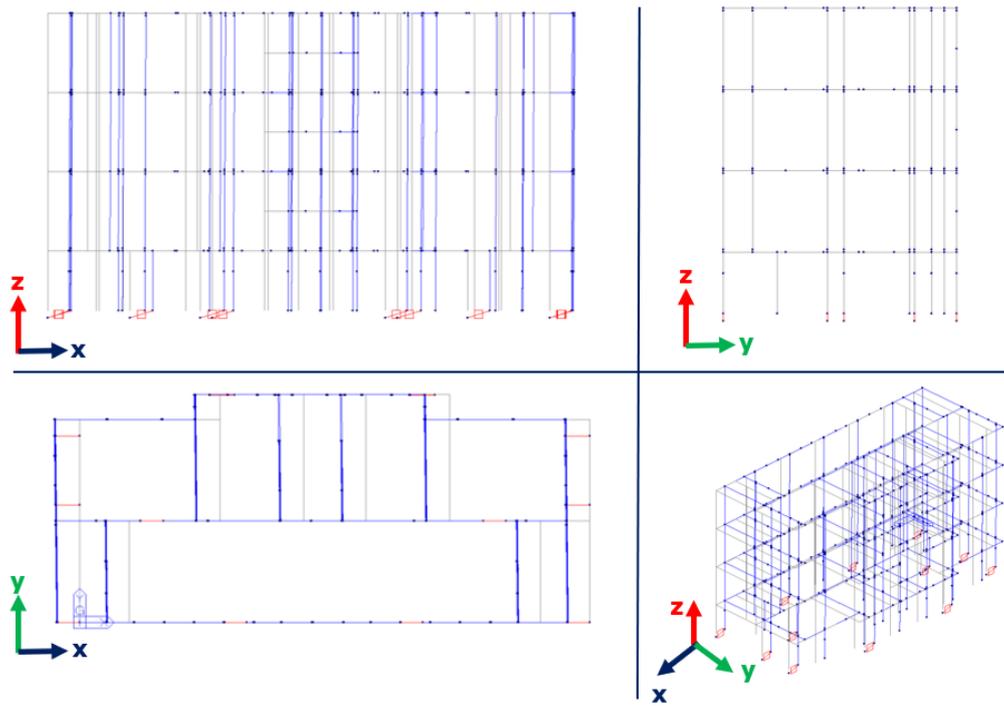


Figura 53 – Secondo modo di vibrare: $T=1,96s$; $M_x=99,3\%$; $M_y=0$; $M_z=0$.

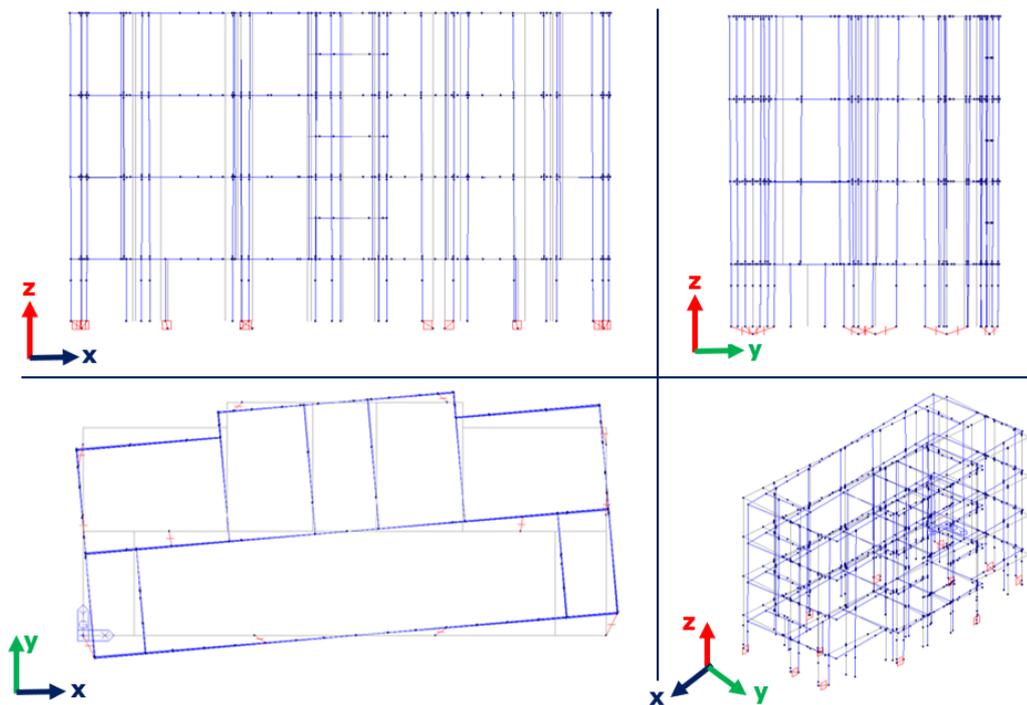


Figura 54 – Terzo Modo di vibrare: $T=1,56s$; $M_x=0$; $M_y=0$; $M_z=99,2\%$.

In Figura 55 si riportano, per completezza, le tabelle con le masse partecipanti e i fattori di partecipazione modale modi di vibrare esportate dal Midas.

Mode	UX	UY	UZ	RX	RY	RZ						
EIGENVALUE ANALYSIS												
Mode No	Frequency		Period	Tolerance								
	(rad/sec)	(cycle/sec)	(sec)									
1	3.1509	0.5015	1.9941	0.0000e+000								
2	3.2033	0.5098	1.9615	0.0000e+000								
3	4.0126	0.6386	1.5659	0.0000e+000								
4	18.1186	2.8837	0.3468	0.0000e+000								
5	24.8383	3.9531	0.2530	0.0000e+000								
6	25.3502	4.0346	0.2479	0.0000e+000								
7	46.3830	7.3821	0.1355	0.0000e+000								
8	56.7712	9.0354	0.1107	0.0000e+000								
9	56.8892	9.0542	0.1104	0.0000e+000								
10	57.3050	9.1204	0.1096	0.0000e+000								
11	58.1749	9.2588	0.1080	0.0000e+000								
12	59.7951	9.5167	0.1051	0.0000e+000								
13	78.3775	12.4742	0.0802	0.0000e+000								
14	84.1032	13.3854	0.0747	0.0000e+000								
15	84.1129	13.3870	0.0747	0.0000e+000								
16	84.1313	13.3899	0.0747	0.0000e+000								
17	92.3773	14.7023	0.0680	0.0000e+000								
18	93.3253	14.8532	0.0673	0.0000e+000								
19	134.9433	21.4769	0.0466	7.9616e-115								
20	146.9055	23.3807	0.0428	4.4082e-105								
MODAL PARTICIPATION MASSES PRINTOUT												
Mode No	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z		ROTN-X		ROTN-Y		ROTN-Z	
	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)	MASS(%)	SUM(%)
1	0.0000	0.0000	99.8310	99.8310	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
2	99.2783	99.2783	0.0000	99.8310	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.6811	0.6811
3	0.6814	99.9598	0.0000	99.8310	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	99.2013	99.8825
4	0.0000	99.9598	0.1652	99.9962	0.0011	0.0011	0.0180	0.0181	0.0000	0.0000	0.0000	99.8825
5	0.0106	99.9703	0.0000	99.9962	0.0000	0.0011	0.0000	0.0181	0.0234	0.0234	0.0817	99.9642
6	0.0289	99.9992	0.0000	99.9962	0.0000	0.0011	0.0000	0.0181	0.0230	0.0464	0.0326	99.9968
7	0.0000	99.9992	0.0032	99.9994	0.0023	0.0034	0.0004	0.0184	0.0000	0.0464	0.0000	99.9968
8	0.0000	99.9992	0.0000	99.9995	0.0001	0.0034	0.0003	0.0188	0.0000	0.0464	0.0000	99.9968

Figura 55 – Fattori di partecipazione modale e masse partecipanti della struttura isolata.

Verifiche di sicurezza e funzionalità dell’edificio isolato alla base

Si riportano di seguito, a titolo d’esempio, le verifiche riferite allo Stato limite di Salvaguardia della Vita (SLV) per gli elementi travi e pilastri che compongono il telaio di spina in c.a.

Tabella 35 - Verifica a flessione delle travi del telaio di spina in c.a.

TRAVI 30X40															
IMP	Trave	l [m]	b [m]	h [m]	Med.inf [kNm]	Med.sup [kNm]	d [m]	Mrd.c [kNm]	A's.eff	As.eff	A's.eff [mm2]	As.eff [mm2]	Mrd.s	Med/Mrd <1	
3	1 2	4,3	0,3	0,4	50,9	42,9	0,37	84,86	2φ 8	6φ14	100,52	923,64	13,10	120,35	0,60
	2 3	2,75	0,3	0,4	36,7	8,3	0,37	84,86	2φ 8	4φ12	100,52	452,16	13,10	58,92	0,10
2	1 2	4,3	0,3	0,4	40	28,9	0,37	84,86	2φ 8	6φ14	100,52	923,64	13,10	120,35	0,47
	2 3	2,75	0,3	0,4	19	8,1	0,37	84,86	2φ 8	4φ12	100,52	452,16	13,10	58,92	0,10
1	1 2	4,3	0,3	0,4	50	30,8	0,37	84,86	2φ 8	6φ14	100,52	923,64	13,10	120,35	0,59
	2 3	2,75	0,3	0,4	25,8	7,3	0,37	84,86	2φ 8	4φ12	100,52	452,16	13,10	58,92	0,30

Tabella 36 - Verifica a taglio delle travi telaio di spina in c.a

TRAVI 30X40			
Ved _{sup}	Ved _{inf}	Vrd	Ved/Vrd < 1
86,8	85,7	103,74	0,84
57,6	48,6	103,74	0,56
72,2	64,5	103,74	0,70
39,3	43	103,74	0,41
69,1	59,8	103,74	0,67
43,4	38,9	103,74	0,42

Sul telaio di spina in c.a è sono presenti due tipologie di pilastri; quattro pilastri di sezione 30x40 e due pilastri di sezione 30x30. Si riportano di seguito i domini di resistenza M-N dei sei pilastri.

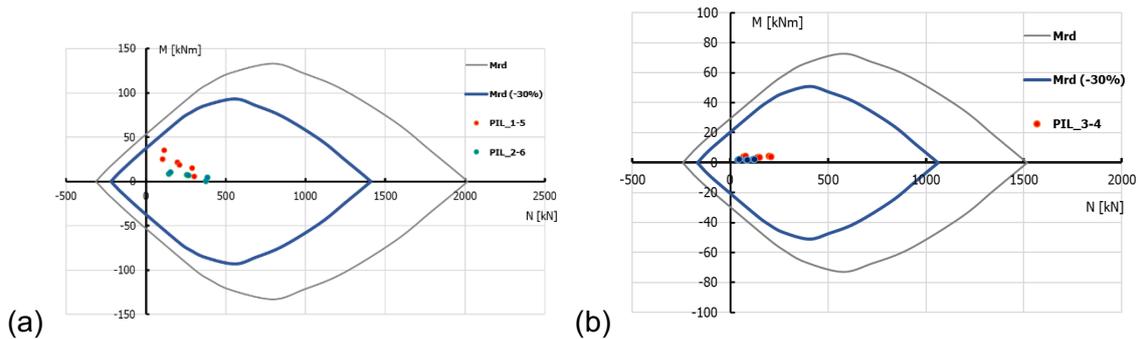


Figura 56 – Verifica a presso-flessione retta dei pilastri 30x40 (a) e 30x30 (b) del telaio di spina in c.a.

Dalle verifiche sopra riportato emerge che il sistema di isolamento simico alla base consente il soddisfacimento delle veriche allo SLV richieste dalle NTC2018.

Le verifiche allo Stato limite di Danno (SLD) sono state condotte in accordo con quanto indicato nel §7.3.6.1. della CM2019, che afferma che la condizione in termini di rigidezza sulla struttura si ritiene soddisfatta qualora la conseguente deformazione degli elementi strutturali non produca sugli elementi non strutturali danni tali da rendere la costruzione temporaneamente inagibile. Negli edifici sismicamente isolati, qualora la temporanea inagibilità sia dovuta a spostamenti di interpiano eccessivi, questa condizione si può ritenere soddisfatta quando gli spostamenti di interpiano d_r , ottenuti dall'analisi sismica, siano inferiori ai 2/3 dei limiti indicati per gli edifici a base fissa.

Per l'edificio in esame si prende come limite quello inerente alle costruzioni con struttura portante in muratura ordinaria:

$$qd_r \leq 2/3 \cdot 0,00020 h = 9.9\text{mm}$$

dove d_r è lo spostamento d'interpiano, cioè la differenza tra gli spostamenti del solaio superiore e del solaio inferiore e h è l'altezza del piano.

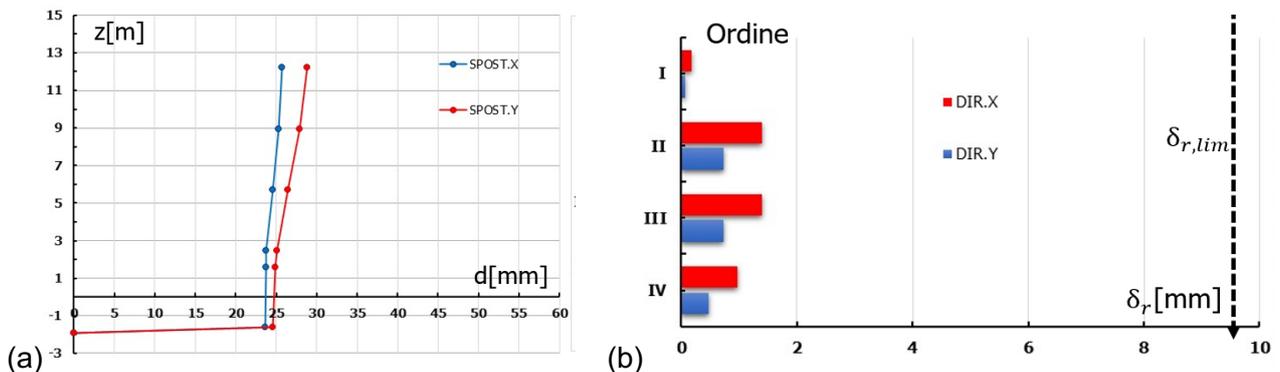


Figura 57 – (a) Spostamenti laterali allo SLD; (b) Verifica degli spostamenti relativi di interpiano.

La verifica è stata effettuata per entrambe le direzioni monitorando gli spostamenti degli spigoli del fabbricato e risulta ampiamente soddisfatta.

Per i dispositivi di isolamento sono state condotte le seguenti verifiche in conformità al § C11.9.7 della CM2019:

Verifica delle tensioni nelle piastre in acciaio:

$$\sigma_s = \frac{1,3 N (t_1 + t_2)}{(A_r t_s)} < f_{yk}$$

dove:

- $A_r = (\varphi - \sin \varphi) D^2/4$ è l'area ridotta efficace dell'isolatore;
- $\varphi = 2 \arccos (\delta/D)$ per isolatori circolari di diametro D;
- t_1 e t_2 sono gli spessori dei due strati di elastomero pari ad 8 mm;
- t_s è lo spessore della piastra pari a 2 mm.

Verifica della deformazione di taglio massima negli isolatori:

$$\gamma_t = \gamma_c + \gamma_s + \gamma_\alpha \quad \gamma_t \leq 500\%$$

dove:

- $\gamma_c = 1.5V/(S_1 \cdot G \cdot A_r)$
- $\gamma_s = d_2 / t_e$
- $\gamma_\alpha = 0$

Verifica dell'aderenza elastomero-acciaio si utilizza la relazione:

$$\gamma_s \leq \frac{\gamma^*}{1,5} \leq 2$$

Verifica instabilità isolatori:

$$V_{max} \leq \frac{V_{cr}}{2}$$

dove:

- $V_{cr} = \frac{G \cdot A_r \cdot S_1 \cdot D}{t_e}$ è il carico critico dell'isolatore elastomerico circolare;
- $A_r = (\varphi - \sin \varphi) D^2/4$ è l'area ridotta efficace dell'isolatore elastomerico circolare;
- $\varphi = 2 \arccos (\delta/D)$.

Con riferimento alla nomenclatura indicata in Figura 58, si riportano di seguito le tabelle riassuntive delle verifiche condotte sui 12 isolatori HDRB.

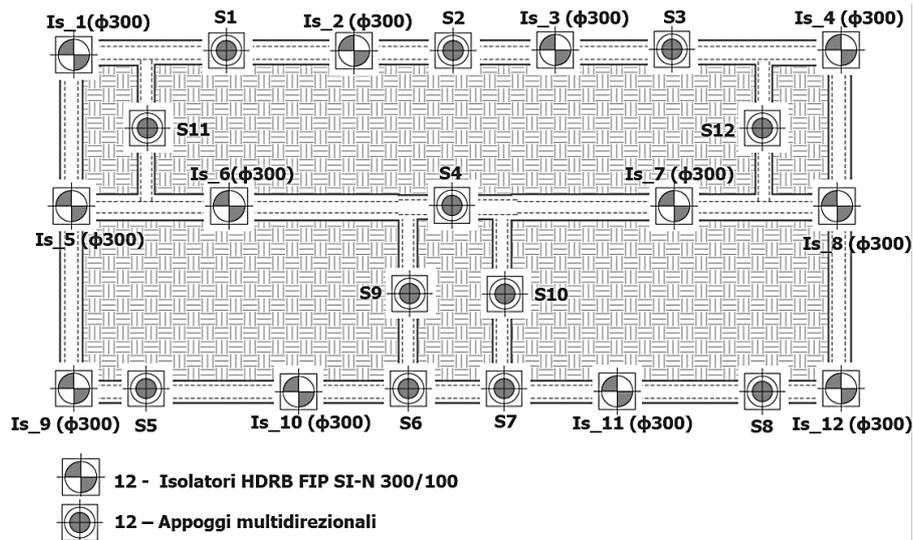


Figura 58 – Pianta del sistema d'isolamento.

	V [kN]	φ	δ [mm]	φ [rad]	senφ	Ar[mm ²]	σs [Mpa]	σs < fyk
Isolatore_1	77,1	300	84,115	2,57	0,54	45786,0	17,51	OK
Isolatore_2	237,5	300	84,115	2,57	0,54	45786,0	53,95	OK
Isolatore_3	237,5	300	84,115	2,57	0,54	45786,0	53,95	OK
Isolatore_4	77,1	300	84,115	2,57	0,54	45786,0	17,51	OK
Isolatore_5	206,1	300	87,176	2,55	0,56	44905,9	47,73	OK
Isolatore_6	523,6	300	86,751	2,55	0,55	45027,9	120,93	OK
Isolatore_7	523,6	300	86,751	2,55	0,55	45027,9	120,93	OK
Isolatore_8	206,1	300	87,176	2,55	0,56	44905,9	47,73	OK
Isolatore_9	115,3	300	89,036	2,54	0,57	44372,5	27,02	OK
Isolatore_10	119,2	300	90,170	2,53	0,57	44047,8	28,14	OK
Isolatore_11	119,2	300	90,170	2,53	0,57	44047,8	28,14	OK
Isolatore_12	115,3	300	89,036	2,54	0,57	44372,5	27,02	OK

Tabella 37 - Verifica della tensione negli inserti in acciaio degli isolatori.

	V [kN]	φ	δ [mm]	φ [rad]	senφ	Ar[mm ²]	γc	γs	γα	γt	γt < 5	γs < 2
Isolatore_1	77,1	300	84,115	2,57	0,54	45786,0	0,158	0,841	0	1,00	OK	OK
Isolatore_2	237,5	300	84,115	2,57	0,54	45786,0	0,486	0,841	0	1,33	OK	OK
Isolatore_3	237,5	300	84,115	2,57	0,54	45786,0	0,486	0,841	0	1,33	OK	OK
Isolatore_4	77,1	300	84,115	2,57	0,54	45786,0	0,158	0,841	0	1,00	OK	OK
Isolatore_5	206,1	300	87,176	2,55	0,56	44905,9	0,430	0,872	0	1,30	OK	OK
Isolatore_6	523,6	300	86,751	2,55	0,55	45027,9	1,090	0,868	0	1,96	OK	OK
Isolatore_7	523,6	300	86,751	2,55	0,55	45027,9	1,090	0,868	0	1,96	OK	OK
Isolatore_8	206,1	300	87,176	2,55	0,56	44905,9	0,430	0,872	0	1,30	OK	OK
Isolatore_9	115,3	300	89,036	2,54	0,57	44372,5	0,244	0,890	0	1,13	OK	OK
Isolatore_10	119,2	300	90,170	2,53	0,57	44047,8	0,254	0,902	0	1,16	OK	OK
Isolatore_11	119,2	300	90,170	2,53	0,57	44047,8	0,254	0,902	0	1,16	OK	OK
Isolatore_12	115,3	300	89,036	2,54	0,57	44372,5	0,244	0,890	0	1,13	OK	OK

Tabella 38 - Verifica della deformazione di taglio massima negli isolatori.

	V [kN]	ϕ	δ [mm]	φ [rad]	$\text{sen}\varphi$	Ar[mm ²]	Vcr [kN]	V/Vcr [%]	Vmax/Vcr <0,5
Isolatore_1	77,1	300	84,115	2,57	0,54	45786,0	2197,73	3,51	OK
Isolatore_2	237,5	300	84,115	2,57	0,54	45786,0	2197,73	10,81	OK
Isolatore_3	237,5	300	84,115	2,57	0,54	45786,0	2197,73	10,81	OK
Isolatore_4	77,1	300	84,115	2,57	0,54	45786,0	2197,73	3,51	OK
Isolatore_5	206,1	300	87,176	2,55	0,56	44905,9	2155,48	9,56	OK
Isolatore_6	523,6	300	86,751	2,55	0,55	45027,9	2161,34	24,23	OK
Isolatore_7	523,6	300	86,751	2,55	0,55	45027,9	2161,34	24,23	OK
Isolatore_8	206,1	300	87,176	2,55	0,56	44905,9	2155,48	9,56	OK
Isolatore_9	115,3	300	89,036	2,54	0,57	44372,5	2129,88	5,41	OK
Isolatore_10	119,2	300	90,170	2,53	0,57	44047,8	2114,30	5,64	OK
Isolatore_11	119,2	300	90,170	2,53	0,57	44047,8	2114,30	5,64	OK
Isolatore_12	115,3	300	89,036	2,54	0,57	44372,5	2129,88	5,41	OK

Tabella 39 - Verifica dell'instabilità degli isolatori.

Vulnerabilità sismica e classe di rischio dell'edificio isolato alla base

Al fine di evidenziare l'efficacia del sistema d'isolamento progettato alla base dell'edificio in esame, in Figura 59 viene proposto il confronto fra le curve di capacità ottenute da UNIBG per la struttura a fase fissa ed il taglio alla base calcolato per la struttura isolata sullo spettro di risposta elastico del sito in cui sorge l'edificio.

A tal riguardo, poiché la deformabilità della struttura isolata è praticamente concentrata nei dispositivi elastomerici, la sovrastruttura si comporta come un corpo praticamente rigido. Pertanto, in Figura 59 sono state considerate solo le curve di capacità ottenute da UNIBG sull'edificio a base fissa per la distribuzione di forze proporzionali alle masse.

Dal confronto tra il taglio alla base della struttura isolata precedentemente calcolato tramite analisi statica lineare ($F_{h,BIS}=424$ kN) e le curve di capacità risulta evidente come tale valore, essendo inferiore al valore del taglio che porta alla formazione delle prime cerniere plastiche, sollecita la struttura in campo elastico, che equivale a dire che la struttura isolata risulti adeguata in quanto in grado di assorbire, rimanendo in campo elastico, il taglio sismico associato allo spettro elastico valutato allo SLV.

Ne consegue che l'intervento di isolamento sismico, che ha produce un rilevante abbattimento dell'azione sismica impattante sulla struttura, consente l'adeguamento sismico dell'edificio, ovvero di raggiungere un Indice di Sicurezza sismica IS-V>1, cui è associata, secondo l'Allegato A del DM65 del 07-03-2017, la classe sismica A+.

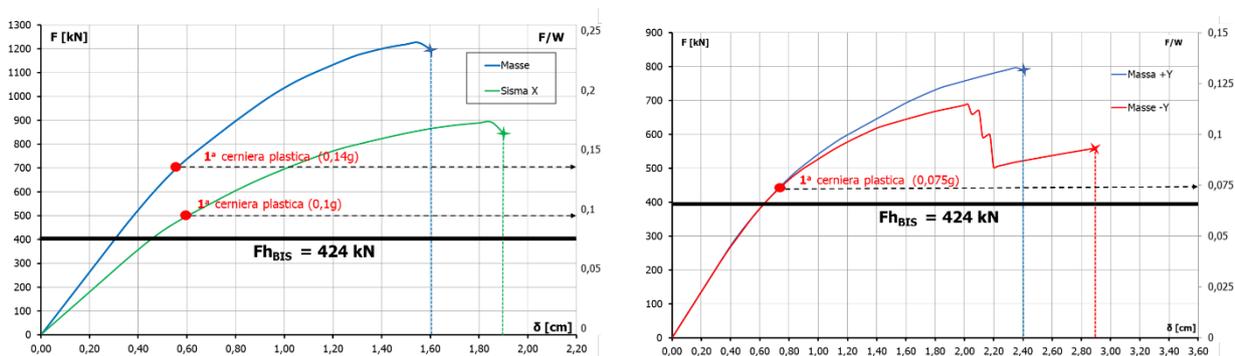


Figura 59 – Confronto tra il taglio sismico alla base dell'edificio isolato ($F_{h,BIS}$) e le curve di capacità dell'edificio a base fissa per la distribuzione di forze proporzionali alle masse: (a) direzione longitudinale (X); (b) direzione trasversale (y).

Messa in opera del sistema di isolamento sismico

Definita la strategia di adeguamento sismico dell'edificio oggetto di studio, si pone il delicato problema dell'esecuzione dell'intervento di isolamento alla base per un edificio esistente in muratura, che quindi deve essere separato dal terreno.

Le modalità operative per la realizzazione di questa strategia si basano su metodologie di intervento "tradizionali", ampiamente sperimentate, negli anni, nell'ambito di opere di sottofondazione di un edificio fondato direttamente sul terreno sottostante. La particolarità dell'edificio in esame consiste nell'avere il piano seminterrato in setti di calcestruzzo armato.

Quindi l'intervento proposto prevede una strategia di intervento che, oltre a creare delle nicchie nei setti per l'alloggiamento dei dispositivi, prevede anche il taglio della restante parte di calcestruzzo, presente tra una nicchia e l'altra, per effettuare l'effettivo distacco tra la sovrastruttura e la sottostruttura.

Vengono di seguito brevemente illustrate le fasi esecutive con cui si sceglie di intervenire. Tramite l'utilizzo di schemi grafici verranno illustrate, in ordine cronologico, le scelte progettuali e le tecniche utilizzate, partendo dallo stato di fatto per arrivare alla completa separazione della sottostruttura dalla sovrastruttura.

Strategia di intervento

Le fasi esecutive prevedono in prima istanza la *separazione del corpo di fabbrica dal terreno circostante*. Si rende necessario predisporre una paratia di perimetro che consenta lo scavo e la realizzazione di un'intercapedine di perimetro (scannafosso) che consenta lo spostamento relativo del fabbricato rispetto al terreno e la possibilità di controllo e manutenzione del sistema di isolamento anche sul perimetro del fabbricato. Si evidenzia che l'edificio attualmente presenta il piano cantinato completamente interrato, quindi la creazione dello scannafosso è necessaria per la fattibilità dell'intervento stesso oltre che per consentire lo spostamento relativo del fabbricato in caso di sisma.

Una volta creato il perimetro intorno all'edificio si può procedere con le *operazioni in sottofondazione*. Occorre quindi la preliminare rimozione del terreno all'interno dei vani portando alla luce le attuali fondazioni.

Successivamente si procede alla suddivisione in *sotto cantieri* dell'intero edificio avviando lo scavo e la successiva esecuzione delle singole fasi, che verranno descritte in dettaglio nel paragrafo successivo. La scelta di operare per sotto cantieri è dettata da tre motivi in particolare:

- si eliminano le probabilità di cedimenti differenziali in fondazione, agendo contemporaneamente su parti opposte dell'edificio;
- permette di evitare lo sgombero degli occupanti durante buona parte della fase di intervento e questo è uno dei punti cardine su cui si fonda il nostro intervento;
- la geometria dell'edificio si presta a tale intervento in quanto è facile operare sui setti perimetrali non essendoci altri edifici limitrofi, ed è facile operare anche sui setti del muro di spina interno in quanto il piano di intervento è un piano cantinato, disabitato, con facile accesso dalla scala interna.

Poi si passa alla *realizzazione dei "plinti"*, o meglio di bulbi di appoggio, che verranno inglobati nella platea esistente, operando sempre per sotto cantieri; in tali elementi si dovranno predisporre dei fori di alloggio per ospitare successivamente l'isolatore e le relative boccole di fissaggio.

La fase immediatamente successiva è la creazione delle *nicchie* per l'alloggiamento dei dispositivi di isolamento con successiva posa in opera dei dispositivi, che avviene avvitandoli ai fori di alloggio ed inserendo quindi dei puntelli all'interno delle nicchie che verranno poi rimossi al momento della messa in carico del dispositivo. È stato poi previsto un reticolo metallico, composto da profili in

acciaio ancorati alla testa dei dispositivi non allineati rigidamente, che costituisce l'elemento di collegamento rigido tra tutti i plinti e la base dei dispositivi di isolamento.

La fase finale è la fase di *taglio della porzione di calcestruzzo* rimanente tra le varie nicchie così da avere la definitiva sconnessione tra la sottostruttura e la sovrastruttura.

Cantierizzazione dell'intervento

La scelta di operare per cantieri deriva dalla necessità di poter effettuare buona parte dell'intervento mantenendo l'edificio fruibile ai condomini. Per far comprendere meglio l'idea di fondo si allegano le viste in pianta della sottofondazione sulla quale è stato progettato l'intervento di cantierizzazione.

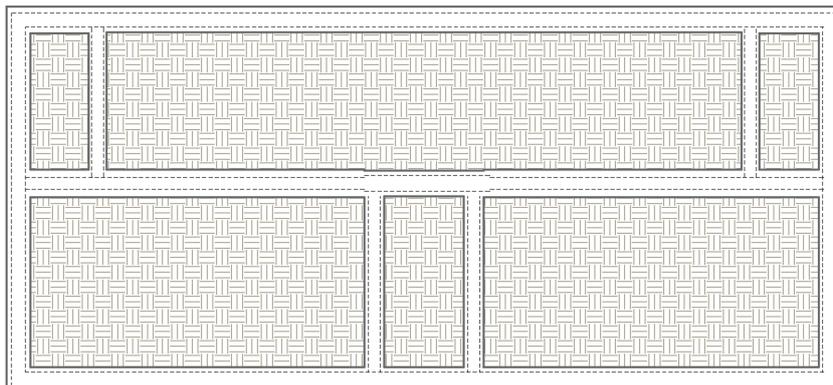


Figura 60 – Sottofondazione nello stato di fatto.

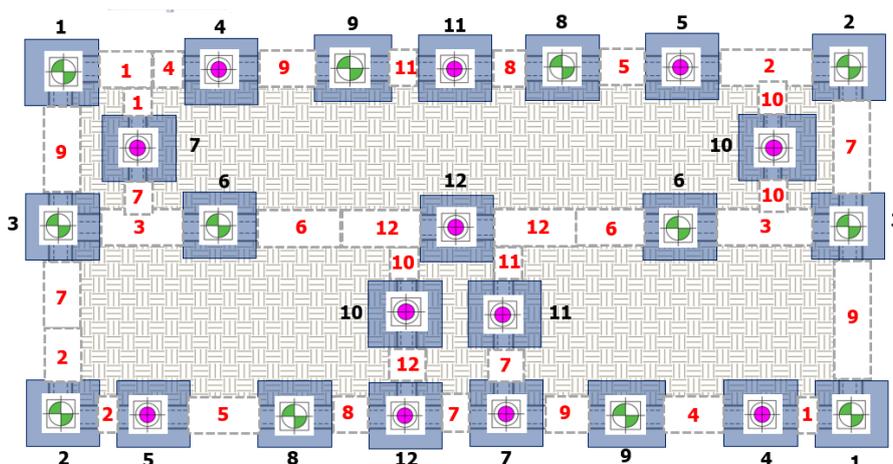


Figura 61 – Sottofondazione con le fasi esecutive del progetto dell'intervento.

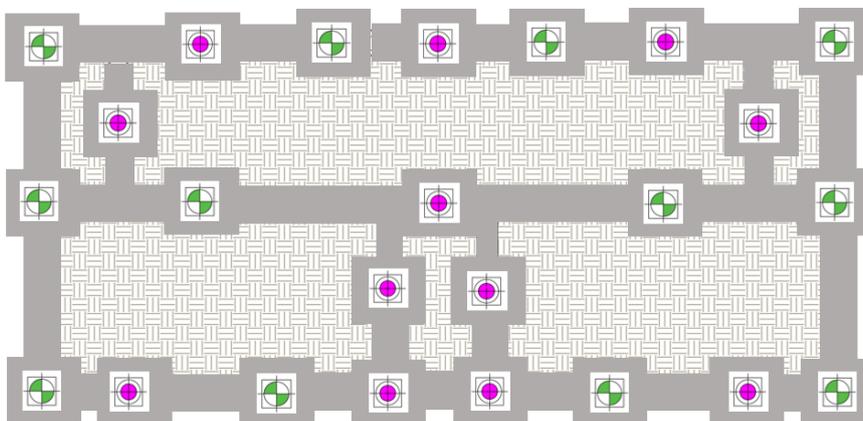


Figura 62 – Sottofondazione post intervento.

Nella Figura 60 è rappresentata la sottofondazione di partenza. Per non appesantire il disegno si sceglie di non riportare le quote ma ricordiamo che l'area in pianta della fondazione è di circa 210 m² (21m x 9.60m). Nella Figura 61 è rappresentato graficamente il progetto dell'intervento. I numeri neri, che vanno da 1 a 12, rappresentano le fasi di scavo. È possibile notare che ad ogni fase sono assegnati due dispositivi, posizionati quasi sempre ai poli opposti. Il quadrato blu individua il perimetro di scavo locale ed è rappresentativo delle fasi 1-2-3 che verranno descritte in dettaglio nel paragrafo successivo. I simboli in verde rappresentano gli isolatori elastomerici, quelli in rosa i dispositivi multidirezionali. Quindi al termine delle 3 fasi rappresentate dai quadrati blu avviene la 4 fase, taglio delle nicchie ed installazione dei dispositivi. I numeri in rosso, invece, che vanno sempre da 1 a 12. Sono rappresentativi delle fasi di taglio delle porzioni di calcestruzzo rimanenti tra le nicchie con gli isolatori. Si noti che i numeri in rosso, quasi sempre, coincidono o sono nelle vicinanze del corrispondente numero nero, ad indicare che la fase 5 di taglio può avvenire conseguentemente alla fase 4. Al termine di tutte e 5 le fasi avremo una vita in pianta rappresentata dalla Figura 62 e si sarà ottenuta la separazione tra la sottostruttura e la sovrastruttura, come forse meglio si intuisce dalla Figura 63.



Figura 63 – Separazione tra sottostruttura e sovrastruttura.

Si ricorda che l'intervento concepito in questo modo è finalizzato a limitare ed equilibrare gli eventuali cedimenti differenziali che le fasi di scavo e, le successive fasi di taglio dei setti, potrebbero determinare in fondazione. Inoltre questo è uno dei pochi modi che permettono di evitare lo sgombero dell'edificio durante la fase esecutiva, arrecando il minor disturbo possibile ai condomini.

Per la messa in opera dei dispositivi sotto il piano di fondazione si opererà per cantieri, al fine di limitare ed equilibrare gli eventuali cedimenti differenziali che le fasi di scavo e di taglio dei setti potrebbero determinare in fondazione. A tal fine si sono ipotizzate 5 fasi esecutive.

Le **fasi 1 e 2** riguardano la realizzazione dei ringrossi delle fondazioni esistenti mediante bulbi in c.a., sopra i quali verranno poi alloggiati i dispositivi elastomerici. Nella **fase 3** si prevede il taglio di nicchie nei setti murari necessari a predisporre gli isolatori e gli scivolatori nella successiva **fase 4**. Nell'ultima **fase 5** è previsto il taglio delle rimanenti porzioni delle pareti tra le nicchie così da realizzare la separazione fisica tra la sottostruttura e la sovrastruttura. I numeri riportati in Figura 61 indicano l'ordine temporale in cui vanno eseguiti i singoli cantieri.

Di seguito si riportano le fasi analizzate più nel dettaglio (Figura 64). Si precisa che le prime quattro fasi che verranno di seguito descritte avranno come schema esempio il setto centrale visto in sezione, per poter meglio comprendere le varie operazioni, mentre per l'ultima fase, che riguarda il taglio del setto tra le nicchie, si utilizzerà uno schema esempio visto in prospetto.

Si ricorda che le fasi che si stanno descrivendo saranno eseguite seguendo l'ordine cronologico dei cantieri individuati in Figura 61.

FASE 1 – Primi interventi in sottofondazione (Figura 64a)

- Demolizione del pavimento del piano cantinato;
- rimozione del terreno all'interno dei vani portando alla luce la fondazione esistente;
- demolizione della fondazione esistente di una porzione pari alle dimensioni del bulbo che accoglierà gli isolatori.

FASE 2 – Realizzazione del bulbo (Figura 64b)

- Posa in opera dei ferri d'armatura per il bulbo in c.a a cui verranno ancorati i dispositivi di isolamento sismico;
- riempimento della cassaforma del bulbo con c.a che diventa un tutt'uno con la fondazione esistente.

FASE 3 – Realizzazione delle nicchie nei setti (Figura 64c)

- Taglio puntuale di nicchie all'interno del setto per alloggiamento degli isolatori tramite sega circolare diamantata;
- Inserimento dei puntelli a sostegno delle nicchie.

FASE 4 – Posizionamento ed installazione dei dispositivi sismici (Figura 64d)

- Posizionamento ed installazione dei dispositivi all'interno delle nicchie;
- Rimozione dei puntelli per la messa in carico del dispositivo sismico.

FASE 5 – Separazione netta tra sottostruttura e sovrastruttura (Figura 64e)

- Taglio con sega diamantata delle porzioni di c.a intercorrenti tra le nicchie

Così facendo si avrà la separazione netta tra sottostruttura e sovrastruttura senza intaccare la continuità strutturale che è garantita dalla presenza dei dispositivi sismici che fungono da collegamento tra le due strutture (Figura 64f).

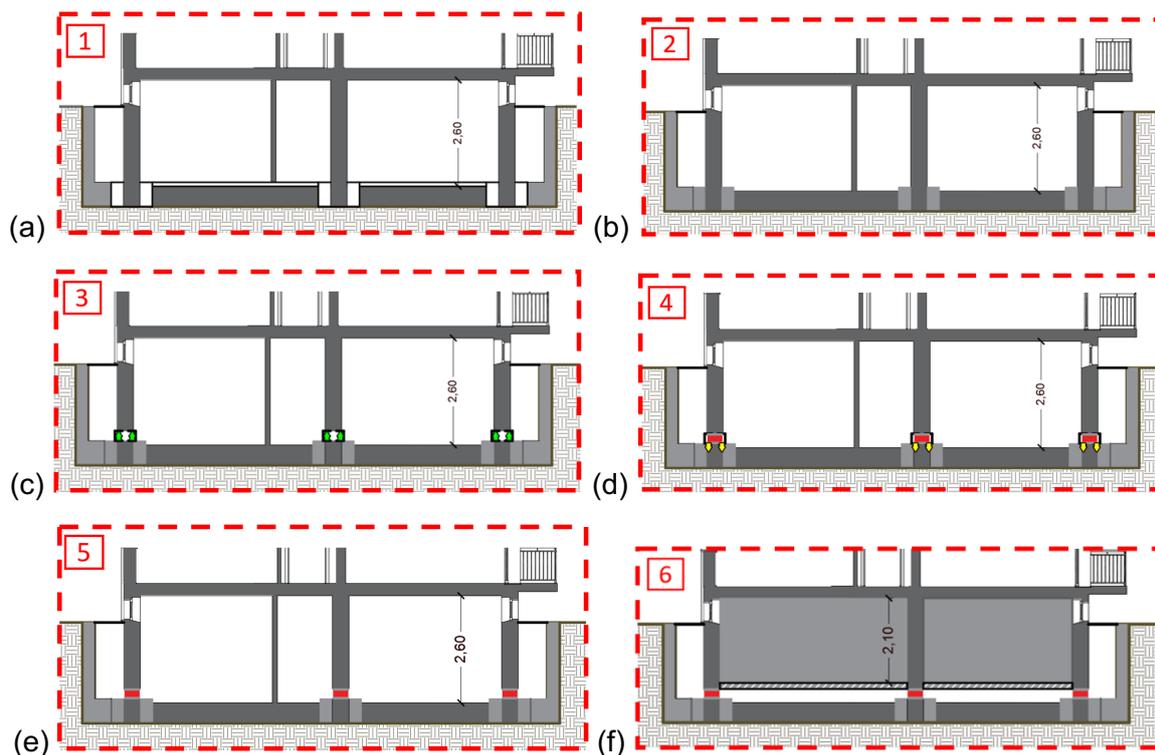


Figura 64 – Fasi di taglio delle murature, disposizione e messa in forza degli isolatori.

Descrizione delle misure di riqualificazione energetica

Le misure di retrofit energetico sono le stesse descritte per la Soluzione 1.

Costi di costruzione

Per la Soluzione 5 il costo totale di realizzazione è pari a € 624.819,18 mentre il costo di realizzazione per il rinforzo strutturale è pari a € 329.247,60, corrispondente al 53% del costo totale.

In particolare, le opere di carattere strutturale incidono per 613,80 €/m², quelle legate al miglioramento energetico per 137,00 €/m², demolizioni e ripristino finiture 191,00 €/m² mentre gli oneri di sicurezza 28,00 €/m².

Di seguito viene riportato il rendiconto delle voci della parte strutturale dell'intervento.

Tabella 40 -Costi di intervento per la parte strutturale (Soluzione 5).

COMPOSIZIONE DEI COSTI DELLE PRINCIPALI CATEGORIE DI INTERVENTO STRUTTURALE					
VOCE DI COSTO	COSTO [€]	% COSTO TOTALE	€/mq in Sup. Lat.	COSTO UNITARIO	QUANTITA'
0 RINFORZO SOLAI	131,421.00 €	39.92	208.02 €	245.01 €	536 m² in pianta
1 Rinforzo	111,523.80 €		176.53 €	207.91 €	536 m ² in pianta
2 Finitura	19,897.20 €		31.49 €	37.09 €	536 m ² in pianta
3 SOTTO-FONDAZIONE	83,829.50 €	25.46	132.69 €	156.28 €	536 m² in pianta
4 Demolizioni e scavi	18,095.90 €		28.64 €	33.74 €	369.29 m ³
5 Realizzazione muri in c.a. controterra	11,758.50 €		18.61 €	21.92 €	260.00 m ²
6 Realizzazione bulbi e travi di collegamenti in c.a.	11,639.50 €		18.42 €	21.70 €	213.43 m ³
7 Tagli muratura	29,418.90 €		46.57 €	54.85 €	65.75 m ²
8 Realizzazione solai perimetrali	12,916.70 €		20.45 €	24.08 €	64.00 m ²
9 SISTEMA ISOLAMENTO	62,051.20 €	18.85	98.22 €	115.68 €	536 m² in pianta
10 Fornitura e posa in opera 12+4 isolatori HDRB	25,509.00 €		40.38 €	47.56 €	16 unità
11 Prove accettazione 4 isolatori HDRB	6,463.30 €		10.23 €	12.05 €	4 unità
12 Fornitura e posa in opera 12+4 appoggi multidirezionali elastomerici	21,856.70 €		34.60 €	40.75 €	16 unità
13 Prove accettazione 4 appoggi multidirezionali elastomerici	6,463.30 €		10.23 €	12.05 €	4 unità
14 Protezione incendio isolatori e apparecchi di appoggio	1,758.90 €		2.78 €	3.28 €	24 unità
15 SOVRA-STRUTTURA	51,945.80 €	15.78	82.22 €	96.84 €	536 m² in pianta
16 Realizzazione diaframma in carpenteria metallica	23,496.80 €		37.19 €	43.80 €	536 m ² in pianta
17 Puntellatura per messa in forza e collegamento diaframma-muratura	9,596.30 €		15.19 €	17.89 €	170 m ²
18 Realizzazione solaio calpestio piano cantinato con lamiera collaborante	18,852.70 €		29.84 €	35.15 €	536 m ² in pianta
19 TOTALE COSTO DI COSTRUZIONE	329,247.50 €	100.00		613.81 €	€/m² in pianta
				173.75 €	€/m³
				521.16 €	€/m² sup. lat.

I costi vengono riassunti nella Figura 65.

COSTI STRUTTURALI DELL'INTERVENTO

COSTI		[€]	
1	RINFORZO SOLAI	131421	39.9%
2	SOTTO-FONDAZIONE	83830	25.5%
3	SISTEMA ISOLAMENTO	62051	18.8%
4	SOVRA-STRUTTURA	51946	15.8%

<i>Costo totale intervento</i>	329247.5	100%
<i>Costo a m² in pianta</i>	613.8	€/m²
<i>Costo a m³</i>	173.7	€/m³
<i>Costo a m² in facciata</i>	173.7	€/m²

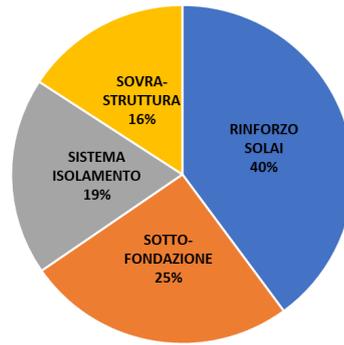


Figura 65 - Costi per la parte strutturale dell'intervento (Soluzione 5).

Per quanto concerne invece l'intero intervento, di seguito viene riportato il computo per macro-aree.

Tabella 41 - Costi di intervento per macroaree (Soluzione 5).

ANALISI DEI COSTI					
TIPO DI STIMA: STIMA A LIVELLO DI PROGETTO PRELIMINARE					
VOCE DI COSTO	COSTO [€]	% COSTO TOTALE	€/mq in Sup. Lat.	COSTO UNITARIO	QUANTITA'
PREPARAZIONE DEL CANTIERE	5,283.59 €	0.85	8.36 €	9.85 €	536 m² in pianta
Allestimento di cantiere	2,100.00 €	0.34	3.32 €	2,100.00 €	
Recinzione di cantiere	70.95 €	0.01	0.11 €	14.19 €	
Costi aggiuntivi per la sicurezza	1,220.00 €	0.20	1.93 €	1,220.00 €	
Ponteggio	1,892.64 €	0.30	3.00 €	8.69 €	217.83 mq
DEMOLIZIONI	1,861.45 €	0.30	2.95 €	3.47 €	536 m² in pianta
Apertura porte finestre	424.80 €	0.07	0.67	236.00 €	1.80 €
Demolizioni e scavi piano interrato per predisposizione isolatori	1,436.65 €	0.23	2.27	17.03 €	84.36 €
SMALTIMENTO RIFIUTI	10,188.20 €	1.63	16.13 €	18.99 €	536 m² in pianta
Conferimento di rifiuti a discariche	19,231.50 €	3.08	1.81	9.60 €	119.26 €
FINITURE FACCIATE	60,926.85 €	9.75	96.44 €	113.58 €	536 m² in pianta
Intonaco rasato facciata nord	4,233.95 €	0.68	6.70	30.57 €	138.50 €
Pannelli di fibrocemento ecologico posati con idonea struttura di supporto	51,630.40 €	8.26	81.72 €	230.00 €	224.48 mq
Pannelli in legno idrorepellente per esterni	5,062.50 €	0.81	8.01 €	135.00 €	37.5 mq
RETROFIT ENERGETICO	73,427.88 €	11.75	116.23 €	136.89 €	536 m² in pianta
Isolante tipo la Stiferite GT sp. 8 cm facciata nord	12,465.00 €	1.99	19.73 €	90.00 €	138.5 mq
Isolante tipo la Stiferite GT sp. 7+7 cm facciata sud est ovest	22,890.50 €	3.66	36.23 €	85.00 €	269.3 mq
Serramenti in PVC	28,800.00 €	4.61	45.59 €	450.00 €	64 mq
Davanzali	4,962.70 €	0.79	7.86 €	135.89 €	36.52 mq
Imbotti finestre	2,407.68 €	0.39	3.81 €	60.00 €	
Zoccolo edificio	1,902.00 €	0.30	3.01 €	75.00 €	
RETROFIT STRUTTURALE	329,247.50 €	52.69	521.16 €	613.81 €	536 m² in pianta
Rinforzo solai	131,421.00 €	21.03	208.02 €	245.01 €	
Sotto-fondazione	83,829.50 €	13.42	132.69 €	156.28 €	
Sistema isolamento	62,051.20 €	9.93	98.22 €	115.68 €	
Sovra-struttura	51,945.80 €	8.31	82.22 €	96.84 €	
SICUREZZA DEL CANTIERE	15,000.00 €	2.40	23.74 €	27.96 €	536 m² in pianta
VARIE ED EVENTUALI	14,878.06 €	2.38	23.55 €	27.74 €	536 m² in pianta
TASSE	51,081.35 €	8.18	80.86 €	95.23 €	536 m² in pianta
SPESE TECNICHE PER LA PROGETTAZIONE	49,593.55 €	7.94	78.50 €	92.46 €	536 m² in pianta
TASSE PER LE SPESE DI PROGETTAZIONE	13,330.75 €	2.13	21.10 €	24.85 €	536 m² in pianta
TOTALE COSTO DI COSTRUZIONE	624,819.18 €	100.00		1,164.84 €	€/m² in pianta
				329.72 €	€/m³
				989.01 €	€/m² sup. lat.

Durata dell'intervento

Per quanto riguarda i tempi di costruzione, sono stati stimati 8 mesi (GG lavorativi con una squadra tipo) per la realizzazione di tutti gli interventi previsti (energetico e strutturale).

5. Considerazioni conclusive

Il presente report mette a confronto diverse soluzioni di retrofit sismico ed energetico. Per quanto riguarda il rispetto dei principi del Life Cycle Thinking, le soluzioni sono tutte concepite per essere realizzate dall'esterno dell'edificio, evitando la rilocazione degli abitanti, nonché per ridurre al minimo gli impatti lungo tutto il ciclo di vita, compresi i danni a tutti i componenti dell'edificio dopo un terremoto. Soluzioni innovative, pensate per garantire un facile montaggio, smontaggio nonché riuso e riciclo, sono state dunque proposte e confrontate tra di loro.

Per un confronto efficace delle diverse tecniche, tutte le soluzioni sono applicate allo stesso edificio- 'caso studio' e sono progettate, tranne la Soluzione 1, per garantire le stesse prestazioni strutturali (soluzioni iso-performance).

Nel report, dapprima viene presentato l'edificio di riferimento e ne viene valutata la capacità prestazionale nella condizione attuale per mezzo di analisi statiche non lineari. Vengono quindi progettate le diverse soluzioni e valutati i costi di costruzione previsti. In particolare, vengono considerate, nel capitolo 3 (Università degli Studi di Bergamo), soluzioni basate su esoscheletri a setti ed esoscheletri a guscio e, nel capitolo 4 (Università degli Studi di Napoli), una soluzione con isolamento alla base. Tali soluzioni permettono di passare da una classe sismica C a una classe A+. Tutte le soluzioni strutturali considerate sono state poi accoppiate allo stesso intervento di recupero energetico, che permette di passare da una classe energetica F a una classe B.

Sulla base della valutazione comparativa delle soluzioni, vengono fatte una serie di considerazioni. Le differenze dei costi di costruzione tra gli esoscheletri a setti ed esoscheletri a guscio si basano sul rapporto tra il costo del sistema di fondazione e quello della sovrastruttura: l'esoscheletro con parete di taglio ha costi molto più elevati associati alle opere di fondazione, mentre quello a guscio presenta costi inferiori. È opportuno peraltro sottolineare che considerando i criteri del Life Cycle Thinking a monte del processo di progettazione, le soluzioni adottate danno luogo ad interventi economicamente efficienti e sostenibili ed a soluzioni a basso impatto ambientale.

I benefici derivanti dall'adozione dell'isolamento sismico alla base dell'edificio in esame sono molteplici. La sensibile riduzione delle accelerazioni sulla struttura sismicamente isolata, rispetto alla configurazione a base fissa, determina infatti:

- un forte abbattimento delle forze di inerzia (e quindi delle sollecitazioni) prodotte dal sisma sulla struttura, tale da evitare il danneggiamento degli elementi strutturali (travi, pilastri, ecc.) anche sotto terremoti violenti;
- una drastica riduzione degli spostamenti interpiano, tale da eliminare il danno agli elementi non strutturali (tamponature, tramezzi, ecc.), così da garantire la piena funzionalità dell'edificio anche a seguito di un terremoto violento;
- un'elevata protezione del contenuto strutturale;
- una percezione molto minore delle scosse sismiche da parte degli occupanti.

In più, quello proposto dalla UR UNINA risulta un intervento poco invasivo rispetto ai tradizionali interventi di adeguamento sismico.

6. Bibliografia

- [1] BPIE, Europe's buildings under the microscope: A country-by-country review of the energy performance of the buildings, Brussel, 2011.
- [2] A. Marini, C. Passoni, A. Belleri, F. Feroldi, M. Preti, G. Metelli, P. Riva, E. Giuriani and G. Plizzari, "Combining seismic retrofit with energy refurbishment for the sustainable renovation of RC buildings: a proof of concept," *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp. 1-21, 2017.
- [3] C. Passoni, A. Marini, A. Belleri e C. Menna, «Redefining the concept of sustainable renovation of buildings: state of the art and an LCT-based design framework,» *Sustainable Cities and Society*, vol. 64, n. 2021, 2021.
- [4] A. Marini, C. Passoni e A. Belleri, «Life cycle perspective in RC building integrated renovation,» in *XIV International Conference on Building Pathology and Constructions Repair – CINPAR*, Florence, 2018.
- [5] Passoni, C., Palumbo, E., Pinho, R., Marini, A. (2022). "The LCT Challenge: Defining New Design Objectives to Increase the Sustainability of Building Retrofit Interventions". *Sustainability*. 2022, 14(14), 8860
- [6] NTC, *Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018)*, Gazzetta Ufficiale del 20/02/2018, Supplemento ordinario n.42, 2018.
- [7] N. Canal, «Resistenza meccanica di blocchi forati a fori orizzontali,» Consorzio POROTON Italia, Verona, 2006.
- [8] J. Zanni, A. Marini, A. Belleri, P. Riva e F. Simonetti, «Integrated rehabilitation with exoskeleton under a life cycle thinking approach application to an existing building,» in *XXVII Congresso del Collegio dei Tecnici dell'Acciaio*, Bologna, 2019.
- [9] S. Labò e A. Marini, «In-plane flexural behavior of hollow brick masonry walls with horizontal holes,» *In fase di invio a Engineering Structures*, 2022.
- [10] MidasGEN, «Analysis Manual for Midas GEN,» 2020.
- [11] EC8, *Design of structures for earthquake resistance*, Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, CEN 2005.
- [12] P. Fajfar, «A Nonlinear Analysis Method for Performance-Based Seismic Design,» *Earthquake Spectra*, vol. 16, n. 3, pp. 573-592, 2000.
- [13] F. Simonetti, E. Curto e P. Riva, *Progetto di fattibilità tecnico economica-Riqualificazione sismica energetica e architettonica con nuova facciata strutturale di un edificio comunale.*, 2019.
- [14] J. Zanni, S. Cademartori, A. Marini, A. Belleri, E. P. Giuriani, P. Riva, B. Angi, G. Franchini, A. Marchetti, P. Odorizzi e G. Luitprandi, «Riqualificazione integrata e sostenibile di edifici esistenti con esoscheletri a guscio prefabbricati: il caso studio AdESA,» in *Colloqui ATE. Nuovi orizzonti per l'architettura sostenibile*, Catania, 2020.

- [15] S. Labò, C. Passoni, A. Marini, A. Belleri e P. Riva, «Design spectra for the preliminary design of elastic seismic retrofit solution from the outside,» in *7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering - COMPDYN*, Crete, 2019.
- [16] A. Marini, A. Belleri, C. Passoni, F. Feroldi e E. Giuriani, «In-plane capacity of existing post-WWII beam-and-clay block floor systems,» *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 20, n. 3, 2022.
- [17] U. E. I. 12944, *Protezione dalla corrosione di strutture in acciaio mediante verniciatura..*

Appendice A1

(A cura dell'Università degli Studi di Bergamo)

Tabella A1 Lista delle EPD adottate per ogni materiale e ipotesi di fine vita considerate nelle EPD per il calcolo degli impatti dei Moduli C3-4-D.

Materiale	EPD	Paese	Validità (anno)	Moduli	Ipotesi di fine vita
	Unical	IT	2022	A1-A3	-
Calcestruzzo C25/30	Beton	FR	2024	C3-C4-D	75% riciclo, 25% scarica (C3: trattamento di rifiuti di demolizione: frantumazione per ottenere ghiaia per uso stradale e stoccaggio; carbonatazione di rifiuti di calcestruzzo - 75% del prodotto in scarica carbonato) (D: sostituzione di materiale vergine - ghiaia naturale per applicazioni stradali)
Casseforme	Panguaneta	SE	2025	A1-A3 + C3-C4-D	49% recupero materiale, 4% recupero energetico, 13% incenerimento, 34% scarica
Barre armatura	Alfa Acciai	IT	2025	A1-A3 + C3-C4-D	Contenuto di materiale riciclato ≥ 97% (D: valore netto tra l'impatto diretto, cioè il riciclaggio dell'acciaio nel Electric Arc Furnace, e l'impatto evitato, cioè la produzione di acciaio dal minerale di ferro nel Basic Oxygen Furnace)
XLAM	Stora Enso	FI	2026	A1-A3 + C3-C4-D	4 scenari alternativi: 1- Riutilizzo: il 100% dell'XLAM viene riutilizzato in forma coerente (D: sostituzione di materiale vergine - prodotto) 2- Riciclaggio: 100% cippatura dell'XLAM per il riciclaggio (D: sostituzione del materiale vergine - cippato) 3- Incenerimento: Incenerimento del 100% dell'XLAM per il recupero di energia (75% di efficienza) (D: sostituzione del gas naturale nella produzione di calore) 4- Scarica: 100% dell'XLAM viene messo in scarica (D: l'assorbimento di metano dalla scarica sostituisce in parte il gas naturale nella produzione di calore)
Lamiera acciaio	Hyundai Steel	KOR	2025	A1-A3 + C3-C4-D	95% riciclo, 5% scarica
	Beltrame	IT	2024	A1-A3	-
Profili acciaio	ArcelorMittal	LU	2024	C3-C4-D	11% riutilizzo, 88% riciclo, 1% scarica (C3: selezione e frantumazione dell'acciaio da riciclare e percentuale di rottami in scarica non recuperati a causa dell'efficienza di selezione - valore conservativo dell'1%) (D: produzione evitata)
Micropali in ghisa	Tiroler	AT	2022	A1-A3 + C3-C4-D	In linea di principio, è possibile riciclare i pali di ferro. Tuttavia, di solito, questo non viene fatto per ragioni economiche e i pali rimangono nel terreno

ALLEGATO 1 – Schede

(A cura dell'Università degli Studi di Bergamo)