a cura di
A. Prota
F. da Porto
M. Dolce

Criteri e soluzioni per la progettazione di interventi integrati e sostenibili

ISBN 979-12-80212-XX-X

Criteri e soluzioni per la progettazione di interventi integrati e sostenibili

Rafforzamento sismico ed efficientamento energetico di edifici esistenti

a cura di
Andrea Prota
Francesca da Porto
Mauro Dolce

Criteri e soluzioni per la progettazione di interventi integrati e sostenibili

Rafforzamento sismico ed efficientamento energetico di edifici esistenti

a cura di
Andrea Prota
Francesca da Porto
Mauro Dolce

L'adozione e le modalità applicative delle soluzioni progettuali illustrate in questo volume e nei casi studio in esso richiamati (e pubblicati sul sito www.reluis.it) sono di esclusiva responsabilità del lettore-progettista come eventuale riferimento per la progettazione in casi reali. ReLUIS e gli autori del presente volume declinano, pertanto, qualsiasi responsabilità rispetto a come i suoi contenuti vengono utilizzati, ribadendo che gli stessi riflettono le conoscenze allo stato dell'arte al momento della pubblicazione.

Prima edizione

ISBN 979-12-80212-XX-X
Doppiavoce
Napoli
www.doppiavoce.it

© 2024 ReLUIS
Tutti i diritti riservati.
È vietata ogni riproduzione.

Indice

Prefazione 5

1. Introduzione 9
1.1. Politiche fiscali, incentivi e loro effetti 12
1.2. Interventi integrati e sostenibili 13

2. Casi studio 17

3. Temi emergenti dall'applicazione ai casi studio 21
3.1. Interventi locali su nodi in c.a. e rinforzo delle tamponature 21
3.1.1. Ambiti di applicabilità 24
3.1.2. Vantaggi e svantaggi 25
3.2. Interventi locali sui collegamenti e rinforzo delle murature 26
3.2.1. Interventi sui collegamenti: applicabilità, vantaggi e svantaggi 29
3.2.2. Interventi su pareti in muratura: applicabilità, vantaggi e svantaggi 32
3.3. Esoscheletri in acciaio 37
3.3.1. Ambiti di applicabilità 39
3.3.2. Vantaggi e svantaggi 41
3.4. Criticità e interventi sui solai 42
3.4.1. Diaframmi di piano negli edifici in c.a. 44
3.4.2. Diaframmi di piano negli edifici storici in muratura 49
3.5. Interventi con sistemi in legno 56
3.5.1. Ambiti di applicabilità 62
3.5.2. Vantaggi e svantaggi 64
3.6. Interventi mediante tecniche di isolamento sismico 68
3.6.1. Ambiti di applicabilità 70
3.6.2. Vantaggi e svantaggi 73

4. Metodi di valutazione integrata 75
4.1. Descrizione metodologica 78
4.1.1. Metodi incrementali 78
4.1.2. Metodologia VAN – Valore Attuale Netto 80
4.1.3. Metodi multicriterio basati sulla valutazione del costo economico nel ciclo di vita 83
4.1.4. Identificazione dell'intervento combinato ottimale con approccio Multi-Criteria Decision Making (MCDM) 86

4.1.5. Metodi basati sulla definizione di curve iso-classe e iso-performance 89
4.1.6. Metodi basati sulla valutazione di sostenibilità complessiva degli interventi integrati 91
4.1.7. Metodi olistici basati sul Life Cycle Thinking (LCT) 93
4.2. Applicazioni 97
4.3. Considerazioni conclusive 102

Bibliografia 105

Autori 117

Appendice 119

Prefazione

La necessità di intervenire sull'edilizia esistente in Italia, per migliorarne la capacità sismica e l'efficienza energetica, dovrebbe ormai essere un obiettivo chiaro e condiviso. D'altro canto, si è sperimentata in questi anni una bassa propensione, o sostanziale inerzia, nell'intraprendere in modo sistematico ed esteso interventi per migliorare le prestazioni sismiche degli edifici, assistendo viceversa ad un'ampia diffusione di interventi per migliorarne il decoro e per riqualificarli energeticamente. Quest'ultima tipologia di interventi è sicuramente di rilevante importanza per gli aspetti sociali, economici ed ambientali connessi alla riduzione della domanda e del consumo di energia. Ciononostante, in un territorio esposto a frequenti eventi sismici di medio/alta intensità, intervenire sul piano dell'efficientamento energetico, tralasciando un contestuale approfondimento del livello di sicurezza sismico ai fini del miglioramento delle prestazioni strutturali, significa aumentare il valore dei beni esposti al rischio. Gli eventi sismici degli ultimi anni ci hanno dato conferma che ciò causa danni strutturali e perdite economiche ancora più ingenti, senza d'altra parte ottenere, a fronte degli investimenti condotti, alcuna mitigazione dei disagi alle popolazioni colpite dal sisma, né riduzione delle perdite di vite umane.

È evidente quindi che tralasciare l'aspetto strutturale e sismico nel processo di sola riqualificazione energetica del patrimonio costruito italiano è una scelta che porta ad una sovrastima non realistica, e con effetti negativi, dei reali benefici dell'intervento. Solo l'investimento in forma integrata sull'efficienza energetica e sulla sicurezza sismica rappresenta una scelta veramente conveniente e logica dal punto di vista tecnico, economico e sociale, e quindi, in sostanza, costituisce l'unica scelta sostenibile possibile.

È in questo contesto che ReLUIS ha sviluppato, sin dal 2019, con un'ampia partecipazione della comunità scientifica italiana e in collegamento con un'analoga iniziativa della Commissione Europea, un progetto finalizzato allo studio e allo sviluppo di interventi di rapida esecuzione, a basso impatto ed integrati per la riqualificazione dell'edilizia esistente. Su questo tema, le unità di ricerca partecipanti al progetto hanno condotto e hanno messo a sistema attività sperimentali e computazionali, ma si sono anche cimentate nell'esperienza diretta di ideazione progettuale di interventi integrati su numerosi edifici casi studio, per ognuno dei quali sono state ipotizzate anche più soluzioni alternative, arrivando a valu-

tare, in maniera uniforme, anche i costi e i tempi di intervento. Lo sviluppo delle proposte ha mirato anche a raccogliere la grande sfida che ormai emerge con chiarezza quando si pianificano azioni di riduzione diffusa del rischio sismico su edilizia residenziale o di pubblico interesse: la fattibilità concreta e l'accettazione degli interventi sono molto elevate solo se essi non richiedono l'interruzione d'uso e la necessità di sgombero. Gli interventi discussi in questo volume hanno dunque mirato a migliorare il comportamento sismico e contestualmente a ridurre i consumi energetici tramite interventi integrati che siano possibilmente realizzabili solo dall'esterno dell'edificio, e con costi e tempi molto contenuti.

Da qui l'impostazione di questo volume, che si prefigge di descrivere alcune tipologie di intervento disponibili per il rafforzamento o il miglioramento sismico di edifici esistenti, da quelle più tradizionali ed applicabili a livello locale (ad esempio, gli interventi sui nodi di strutture in calcestruzzo armato, gli interventi sui collegamenti e sulle pareti di edifici in muratura, gli interventi sui solai) ad altre con effetto a livello globale sull'edificio (utilizzo di esoscheletri in acciaio, tecniche di isolamento sismico per il retrofit dell'esistente) fino a tecniche più innovative, che stanno ricevendo una notevole attenzione anche per gli aspetti di sostenibilità, e che combinano aspetti e concetti validi anche per gli interventi già menzionati, ma considerano l'utilizzo esclusivo di soluzioni e sistemi basati su elementi di legno. La trattazione delle tecniche di intervento si rifà ad aspetti normativi ed applicativi, non ha la pretesa di una trattazione esaustiva ma fornisce i principali criteri progettuali, gli ambiti di applicabilità, i vantaggi e le limitazioni delle diverse tecniche, anche in relazione al loro impatto (invasività, costi e tempi di intervento) e, appunto, alla loro integrazione con interventi che migliorino l'efficienza energetica. Data la natura applicativa dell'argomento trattato, le considerazioni esposte nascono anche dall'esperienza diretta di progettazione degli interventi integrati già richiamata, riportata mediante schede sintetiche in appendice, e contenuta in forma estesa in relazioni di calcolo complete, scaricabili dal sito di ReLUIS.

Nella logica di favorire la diffusione di tali interventi integrati, in conclusione del manuale si è affrontato un altro tema che oggi costituisce una delle principali limitazioni tecniche all'applicazione di interventi integrati e sostenibili. Si è cercato di dare risposta alla seguente domanda: si può condurre una valutazione integrata dei diversi aspetti progettuali, energetici/strutturali ma non solo, per pervenire alla scelta di un intervento che assicuri contestualmente il soddisfacimento di più prestazioni? Oggi sono ormai disponibili, anche se non ancora diffusi nelle pratiche applicazioni, approcci metodologici integrati, che in molti casi fanno riferimento al ciclo di vita dell'edificio e che consentono di includere nella

valutazione delle prestazioni criteri ulteriori rispetto a quelli energetici e strutturali; ciò può consentire di portare in conto anche i vantaggi sociali e gli impatti ambientali globali degli interventi previsti. Il lavoro di confronto tra metodi diversi svolto all'interno del progetto ReLUIS ha consentito, in questo campo ancora in via di sviluppo, di fissare alcuni requisiti di partenza per una più pratica ed immediata applicazione dei metodi stessi.

L'attività nell'ambito di queste tematiche sta proseguendo nel contesto del nuovo progetto ReLUIS-DPC. Le esperienze e i risultati sin qui raccolti, e solo in parte riportati all'interno di questo volume, costituiscono già un riferimento unico e prezioso, a livello nazionale ed internazionale, su un tema d'attualità e di fondamentale importanza, al fine di promuovere la più diffusa applicazione di interventi integrati per il rafforzamento sismico e per il contestuale efficientamento energetico, anche eseguibili dall'esterno dell'edificio, o comunque compatibili con la minima interruzione d'uso possibile, con tempi e costi contenuti.

Francesca da Porto, Andrea Prota, Mauro Dolce

1.
Introduzione

Ciro Del Vecchio, Elisa Saler, Andrea Prota, Francesca da Porto

Il patrimonio edilizio esistente italiano risulta vetusto e non adeguato a soddisfare gli attuali requisiti prestazionali dal punto di vista strutturale, dei consumi energetici e del comfort abitativo. Stando alle statistiche pubblicate dall'ISTAT [1] la maggior parte degli edifici esistenti è stato costruito prima dell'inizio degli anni '80. Dunque, molti di essi hanno superato la vita nominale, come intesa dalle vigenti norme tecniche [2], e necessitano di interventi di manutenzione straordinaria per il ripristino di avanzati fenomeni di degrado e del decoro complessivo del fabbricato. Inoltre, numerosi edifici sono stati progettati senza tenere conto né delle azioni sismiche né dell'efficienza energetica [3]. Ciò comporta un grande rischio sociale legato alla vulnerabilità degli edifici, che si può tradurre in danni strutturali ed economici, oltre alla perdita di vite umane [4-8]. Sotto il profilo energetico, circa il 75% dei 12,5 milioni di edifici residenziali non sono energeticamente efficienti e il 75%-80% di questi sarà ancora in uso nel 2050 [9]

Questi sono i motivi alla base del forte impulso da parte del governo ad incentivare, con un susseguirsi di misure fiscali, interventi di riqualificazione del costruito per migliorarne le prestazioni strutturali ed energetiche ed ammodernarne l'aspetto estetico.

Secondo un'analisi della *World Bank* [10] investire in forma integrata sull'efficienza energetica e sulla sicurezza strutturale in Europa è una scelta conveniente dal punto di vista tecnico, economico e sociale. In particolare, l'implementazione di soli interventi energetici comporta un incremento del valore esposto per gli edifici situati in zone a rischio sismico medio-alto: escludere il rischio sismico dalla valutazione dei benefici di interventi di efficientamento energetico può condurre a una sovrastima di questi benefici [11].

Nell'ottica di limitare le ripercussioni legate al cambiamento climatico e agli altri rischi naturali, l'Unione Europea e le istituzioni globali si sono attivate, conformando le loro politiche al fine di mitigare l'impatto dell'attività umana sull'ambiente e incentivare lo sviluppo di strategie sostenibili di adattamento.

Nel 2015 è stato stipulato l'Accordo di Parigi [12], con cui i 195 Paesi firmatari si impegnano a ridurre le emissioni di gas serra. Inoltre, viene adottata l'Agenda 2030, che definisce i 17 obiettivi di sviluppo sostenibile (OSS): tra questi, l'obiettivo 11 prevede lo sviluppo di città inclusive, sicure, resilienti e sostenibili. Nello stesso anno è stato adottato anche il *Sendai Framework* [13], in cui si definiscono quattro priorità di azione orientate alla riduzione del rischio di disastri. Le politiche intraprese dall'UE per il contrasto al cambiamento climatico e per uno sviluppo sostenibile sono riassunte nel *Green Deal* europeo [14], in cui rientra la strategia *Renovation Wave* [15], supportata a sua volta dall'iniziativa *New European Bauhaus* [16], entrambe orientate alla creazione di spazi sostenibili, inclusivi e confortevoli. Garantire la sicurezza sismica è parte del principio chiave del Green Deal sul miglioramento della salute e del benessere dei cittadini attraverso edifici rinnovati ed efficienti. Attraverso la *European Climate Law* [17] le proposte contenute nel *Green Deal* sono state ufficialmente convertite in legge.

Analizzando gli interventi di riqualificazione dei fabbricati attuati negli ultimi anni, grazie all'utilizzo dei bonus fiscali, si può notare come la gran parte delle risorse sia stata impiegata per interventi di miglioramento dell'efficienza energetica o del decoro complessivo del fabbricato [18]. Di fatto, pochissima attenzione è stata posta sul miglioramento della sicurezza strutturale e sismica, pur trovandoci in un territorio ad elevato rischio sismico.

Sebbene gli interventi di efficientamento energetico comportino indubbi benefici a breve termine apprezzabili a diversi livelli di interesse, da un risparmio immediato in bolletta ad una riduzione significativa della domanda di energia a livello nazionale, i danni osservati a seguito dei recenti eventi sismici (Figura 1.1)



Figura 1.1. Danni provocati dal terremoto del Centro Italia del 2016 a sistemi di isolamento termico installati su edifici esistenti.

hanno evidenziato come tali investimenti sono esposti a forte rischio di perdita nel caso di eventi sismici di medio/alta intensità.

Tali eventi, sono purtroppo frequenti su un territorio ad alto rischio sismico come quello italiano che solo negli ultimi due decenni è stato interessato da cinque eventi con significative perdite economiche e di vite umane. Dunque, una riqualificazione del patrimonio edilizio esistente non può prescindere da considerazioni sulle prestazioni sismiche degli edifici esistenti al fine di migliorarne la sicurezza e ridurre le perdite economiche dirette ed indirette in caso di eventi sismici.

A livello europeo sono stati avviati diversi progetti, al fine di indagare tecniche e metodi che permettessero di dare una risposta concreta al problema, nonché fornire alle istituzioni una base scientifica su cui costruire il proprio quadro normativo. Tra questi, il Progetto Pilota [19] "Tecniche integrate per il miglioramento sismico e l'efficientamento energetico di edifici esistenti", sviluppato dal Joint Research Centre della Commissione Europea, si pone come obiettivo quello di definire strumenti e linee guida per ridurre al tempo stesso la vulnerabilità degli edifici e incrementarne l'efficienza energetica. Le *azioni* necessarie per conseguire questo obiettivo includono la classificazione e analisi delle tecnologie e dei metodi disponibili per il retrofit integrato, la valutazione dell'impatto di strategie di intervento sulle varie regioni europee al variare di rischio sismico, condizioni climatiche e aspetti socioeconomici, e il coinvolgimento di potenziali stakeholder appartenenti ai settori dell'industria, della ricerca, del policy making e la popolazione in generale.

A livello nazionale, la collaborazione tra la Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (ReLUIS) e il Dipartimento di Protezione Civile (DPC) ha permesso lo sviluppo di un progetto di ricerca finalizzato ad indagare le strategie di intervento su strutture esistente. Lo studio, che coinvolge 42 unità di ricerca da tutto il territorio nazionale, costituisce il Work Package 5 del più ampio progetto DPC-ReLUIS, finanziato dal Dipartimento di Protezione Civile. L'obiettivo è quello di sviluppare strumenti operativi e linee guida, che abbiano lo scopo di favorire l'implementazione di strategie sostenibili ed integrate per la mitigazione del rischio sismico e l'efficientamento energetico del patrimonio edilizio esistente, in un contesto in cui gli interventi per l'efficientamento energetico assumono un ruolo trainante. Sono state, quindi, proposte soluzioni integrate e sostenibili con particolare attenzione agli interventi integrati di rapida esecuzione, al fine di minimizzare tempi e costi di applicazione e promuoverne l'utilizzo a larga scala come strategia nazionale di riduzione del rischio sismico del costruito, di riduzione dei consumi energetici e di sostenibilità del costruito. Il progetto ha quindi una forte vocazione applicativa e si propone di fornire indicazioni

operative a professionisti ed amministrazioni impegnati nel miglioramento del patrimonio edilizio esistente.

I quattro task in cui si articola il WP sono:

- **Task 5.1** Interventi integrati e sostenibili per la riqualificazione di edifici esistenti;
- **Task 5.2** Metodi di valutazione integrati;
- **Task 5.3** Interventi su edifici vincolati, monumentali e chiese;
- **Task 5.4** Interventi di miglioramento e adeguamento di ponti esistenti.

Il presente volume raccoglie e presenta i principali risultati ottenuti nell'ambito di questo progetto, focalizzandosi sull'applicazione a edifici di tipologia strutturale ordinaria (ovvero sui task 5.1 e 5.2). Nel *Capitolo 1* è presentato l'ambito in cui si colloca il tema degli interventi integrati, con riferimenti particolari agli aspetti economici e tecnologici. Nel *Capitolo 2* sono introdotti i casi studio oggetto di indagine, di cui si riporta una breve descrizione e le modalità con cui sono stati selezionati. Per gli stessi casi studio viene presentata in *Appendice* una scheda di sintesi, che rimanda alle relazioni di dettaglio pubblicate on-line sul sito ReLUIS. Nel *Capitolo 3* vengono esposte alcune considerazioni relative agli interventi, sia locali che globali e con livelli crescenti di invasività, che possono essere applicati agli edifici ordinari al fine di migliorarne le prestazioni sismiche ed energetiche. Infine, nel *Capitolo 4* sono presentati i metodi adottati per la valutazione di vulnerabilità sismica ed efficienza energetica dei casi studio nello stato di fatto (configurazione *as-built*) e al variare delle soluzioni di intervento proposte.

1.1. Politiche fiscali, incentivi e loro effetti

Al fine di incentivare il rinnovo del patrimonio edilizio esistente, il governo italiano ha introdotto nel 2020 l'agevolazione fiscale del *Superbonus*, disciplinata dall'articolo 119 del decreto-legge n. 34/2020 [20]. Il provvedimento consiste in una detrazione sulle spese sostenute per la realizzazione di specifici interventi finalizzati all'efficientamento energetico e al consolidamento statico o alla riduzione del rischio sismico degli edifici. L'agevolazione si affianca alle detrazioni spettanti per gli interventi di riqualificazione energetica degli edifici (*Ecobonus*) e per quelli di recupero del patrimonio edilizio, inclusi quelli antisismici (*Sismabonus*).

I dati nazionali e regionali relativi all'utilizzo del *Superbonus* pubblicati dall'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) mostrano che il numero di interventi (asseverazioni depositate) che hanno usufruito dell'agevolazione ammonta a 495.717, di cui oltre il

95% già realizzati, per un totale di investimenti ammessi a detrazione pari a circa 117,8 miliardi di euro (dati aggiornati al 31 maggio 2024) [18]. Stando ai dati disponibili sul Portale Nazionale delle Classificazioni Sismiche (PNCS) [21], nel biennio 2022-23 gli interventi realizzati che hanno usufruito del *Sismabonus*, finalizzati, quindi, al solo rafforzamento sismico degli edifici, sono 763 il cui costo totale è di circa 278 milioni di euro. Si specifica che ad oggi non sussistono obblighi normativi per il conferimento al Portale Nazionale delle Classificazioni Sismiche dell'asseverazione. Ne deriva che il numero di interventi conferiti nel portale non rappresenta la totalità di quelli eseguiti in Italia. I dati relativi a questi interventi, suddivisi per regione, zona sismica, tecnica costruttiva del fabbricato e tipo di intervento (rinforzo, ripristino, ricostruzione), sono disponibili sul portale.

1.2. Interventi integrati e sostenibili

La necessità di riqualificare il patrimonio edilizio esistente italiano e le opportunità fornite dalle attuali politiche di incentivazione della riduzione dei consumi energetici rappresentano una occasione importante per migliorare le prestazioni del costruito. Guardando al contesto precedentemente descritto, appare evidente come si debba propendere verso soluzioni che guardino alla problematica del miglioramento delle prestazioni degli edifici esistenti a tutto tondo, senza tralasciare nessuna delle variabili in gioco. Volendo ricercare tra i fattori che hanno contribuito a far propendere la maggior parte degli utenti verso interventi di riqualificazione energetica piuttosto che verso quelli di rinforzo sismico, e tralasciando l'ovvio aspetto relativo al risparmio diretto in bolletta conseguente agli interventi di riqualificazione energetica, l'invasività dell'intervento assume sicuramente un ruolo determinante. Di fatto, per quanto le tecnologie abbiano fatto grandi progressi negli ultimi anni, gli interventi di rinforzo sismico sono ancora percepiti come interventi invasivi in cui si va a perdere in pienamente, o in parte, la funzionalità dell'opera per un periodo di tempo significativo. Questo aspetto, in un contesto ordinario non-emergenziale in cui l'edificio è in uso al momento della scelta della tipologia di intervento, tende a scoraggiare fortemente la messa in atto di interventi che comportino anche minimamente la perdita di funzionalità dell'opera. Da qui la motivazione di intraprendere la ricerca e lo sviluppo di nuove tecniche di intervento integrate che, con diversi livelli di invasività e di prestazioni, tendano a migliorare contemporaneamente le prestazioni strutturali, le prestazioni energetiche, il decoro e la funzionalità dell'opera.

La metodologia qui proposta mira a implementare una strategia di retrofit incrementale a livello di invasività crescente che integri interventi strutturali ed energetici. È necessario tener conto che nell'ottica degli interventi integrati, sono da considerarsi fattibili solo quelle combinazioni di interventi che sono reciprocamente compatibili. Nello specifico, bisogna rispettare la condizione che entrambi i tipi di interventi (strutturale ed energetico) debbano essere applicati alla medesima scala dimensionale dell'edificio (involucro esterno, involucro interno, edificio nell'intero complesso), prevedere lo stesso livello di invasività e le stesse tempistiche di esecuzione. Inoltre, al fine di evitare di aumentare il valore economico esposto e suscettibile di danneggiamento a seguito di eventi sismici anche di moderata intensità, è opportuno che l'incremento del valore dei componenti che garantiscano una maggiore efficienza energetica sia affiancato da interventi strutturali che prevedano un pari aumento di sicurezza e prestazioni globali del sistema strutturale, al fine di garantire, oltre che la sicurezza degli occupanti, anche la protezione dei contenuti. Quest'ultimo aspetto è di fondamentale importanza al fine di evitare di attuare interventi integrati di invasività diverse; si potrebbe incorrere nell'errore, ad esempio, di effettuare interventi energetici più efficienti ed invasivi rispetto a quelli strutturali, andando così ad aumentare il valore esposto con conseguente rischio di maggiori perdite in caso di evento sismico. La definizione di interventi di livello incrementale nasce dalla scelta di voler fornire soluzioni di intervento a costi, tempi di esecuzione ed invasività crescenti che contemplino sia soluzioni di minimo impatto, da attuarsi nel caso si abbiano a disposizione un budget limitato o vincoli temporali molto stretti per l'implementazione degli interventi, che soluzioni altamente performanti che di contro prevedono costi e tempi più lunghi. In tutti i casi, nella definizione degli interventi e nell'implementazione ai casi studio selezionati devono essere rispettati i requisiti di sicurezza e le procedure previste dalle vigenti norme tecniche per le costruzioni NTC 2018 [2]. In particolare, la quantificazione dell'efficacia degli interventi fa riferimento a due indici di prestazione:

– ζ_E: indice di sicurezza allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV), per ciò che riguarda gli interventi di rinforzo sismico, che rappresenta il rapporto tra PGA_C e la PGA_D ossia il rapporto tra l'intensità delle azioni sismiche corrispondenti alla capacità resistente dell'edificio e la domanda definita dalla norma. La quantificazione dell'efficacia degli interventi deve essere fatta in relazione ad altri stati limite individuati in base dalla classe d'uso dell'opera.
– *PEC*: consumo totale di energia primaria, relativo al retrofit energetico, misurato in [kWh/m^{2}y].

Prendendo come riferimento la classificazione degli interventi proposta dalle norme tecniche per le costruzioni NTC 2018 [2], si possono distinguere tre categorie di interventi:

- **Interventi di riparazione o locali:** si intendono quegli interventi che riguardano singole parti e/o elementi della struttura e che non riducono le condizioni di sicurezza preesistenti. Questi interventi non devono modificare in maniera significativa il comportamento globale della costruzione;
- **Interventi di miglioramento:** si intendono quegli interventi atti ad aumentare la sicurezza strutturale preesistente, senza necessariamente raggiungere i livelli di sicurezza dell'adeguamento. Sono interventi che possono prevedere modifiche significative del comportamento della struttura nel suo insieme o in parti di essa;
- **Interventi di adeguamento:** si intendono quegli interventi atti ad aumentare la sicurezza strutturale preesistente, conseguendo i livelli di sicurezza specifici e fissati dalle norme in funzione della tipologia di intervento e della destinazione d'uso della costruzione. Anche questi sono interventi che possono prevedere modifiche significative del comportamento della struttura nel suo insieme o in parti di essa.

In generale, in relazione al livello di applicazione e al grado di invasività degli interventi proposti, si possono distinguere gli interventi di retrofit in due macro-categorie:

- **Interventi locali:** che comprendono quegli interventi strutturali eseguiti su singole parti e/o elementi della struttura, finalizzati ad aumentarne la resistenza, o la capacità deformativa, o a eliminare possibili crisi fragili;
- **Interventi globali:** che comprendono quegli interventi che prevedono una modifica significativa del comportamento strutturale, ad esempio attraverso l'inserimento di elementi aggiuntivi (sistemi o pareti di controvento, esoscheletri, ecc.) o elementi finalizzati alla riduzione della domanda (ad esempio sistemi di isolamento e/o dissipatori) al fine di raggiungere delle prestazioni molto elevate. Tali interventi spesso sono accompagnati anche dall'esecuzione di interventi locali su alcuni elementi. Di contro tali interventi richiedono un significativo grado di invasività e tempi di realizzazione più lunghi.

In alcuni casi gli interventi, sia locali (ad esempio in alcune tipologie di intervento sui nodi) che globali (ad esempio in alcune applicazioni di esoscheletri), possono essere eseguiti operando solo dall'esterno, mentre in alcuni altri casi, anche per le stesse tipologie di interventi appena menzionate, è necessario operare sia dall'interno che dall'esterno. In questo lavoro queste due condizioni di inter-

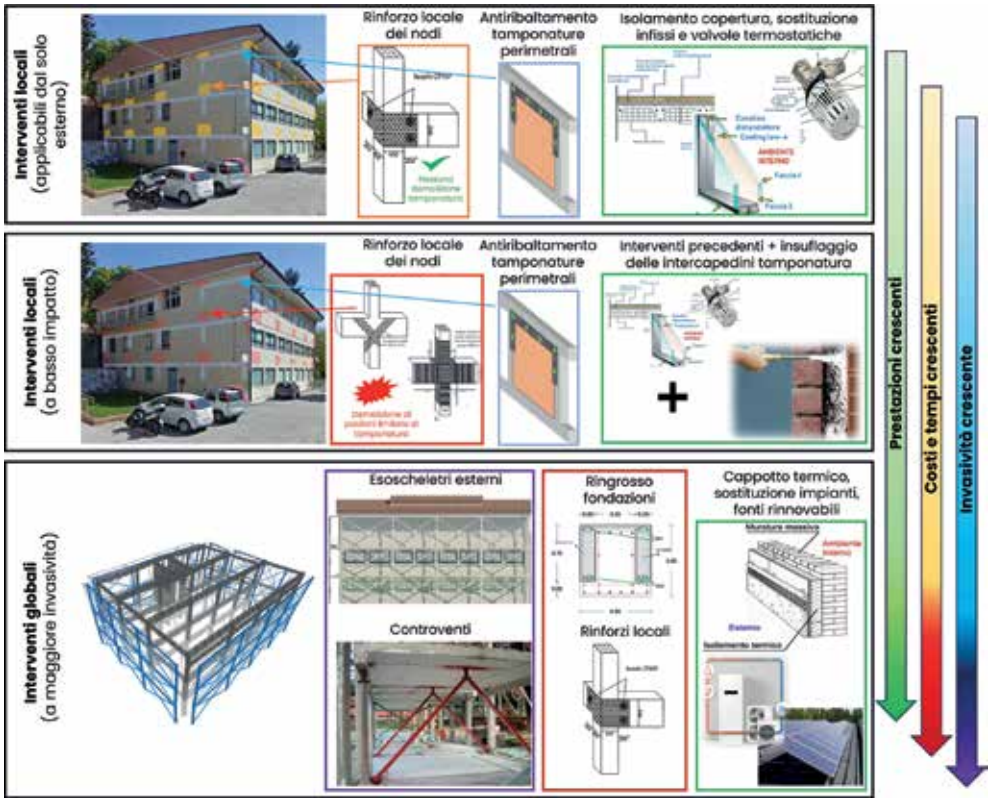


Figura 1.2. Esempi di interventi integrati per i casi studio descritti in questo volume.

vento sono state individuate, e segnalati i tempi di realizzazione ridotti quando possibili anche per interventi eseguiti dall'interno.

A titolo di esempio, in Figura 1.2 è riportata una proposta di interventi integrati per uno degli edifici casi studio in cemento armato successivamente descritti. Sono state individuate tre diverse possibili strategie di intervento distinte l'una dall'altra per livello di invasività e tempistiche di esecuzione. Nello specifico gli interventi incrementali proposti prevedono un incremento dell'indice di sicurezza sismico ed un decremento dei consumi energetici a fronte di una crescente invasività dell'intervento.

2.
Casi studio

Elisa Saler, Ciro Del Vecchio

L'approccio adottato all'interno del progetto di ricerca per la definizione degli interventi si basa sull'analisi di casi studio. Ciò ha permesso di interfacciarsi, nella scelta e nella progettazione degli interventi, con problematiche reali ed elementi di complessità specifici di edifici esistenti pubblici e privati, ad uso scolastico, uffici, residenziale ed industriale. L'obiettivo è quello di riuscire a considerare, nel modo più realistico possibile, peculiarità tipiche di edifici differenti che influenzano la scelta dell'intervento ed i relativi costi e tempi di esecuzione. L'approccio con cui saranno analizzati tali casi studio è quello tipico di un progettista considerando diverse soluzioni di intervento possibili, incluse quelle che prevedono tecniche di intervento innovative e di recente sviluppo.

A tal fine, la selezione dei casi studio è stata orientata a cercare di coprire diverse tipologie di interesse e tipiche del patrimonio edilizio italiano, con sistemi strutturali costituiti da materiali diversi (muratura, cemento armato, acciaio). Sono stati analizzati diversi database, andando a scegliere gli edifici per cui risultavano disponibili gli elaborati progettuali originali, un rilievo dello stato di fatto, nonché i dettagli costruttivi e le proprietà dei materiali in-situ. Come risultato, il set di casi studio analizzato include quattro edifici in calcestruzzo armato (c.a.), due edifici in carpenteria metallica e sei edifici in muratura.

Dal punto di vista delle destinazioni d'uso i casi studio presentati offrono una buona copertura delle possibili casistiche, includendo:

– quattro casi di edifici residenziali (due in muratura e due in c.a.);
– quattro edifici scolastici (due in muratura e due in c.a.);
– due edifici pubblici di carattere strategico (uno in muratura e uno in acciaio);
– un edificio soggetto ad affollamenti rilevanti (in muratura);
– un edificio industriale in acciaio.

Di seguito, in Figura 2.1 sono illustrati i casi studio in calcestruzzo armato inclusi nel progetto, in Figura 2.2 sono riportati i casi studio in carpenteria me-



Figura 2.1. Edifici in calcestruzzo armato selezionati come casi studio.



Figura 2.2. Edifici in carpenteria metallica selezionati come casi studio.



Figura 2.3. Edifici in muratura portante selezionati come casi studio.

tallica, mentre in Figura 2.3 sono riportati gli edifici in muratura portante analizzati come casi studio.

Le informazioni relative a ciascun caso studio sono sintetizzate nelle schede riportate in Appendice del presente volume. I dettagli costruttivi, la geometria e le proprietà dei materiali unitamente al dettaglio delle analisi svolte per la valutazione delle prestazioni sismiche e al progetto degli interventi per ciascun edificio sono riportati nei report specifici, pubblicati sul sito del Consorzio ReLUIS. Si specifica che onde evitare l'identificazione dei fabbricati oggetto di studio sono stati omessi i dati relativi alla localizzazione dei fabbricati. Inoltre, in questa prima fase del progetto, si sono selezionati tutti casi studio di edifici isolati (tranne un complesso residenziale a schiera, analizzato comunque nella sua interezza), lasciando ad un secondo momento le ulteriori complessità derivanti dall'analisi e dall'intervento su edifici in aggregato.

I computi metrici sono stati redatti considerando l'elenco prezzi della regione di appartenenza secondo quanto specificato nelle note di ogni appendice. La redazione dei progetti e dei relativi computi si è estesa per tutta la durata del progetto dal 2019 al 2024, incorporando necessariamente la variabilità di prezzi di mercato dei materiali da costruzione e delle lavorazioni. I costi degli interventi presenti in appendice potranno essere attualizzati mediante la valutazione dell'incremento dei prezzi come previsto dai prezzari regionali e dai documenti tecnici e amministrativi di riferimento.

Elenco dei casi studio analizzati:

- Caso studio 1: edificio scolastico in cemento armato sito in provincia di Teramo;
- Caso studio 2: edificio scolastico in cemento armato sito in provincia di Macerata;
- Caso studio 3: edificio residenziale in cemento armato sito in provincia di Brescia;
- Caso studio 4: edificio residenziale in cemento armato sito in provincia di Torino;
- Caso studio 5: edificio ad uso pubblico strategico in acciaio sito a Napoli;
- Caso studio 6: edificio industriale in acciaio sito in provincia di Avellino;
- Caso studio 7: edificio ad uso pubblico in muratura in provincia di Ancona;
- Caso studio 8: edificio scolastico in muratura in provincia di Macerata;
- Caso studio 9: edificio ad uso pubblico in muratura in provincia di Trento;
- Caso studio 10: edificio scolastico in muratura in provincia di Macerata;
- Caso studio 11: edificio residenziale in muratura in provincia di Bergamo;
- Caso studio 12: edificio residenziale in muratura in provincia di Macerata.

3.
Temi emergenti dall'applicazione ai casi studio

A valle della progettazione delle diverse proposte di intervento per il miglioramento delle prestazioni dei casi studio selezionati, sono emersi alcuni temi di particolare rilevanza e che necessitano di approfondimento. Sono descritti in maniera sintetiche nei seguenti paragrafi. Si specifica che i criteri di scelta, la progettazione di dettaglio degli interventi, gli elaborati progettuali, i dettagli costruttivi unitamente ai costi di esecuzione ed i relativi tempi sono riportati nei relativi report disponibili sul sito ReLUIS. Una sintesi delle prestazioni iniziali dell'edificio oggetto di caso studio, delle prestazioni sismiche ed energetiche a seguito dell'intervento ed i relativi costi e tempi d'esecuzione sono riportati nelle schede di sintesi in appendice.

3.1. Interventi locali su nodi in c.a. e rinforzo delle tamponature

Andrea Prota, Ciro Del Vecchio

Negli ultimi anni gli interventi locali hanno rivestito un ruolo rilevante nel rinforzo sismico di edifici esistenti, rappresentando una delle soluzioni maggiormente impiegate dai progettisti. Ciò è da attribuire alla loro versatilità, alla bassa invasività ed al contenuto livello di disturbo agli occupanti collegato alla loro messa in opera. Tutto questo ha contribuito a far crescere l'interesse della comunità scientifica e professionale nei confronti di questa tipologia di interventi, portando allo sviluppo di nuove soluzioni di rinforzo [22, 23] e ad approfondire lo studio del loro contributo in termini di incremento della sicurezza sismica dell'intero fabbricato [24]. Nel contesto normativo italiano, che nell'ultimo decennio ha visto il passaggio dalla prima versione delle NTC del 2008 [25] alla nuova versione del 2018 [2] e l'introduzione delle linee guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni [26], si è tenuto in conto del crescente interesse verso questa tipologia di interventi. Nello specifico, gli interventi locali rappresentano la prima categoria di intervento menzionata dalle vigenti norme tecniche che, ri-

spetto alla versione precedente, ne chiariscono meglio caratteristiche e finalità. Essi vengono definiti come «*interventi che interessino singoli elementi strutturali e che, comunque, non riducano le condizioni di sicurezza preesistenti. Essi non debbono cambiare significativamente il comportamento globale della costruzione*» (ovvero non alterare significativamente massa e rigidezza del sistema strutturale) «*e sono volti a migliorare le caratteristiche di resistenza e/o di duttilità di elementi o parti, anche non danneggiati, ed impedire meccanismi di collasso locale*». Inoltre, nelle linee guida per la classificazione del rischio sismico è prevista la possibilità di ritenere valido il passaggio alla Classe di Rischio immediatamente superiore, eseguendo solamente interventi locali di rafforzamento, che, con riferimento agli edifici in cemento armato consistono in: confinamento di tutti i nodi perimetrali non confinati dell'edificio; opere volte a scongiurare il ribaltamento delle tamponature, compiute su tutte le tamponature perimetrali presenti sulle facciate; eventuali opere di ripristino delle zone danneggiate e/o degradate.

Diverse sono le tecniche di rinforzo che permettono di perseguire tali obiettivi. Citandone solo alcuni, allo scopo di esempio, ci sono interventi basati sull'impiego di materiali compositi del tipo FRP o FRCM, nastri in acciaio pretesi, classici placcaggi con profili metallici o innovative piastre metalliche dissipative. La loro diffusione dipende, ovviamente, dalla facilità di messa in opera, dalla reperibilità sul mercato e dal relativo costo, dalla disponibilità di chiari approcci progettuali e di manuali applicativi che riportino i dettagli costruttivi necessari alla corretta posa in opera. A tal riguardo, il consorzio ReLUIS ha pubblicato nel 2011 le *Linee guida per la riparazione ed il rafforzamento di elementi strutturali, tamponatura e partizioni* [27] aventi il fine di supportare i progettisti impegnati nella ricostruzione post-sisma di L'Aquila del 2009 nella definizione degli interventi su edifici esistenti. Questo documento, di riferimento per la comunità professionale, illustra le soluzioni di rinforzo locale disponibili all'epoca, dettagliandone le modalità applicative, gli approcci progettuali ed i particolari costruttivi. Le soluzioni di intervento locale proposte (confinamento dei nodi perimetrali con FRP, CAM, placcaggi metallici), unitamente all'installazione di presidi anti-ribaltamento per le tamponature perimetrali, sono state tra le tecniche maggiormente impiegate nella ricostruzione post-sisma [28], dimostrando la fattibilità di un impiego a larga scala con tempi e disturbi agli occupanti ragionevoli.

Vale la pena sottolineare che il contesto di una ricostruzione post-sisma, caratterizzato da edifici completamente o in gran parte non occupati, per quanto abbia fornito dati ed informazioni utili circa i tempi ed i costi di soluzioni di rinforzo, non può essere preso come riferimento per valutare l'applicabilità di strategie di mitigazione del rischio sismico a grande scala in tempo di pace. Di fatto,

analizzando i dati ottenuti dal monitoraggio degli interventi effettuati nei primi anni dell'entrata in vigore dei bonus fiscali per la riqualificazione sismica ed energetica degli edifici esistenti, si può osservare come si sia spesso optato per il solo efficientamento energetico del fabbricato [18, 29] in quanto garantiva, nella maggior parte dei casi, una bassa invasività con interventi attuabili operando prevalentemente dal solo esterno.

Da qui la necessità di sviluppare ulteriormente le soluzioni di intervento locale al fine di renderle, senza minarne l'efficacia, applicabili con minimo disturbo per gli occupanti e, nei casi in cui è possibile, anche operando dal solo esterno (Figura 3.1). Ciò ha portato allo sviluppo di nuove soluzioni di intervento locale basate sull'impiego di FRP, placcaggi metallici, nastri metallici pretesi o piastre metalliche dissipative, validate attraverso campagne sperimentali [23, 30-32] ed analisi numeriche [33].

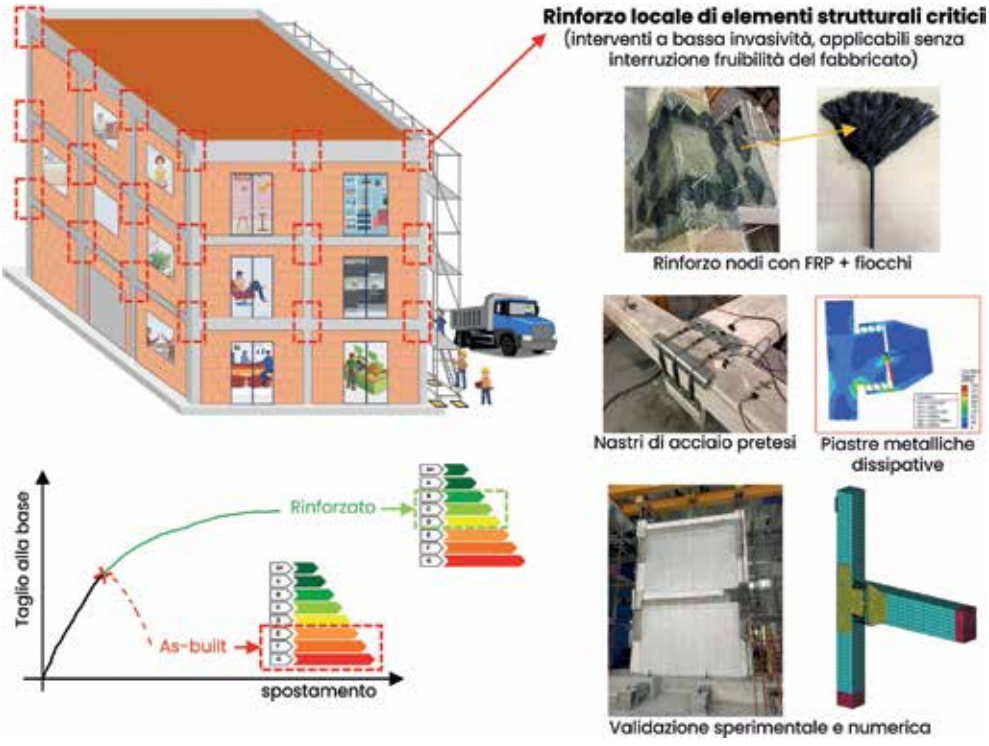


Figura 3.1. Interventi locali a basso impatto.

L'osservazione dei danni subiti dagli edifici in cemento armato a seguito dei recenti eventi sismici e l'analisi delle relative perdite economiche hanno evidenziato come sia necessario proteggere le tamponature da possibili danneggiamenti prematuri collegati ai meccanismi di ribaltamento da primo modo. In tale ottica gli interventi di rinforzo locale, affinché portino ad un significativo incremento delle prestazioni globali, devono interessare anche le tamponature perimetrali. Il ribaltamento verso l'esterno può essere impedito attraverso l'impiego di materiali compositi di tipo FRCM, combinati o meno con ancoraggi meccanici in acciaio o FRP. Le diverse soluzioni vanno dal rinforzo del perimetro della tamponatura a quelle, ulteriormente migliorate, diffuse sulla superficie esterna del tamponamento ed eventualmente integrate con l'isolamento termico [33].

3.1.1. Ambiti di applicabilità

L'impiego prevalente di questa tipologia di interventi è indicato per gli edifici in cemento armato che presentano debolezze strutturali derivanti da meccanismi locali o premature crisi fragili localizzate a livello di singoli elementi strutturali e collegate a carenze di armatura o dettagli costruttivi non conformi alle attuali normative sismiche. In particolare, gli interventi dovranno riguardare quegli elementi strutturali e non-strutturali il cui danneggiamento può compromettere significativamente la risposta globale del fabbricato e determinarne la parziale o totale inagibilità o il collasso.

Tra le debolezze strutturali più diffuse è possibile citare: la crisi a taglio dei nodi trave-pilastro, crisi a taglio dell'estremità superiore dei pilastri per scorrimento sulla ripresa di getto o per effetto dell'azione trasmessa dalla tamponatura; rottura a taglio alle estremità delle travi; rottura a taglio di pilastri tozzi presenti nel vano scala o in corrispondenza delle finestrature a nastro; carenza di duttilità dei pilastri. Nello specifico le crisi a taglio dei pannelli nodali o per effetto della spinta delle tamponature si concentrano sugli elementi perimetrali per la mancanza di confinamento derivante dalla presenza di altri elementi strutturali o non-strutturali, per cui intervenire su tali elementi può avvenire dal solo esterno o, comunque, con bassi livelli di invasività.

Essendo l'obbiettivo principale quello di incrementare la capacità dell'elemento critico nei confronti delle rotture di tipo fragile che ne limitano la capacità strutturale, soprattutto in termini di duttilità, resta l'obbligo di redazione di un elaborato progettuale che dimostri «*l'incremento del livello di sicurezza locale. Il progetto e la valutazione della sicurezza potranno essere riferiti alle sole parti e/o elementi interessati,*

documentando le carenze strutturali riscontrate e dimostrando che, rispetto alla configurazione precedente al danno, al degrado o alla variante, non vengano prodotte sostanziali modifiche al comportamento delle altre parti e della struttura nel suo insieme e che gli interventi non comportino una riduzione dei livelli di sicurezza preesistenti» [2].

Le indicazioni progettuali sono riportate nelle vigenti norme tecniche [2], [34] o in documenti di comprovata validità. A tal riguardo è possibile citare le linee guida CNR per la progettazione ed il controllo di interventi con FRP [35], le linee guida ReLUIS [27] ed il nuovo fib bulletin 90 [36].

Senza entrare nel dettaglio degli approcci progettuali per interventi di rinforzo, già ampiamente discussi nei suddetti documenti, l'impiego di soluzioni applicabili dal solo esterno, ad esempio per il rinforzo di nodi travi-pilastro (che rappresentano, in molti casi, gli elementi più vulnerabili degli edifici esistenti in c.a.) rende necessario l'impiego di ulteriori approcci progettuali per la definizione di dettagli costruttivi prima non necessari. Tali approcci sono dettagliati nei report completi dei casi studio allegati al presente volume.

3.1.2. Vantaggi e svantaggi

I principali vantaggi consistono in una bassa invasività, costi e tempi di intervento contenuti. In molti casi interessano porzioni limitate del sistema strutturale, spesso sono applicabili solo dall'esterno. Studi sperimentali e numerici hanno dimostrato come risolvendo le crisi fragili si possa incrementare significativamente il livello di sicurezza globale dell'intero sistema strutturale. La progettazione di tali interventi non richiede analisi globali di valutazione della vulnerabilità sismica dell'intero sistema strutturale. L'attribuzione dell'incremento di una classe di rischio sismico attraverso il metodo semplificato è possibile eseguendo interventi di confinamento su tutti i nodi perimetrali non confinati della struttura, soltanto se la struttura è stata originariamente concepita con la presenza di telai in entrambe le direzioni ed effettuando contestualmente opere volte a scongiurare il ribaltamento delle tamponature perimetrali.

Tali interventi possono ritardare l'attingimento della capacità ultima, ma non modificare il meccanismo di collasso. Non incrementano la rigidezza del sistema strutturale e quindi non riescono a ridurre la domanda di spostamento. Di conseguenza non limitano i danni alle componenti non-strutturali. A tal fine è opportuno ricorrere ad interventi atti a contrastare il ribaltamento di tutte le tamponature perimetrali presenti, che si possono ben integrare con interventi di efficientamento energetico dell'involucro.

3.2. Interventi locali sui collegamenti e rinforzo delle murature

Francesca da Porto, Serena Cattari, Natalino Gattesco, Sergio Lagomarsino, Luigi Sorrentino

La scelta di interventi appropriati per edifici in muratura riveste un importante ruolo nel campo del rinforzo sismico delle strutture esistenti, in quanto questa tipologia edilizia è particolarmente diffusa all'interno del patrimonio costruito nazionale, rappresentando più del 57% dell'edilizia residenziale italiana secondo le fonti [1], e costituendo anche una significativa porzione di edifici pubblici, a destinazione scolastica e/o amministrativa, nonché il tessuto urbano di borghi e centri storici. D'altra parte, queste costruzioni sono state edificate in larga misura prima dell'avvento di qualsiasi normativa tecnica, quindi presentano delle vulnerabilità intrinseche che sono state evidenziate, per edifici in muratura realizzati prima degli anni '80, da tutti i più recenti terremoti [37, 38].

Per ridurre questo stato di potenziale significativa vulnerabilità, le Norme Tecniche per le Costruzioni nelle loro due versioni [2, 25], nonché, nel caso di edifici in muratura vincolati, le Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale [39] propongono un utilizzo sistematico di interventi di tipo locale.

Tale scelta è ulteriormente rafforzata dalle linee guida per la classificazione del rischio sismico [40] le quali nell'ambito del metodo semplificato prevedono il passaggio alla Classe di Rischio immediatamente superiore eseguendo solamente interventi di rinforzo locale, che, con riferimento agli edifici in muratura, consistono principalmente in interventi di stabilizzazione fuori piano delle pareti e di collegamento dei pannelli murari agli orizzontamenti, con l'obiettivo di perseguire quanto più possibile un comportamento d'insieme "scatolare" e di posticipare l'attivazione dei meccanismi locali e/o fuori del piano, rispetto all'attivazione di meccanismi globali. Ovviamente imprescindibili sono il ripristino delle zone danneggiate e/o degradate, la eliminazione delle eventuali spinte orizzontali non contrastate, e la messa in sicurezza di elementi non strutturali.

Questo tipo di interventi discende direttamente dall'osservazione delle modalità di danneggiamento per edifici in muratura, che vede l'attivazione di meccanismi fuori piano (meccanismi di primo modo), quali ribaltamenti e flessioni di porzioni di parete, per valori dell'azione sismica in alcuni casi anche piuttosto modesta, a causa della mancanza di un buon ammorsamento tra pareti ortogonali e dell'assenza di collegamenti tra elementi verticali e orizzontali, o più in generale, dell'assenza o carenza di sistemi di vincolo efficaci a contrastarne lo sviluppo. La realizzazione di ammorsamenti, catene, cerchiature, collega-

menti a livello dei solai e sistemi di cordolatura, possono quindi risultare molto utili in questi casi.

Oltre agli aspetti legati ai collegamenti, un ruolo fondamentale nella risposta sismica degli edifici in muratura è legato alla qualità muraria, che è determinata sia dalle proprietà meccaniche dei materiali costituenti (blocchi e malta) che dalla loro tessitura nello sviluppo dei paramenti murari e nella loro sezione trasversale. Nel caso di assenza di monoliticità e di scarsa qualità dei pannelli murari, le azioni sismiche possono provocare la disgregazione della muratura ancor prima dell'attivazione dei meccanismi di primo modo appena descritti. È per questo motivo, che le sopra citate linee guida per la classificazione del rischio sismico [40] dispongono, nel caso di edifici realizzati con murature di qualità particolarmente scadente (pietrame irregolare o mattoni di terra cruda), che gli interventi di rinforzo locale sopra descritti non siano applicabili da soli.

In questo caso è infatti necessario innanzi tutto garantire la qualità e la monoliticità della muratura, mediante una serie di interventi, che variano a seconda della tipologia muraria e della relativa applicabilità, finalizzati a contrastare la disgregazione muraria, fornendo le condizioni di base affinché si possa effettuare qualsiasi altro tipo di intervento, incluso quello sui collegamenti tra pareti e tra pareti e orizzontamenti, e che spesso possono avere anche l'effetto di incrementare la resistenza, sotto diversi stati di sollecitazione, delle pareti, in particolare di aumentarne la resistenza a taglio.

La resistenza (a compressione e in particolar modo a taglio) della muratura diviene un parametro determinante nella risposta sismica di edifici in muratura, quando, grazie al soddisfacimento del suddetto prerequisito della qualità muraria e alla presenza di buone connessioni tra pareti ortogonali e tra pareti e orizzontamenti, i meccanismi di ribaltamento fuori piano sono inibiti e quindi le pareti manifestano meccanismi resistenti nel piano in cui lo sviluppo delle lesioni (associate a modalità di danno a taglio e/o a pressoflessione) avviene per raggiungimento della resistenza del materiale. Qualora la resistenza nel piano sia insufficiente sono necessari interventi anch'essi variabili a seconda della tipologia muraria.

In presenza, inoltre, di solai e coperture sufficientemente rigidi e ben collegati con gli elementi verticali, gli edifici in muratura raggiungono un comportamento d'insieme riconducibile al funzionamento "scatolare", che garantisce il trasferimento delle azioni orizzontali (azioni inerziali dell'impalcato e delle pareti caricate fuori piano) alle pareti di controvento, resistenti nel proprio piano. Rimandando ad altra sede una descrizione più dettagliata del comportamento sismico dell'edificio, questo meccanismo di tipo globale porta ad un più razio-

nale sfruttamento delle resistenze nel piano delle pareti, che risultano, quindi, ancora di fondamentale importanza. Inoltre, anche a danneggiamento nel piano avvenuto, si conserva una capacità portante nei confronti dei carichi di gravità, capacità che viene invece meno nel caso dei meccanismi di ribaltamento. Affinché i diaframmi di piano soddisfino le condizioni appena espresse, si possono applicare una serie di tecniche di intervento, approfondite al paragrafo 3.4 del presente volume. Qui si sottolinea solo che l'esecuzione di interventi invasivi, quali la sostituzione di solai flessibili e leggeri con solai pesanti di calcestruzzo armato, spesso non è risolutiva, e anzi può essere fortemente peggiorativa, stante l'incremento delle masse e l'introduzione di significative eccentricità dei carichi verticali sulle pareti.

Come nel caso di edifici di altre tipologie strutturali, anche nel caso di edifici in muratura la vulnerabilità può essere influenzata da fattori quali la geometria e l'organizzazione strutturale dell'edificio, la regolarità in pianta e in elevazione, lo stato di manutenzione. Inoltre, spesso gli edifici in muratura si trovano all'interno di un tessuto urbano storico, formato da aggregati costituiti da unità strutturali adiacenti. In questo caso si attivano vulnerabilità specifiche, derivanti dalla presenza di unità strutturali adiacenti tra loro e caratterizzate da irregolarità plano-altimetriche, dalla presenza di solai sfalsati, dal possibile innesco di fenomeni di martellamento e da mancati ammorsamenti tra pareti. Questi effetti non sono trascurabili, ma una loro descrizione dettagliata esula da questa trattazione, che si riferisce ad interventi applicabili in generale su edifici in muratura.

Nella scelta della tipologia di intervento da eseguire, è importante prestare attenzione all'invasività delle tecniche e alla compatibilità con la struttura iniziale, limitando il più possibile alterazioni significative degli elementi originali – struttura [41] e materiali [42]. Tale principio non vale solo per aspetti di conservazione legati alle costruzioni di particolare pregio storico-architettonico [43], ma ha una valenza generale, implicando una maggiore compatibilità con i materiali e con il comportamento strutturale originario dell'edificio e portando spesso a soluzioni più efficaci [44]. All'interno di questo approccio, è possibile intervenire utilizzando sia metodologie tradizionali, sia tecniche innovative e materiali avanzati [45].

Infine, va ricordato che le modalità di danneggiamento degli edifici in muratura portante sono strettamente legate ai fattori di vulnerabilità specifici che li caratterizzano; per questo motivo la conoscenza dell'edificio (in termini di fasi storico-costruttive, di elementi strutturali e materiali che lo compongono, di stato di conservazione e/o danneggiamento attuale, ecc.), ancor più che in altre tipologie strutturali, è di fondamentale importanza per una corretta progettazione degli interventi.

Nei seguenti capitoli verranno inoltre fornite alcune indicazioni in ottica di combinare il miglioramento sismico con il retrofit energetico dell'edificio. In alcuni casi gli interventi per il miglioramento sismico si basano su materiali (acciaio, calcestruzzo armato) caratterizzati da conducibilità termica maggiore rispetto a quella della muratura, quindi, per applicazioni estese, va valutato l'eventuale effetto di ponte termico. Sempre nel contesto dell'integrazione degli interventi, possono essere considerati una serie di interventi a livello dei sistemi impiantistici che permettono di ridurre la domanda di energia, combinabili a qualsiasi intervento strutturale, come sostituzione di caldaie, e/o installazione di pannelli solari e fotovoltaici, nonché sistemi geotermici [46].

3.2.1. Interventi sui collegamenti: applicabilità, vantaggi e svantaggi

La mancanza di connessioni tra pareti ortogonali e tra pareti e orizzontamenti può essere ovviata mediante interventi locali. Il ripristino del comportamento monolitico della parete, se non già garantito, va effettuato con alcune delle tecniche presentate nel successivo paragrafo, ed è condizione necessaria affinché tali interventi siano efficaci.

Un buon collegamento tra pareti ortogonali, per favorire un comportamento scatolare della struttura, può essere garantito tramite l'inserimento di catene metalliche (Figura 3.3a), o di altri materiali, a livello degli impalcati. I tiranti vengono posti in corrispondenza dei maschi murari, in entrambe le direzioni del fabbricato e in numero adeguato, al fine di contrastare i meccanismi fuori piano [47-49]. Tale tipo d'intervento è ancora più essenziale nel caso in cui siano presenti delle volte, in quanto permette di eliminarne le spinte. Nel caso di inserimento di catene metalliche, va prestata attenzione alla qualità muraria: se scadente, potrebbero verificarsi rotture locali in corrispondenza del capochiave, inficiando così l'intervento. Un possibile limite all'applicabilità dell'intervento è dato da aspetti funzionali, in particolare nei sottotetti, dove la quota di inserimento dei tiranti potrebbe essere incompatibile con l'uso degli ambienti e la muratura di capochiave potrebbe essere troppo poco caricata per offrire un'adeguata resistenza al punzonamento.

Anche le cerchiature metalliche o con materiali fibrorinforzati hanno lo scopo di inibire l'attivazione di cinematismi fuori piano migliorando i collegamenti tra elementi strutturali [41]. Questa tecnica si può applicare in edifici in cui i cordoli in calcestruzzo non sono presenti oppure non sono adeguatamente armati [50]. È necessario evitare l'insorgere di concentrazioni di tensioni in corrispondenza degli spigoli delle murature, così come una eccessiva deformabilità di tratti mol-

to lunghi mediante collegamenti trasversali. Le cerchiature in materiale composito possono essere realizzate in corrispondenza delle cornici marcapiano e, pur non essendo dotate di caratteristiche di efficienza energetica, sono facilmente integrabili con interventi di rivestimento a cappotto (Figura 3.2).

Alternativamente si può prevedere l'inserimento di cordoli realizzati in calcestruzzo armato, muratura armata, legno o in acciaio al fine di incrementare la connessione tra pareti ortogonali e tra pareti e orizzontamenti. Per quanto riguarda in particolare i cordoli in calcestruzzo armato, stante l'invasività delle operazioni di esecuzione in breccia ai piani intermedi, questi risultano di fatto realizzabili solo in sommità alle pareti murarie, avendo cura di non sovradimensionarli, per evitare un eccessivo peso e una rigidezza incompatibile con quella della muratura stessa; inoltre, l'utilizzo di connessioni per evitare lo scivolamento del cordolo sulla muratura, non sempre è necessario, spesso risulta non efficace e può danneggiare la muratura, quando questa è di cattiva qualità (l'attrito che si sviluppa all'interfaccia tra cordolo e cimasa muraria è in genere sufficiente, se si evitano eccessive disomogeneità di rigidezza tra i due elementi). Anche nel caso di cordoli in muratura armata, l'esecuzione è semplice solo per realizzazioni all'ultimo livello, in concomitanza al rifacimento della copertura. L'inserimento di cordolature lignee o metalliche, oltre a non comportare un incremento significativo di peso, può essere facilmente realizzato ad ogni livello del fabbricato, operando con elementi accostati alla muratura e tra loro collegati trasversalmente attraverso

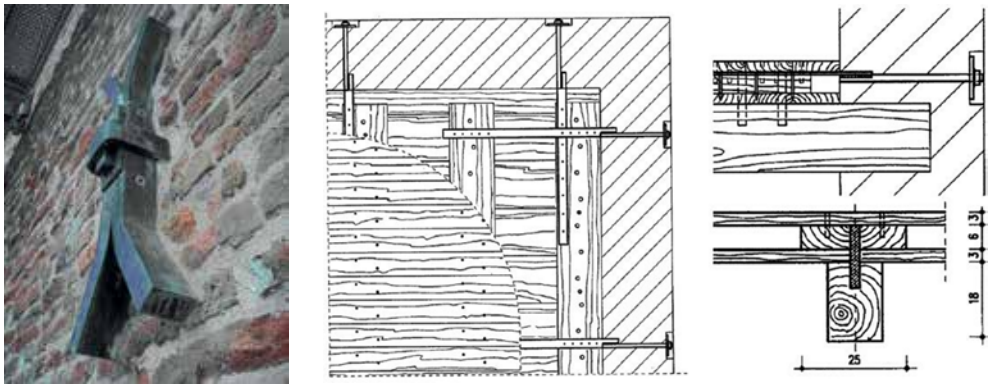


Figura 3.2. Intervento integrato di cerchiatura con materiali fibrorinforzati e cappotto.

la muratura (l'uso di connettori passivi con la muratura, in presenza di elementi accostati solo su un lato, è per quanto possibile da evitarsi). L'intervento deve in ogni caso essere associato alla presenza di muratura di buona qualità, oppure – nel caso questo prerequisito sia assente – sia abbinato ad altre tecniche volte innanzi tutto al miglioramento delle caratteristiche murarie.

Al fine di migliorare il comportamento fuori piano e la redistribuzione dei carichi nel piano delle pareti, in caso di solai in legno, si possono inserire degli ancoraggi (Figura 3.3b) dotati di capochiave o iniettati in foro nella parete [52-54]. In questo caso, può essere necessario un rinforzo locale della muratura nella zona di ancoraggio, ad esempio tramite ristilatura dei giunti o iniezioni, rispettivamente su murature regolari o in pietra irregolare e povera [55].

Per migliorare gli ammorsamenti si può anche utilizzare la tecnica della ricostruzione locale, o scuci-cuci, che consiste nella demolizione locale della muratura con successiva ricostruzione, con la quale è possibile migliorare le connessioni e l'ingranamento dei blocchi in prossimità dei martelli murari e delle angolate. Tale tecnica trova maggiore impiego nella riparazione delle lesioni o nella ricostruzione di porzioni di parete muraria particolarmente compromesse, come meglio specificato nel paragrafo successivo. Un'altra possibilità è l'inserimento di barre, ad esempio collocate nei giunti in occasione dello scuci-cuci, tenendo in considerazione i materiali da utilizzare in relazione al possibile degrado delle barre nel tempo e all'effettiva adesione delle stesse alla muratura. Tali tecniche realizzano un ammorsamento locale, la cui efficacia deve essere garantita da una migliore qualità muraria nel corpo delle pareti collegate.



(a) (b)

Figura 3.3. a) Capochiave di un tirante, b) ancoraggio di una parete in muratura al solaio ligneo [51].

3.2.2. Interventi su pareti in muratura: applicabilità, vantaggi e svantaggi

Gli interventi sulle pareti in muratura possono essere eseguiti per ripristinarne le caratteristiche originarie, nel caso di danneggiamento o di deterioramento del materiale, oppure per migliorarne le prestazioni, agendo alla scala del materiale oppure anche sul sistema resistente maschi-fasce. Si ricorda come le fasce siano le porzioni di muratura identificabili tra aperture allineate verticalmente e che assolvono alla funzione di collegare i maschi murari, ossia gli elementi portanti verticali preposti ad equilibrare le azioni orizzontali e verticali.

Come già menzionato, per ripristinare la muratura in presenza di lesioni o deterioramento, è possibile utilizzare la tecnica di scuci-cuci (Figura 3.4a). L'obiettivo è ripristinare la continuità muraria lungo fessure o discontinuità, mediante sostituzione degli elementi danneggiati con altri simili per geometria, dimensioni, rigidezza e resistenza. È applicabile sia a muratura in mattoni che in pietra, purché non fortemente irregolari, e può avere maggior efficacia se combinata con altri interventi, anche di ristilatura armata e/o iniezione, a seconda del tipo di muratura [44].

Per migliorare le prestazioni alla scala del materiale – con l'obiettivo di incrementare le proprietà meccaniche e in relazione alle diverse modalità di danno a taglio e pressoflessione – sono disponibili diverse soluzioni.

Nel caso di muratura in pietrame, con presenza di due paramenti esterni ed un nucleo interno, di spessore più o meno significativo, con presenza di vuoti e malta scadente, il consolidamento dei pannelli murari può avvenire mediante iniezioni di miscele leganti (Figura 3.4b) che possono migliorare l'omogeneità della muratura [56-58] oltre a determinarne l'incremento della resistenza a compressione e a taglio. Nell'esecuzione è preferibile utilizzare malte a base di calce idraulica naturale in quanto più simili alle malte originarie e quindi più compatibili dal punto di vista chimico-fisico, ma anche meccanico [59-62]. L'iniezione di miscele leganti a base di calce è compatibile con murature irregolari che presentano una sufficiente percentuale di vuoti al proprio interno e ha il vantaggio di non comportare incrementi sproporzionati di rigidezza della muratura.

Al fine di migliorare il comportamento delle murature a più paramenti, si possono inserire diatoni artificiali o connettori metallici ortogonalmente al piano della muratura. L'intervento garantisce una riduzione delle deformazioni trasversali dovute a carichi assiali e riduce lo sviluppo di problemi locali sotto azioni fuori piano [59, 63]. L'esecuzione dei fori può richiedere diverse fasi al fine di non danneggiare il pannello murario oggetto di intervento, dipendendo anche dalla tipologia e qualità muraria [64, 65]. Un caso particolare è rappresentato



(a) (b) (c)

Figura 3.4. a) Scuci-cuci, b) iniezioni, c) ristilatura armata dei giunti.

dalle pareti in laterizio a cassetta (o a "cassa vuota"), caratterizzate da paramenti separati da un'intercapedine vuota, per le quali è possibile procedere al collegamento tramite barre elicoidali diffuse. Questo intervento permette di ripristinare il collegamento tra i paramenti e migliorarne la risposta nei riguardi delle azioni sia fuori piano sia nel piano, contribuendo a rendere il comportamento simile a quello di pareti monolitiche.

In presenza di malta deteriorata, o assente per erosione degli agenti atmosferici, la ristilatura dei giunti permette di migliorare la compattezza degli strati più esterni della muratura. Questo intervento consiste nel riempire in profondità i giunti di malta, con accortezze esecutive tese a far sviluppare adeguata aderenza con il substrato esistente, e può avere un effetto migliorativo sulla resistenza della parete, soprattutto se combinato a iniezioni [66]. Nel caso di muratura di tessitura regolare, ad esempio muratura di mattoni o di pietra a giunti regolari, l'intervento può essere abbinato all'inserimento di barre di armatura (di acciaio inossidabile o di materiali compositi) al fine di realizzare una ristilatura armata (Figura 3.4c). Prove sperimentali su questo intervento, pensato soprattutto per prevenire gli effetti viscosi nella muratura soggetta a carichi rilevanti [67], hanno fornito una prima validazione dell'effetto benefico a taglio per muratura in laterizio [68-70]. Tale intervento è inoltre utile, nel campo del miglioramento sismico, per potenziare localmente la qualità muraria nei punti di scarico di forze concentrate (ad esempio, in prossimità dei capochiave), a complemento di interventi di scuci-cuci o per incrementare gli ammorsamenti tra pareti ortogonali. Anche nel caso di questo intervento è necessario porre attenzione alla compatibilità delle nuove malte con i materiali originari, prediligendo malte di calce idraulica naturale [59].

Una tecnica molto diffusa a partire dagli anni '80 è l'impiego di intonaco armato, realizzato accostando due paretine di calcestruzzo armato con reti elettrosaldate, collegate mediante barre passanti la muratura, in grado di incrementa-

re notevolmente la resistenza delle pareti. Oggi questa tecnica è sconsigliata, se non in casi molto specifici nei quali la porzione di muratura da consolidare sia di limitate dimensioni e particolarmente caricata. Infatti, nel corso degli anni questo tipo di intervento ha dimostrato delle limitazioni legate sia a dettagli esecutivi impropri, in particolare per l'ossidazione o mancata sovrapposizione delle reti, sia all'incremento, anche eccessivo, di rigidezza delle pareti su cui viene applicato, con i conseguenti risvolti sul comportamento sismico a livello locale e globale, unito anche ad un significativo incremento di massa delle pareti, se confrontato con gli altri possibili interventi per le murature [71, 72].

Gli interventi sin qui descritti, come ad esempio l'intonaco armato e le iniezioni, possono tuttavia peggiorare le prestazioni delle pareti in termini di conducibilità termica e trasmittanza [73]. Anche per questo motivo si suggerisce la combinazione di queste soluzioni con interventi di miglioramento termico, che vanno dall'utilizzo di intonaco termoisoltante all'applicazione di sistemi isolanti, come il cappotto, per compensare il peggioramento delle prestazioni termiche e ridurre il flusso di calore attraverso le pareti [73]. Si sottolinea che sono in corso di sviluppo e di studio malte ed intonaci, con buone caratteristiche meccaniche e dotati anche di proprietà termoisolanti, basati su geopolimeri [74, 75], perlite o materiali ad accumulo latente [76].

Nel corso di anni più recenti sono state anche testate soluzioni con applicazione di materiali compositi, per l'incremento della resistenza a taglio e a flessione nel piano della muratura [75, 77-79] o per migliorare la risposta fuori piano delle pareti [80, 81]. L'utilizzo di laminati o fasce di materiale composito applicati con matrici organiche (FRP-*Fiber Reinforced Polymers*), pur avendo un riscontro normativo [82], è stato superato sia per la non rimovibilità e scarsa resistenza al fuoco delle resine [75], sia per la non compatibilità fisica con il substrato murario, e i conseguenti problemi di durabilità degli interventi [45, 74]. Oggi si tende ad utilizzare materiali compositi applicati con matrici inorganiche, tipo SRG (*Steel Reinforced Grout*), in particolare per il miglioramento della risposta fuori piano.

Da queste esperienze è maturata quindi una nuova tipologia di rinforzi, realizzati con strati di normale intonaco di calce idraulica, all'interno del quale viene annegata una rete di materiale composito, tipologia già dotata di istruzioni operative [83]. Questa tecnica può di volta in volta prendere le forme del TRM (*Textile Reinforced Mortar*), FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*), CRM (*Composite Reinforced Mortar*) – che a sua volta può prevedere l'utilizzo di un'armatura di rinforzo costituita da reti in fibre di vetro o carbonio. Condizione necessaria per l'efficacia di questi intonaci armati è la loro connessione al-

la muratura tramite barre/fiocchi trasversali. Esistono anche applicazioni con intonaci rinforzati con fibre corte disperse SFRM (*Steel Fiber Reinforced Mortar*), la cui applicazione è stata studiata per pannelli in muratura regolare, in laterizio o pietra [84, 85].

In generale, questa tipologia di interventi si presta maggiormente a tipologie di muratura già in partenza regolari, a singolo paramento e di discreta qualità. Recentemente è stata testata l'efficacia anche per murature a più paramenti, in mattoni e in pietra sbozzata, in abbinamento ad un adeguato sistema di connessione trasversale [86, 87]. Per confronti di murature fortemente decoese e irregolari, l'intervento andrebbe abbinato a iniezioni o ad altri interventi volti al contenimento e al miglioramento della consistenza della muratura, per garantirne anzitutto il comportamento monolitico. L'approccio tradizionale prevede l'esecuzione su entrambi i lati della parete, ma recenti studi hanno valutato la sua efficacia con applicazione su una sola faccia del pannello murario [88, 89] per ridurre l'impatto dell'intervento.

Questa soluzione, a differenza delle precedenti, è in grado di prevedere l'integrazione con gli aspetti di efficienza energetica. Nel caso di intervento con TRM abbinato a particolari tipologie di cappotto è stato dimostrato un ulteriore aumento della resistenza fuori piano rispetto all'esecuzione del solo TRM [55, 91], mentre è stato constatato anche un sostanziale mantenimento della resistenza nel piano (Figura 3.5), premesso in entrambi i casi che i sistemi di connessione del sistema di rinforzo, che si trova staccato dalla muratura, siano validi ed efficaci [92]. Facconi et al. [93] hanno proposto anche l'uso di SFRM abbinato a pannelli isolanti, ad esempio in fibra di vetro e aerogel di silice oppure in fibra di legno. Un vantaggio di queste soluzioni è il fatto che possono essere applicate all'ester-



(a) (b)

Figura 3.5. Prova di compressione diagonale su a) pannello rinforzato con TRM e b) pannello rinforzato con TRM e isolamento termico [92].

no, riducendo l'impatto del cantiere, anche se ovviamente non è sempre possibile modificare l'aspetto delle facciate [94].

Un'alternativa all'accoppiamento di interventi sismici ed energetici è l'applicazione di cappotti sismici, ovverosia esoscheletri ingegnerizzati che integrano una membrana di cemento armato gettata in opera all'interno di un cassero a perdere formato da due strati di materiale isolante. Questo intervento richiede l'inserimento di ancoraggi a livello delle fondazioni e dei cordoli di piano [95], e assicura il trasferimento delle azioni sismiche ai nuovi pannelli solo in presenza di solai rigidi e ben collegati a tutte le murature, analogamente a quanto avviene nel caso di esoscheletri.

Recentemente sono stati proposti rinforzi per pannelli murari tramite l'uso di elementi in legno, che costituiscono una strategia di intervento pienamente integrata dal punto di vista sismico ed energetico, e che risultano meno invasivi delle applicazioni in calcestruzzo armato. Queste strategie di rinforzo sono presentate nel dettaglio al paragrafo 3.5 del presente volume.

Come inquadrato all'inizio del paragrafo, vi sono poi interventi mirati ad intervenire sul sistema resistente della parete inteso come insieme di maschi e fasce murarie, quando possibile identificarlo chiaramente (tipicamente nel caso di aperture disposte in modo regolare). Il sistema di maschi e fasce può presentare modalità di danno nel piano localizzato prevalentemente nelle fasce (nel caso di sistemi cosiddetti di "fasce deboli-maschi forti") oppure prevalentemente nei maschi (nel caso di sistemi di "fasce forti-maschi deboli"). La presenza di cordoli di piano – con qualunque delle tecniche prima menzionate – favorisce un comportamento di tipo "fasce forti-maschi deboli". Va precisato che anche la presenza di catene disposte parallelamente alle pareti ne migliorano la risposta nel piano, contribuendo all'incremento della resistenza delle fasce.

Un intervento che può agire sulla risposta del sistema parete intervenendo sulla sua rigidezza, resistenza e duttilità globale è quello della cerchiatura delle aperture tramite profili metallici. Va menzionato che la cerchiatura in corrispondenza di apertura di un vano è un intervento piuttosto tradizionale e diffuso nella pratica nell'ambito degli "interventi locali" ai sensi delle NTC 2018. Va tuttavia precisato che in questo caso la progettazione dei profili, quindi il dimensionamento dell'intervento, deve essere operato per non alterare il comportamento globale, quindi la rigidezza, la resistenza e la capacità di deformazione della struttura su cui si sia intervenuti [34].

L'intervento tramite cerchiatura può essere altresì impiegato efficacemente anche ai fini di un miglioramento sismico. In questo caso è possibile invece sfruttare i vani esistenti e le alterazioni conseguenti alla loro cerchiatura – ad esempio

in termini di incremento della rigidezza, o spostamento del centro di rigidezza di piano – per migliorare le prestazioni agli stati limite di esercizio – oppure di resistenza e di duttilità ultima, sfruttando la plasticizzazione dei profili metallici e il loro incrudimento.

3.3. Esoscheletri in acciaio

Raffaele Landolfo

Gli edifici esistenti, realizzati prima degli anni '80, costituiscono una parte rilevante del patrimonio edilizio esistente, soprattutto in ambito europeo [96-98]. Questi edifici, avendo superato ampiamente la loro vita di servizio, sono caratterizzati da una elevata vulnerabilità connessa alla durabilità dei materiali a cui si aggiungono, nelle aree interessate dai terremoti, carenze derivanti dall'assenza di dettami sismici. Molteplici sono oggigiorno le strategie e le tecniche di intervento che è possibile adottare per il miglioramento e l'adeguamento sismico delle costruzioni esistenti [39, 99].

Analizzando le carenze strutturali presenti nell'organismo ed i livelli di prestazioni attesi, le strategie di intervento possono essere mirate a incrementare la capacità (*C*) e/o a ridurre la domanda (*D*). Tali interventi possono essere implementati a livello globale e/o locale, facendo ricorso a diversi sistemi e tecnologie per il miglioramento e l'adeguamento sismico delle costruzioni esistenti.

Gli interventi globali prevedono l'addizione di sistemi sismoresistenti che possono essere applicati internamente e/o esternamente alla costruzione esistente. Nel caso in cui le addizioni siano eseguite dall'interno si parla di endoscheletro, diversamente di esoscheletro. In entrambi i casi è possibile ottenere un forte aumento di rigidezza e resistenza laterale, e se opportunamente progettato, tale intervento, consente di adeguare sismicamente manufatti esistenti caratterizzati da bassi livelli di sicurezza. Gli endoscheletri sono utilizzati qualora non si possa agire dall'esterno per ragioni di natura fisica/geometrica (ad es. edifici in aggregato), urbanistica (ad es. limitazioni su distanze e volumi), ed architettonica (ad es. edifici vincolati).

Gli esoscheletri possono essere definiti come sistemi esterni applicati in modo diffuso sul perimetro della struttura esistente e dotati di fondazioni proprie. Gli esoscheletri, essendo posizionati esternamente al manufatto da proteggere, hanno il loro punto di forza nella possibilità di evitare l'interruzione/utilizzo della costruzione esistente. Questo tipo di vantaggio è particolarmente rilevante in edifici strategici, ad uso residenziale e commerciale/industriale, per i quali l'in-

terruzione delle attività potrebbe comportare un ritardo nei servizi pubblici e/o una perdita economica in termini di costi indiretti.

Sebbene tale soluzione sia già contemplata dai primi codici giapponesi e americani che si occupavano negli anni '70-'80 di retrofit strutturale e nel manuale tecnico predisposto alla fine degli anni '80 dal Dipartimento dell'esercito, della marina e dell'aeronautica statunitense [100, 101] l'utilizzo degli esoscheletri è oggigiorno ritornato di grande attualità per le potenzialità connesse alla realizzazione di interventi di rapida esecuzione, basso impatto ed integrati.

La diffusione degli esoscheletri in acciaio è infatti dovuta alla possibilità realizzare, ad esempio con soluzioni a secco ad alto livello di industrializzazione, un retrofit integrato e reversibile, che possa quindi adattarsi alle future esigenze del manufatto [102]. Il nuovo involucro riduce la classe di esposizione del calcestruzzo, consentendo di prolungare la vita utile del manufatto esistente, aspetto spesso trascurato negli interventi di miglioramento sismico e nella determinazione della classe di rischio sismico [103]. Gli esoscheletri forniscono quindi la possibilità di soddisfare in modo completo la visione olistica (HV) in ottica *Life Cycle Thinking* (LCT), agendo sulle prestazioni strutturali (sismica e a durabilità), architettoniche (funzionali ed estetiche) ed ambientali (energetiche e confort), valutabili durante l'intero ciclo di vita della costruzione. Infatti, in una logica di sviluppo sostenibile, la necessità di realizzare interventi che siano sicuri e sostenibili, dal punto di vista ambientale ed economico, richiede un approccio multidisciplinare alla progettazione definita, visione olistica (*Holistic Vision* HV). Si parla in questo caso di retrofit integrato: strutturale, energetico, formale e funzionale, che combini la "sicurezza strutturale" ai concetti di "deep renovation". La scelta della soluzione ottimale richiederebbe in questi casi un approccio di tipo LCT in cui analizzare le implicazioni sulle performance strutturali e a durabilità (PBD & *Life-cycle engineering* LCE), sui costi (*Life Cycle Costs*, LCC) e sugli impatti ambientali (*Life Cycle Assessment*, LCA) durante l'intero ciclo di vita della costruzione [3, 104].

È in questo contesto che si inseriscono gli esoscheletri, intesi come strutture additive che, applicate in modo diffuso esternamente al manufatto da proteggere, consentono di incrementarne in modo significativo il livello di sicurezza.

In funzione delle caratteristiche geometriche e di come lavorano è possibile introdurre una prima classificazione degli esoscheletri in acciaio [105]; in particolare gli esoscheletri (EXO), in funzione di come assorbono le sollecitazioni orizzontali si possono classificare in tridimensionali (3D, ad es. nuclei o gusci a singolo o doppio strato) o bidimensionali (2D, ad es. pareti di taglio a parete piena o reticolari). Un'ulteriore differenziazione viene fatta nei confronti della disposi-

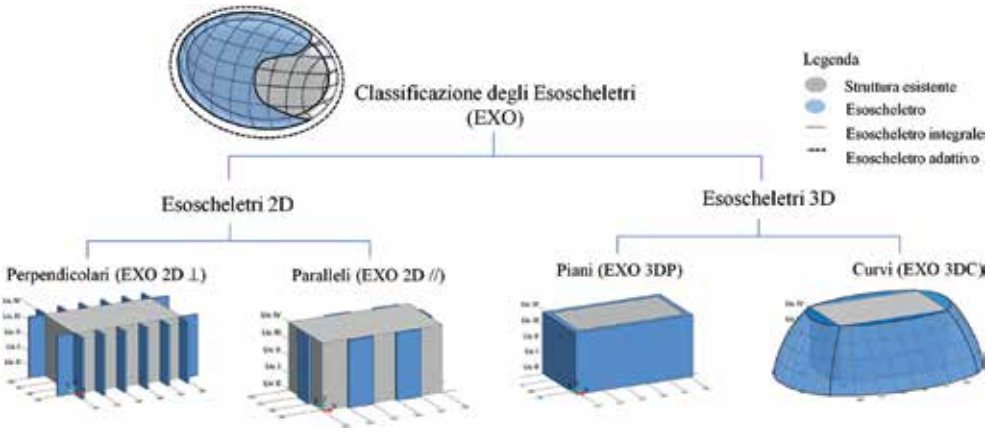


Figura 3.6. Classificazione esoscheletri in acciaio.

zione delle pareti di taglio nei confronti della struttura da rinforzare; se le pareti sono disposte ortogonalmente alla facciata dell'edificio da proteggere si parla di esoscheletri perpendicolari (⊥) altrimenti paralleli (//) (Figura 3.6).

3.3.1. Ambiti di applicabilità

Le carenze tipiche riscontrabili negli edifici esistenti, progettati e/o costruiti in assenza di specifiche sismiche, sono generalmente di carattere globale e comprendono la ridotta portanza in termini di rigidezza e resistenza globale alle azioni laterali, l'irregolarità nella configurazione planimetrica e/o altimetrica. A tali carenze si aggiungono quelle locali, legate al corretto trasferimento delle azioni tra gli elementi (ad es. nodi a parziale ripristino o non confinati) e/o ai dettagli costruttivi delle membrature (ad es. sezioni particolarmente snelle o carenti di armature) che, innescando meccanismi fragili, possono ridurre drasticamente la duttilità della struttura. Ciò premesso, per quanto concerne gli aspetti strutturali, gli esoscheletri in acciaio rappresentano una soluzione efficace soprattutto nei casi in cui siano presenti carenze globali e al contempo siano richiesti, a valle del processo di retrofit, elevati livelli prestazionali attesi. Gli esoscheletri, applicati esternamente al perimetro della struttura, agiscono in parallelo alla costruzione esistente, fornendo un aumento significativo della rigidezza e della resistenza globale alle azioni laterali. Infine, questa tipologia di intervento, come accennato

in precedenza, risulta particolarmente vantaggiosa in contesti in cui il livello di sicurezza strutturale deve essere incrementato senza la necessità di interrompere l'uso o le attività dell'edificio oggetto di retrofit.

Attualmente, esistono diverse applicazioni realizzate sia in Italia che all'estero, dimostrando l'efficacia degli esoscheletri in acciaio nel migliorare la sicurezza sismica di edifici con carenze strutturali. Un esempio emblematico in Italia è rappresentato dall'edificio Magneti Morelli, dove sono stati applicati esoscheletri ortogonali (Figura 3.7a). Questa soluzione ha permesso di incrementare notevolmente la rigidezza e la resistenza globale alle azioni laterali, affrontando così le carenze strutturali originarie, portando all'adeguamento dell'edificio esistente [106].



(a) Edifici uffici Magneti Marelli (BO, Italy)



(b) Tokyo institute of technology (Japan)

Figura 3.7. Realizzazioni emblematiche.

A livello internazionale, *The Institute of Technology* di Tokyo è un esempio significativo in cui sono stati utilizzati esoscheletri paralleli per un retrofit "integrato" energetico-strutturale. L'applicazione di esoscheletri paralleli ha infatti consentito di migliorare la sicurezza sismica nei riguardi di tutti gli stati limite dell'edificio, affiancando contemporaneamente interventi volti a ottimizzare l'efficienza energetica. Questo approccio olistico dimostra la versatilità della tecnologia degli esoscheletri, in grado di affrontare non solo le carenze strutturali ma anche di supportare interventi di retrofit energetico (Figura 3.7b).

In entrambi i casi, l'utilizzo degli esoscheletri ha permesso di implementare soluzioni di miglioramento/adeguamento sismico in modo efficiente, con minor impatto sull'attività degli edifici e una maggiore flessibilità nel soddisfare diverse esigenze strutturali e energetiche.

Attualmente, la normativa sismica italiana, espressa nelle NTC 2018 [2], non fornisce una procedura specifica di progetto per l'implementazione degli esoscheletri in acciaio. Tuttavia, in recenti studi di letteratura [107], sono state avanzate proposte e linee guida per affrontare questa lacuna normativa e fornire indicazioni pratiche per il corretto utilizzo degli esoscheletri nell'adeguamento sismico degli edifici. L'evoluzione della letteratura tecnica rappresenta un importante contributo per colmare le lacune normative e fornire riferimenti affidabili per gli specialisti del settore che intendono adottare questa tecnologia nei loro progetti di miglioramento sismico.

3.3.2. Vantaggi e svantaggi

Gli esoscheletri in acciaio offrono una serie di vantaggi nell'ambito del miglioramento sismico degli edifici esistenti. Prima di tutto, la loro implementazione contribuisce significativamente ad aumentare la sicurezza sismica degli edifici, migliorando la rigidezza e la resistenza globale alle azioni laterali.

Un punto fondamentale è che questo risultato viene ottenuto senza la necessità di interrompere le attività quotidiane dell'edificio, e quindi senza la necessità di riallocare le persone all'interno degli stessi, poiché gli esoscheletri possono essere applicati esternamente con un impatto minimo sulle occupazioni in corso. La flessibilità e l'adattabilità di questa soluzione consentono inoltre interventi mirati, adattati alle specifiche esigenze strutturali di ciascun edificio. Un altro beneficio rilevante è la possibilità di integrare gli esoscheletri in acciaio con interventi di retrofit energetico, ottimizzando così l'efficienza energetica complessiva dell'edificio. Infine, la rapidità di esecuzione, specialmente con soluzioni a secco

altamente industrializzate, rappresenta un ulteriore vantaggio in termini di tempi di intervento.

Le applicazioni degli esoscheletri, sebbene offrano numerosi vantaggi, presentano alcune criticità che è essenziale considerare nel processo decisionale. In primo luogo, l'applicazione di questi sistemi, quando disposti ortogonalmente alla facciata dell'edificio esistente, è limitata agli edifici isolati, circostanza che può ridurre la loro applicabilità in contesti urbani densamente sviluppati. La necessità di spazio lungo il perimetro dell'edificio è invece una criticità peculiare degli esoscheletri paralleli, in quanto potrebbe generare interferenze con balconi o altri elementi architettonici presenti. Inoltre, l'utilizzo degli esoscheletri è più efficace in edifici che non sono soggetti a vincoli architettonici o urbanistici significativi, poiché queste restrizioni possono limitare la fattibilità dell'applicazione esterna. Infine, è cruciale eseguire una verifica accurata della capacità del diaframma (ipotesi di impalcato rigido), poiché l'aggiunta di nuovi elementi sismoresistenti può influenzare il comportamento e la stabilità di questa componente strutturale. Questo passo è essenziale per garantire la coerenza e l'efficacia dell'intervento sismico, riducendo al minimo il rischio di problemi strutturali o comportamentali indesiderati [108]. Tali aspetti sono descritti nel paragrafo successivo.

3.4. Criticità e interventi sui solai

Alessandra Marini, Giovanni Metelli, Margherita Pauletta, Maurizio Piazza, Luca Sbrogiò

La risposta sismica degli edifici, sia nella configurazione allo stato di fatto, sia nell'eventuale configurazione post-intervento, è governata dal comportamento degli elementi strutturali che ne costituiscono il sistema sismo-resistente, che si compone di strutture verticali, generalmente orientate parallelamente all'azione sollecitante, e di diaframmi di piano. I diaframmi raccolgono le forze inerziali di piano e le trasferiscono agli elementi sismo resistenti verticali che, a loro volta, convogliano l'azione sismica in fondazione.

Negli edifici esistenti, allo stato di fatto, il ruolo del diaframma di piano deve essere svolto dagli impalcati; quando rigidezza e resistenza nel piano risultano inadeguate, è necessario l'intervento di rinforzo del solaio o l'introduzione di nuovi sistemi strutturali con funzione di diaframma di piano.

La forza di inerzia totale che agisce sul diaframma è il prodotto della massa di pertinenza del solaio, che varia in funzione della tipologia strutturale e della configurazione dell'edificio esistente, e l'accelerazione spettrale del diaframma.

Le sollecitazioni interne al diaframma, generate dal percorso dei carichi nel piano fino ai vincoli in corrispondenza degli elementi verticali del sistema sismo-resistente, dipendono dall'organizzazione del diaframma stesso, dalla sua rigidezza, condizionata dalla tipologia strutturale, dalla sua forma in pianta e dalla distanza degli appoggi, dalla distribuzione e ampiezza delle possibili aperture, nonché dalla capacità ultima offerta.

La valutazione di rigidezza e capacità nel piano dell'impalcato allo stato di fatto costituisce prerequisito fondamentale sia in fase di verifica di vulnerabilità dell'edificio esistente, sia in fase di concezione strutturale e progetto dell'eventuale intervento di rinforzo. Per la caratterizzazione della rigidezza del diaframma nel piano, i solai sono in genere schematizzati adottando la cosiddetta "analogia della trave a taglio", modellando il solaio caricato nel piano come un elemento bidimensionale costituito da materiale fittizio avente "rigidezza a taglio equivalente" (G_d) e dotato di sola deformazione a taglio; eventuali deformazioni flessionali e a taglio dovute allo scorrimento delle connessioni tra gli elementi sono dunque "incluse" all'interno del parametro G_d. In relazione alla tipologia strutturale del diaframma, è poi importante tener conto della rigidezza dei sistemi di connessione alle strutture verticali. Per quanto riguarda la capacità, i modelli di calcolo sono specifici per le differenti tipologie di impalcato (in c.a., in legno); nel caso di interventi di rinforzo sono funzione della tecnica impiegata per l'organizzazione del diaframma e dei sistemi di connessione diaframma-strutture verticali, e dipendono dal meccanismo cui si associa il raggiungimento delle condizioni ultime.

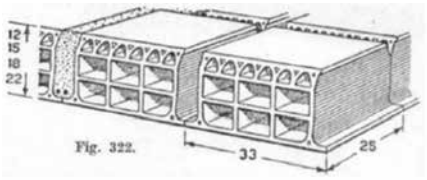
Quando l'impalcato esistente è incapace di assolvere efficacemente al ruolo di diaframma di piano, ovvero quando la domanda in termini di spostamento o azioni interne eccede la capacità, è necessario operarne il rinforzo. La tecnica di intervento varia in funzione della tipologia strutturale dell'edificio esistente e dell'impalcato, come verrà meglio precisato nel seguito. È importante osservare la particolare criticità della corretta concezione strutturale dell'intervento nel suo complesso, partendo dallo studio dell'organizzazione geometrica e strutturale dell'intero edificio, per arrivare alla definizione di dettagli costruttivi idonei ad assicurare, da un lato, la continuità del flusso delle azioni sismiche e, dall'altro, la coerenza con l'esistente, necessaria per garantire la fattibilità tecnica dell'intervento. Infatti, in assenza di adeguata definizione del percorso dei carichi e di efficace disposizione dei componenti del diaframma, rigidezza e resistenza del sistema possono risultare compromessi.

Sebbene il ruolo critico dei diaframmi di piano come componenti essenziali del sistema sismo-resistente sia ormai ampiamente riconosciuto, si evidenzia l'inadeguatezza dei documenti normativi nella declinazione del tema per gli edi-

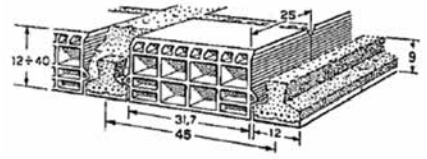
fici in calcestruzzo armato. Viceversa, per i diaframmi lignei negli edifici in muratura, i documenti normativi forniscono un efficace supporto al professionista [109-111]. La bozza di aggiornamento della norma europea [112], con un nuovo capitolo dedicato interamente alle strutture di legno, fa un passo avanti traendo vantaggio da una lunga ed estesa attività di ricerca, di cui i progetti DPC-ReLUIS sono parte rilevante [113].

3.4.1. Diaframmi di piano negli edifici in c.a.

Gli impalcati degli edifici in c.a. sono solitamente realizzati con sistemi in laterocemento. Negli anni sono state impiegate tipologie differenti di solai, con o senza cappa estradossale in calcestruzzo o in calcestruzzo armato. In relazione all'idoneità degli impalcati a svolgere il ruolo di diaframma di piano, la distinzione tra queste tipologie è determinata dal laterizio impiegato come alleggerimento. Si possono distinguere: Tipo 1 – i sistemi che includono blocchi di laterizio che interessano la gran parte dello spessore del solaio, che presentano una certa resistenza a taglio nel piano (quali, ad esempio, i solai celersap©, excelsior©, supersolaio©, e similari, Figura 3.8a); Tipo 2 – i sistemi alleggeriti che ricorrono a

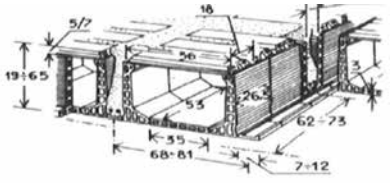


Excelsior© floor system

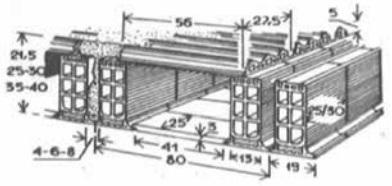


Celersap© floor system with prestressed joists

(a)



Stimip© floor system



Sepal© floor system

(b)

Figura 3.8. Esempi di solaio in laterocemento: a) Tipo 1, con pignatta a tutto spessore di solaio e gettati in opera, con rigidezza e resistenza nel piano, possono svolgere ruolo di diaframma anche in assenza di cappa; b) Tipo 2, con tavelloni, con rigidezza e resistenza nel piano solo in presenza di cappa estradossale.

tavelloni, che complessivamente non offrono alcuna resistenza a taglio nel piano (tra questi, i solai tipo: varese©, stimip©, sepal©, cappa© e similari, Figura 3.8b). Nonostante generalmente i solai siano stati inizialmente concepiti per resistere alle sole azioni gravitazionali, i sistemi Tipo 1 offrono rigidezza e resistenza nel piano, anche in assenza di cappa estradossale, grazie alla formazione di un meccanismo ad arco-catena, o a puntoni e tiranti, nello spessore di solaio e alla resistenza a compressione e/o a taglio offerta dai blocchi di laterizio; i sistemi Tipo 2, invece, offrono rigidezza e capacità nel piano solo se provvisti di cappa estradossale in c.a. [108].

Negli edifici esistenti in c.a. i diaframmi trattengono i telai monodimensionali, eventualmente tamponati, caricati fuori piano e offrono un vincolo sommitale alle pareti dei locali seminterrati, soggette alla spinta del terreno. Negli edifici in c.a. rinforzati con esoscheletri (paragrafo 3.3), il diaframma è soggetto alle eventuali azioni di trasferimento [114] dovute alla ridistribuzione delle azioni nel sistema accoppiato edificio esistente-esoscheletro, in funzione della compatibilità delle deformazioni dei due sistemi resistenti.

La rigidezza del diaframma di piano dipende oltre che dalla tipologia di solaio (1 o 2), dall'organizzazione strutturale dell'impalcato in laterocemento, e cioè dalla presenza di elementi irrigidenti, quali travi di spina e di bordo, ripartitori e cordoli nonché dall'armatura negli stessi; dipende inoltre dall'organizzazione strutturale dell'edificio, in particolare dalla distanza tra gli elementi verticali del sistema sismo-resistente e dalla loro rigidezza, dal numero, dalla posizione e dall'ampiezza delle aperture nel piano. Con riferimento alle NTC 2018 [2], in edifici con solai aventi soletta armata di spessore maggiore di 4 cm, la cui rigidezza può essere considerata infinita, le forze sismiche si ripartiscono tra gli elementi verticali secondo la rigidezza di questi ultimi. Negli altri casi, questa assunzione non è valida: nel caso di assenza di soletta nei solai Tipo 1, di soletta non armata o armata e non collaborante con i travetti, e nel caso di soletta avente spessore inferiore a 4 cm nei solai Tipo 1 e 2, è necessario considerare la rigidezza finita dell'impalcato nei modelli di calcolo. Analoga conclusione vale anche quando l'edificio presenta particolari configurazioni, come, ad esempio, la pianta molto allungata con setti alle estremità, oppure in presenza di ampie aperture nell'impalcato [115-120].

Per quanto riguarda la capacità nel piano, i solai in laterocemento, di Tipo 1 e di Tipo 2 con cappa estradossale, offrono resistenza grazie alla formazione di un meccanismo ad arco e catena, o a puntoni e tiranti in relazione alla distribuzione del carico e alla morfologia dell'impalcato [121]. Considerando il caso più critico, di solai Tipo 1 sprovvisti di cappa estradossale, e con riferimento al sistema resistente arco e catena, la capacità ultima del diaframma può essere associa-

ta all'innesco del più critico dei seguenti meccanismi di rottura [108] (Figura 3.9): A) rottura a compressione dei blocchi di laterizio in chiave all'arco, nella direzione ortogonale ai fori; B) rottura per compressione e taglio agli appoggi, solitamente legata alla rottura a taglio del blocco di laterizio o alla crisi dell'interfaccia blocco/trave; C) rottura a trazione della catena, o corrente inferiore. Nel caso di presenza di cappa in c.a., la sollecitazione nel piano si distribuisce tra la cappa e il sistema in laterocemento in funzione della rigidezza relativa e dell'efficacia della mutua connessione, fino alla rottura fragile di uno degli strati. La capacità ultima del solaio nel piano può essere stimata analiticamente come il minimo taglio associato all'instaurarsi del più critico dei tre meccanismi. Solitamente, come evidenziato nelle indagini post-terremoto e in prove sperimentali eseguite in laboratorio e in sito [122, 123], la crisi è associata al meccanismo B, di tipo fragile, che si manifesta per deformazioni molto ridotte.

La capacità dei solai, in generale, non risulta critica nelle condizioni pre-intervento quando gli archi di scarico fanno ponte tra i pilastri dell'edificio esistente; tuttavia, la capacità dei solai può essere insufficiente a valle degli interventi di rinforzo, a causa de: 1) l'incremento dell'azione sismica totale, conseguente l'aumento di rigidezza della struttura rinforzata; 2) l'aumento delle azioni interne nel diaframma, associato all'aumento della luce del sistema arco-catena che fa ponte tra gli elementi rigidi dell'eventuale nuovo sistema sismo-resistente (quali ad esempio nuove pareti sismo-resistenti nei sistemi a setti, o nuove facciate nei sistemi a guscio [124, 125]) (Figura 3.10).

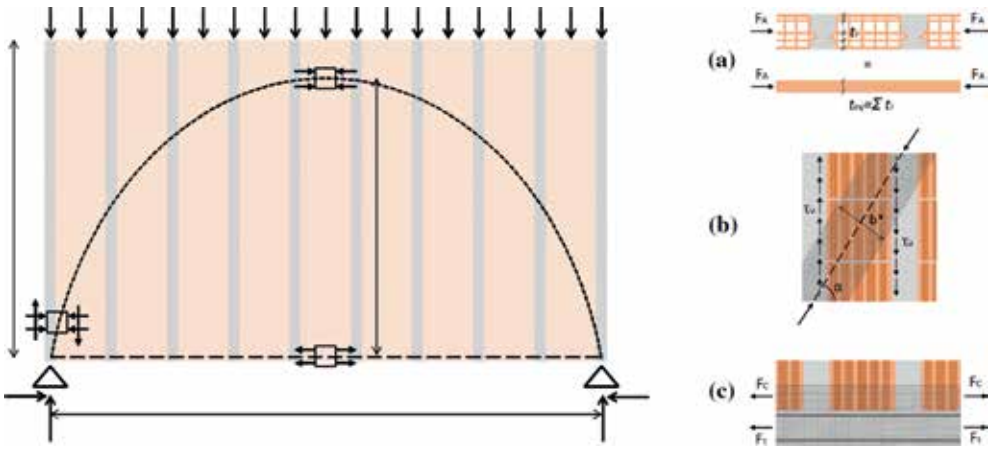


Figura 3.9. Capacità nel piano di solai in laterocemento: meccanismo resistente ad arco e meccanismi di rottura (adattato da Marini et al. 2022 [108]).

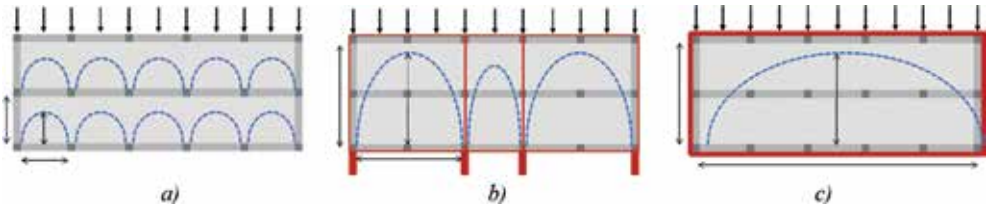


Figura 3.10. Meccanismo arco-catena in caso di edifici: a) non rinforzati; b) rinforzati tramite pareti, o c) esoscheletri a guscio (adattato da Marini et al. 2022 [108]).

Interventi di rinforzo per solai in laterocemento. Il rinforzo dei solai esistenti in laterocemento può essere indicato per ovviare ad eccessiva deformabilità nel piano, e a problemi di insufficiente capacità, legati alla disposizione delle aperture oppure al rischio di insorgenza di uno dei meccanismi di collasso del sistema arco-catena.

Quando la capacità del solaio è governata dalla resistenza a trazione dei cordoli perimetrali (Meccanismo C, Figura 3.9), è sufficiente introdurre degli elementi di rinforzo, costituiti da catene o piatti metallici, disposti in continuità lungo il perimetro esterno, come fasce marcapiano, e collegati ai cordoli esistenti in modo da garantire l'attivazione del meccanismo di arco-tirante. Questa soluzione risulta poco invasiva e di rapida esecuzione in quanto prevede l'inserimento di componenti metallici, che possono essere messi in opera a secco, operando dall'esterno.

Quando il rinforzo si rende necessario per organizzare l'impalcato in presenza di aperture eccessive e garantire un efficace percorso dei carichi di piano verso i sistemi sismo resistenti verticali, oppure nel caso sia previsto l'irrigidimento globale dell'edificio, o in caso di possibile innesco dei meccanismi a) e b) di Figura 3.9, è necessario intervenire col rinforzo dell'impalcato in laterocemento con soluzioni più impattanti, intradossali o estradossali in funzione dei vincoli imposti e delle scelte progettuali. È possibile intervenire all'intradosso dell'impalcato con una soluzione leggera e a secco, introducendo una reticolare di piano costituita da piatti metallici (Figura 3.11a), dotata di correnti perimetrali e diagonali fissati con collegamenti inghisati a travi e travetti esistenti in c.a. per garantire il trasferimento delle azioni sismiche e per impedire l'instabilità dei profili metallici; oppure un sistema ibrido con tiranti post-tesi posizionati a livello del soffitto, nascosti alla vista con controsoffitti, che riorganizzano il meccanismo resistente nell'implacato [122] (Fig. 3.11a). Entrambe le soluzioni implicano la possibilità di accedere all'intradosso del solaio, posizionando impalcature all'interno dell'e-

dificio e rimuovendo eventuali controsoffitti, e possono essere necessarie piccole demolizioni nelle tramezzature per garantire la continuità dei componenti della struttura reticolare. Qualora non siano già presenti controsoffitti, è comunque opportuno prevedere schermature per ragioni di durabilità ed estetiche, a meno che non si pongano problemi di altezza minima di interpiano. La soluzione offre dei vantaggi in termini di costi e di invasività, grazie all'impiego di elementi strutturali leggeri messi in opera a secco; tuttavia, il contributo offerto è prevalentemente in termini di resistenza nel piano, in quanto la rigidezza del sistema è limitata rispetto a quella del solaio esistente. Questo tipo di intervento è facilmente abbinabile al rinforzo statico a flessione dei solai operato con travi rompitratta o con elementi di rinforzo attivo, mediante organizzazione di una reticolare intradossale che preveda doppia funzionalità delle travi di rinforzo.

In alternativa è possibile intervenire all'estradosso con la realizzazione di un nuovo sottofondo strutturale sottile, di spessore di 4-5 cm in calcestruzzo ordinario o di 2-3 cm in calcestruzzo ad alte prestazioni [126] (Figura 3.11b), che può svolgere la duplice funzione di rinforzo sismico e statico per il solaio esistente. L'intervento prevede generalmente la realizzazione di collegamenti meccanici con travi e travetti, realizzabili ad esempio con spinotti. Nel caso di rinforzo di impalcati già provvisti di cappa, è possibile evitare le connessioni meccaniche operando il getto del nuovo strato strutturale sull'estradosso del solaio esistente previa sabbiatura [127].

Rispetto alle soluzioni a secco intradossali, la tecnica del sottofondo strutturale comporta aumento di peso e tempi di esecuzione estesi dovuti all'impiego di un sistema "umido", a fronte di maggiori rigidezza e resistenza nel piano e più agevole adattabilità a impalcati con geometrie irregolari. Implica inoltre maggiore invasività in quanto richiede operazioni preliminari di demolizione e smaltimento delle finiture esistenti disposte sopra allo strato strutturale, quali sottofondo, pavimento e tramezze, con conseguenti maggiori impatti economici ed ambientali e la necessità di dismissione temporanea parziale o totale dell'edificio.

Le tecniche intradossali ed estradossali possono essere abbinate ad interventi di efficientamento energetico, come nel caso di installazione di strati termo isolanti intradossali, o di nuovi impianti sull'estradosso o all'intradosso del diaframma. L'intervento integrato richiede preliminare verifica della compatibilità architettonico-funzionale con l'altezza minima di interpiano, la quota di sbarco delle scale, l'altezza minima delle porte e dei parapetti delle finestre.

I diaframmi devono poi essere efficacemente connessi agli elementi verticali, strutturali e non strutturali, per raccoglierne l'azione inerziale e traferire l'azione tagliante di piano ai componenti verticali del sistema sismo-resistente. La scelta

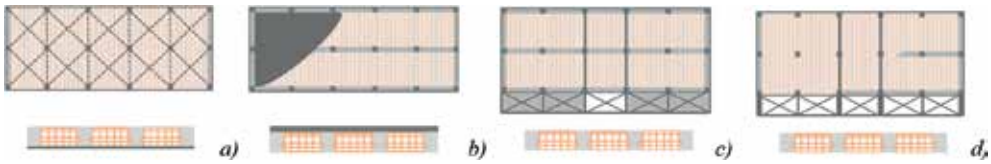


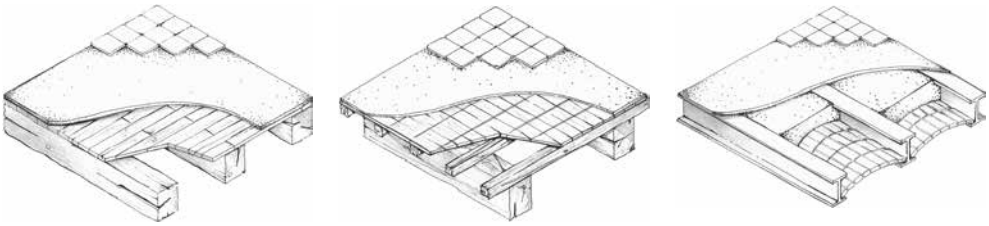
Figura 3.11. Formazione di diaframmi di piano: a) reticolare in acciaio intradossale; b) lastra estradossale in c.a o HPRC; c) mediante reingegnerizzazione/rinforzo dei balconi esistenti; d) diaframmi esterni realizzati tra le nuove pareti di taglio con funzione di nuovi balconi (adattato da Marini et al. 2022 [108]).

dei tipi di connessione dipende dal tipo di rinforzo adottato e dai particolari costruttivi dell'edificio esistente.

Nel caso sia previsto anche un intervento di rinforzo globale delle strutture in elevazione, con introduzione di nuovi setti sismo resistenti o esoscheletri (Capitolo 3.3), è possibile ridurre la domanda sul diaframma in termini di azioni e spostamenti, mediante opportuna calibrazione della distanza delle pareti verticali, e quindi della luce del diaframma. In alternativa, quando la posizione degli elementi verticali è fissata ed è necessario rinforzare gli impalcati nel piano, si può valutare l'opportunità/fattibilità di organizzare diaframmi esterni all'edificio, con strutture reticolari in acciaio, opportunamente collegate agli elementi verticali del sistema sismo-resistente e all'impalcato con connessioni a taglio e tiranti post-tesi [128]. Tali strutture possono essere organizzate anche per assolvere la funzione statica di nuovi balconi (Figura 3.11c), incrementando la superficie di piano dell'edificio ed il valore immobiliare. Allo stesso modo, si possono reingegnerizzare/ rinforzare i balconi esistenti con funzione di diaframmi esterni (Figura 3.11d). Questa tecnica consente di operare dall'esterno impiegando elementi prefabbricati, fissati a secco, riducendo significativamente l'invasività dell'intervento; tuttavia, la sua fattibilità va attentamente verificata, sia per quanto riguarda gli aspetti tecnici (quali ad esempio: controllo del rapporto L/h diaframma, fattibilità dei collegamenti con l'esistente, possibili interferenze con elementi non strutturali), che per quanto riguarda gli vincoli urbanistici legati all'aumento di volume e di superficie utile.

3.4.2. Diaframmi di piano negli edifici storici in muratura

I solai tradizionali negli edifici storici sono tipicamente costituiti da travetti in legno massiccio distanziati di circa 0,5-0,7 m, sormontati dall'assito, uno stra-



(a) (b) (c)

Figura 3.12. Solai tradizionali negli edifici storici: a) solai con travetti lignei e assito, oppure b) con tavelle in cotto; c) solai a volterrana con putrelle d'acciaio (tratto da Sbrogiò et al. 2021 [130]).

to di assi di legno (2-3 cm di spessore) chiodato perpendicolarmente ai travetti (Figura 3.12a), oppure da tavelle in cotto (Figura 3.12b). Così composti, i solai tradizionali sono in generale incapaci di esplicare un'efficace azione di diaframma di piano: le tavole di assito, chiodate in modo irregolare ai travetti, non sono in grado di resistere al flusso di taglio nel piano; le testate dei travetti, inserite all'interno di tasche lasche nelle murature, sono sprovviste di un adeguato collegamento in grado di trattenere le pareti caricate fuori piano e di trasferire le azioni sismiche alle pareti resistenti. In questo scenario, è frequente la necessità di rinforzare gli impalcati esistenti al fine di renderli idonei a esplicare il ruolo di diaframmi di piano. In alcuni casi è possibile rilevare solai a volterrana (Figura 3.12c), composti da putrelle di acciaio e voltine in laterizio, o a putrelle e tavelloni, oppure in laterocemento (Figura 3.8). Nel seguito si fa riferimento al solo rinforzo dei solai lignei [129].

Negli edifici esistenti in muratura il diaframma ha il compito di offrire un vincolo laterale alle pareti caricate fuori piano e un presidio nei confronti dell'instabilità delle stesse [131] (Capitolo 3.2). I diaframmi di piano raccolgono pertanto le azioni sismiche di tutte le masse che competono all'impalcato, in particolare l'azione delle pareti caricate fuori piano, e le trasferiscono alle pareti sismo-resistenti. La realizzazione di diaframmi di piano, adeguatamente connessi alle murature perimetrali, consente di organizzare un sistema sismo-resistente scatolare.

Il ricorso ai diaframmi di piano negli edifici storici in muratura è inevitabile ogni qualvolta l'inserimento di catene perimetrali risulti impercorribile; ad esempio in presenza di edifici allungati, con pareti molto snelle e irrigidimenti distanti, ovvero nel caso di edifici con grandi porticati al piano terra o con irregolarità in pianta molto evidenti, con celle murarie parziali o incomplete, in presenza di canne fumarie entro lo spessore della muratura (si veda a riguardo

il Capitolo 3.2). In alcuni casi, quando è necessario incrementare la rigidezza di piano, è possibile irrigidire l'impalcato esistente anche in presenza di catene perimetrali. Si ricorre infine ai diaframmi di piano nel caso sia necessario operare il contestuale rinforzo a flessione degli impalcati nei confronti dei carichi statici e siano pertanto già previsti il rifacimento delle finiture e la dismissione temporanea del fabbricato.

È importante notare che, sebbene i diaframmi di piano (come pure le catene perimetrali) vengano introdotti per inibire i meccanismi fuori-piano delle murature, essi possono consentire di migliorare contestualmente anche il comportamento delle pareti nel piano. È il caso dei diaframmi che presentano correnti metallici fissati alle pareti murarie: il rinforzo nel piano si realizza grazie all'efficace azione di contenimento delle fasce murarie garantito dalla connessione diffusa del corrente teso del diaframma alle murature perimetrali, che può trasformare il comportamento della parete da "fasce deboli e maschi forti" a "fasce forti e maschi deboli".

I diaframmi sono frequentemente costituiti da pannelli ingegnerizzati, da tavolati semplici o doppi, da sottofondi armati, come meglio articolato nel seguito, e da connessioni alle murature perimetrali. Per edifici con celle murarie estese, è spesso necessario introdurre dei correnti perimetrali con funzione di tiranti del sistema resistente e di ripartitori per il trasferimento dei flussi tangenziali del diaframma alle pareti sismo-resistenti [132]. Per il pre-dimensionamento dei componenti del diaframma si può fare riferimento allo schema a puntoni e tiranti, organizzando un efficace percorso dei carichi; nel caso di celle murarie allungate, è possibile riferirsi allo schema dell'elemento bidimensionale appoggiato sulle murature sismo-resistenti. Quest'ultimo si basa sull'ipotesi semplificativa che le sollecitazioni di flessione e taglio nel piano possano essere disaccoppiate ed affidate rispettivamente ai correnti perimetrali metallici e all'anima del diaframma, purché quest'ultimo sia sufficientemente rigido [132]. È poi necessario prevedere specifici sistemi di connessione perimetrali, in particolare: a) connessioni per trattenere le pareti caricate fuori-piano, con funzione di tirante, che possono essere realizzate con sottili barre inghisate o fissate con piastra alle murature e saldate a piatti chiodati al diaframma, oppure con "spilloni" che collegano la testa dei travetti del solaio alle pareti murarie perpendicolari; e b) connessioni per trasferire l'azione tagliante di piano alle pareti sismo-resistenti, per le quali è possibile ricorrere, ad esempio, a spinotti metallici o sfruttare i travetti infissi nelle murature.

Esistono situazioni critiche che necessitano di concezioni strutturali non-standard per evitare possibili mal funzionamenti del sistema sismo-resistente

[133]. È il caso, ad esempio, degli edifici fortemente irregolari in pianta o in elevazione, come in presenza di porticati, pareti in falso, ampie aperture nei solai: in queste situazioni, meritevoli di specifici approfondimenti, è necessario identificare la cella muraria resistente nei confronti delle azioni sismiche, spesso differente dalla cella geometrica, e progettare di conseguenza il diaframma di piano, definendo con chiarezza il percorso dei carichi, le porzioni di impalcato da "appendere" al sistema resistente, il ruolo dei componenti strutturali e i dettagli costruttivi [134].

Interventi di rinforzo per solai lignei. Relativamente alle tecniche costruttive dei diaframmi di piano, i recenti terremoti del centro Italia (Umbria-Marche 1997, L'Aquila 2009 e Amatrice 2016-2017) hanno mostrato l'inadeguatezza della pratica diffusa negli anni ottanta del secolo scorso, che prevedeva la sostituzione degli impalcati esistenti in legno con solette in laterocemento. A causa dell'elevata massa e rigidezza, le solette in laterocemento hanno prodotto sollecitazioni non sopportate dalle murature esistenti, specialmente se in pietrame. La presenza di solette in c.a., specie se realizzate in breccia entro lo spessore della muratura, costituisce elemento di vulnerabilità intrinseca degli edifici, e merita specifiche valutazioni.

Per gli edifici storici sono state dunque studiate e proposte negli anni specifiche soluzioni a secco, caratterizzate da una maggiore compatibilità con l'esistente e basate sul rinforzo dei solai lignei esistenti. Nella bozza di aggiornamento della norma europea PrEN1998-3 [112], è fornita una rassegna di alcune possibili tecniche di rinforzo estradossale dei solai lignei (Figura 3.13, da Piazza et al. 2008 [135]).

Il pannello d'anima del diaframma può essere realizzato impiegando tavole lignee a formare un doppio assito incrociato (Figura 3.13a), con l'assito di rinforzo ordito a 45° rispetto a quello esistente [136-142], o pannelli lignei [143-148], di differente tipologia e spessore a seconda delle esigenze (compensato, OSB – *Oriented Strand Board*, CLT – *Cross Laminated Timber*; Figura 3.13b-c), collegati ai travetti esistenti con viti e/o chiodi. La tecnica del doppio assito non richiede collegamenti tra le nuove tavole affiancate ma solo tra queste e i travetti esistenti, tali da formare un sistema reticolare costituito da correnti (travetti esistenti), diagonali (assito nuovo) e montanti (assito esistente) in grado di resistere alle azioni sismiche nel piano. L'impiego della tecnica dell'assito incrociato richiede un'attenta valutazione dell'andamento del flusso di taglio lungo il perimetro del diaframma, governato dal comportamento locale delle connessioni tra correnti metallici perimetrali e le tavole dell'assito continue, costituito in genere da chiodi [142]. Questa tecnica, nonostante richieda maggiore cura nella preparazione e nel

posizionamento delle tavole, è preferita nell'ambito del recupero conservativo in quanto utilizza il medesimo materiale delle strutture esistenti, e risulta traspirante.

L'impiego di pannelli lignei di dimensioni commerciali richiede che questi vengano collegati tra loro lungo i bordi per formare una lastra sufficientemente rigida e resistente nel piano. In questo caso il solaio esistente non collabora necessariamente alla risposta sismica ma deve comunque essere collegato al nuovo pannello d'anima per il trasferimento delle azioni di competenza e per fornire un vincolo all'instabilità della lastra.

La scelta della tipologia di pannelli da impiegare dipende dalle esigenze specifiche. Per assolvere la sola funzione di diaframma sismico è sufficiente impiegare pannelli di spessore ridotto (1-3 cm), tipicamente in legno compensato o, meno frequentemente, in OSB [144-148]. Quando invece è necessario garantire un rinforzo anche nel confronto dei carichi gravitazionali possono essere impiegati pannelli in CLT di spessori più elevati [149] (Figura 3.13c) o, in alternativa, un sistema composto da listoni in legno lamellare o LVL, allineati sopra i travetti e connessi a questi per il rinforzo statico, su cui vengono posizionati e collegati pannelli o tavole di spessore ridotto con funzione di diaframma sismico (Figura 3.13d).

Le soluzioni descritte prevedono l'impiego di materiali a base legno, di origine naturale, a basso impatto ambientale a patto di impiegare resine sostenibili, leggeri, facilmente lavorabili e adattabili a geometrie non regolari. Tali soluzioni richiedono accorgimenti specifici per assicurarne la durabilità (protezione dal fuoco e dall'umidità), per limitare le vibrazioni e la rumorosità indotta dal calpestio. L'impiego di elementi di grandi dimensioni, come i pannelli CLT o LVL-C (LVL con presenza di piallacci anche orientati in direzione trasversale [150]), può comportare maggiori problemi di movimentazione specialmente in presenza di ambienti interni angusti, e richiedere opere preliminari per il varo dei pannelli all'interno del cantiere e per la loro movimentazione tra i locali, con conseguente aumento di tempi e costi di realizzazione.

Una tecnica di rinforzo meno invasiva e concettualmente simile a quella dell'assito incrociato prevede l'impiego di strisce metalliche o in materiale composito [136, 138, 139, 151, 152] (Figura 3.13e), disposte a formare una serie di diagonali intersecate, chiodate (strisce metalliche) o incollate (materiale composito) all'assito, ai travetti esistenti e agli eventuali correnti perimetrali. In questo caso la resistenza a trazione dell'acciaio o del materiale composito viene sfruttata per incrementare la resistenza nel piano del diaframma utilizzando strisce metalliche di pochi millimetri di spessore, chiodate per tutta la loro estensione alla struttura esistente. I maggiori vantaggi di questa soluzione riguardano la rapidità e la facilità di esecuzione, l'incremento di peso trascurabile e l'economicità.

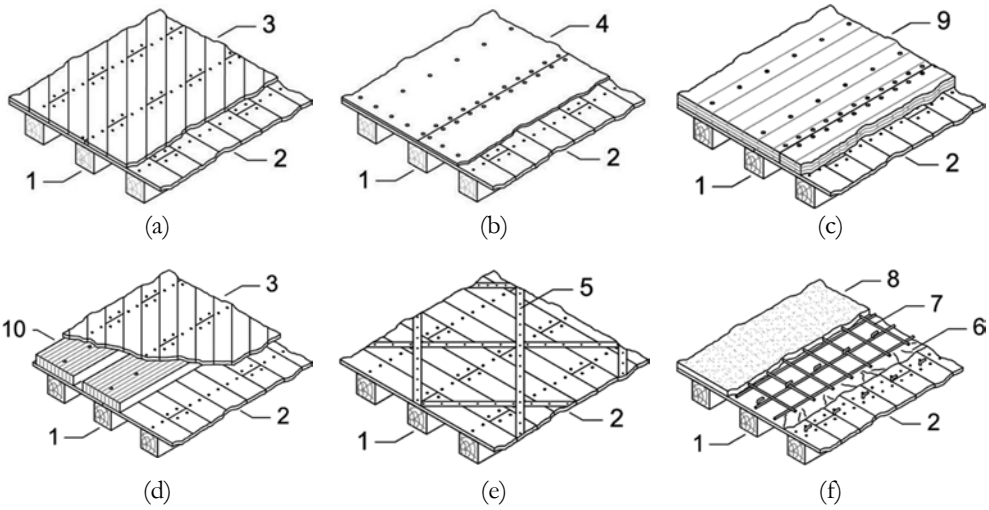


Figura 3.13. Soluzioni di rinforzo: a) tavolato diagonale; b) pannelli a base di legno; c) pannelli CLT/LVL; d) tavoloni lignei e tavolato diagonale; e) strisce metalliche; f) sottofondo strutturale (immagine riadattata da Piazza et al. 2008 [135]). Elementi strutturali esistenti: 1 = Travetti; 2 = Tavolato. Elementi di rinforzo/irrigidimento: 3 = Tavolato diagonale; 4 = Pannelli lignei a basso spessore (es. OSB, compensato); 5 = Strisce metalliche; 6 = Membrana impermeabile; 7 = Rete metallica; 8 = Soletta in calcestruzzo; 9 = Pannelli xlam/microlamellare; 10 = Tavoloni in lamellare/microlamellare.

Una tecnica di rinforzo alternativa è quella "a umido" che prevede la sostituzione del massetto esistente con un sottofondo strutturale in calcestruzzo armato con rete elettrosaldata (Figura 3.13f). In alternativa, il sottofondo strutturale può essere realizzato in calcestruzzo ad elevate prestazioni [126, 153], anche fibro-rinforzato, oppure in malta di calce armato con rete in fibra di vetro. La soluzione è adatta a geometrie irregolari degli impalcati. Il costo varia in base al materiale utilizzato: la soluzione in calcestruzzo ordinario è economica, poiché il materiale è facilmente reperibile e relativamente semplice da gettare; al contrario, l'utilizzo di calcestruzzi speciali e malta di calce comporta costi maggiori, legati al costo per l'acquisto dei materiali e alla necessità di manodopera specializzata per la posa. Considerato il peso introdotto con il getto del nuovo sottofondo strutturale, in presenza di impalcati particolarmente deformabili, può essere necessario puntellare il solaio all'intradosso durante la fase di maturazione del getto, con conseguente maggiore invasività, dovuta alla necessità di accedere sia all'intradosso che all'estradosso dell'impalcato. La tecnica può essere facilmente ingegnerizzata, mediante inserimento di connettori tra sottofondo struttura-

le e travi e travetti portanti del solaio (ad esempio spinotti o vitoni), per rendere la nuova soletta collaborante ed irrigidire l'impalcato anche nei confronti dei carichi gravitazionali.

La normativa prEN1998-3 [112] fornisce valori di riferimento della rigidezza a taglio equivalente del diaframma, con riferimento a solai con tavolato semplice, prima e dopo l'applicazione delle soluzioni di rinforzo a base di legno mostrate in Figura 3.14. Tali valori sono stati ricavati a partire dalle evidenze sperimentali e numeriche raccolte nel corso degli anni e incluse in pubblicazioni come Valluzzi et al. 2008 [137], 2013a [139]; Baldessari et al. 2009 [136]; Brignola et al. 2012 [143]; Giongo et al. 2014a [154], 2014b [155], 2018 [156]; Gattesco et al. 2014 [152]; Rizzi et al. 2017 [140], 2019 [147], 2020 [148]; Gubana et al. 2018 [145].

Se opportunamente concepite e progettate, le soluzioni a secco, in particolare quelle che ricorrono ai prodotti a base di legno, combinano compatibilità dei materiali, sostenibilità, reversibilità e leggerezza (a, b, c, d) con notevoli



(a) (b)

(c) (d)

Figura 3.14. Formazione di diaframmi di piano con a) assito incrociato; b) pannelli in compensato; c) pannelli CLT per il contestuale rinforzo statico; d) sottofondo strutturale alleggerito.

prestazioni meccaniche nel piano (a, b, c, d) e fuori piano (c, d e sono prive dei rischi di percolazione d'acqua tipici delle soluzioni con sottofondo collaborante. Le tecniche a secco sono inoltre molto leggere ed il comportamento sismico dell'edificio può beneficiare dalla riduzione apprezzabile delle azioni sismiche sull'impalcato.

In termini di applicabilità, tutte queste soluzioni richiedono accessibilità all'estradosso, ossia sono applicabili previa rimozione delle pavimentazioni e demolizione e smaltimento di eventuali sottofondi. Ciò comporta la necessità di dismettere temporaneamente l'uso dell'edificio, nonché di prevedere, oltre al costo di costruzione, i costi associati al rifacimento delle finiture. Inoltre, la progettazione delle soluzioni estradossali deve curare lo spessore complessivo dell'impalcato, per evitare problemi di incompatibilità di quote con le soglie delle porte, con le altezze dei parapetti delle finestre, e con il piano di sbarco delle scale, che comporterebbero importanti costi aggiuntivi per le opere di adeguamento funzionale.

Indipendentemente dalla tecnica adottata, è spesso necessario l'esecuzione di prove di cantierabilità per verificare l'efficacia dei sistemi di collegamento con l'esistente [132, 157], la cui capacità non può spesso essere definita a priori a causa dell'elevato grado di incertezza sulle caratteristiche meccaniche della muratura, sulla loro eterogeneità, sullo stato di conservazione e sulla qualità costruttiva. Infine, la corretta risuscita dell'intervento risulta condizionata, oltre che da una curata progettazione, anche da un'attenta direzione dei lavori in situ.

3.5. Interventi con sistemi in legno

Ivan Giongo, Francesco Graziotti, Jacopo Zanni, Maria Rosa Valluzzi

L'utilizzo del legno per il rinforzo sismico delle strutture esistenti è un tema che, recentemente, sta ricevendo una notevole attenzione da parte sia del mondo della ricerca che di quello industriale. Tale concetto non è del tutto nuovo. Molti sono infatti gli esempi in vari paesi del mondo di tecnologie tradizionali che, combinando il legno con altri materiali, si sono dimostrate efficaci nel sopravvivere a terremoti di forte intensità (es. Himis in Turchia, Dhajji Dewari in India, Casa Baraccata in Italia, Gajola Pombalina in Portogallo, solo per citarne alcune). Alla luce di questi esempi e beneficiando dello sviluppo e diffusione di nuovi prodotti in legno ingegnerizzato (es. pannelli in microlamellare, pannelli CLT), sono state recentemente sviluppate molteplici soluzioni che vedono l'uso del legno per il miglioramento/adeguamento sismico delle strutture esistenti.

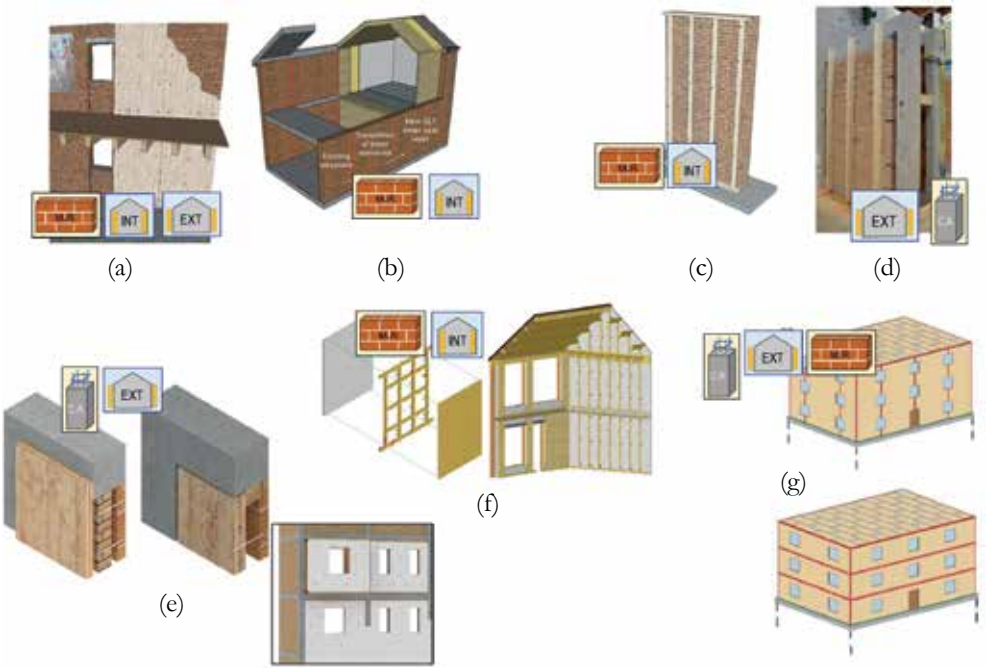
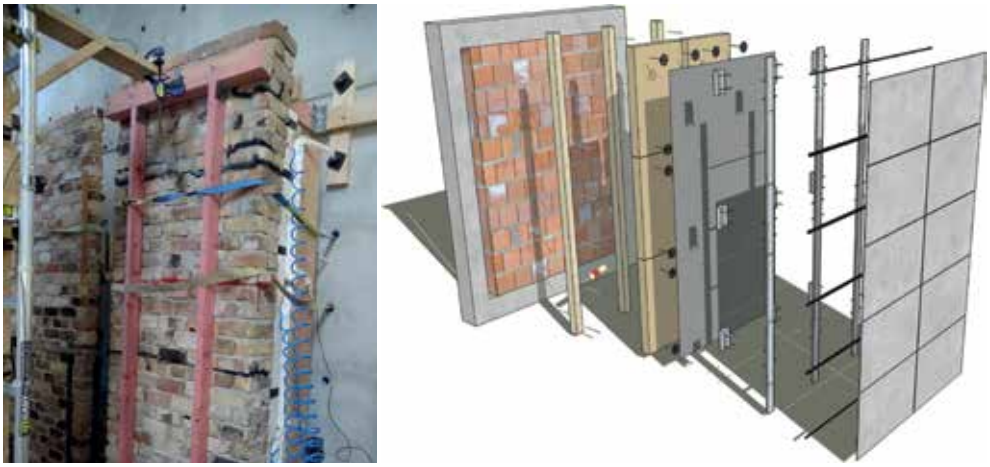


Figura 3.15. Sintesi delle tecniche di rinforzo per murature/c.a. con sistemi in legno. a) Placcaggi su murature; b) Endoscheletri in edifici in muratura (*nested build.*); c) Costolature su pareti in muratura; d) Costolature su tamponamenti; e) Placcaggi su edifici c.a.; f) Telai (LTF) su murature; g) Esoscheletri su edifici in muratura/c.a.

In questo quadro, fondamentale è stata l'attività condotta all'interno del progetto ReLUIS (anche con alcune collaborazioni con il Centro comune di ricerca – JRC), dove forte attenzione è data alla messa a punto di interventi realizzati prevalentemente a secco, reversibili e scarsamente invasivi. Tali soluzioni possono essere integrate con strategie di miglioramento dell'efficienza energetica, promuovendo quindi la sostenibilità degli interventi. In tale prospettiva, la natura rinnovabile del materiale e la prefabbricazione tipica delle costruzioni in legno hanno favorito lo sviluppo di soluzioni differenziate, mirate al rinforzo di i) tetti e solai in legno esistenti (si veda paragrafo 3.4), ii) pareti/strutture in muratura, iii) strutture in cemento armato. La Figura 3.15 riporta una sintesi delle tecniche principali studiate in ambito ReLUIS, con riferimento ai punti ii) e iii).

Costolature lignee. Si tratta di elementi monodimensionali in legno fissati verticalmente ad intervalli regolari sulla superficie muraria di pareti e pareti di



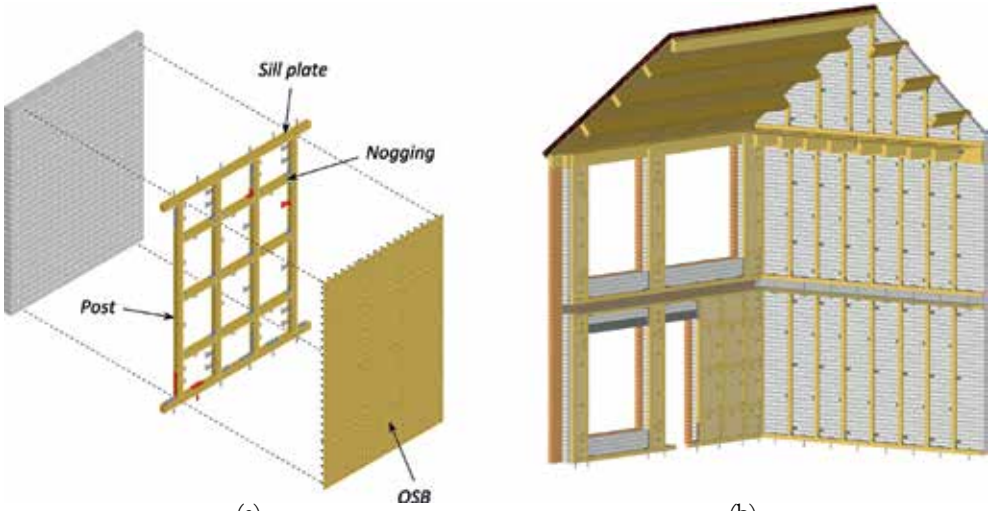
(a) (b)

Figura 3.16. Rinforzo con costolature lignee applicato a pareti in muratura [158] (a) e a pareti di tamponamento (b).

tamponamento, allo scopo di ridurre la vulnerabilità di pareti e pareti di tamponamento nei confronti di possibili meccanismi di ribaltamento fuori-piano [158]. Il collegamento alla muratura viene realizzato tramite connettori puntuali distribuiti lungo la costola lignea, che possono essere inseriti a secco oppure con l'ausilio di leganti chimici, a seconda del tipo di supporto murario (Figura 3.16).

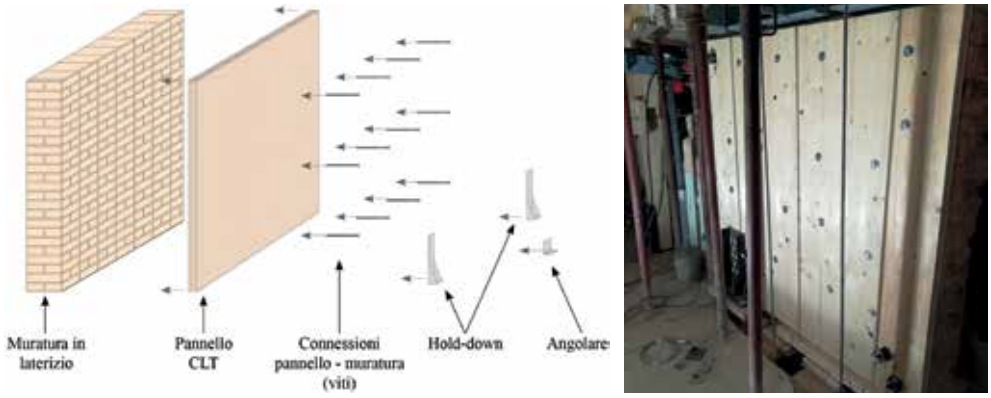
Placcaggio con pareti intelaiate. Il sistema di rinforzo proposto si basa sull'applicazione di un telaio in legno e pannelli in legno di tipo OSB per la mitigazione dei meccanismi di ribaltamento fuori piano e il miglioramento delle prestazioni nel piano degli elementi in muratura [159]. I montanti in legno migliorano innanzitutto la resistenza a flessione fuori piano delle pareti murarie (Figura 3.17). Il collegamento del telaio in legno ai solai mediante zoccoli migliora la connessione parete-diaframma. Infine, i telai in legno collegati alle pareti, con i pannelli OSB ad essi inchiodati, aumentano la resistenza e la capacità di deformazione dei maschi nel loro piano, sia a taglio che a pressoflessione. Eventuali solai flessibili possono essere rinforzati utilizzando gli stessi pannelli utilizzati per le pareti murarie [160].

Placcaggi con pannelli. Tali soluzioni prevedono l'utilizzo di pannelli a strati incrociati di tavole (CLT) oppure di sfogliati (microlamellare/LVL) per il rinforzo locale e globale di strutture in muratura [161] e c.a. [162]. Nel caso di edifici in muratura, i pannelli sono fissati al supporto murario tramite connettori



(a) (b)

Figura 3.17. Placcaggio con pareti intelaiate; panoramica del sistema di rinforzo: layout, componenti (a) e applicazione ad un edificio esistente in muratura (b).



(a) (b)

Figura 3.18. Placcaggio con pannelli CLT di edifici in muratura: componenti (a) e test in-situ (b) [164].

puntuali distribuiti sulla superficie della parete che creano un sistema composito legno-muratura (Figure 3.18 e 3.19). L'interazione con lo scheletro murario esistente gioca un ruolo fondamentale al fine di incrementare la capacità portante e di deformazione delle pareti sottoposte a carico laterale. L'inserimento di collegamenti pannello-pannello permette di aumentare ulteriormente le prestazio-



(a) (b)

Figura 3.19. Placcaggio con pannelli CLT di edifici c.a.: test di laboratorio [166] (a) ed esempi applicativi (b).

ni del sistema rinforzato [163]. Sono state anche indagate delle soluzioni ibride che accoppiano pannelli massicci di basso spessore alle costolature, nell'ottica di ottimizzare l'uso del materiale quando la richiesta di incremento di capacità portante nel piano è contenuta.

Nel caso di applicazione su edifici a telaio in c.a. con tamponamento in muratura, i pannelli lignei vengono collegati esclusivamente al telaio esistente (non sono previste nuove fondazioni) con connettori a gambo cilindrico distribuiti sul bordo del pannello, che trasferiscono le sollecitazioni dal telaio al pannello di rinforzo. A seconda del tipo di tamponamento e degli effetti dell'interazione tamponamento-telaio, sono state messe a punto soluzioni che prevedono il mantenimento, oppure la parziale (es. per tamponamenti a cassa-vuota) o completa rimozione del tamponamento [165]. Nel caso di parziale (o totale) rimozione del tamponamento il pannello ligneo viene fissato alla struttura attraverso un controtelaio, sempre in legno, inserito in luce alla maglia strutturale.

Endoscheletri. La tecnica di rinforzo per edifici esistenti in muratura *Nested Building* appartiene alla categoria degli interventi integrati, capaci di soddisfare molteplici requisiti prestazionali (Figura 3.20). Nello specifico, esso consente:

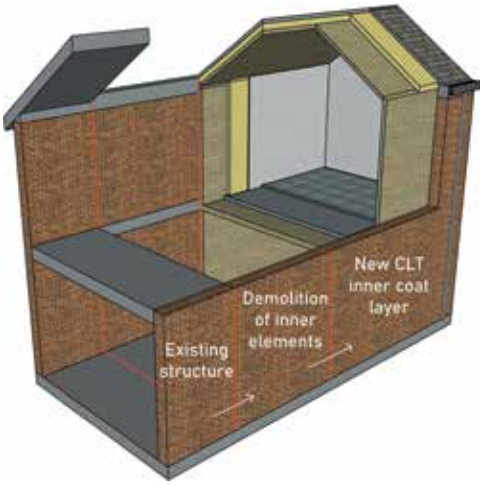


Figura 3.20. Schema applicativo di endoscheletri lignei su edifici in muratura (soluzione *nested buildings*) [167].

i) il rinforzo strutturale e miglioramento sismico dell'edificio, ii) l'aggiornamento delle prestazioni termo-igrometriche, energetiche e funzionali, iii) il mantenimento dell'identità formale esterna.

La procedura operativa consiste nella realizzazione di un endoscheletro all'interno dell'edificio, composto da componenti in legno, in particolare CLT (Cross Laminated Timber) [167]. La nuova struttura integrata legno-muratura consente il rinforzo dell'edificio, mediante l'introduzione di i) diaframmi di piano e ii) pareti accoppiate di rinforzo legno-muratura. Si prevede che gli orizzontamenti lignei in CLT (solai e coperture) siano collegati alle pareti in muratura, in modo da garantirne la stabilità rispetto ai meccanismi fuori piano. Anche la resistenza nel piano delle pareti è migliorata dall'accoppiamento con pannelli in CLT [149, 164], sia a livello di diaframma, che in maniera diffusa tramite connettori in acciaio [168].

Esoscheletri. La tecnica proposta prevede la realizzazione di esoscheletri in legno con pannelli in CLT, che operano in parallelo con l'edificio esistente, incrementando rigidezza e resistenza globali, con riduzione della domanda di spostamento e delle sollecitazioni negli elementi strutturali esistenti [169]. Gli esoscheletri in CLT possono essere concepiti secondo diversi schemi strutturali, a partire da sistemi a pareti semplici o accoppiate fino ai gusci, incrementando progressivamente le prestazioni e riducendo, nel caso dei gusci, le sollecitazioni nel sistema di fondazione (Figura 3.21). Un ruolo chiave è attribuito anche alle connessioni tra l'esoscheletro ligneo e l'edificio esistente, in corrispondenza degli impalcati,



(a) (b) (c)

Figura 3.21. Esoscheletri. Riqualificazione integrata di edificio residenziale: edificio allo stato di fatto (a); edificio con esoscheletro strutturale ligneo (b); edificio con involucro strutturale-energetico e architettonico (c) [170, 171].

e con la nuova fondazione, nonché le connessioni tra pannelli adiacenti. Se opportunamente progettate, le connessioni possono assicurare capacità dissipativa e un comportamento ricentrante, indispensabili per una progettazione orientata al controllo del danno.

3.5.1. Ambiti di applicabilità

Costolature lignee. La soluzione è pensata per il rinforzo nei confronti di possibili meccanismi di ribaltamento fuori-piano di pareti e tamponamenti in muratura. Trova applicazione specialmente ai livelli superiori degli edifici dove sono maggiori i fenomeni di amplificazione dinamica. Le costole lignee possono essere applicate sul lato interno delle pareti (soluzione tipica per gli edifici in muratura), oppure sul lato esterno (ad esempio quando impiegati per presidiare tamponature in edifici a telaio in c.a. e a supporto della creazione di pareti ventilate).

Placcaggio con pareti intelaiate. Questo sistema è stato concepito come rinforzo sismico di edifici in muratura ordinaria. Questi presentano spesso criticità dovute a meccanismi locali (come, ad esempio, il ribaltamento fuori piano di pareti murarie), che impediscono un comportamento globale dell'edificio limitandone significativamente la capacità sismica. Qualora i meccanismi locali siano inibiti, la crisi a taglio nel piano dei maschi murari può risultare deleteria per la risposta globale della struttura non rinforzata, poiché associata a una limitata capacità deformativa.

Placcaggi con pannelli. Tali tecniche possono essere impiegate per il rinforzo integrato di edifici in muratura ordinaria e di strutture a telaio in c.a. co-

struite a partire dal secondo dopoguerra. Con riferimento alle soluzioni studiate per edifici in muratura, la possibilità di applicare il rinforzo in maniera selettiva sugli elementi/pareti maggiormente sollecitate (visto che il rinforzo non modifica la risposta elastica delle murature) rende il sistema "scalabile" e adattabile in relazione alla pericolosità sismica del sito e alla vulnerabilità della struttura in esame. A seconda del posizionamento dei pannelli sul lato interno o esterno delle pareti [172] è possibile sfruttare aspetti quali il trasferimento diretto di sollecitazioni dagli impalcati (rinforzati con soluzioni a base-legno) oppure la continuità dei pannelli su più piani. Anche nel caso di rinforzo di edifici a telaio in c.a. i pannelli posso essere applicati in un numero limitato di maglie (a patto di garantire continuità verticale nell'applicazione dell'intervento fino alla base della struttura) avendo cura, ove risultasse necessario, di intervenire sulle restanti maglie al fine di limitare l'interazione tra i tamponamenti murari e gli elementi strutturali. Per massimizzare durabilità e prestazioni energetiche, la stratigrafia degli elementi non strutturali (es. membrane impermeabilizzanti e pacchetto isolante) varia in relazione alla configurazione di rinforzo adottata [173, 174].

Endoscheletri (*Nested Building*). L'applicazione della tecnica *Nested Building* prevede che le componenti strutturali interne dell'edificio, quali solai e partizioni interne, possano essere demolite, per poter introdurre o realizzare l'endoscheletro. Tali condizioni si riscontrano in edifici esistenti, spesso non di pregio, che abbiano subito altri interventi, spesso onerosi e invasivi (es. superfetazioni o sostituzioni di orizzontamenti in c.a., talvolta peggiorative del comportamento originale dell'edificio). L'endoscheletro in CLT deve essere dimensionato in modo tale da garantire la salvaguardia della vita in caso di eventi sismici attesi, anche in caso di collassi locali di porzioni di muratura. Le prestazioni energetiche e termo-igrometriche sono incrementate dal sistema accoppiato parete in muratura-pannello in legno che, con adeguati dettagli tecnici, permette una riduzione della dispersione termica e un incremento del comfort abitativo [167].

Esoscheletri. La soluzione trova impiego nella riqualificazione sostenibile e integrata [175] di edifici del secondo dopoguerra, in c.a. o in muratura recente, di scarso pregio architettonico. Esistono tuttavia limiti di applicabilità legati alla geometria e alla regolarità dell'edificio, ai limiti dimensionali e meccanici relativi all'impiego dei pannelli in CLT. La soluzione è stata applicata da UNIBG, in collaborazione con altri partner industriali, per il recupero integrato di una palestra con struttura prefabbricata in c.a., con la realizzazione di un esoscheletro a guscio ibrido acciaio-legno [176, 177] e di un edificio residenziale con esoscheletro a pareti accoppiate [170, 171].

3.5.2. Vantaggi e svantaggi

Costolature lignee. La tecnica di rinforzo è caratterizzata da ridottissimo impatto, notevole economicità e facilità di messa in opera. Anche nel caso in cui le costole lignee vengano applicate sul lato interno delle pareti, l'intervento può essere eseguito senza la necessità di interrompere l'uso del fabbricato. Il sistema può essere facilmente integrato con strategie di efficientamento energetico e di rinforzo/irrigidimento dei solai. Particolare attenzione ai dettagli costruttivi è necessaria per garantire adeguata durabilità all'intervento qualora le costole siano applicate sul lato esterno delle pareti.

Placcaggio con pareti intelaiate. Il rinforzo in oggetto rappresenta una soluzione leggera, sostenibile, con costi e tempi di intervento contenuti. Il sistema si pone come primi due obiettivi quelli di incrementare la resistenza fuori piano delle pareti e di migliorare le connessioni tra pareti murarie e solai esistenti, favorendo in questo modo un comportamento globale dell'edificio (Figura 3.22). Infine, il sistema è in grado di incrementare la capacità nel piano dei maschi murari sia in termini di resistenza che di deformazione ultima. L'efficacia del sistema in questo senso è stata dimostrata sia sperimentalmente [158-160, 178] che numericamente [179]. Una procedura analitica dettagliata per il progetto del sistema in oggetto e di tutte le sue componenti (ad esempio: sezioni trasversali degli elementi lignei, numero e resistenza delle connessioni, spessore dei pannelli) è riportata in [180]. Le equazioni proposte sono successivamente applicate e validate attraverso lo studio di un caso specifico [181].

D'altra parte, le dimensioni complessive dei componenti di retrofit sono correlate allo spessore e alla resistenza delle pareti in muratura. Pertanto, all'aumentare dello spessore della muratura, le sezioni trasversali dei telai e dei pannelli in legno devono aumentare al fine di avere un beneficio apprezzabile, almeno per quanto riguarda la resistenza nel piano. Inoltre, vista la sua flessibilità rispetto alla muratura, il sistema non ritarda la prima formazione delle fessure sebbene contribuisca alla riduzione della loro ampiezza massima e alla diffusione più omogenea del danno nel maschio murario [158].

Placcaggi con pannelli. Quando applicate agli edifici in muratura, queste tecniche permettono un notevole incremento delle prestazioni meccaniche; incremento che può essere sfruttato a livello di singolo pannello, di parete o di intero edificio, a seconda della configurazione di rinforzo adottata.

L'applicazione di questi sistemi di rinforzo ha un impatto limitato sull'attivazione del danno (il rinforzo infatti si "attiva" successivamente alla fessurazione delle pareti) ma limita la propagazione delle fessure grazie alla presenza di con-

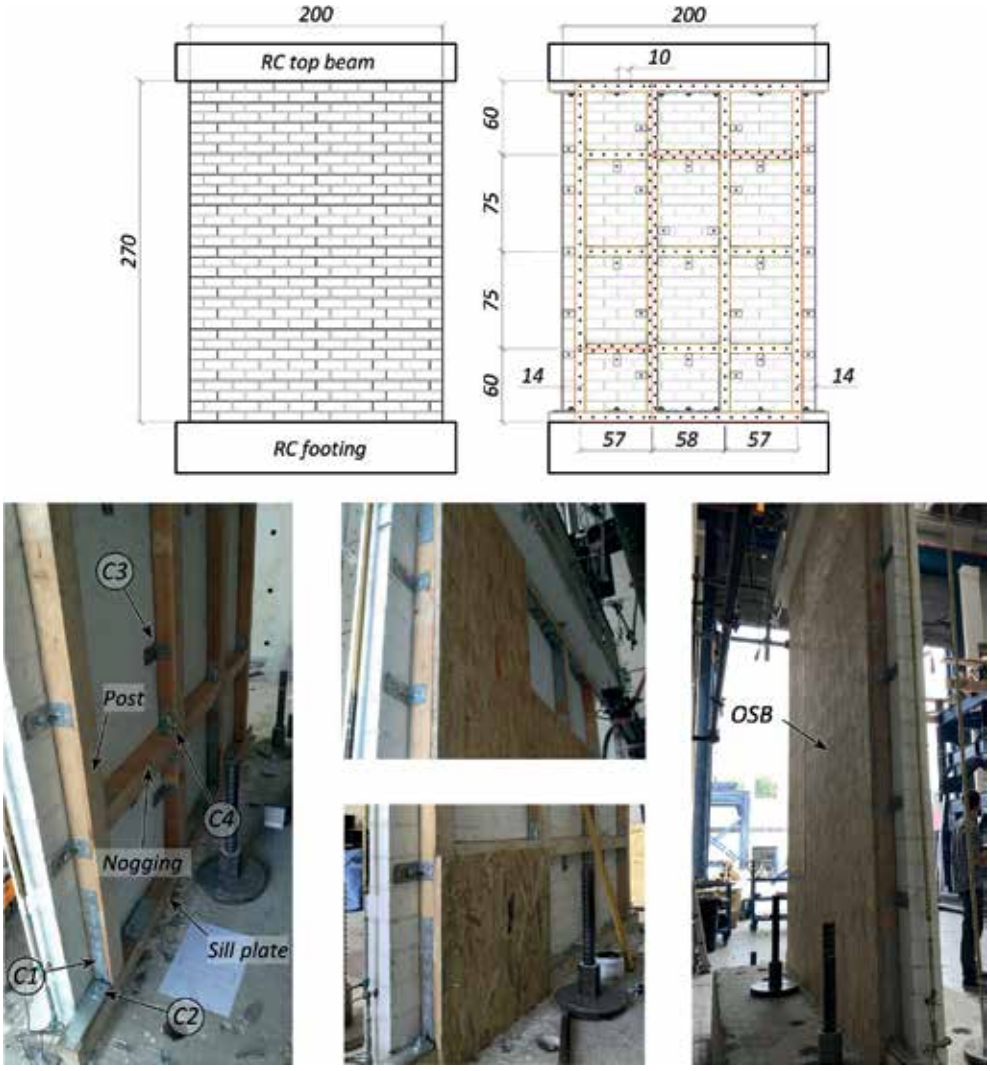


Figura 3.22. Placcaggio con pareti intelaiate: geometria e dettagli del sistema di rinforzo [159].

nettori diffusi sulla parete e ritarda il raggiungimento della condizione ultima. I placcaggi permettono di migliorare anche il comportamento fuori piano grazie alla rigidezza flessionale dei pannelli CLT/LVL e alla presenza dei collegamenti meccanici in grado di impegnare un'azione composita *muro-pannello ligneo*. Il trasporto e l'installazione dei pannelli all'interno del fabbricato (quando la configu-

razione scelta lo prevede), può rappresentare una sfida tecnologica. Tuttavia, per facilitare l'inserimento dei pannelli, è possibile ridurne la lunghezza senza che ciò impatti negativamente sull'efficacia del rinforzo.

Ciascuna delle soluzioni studiate e testate per il rinforzo degli edifici a telaio in c.a. con tamponamento in muratura, può essere parzialmente prefabbricata e messa in opera già integrata con un pacchetto isolante in modo da ridurre costi e tempi di lavorazione. La configurazione di rinforzo meno invasiva (mantenimento dei tamponamenti originali) produce notevoli incrementi di capacità portante senza modificare la rigidezza iniziale della struttura. La configurazione più invasiva (parziale/totale rimozione dei tamponamenti) permette un ulteriore significativo incremento della resistenza laterale ed un aumento della capacità di deformazione a fronte di una marcata riduzione della rigidezza iniziale. Gli incrementi di prestazione appena menzionati fanno affidamento su un trasferimento di sollecitazioni dalle colonne alle travi, le quali dunque devono presentare un'apprezzabile "riserva di resistenza" (spesso riscontrabile nelle situazioni di "trave forte"-"pilastro debole"). L'efficacia dei sistemi di rinforzo basati su placcaggi con pannelli lignei è stata dimostrata sia sperimentalmente [164, 166, 182] sia su casi studio applicativi [165, 183] e sono disponibili diversi approcci di calcolo e di analisi. Particolare attenzione ai dettagli costruttivi è necessaria per garantire adeguata durabilità agli interventi realizzati con placcaggi lignei, in special modo quando i pannelli si trovano sul lato esterno dello scheletro strutturale.

Endoscheletri (*Nested Building*). L'intervento Nested Building permette la riqualificazione integrata di edifici esistenti, consentendone il rinforzo strutturale e l'aggiornamento delle prestazioni energetiche mediante l'impiego pannelli in legno tipo CLT. Il legno è maggiormente sostenibile rispetto ad altri materiali impiegati per il rinforzo degli edifici, quali calcestruzzo armato e acciaio [184], e rispetta i requisiti tecnici richiesti nel miglioramento di edifici esistenti in muratura, quali compatibilità meccanica e chimica, reversibilità, riconoscibilità, rapidità esecutiva, e durabilità.

L'intervento è di rapida esecuzione grazie al sistema di assemblaggio a secco. Tuttavia, la tecnica richiede la realizzazione di un endoscheletro, per il quale può essere necessaria la demolizione di alcune componenti interne e/o disporre determinate aperture di passaggio, mediante parziali demolizioni di pareti (es. in prossimità di finestre e porte). La demolizione interna, per contro, potrebbe favorire nuove configurazioni e destinazioni d'uso per l'edificio, secondo carichi specifici che non sono più limitati dalle condizioni strutturali precedenti.

Grazie alla scarsa, o nulla, necessità di intervento dall'esterno, e delle demolizioni solo interne, l'intervento è adatto a edifici in cui l'identità formale esterna

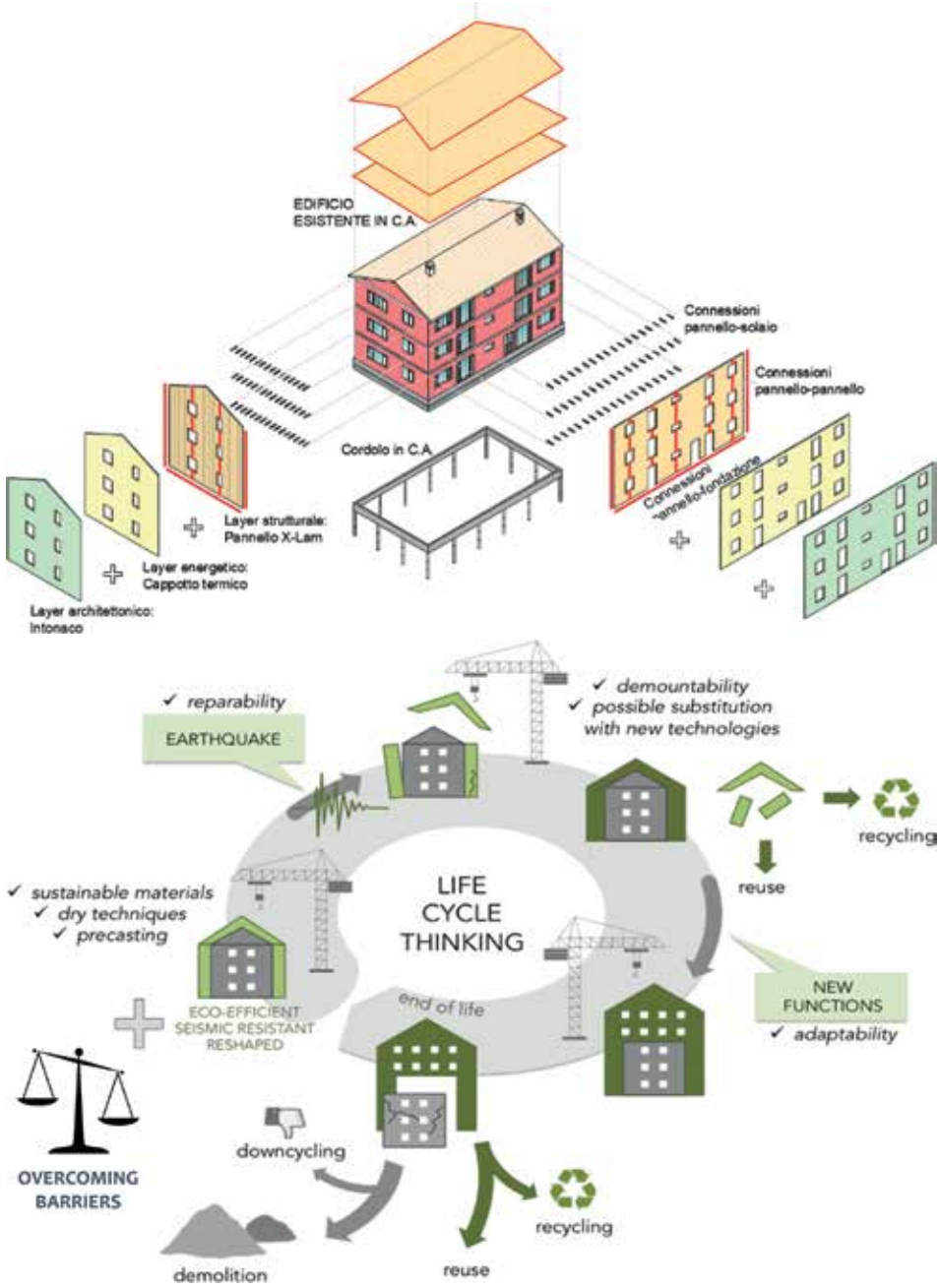


Figura 3.23. Concept generale intervento integrato con esoscheletro in ottica LCT (after Marini et al. 2018 [207]).

debba essere preservata. La progettazione dell'intervento richiede il dimensionamento dei connettori a secco in acciaio e la valutazione globale del sistema integrato, non sempre facilmente ottenibili con strumenti di calcolo convenzionali.

Esoscheletri. L'esoscheletro, assemblato dall'esterno, non necessita la rilocazione degli abitanti durante i lavori. Mediante calibrazione di rigidezza, resistenza, capacità dissipativa e ricentrante del sistema strutturale, consente di perseguire target prestazionali più elevati, tali da assicurare sicurezza e sostenibilità lungo l'intero ciclo di vita, limitando il danno, e di conseguenza gli impatti indotti dal terremoto, su elementi strutturali e non strutturali. L'impiego di un materiale ingegnerizzato a base legno offre notevoli vantaggi in ottica "Life Cycle Thinking" – LCT (Figura 3.23). Inoltre, la tecnologia costruttiva con pannelli CLT risulta ottimale in termini di prefabbricazione e montaggio a secco dei componenti, riducendo tempi e impatti del cantiere, garantendo maggiore flessibilità in caso di aggiustamenti in opera (come la creazione di fori, intagli e altri accorgimenti necessari per gestire le interferenze con l'edificio esistente). La superficie piana dei pannelli facilita la posa degli strati di isolamento e finitura, e può costituire il supporto per ulteriori elementi strutturali e non strutturali (quali balconi e facciate ventilate). L'esoscheletro richiede frequentemente un nuovo sistema di fondazione (più leggero per esoscheletri a guscio, più significativo in caso di setti), costituito da cordoli in c.a. e micropali. La realizzazione delle fondazioni costituisce la fase più impattante in cantiere per questa soluzione. L'applicabilità del sistema è dettata dalla configurazione geometrica degli edifici esistenti e dalle loro vulnerabilità intrinseche. La disposizione dei pannelli CLT richiede infatti regolarità e continuità che non possono essere garantite, ad esempio, in presenza di piani con grandi aperture destinate a box, negozi, porticati. In queste circostanze è possibile ricorrere a soluzioni ibride legno-acciaio.

3.6. Interventi mediante tecniche di isolamento sismico

Mauro Dolce

I moderni criteri di progettazione antisismica hanno come obiettivo fondamentalo quello di evitare il collasso delle strutture per terremoti di forte intensità e il danneggiamento delle parti non strutturali per terremoti di media intensità.

La progettazione antisismica tende a definire sistemi strutturali che hanno una capacità superiore alla domanda determinata dal moto del terreno sottostante la struttura. Un evento sismico genera, infatti, nella struttura delle forze d'inerzia proporzionali al prodotto delle sue masse per le accelerazioni indotte dal terre-

no. Per evitare danni strutturali durante un sisma all'aumentare della sua intensità attesa, sarebbe necessario aumentare proporzionalmente la resistenza della struttura. Tuttavia non è economicamente conveniente aumentare indefinitamente la resistenza della struttura, vista la ridotta probabilità di accadimento di eventi sismici di elevata intensità. Di conseguenza, i codici sismici moderni consentono di far ricorso alla duttilità strutturale per soddisfare la disequazione Capacità ≥ Domanda, che diviene condizione sulla duttilità, o sulle deformazioni e le grandezze ad esse correlate, e non più sulla resistenza. Una filosofia di progettazione basata sull'aumento della capacità porta quindi alla scelta fra due possibili alternative: (i) aumentare la resistenza della struttura, sopportando costi di realizzazione più elevati, (ii) aumentare la duttilità della struttura, con una progettazione finalizzata a sviluppare meccanismi di plasticizzazione favorevoli ("capacity design" o criterio della gerarchia delle resistenze). Il progetto è poi completato con il controllo degli spostamenti interpiano per terremoti di media intensità, così da limitare i danni alle parti non strutturali. Una terza via, che rappresenta una alternativa più efficace delle precedenti è l'isolamento sismico [185, 187], perché realizza la strategia di riduzione della domanda in maniera globale, abbattendo drasticamente l'energia trasmessa dal suolo all'intera struttura.

L'isolamento sismico consiste essenzialmente nel disaccoppiare il moto del terreno da quello della struttura, introducendo una sconnessione lungo l'altezza della struttura stessa (generalmente alla base, nel caso degli edifici, fra la pila e l'impalcato, nei ponti), che risulta quindi suddivisa in due parti: la sottostruttura, rigidamente connessa al terreno, e la sovrastruttura [185]. La continuità strutturale, e con essa la trasmissione dei carichi verticali al terreno, è garantita attraverso l'introduzione, fra sovrastruttura e sottostruttura, di particolari apparecchi di appoggio, detti isolatori, caratterizzati da un'elevata deformabilità e/o da una bassa resistenza al moto in direzione orizzontale e, normalmente, da una notevole rigidezza in direzione verticale Figura 3.24.

La sottostruttura, generalmente molto rigida, subisce all'incirca la stessa accelerazione del terreno, mentre la sovrastruttura beneficerà degli effetti derivanti dall'aumento di deformabilità del sistema di isolamento. Il periodo proprio di vibrazione di edifici ordinari a base fissa spesso ricade proprio nell'intervallo di maggior amplificazione dello spettro di risposta in accelerazione esponendo il sistema strutturale a forze di inerzia significative. L'aumento di deformabilità conseguente all'introduzione degli isolatori porta il periodo proprio del sistema strutturale in zone dello spettro a più bassa accelerazione con significativa riduzione delle accelerazioni trasmesse alla sovrastruttura, drasticamente minori rispetto a quelle prodotte nella configurazione a base fissa. L'aumento del periodo proprio

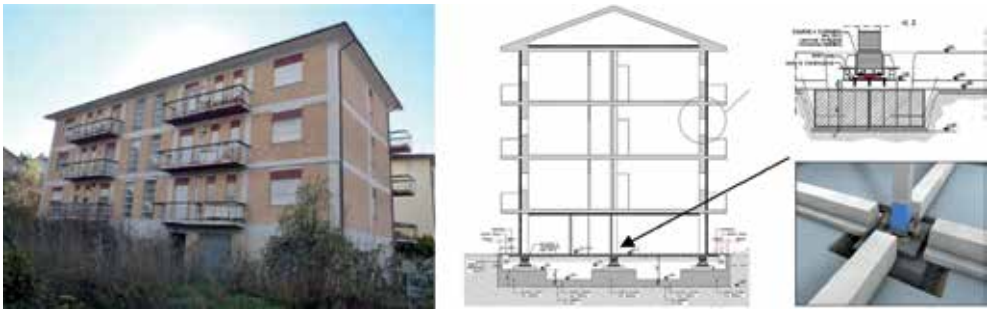


Figura 3.24. Edificio esistente in c.a. migliorato sismicamente attraverso isolemento alla base.

di vibrazione si traduce anche in un incremento di spostamenti, che però si concentrano negli isolatori, mentre la sovrastruttura si comporta quasi come un corpo rigido, subendo spostamenti relativi interpiano molto contenuti e, conseguentemente, senza subire danni alle parti non-strutturali. Per evitare eccessivi spostamenti del sistema d'isolamento, che risulterebbero condizionanti nella progettazione degli impianti a terra o dei giunti di separazione con strutture adiacenti, il sistema di isolamento nel suo insieme può essere dotato di un'elevata capacità dissipativa, corrispondente a rapporti di smorzamento dell'ordine del 10÷30%, ottenute grazie alle caratteristiche intrinseche degli isolatori o al loro accoppiamento con dispositivi che forniscono smorzamento aggiuntivo.

3.6.1. Ambiti di applicabilità

L'isolamento sismico può realizzarsi secondo diverse strategie [185], che possono ricondursi essenzialmente a due:
(i) incremento del periodo, senza o con dissipazione di energia,
(ii) limitazione della forza, senza o con dissipazione di energia.

Nella strategia dell'incremento del periodo si utilizzano dispositivi a comportamento quasi-elastico per abbattere le accelerazioni sulla struttura. La riduzione degli effetti sulla struttura è conseguita principalmente attraverso l'assorbimento nei dispositivi di gran parte dell'energia sismica in ingresso, sotto forma di energia elastica di deformazione.

Nella strategia della limitazione della forza si utilizzano dispositivi a comportamento rigido – o elastico – perfettamente plastico, o comunque fortemente non lineare, con un ramo pressoché orizzontale per grandi spostamenti (incru-

dimento quasi nullo). La riduzione degli effetti sulla struttura avviene attraverso la limitazione, da parte dei dispositivi, della forza trasmessa alla sovrastruttura. L'imposizione di un limite massimo alla forza trasmessa può essere anche vista come un'applicazione del capacity design a livello di sistema strutturale, nel quale viene stabilita una gerarchia tra la resistenza globale della struttura e la "resistenza" del sistema di isolamento. La dissipazione d'energia del sistema d'isolamento è sfruttata essenzialmente per contenere gli spostamenti alla base. Ciò si traduce anche in una riduzione della forza trasmessa nel caso d'incrudimento non trascurabile. Le variazioni brusche di rigidezza tipiche di alcuni legami fortemente non lineari possono comportare maggiori valori delle accelerazioni nella parte alta della sovrastruttura.

La strategia basata sull'incremento del periodo è certamente la più frequentemente adottata nell'isolamento degli edifici, per ragioni diverse, tra cui, non secondarie, quelle legate ad aspetti tecnologici e realizzativi. Quella basata sulla limitazione della forza trova impiego soprattutto nei casi in cui il controllo delle forze indotte dal sisma sulla struttura rappresenta l'aspetto cruciale della progettazione (come può accadere nell'adeguamento sismico delle strutture esistenti), ed in linea di principio anche nei casi in cui la strategia ad incremento del periodo raggiunge i suoi limiti di applicabilità e convenienza (ad esempio in presenza di strutture deformabili o di terremoti attesi con elevato contenuto energetico alle basse frequenze) [185]. Un aspetto positivo della strategia a limitazione della forza è la sostanziale indipendenza dell'efficacia dell'isolamento dalle caratteristiche del sisma (intensità e contenuto in frequenze), a condizione di poter accettare spostamenti anche molto ampi del sistema di isolamento [186].

L'isolamento sismico trova ad oggi impiego anche negli interventi di adeguamento o miglioramento sismico su di un edificio esistente. La definizione della tecnica di intervento presenta problematiche complesse, che possono portare a soluzioni tra loro totalmente diverse, da ottimizzare in relazione alle caratteristiche del singolo edificio ed in particolare:

- alla sua geometria (sviluppo planimetrico e altimetrico),
- alle caratteristiche di resistenza dei materiali,
- al livello di sicurezza della struttura esistente rispetto ai carichi verticali,
- alla sua capacità resistente, pur se minima, alle azioni orizzontali,
- alla distribuzione degli elementi non strutturali ed alla loro configurazione geometrica (tamponature e tramezzature piene o con aperture),
- ai dettagli costruttivi (armature trasversali in travi e colonne, lunghezze di sovrapposizione e ancoraggio, armature nei nodi, per il c.a., ammorsamenti tra pareti, collegamenti tra pareti e solai, ecc. per la muratura, Figura 3.25).

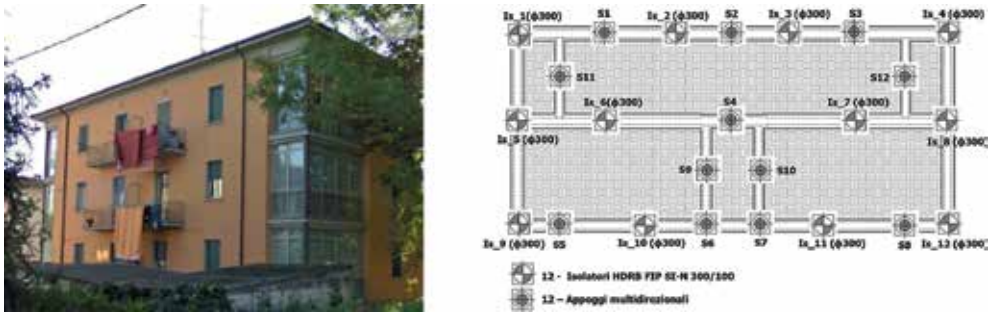


Figura 3.25. Edificio esistente in muratura migliorato sismicamente attraverso isolamento alla base.

La valutazione attenta di tutti questi elementi può portare ad una scelta che vede la strategia dell'isolamento sismico vincente rispetto a soluzioni più tradizionali, qualora siano verificate alcune condizioni sulla resistenza e sulla geometria della struttura. È opportuno, infatti, ricordare che, a differenza di una costruzione tradizionale fissa alla base, la protezione sismica mediante isolamento è affidata alla capacità dell'isolamento stesso di ridurre drasticamente le accelerazioni, e quindi le forze d'inerzia, sulla struttura. Grazie all'isolamento, una struttura con un'opportuna resistenza alle azioni orizzontali, anche significativamente inferiore a quella richiesta ad una struttura fissa alla base, potrà essere in grado di sostenere terremoti violenti mantenendosi sostanzialmente in campo elastico, senza dover ricorrere, per evitare il collasso, alle sue capacità di deformazione inelastica. Quasi sempre l'aspetto più critico in una struttura esistente, pur se progettata con le vecchie norme sismiche, è proprio l'inadeguatezza dei dettagli costruttivi e la mancanza di controllo dei meccanismi di danneggiamento (capacity design), e dunque l'incapacità di sostenere grandi deformazioni inelastiche. Occorre altresì rilevare che anche la presenza di irregolarità strutturali e non strutturali (ad esempio una distribuzione sfavorevole delle tamponature), in pianta o in elevazione, che tipicamente comportano concentrazione di richieste di duttilità in pochi elementi strutturali non in grado di sostenerle, risulta decisamente meno pericolosa in una struttura con isolamento sismico, grazie al mantenimento in campo sostanzialmente elastico della struttura. In definitiva, in una struttura con isolamento sismico, le verifiche di resistenza sono sufficienti a garantire il necessario livello di sicurezza rispetto alle azioni sismiche, e ciò risulta particolarmente favorevole nell'adeguamento di una struttura esistente, nella quale ogni intervento volto a rimediare all'inadeguatezza dei dettagli costruttivi è complicato e costoso.

3.6.2. Vantaggi e svantaggi

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

a. 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;
b. 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;
c. un'elevata protezione del contenuto strutturale;
d. una percezione molto minore delle scosse sismiche da parte degli occupanti.

Quanto detto si traduce, in primo luogo, in una drastica riduzione o nel totale azzeramento dei costi di riparazione dell'edificio a seguito di un evento sismico di elevata intensità. Tutto ciò a fronte di un costo iniziale, per gli edifici nuovi, leggermente superiore (dell'ordine del 10% del costo strutturale [187]), o anche inferiore, rispetto ad una normale struttura antisismica, essendo funzione di numerosi parametri, quali:

– le dimensioni e, soprattutto, il numero di piani;
– la configurazione dell'edificio, in relazione alla facilità di sistemare il piano di isolamento;
– la maglia strutturale, in relazione al numero di dispositivi necessari per realizzare il sistema di isolamento;
– il contenuto in frequenze dell'azione di progetto, in relazione all'entità dell'abbattimento dell'azione;
– la presenza di edifici in adiacenza, in relazione alla realizzazione di giunti di separazione e alle relative problematiche architettoniche e impiantistiche;
– il tipo di dispositivi del sistema di isolamento.

In particolare il numero di piani può risultare sfavorevole se troppo piccolo o troppo grande. Nel primo caso l'incidenza percentuale è ovviamente maggiore, in quanto il costo dei dispositivi e delle maggiori lavorazioni sulla struttura nel piano d'isolamento si ripartisce su un numero limitato di piani, nel secondo caso il periodo della struttura, considerata a base fissa, può risultare elevato e tale da limitare i vantaggi dell'isolamento in termini di riduzione delle forze sismiche.

I vantaggi di tipo socio-economico dell'isolamento sismico si apprezzano appieno soprattutto per gli edifici che, per la funzione ivi svolta, devono ri-

manere operativi dopo un terremoto violento, ad esempio gli ospedali o i centri operativi per la gestione dell'emergenza (centri di protezione civile, caserme dell'Esercito e dei Vigili del Fuoco, ecc.), oppure per le strutture il cui contenuto ha un valore di gran lunga superiore a quello della struttura stessa (scuole, musei, banche, centri di calcolo, ecc.) o per quelle ad alto rischio (centrali nucleari o chimiche, ecc.) [185].

4.
Metodi di valutazione integrata

Negli ultimi decenni, le pratiche di intervento sul patrimonio edilizio esistente adottate in numerosi paesi dell'UE hanno evidenziato come gli aspetti dell'efficienza energetica e della vulnerabilità sismica siano stati affrontati in modo indipendente, seguendo gli standard/guidelines corrispondenti a ciascuno di essi e generalmente non integrati in un processo metodologico comune [188].

I piani nazionali di recupero/intervento comportano il raggiungimento di obiettivi energetici e/o strutturali predefiniti, ma vengono generalmente attuati senza una chiara strategia, perdendo dunque l'opportunità di massimizzare i benefici sfruttando le possibili sinergie degli interventi energetici/strutturali integrati.

Contrariamente alla pratica comune di interventi separati, si può prevedere dunque un grande potenziale per un approccio metodologico integrato in termini di risoluzione di diversi problemi legati alla sostenibilità in senso allargato, ovvero che comprenda anche i concetti di sicurezza, resilienza e confort. Un approccio metodologico integrato si riferisce a un insieme organizzato e coerente di principi, pratiche e criteri che guidano la selezione, implementazione e valutazione delle tecniche di retrofit energetico e sismico, assicurando che siano ottimizzate per la specificità del contesto, efficaci in termini ingegneristici, sostenibili ed economicamente vantaggiose. Ad esempio, l'attuazione dei lavori di ristrutturazione energetica e strutturale in un unico processo riduce i costi aggiuntivi e i disturbi per l'occupante. Tuttavia, un approccio metodologico integrato robusto dovrebbe essere strettamente correlato alla conoscenza degli aspetti tipologici, morfologici e tecnologici e del processo di intervento, nonché alla situazione di contesto dell'edificio. Più in generale, possono essere individuate le seguenti caratteristiche degli approcci metodologici integrati:

– *Multidisciplinarietà.* Dato che nel processo di intervento sugli edifici esistenti sono coinvolti diversi aspetti delle prestazioni dell'edificio, è necessario considerare un approccio multidisciplinare (es. ingegneria strutturale, energetica, ambientale) per identificare l'interazione tra problemi strutturali ed energetici, così come per la determinazione degli impatti ambientali associati al processo di retrofit.

– *Orientamento alla resilienza.* La strategia di selezione ed implementazione di tecniche integrate dovrebbe mirare al miglioramento della resilienza dell'edificio nei confronti degli eventi pericolosi, minimizzando il tempo di inattività, la perdita finanziaria e garantendo la sicurezza degli occupanti.
– *Adattabilità al contesto specifico del sito.* L'approccio dovrebbe essere flessibile, capace di adattarsi a una varietà di contesti edilizi, geografici e climatici.
– *Economia.* Una delle possibili strategie di output di un approccio integrato dovrebbe considerare la capacità di fornire una stima monetaria degli interventi e delle loro conseguenze.
– *Approccio al ciclo di vita.* Considerare gli investimenti iniziali e gli impatti ambientali della demolizione e/o ri-costruzione, valutando allo stesso tempo l'impatto complessivo lungo l'intera vita utile prevista post-intervento.
– *Facilità d'uso.* Facilità d'uso e applicabilità, assicurando che possa essere implementato efficacemente anche nella pratica professionale.

Tali caratteristiche si collegano al contesto generale precedentemente illustrato, evidenziando l'importanza di un approccio integrato nel retrofit degli edifici esistenti, che unisca aspetti di efficienza energetica e resilienza sismica. I paragrafi che seguono riportano i principali risultati delle unità di ricerca attive nel progetto ReLUIS WP5 relativi allo sviluppo dei metodi/approcci di valutazione integrati applicabili a edifici in c.a. e/o muratura esistenti. La diversità delle caratteristiche dei vari metodi (descritte in dettaglio nel paragrafo 4.1 e che possono includere anche più di un punto tra quelli elencati sotto) si può riassumere nei seguenti punti:

1. *Scala temporale di riferimento – Iniziale vs Life Cycle.* Nel primo caso, l'approccio prevede la quantificazione di prestazioni (ingegneristiche, economiche, ambientali e/o sociali) allo stato iniziale dell'intervento, concentrandosi sulla selezione efficace di tecniche combinate derivante da criteri economici di breve termine (es. minimizzazione del costo iniziale dell'intervento). Tuttavia, l'approccio life cycle va oltre lo stato iniziale, ossia considerando l'intero ciclo di vita dell'edificio. Questo include, ad esempio, i costi di manutenzione, la durabilità delle soluzioni implementate, e i benefici a lungo termine in termini di efficienza energetica e resistenza sismica e i costi/impatti connessi al fine vita dell'edificio. È un approccio più sostenibile e olistico che assicura che gli edifici rimangano funzionali, sicuri ed efficienti nel lungo termine.
2. *Scala dimensionale dell'applicazione – Singolo Elemento vs Intero Edificio.* Focalizzarsi su un singolo elemento, come elementi di facciata, può permettere soluzioni altamente specializzate e ottimizzate per quella specifica componente. Tuttavia, la considerazione dell'intero edificio permette un'analisi più comprensiva, valutando l'interazione meccanica, energetica ed economica tra diverse compo-

nenti (e. strutturali e non strutturali) e impianti dell'edificio. Questo approccio globale assicura che le soluzioni siano ottimizzate non solo a livello individuale, ma anche nel contesto dell'intera struttura, garantendo coerenza e integrazione funzionale.

3. *Discretizzazione degli interventi con target prestazionali sismici ed energetici.* Gli interventi incrementali permettono miglioramenti sismici ed energetici step-by-step, permettendo flessibilità e adattabilità. Possono essere focalizzati su specifici target prestazionali e possono essere implementati in base alle priorità, ai budget disponibili e alle esigenze emergenti. Questo approccio è pratico, ma richiede una pianificazione e una valutazione attente per assicurare che ogni intervento contribuisca efficacemente agli obiettivi complessivi.
4. *Definizione di curve di Iso-Performance.* Le curve di iso-performance permettono di comparare l'efficacia di diverse tecniche di retrofit che utilizzano materiali diversi. Questo strumento è cruciale per identificare soluzioni che offrono il miglior equilibrio tra costi (economici ed ambientali), performance e durabilità. Serve a visualizzare e quantificare l'impatto delle varie opzioni disponibili, facilitando decisioni informate basate su dati tangibili.
5. *Ottimizzazione dei Costi.* La determinazione dei costi "ottimali" si basa su formulazioni matematiche e analitiche per minimizzare i costi associati agli interventi sismici ed energetici massimizzandone i benefici tecnici e funzionali. L'applicazione del metodo MCDM (Multi-Criteria Decision Making) introduce un livello aggiuntivo di complessità e precisione, considerando molteplici fattori e criteri per assicurare che le decisioni siano olistiche e riflettano un ampio spettro di considerazioni.
6. *Metodi Olistici e/o Basati su LCT.* I metodi olistici considerano l'edificio e il suo contesto in maniera globale, mentre i metodi basati su LCT (Life Cycle Thinking) si concentrano sulla minimizzazione degli impatti dell'edificio durante il suo intero ciclo di vita. Entrambi questi approcci sono fondamentali per assicurare soluzioni sostenibili ed efficaci. Mentre l'approccio olistico assicura che tutti gli aspetti dell'edificio e del suo contesto siano considerati, la condivisione dei principi LCT assicura che le soluzioni siano sostenibili, praticabili e vantaggiose nel lungo termine.

In aggiunta alla descrizione dettagliata dei vari metodi sviluppati dalle varie unità di ricerca, nel paragrafo 4.2 questi ultimi saranno applicati ad alcuni dei casi studio individuati ed ampiamente discussi nella sezione dedicata del presente Volume. Lo scopo è quello di valutarne la reale applicabilità e capacità di identificare le strategie più efficaci ed efficienti in vari contesti, promuovendo l'adozione delle migliori pratiche di intervento a seconda delle esigenze specifiche degli stakeholder.

4.1. Descrizione metodologica

Costantino Menna, Chiara Passoni, Linda Giresini, Ricardo Monteiro

4.1.1. Metodi incrementali

La metodologia consiste nel valutare, al tempo iniziale dell'intervento (quindi non sul ciclo di vita della struttura), una strategia di retrofit incrementale che integri simultaneamente misure strutturali ed energetiche, rispettando i vincoli fisici, tecnici e sociali associati agli edifici esistenti in cemento armato e muratura. Questo approccio considera come fattibili esclusivamente gli interventi combinati di miglioramento energetico e strutturale che risultano essere mutualmente compatibili. Tale compatibilità impone che gli interventi siano realizzabili alla stessa scala dimensionale dell'edificio, sia essa relativa a componenti specifici, all'involucro edilizio, o ad altri elementi esterni o interni. Gli interventi idonei devono inoltre presentare una durata di esecuzione praticamente compatibile, consentendo di minimizzare l'impatto sulle normali attività svolte all'interno degli edifici. La selezione delle soluzioni di retrofit ottimali è influenzata dalla disponibilità di risorse economiche e dalla necessità di limitare i disagi durante i lavori, criteri questi particolarmente rilevanti in contesti sensibili come gli edifici pubblici e residenziali.

La valutazione prestazionale dell'intervento combinato è basata sulla classificazione delle opzioni tecniche disponibili ed in funzione della loro integrabilità; quest'ultima è organizzata in base al livello di invasività e il tempo necessario per la loro implementazione. Un quadro concettuale dettagliato della procedura, inclusi i livelli di intervento, le tecniche di retrofit selezionate, gli obiettivi di performance e l'integrazione degli interventi nel contesto di una progettazione olistica, è illustrato schematicamente in Tabella 4.1.

I miglioramenti ottenibili dall'intervento combinato sono tipicamente generalizzabili in termini di sicurezza sismica ed efficienza energetica, più in dettaglio tramite due indicatori fondamentali: il primo è l'indice di sicurezza sismico, calcolato come rapporto tra l'accelerazione di picco al suolo che determina il raggiungimento dello Stato Limite di salvaguardia della vita (PGAc) e quella di progetto (PGAd) prevista nel sito dell'edificio edificio; il secondo è il consumo energetico primario totale (PEC), espresso in kWh/m² anno, determinato conformemente alle normative italiane vigenti. Entrambi gli indicatori fondamentali possono essere determinati secondo tipologie di analisi specifiche, semplificate o complesse (es. modelli non-lineari), o ancora utilizzando la classificazione simica ed energetica secondo le normative vigenti; nello studio di [189] si riportano alcuni esempi.

Tabella 4.1. Relazione tra livelli di intervento combinati e invasività degli stessi.

			INTERVENTI DI EFFICIENTAMENTO ENERGETICO						
			Incremento del livello di invasività, incremento di efficacia →						
			Basso			**Medio**		**Alto**	
		Tecnica di retrofit	Valvole termost.	Sostit. Finestre	Isolamento copertura	Insuffl.	Isolam. Termico	Nuovi Impianti	Energia rinnovabile
INTERVENTI DI RETROFIT SISMICO Incremento del livello di invasività, incremento di efficacia →	**Basso**	Incamiciatura FRP	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Incamiciatura Acciaio	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		FRCM/ TRM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Medio-Alto	Incamiciatura c.a.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Controventi in acciaio	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Esoscheletri esterni	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Alto	Setti/pareti in c.a.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		Isolamento alla base	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Durata dell'intervento:			✓ *Breve*		✓ *Media*		✓ *Lunga*		

Il livello di invasività di un intervento di miglioramento sismico basato sull'inserimento dell'isolamento sismico alla base dipende molto dalla geometria dell'edificio e dalle caratteristiche della struttura. Infatti, sotto determinate condizioni, l'inserimento del sistema di isolamento sismico può essere effettuato senza richiedere interventi sulle strutture in elevazione, ad eccezione del piano di isolamento, e senza la necessità di evacuazione dell'edificio.

Questa metodologia incrementale evidenzia come, procedendo verso livelli di efficacia di intervento superiori atti a migliorare le prestazioni sismiche ed energetiche, si verifichi un incremento proporzionale nella complessità degli interventi, nella loro durata e nei costi associati. Questo consente ai proprietari e ai progettisti di effettuare scelte informate riguardo il livello di interven-

to da perseguire, bilanciando le prestazioni desiderate con l'impatto e il costo degli interventi.

È fondamentale sottolineare che, sebbene la metodologia sia applicabile a un ampio spettro di edifici, le specifiche soluzioni di retrofit devono essere attentamente valutate caso per caso, per assicurare che siano ottimali rispetto alle particolari caratteristiche e necessità di ogni singolo edificio. Inoltre, sebbene questo metodo porti a soluzioni integrate pratiche e compatibili, non vi è possibilità di approfondire le prestazioni nel ciclo di vita ma unicamente in una fase iniziale del progetto dell'intervento.

4.1.2. Metodologia VAN – Valore Attuale Netto

Nell'ambito dell'applicazione del metodo VAN, la prestazione integrata sismico-energetica viene valutata a partire da una analisi disaccoppiata della vulnerabilità sismica e dell'efficienza energetica della struttura nello stato di fatto e negli stati di progetto proposti (uno per ogni livello di intervento, qualora siano previsti approcci incrementali). La vulnerabilità sismica viene valutata partendo dalla costruzione di un modello strutturale non-lineare, in grado di cogliere il comportamento della struttura in condizioni ordinarie e di danneggiamento fino al collasso. La prestazione sismica della struttura è espressa in termini di rapporto ζ_E tra la capacità laterale e la domanda sismica. In accordo con le linee guida italiane, la classe di rischio sismico per l'edificio si determina prendendo la peggiore tra le due ottenute calcolando gli indici:

- **IS-V** (F → A+): indice di sicurezza, definito come il rapporto tra la capacità della struttura e la domanda del sito, entrambe espresse in termini di accelerazione di picco al suolo (in inglese *peak ground acceleration*, PGA) in condizioni di SLV;
- **PAM** (G → A+): perdita annua media (in inglese *expected annual losses*, EAL), definita come il rapporto tra il costo di riparazione del danno causato da tutti gli eventi sismici che possono verificarsi nel corso della vita utile dell'edificio e il numero di anni, rapportato al valore dell'edificio.

L'efficienza energetica è valutata considerando il fabbisogno specifico di energia primaria (dall'inglese, Primary Energy Consumption, PEC) dell'edificio nell'arco di un anno, espresso in *kWh/(m²a)*. La classe energetica viene ricavata confrontando questo valore con il corrispondente calcolato sull'edificio di riferimento, in accordo con la norma UNI-TS 11300. In accordo con la norma, il fabbisogno di energia primaria è calcolato sommando i fabbisogni energetici per

condizionamento invernale ed estivo dell'aria, acqua calda sanitaria, ventilazione, illuminazione e trasporto. La norma permette di valutare il fabbisogno adottando modelli quasi-stazionari; tuttavia, l'uso di modelli dinamici permette di avere informazioni più dettagliate e stime più precise di questo indicatore.

Costi e tempi di esecuzione degli interventi. A valle di queste analisi, gli indicatori di prestazione sismica ed energetica associati allo stato di fatto e a quello di progetto nelle ipotesi di intervento sono noti e possono essere elaborati. In particolare, sia nel caso sismico che in quello energetico è possibile quantificare il beneficio apportato dai vari interventi, inteso come risparmio economico ΔEAL, per semplice differenza tra le perdite attese prima ($EAL_{as\ built}$) e dopo ($EAL_{retrofitted}$) l'intervento:

$$\Delta EAL\ [€] = \left(EAL_{as\ built} - EAL_{retrofitted}\right) \times Building\ value \tag{4.1}$$

L'efficacia dell'investimento è valutata attraverso il periodo di ritorno dell'investimento (in inglese *payback period*, PBP), che corrisponde al numero di anni dopo il quale il beneficio generato dall'intervento è uguale al costo iniziale sostenuto. Se il PBP è inferiore alla vita residua dell'edificio, l'intervento può essere considerato economicamente vantaggioso. Questo indicatore può essere valutato costruendo la curva del valore attuale netto (in inglese *net present value*, NPV) e osservando dove questa interseca l'asse delle ascisse.

Nel contesto della valutazione sismica, l'indicatore NPV è espresso dalla seguente formula:

$$NPV_S = \sum_{t=1}^{T} \frac{\Delta EAL[€]}{(1+r)^t} - C \tag{4.2}$$

dove t è il tempo in anni, r è il tasso di interesse, che in questo caso è assunto pari a 1%, T è la vita residua dell'edificio ed è pari a 50 anni, e C è il costo dell'intervento.

Analogamente, nel contesto della valutazione di prestazione energetica è possibile valutare l'intervento ottimale in funzione del valore attuale netto NPV espresso dalla formula:

$$NPV_E = -I_0 + R\sum_{j=1}^{n} \frac{1}{(1+a)^j} \tag{4.3}$$

dove I_0 è l'investimento iniziale, R è il flusso economico reale generato dal risparmio energetico, j è il tempo in anni, n è la vita residua e a è il tasso di interesse, che in questo caso è assunto pari a 3%. I costi dell'energia sono stati valutati

assumendo 0,11 €/kWh come costo del gas, 0,22 €/kWh per l'elettricità e 0,06 €/kWh per l'energia fotovoltaica in esubero rispetto al fabbisogno dell'edificio.

Infine, è possibile stimare il tempo di esecuzione dell'intervento e interruzione delle attività dell'edificio. Questo parametro è significativo, in quanto incrementa il costo reale complessivo dell'intervento dovuto al ricollocamento degli abitanti e l'eventuale periodo di inattività/fermo produttivo. La valutazione può prendere in considerazione un numero variabile (ma realistico) di gruppi di lavoro, ciascuno formato da due lavoratori specializzati più uno non specializzato. Per ogni livello di intervento, il tempo di inattività dell'edificio varia a seconda del numero di squadre che vengono assegnate a ciascuna fase dell'intervento.

Aspetti peculiari del metodo VAN. Al fine di ottenere una valutazione quanto più generale delle strategie di intervento combinato, è necessario che il metodo conservi una prospettiva multidisciplinare. In accordo con questo approccio, il metodo presentato valuta non solo gli aspetti strutturali delle soluzioni di intervento proposte, ma anche quelli energetici attraverso l'analisi del fabbisogno di energia primaria (convertibile in emissioni di CO_2) e quelli economici in termini di risparmio sui consumi e sui potenziali danni, costo effettivo dell'intervento e incentivi proposti dai diversi governi. Il metodo, inoltre, non si concentra solo sullo stato iniziale dell'intervento, ma è in grado di includere alcuni aspetti che riguardano l'intero ciclo di vita dell'edificio. In particolare, la valutazione su una scala temporale più ampia viene svolta attraverso la stima dei risparmi ottenibili: al variare della soluzione di intervento, le quote di risparmio sul costo dell'energia e sul danno potenziale in caso di terremoto sono valutate nel corso di tutta la vita residua. La valutazione viene svolta in questo caso a scala di intero edificio. Come riportato in precedenza, questo approccio permette di valutare l'interazione tra le diverse componenti (involucro, solai e impianti), restituendo informazioni sul comportamento d'insieme dell'edificio.

I dati necessari per la valutazione di interventi combinati con il metodo VAN sono essenzialmente di quattro tipi: geometrico, strutturale, energetico ed economico. I dati di tipo geometrico, quali la superficie e il volume, permettono di elaborare le altre informazioni, trasformandole in totali o specifiche (ad esempio, consumi e costi). Gli input di carattere strutturale quantificano la prestazione sismica della struttura e sono l'indice di prestazione sismica IS-V e l'indice PAM; dal punto di vista energetico è necessario conoscere il fabbisogno annuale di energia primaria. I precedenti possono essere convertiti in parametri di tipo economico (perdite, risparmi): a questi si aggiungono i costi e gli eventuali incentivi nazionali previsti (con relativa durata temporale). Dall'applicazione del metodo è possibile

ottenere il valore annuo netto al variare dell'anno in cui si colloca l'analisi. La valutazione di questo indicatore estesa all'intera vita residua dell'edificio permette di ricavare la curva costi (in euro) vs. tempo caratteristica di ogni soluzione proposta. In generale, la curva, a valori inizialmente negativi, è monotona crescente e si annulla in un unico punto: Il valore di tempo (PBP) in corrispondenza del quale la curva interseca l'asse delle ascisse rappresenta il metro di confronto tra le varie alternative: minore il valore, maggiore la convenienza.

4.1.3. Metodi multicriterio basati sulla valutazione del costo economico nel ciclo di vita

Il metodo rientra nella famiglia dei modelli multicriterio e si basa sul consumo di energia primaria (E), la capacità sismica (S), e il beneficio economico (B). Dal momento che quest'ultimo può essere calcolato per entrambe le altre due componenti, nello spazio tridimensionale che si viene a definire, esso rappresenta l'asse z, mentre le singole misure di intervento sono rappresentate da triplette (e; s; b), cioè punti nello spazio 3D <E, S, B>. Avendo cura di applicare una normalizzazione di scala ai valori assoluti, dove lo stato di fatto rappresenta in genere la situazione più sfavorevole, è possibile limitare le triplette nell'intervallo [0;1] e quindi ottenere un dominio limite rappresentato dal cubo di lato 1 con uno spigolo sull'origine (Figura 4.1). La normalizzazione avviene in modo tale che la singola situazione ottimale riceva la valutazione più alta, quindi quella con i consumi minori ma con la capacità sismica e i benefici economici complessivi più alti.

La regola decisionale rappresenta quindi la relazione "ideale" attesa tra i criteri e definisce l'ordinamento delle misure sulla base della distanza di ciascuna dal modello. Per ottenere la regola complessiva si può partire dalla rappresentazione grafica degli stessi a coppie, nel rispettivo piano. Ipotizzando di dover raggiungere un compromesso tra l'efficienza energetica e i costi in funzione della disponibilità a pagare dell'investitore si può stabilire un modello lineare tra E e B [190], che può essere adottato anche per S e B, dove il costo impone un limite al miglioramento sismico ottenibile. Al contrario, la relazione tra E e S non è immediata, poiché le due discipline sono di fatto indipendenti, e i modelli esistenti offrono approcci molto diversi, da curve ellittiche chiuse [191] a curva aperte di tipo iperbolico [192]. La proiezione in 3D di questi modelli assieme alle rette negli altri due piani genera una superficie complessa; pertanto, si può adottare una relazione lineare anche tra S e E, ottenendo nel grafico tridimensionale la retta

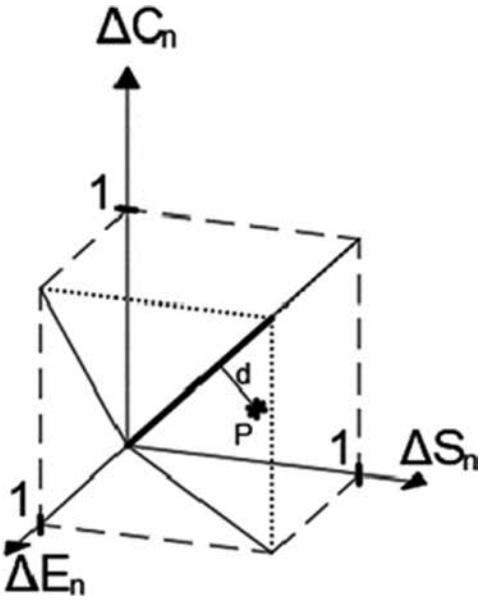


Figura 4.1. Rappresentazione grafica del modello decisionale nello spazio consumi energetici (E) - prestazione sismica (S) - beneficio economico (C).

che taglia in diagonale il cubo che descrive il dominio passando per l'origine e il punto (1;1;1). La regola considera l'equivalenza dei tre criteri (e=s=b) la situazione ottimale (Figura 4.1).

Il modello ordina le misure di intervento in funzione della distanza tra i punti che le rappresentano e la diagonale del cubo (Eq. 4.4):

$$\begin{cases} e = 1 - t \\ s = 1 - t \\ b = 1 - t \end{cases} \tag{4.4}$$

La distanza è calcolata mediante la Eq. 4.5:

$$d = \sqrt{(e_p - e_m)^2 + (s_p - s_m)^2 + (b_p - b_m)^2} \tag{4.5}$$

dove il pedice *m* indica le prestazioni energetiche e strutturali e il costo della *m*-esima misura di intervento e il pedice *p*, la loro proiezione sulla retta (Eq. 4.6)

$$e_p = s_p = b_p = 1 - \frac{3 - e_m - s_m - b_m}{3} \tag{4.6}$$

I consumi energetici (E), allo stato di fatto e per la *m*-esima misura di intervento energetico, sono calcolati alla scala globale dell'edificio e sulla base dei fab-

bisogni dell'edificio per riscaldamento condizionamento, acqua calda sanitaria e funzionamento delle apparecchiature elettriche e sono poi convertiti in energia primaria secondo le disposizioni normative italiane. Il parametro di energia primaria consente di stimare anche il costo annuale dei consumi in modo semplificato, ad esempio in funzione del prezzo del gas metano. Le prestazioni sismiche (S), allo stato di fatto e nelle configurazioni di intervento, sono calcolate a livello globale dell'edificio e sono descritte dalle accelerazioni di capacità per i quattro stati limite di riferimento, e in particolare allo SLV, ricavate da analisi statiche non lineari su modelli globali. Questi valori permettono di ricavare anche la PAM, da cui dedurre l'entità delle perdite annuali generate dal danno simico in percentuale rispetto al valore di ricostruzione dell'edificio. La PAM va calcolata considerando una vita di riferimento di 30 anni, per poter essere omogenea con la finestra temporale dell'analisi economica. Per ogni misura di intervento vanno anche determinati i costi di realizzazione. Tuttavia, la convenienza di una soluzione può essere stabilita solo valutandone i costi nel ciclo vita (LCC), convenzionalmente assunto in 30 anni (Eq. 4.7):

$$LCC = C_I + \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \sum (C_M + C_E + C_S) \tag{4.7}$$

in cui C_I è il costo dell'investimento iniziale, C_M il costo della manutenzione, C_E il costo dei consumi energetici e C_S l'ammontare delle perdite sismiche, mentre il fattore davanti alla sommatoria consente l'attualizzazione delle annualità. Il beneficio B di ciascuna soluzione (pedice m), singola o combinata, è valutato in termini differenziali rispetto allo stato di fatto (pedice AB) [191], eventualmente includendo l'incremento di valore dell'immobile (MPP), dovuto alla sua maggiore appetibilità sul mercato a seguito degli interventi sismici o energetici (Eq. 4.8).

$$B_M = MPP_{E,S} + LCC_{AB} - LCC_m \tag{4.8}$$

I risultati dell'applicazione del metodo si ottengono misurando la distanza del punto P rappresentativo di una generica soluzione (consumi; perdite; beneficio) dalla retta "ottimale" consumi=perdite=beneficio (Eqq. 4.4-4.6); tipo di output: graduatoria degli interventi. Il metodo proposto può essere utilizzato per valutare sia interventi singoli, energetici o sismici, sia combinati ed è caratterizzato da multidisciplinarità, poiché considera 3 criteri (consumi energetici, perdite sismiche e costi nel ciclo vita in 30 anni) il cui studio combinato può essere utilizzato per definire schemi di incentivazione statale.

4.1.4. Identificazione dell'intervento combinato ottimale con approccio Multi-Criteria Decision Making (MCDM)

La metodologia Multi-Criteria Decision Making (MCDM) applicata a problemi di ingegneria strutturale, ampiamente descritta in [193-195], si basa su un metodo di media ponderata per identificare la soluzione ottimale e considera le prestazioni di diverse alternative di retrofit su un'ampia gamma di variabili decisionali (VD). Tale metodologia può essere utilizzata sia in caso di interventi sismici locali che interventi globali, per interventi di riqualificazione e ristrutturazione energetica, nonché per interventi integrati sismici ed energetici. Il metodo richiede la definizione di variabili decisionali di diversa natura (es., tecnica, sociale, economica) atte a garantire al decision-maker di considerare vari fattori e criteri per assicurare che le decisioni siano olistiche. Nel metodo proposto, le variabili decisionali considerate sono otto (Figura 4.2) ed abbracciano diversi macrosettori, che possono essere riassunti in economico, ambientale, sociale e tecnico, tali da rendere l'approccio multidisciplinare e curante degli aspetti di sostenibilità.

Sebbene si stiano sviluppando metodologie semplificate, atte a permettere un più ambio utilizzo della metodologia, l'attuale framework prevede l'utilizzo di metodologie rigorose: (i) analisi dinamiche non lineari, (ii) la derivazione di curve di fragilità a partire dai risultati del punto (i), (iii) la valutazione delle perdite

Variabile	Settore	Definizione	Descrizione	Importanza	Peso
C1	Economico	Costo di istallazione	Il costo di installazione è il costo combinato degli schemi di retrofit sismico ed energetico per ogni alternativa, considerando le efficienze che possono essere ottenute implementando entrambi gli schemi di retrofit simultaneamente	Alta	0.15
C2		Costo annuo previsto	Il costo annuale previsto di un'alternativa di retrofit comprende tre componenti: le perdite annuali previste (EAL), il costo di manutenzione dei componenti di retrofit e il costo energetico annuale (AEC)	Alta	0.19
C3	Ambiente-Sostenibilità	Impatti ambientali previsti nel ciclo di vita	Gli LCEI attesi sono calcolati utilizzando l'equazione proposta da Caruso et al. (2020): l'equazione comprende diverse componenti: Impatto Ambientale di Installazione (IEI) dell'alternativa di retrofit, l'Impatto Ambientale Annuale Previsto (EAEI) della struttura retrofittata, la vita utile prevista (SL) della struttura dopo il retrofit, l'Impatto Ambientale di Manutenzione (MEI) totale dell'alternativa durante la vita utile prevista e la superficie totale (A) dell'edificio	Alta	0.18
C4	Sociale	Probabilità annua di collasso	Tasso annuo di danni strutturali che potrebbero causare crolli	Media	0.14
C5		Durata degli interventi	Stima della durata dei lavori di intervento strutturale	Media	0.13
C6		Impatto architettonico	L'impatto degli schemi di retrofit strutturale ed energetico; se si presume che gli schemi di retrofit energetico abbiano un impatto visivo altrettanto basso una volta completata la costruzione, si può considerare solo l'impatto degli schemi di retrofit strutturale	Bassa	0.06
C7	Tecnico	Necessità di manodopera specializzata/conoscenze progettuali	Stima del fabbisogno di manodopera specializzata/conoscenze progettuali, utilizzando l'AHP e il giudizio degli esperti	Bassa	0.05
C8		Richiesto intervento in fondazione	Il rapporto massimo delle reazioni verticali tra l'edificio caso-studio e ciascuna delle alternative di retrofit viene utilizzato per rappresentare la quantità di lavoro necessario per migliorare le fondazioni della struttura esistente per far fronte ai carichi della struttura retrofittata.	Media	0.10

Figura 4.2 Sintesi delle variabili decisionali e dei corrispettivi pesi.

in modalità component-based, secondo PACT di FEMA P-58 [208], (iv) analisi delle performance energetiche. Le variabili decisionali, per ogni intervento combinato di retrofit sismico e di efficienza energetica, vengono quindi quantificate utilizzando le espressioni riportate in Tabella 4.2.

A ciascuna delle variabili decisionali è stato assegnato un peso [195], come indicato in Figura 4.2, in funzione della loro importanza, definito utilizzando la procedura di gerarchia analitica [196]. Tali pesi potrebbero inoltre essere modificati in funzione dell'esperienza del decisore o eventuali circostanze specifiche. Le variabili decisionali C1, C2 e C3 sono considerate le più rilevanti, come dimostra il valore dei loro pesi, mentre C6 e C7 sono considerate meno rilevanti. Si preci-

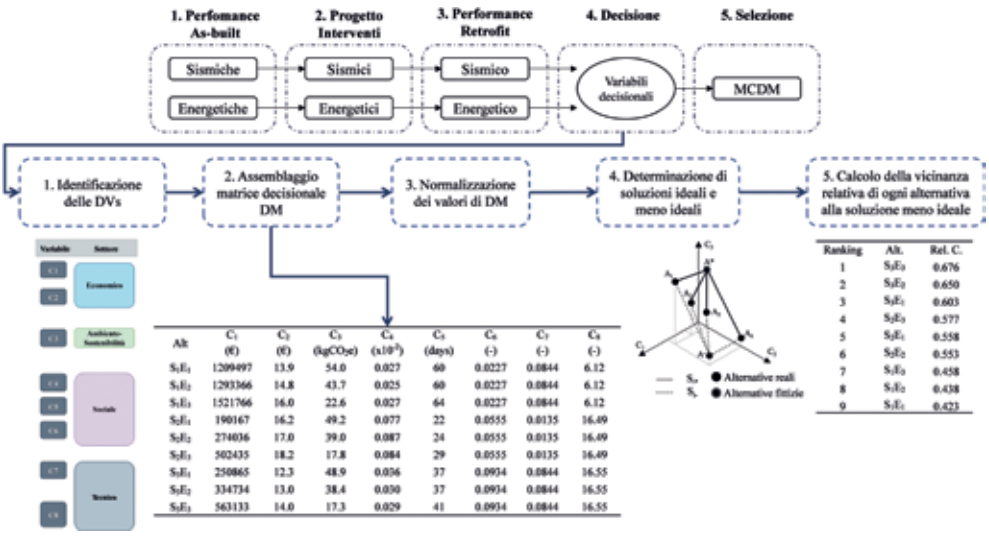
Tabella 4.2. Riassunto delle espressioni necessarie alla quantificazione delle variabili decisionali.

DV	Equazione
C1	$C_{pre_retrofit} + C_{retrofit_inst} + C_{post_retrofit}$
C2	$EAC = \frac{MC + (EAL + AEC) \times SL}{A \times SL}$ $MC = \sum_{i}^{nr_i} \frac{C_i \times IR \times \left(1 - IR^{SL/FI_i}\right)}{(1 - IR)}$
C3	$LCEI = \frac{IEI + EAEI_{post-retrofit} \times SL + MEI}{A \times SL}$
C4	Definita a partire dalla curva di fragilità al collasso e dalla curva di hazard sismico
C5	Durata complessiva dei lavori per l'installazione del retrofit, considerando tutte le fasi di cantierizzazione fino a chiusura dei lavori.
C6	Procedura di gerarchia analitica (AHP) con la matrice delle preferenze basata sul giudizio professionale del decision-maker.
C7	Procedura di gerarchia analitica (AHP) con la matrice delle preferenze basata sul giudizio professionale del decision-maker
C8	$max\left(\frac{R_{Z,as-built}}{R_{Z,retrofit}}\right)$

Tutte le variabili considerate e i fattori di seguito riportati sono dettagliatamente descritti in [195]: $C_{pre_retrofit}$ = costo dei lavori di preparazione necessari per l'applicazione dell'intervento di retrofit; $C_{retrofit_inst}$ = costo dell'installazione del retrofit; $C_{post_retrofit}$ = costo dei lavori di ripristino necessari dopo l'applicazione dell'intervento di retrofit; MC = costo di manutenzione; AEC = costo energetico annuale; EAL = perdita annua attesa; A – superficie; SL = vita utile della struttura; $EAEI_{post\text{-}retrofit}$ = impatto ambientale annuo atteso della struttura retrofittata; IEI = impatto ambientale dell'installazione; IR = tasso di inflazione; MEI = EI totale di manutenzione dell'alternativa nel corso della vita utile prevista; $R_{Z,as\text{-}built}$ – reazione massima verticale in condizioni as-built; $R_{Z,retrofit}$ = reazione massima verticale per l'edificio in condizioni retrofit; FI_i – frequenza delle ispezioni per l'i-esimo intervento; nr_i – numero totale degli interventi richiesti per l'installazione del retrofit.

sa inoltre che, come riportato da Carofilis et al. [197], la scelta del vettore dei pesi rappresenta la fonte di incertezza più significativa nella procedura MCDM e, di conseguenza, nei risultati. Si rimanda a Clemett et al. [197] per maggiori dettagli sulla struttura MCDM qui utilizzata e sulla definizione della matrice decisionale e dei vettori di peso.

Una volta ottenuti i valori per ogni DV, è possibile assemblare una matrice decisionale (DM) contenente i valori associati per ogni intervento di retrofit. I valori della DM vengono poi normalizzati e si determinano le soluzioni ideali e meno ideali per ogni variabile decisionale, consentendo un confronto con ciascuna delle alternative progettuali identificate. A tal fine, si utilizza la distanza euclidea nello spazio n tra i valori della matrice decisionale per l'alternativa progettuale e le alternative ideali e meno ideali. Infine, si calcola la vicinanza relativa di ogni alternativa alla soluzione meno ideale, e l'alternativa con la maggiore vicinanza relativa (cioè, l'alternativa più lontana dalla meno ideale) viene scelta come soluzione preferita. Un riassunto esemplificativo degli step necessari per la definizione della soluzione ottimale è riportato in Figura 4.3, insieme ad un esempio qualitativo dell'output (ranking delle diverse alternative di retrofit sismico ed energetico).



Alt	C_1 (€)	C_2 (€)	C_3 ($kgCO_2e$)	C_4 ($x10^{-3}$)	C_5 (days)	C_6 (-)	C_7 (-)	C_8 (-)
S_1E_1	1209497	13.9	54.0	0.027	60	0.0227	0.0844	6.12
S_1E_2	1293366	14.8	43.7	0.025	60	0.0227	0.0844	6.12
S_1E_3	1521766	16.0	22.6	0.027	64	0.0227	0.0844	6.12
S_2E_1	190167	16.2	49.2	0.077	22	0.0555	0.0135	16.49
S_2E_2	274036	17.0	39.0	0.087	24	0.0555	0.0135	16.49
S_2E_3	502435	18.2	17.8	0.084	29	0.0555	0.0135	16.49
S_3E_1	250865	12.3	48.9	0.036	37	0.0934	0.0844	16.55
S_3E_2	334734	13.0	38.4	0.030	37	0.0934	0.0844	16.55
S_3E_3	563133	14.0	17.3	0.029	41	0.0934	0.0844	16.55

Ranking	Alt.	Rel. C.
1	S_2E_3	0.676
2	S_2E_2	0.650
3	S_2E_1	0.603
4	S_3E_3	0.577
5	S_3E_1	0.558
6	S_3E_2	0.553
7	S_1E_3	0.458
8	S_1E_2	0.438
9	S_1E_1	0.423

Figura 4.3 Riassunto esemplificativo dei diversi step necessari per applicare la metodologia MCDM proposta.

4.1.5. Metodi basati sulla definizione di curve iso-classe e iso-performance

Il metodo prevede un approccio multidisciplinare e sistematico nella definizione degli impatti economici e ambientali degli interventi integrati applicabile a edifici in muratura. La selezione degli interventi integrati è definita rispettando i principi della sostenibilità, generalmente confrontando soluzioni tradizionali con quelle più innovative che assicurano un ridotto impatto ambientale. La metodologia, che consente il confronto dei risultati considerando sia la sola fase di messa a punto dell'intervento sia il life cycle, è stata applicata sia sull'elemento singolo [191, 198], sia su facciate principali di edifici [192] per analisi nel piano, Giresini et al. [199] per analisi fuori piano, sia sull'intero edificio [200]. Recentemente, si è messa a punto una metodologia che tiene conto anche delle classi di rischio sismico e di performance energetica nella valutazione dell'impatto.

Il metodo, a complessità crescente, parte dalla definizione di indicatori sintetici di performance sismica ed energetica che siano in grado di descrivere la risposta dell'edificio in termini strutturali ed energetici in modo semplice ed efficace. In base all'intervento integrato (ad esempio, reti di GFRP combinate con pannelli isolanti, o cerchiature in acciaio accoppiate con infissi basso-emissivi), si possono calcolare tali indicatori fissando un budget economico (solitamente normalizzato al m^2 di superficie verticale o orizzontale) oppure un impatto ambientale (anch'esso, normalizzato al m^2 ed espresso in termini di CO_2 equivalente, classica categoria di impatto del LCA). Il metodo è dunque facilmente applicabile qualora siano noti i seguenti dati di input: indicatori di performance sismica (ad es. il rapporto domanda/capacità) ed energetica (trasmittanza o consumo di energia), costi economici e ambientali correlati. Risultato dell'analisi sono curve di iso-costo e di iso-performance, vedi Figura 4.4 e Figura 4.5, che possono essere lette in molteplici modi, intersecando le curve di capacità con le curve di domanda (definite per sito di costruzione) al fine di ottenere il punto target, oppure partendo da una performance minima che l'intervento integrato deve garantire e sondandone l'impatto economico e ambientale. Grazie a questi grafici sviluppati ad hoc, è immediato leggere l'impatto in termini economici e ambientali correlato ai vari interventi integrati presi in esame, selezionando quello ottimale dal punto di vista economico, ambientale, o entrambi. Ulteriori grafici sono le curve di iso-classe, vedi Figura 4.4, dove a parità di salto di classe energetica o di rischio sismico si possono quantificare gli impatti economici e ambientali.

Si sottolinea come tale procedura possa essere applicata a diverse scale di complessità, dal singolo pannello murario all'intero edificio mostrando una elasticità molto efficace per i professionisti e per chi utilizzerà il metodo per decisioni complesse riguardanti gruppi di edifici.

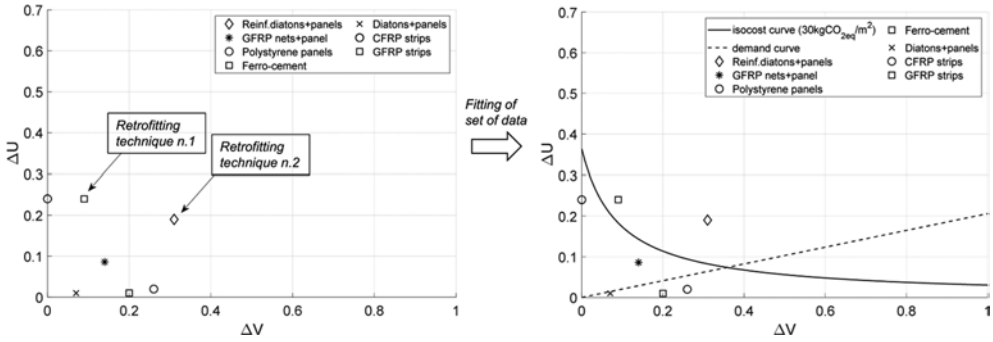
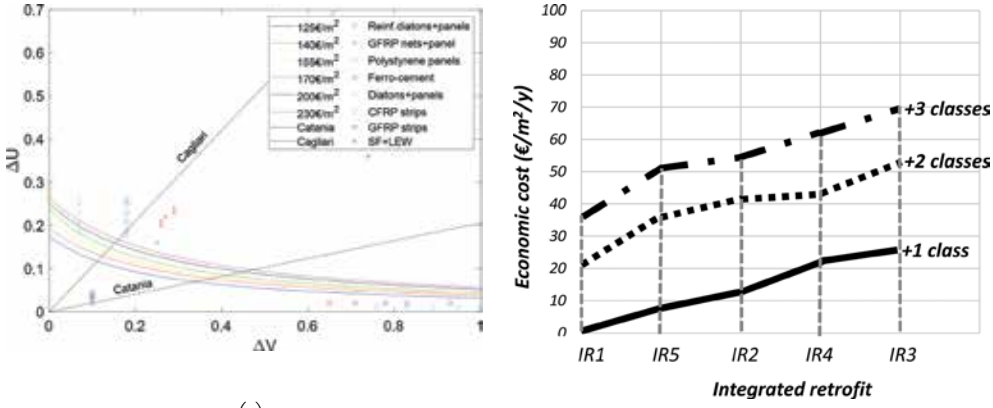


Figura 4.4. Procedura per la definizione delle curve di isocosto economico/ambientale.



(a) (b)

Figura 4.5. (a) Esempio di curve di (a) isocosto e (b) isoclasse in termini di impatto economico.

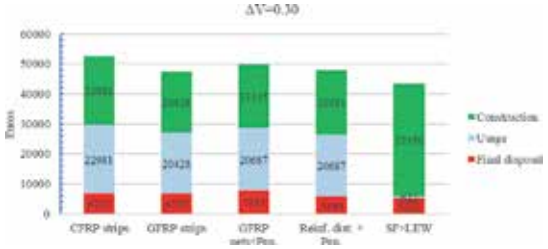


Figura 4.6. Esempio di curva di isoperformance economica con indicazione delle fasi del ciclo vita.

4.1.6. Metodi basati sulla valutazione di sostenibilità complessiva degli interventi integrati

In questa tipologia di metodologia decisionale multicriterio è possibile identificare la strategia di intervento ottimale (combinato/ integrato e non) per un dato edificio sulla base di una molteplicità di parametri decisionali. Questa metodologia consente di eseguire una valutazione integrata delle prestazioni energetiche e sismiche degli edifici esistenti, quantificando gli impatti economici, ambientali e sociali lungo tutto il ciclo di vita dell'edificio stesso. L'approccio è dunque applicabile alla scala dell'intero edificio, a prescindere dalla tipologia strutturale e dal tipo di intervento proposto (incluso incremental retrofitting), e la scala temporale è quella del ciclo di vita dell'edificio. Tuttavia, essendo esso utilizzato prevalentemente per confronto tra interventi sullo stesso edificio, il frame temporale generalmente considerato è la vita dell'edificio post-intervento.

Le variabili decisionali proposte sono, nella versione originale del metodo descritta in Caruso et al. [201, 202], i costi (C) e gli impatti ambientali (CE) valutati sul ciclo di vita dell'edificio post-intervento, il periodo di ritorno dell'investimento per l'intervento (PB), e le perdite di vite umane (AALL) attese dovute a potenziali terremoti.

Per quanto riguarda il calcolo dei vari parametri, in particolare, i costi della fase d'uso post-intervento sono valutati in termini monetari (€), sommando i contributi del costo dell'installazione dell'intervento, delle perdite economiche sismiche, del consumo energetico e dell'eventuale fine vita dei componenti dell'intervento stesso, normalizzando infine la somma per la vita post-retrofit e l'area totale dell'edificio. I costi dell'intervento si possono valutare da stime medie per tipologia/destinazione d'uso dell'edificio, prezzari, computi metrici, o schede dei produttori, i costi dei consumi energetici a partire da costi medi dell'energia o tramite comunicazione con professionisti, le perdite sismiche attese in fase d'uso tramite approcci quali FEMA P-58, linee guida per la valutazione della classe di rischio sismico, ecc. È anche possibile eventualmente considerare l'impatto economico della potenziale interruzione di attività a seguito di eventi sismici rilevanti (tramite approcci quali FEMA P-58 [208] o simili).

Gli impatti ambientali della fase d'uso post-intervento sono valutati in termini di emissioni di CO_2 equivalente (kg eCO_2), sommando i contributi elencati prima in termini ambientali. Le emissioni dell'intervento si possono calcolare tramite il modello USEEIO o altri software per LCA, utilizzando l'Inventory of Carbon and Energy (ICE), oppure tramite EPD fornite dai produttori, ecc., le emissioni prodotte dai consumi energetici a partire da emissioni medie dell'energia o trami-

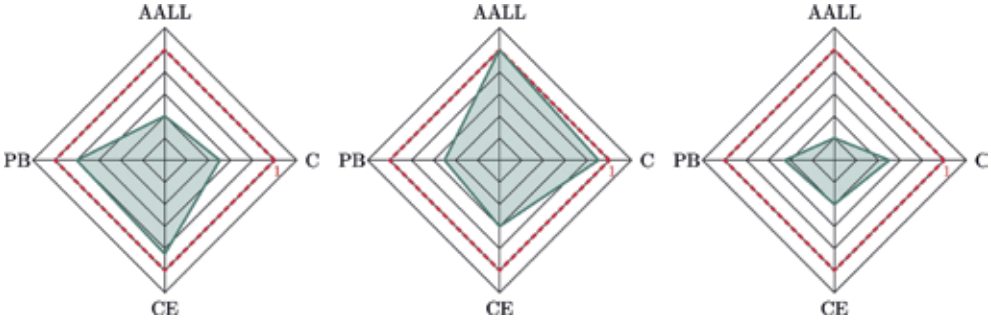
te comunicazione con professionisti, le emissioni attese in fase d'uso per potenziali attività di riparazione post-sisma tramite approcci quali FEMA P-58 o simili.

Il tempo di ritorno dell'investimento per l'intervento è invece valutato in anni, e si può ottenere tramite il calcolo del valore attuale netto oppure tramite procedure semplificate come quella riportata nella UNI EN 15459:2018 [209].

Infine, gli impatti sociali della fase d'uso post retrofit dell'edificio sono valutati in termini di vittime attese dovute a potenziali terremoti in fase d'uso, tramite approcci quali FEMA P-58 [208] o simili.

Per l'identificazione dell'intervento ottimo, si ricorre all'utilizzo dei cosiddetti "radar plots", che permettono di visualizzare graficamente l'intervento che allo stesso tempo minimizza tutti i parametri considerati, ovvero quello risultante nell'area minore. Si nota che, per una corretta rappresentazione delle configurazioni rinforzate nei radar plots, i quattro parametri sono normalizzati rispetto ai loro corrispondenti valori nella configurazione as-built, eccetto per il PB che è normalizzato per la vita utile stimata per l'edificio rinforzato. In Figura 4.7, si riporta un esempio di radar plots per tre ipotetiche configurazioni di intervento, i.e. rinforzo strutturale, efficientamento energetico, e intervento integrato. Quest'ultimo risulta essere l'intervento ottimale. Si nota quindi che tutti i pilastri della sostenibilità (economia, ambiente e società) sono inclusi nella valutazione, che al tempo stesso si presta ad un approccio multidisciplinare (considerando congiuntamente le prestazioni energetiche e sismiche, nonché ambientali dell'edificio).

Infine, i parametri economici e ambientali proposti potrebbero fornire una base per una nuova classificazione integrata degli edifici, che considera allo stesso tempo le prestazioni energetiche e sismiche degli stessi, come rappresentato in Figura 4.8, in cui i tre simboli (triangolo, cerchio, rombo) rappresentano tre



(a) (b) (c)

Figura 4.7. Esempio di radar plots per tre ipotetiche configurazioni di intervento: rinforzo strutturale (a), efficientamento energetico (b), e intervento integrato (c).

potenziali interventi, mettendo in evidenza l'approccio integrato che potenzialmente permetterebbe un salto di classe.

Si nota infine che il metodo è stato concepito in modo tale da poter includere ulteriori parametri decisionali, e da essere integrabile con altri metodi olistici più comprensivi [203].

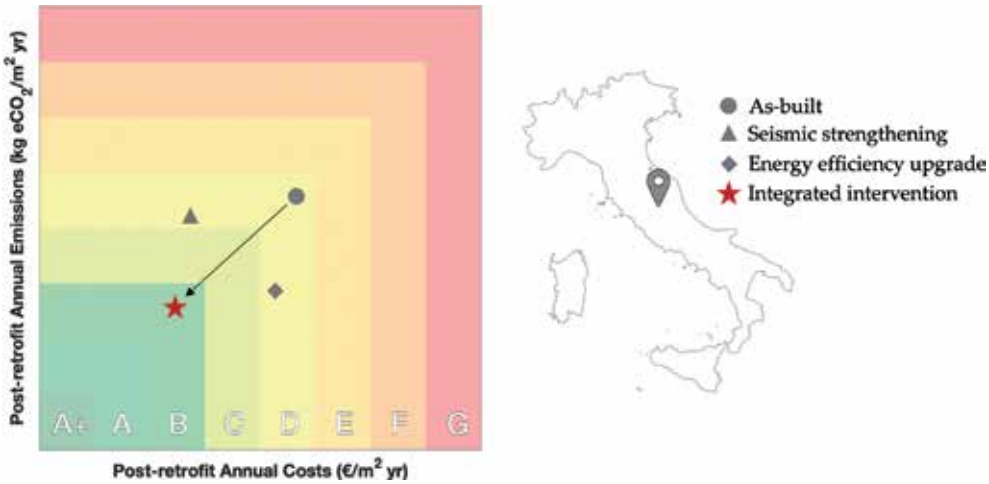


Figura 4.8. Esempio di classificazione integrata per tre ipotetiche configurazioni rinforzate [203].

4.1.7. Metodi olistici basati sul Life Cycle Thinking (LCT)

L'LCT-based Design Framework è una procedura per la progettazione di interventi di recupero integrato e sostenibile del patrimonio edilizio esistente. Tale procedura copre tutto il processo di progettazione, fornendo per ogni fase indicazioni e strumenti finalizzati all'integrazione dei principi della sostenibilità all'interno del progetto di recupero. Ciò rende il Framework proposto facilmente integrabile/armonizzabile con Level(s), lo *European framework for sustainable constructions*, che, al fine di raggiungere determinati macro-obiettivi di sostenibilità, propone una serie di strumenti applicabili a 3 livelli: L1 – progetto preliminare, L2 – progetto definitivo, L3 – edificio costruito e manutenzione (https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/levels_en).

Adottando un approccio *Life Cycle Thinking* nella progettazione, è possibile massimizzare le molteplici performance (ad esempio: energetica, strutturale,

acustica, funzionale, comfort), minimizzando al contempo gli impatti ambientali, economici, e sociali lungo tutta la vita dell'edificio. A tal fine, l'LCT introduce nuovi principi che devono essere considerati nella concezione delle tecniche di intervento (Figura 4.9), come ad esempio: la facilità di montaggio delle soluzioni al fine di ridurre tempi e impatti in fase di costruzione; la riparabilità, durabilità, adattabilità, flessibilità delle soluzioni per ridurre costi e impatti durante l'uso della struttura; e la facilità di smontaggio, la modularità, la standardizzazione per agevolare il possibile riutilizzo degli elementi costruttivi al termine della vita utile della struttura. Tali principi possono essere integrati nella progettazione e applicati solo mediante re-ingegnerizzazione da parte degli ingegneri strutturisti delle tecniche di recupero esistenti o tramite la proposta di nuove soluzioni, espandendo il concetto di ingegneria strutturale in *Life Cycle Structural Engineering* (LCSE).

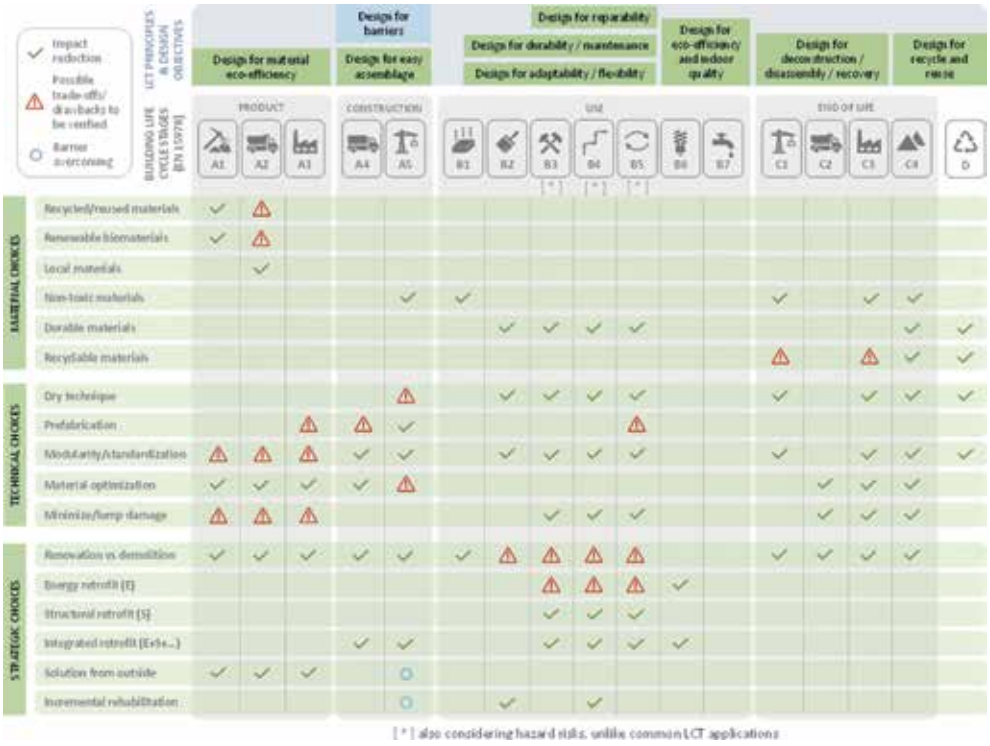


Figura 4.9 Principi per la concezione di soluzioni di intervento ispirate al Life Cycle Thinking (LCT) [204].

L'LCT-based Design Framework trasforma il classico processo progettuale per il recupero di una struttura esistente in un processo ad 8 step (Figura 4.10):

1. valutazione integrata multidisciplinare dell'esistente con identificazione delle eventuali molteplici necessità e degli obiettivi prestazionali;
2. valutazione preliminare qualitativa delle soluzioni integrate in ottica LCT e definizione di un primo set di soluzioni sostenibili;
3. progetto preliminare delle soluzioni;
4. scelta della soluzione ottimale sulla base di criteri LCT quantitativi (costi, impatti, analisi delle perdite, ecc.);
5. progetto definitivo;
6. classificazione delle soluzioni tramite classificazioni tradizionali (classe energetica/sismica), classificazioni integrate o tramite Rating Systems (es. GBC, LEED, BREEAM, ITACA, ecc.) e scelta della soluzione ottimale;
7. progetto esecutivo;
8. progetto della manutenzione programmata.

Tutti gli step di questo Framework richiedono un approccio sostenibile di tipo LCT, includendo valutazioni multidisciplinari e di durabilità nella fase 1, nuovi obiettivi prestazionali per la progettazione in fase 3 (ad esempio: limitare i danni a valle di un sisma), e soluzioni strutturali sostenibili nelle fasi 3 e 5 (ad esempio soluzioni che adottino materiali eco-efficienti, dettagli strutturali ispirati ai principi dell'LCT).

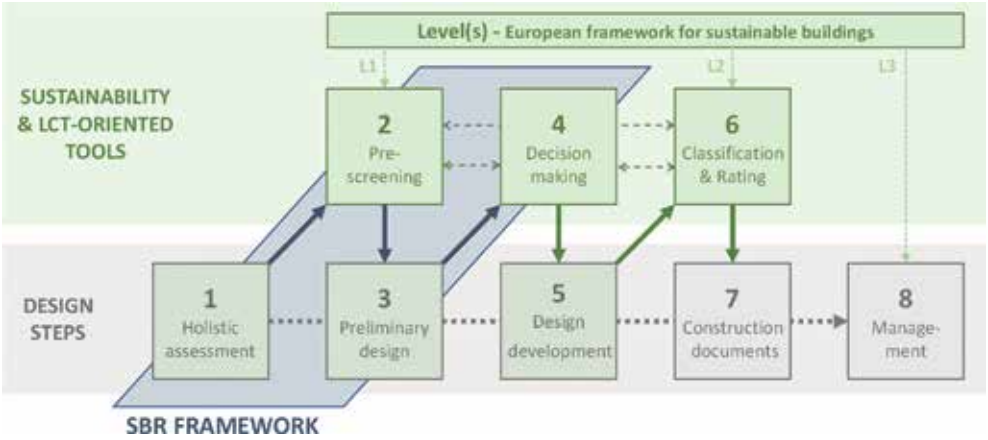


Figura 4.10. LCT-based Design Framework: integrazione di strumenti per la valutazione sostenibile e ispirata ai principi dell'LCT negli step della progettazione [203, 205].

Le fasi più innovative della procedura dal punto di vista della sostenibilità sono le fasi 2, 4, 6, che richiedono l'utilizzo di appositi strumenti di valutazione delle soluzioni. Nella fase 2 si applica uno strumento di pre-screening qualitativo basato su un metodo MCDM (Multi Criteria Decision Making) oppure anche metodi semplificati. Nella fase 4 si possono adottare dei metodi quantitativi tipo LCA, LCC, S-LCA per valutare rispettivamente gli impatti ambientali, economici e sociali delle soluzioni, eventualmente integrandoli all'interno di metodi MCDM. Nella fase 6 si possono infine adottare sistemi consolidati di classificazione o strumenti innovativi quale la classificazione integrata proposta al paragrafo 4.1.6.

L'LCT-Based Design Framework è stato intenzionalmente concepito per essere flessibile, fornendo quindi delle linee guida alla progettazione di soluzioni integrate e sostenibili ma allo stesso tempo lasciando la libertà al progettista di integrare negli step 2, 4 e 6 gli strumenti più consoni al proprio caso in funzione delle sue specifiche conoscenze e necessità, ma anche per consentire facile aggiornamento rispetto ad innovazioni introdotte dalla ricerca, nonché integrazione di strumenti più evoluti che dovessero essere messi a disposizione dei professionisti. Ad esempio, considerando gli step più significativi dal punto di vista della sostenibilità, gli output sono:

– Output Step 2: valutazione di idoneità e fattibilità delle soluzioni e classifica delle soluzioni sulla base di criteri qualitativi.
– Output Step 4: classifica delle soluzioni e definizione della soluzione ottimale sulla base di criteri quantitativi (stima degli impatti ambientali e dei costi sul ciclo di vita, perdite medie annue, ecc).
– Output Step 6: classificazione sismica/energetica/combinata; classifica e valutazione delle soluzioni sulla base di rating systems.

LCT-based Pre-screening Tool. L'LCT-based Pre-screening Tool è uno strumento finalizzato alla selezione di un set di soluzioni di intervento sostenibili per un particolare edificio di riferimento. La procedura si divide in due fasi: una selezione delle possibili tecniche in funzione della fattibilità tecnico-economica, definita sulla base delle caratteristiche dell'edificio, dei vincoli urbanistici e del contesto, delle sue prestazioni iniziali in relazione agli obiettivi prestazionali prefissati e delle specifiche richieste del Decision Maker; e una classifica delle soluzioni in termini di sostenibilità, condotta valutando in modo qualitativo tramite Multi Criteria Decision Making (MCDM) tools la rispondenza di ogni soluzione ai principi definiti con approccio Life Cycle Thinking (LCT). Come output di questo metodo si ha dunque una preselezione delle soluzioni più sostenibili per un determinato caso studio, che potranno quindi essere pre-dimensionate ed eventualmente valutate in modo quantitativo nelle fasi successive. L'applicazione

di questo pre-screening tool a monte della progettazione è finalizzata a rendere più speditivo il processo di valutazione e design di interventi di recupero sostenibili, evitando ai professionisti di spendere tempo e risorse nella valutazione, se non addirittura nel progetto, di soluzioni che potrebbero poi rivelarsi poco sostenibili con l'applicazione di metodi di valutazione ex-post, spesso molto onerosi (ad esempio LCA, LCC, ecc). Questo metodo si integra all'interno dello Step 2 dell'LCT-based design framework per il progetto di interventi di riqualificazione integrata e sostenibile del patrimonio edilizio esistente.

Il metodo di valutazione MCDM confronta le diverse alternative di retrofit sulla base di criteri ispirati all'LCT finalizzati a massimizzare la sostenibilità degli interventi, che vengono pesati da parte del progettista in funzione delle specifiche necessità dell'edificio e del DM, dei vincoli imposti al progetto e delle possibili peculiarità connesse alla localizzazione dell'edificio (es. sismicità, area climatica, rischi naturali, ecc). La raccolta dei dati iniziali è basata su un questionario che permette di indicare il peso di un determinato criterio e di fornire una valutazione qualitativa. I risultati sono poi aggregati adottando un metodo MCDM sviluppato a partire dal metodo TOPSIS. In output il tool fornisce un "profilo di sostenibilità" per ognuna delle soluzioni indicate, un radar graph espresso o in termini di potenziali impatti per fasi del ciclo di vita o per categoria di impatto, che permette di definire un ranking delle alternative (Figura 4.11, Figura 4.12).

4.2. Applicazioni

Costantino Menna, Chiara Passoni, Martina Caruso

L'applicazione dei metodi ha coinvolto un unico caso studio di riferimento, l'edificio residenziale in cemento armato sito in provincia di Brescia analizzato nel presente report (Scheda C.A.3). In riferimento a tale edificio, è stato applicato il metodo dell'"LCT-Based Design Framework" (paragrafo 4.1.7), in quanto approccio olistico che propone una revisione del processo di progettazione in chiave LCT, in cui sono stati integrati, nello Step 2, l'"LCT-Based MCDM Prescreening Tool" per la valutazione preliminare delle soluzioni (paragrafo 4.1.7) e, nello Step 4, il "Metodo basato sulla valutazione di sostenibilità complessiva" per la valutazione quantitativa e multidisciplinare delle soluzioni proposte (paragrafo 4.1.6). Si noti che le valutazioni qualitative dello Step 2 hanno integrato anche considerazioni di compatibilità del "Metodo Incrementale" (paragrafo 4.1.1); per quanto riguarda invece lo Step 4, si sarebbero potuti applicare anche i Metodi descritti nei paragrafi 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4, che si basano, come il Metodo

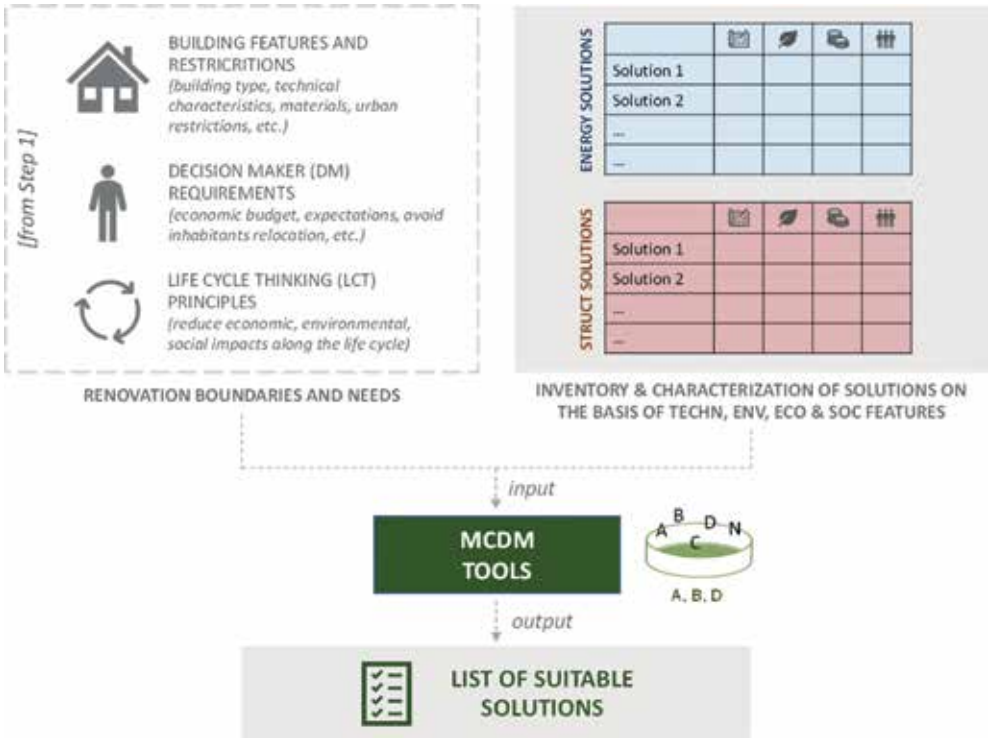


Figura 4.11. LCSE Pre-screeing tool: approccio metodologico, input e output [204].



Figura 4.12. Grafici radar per la comparazione grafica delle soluzioni in termini di potenziali impatti nelle varie fasi del ciclo di vita (a) o considerando varie categorie di impatto (b) (in blu: soluzione migliore A+; nel centro: soluzione peggiore A-; in azzurro: soluzione intermedia).

del paragrafo 4.1.6, su metriche quantitative ottenibili tramite analisi sismiche ed energetiche, analisi delle perdite e valutazione di costo e impatto ambientale sul ciclo di vita. Il Metodo del paragrafo 4.1.5, invece, pur integrabile negli Step 2 e 4, non poteva essere considerato in questa applicazione poiché riferito agli edifici in muratura.

Step 1 dell'LCT-Based Design Framework – Holistic assessment

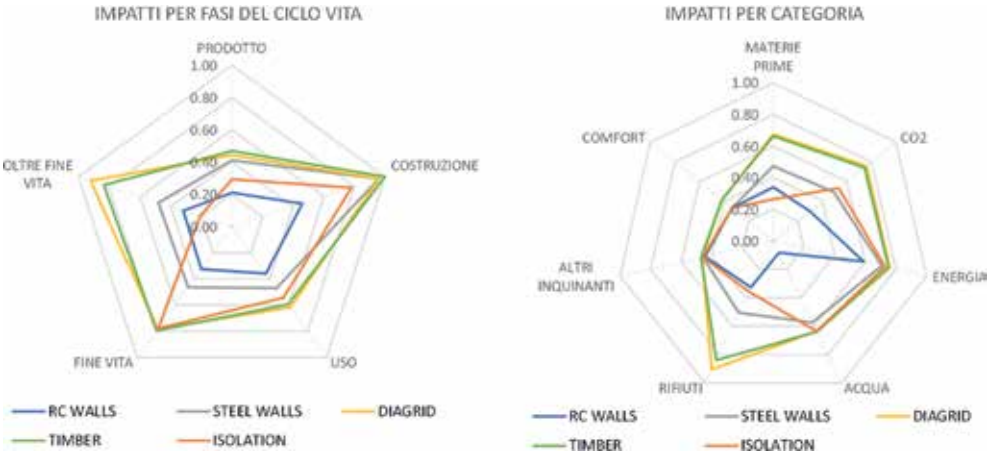
Nel primo Step viene analizzato lo stato di fatto dell'edificio adottando un approccio multidisciplinare. In questo caso, l'edificio presentava gravi carenze energetiche e sismiche (classe energetica E e classe sismica C), richiedendo un intervento di riqualificazione integrata (Scheda C.A.3).

Step 2 dell'LCT-Based Design Framework – LCT-Based MCDM Pre-screening Tool

Il metodo proposto per il pre-screening delle soluzioni si divide in due fasi: 1-una selezione delle possibili tecniche in funzione della fattibilità tecnico-economica e 2-una classifica delle soluzioni in termini di sostenibilità, tramite un MCDM tool basato sul metodo TOPSIS.

Per quanto riguarda la fattibilità tecnico-economica, si sono dapprima considerati i vincoli tecnici e quelli imposti dal Decision Maker (DM). In questo caso, l'edificio era un edificio isolato multipiano in c.a., costituito da un telaio tamponato, destinato a residenza sociale, senza dunque particolari vincoli da un punto di vista urbanistico, architettonico o di conservazione. Essendo tuttavia destinato a Social Housing, il DM richiedeva di non rilocare gli abitanti e di arrecar loro il minor disturbo, di operare un intervento sismico ed energetico, con integrazione delle tecniche in modo da minimizzare impatti e costi nel ciclo vita.

Per quanto riguarda il retrofit energetico si è deciso di considerare un'unica alternativa, isolamento termico e sostituzione delle caldaie, selezionata sulla base dei criteri del Metodo incrementale. Le sole soluzioni strutturali sono state quindi comparate tramite il tool. Sette diverse possibili tecniche sono state considerate in input al MCDM tool; due, il rinforzo locale dei nodi tramite la tecnica di jacketing e il rinforzo selettivo di alcune campate del telaio tramite la realizzazione di nuove pareti in c.a., sono state direttamente scartate in quanto incompatibili con la richiesta del committente di non rilocare gli abitanti. Delle restanti 5, esoscheletro realizzato con pareti in c.a. e in acciaio progettate con approccio tradizionale, esoscheletro realizzato con sistema a guscio in legno o diagrid di acciaio progettati con approccio LCT (smontabile, prefabbricato, ecc), e sistema di isolamento, si riporta l'esito del MCDM tool in termini di "profili di sostenibili-



(a) (b)

Figura 4.13. "Profili di sostenibilità" per la comparazione grafica delle soluzioni in termini di potenziali impatti nelle varie fasi del ciclo di vita (a) o considerando varie categorie di impatto (b).

tà" (Figura 4.13). Tale pre-screeing porterebbe a propendere dunque per la scelta dei due sistemi a guscio, tuttavia, nel seguito dell'applicazione si è proceduto al dimensionamento dei quattro differenti esoscheletri al fine di validare tramite analisi quantitativa i risultati ottenuti nello Step 2.

Step 3 dell'LCT-Based Design Framework – Preliminary design delle soluzioni selezionate

Le quattro soluzioni ad esoscheletro sono state pre-dimensionate in modo da avere le stesse prestazioni sismiche ed energetiche (Soluzioni 2-5 della Scheda C.A.3). Di queste soluzioni, si è realizzato un computo metrico preliminare per valutare le *bill of quantity* di ogni intervento (diviso per sovrastruttura, fondazione e connessioni) [20].

Step 4 dell'LCT-Based Design Framework – Decision making

Sulla base delle analisi strutturali ed energetiche e dei computi realizzati allo Step precedente, è possibile condurre delle valutazioni più accurate dei costi e degli impatti delle soluzioni lungo il ciclo di vita. Come anticipato, in questo step si sarebbero potuti applicare molti dei metodi precedentemente proposti. Si è qui applicato il Metodo del paragrafo 4.1.6 a titolo esemplificativo [201].

Il metodo si basa sulla comparazione delle soluzioni sulla base di 4 variabili decisionali:

1. costi sul ciclo di vita (C), compresi i costi dell'adeguamento (sia per la sua installazione che per i processi di fine vita), le perdite economiche sismiche previste e i costi energetici;
2. emissioni di carbonio sul ciclo di vita (CE), espresse in termini di emissioni di anidride carbonica equivalenti, compreso l'impatto ambientale dei componenti dell'esoscheletro (sia per la loro installazione che per la fine del ciclo di vita), perdite ambientali sismiche previste e impatto sul consumo energetico;
3. periodo di ritorno (PB) dell'investimento economico per la realizzazione del retrofit;
4. perdita media annua di vite umane (AALL) dovuta al rischio sismico, espressa in termini di numero atteso di vittime per anno.

Tali parametri sono stati calcolati sulla base delle analisi strutturali ed energetiche svolte allo Step 3, a cui sono state abbinate delle analisi delle perdite realizzate tramite il software PACT [208] (per valutare perdite economiche, ambientali e di vite umane legate al sisma), delle analisi economiche per valutare il costo del rinforzo e delle analisi degli impatti ambientali semplificate basate su EPD per valutare gli impatti del rinforzo nella costruzione e al fine vita [203]. Anche in questo Step, essendo il retrofit energetico comune a tutte le soluzioni, la differenza tra le soluzioni sarà legata alla sola componente strutturale degli esoscheletri.

La Figura 4.14 mostra i grafici radar risultanti dall'applicazione del metodo, ottenuti normalizzando il PB per la vita attesa post-retrofit dell'edificio (ovvero 50 anni) e gli altri tre parametri per i corrispondenti valori as-built. La soluzione ottimale, che è quella corrispondente alla più piccola area risultante e quindi minimizzando tutte e quattro le variabili considerate, risulta la soluzione guscio in legno, seguita, in ordine crescente, da pareti in ca, diagrid in acciaio e pareti in acciaio.

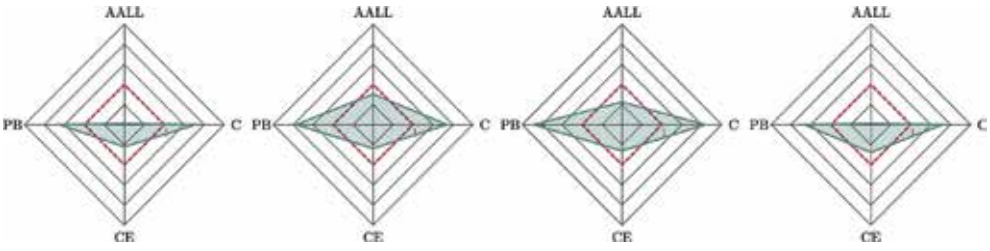


Figura 4.14. Radar plots delle quattro tecniche (da sinistra a destra, guscio in legno, diagrid in acciaio, pareti in acciaio, pareti in c.a.) considerando le 4 variabili decisionali: costi normalizzati post-retrofit (C), emissioni di carbonio (CE), periodo di ritorno (PB) e perdite di vite umane (AALL).

Step 5 dell'LCT-Based Design Framework – Design development

In uscita dallo Step 4 si seleziona la soluzione ottimale per il caso studio, che viene quindi dimensionata nel dettaglio nello Step 5. In particolare, in questo Step sarà necessario progettare in modo accurato i dettagli costruttivi, le fasi di montaggio e smontaggio, le azioni richieste per la manutenzione o la sostituzione nel ciclo di vita, al fine di tradurre in indicazioni operative quanto previsto in fase di concezione LCT nello Step 2, assicurando quindi il raggiungimento effettivo dei principi universali di sostenibilità sul ciclo di vita.

Step 6 dell'LCT-Based Design Framework – Classification and rating

Nello Step 6, si può procedere alla classificazione delle soluzioni tramite certificazioni energetiche e classificazioni sismiche o classificazioni integrate [210] (Metodo del paragrafo 4.1.6), conducendo analisi LCA ed LCC più accurate, o adottando sistemi di Green Building Rating System per avere un accertamento della sostenibilità della soluzione finale adottata. Tale soluzione sicuramente garantirà un elevato livello di sostenibilità essendo frutto di un iter progettuale che ha permesso di introdurre considerazioni sostenibili sin dai primi Step della progettazione, orientando da subito le scelte progettuali secondo un approccio LCT.

Step 7 e 8 dell'LCT-Based Design Framework – Construction documents and management

Una volta adottati i vari tool sostenibili negli Step precedenti, si conclude il processo di progettazione con la produzione dei disegni costruttivi e la gestione dell'edificio coerentemente con i principi di sostenibilità precedentemente definiti.

4.3. Considerazioni conclusive

Costantino Menna, Francesca da Porto, Alessandra Marini, Rui Pinho, Andrea Prota

Nel contesto del miglioramento delle prestazioni sismiche ed energetiche degli edifici esistenti, le scelte relative alle tecniche di retrofit integrato rappresentano una sfida complessa e multidimensionale. La valutazione dell'efficacia di tali tecniche non si limita alla mera considerazione di costi e benefici tangibili, ma richiede un'analisi approfondita che tenga conto di una vasta gamma di fattori, tra cui l'impatto ambientale, l'impatto sociale, la sostenibilità a lungo termine, la resilienza strutturale e l'entità dell'uso di risorse energetiche.

La necessità di integrare in modo efficace le valutazioni sismiche ed energetiche nell'ambito del retrofit degli edifici esistenti richiede l'adozione di strumenti di

decisione avanzati e spesso sinergici. Questi strumenti devono essere in grado di gestire e sintetizzare grandi quantità di dati (tecnici, ambientali, di fine vita ecc.), bilanciando variabili tecniche e normative, aspettative degli stakeholder, e limitazioni finanziarie. Il compito è ulteriormente complicato dalla varietà di scenari e condizioni locali specifiche, che richiedono un approccio flessibile e adattabile.

Dall'esame approfondito dei differenti metodi citati in questo capitolo, è possibile, in via preliminare, generalizzare un framework metodologico rappresentato nella Figura 4.15 da uno schema che fornisce una guida strutturata per approcciare la complessità della valutazione integrata sismico-energetica. Attraverso un processo che evolve da una valutazione olistica a decisioni finali ben ponderate, il framework in questione incorpora diversi strumenti analitici e decisionali alternativi, utilizzabili in maniera sinergica per ottimizzare e massimizzare i risultati del retrofit integrato. Ogni fase del processo – dalla valutazione olistica iniziale, attraverso lo screening preliminare e la progettazione preliminare, fino alla decisione finale – è progettata per assicurare che ogni decisione sia informata da una comprensione completa e integrata delle implicazioni sismiche ed energetiche. In particolare, ciascuna fase è integrata con specifici metodi di valutazione e decisione, per guidare la scelta delle tecniche di retrofit sismico-energetiche.

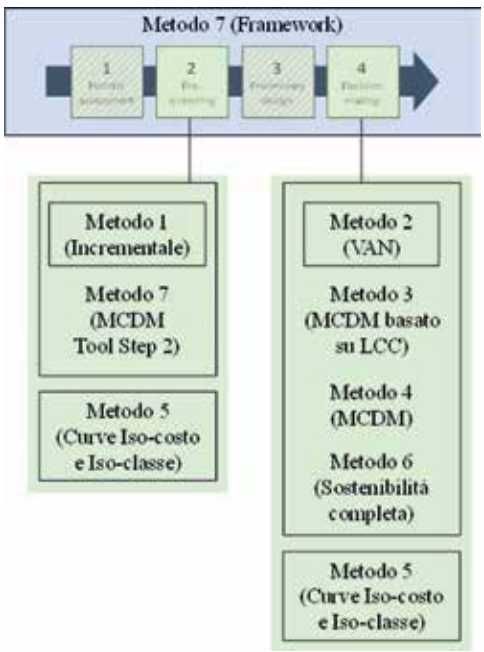


Figura 4.15. Schema metodologico di sintesi per i metodi di valutazione integrati. La numerazione dei metodi fa riferimento ai paragrafi dal 4.1.1 al 4.1.7.

1. Holistic Assessment (Valutazione Olistica): in questa fase iniziale, si effettua una valutazione complessiva dell'edificio, considerando sia aspetti strutturali che energetici. Il processo può includere l'analisi delle condizioni esistenti e la definizione delle esigenze di retrofit.
   Metodi specifici inseriti ed applicabili:
   – Metodo 1 (Incrementale): Valuta i miglioramenti incrementali che possono essere applicati senza e con interventi invasivi.
   – Metodo 7 (MCDM Tool Step 2): Applica strumenti di Multi-Criteria Decision-Making al secondo passaggio, per bilanciare diversi fattori decisionali.
   – Metodo 5 (Curve Iso-costo e Iso-classe): Utilizza curve per comparare i costi e le classi di efficacia del retrofit.
2. Pre-screening: Questa fase serve a filtrare le opzioni di retrofit non praticabili o non efficienti in base a criteri preliminari, come il budget, la fattibilità tecnica e l'impatto operativo.
3. Preliminary Design (Progettazione Preliminare): in questa fase si sviluppano i concept di design basati sui risultati dello screening. Si elaborano soluzioni di retrofit dettagliate che soddisfano i requisiti specifici dell'edificio.
   Metodi specifici inseriti ed applicabili:
   – Metodo 2 (VAN): Valutazione del Valore Attuale Netto per analizzare la convenienza economica delle opzioni.
   – Metodo 3 (MCDM basato su LCC): Decision Making Multicriterio basato sul Life-Cycle Costing per valutare la sostenibilità economica a lungo termine delle opzioni.
   – Metodo 4 (MCDM): Applicazione di tecniche decisionali multicriterio per valutare vari aspetti del design preliminare.
   – Metodo 6 (Sostenibilità completa): Valutazione comprensiva dell'impatto ambientale, sociale ed economico.
   – Metodo 5 (Curve Iso-costo e Iso-classe): Uso di curve per analizzare ulteriormente il rapporto costo-efficacia.
4. Decision Making (Decisione Finale): si tratta della fase finale in cui vengono prese le decisioni basate sulle analisi e progettazioni specifiche del punto precedente. Si sceglie il piano di retrofit che meglio risponde agli obiettivi del progetto, considerando efficienza, costi e impatti.

In sintesi, l'approccio presentato è un esempio che mira a fornire una soluzione metodica e ben integrata per affrontare le sfide del retrofit sismico ed energetico degli edifici, combinando expertise tecnica con strategie decisionali avanzate per realizzare interventi che non solo siano tecnicamente fattibili ed economicamente vantaggiosi, ma anche sostenibili e socialmente responsabili.

Bibliografia

[1] "ISTAT, 15◦ censimento della popolazione e delle abitazioni 2011," 2011.

[2] MIT, *Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» (in Italian). Supplemento ordinario n. 8 alla Gazzetta Ufficiale del 20-2-2018*. Italy, 2018, pp. 1-367.

[3] M. Lamperti Tornaghi, A. Loli, and P. Negro, "Balanced Evaluation of Structural and Environmental Performances in Building Design," *Buildings*, vol. 8, no. 4, pp. 1-52, 2018.

[4] P. Ricci, F. de Luca, and G. M. Verderame, "6th April 2009 L'Aquila earthquake, Italy: Reinforced concrete building performance," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 285-305, 2011, doi: 10.1007/s10518-010-9204-8.

[5] M. Indirli, L. A. S. Kouris, A. Formisano, R. P. Borg, and F. M. Mazzolani, "Seismic damage assessment of unreinforced masonry structures after the Abruzzo 2009 earthquake: The case study of the historical centers of L'Aquila and Castelvecchio Subequo," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 7, no. 5, pp. 536-578, 2013, doi: 10.1080/15583058.2011.654050.

[6] D. A. Bournas, P. Negro, and F. F. Taucer, "Performance of industrial buildings during the Emilia earthquakes in Northern Italy and recommendations for their strengthening," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 12, no. 5, pp. 2383-2404, 2014, doi: 10.1007/s10518-013-9466-z.

[7] F. De Luca, G. M. Verderame, F. Gómez-Martínez, and A. Pérez-García, "The structural role played by masonry infills on RC building performances after the 2011 Lorca, Spain, earthquake," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 12, no. 5, pp. 1999-2026, 2014, doi: 10.1007/s10518-013-9500-1.

[8] C. I. Casajus Valles A., Marin Ferrer M., Poljansek K., *Eur 30183 en 1*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.

[9] Y. Li, S. Kubicki, A. Guerriero, and Y. Rezgui, "Review of building energy performance certification schemes towards future improvement," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 113, no. February, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109244.

[10] World Bank, "Investment in Disaster Risk Management in Europe Makes Economic Sense," *Invest. Disaster Risk Manag. Eur. Makes Econ. Sense*, 2021, doi: 10.1596/35686.

[11] G. M. Mauro *et al.*, "A Multi-Step Approach to Assess the Lifecycle Economic Impact of Seismic Risk on Optimal Energy Retrofit," *Sustainability*, vol. 9, p. 989, 2017, doi: 10.3390/su9060989.

[12] United Nations, "Report of the Conference of the Parties on its twenty-first session, held in Paris from 30 November to 13 December 2015 Part one: Proceedings," *United Nations – Framew. Conv. Clim. Chang.*, vol. 01192, no. November, p. 32, 2015.

[13] A. Aitsi-Selmi, S. Egawa, H. Sasaki, C. Wannous, and V. Murray, "The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction: Renewing the Global Commitment to People's Resilience, Health, and Well-being," *Int. J. Disaster Risk Sci.*, vol. 6, no. 2, pp. 164-176, 2015, doi: 10.1007/s13753-015-0050-9.

[14] C. Fetting, "'The European Green Deal', ESDN Report," *Eur. Comm.*, vol. 53, no. 9, p. 24, 2020.

[15] European Commission, "Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions – A Renovation Wave for Europe – greening our buildings, creating jobs, improving lives. COM(2020) 662 f," *Off. J. Eur. Union*, p. 26, 2020.

[16] European Commission, "New European Bauhaus Beautiful, Sustainable, Together – COM(2021) 573 final," p. 21, 2021.

[17] D. Brinkman, "EU climate law," *Sustain. Financ. Clim. Chang.*, vol. 2021, no. June, pp. 116-136, 2024, doi: 10.4337/9781800377288.00016.

[18] ENEA, "Dati di Utilizzo del Superbonus 110% (al 31 agosto 2023)," 2023. [Online]. Available: https://www.efficienzaenergetica.enea.it/detrazioni-fiscali/superbonus/risultati-superbonus.html.

[19] K. Gkatzogias *et al.*, *Integrated techniques for the seismic strengthening and energy efficiency of existing buildings. Pilot Project Workshop*, no. November 2020. 2021.

[20] I. Decreto-legge and D. Rilancio, "PROVVEDIMENTO D.L. n. 34 / 2020 – Misure urgenti in materia di salute e di sostegno al lavoro e all ' economia (cd. decreto "Rilancio")," vol. 2020, pp. 2020-2021, 2021.

[21] "Portale Nazionale delle Classificazioni Sismiche (PNCS)".

[22] C. Del Vecchio, M. Di Ludovico, A. Balsamo, A. Prota, G. Manfredi, and M. Dolce, "Experimental investigation of exterior RC beam-column joints retrofitted with FRP systems," *J. Compos. Constr.*, 2014, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000459.

[23] G. M. Verderame, P. Ricci, M. T. De Risi, and C. Del Gaudio, "Experimental response of unreinforced exterior RC joints strengthened with prestressed steel strips," *Eng. Struct.*, vol. 251, pp. 1133-1158, 2022.

[24] R. Frascadore, M. Di Ludovico, A. Prota, G.M. Verderame, G. Manfredi, M. Dolce and E. Cosenza (2014). Local strengthening of RC structures as a strategy for seismic risk mitigation at regional scale. *Earthquake Spectra*, Volume 31, No. 2, pages 1083–1102, May 2015. doi: http://dx.doi.org/10.1193/122912EQS361M

[25] MIT, *DM 14 gennaio 2008: Nuove norme tecniche per le costruzioni*. 2008, p. 367.

[26] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, "D.M. 7 marzo 2017, n. 65, 'Linee Guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni,'" *Http://Www.Mit.Gov.It/Normativa/Decreto-Ministeriale-Numero-65-Del-07032017*, vol. 2017, no. 2, pp. 1-11, 2017.

[27] M. Dolce, G. Manfredi (a cura di), *Linee guida per la riparazione e rafforzamento di elementi strutturali, tamponature e partizioni*. Doppiavoce. 2011. ISBN 978-88-89972-29-8.

[28] M. Dolce, G. Manfredi (a cura di), *Libro bianco sulla ricostruzione privata fuori dai centri storici nei comuni colpiti dal sisma dell'Abruzzo del 6 aprile 2009*, p. 224, Doppiavoce, 2015.

[29] Centro Studi CNI, "Nota stampa i numeri del superbonus," 2023. [Online]. Available: https://www.ingenio-web.it/pdfs/incentivi-per-i-superbonus-spesi-oltre-100-mld-di-euro-tutti-i-dati-nell-analisi-cni.pdf.

[30] C. Del Vecchio, M. Di Ludovico, A. Balsamo, G. Manfredi, A. Prota, and M. Dolce, "La riduzione diffusa della vulnerabilità sismica degli edifici esistenti in cemento armato – Interventi leggeri e a basso impatto basati su materiali compositi," *Structural*, vol. 235, 2021, doi: 10.12917/STRU235.14.

[31] C. Del Vecchio, M. Di Ludovico, A. Balsamo, and A. Prota, "Minimally Invasive FRP Strengthening of External Beam-Column Joints," *J. Compos. Constr.*, vol. 28, no. 4, 2024, doi: 10.1061/JCCOF2.CCENG-4525.

[32] E. Ciampa, F. Ceroni, A. De Angelis, and M. R. Pecce, "Bond tests on concrete elements externally bonded with steel plates and assessment of bond strength models," *Eng. Struct.*, vol. 296, no. 116835, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116835.

[33] G. Santarsiero, V. Manfredi, and A. Masi, "Numerical Evaluation of the Steel Plate Energy Absorption Device (SPEAD) for Seismic Strengthening of RC Frame Structures," *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 18, no. 8, pp. 835-850, 2020, doi: 10.1007/s40999-020-00510-x.

[34] M. I. T. 2019, "Circolare del ministero delle infrastructure e dei trasporti, n.7 del 21 gennaio 2019: "Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 gennaio 2018," *Cons. Super. dei Lav. pubblici. G.U. n.35 del 11.02.2019*, 2019.

[35] CNR-DT 200, *Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures*, R1 ed. Rome, 2013.

[36] fib bulletin 90, *Externally applied FRP reinforcement for concrete structures*. Fédération internationale du béton (fib), 2019, 2019.

[37] A. Penna, P. Morandi, M. Rota, C. F. Manzini, F. da Porto, and G. Magenes, "Performance of masonry buildings during the Emilia 2012 earthquake," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 12, no. 5, pp. 2255-2273, 2014, doi: 10.1007/s10518-013-9496-6.

[38] L. Sorrentino, S. Cattari, F. da Porto, G. Magenes, and A. Penna, "Seismic behaviour of ordinary masonry buildings during the 2016 central Italy earthquakes," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 17, no. 10, pp. 5583-5607, 2019, doi: 10.1007/s10518-018-0370-4.

[39] LL.GG., "Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008 (09/02/2011)," vol. 1, no. c, pp. 1-83, 2011.

[40] MIT, "DM n 24 del 09-01-2020, Sisma Bonus – Linee guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni." 2020.

[41] C. Modena, M. R. Valluzzi, F. Da Porto, and F. Casarin, "Structural aspects of the conservation of historic masonry constructions in seismic areas: Remedial measures and emergency actions," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 5, no. 4-5, pp. 539-558, 2011, doi: 10.1080/15583058.2011.569632.

[42] L. Binda, A. Saisi, and C. Tedeschi, "Compatibility of materials used for repair of masonry buildings: research and applications," *Fract. Fail. Nat. Build. Stones*, pp. 167-182, 2006.

[43] ICOMOS, "Recommendations for the analysis, conservation and structural restoration of architectural heritage," *Archit. Herit.*, pp. 3-6, 2001.

[44] F. da porto, M. Valluzzi, M. Munari, C. Modena, A. Arêde, and A. Costa, "Strengthening of Stone and Brick Masonry Buildings," 2018, pp. 59-84.

[45] M. R. Valluzzi, "Challenges and perspectives for the protection of masonry structures in historic centers: The role of innovative materials and techniques," *RILEM Tech. Lett.*, vol. 1, pp. 45-49, 2016, doi: 10.21809/rilemtechlett.2016.10.

[46] D. A. Pohoryles *et al.*, *Technologies for the combined seismic and energy upgrading of existing buildings*. 2022.

[47] P. Tomaževič, M., Lutman, M., Weiss, "Seismic upgrading of old brick-masonry urban houses: Tying of walls with steel ties," *Earthq Spectra*, no. 12, pp. 599-622, 1996, doi: https://doi.org/10.1193/1.1585898.

[48] O. AlShawa, D. Liberatore, and L. Sorrentino, "Dynamic One-Sided Out-Of-Plane Behavior of Unreinforced-Masonry Wall Restrained by Elasto-Plastic Tie-Rods," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 13, no. 3, pp. 340-357, 2019, doi: 10.1080/15583058.2018.1563226.

[49] S. Podestà and L. Scandolo, "Earthquakes and Tie-Rods: Assessment, Design, and Ductility Issues," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 13, no. 3, pp. 329-339, 2019, doi: 10.1080/15583058.2018.1563239.

[50] V. Follador, P. Carpanese, M. Donà, and F. da Porto, "Effect of retrofit interventions on seismic fragility of Italian residential masonry buildings," *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 91, no. March, 2023, doi: 10.1016/j.ijdrr.2023.103668.

[51] M. R. Valluzzi, "On the vulnerability of historical masonry structures: analysis and mitigation," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 40, no. 7, pp. 723-743, 2007, doi: 10.1617/s11527-006-9188-7.

[52] F. Solarino, D. V Oliveira, and L. Giresini, "Wall-to-horizontal diaphragm connections in historical buildings: A state-of-the-art review," *Eng. Struct.*, vol. 199, no. September, p. 109559, 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109559.

[53] S. Moreira, L. F. Ramos, D. V Oliveira, and P. B. Lourenço, "Design Parameters for Seismically Retrofitted Masonry-To-Timber Connections: Injection Anchors," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 10, no. 2-3, pp. 217-234, 2016, doi: 10.1080/15583058.2015.1113339.

[54] A. S. Araújo, D. V Oliveira, and P. B. Lourenço, "Numerical study on the performance of improved masonry-to-timber connections in traditional masonry buildings," *Eng. Struct.*, vol. 80, pp. 501-513, 2014, doi: 10.1016/j.engstruct.2014.09.027.

[55] C. Modena, M. R. Valluzzi, R. T. Folli, and L. Binda, "Design choices and intervention techniques for repairing and strengthening of the Monza cathedral bell-tower," *Constr. Build. Mater.*, vol. 16, no. 7, pp. 385-395, 2002, doi: 10.1016/S0950-0618(02)00041-7.

[56] A. V. Tomaževič M., "The strengthening of stone-masonry walls by injecting the masonry-friendly grouts," *Eur. Earthq. Eng.*, vol. 7, no. 2, pp. 10-20.

[57] B. G. Binda L., Modena C., "Strengthening of masonries by injection technique," in *Proc. Of, 6th NaMC 1*, 1993, pp. 1-14.

[58] E. Vintzileou and T. P. Tassios, "Three-Leaf Stone Masonry Strengthened by Injecting Cement Grouts," *J. Struct. Eng.*, vol. 121, no. 5, pp. 848-856, 1995, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(1995)121:5(848).

[59] M. R. Valluzzi, F. Da Porto, and C. Modena, "Behavior and modeling of strengthened three-leaf stone masonry walls," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 37, no. 267, pp. 184-192, 2004, doi: 10.1617/13977.

[60] D. V Oliveira, R. A. Silva, E. Garbin, and P. B. Lourenço, "Strengthening of three-leaf stone masonry walls: An experimental research," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 45, no. 8, pp. 1259-1276, 2012, doi: 10.1617/s11527-012-9832-3.

[61] E. Vintzileou and A. Miltiadou-Fezans, "Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts," *Eng. Struct.*, vol. 30, no. 8, pp. 2265-2276, 2008, doi: 10.1016/j.engstruct.2007.11.003.

[62] A. Kalagri, A. Miltiadou-Fezans, and E. Vintzileou, "Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 43, no. 8, pp. 1135-1146, 2010, doi: 10.1617/s11527-009-9572-1.

[63] C. Valluzzi, M.R., Mazzon, N., Garbin E., Modena, "Experimental characterization of out-of-plane seismic response of strengthened three-leaf stone masonry walls by shaking table tests," 2013.

[64] A. Cascardi, M. Leone, and M. A. Aiello, "Transversal joining of multi-leaf masonry through different types of connector: Experimental and theoretical investigation," *Constr. Build. Mater.*, vol. 265, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120733.

[65] M. Corradi, A. Borri, E. Poverello, and G. Castori, "The use of transverse connectors as reinforcement of multi-leaf walls," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 50, no. 2, 2017, doi: 10.1617/s11527-016-0977-3.

[66] M. Corradi, C. Tedeschi, L. Binda, and A. Borri, "Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: Deep repointing," *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, no. 4, pp. 463-472, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.11.021.

[67] C. Modena and M. R. Valluzzi, "Repair techniques for creep and long-term damage of massive structures," in *Advances in Architecture*, 2003, vol. 15, pp. 141-150.

[68] S. Casacci, C. Gentilini, A. Di Tommaso, and D. V Oliveira, "Shear strengthening of masonry wallettes resorting to structural repointing and FRCM composites," *Constr. Build. Mater.*, vol. 206, pp. 19-34, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.044.

[69] L. Garcia-Ramonda, L. Pelá, P. Roca, and G. Camata, "In-plane shear behaviour by diagonal compression testing of brick masonry walls strengthened with basalt and steel textile reinforced mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 240, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117905.

[70] C. Sandoval, R. Serpell, G. Araya-Letelier, and S. Calderón, "Shear behavior of single- and triple-thickness masonry panels strengthened by bed-joint structural repointing," *Constr. Build. Mater.*, vol. 286, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122925.

[71] M. Corradi, A. Borri, G. Castori, and R. Sisti, "Shear strengthening of wall panels through jacketing with cement mortar reinforced by GFRP grids," *Compos. Part B Eng.*, vol. 64, pp. 33-42, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2014.03.022.

[72] I. Hafner, T. Kišiček, and M. Gams, "Review of Methods for Seismic Strengthening of Masonry Piers and Walls," *Buildings*, vol. 13, no. 6, 2023, doi: 10.3390/buildings13061524.

[73] M. De Vita, A. Mannella, A. Sabino, and A. Marchetti, "Seismic retrofit measures for masonry walls of historical buildings, from an energy saving perspective," *Sustain.*, vol. 10, no. 4, 2018, doi: 10.3390/su10040984.

[74] F. Longo, A. Cascardi, P. Lassandro, and M. A. Aiello, "Energy and seismic drawbacks of masonry: a unified retrofitting solution," *J. Build. Pathol. Rehabil.*, vol. 6, no. 1, 2021, doi: 10.1007/s41024-021-00121-6.

[75] T. Triantafillou, A. Bournas, and D. Gkournelos, *Novel technologies for the seismic upgrading of existing European buildings*. 2022.

[76] M. M. K. Zanjani, I. Peralta, V. D. Fachinotti, and A. Caggiano, *Integrated Structural and Energy Retrofitting Based on Cementitious Composites and Phase Change Materials*, vol. 48. 2024.

[77] M. R. Valluzzi, D. Tinazzi, and C. Modena, "Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 16, no. 7, pp. 409-416, 2002, doi: 10.1016/S0950-0618(02)00043-0.

[78] A. Prota, G. Marcari, G. Fabbrocino, G. Manfredi, and C. Aldea, "Experimental in-plane behavior of tuff masonry strengthened with cementitious matrix-grid composites," *J. Compos. Constr.*, vol. 10, no. 3, pp. 223-233, 2006, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2006)10:3(223).

[79] N. G. Shrive, "The use of fibre reinforced polymers to improve seismic resistance of masonry," *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, no. 4, pp. 269-277, 2006, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.08.030.

[80] C. G. Papanicolaou, T. C. Triantafillou, K. Karlos, and M. Papathanasiou, "Textile-reinforced mortar (TRM) versus FRP as strengthening material of URM walls: In-plane cyclic loading," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 40, no. 10, pp. 1081-1097, 2007, doi: 10.1617/s11527-006-9207-8.

[81] M. R. Valluzzi, F. da Porto, E. Garbin, and M. Panizza, "Out-of-plane behaviour of infill masonry panels strengthened with composite materials," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 47, no. 12, pp. 2131-2145, 2014, doi: 10.1617/s11527-014-0384-6.

[82] Cnr, "DT-200/2014 – Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati (in Italian), Consiglio Nazionale delle Ricerche," 2014.

[83] C.-D. 215, "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizo do Compositi Fibrorinforzati a Matrice Inorganica," *CNR Cons. Naz. delle Ricecrche*, p. 89, 2018.

[84] L. Facconi, A. Conforti, F. Minelli, and G. A. Plizzari, "Improving shear strength of unreinforced masonry walls by nano-reinforced fibrous mortar coating," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 48, no. 8, pp. 2557-2574, 2015, doi: 10.1617/s11527-014-0337-0.

[85] L. Facconi, S. S. Lucchini, F. Minelli, and G. A. Plizzari, "Analytical model for the in-plane resistance of masonry walls retrofitted with steel fiber reinforced mortar coating," *Eng. Struct.*, vol. 275, no. PB, p. 115232, 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2022.115232.

[86] N. Gattesco, E. Rizzi, L. Facconi, F. Minelli, and A. Dudine, "Investigating the effectiveness of a CRM system: full scale reverse cyclic tests on a two-storey rubblestone masonry building," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 44, no. 2022, pp. 2222-2229, 2022, doi: 10.1016/j.prostr.2023.01.284.

[87] N. Gattesco, E. Rizzi, I. Boem, A. Dudine, and M. Gams, "A new method of seismic strengthening stone masonry with CRM coatings on one side," *Constr. Build. Mater.*, vol. 407, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133565.

[88] N. Gattesco, I. Boem, E. Rizzi, A. Dudine, and M. Gams, "Cyclic tests on two-leaf rubble stone masonry spandrels strengthened with CRM coating on one or both sides," *Eng. Struct.*, vol. 296, 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.116965.

[89] M. Gams, I. Boem, N. Gattesco, E. Rizzi, and A. Dudine, "Experimental study on the seismic enhancement of brick masonry spandrels using a single-sided composite reinforced mortar coating," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 22, no. 5, pp. 2531-2552, 2024, doi: 10.1007/s10518-024-01868-2.

[90] T. C. Triantafillou, K. Karlos, K. Kefalou, and E. Argyropoulou, "An innovative structural and energy retrofitting system for URM walls using textile reinforced mortars combined with thermal insulation: Mechanical and fire behavior," *Constr. Build. Mater.*, vol. 133, pp. 1-13, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.032.

[91] D. A. Pohoryles, D. A. Bournas, F. Da Porto, A. Caprino, G. Santarsiero, and T. Triantafillou, "Integrated seismic and energy retrofitting of existing buildings: A state-of-the-art review," *J. Build. Eng.*, vol. 61, no. September, p. 105274, 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.105274.

[92] M. Giaretton, D. Dizhur, E. Garbin, J. M. Ingham, and F. Da Porto, "In-Plane Strengthening of Clay Brick and Block Masonry Walls Using Textile-Reinforced Mortar," *J. Compos. Constr.*, vol. 22, no. 5, 2018, doi: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000866.

[93] L. Facconi, S. S. Lucchini, F. Minelli, B. Grassi, M. Pilotelli, and G. A. Plizzari, "Innovative method for seismic and energy retrofitting of masonry buildings," *Sustain.*, vol. 13, no. 11, pp. 1-21, 2021, doi: 10.3390/su13116350.

[94] D. A. Pohoryles, D. A. Bournas, F. Da Porto, G. Santarsiero, and Triantafillou, *Overview of combined seismic and energy upgrading technologies for existing*. Luxembourg, 2022.

[95] V. Pertile, A. Stella, L. De Stefani, and R. Scotta, "Seismic and energy integrated retrofitting of existing buildings with an innovative icf-based system: Design principles and case studies," *Sustain.*, vol. 13, no. 16, 2021, doi: 10.3390/su13169363.

[96] R. Landolfo, A. Formisano, G. Di Lorenzo, and A. Di Filippo, "Classification of european building stock in technological and typological classes," *J. Build. Eng.*, vol. 45, no. 103482, 2022, doi: ISSN 2352-7102.

[97] "Eurostat Data Navigation Tree," vol. 6, pp. 1-172, 2011.

[98] Eurostat, "Owner-Occupied Dwellings by Type and Year of Construction of the Building," Luxembourg, 2001.

[99] JBDPA, "Guideline for Seismic Retrofit of Existing Reinforced Concrete Buildings," 2001.

[100] JBDPA, "Japan Building Disaster Prevention Association: Standards for evaluation of seismic capacity and guidelines for seismic rehabilitation of existing reinforced concrete buildings. revised in 1990 (in Japanese)," 1977.

[101] DOA-N-AF, "Seismic Design Guidelines for Upgrading Existing Buildings, Army TM 5-809-10-2, Navy NAVFAC P-355.2, AFM 88-3, Chap. 13, Sec. B," 1988.

[102] A. Carvezan, M. L. Tornaghi, and P. Negro, "Taxonomy of the redevelopment methods for non-listed architecture: from façade refurbishment to the exoskeleton system," 2016.

[103] A. Bossio, F. Russo, F. Fabbrocino, G. P. Lignola, and A. Prota, "Evaluation of Corroded Reinforced Concrete Buildings According to Sismabonus," 2018.

[104] C. Passoni, A. Marini, A. Belleri, and C. Menna, "Redefining the concept of sustainable renovation of buildings: State of the art and an LCT-based design framework," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 64, no. 102519, 2021.

[105] G. Di Lorenzo, E. Colacurcio, A. Di Filippo, A. Formisano, A. Massimilla, and R. Landolfo, "State-of-the-art on steel exoskeletons for seismic retrofit of existing RC buildings," *Ing. Sismica*, vol. 37, no. 1, pp. 33-50, 2020.

[106] M. Franceschini, P. Semproli, A. Secci, M. Mundadori, B. Melli, and B. Biancocini, "I segni della ricostruzione post terremoto maggio 2012: L'adeguamento sismico della palazzina per uffici nello stabilimento Magneti Marelli di Crevalcore," *Fond. Promoz. Acciaio*, 2014.
[107] G. Di Lorenzo, R. Tartaglia, A. Prota, and R. Landolfo, "Design procedure for orthogonal steel exoskeleton structures for seismic strengthening," *Eng. Struct.*, vol. 275, no. 115252, 2023.
[108] A. Marini, A. Belleri, C. Passoni, F. Feroldi, and E. Giuriani, "In-plane capacity of existing post-WWII beam-and-clay block floor systems," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 20, pp. 1655-1683, 2022.
[109] ASCE, "ASCE standard, ASCE/SEI, 41-17, seismic evaluation and retrofit of existing buildings." American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, 2017.
[110] NZSEE, "Assessment and Improvement of the Structural Performance of Buildings in Earthquakes (Section 3, Initial Seismic Assessment)," vol. 3, no. September. Wellington, New Zealand, p. 72, 2017.
[111] I. Giongo, G. Schiro, R. Tomasi, D. Dizhur, and J. Ingham, "Seismic assessment procedures for flexible timber diaphragms," 2015, doi: 10.1007/978-3-319-39492-3_22.
[112] CEN, "PrEN 1998-3:2021. Earthquake resistance design of structures – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings." Brussels, BE, 2021.
[113] M. Piazza, I. Giongo, E. Rizzi, and D. Riccadonna, "Riduzione della vulnerabilità sismica di edifici tradizionali tramite interventi sui diaframmi lignei di piano e di copertura," *DPC-ReLUIS 2022-2024*, vol. WP13-Task, 2024.
[114] J. P. Moehle, J. D. Hooper, C. Passoni, and T. R. Meyer, "Seismic design of cast-in-place concrete diaphragms, chords, and collectors: a guide for practicing engineers," *NIST GCR 10-917-4*, 2010.
[115] H. Saffarini and M. Qudaimat, "In-plane floor deformations in RC Structures," *J. Struct. Eng.*, vol. 118, pp. 3089-3102, 1992.
[116] S. H. Ju and M. C. Lin, "Comparison of building analyses assuming rigid or flexible floors," *J. Struct. Eng.*, no. 125, pp. 25-31, 1999.
[117] R. Khajehdehi and N. Panahshahi, "Effect of openings on in-plane structural behavior of reinforced concrete floor slabs," *J. Build. Eng.*, no. 7, pp. 1-11, 2016.
[118] M. Pecce, F. Ceroni, G. Maddaloni, and V. Iannuzzella, "Assessment of the in-plane deformability of RC floors with traditional and innovative lightening elements in RC framed and wall structures," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 15, no. 7, pp. 3125-3149, 2017, doi: 10.1007/s10518-017-0083-0.
[119] M. R. Pecce, F. Ceroni, and G. Maddaloni, "In-plane deformability of RC floors: assessment of the main parameters and influence on dynamic behaviour," *Bull. Earthq. Eng.*, no. 17, pp. 297-311, 2019, doi: 10.1007/s10518-018-0432-7.
[120] G. Frappa, I. Pitacco, S. Baldassi, and M. Pauletta, "Methods to Reproduce In-Plane Deformability of Orthotropic Floors in the Finite Element Models of Buildings," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 11, 2023, doi: 10.3390/app13116733.
[121] D. K. Bull, "Understanding the complexities of designing diaphragms in buildings for earthquakes," *Bull N Z Soc Earthq Eng*, vol. 37(2), pp. 70-88, 2004.
[122] F. Feroldi *et al.*, "Energy efficiency upgrading, architectural restyling and structural retrofit of modern buildings by means of 'engineered' double skin façade," in *Structures and architecture: concepts, applications and challenges*, 1st Editio., Londra, 2013, p. 8.
[123] E. Casprini, C. Passoni, A. Marini, E. Belleri, and E. Giuriani, "In-plane capacity of beam and block floor systems: An in-field experimental study," 2020.
[124] A. Marini *et al.*, "Combining seismic retrofit with energy refurbishment for the sustainable renovation of RC buildings: a proof of concept," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, 2017, doi: 10.1080/19648189.2017.1363665.

[125] C. Passoni, E. Casprini, A. Marini, and A. Belleri, "The role of capacity and flexibility of floor diaphragms in the seismic retrofit of existing RC buildings," 2022.
[126] A. Marini, G. Plizzari, and C. Zanotti, "Seismic enhancement of existing building by means of fiber reinforced concrete diaphragms," *J Civ. Eng Arch*, vol. 4, no. 6-15, 2010.
[127] CEN, "PrEN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings." Brussels, BE, 2004.
[128] J. Zanni, S. Labò, P. Passoni, A. Marini, A. Belleri, and P. Riva, "Intervento di riqualificazione integrata strutturale energetica ed architettonica di edifici residenziali in ottica LCT," in *Atti del XXVIII Congresso C.T.A. (Volume I)*, Francavilla al mare (PE), 2022.
[129] E. Giuriani, *Consolidamento degli edifici storici*. 2012.
[130] L. Sbrogiò, Y. Saretta, and M. R. Valluzzi, "Empirical Performance Levels of Strengthened Masonry Buildings Struck by the 2016 Central Italy Earthquake: Proposal of a New Taxonomy," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 17, no. 7, pp. 1017-1042, 2023, doi: 10.1080/15583058.2021.2011474.
[131] M. Donà, P. Morandi, M. Minotto, C. F. Manzini, F. da Porto, and G. Magenes, "Second-order effects in URM walls subjected to compression and out-of-plane bending: from numerical evaluation to proposal of design procedures," *Eng. Struct.*, 2020.
[132] E. Giuriani, "L'organizzazione degli impalcati per gli edifici storici," *L'Edilizia. Spec. Legno Strutt.*, pp. 30-41, 2004.
[133] J. Zanni, S. Labò, C. Passoni, A. Marini, and E. Giuriani, "Criticità legate alla concezione strutturale di diaframmi di piano complessi," *Rep. ReLUIS UniBG*, 2024.
[134] G. Metelli, E. Giuriani, and et al., "Intervento di miglioramento sismico dell'edificio residenziale caso-studio 'pieve torina' con la tecnica dell'assito in legno incrociato," *Rep. Reluis WP5-UR8-TASK1-UNIBS*, 2022.
[135] M. Piazza, C. Baldessari, and R. Tomasi, "The role of in-plane floor stiffness in the seismic behaviour of traditional buildings," 2008.
[136] C. Baldessari, M. Piazza, and R. Tomasi, "The refurbishment of existing timber floors: characterization of the in-plane behaviour," 2009.
[137] M. R. Valluzzi, E. Garbin, M. Della Benetta, and C. Modena, "Experimental assessment and modelling of in-plane behaviour of timber floors," in *Structural Analysis of historic Construction, Preserving Safety and Significance*, 2008, pp. 755-765.
[138] M. R. Valluzzi, E. Garbin, M. dalla Benetta, and C. Modena, "In-plane strengthening of timber floors for the seismic improvement of masonry buildings," *Proc. 11th World Conf. Timber Eng.*, pp. 1752-1757, 2010.
[139] M. R. Valluzzi, E. Garbin, M. Della Benetta, and C. Modena, "Experimental Characterization of Timber Floors Strengthened by in-Plane Improvement Techniques," *Adv. Mater. Res.*, no. 778, pp. 682-689, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.778.682.
[140] E. Rizzi, M. Capovilla, I. Giongo, and M. Piazza, "Numerical study on the in-plane behaviour of existing timber diaphragms strengthened with diagonal sheathing," *SHATIS'17*, pp. 1-12, 2017.
[141] G. Metelli, E. Giuriani, and et al., "Solai lignei rinforzati sismicamente con la tecnica del doppio assito: risultati sperimentali di un diaframma con assi diagonali discontinue e validazione di un modello numerico agli elementi finiti," *Rep. Reluis WP5-UR8-TASK1-UNIBS*, 2020.
[142] G. Metelli, A. Marini, S. Cominelli, F. Feroldi, A. M. B. Bert, and E. Giuriani, "Preliminary test results on the in-plane strengthening of timber floors with the double planking technique," *13th World Conf. Timber Eng.*, vol. 1, pp. 358-365, 2023, doi: 10.52202/069179-0049.
[143] A. Brignola, S. Pampanin, and S. Podestà, "Experimental evaluation of the in-plane stiffness of timber diaphragms," *Earthq. Spectra*, vol. 28, no. 4, pp. 1687-1709, 2012, doi: 10.1193/1.4000088.

[144] M. R. Valluzzi, A. di Bella, and E. Garbin, "Optimization of mechanical and acoustic performance of timber floors," *Adv. Mater. Res.*, vol. 778, pp. 690-697, 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.778.690.

[145] A. Gubana and M. Melotto, "Experimental tests on wood-based in-plane strengthening solutions for the seismic retrofit of traditional timber floors," *Constr. Build. Mater.*, vol. 191, pp. 290-299, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.177.

[146] A. Gubana and M. Melotto, "Cyclic numerical analyses on wood-based in-plane retrofit solutions for existing timber floors," *Structures*, vol. 33, no. June 2020, pp. 1764-1774, 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.05.037.

[147] E. Rizzi, M. Capovilla, M. Piazza, and I. Giongo, "In-plane behaviour of timber diaphragms retrofitted with CLT panels," *RILEM Bookseries*, 2019, doi: 10.1007/978-3-319-99441-3_173.

[148] E. Rizzi, I. Giongo, J. M. Ingham, and D. Dizhur, "Testing and Modeling In-Plane Behavior of Retrofitted Timber Diaphragms," *J. Struct. Eng.*, vol. 146, no. 2, pp. 1-15, 2020, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002473.

[149] M. Salvalaggio and M. R. Valluzzi, "Optimization of Intervention Strategies for Masonry Buildings Based on CLT Components," *Heritage*, vol. 5, no. 3, pp. 2142-2159, 2022, doi: 10.3390/heritage5030112.

[150] CEN, "PrEN 1995-1-1 (2024). Eurocode 5: Design of timber structures." 2024.

[151] M. R. Valluzzi, E. Garbin, C. Modena, E. Bozza, and D. Francescato, "Modeling of timber floors strengthened with seismic improvement techniques," *Struct. Heal. Assess. Timber Struct.*, pp. 744-755, 2016, doi: 10.17425/WK46TIMBER.

[152] N. Gattesco and L. Marcorini, "In-plane stiffening techniques with nail plates of CFRP strips for timber floors in historical masonry buildings," *Constr. Build. Mater.*, vol. 58, no. 2, pp. 64-76, 2014.

[153] A. Meda and P. Riva, "Strengthening of wooden floors with high performance concrete slabs," *Int. J. Restaur. Build. Monum.*, 2003.

[154] I. Giongo, D. Dizhur, R. Tomasi, and J. M. Ingham, "Field testing of flexible timber diaphragms in an existing vintage URM building," *J. Struct. Eng. 141*, 2014.

[155] I. Giongo, A. Wilson, and et al., "Detailed seismic assessment and improvement procedure for vintage flexible timber diaphragms," *NZSEE Bull.*, vol. 47, pp. 97-118, 2014.

[156] I. Giongo, E. Rizzi, J. M. Ingham, and D. Dizhur, "Numerical Modeling Strategies for In-Plane Behavior of Straight Sheathed Timber Diaphragms," *J. Struct. Eng.*, vol. 144, no. 10, pp. 1-13, 2018, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002148.

[157] A. Marini, E. Giuriani, A. Belleri, and S. Cominelli, "Dowel connections securing roof-diaphragms to perimeter walls in historic masonry buildings and in-field testing for capacity assessment," *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 16, pp. 4001-4025, 2018.

[158] D. Cassol, I. Giongo, J. Ingham, and D. Dizhur, "Seismic out-of-plane retrofit of URM walls using timber strong-backs," *Constr. Build. Mater.*, vol. 269, p. 121237, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121237.

[159] G. Guerrini, N. Damiani, M. Miglietta, and F. Graziotti, "Cyclic response of masonry piers retrofitted with timber frames and boards," *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.*, vol. 174, no. 5, pp. 372-388, 2021, doi: 10.1680/jstbu.19.00134.

[160] M. Miglietta, N. Damiani, G. Guerrini, and F. Graziotti, *Full-scale shake-table tests on two unreinforced masonry cavity-wall buildings: effect of an innovative timber retrofit*, vol. 19, no. 6. Springer Netherlands, 2021.

[161] I. Giongo, G. Schiro, and M. Piazza, "On the use of timber-based panels for the seismic retrofit of masonry structures," 2017.

[162] F. Smiroldo, I. Giongo, and M. Piazza, "Use of timber panels to reduce the seismic vulnerability of concrete frame structures," *Eng. Struct.*, vol. 244, no. July, p. 112797, 2021, doi: 10.1016/j.engstruct.2021.112797.

[163] D. Cassol, I. Giongo, and M. Piazza, "Numerical study on seismic retrofit of URM walls using timber panels," *COMPDYN Proc.*, vol. 2021-June, pp. 563-580, 2021, doi: 10.7712/120121.8509.19447.

[164] I. Giongo, E. Rizzi, D. Riccadonna, and M. Piazza, "On-site testing of masonry shear walls strengthened with timber panels," *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.*, vol. 174, no. 5, pp. 389-402, 2021, doi: 10.1680/jstbu.19.00179.

[165] F. Smiroldo, A. Bartolotti, M. Colombo, and I. Giongo, "Timber-based seismic retrofit of a 5-storey RC structure built in 1955," *NZSEE 2023 Annu. Conf.*, 2023.

[166] F. Smiroldo, S. Kallioras, G. Sommacal, D. Bournas, M. Piazza, and I. Giongo, "Full-scale testing of masonry-infilled RC frames retrofitted with cross-laminated timber panels," *Eng. Struct.*, vol. 294, no. August, 2023, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.116789.

[167] M. R. Valluzzi *et al.*, "Nested buildings: An innovative strategy for the integrated seismic and energy retrofit of existing masonry buildings with CLT panels," *Sustain.*, vol. 13, no. 3, pp. 1-19, 2021, doi: 10.3390/su13031188.

[168] D. Riccadonna, I. Giongo, G. Schiro, E. Rizzi, and M. A. Parisi, "Experimental shear testing of timber-masonry dry connections for the seismic retrofit of unreinforced masonry shear walls," *Constr. Build. Mater.*, vol. 211, pp. 52-72, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.145.

[169] C. Passoni, J. Guo, C. Christopoulos, A. Marini, and P. Riva, "Design of dissipative and elastic high-strength exoskeleton solutions for sustainable seismic upgrades of existing RC buildings," *Eng. Struct.*, vol. 221, 2020.

[170] J. Zanni *et al.*, "Application of CLT prefabricated exoskeleton for an integrated renovation of existing buildings and continuous structural monitoring," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 44, pp. 1164-1171, 2022, doi: 10.1016/j.prostr.2023.01.150.

[171] J. Zanni *et al.*, "Application of a wooden prefabricated shell exoskeleton for the integrated and sustainable retrofit of a residential building," *13th World Conf. Timber Eng. WCTE 2023*, vol. 7, pp. 4173-4181, 2023, doi: 10.52202/069179-0543.

[172] D. Cassol, M. Danovska, A. Prada, and I. Giongo, "Timber-Based Strategies for Seismic Collapse Prevention and Energy Performance Improvement in Masonry Buildings," *Sustain.*, vol. 16, no. 1, 2024, doi: 10.3390/su16010392.

[173] M. Busselli, D. Cassol, A. Prada, and I. Giongo, "Timber based integrated techniques to improve energy efficiency and seismic behaviour of existing masonry buildings," *Sustain.*, vol. 13, no. 18, 2021, doi: 10.3390/su131810379.

[174] F. Smiroldo, I. Paviani, I. Giongo, S. Zanon, R. Albatici, and M. Piazza, "An integrated approach to improve seismic and energetic behaviour of rc framed buildings using timber panels," *Sustain.*, vol. 13, no. 20, 2021, doi: 10.3390/su132011304.

[175] A. Marini *et al.*, "Combining seismic retrofit with energy refurbishment for the sustainable renovation of RC buildings : a proof of concept," *Eur. J. Environ. Civ. Eng.*, vol. 8189, pp. 1-21, 2017, doi: 10.1080/19648189.2017.1363665.

[176] J. Zanni *et al.*, "Riqualificazione integrata e sostenibile di edifici esistenti con esoscheletri a guscio prefabbricati: il caso studio AdESA," in *Colloqui.AT.e 2020 – Artec Conference*, 2020, pp. 1592-1604, doi: ISBN: 978-88-96386-94-1.

[177] J. Zanni *et al.*, "Integrated deep renovation of existing buildings with prefabricated shell exoskeleton," *Sustain.*, vol. 13, no. 20, pp. 1-27, 2021, doi: 10.3390/su132011287.

[178] M. Giaretton, D. Dizhur, and J. M. Ingham, "Shaking table testing of as-built and retrofitted clay brick URM cavity-walls," *Eng. Struct.*, vol. 125, pp. 70-79, 2016, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.06.032.

[179] N. Damiani, M. Miglietta, G. Guerrini, and F. Graziotti, "Numerical Assessment of the Seismic Performance of a Timber Retrofit Solution for Unreinforced Masonry Buildings," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 17, no. 1, pp. 114-133, 2023, doi: 10.1080/15583058.2022.2106461.

[180] N. Damiani, G. Guerrini, and F. Graziotti, "Design procedure for a timber-based seismic retrofit applied to masonry buildings," *Eng. Struct.*, vol. 301, no. April 2023, 2024, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.116991.

[181] G. Guerrini, N. Damiani, M. Miglietta, and F. Graziotti, "Experimental validation of analytical equations for retrofitting masonry buildings with timber frames and boards," *Eng. Struct.*, vol. 300, no. November 2023, 2024, doi: 10.1016/j.engstruct.2023.117124.

[182] E. Rizzi, I. Giongo, D. Riccadonna, and M. Piazza, *Testing of Irregular Stone Masonry Strengthened with Cross-Laminated Timber*, vol. 209 LNCE. 2022.

[183] G. Schiro and I. Giongo, "Adeguamento sismico di edifici esistenti in muratura con pannelli XLAM: un caso studio," *Ingenio web Mag.*

[184] F. Pierobon, M. Huang, K. Simonen, and I. Ganguly, "Environmental benefits of using hybrid CLT structure in midrise non-residential construction: An LCA based comparative case study in the U.S. Pacific Northwest," *J. Build. Eng.*, vol. 26, no. February, 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2019.100862.

[185] M. Dolce, D. Cardone, A. Di Cesare, F. C. Ponzo. *Progetto di edifici con isolamento sismico*. Prima edizione. IUSS Press, Pavia, dicembre 2004. M. Dolce, F. C. Ponzo, A. Di Cesare, G. Arleo, *Progetto di edifici con isolamento sismico*. Seconda edizione. IUSS Press, Pavia. 2010. ISBN: 978-88-6198-050-1.

[186] M. C. Constantinou and M. C. Kneifati, "Dynamics of soil-base-isolated-structure systems," *ASCE J. Struct. Eng.*, vol. 114, no. 1, pp. 211-221, 1988, doi: 0733-9445/88/0001-0211.

[187] T. E. Kelly, "Base Isolation of Structures: design guidelines," 2001.

[188] C. Menna *et al.*, "Review of methods for the combined assessment of seismic resilience and energy efficiency towards sustainable retrofitting of existing European buildings," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 77, p. 103556, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.SCS.2021.103556.

[189] C. Menna, C. Del Vecchio, M. Di Ludovico, G. M. Mauro, F. Ascione, and A. Prota, "Conceptual design of integrated seismic and energy retrofit interventions," *J. Build. Eng.*, vol. 38, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102190.

[190] P. Bragolusi and C. D'Alpaos, "The valuation of buildings energy retrofitting: A multiple-criteria approach to reconcile cost-benefit trade-offs and energy savings," *Appl. Energy*, vol. 310, p. 118431, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.118431.

[191] M. Sassu, F. Stochino, and F. Mistretta, "Assessment Method for Combined Structural and Energy Retrofitting in Masonry Buildings," *Build. 2017, Vol. 7, Page 71*, vol. 7, no. 3, p. 71, Aug. 2017, doi: 10.3390/BUILDINGS7030071.

[192] L. Giresini, S. Paone, and M. Sassu, "Integrated Cost-Analysis Approach for Seismic and Thermal Improvement of Masonry Building Façades," *Build. 2020, Vol. 10, Page 143*, vol. 10, no. 8, p. 143, Aug. 2020, doi: 10.3390/BUILDINGS10080143.

[193] N. Caterino and E. Cosenza, "Evaluation of seismic retrofit techniques via a multicriteria approach accounting for Italian tax incentives," in *ANIDIS 2017 Pistoia*, 2017, pp. 44-53.

[194] W. W. C. Gallo, G. Gabbianelli, and R. Monteiro, "Assessment of Multi-Criteria Evaluation Procedures for Identification of Optimal Seismic Retrofitting Strategies for Existing RC Buildings," *J. Earthq. Eng.*, vol. 26, no. 11, pp. 5539-5572, Aug. 2022, doi: 10.1080/13632469.2021.1878074.

[195] N. Clemett, W. W. C. Gallo, G. Gabbianelli, G. J. O'Reilly, and R. Monteiro, "Optimal Combined Seismic and Energy Efficiency Retrofitting for Existing Buildings in Italy," *J. Struct. Eng.*, vol. 149, no. 1, p. 04022207, Oct. 2022, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003500.

[196] R. W. Saaty, "The analytic hierarchy process—what it is and how it is used," *Math. Model.*, vol. 9, no. 3-5, pp. 161-176, Jan. 1987, doi: 10.1016/0270-0255(87)90473-8.

[197] W. W. C. Gallo, N. Clemett, G. Gabbianelli, G. O'Reilly, and R. Monteiro, "Influence of Parameter Uncertainty in Multi-Criteria Decision-Making When Identifying Optimal Retrofitting Strategies for RC Buildings," *J. Earthq. Eng.*, vol. 27, no. 7, pp. 1769-1794, May 2023, doi: 10.1080/13632469.2022.2087794.

[198] F. Mistretta, F. Stochino, and M. Sassu, "Structural and thermal retrofitting of masonry walls: An integrated cost-analysis approach for the Italian context," *Build. Environ.*, vol. 155, pp. 127-136, May 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.03.033.

[199] L. Giresini, C. Casapulla, and P. Croce, "Environmental and Economic Impact of Retrofitting Techniques to Prevent Out-of-Plane Failure Modes of Unreinforced Masonry Buildings," *Sustain. 2021, Vol. 13, Page 11383*, vol. 13, no. 20, p. 11383, Oct. 2021, doi: 10.3390/SU132011383.

[200] L. Giresini *et al.*, "Iso-Class Curves for the Assessment of Seismic/Energy Retrofitting of an Existing Masonry Building through a Timber Frame System," pp. 1-21, 2024.

[201] M. Caruso, R. Pinho, F. Bianchi, F. Cavalieri, and M. T. Lemmo, "A Life Cycle Framework for the Identification of Optimal Building Renovation Strategies Considering Economic and Environmental Impacts," *Sustainability*, vol. 12, no. 23, p. 10221, 2020, doi: 10.3390/su122310221.

[202] M. Caruso, R. Pinho, F. Bianchi, F. Cavalieri, and M. T. Lemmo, "Multi-criteria decision-making approach for optimal seismic/energy retrofitting of existing buildings," *Earthq. Spectra*, vol. 39, no. 1, pp. 191-217, Feb. 2023, doi: 10.1177/87552930221141917/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_87552930221141917-FIG11.JPEG.

[203] C. Passoni, M. Caruso, A. Marini, R. Pinho, and R. Landolfo, "The Role of Life Cycle Structural Engineering in the Transition towards a Sustainable Building Renovation: Available Tools and Research Needs," *Build. 2022, Vol. 12, Page 1107*, vol. 12, no. 8, p. 1107, Jul. 2022, doi: 10.3390/BUILDINGS12081107.

[204] C. Passoni, E. Palumbo, R. Pinho, and A. Marini, "The LCT Challenge: Defining New Design Objectives to Increase the Sustainability of Building Retrofit Interventions," *Sustain. 2022, Vol. 14, Page 8860*, vol. 14, no. 14, p. 8860, Jul. 2022, doi: 10.3390/SU14148860.

[205] C. Passoni, A. Marini, A. Belleri, and C. Menna, "Redefining the concept of sustainable renovation of buildings: State of the art and an LCT-based design framework," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 64, no. October 2020, p. 102519, 2021, doi: 10.1016/j.scs.2020.102519.

[206] B. García de Soto *et al.*, "Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall," *Autom. Constr.*, vol. 92, pp. 297-311, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.autcon.2018.04.004.

[207] A. Marini, C. Passoni, A. Belleri, "Life cycle perspective in RC building integrated renovation" International Conference on Building Pathology and Constructions Repair – CINPAR 2018, *Procedia Structural Integrity* Volume 11, 2018, Pages 28-35.

[208] Federal Emergency Management Agency "FEMA P-58. Seismic Performance Assessment of Buildings", 2018.

[209] UNI EN 15459-1:2018 "Prestazione energetica degli edifici - Sistemi di riscaldamento e sistemi di raffrescamento idronici negli edifici - Parte 1: Procedura di valutazione economica per i sistemi energetici negli edifici", 2018.

[210] Caruso, M., Pinho, R., Bianchi, F., Cavalieri, F., & Lemmo, M. T. (2021). Integrated economic and environmental building classification and optimal seismic vulnerability/energy efficiency retrofitting. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 19(9), 3627-3670.

Autori

Martina Caruso
Assegnista, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Pavia

Serena Cattari
Professoressa Ordinaria, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale, Università di Genova

Francesca da Porto
Professoressa Ordinaria, Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova

Ciro Del Vecchio
Professore Associato, Dipartimento di Ingegneria, Università del Sannio, Benevento

Mauro Dolce
Professore Ordinario, Presidente del Consorzio ReLUIS

Natalino Gattesco
Professore Ordinario, Dipartimento di Ingegneria e Architettura, Università di Trieste

Ivan Giongo
Professore Associato, Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica, Università di Trento

Linda Giresini
Ricercatrice, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "Sapienza"

Francesco Graziotti
Ricercatore, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Pavia

Sergio Lagomarsino
Professore Ordinario, Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale, Università di Genova

Raffaele Landolfo
Professore Ordinario, Dipartimento di Strutture per l'ingegneria e l'architettura, Università di Napoli Federico II

Alessandra Marini
Professoressa Ordinaria, Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate, Università di Bergamo

Costantino Menna
Professore Associato, Dipartimento di Strutture per l'ingegneria e l'architettura, Università di Napoli Federico II

Giovanni Metelli
Professore Associato, Dipartimento di Ingegneria Civile, Architettura, Territorio, Ambiente e di Matematica, Università di Brescia

Ricardo Monteiro
Professore Associato, IUSS Pavia

Chiara Passoni
Ricercatrice, Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate, Università di Bergamo

Margherita Pauletta
Professoressa Associata, Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura, Università di Udine

Maurizio Piazza
Professore Ordinario, Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale e Meccanica, Università di Trento

Rui Pinho
Professore Ordinario, Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Pavia

Andrea Prota
Professore Ordinario, Dipartimento di Strutture per l'ingegneria e l'architettura, Università di Napoli Federico II

Elisa Saler
Assegnista, Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova

Luca Sbrogiò
Ricercatore, Dipartimento dei Beni Culturali: archeologia, storia dell'arte, del cinema e della musica, Università di Padova

Luigi Sorrentino
Professore Associato, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Università di Roma "Sapienza"

Maria Rosa Valluzzi
Professoressa Associata, Dipartimento dei Beni Culturali: archeologia, storia dell'arte, del cinema e della musica, Università di Padova

Jacopo Zanni
Assegnista, Dipartimento di Ingegneria e Scienze Applicate, Università di Bergamo

Elenco unità di ricerca partecipanti

Napoli Federico II (Andrea Prota), Padova (Francesca da Porto), ITC – CNR (Claudio Modena), Politecnico di Milano (Maria Adelaide Vittoria Parisi) Politecnico di Milano (Claudio Chesi), Politecnico di Milano (Gabriele Milani), Basilicata (Angelo Masi/ Giuseppe Santarsiero), Bergamo (Alessandra Marini), Brescia (Giovanni Metelli), Brescia (Marco Preti), Cagliari (Mauro Sassu, Flavio Stochino), Campania "Vanvitelli" (Alberto Mandara), Catania (Ivo Caliò), Catania (Caterina Felicia Carocci), Genova (Serena Cattari/Sergio Lagomarsino), Napoli Federico II (Raffaele Landolfo), Napoli Federico II (Emidio Nigro), Napoli Federico II (Bruno Calderoni/Giuseppe Brandonisio), Padova (Maria Rosa Valluzzi), Parma (Gianni Royer Carfagni), Pavia (Andrea Penna, Francesco Graziotti), Roma "Sapienza" (Luigi Sorrentino), Roma Tre (Gianmarco De Felice), Roma "Sapienza" (Giorgio Monti/Nicola Nisticò), Salerno (Gianvittorio Rizzano), Sannio (Luigi Di Sarno), Sannio (Maria Rosaria Pecce), Sannio (Stefania Sica/ Alessandra De Angelis), Trento (Maurizio Piazza/Ivan Giongo), Trieste (Natalino Gattesco), Udine (Gaetano Russo/Margherita Pauletta), Napoli Federico II (Gaetano Della Corte), Napoli Federico II (Luciano Rosati), Napoli Federico II (Francesco Marotti De Sciarra), Napoli Federico II (Costantino Menna), Sannio (Ciro Del Vecchio), Napoli Parthenope (Nicola Caterino), Napoli Federico II (Gerardo Mario Verderame), IUSS-Pavia (Gian Michele Calvi), IUSS-Pavia (Ricardo Monteiro), Pavia (Rui Pinho), Politecnico di Torino (Giuseppe Ferro), Napoli Federico II (Francesco Portioli), Roma "Sapienza" (Linda Giresini)

Appendice

Caso studio 1: edificio scolastico in cemento armato sito in provincia di Teramo

https://www.reluis.it/doc/DPC-ReLUIS-2022-2024/WP5/07_ISOLA_DEL_GRAN_SASSO_scuola_CA.pdf

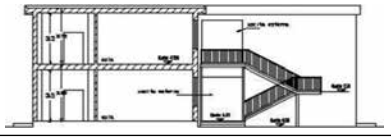
TIPOLOGIA	
Destinazione d'uso	Edificio scolastico
Sistema costruttivo	Telai in cemento armato
Epoca di costruzione	1960-1970
Numero di piani	2 fuori terra
Area in pianta	735 mq a piano
Superficie calpestabile	1470 mq
Regolare in pianta	No
Reg. in elevazione	Sì
Classe d'uso	III

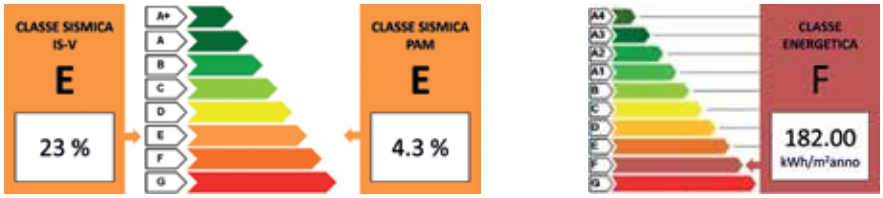
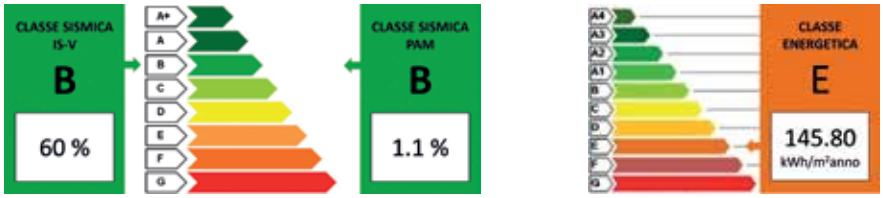
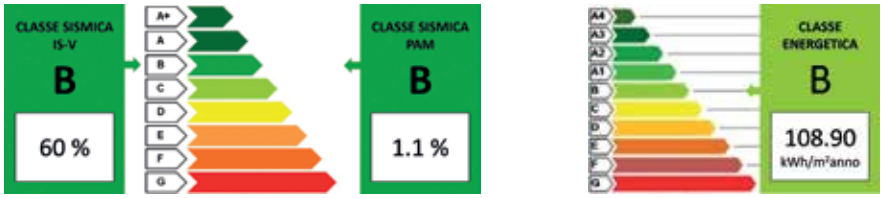
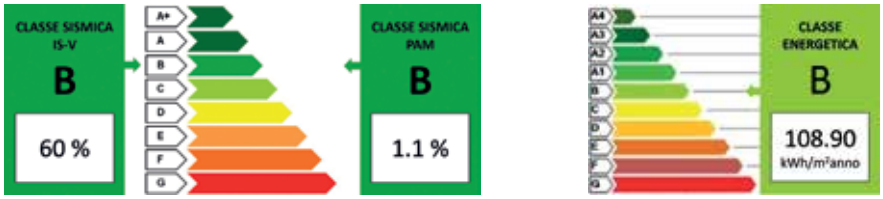


PARAMETRI DI DOMANDA			
Zona Sismica: 2			**Zona Climatica: D**
$a_{g\ SLV}$ = 0,255 [g]	Classe di suolo: B	Cat. top: T1	Gradi giorno: 1834

INTERVENTI PROPOSTI		
	Intervento sismico	**Intervento energetico**
Int. 1	**Interventi locali** sui nodi trave pilastro non confinati e sui pilastri tozzi del vano scala con FRP applicabile dal solo esterno. Ringrosso nodi non verificati a compressione. Antiribaltamento sulle tamponature perimetrali.	Intervento di isolamento termico della copertura, sostituzione dei componenti trasparenti, installazione delle valvole termostatiche.
Int. 2	**Interventi locali:** Come intervento 2, con aggiunta di rinforzo a taglio all'estremità delle travi e confinamento estremità dei pilastri. Tale soluzione prevede la demolizione di porzioni delle tamponature perimetrali.	Come intervento 1, con aggiunta dell'isolamento termico delle pareti verticali e sostituzione caldaia.
Int. 3	**Interventi locali:** tramite rinforzo di travi, pilastri e nodi trave-pilastro in c.a. con placcaggio con profili metallici.	Come intervento 2
Int. 4	**Intervento globale** tramite l'impiego di controventi metallici dissipativi. Rinforzo locale delle zone di connessione tra controventi e struttura in c.a. Ringrosso delle fondazioni con micropali.	Come intervento 1, con aggiunta dell'isolamento termico delle pareti verticali, correzione dei ponti termici derivanti da interventi strutturali, sostituzione impianti ed installazione impianto fotovoltaico.
Int. 5	**Intervento globale** tramite telai in acciaio esterni sia rigidi che dissipativi. Rinforzo locale di travi, pilastri e nodi trave-pilastro in c.a. con metodo CAM. Ringrosso delle fondazioni con micropali.	Come intervento 4

METODI DI ANALISI	
Analisi sismica: Pushover	**Analisi energetica:** Dinamico

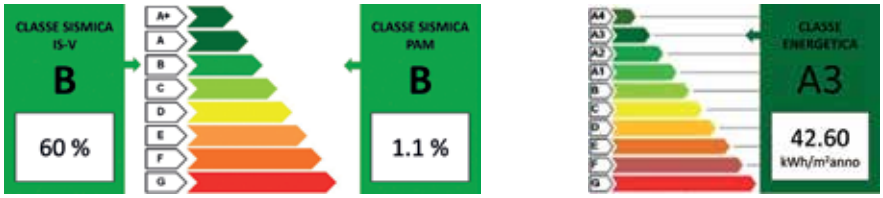
CARATTERISTICHE STRUTTURALI			
Elemento	**Classe/ Proprietà**	**Note**	**Schema/Foto**
Nodi trave-pilastro	Calcestruzzo di bassa qualità ed assenza di staffe nel pannello di nodo	Sono identificabili tre geometrie differenti di nodi: nodi d'angolo, nodi di parete e nodi di parete con pilastro fuori sagoma	
Pilastri	Calcestruzzo di bassa qualità ed armatura trasversale carente	I pilastri sono molto snelli in una direzione e fuoriescono dalla sagoma dell'edificio verso l'esterno	
Travi	Calcestruzzo di bassa qualità ed armatura trasversale carente		
Solai	Solaio latero cementizio con soletta di spessore 4 cm		
Copertura	Copertura piana		

RISULTATI				
CONFIGURAZIONE *AS-BUILT*	**Note (S)** Scarsa capacità sismica a causa di crisi fragili di nodi e pilastri **Note (E)** Impianti scadenti			
IS-V 23%	**PAM** 4,3%	**EP** 182,00 kWh/(m²y)		
				
INTERVENTO 1	**Tempi**[1] 3,5 mesi	**Costi**[2] 408.000 €	277,55 €/m²	
IS-V 60%	**PAM** 1,1%	**EP** 145,80 kWh/(m²y)		
				
INTERVENTO 2	**Tempi**[1] 6 mesi	**Costi**[2] 694.000 €	472,11 €/m²	
IS-V 60%	**PAM** 1,1%	**EP** 108,90 kWh/(m²y)		
				
INTERVENTO 3	**Tempi**[1] 7,5 mesi	**Costi**[2] 738.190 €	502,17 €/m²	
IS-V 70%	**PAM** 1,0%	**EP** 108,90 kWh/(m²y)		
				

INTERVENTO 4	Tempi[1]	8,0 mesi	Costi[2]	1.027.500 €	698,87 €/m²
IS-V	>100%	**PAM**	0,47%	**EP**	42,60 kWh/(m²y)



INTERVENTO 5	Tempi[1]	9,0 mesi	Costi[2]	1.044.200 €	710,34 €/m²
IS-V	60%	**PAM**	1,1%	**EP**	42,60 kWh/(m²y)



[1] Considerando 2 squadre per opere civili e 2 squadre per opere energetiche.
[2] L'analisi di costo fa riferimento al Prezziario regionale dei lavori pubblici della Regione Marche dell'anno 2019. I costi sono comprensivi di oneri per la sicurezza.

Caso studio 2: edificio scolastico in cemento armato sito in provincia di Macerata

https://www.reluis.it/doc/DPC-ReLUIS-2022-2024/WP5/08_LORO_PICENO_scuola_CA.pdf

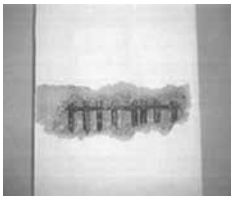
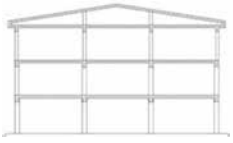
TIPOLOGIA	
Destinazione d'uso	Edificio scolastico
Sistema costruttivo	Telai in cemento armato
Epoca di costruzione	1950-1960
Numero di piani	3 fuori terra
Area in pianta	400 mq a piano
Superficie calpestabile	1200 mq
Regolare in pianta	Sì
Reg. in elevazione	Sì
Classe d'uso	III

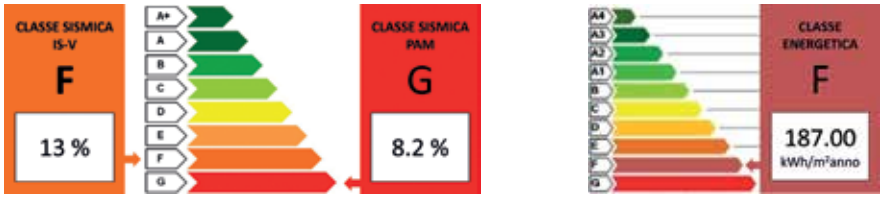
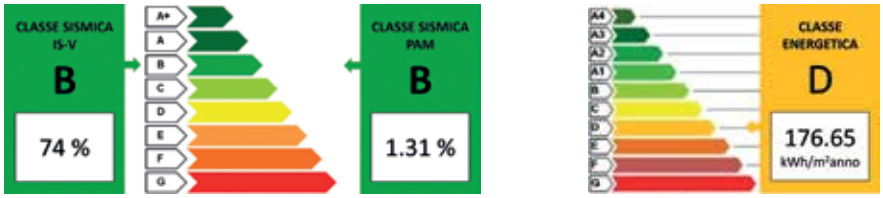
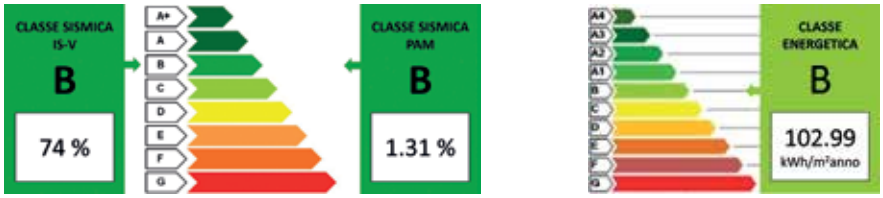
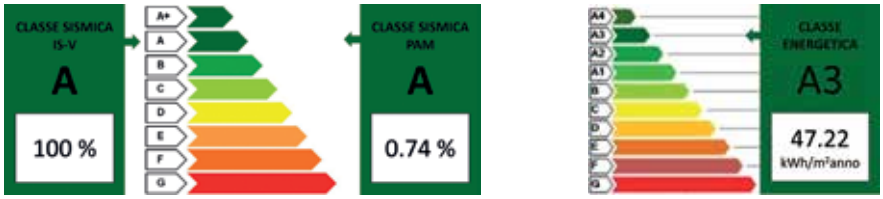


PARAMETRI DI DOMANDA			
Zona Sismica: 2			**Zona Climatica: D**
$a_{g\ SLV}$ = 0,202 [g]	Classe di suolo: B	Cat. top: T1	Gradi giorno: 2150

INTERVENTI PROPOSTI		
	Intervento sismico	**Intervento energetico**
Int. 1	**Intervento locale** eseguito solo dall'esterno mediante rinforzo dei nodi e delle travi con sistemi CFRP e intervento antiribaltamento delle tamponature.	Isolamento termico della copertura; sostituzione dei componenti trasparenti dell'involucro edilizio e delle valvole termostatiche.
Int. 2	**Intervento locale** eseguito dall'esterno e all'interno mediante rinforzo dei nodi e delle travi con sistemi CFRP; rinforzo della parte sommitale dei pilastri mediante compositi in SFRP; intervento antiribaltamento delle tamponature.	Isolamento termico della copertura; sostituzione dei componenti trasparenti dell'involucro edilizio e delle valvole termostatiche; insufflaggio delle pareti a cassa vuota; intonaco termoisolante; caldaia ad alto rendimento.
Int. 3	**Intervento globale** eseguito inserendo pareti in calcestruzzo aerato autoclavato; rinforzo dei nodi, delle travi e dei pilastri con sistemi CFRP; rinforzo della parte sommitale dei pilastri mediante compositi in SFRP; intervento antiribaltamento delle tamponature.	Isolamento termico della copertura; sostituzione dei componenti trasparenti dell'involucro edilizio e delle valvole termostatiche; installazione di pannelli fotovoltaici e di nuovi corpi illuminanti con tecnologia LED e inserimento del cappotto termico per le pareti non interessate dall'intervento di sostituzione con calcestruzzo aerato autoclavato.
Int. 4	**Intervento globale** eseguito inserendo controventi dissipativi; rinforzo delle fondazioni; rinforzo dei nodi, delle travi e dei pilastri con sistemi CFRP; rinforzo della parte sommitale dei pilastri mediante compositi in SFRP; intervento antiribaltamento delle tamponature.	Isolamento termico della copertura; sostituzione dei componenti trasparenti dell'involucro edilizio e delle valvole termostatiche; installazione di pannelli fotovoltaici e di nuovi corpi illuminanti con tecnologia LED e inserimento di pompe di calore.
Int. 5	**Intervento globale** tramite costruzione di esoscheletro dissipativo in c.a. irrigidito da diagonali metalliche.	Isolamento termico delle pareti opache verticali; Isolamento termico della copertura; Sostituzione dei serramenti esterni; Installazione di un impianto fotovoltaico con accumulo (grid connected); Relamping impianto di illuminazione; Sostituzione dell'impianto di riscaldamento con una pompa di calore; Installazione di un impianto di ventilazione meccanica controllata (VMC).

METODI DI ANALISI	
Analisi sismica: Pushover	**Analisi energetica:** Quasi stazionario (UNI 11300 TS)

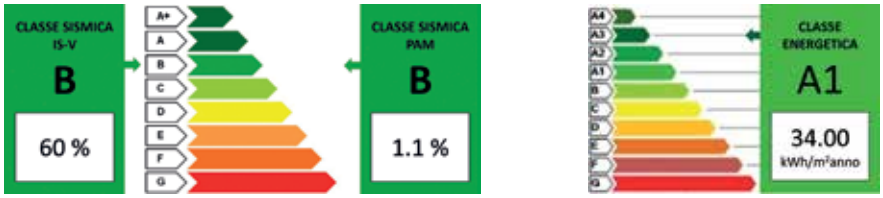
CARATTERISTICHE STRUTTURALI			
Elemento	**Classe/Proprietà**	**Note**	**Schema/Foto**
Nodi trave-pilastro	Calcestruzzo di bassa qualità ed assenza di staffe nel pannello di nodo	Per via della presenza di telai in una sola direzione, anche all'interno vi sono nodi non confinati	
Pilastri	Calcestruzzo di bassa qualità ed armatura trasversale carente	I pilastri hanno dimensioni in sezione ridotte e sono rastremati ad ogni piano. Sul perimetro sono presenti pilastri tozzi in corrispondenza di finestre a nastro	
Travi	Calcestruzzo di bassa qualità ed armatura trasversale carente		
Solai	Solaio latero cementizio di spessore 20+4 cm		
Copertura	Copertura a falde inclinate		

RISULTATI					
CONFIGURAZIONE *AS-BUILT*	**Note (S)** Scarsa capacità sismica a causa di crisi fragili di nodi e pilastri **Note (E)** Impianti scadenti				
IS-V	13%	**PAM**	8,2%	**EP**	187 kWh/(m²y)
					
INTERVENTO 1		**Tempi**[1]	2 mesi	**Costi**[2]	233.500 € 194,58 €/m²
IS-V	74%	**PAM**	1,31%	**EP**	176,65 kWh/(m²y)
					
INTERVENTO 2		**Tempi**[1]	3 mesi	**Costi**[2]	402.500 € 335,42 €/m²
IS-V	74%	**PAM**	1,31%	**EP**	102,99 kWh/(m²y)
					
INTERVENTO 3		**Tempi**[1]	4 mesi	**Costi**[2]	661.350 € 571,13 €/m²
IS-V	100%	**PAM**	0,74%	**EP**	47,22 kWh/(m²y)
					

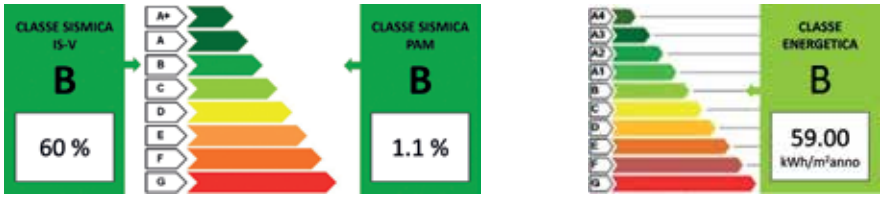
INTERVENTO 4	Tempi[1]	4 mesi	Costi[2]	694.300 €	581,92 €/m²
IS-V	100%	**PAM**	0,51%	**EP**	102,99 kWh/(m²y)



INTERVENTO 5	Tempi[1]	4 mesi	Costi[2]	652.160 €	543,47 €/m²
IS-V	60%	**PAM**	1,1%	**EP**	34,00 kWh/(m²y)



INTERVENTO 6	Tempi[1]	4 mesi	Costi[2]	719.650 €	599,70 €/m²
IS-V	60%	**PAM**	1,1%	**EP**	59,00 kWh/(m²y)



[1] Considerando 3 squadre per opere civili e 1 squadra per opere energetiche.
[2] L'analisi di costo fa riferimento al Prezziario regionale dei lavori pubblici della Regione Marche dell'anno 2019. I costi sono comprensivi di oneri per la sicurezza.

Caso studio 3: edificio residenziale in cemento armato sito in provincia di Brescia

https://www.reluis.it/doc/DPC-ReLUIS-2022-2024/WP5/09_TUSCOLANO_MADERNO_residenziale_CA.pdf

TIPOLOGIA	
Destinazione d'uso	Edificio residenziale
Sistema costruttivo	Telai in cemento armato
Epoca di costruzione	1960
Numero di piani	3 fuori terra
Area in pianta	230 mq a piano
Superficie calpestabile	690 mq
Regolare in pianta	No
Reg. in elevazione	No
Classe d'uso	II

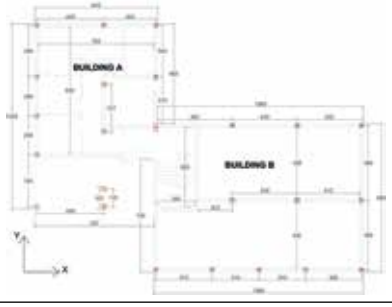


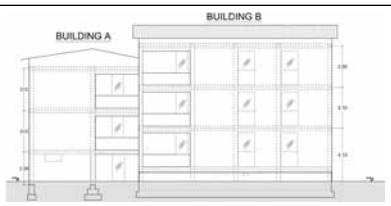
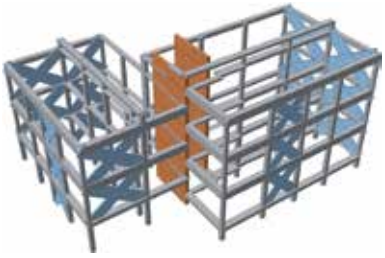
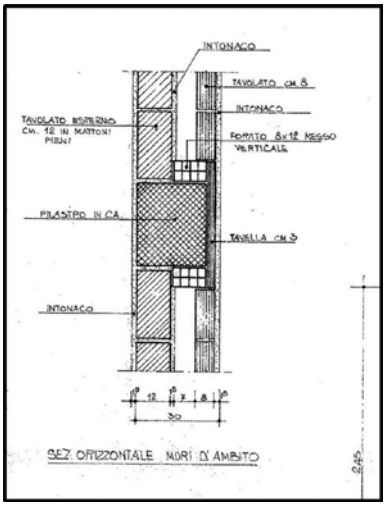
PARAMETRI DI DOMANDA			
Zona Sismica: 2			**Zona Climatica: E**
$a_{g\ SLV}$ = 0,233 [g]	Classe di suolo: C	Cat. top: T1	Gradi giorno: 2265

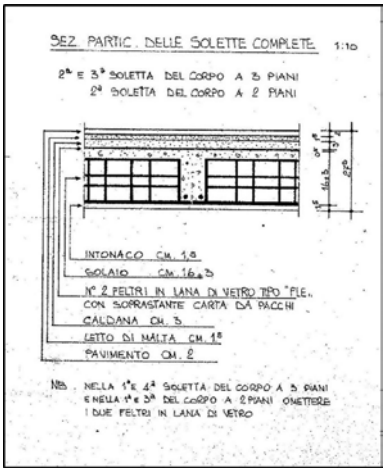
INTERVENTI PROPOSTI		
	Intervento sismico	**Intervento energetico**
Int. 1	**Intervento globale** mediante esoscheletro composto da pareti sismo-resistenti reticolari installate in prossimità delle facciate dell'edificio. Ad ogni piano viene introdotta una fascia marcapiano in acciaio collegata alle travi perimetrali dell'impalcato; vengono inseriti nuovi tiranti all'intradosso del tetto e del solaio per migliorare la capacità del diaframma di piano. Soluzione strutturale di riferimento per lo sviluppo delle Soluzioni 2-5.	1) Ottimizzazione degli elementi opachi verticali e orizzontali mediante aggiunta di un rivestimento termoisolante e sostituzione dei serramenti con nuovi elementi ad alta efficienza energetica e triplo vetro. 2) sostituzione delle caldaie per la produzione di acqua calda sanitaria con caldaie ad alto rendimento in ogni appartamento.
Int. 2	**Intervento globale** mediante esoscheletro tipo diagrid in profili di acciaio che si estende lungo tutte le facciate. La diagrid è una struttura tridimensionale, a guscio costituita da moduli triangolari composti da elementi orizzontali e diagonali. Ad ogni piano viene introdotta una fascia marcapiano in acciaio collegata alle travi perimetrali dell'impalcato; vengono inseriti nuovi tiranti all'intradosso del tetto e del solaio per migliorare la capacità del diaframma di piano.	Come Intervento 1.
Int. 3	**Intervento globale** mediante esoscheletro a guscio in legno che si estende su tutta la facciata, realizzato con pannelli XLAM e rinforzato con telai in acciaio in prossimità delle aperture. Ad ogni piano viene introdotta una fascia marcapiano in acciaio collegata alle travi perimetrali dell'impalcato; vengono inseriti nuovi tiranti all'intradosso del tetto e del solaio per migliorare la capacità del diaframma di piano.	Come Intervento 1.
Int. 4	**Intervento globale** mediante esoscheletro composto da pareti sismo-resistenti in calcestruzzo armato. Ad ogni piano viene introdotta una fascia marcapiano in acciaio collegata alle travi perimetrali dell'impalcato; vengono inseriti nuovi tiranti all'intradosso del tetto e del solaio per migliorare la capacità del diaframma di piano.	Come Intervento 1.

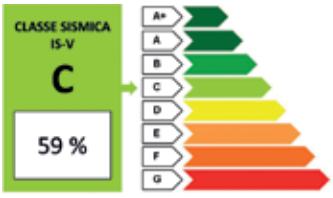
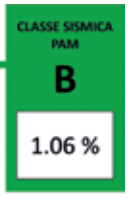
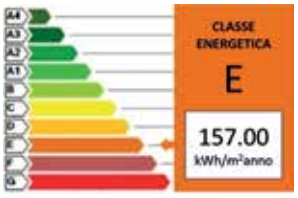
Int. 5	**Intervento globale** mediante esoscheletro composto da pareti sismo-resistenti composte da profili d'acciaio e pannello d'anima in lamiera. Ad ogni piano viene introdotta una fascia marcapiano in acciaio collegata alle travi perimetrali dell'impalcato; vengono inseriti nuovi tiranti all'intradosso del tetto e del solaio per migliorare la capacità del diaframma di piano.	Come Intervento 1.
Int. 6	**Intervento globale** mediante introduzione di pareti in c.a. esterne all'edificio, disposte in aderenza all'edificio esistente. Completa l'intervento una serie di interventi locali: esecuzione di tagli orizzontali nel paramento esterno dei tamponamenti senza aperture ed introduzione di un sistema di ritegno fuori piano; rinforzo locale mediante incamiciatura dei pilastri tozzi del piano cantinato.	Come Intervento 1.

METODI DI ANALISI	
Analisi sismica: Pushover	**Analisi energetica:** Dinamico

CARATTERISTICHE STRUTTURALI			
Elemento	**Classe/ Proprietà**	**Note**	**Schema/Foto**
Irregolare in pianta	Pianta ad L costituita a due unità strutturali (corpo A e copro B).	Il collegamento tra i due corpi è costituito dal vano scale.	

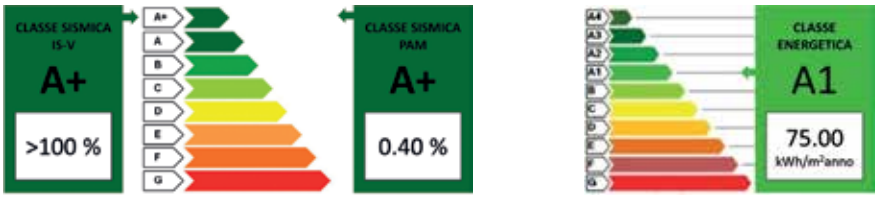
Irregolare in elevazione	Impalcati sfalsati tra i due corpi.		
Vano scale	Pareti del vano scale lunghe 5 metri con elevata rigidezza e debolmente armate.		
Struttura principale	Telai monodirezionali in c.a.; travi di bordo e di spina ribassate. Le fondazioni sono costituite da travi rovesce lungo il perimetro e plinti collegati per i pilastri centrali.	Struttura non progettata per i carichi orizzontali	
Tamponamenti	Spessore 30 cm: intonaco – mattone pieno 12 cm – intonaco – intercapedine d'aria – forato 8 cm – intonaco.	Interagenti con il telaio in c.a.	

Solai	Solaio in latero-cemento (16+3)	Gettato in opera L=5,30 m, interasse travetti in c.a.. 40cm	

RISULTATI					
CONFIGURAZIONE *AS-BUILT*					
IS-V 59%		**PAM** 1,06%		**EP**	Risc: 150,00 kWh/(m²y) Raff: 7,00 kWh/(m²y)
					
classe sismica C				**classe energetica E**	
INTERVENTO 1	**Tempi**[1]	8 mesi	**Costi**[2]	520.950 €	**Str**: 479,35 €/m² **En**: 200,00 €/m² **On**: 51,00 €/m²
INTERVENTO 2	**Tempi**[1]	6 mesi	**Costi**[2]	412.620 €	**Str**: 322,00 €/m² **En**: 200,00 €/m² **On**: 51,00 €/m²
INTERVENTO 3	**Tempi**[1]	6,5 mesi	**Costi**[2]	434.700 €	**Str**: 354,00 €/m² **En**: 200,00 €/m² **On**: 51,00 €/m²
INTERVENTO 4	**Tempi**[1]	6,5 mesi	**Costi**[2]	433.320 €	**Str**: 352,00 €/m² **En**: 200,00 €/m² **On**: 51,00 €/m²
INTERVENTO 5	**Tempi**[1]	7,5 mesi	**Costi**[2]	488.520 €	**Str**: 432,00 €/m² **En**: 200,00 €/m² **On**: 51,00 €/m²

INTERVENTI 1-5 (iso-performance strutturale ed energetica) prevedono soluzioni di rinforzo mediante esoscheletro e sono applicabili dall'esterno senza ricollocazione degli abitanti. I risultati verranno pertanto riportati una sola volta.

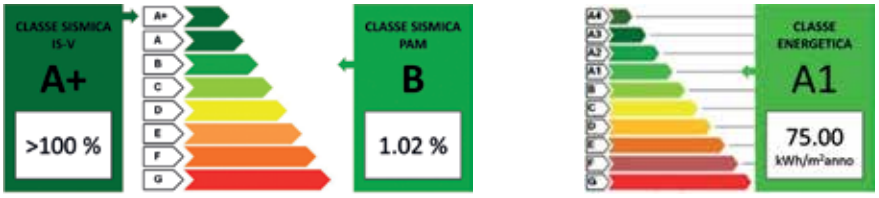
IS-V 155% **PAM** 0,40% **EP** Risc: 68,00 kWh/(m²y) Raff: 7,00 kWh/(m²y)



classe sismica A+ **classe energetica A1**

INTERVENTO 6	**Tempi**[1] 7,5 mesi	**Costi**[2] 290.434,26 €	**Str**: 205,04 €/m² **En**: 200,00 €/m² **On**: 28,04 €/m²

IS-V 102% **PAM** 1,02%



classe sismica B **classe energetica A1**

[1] GG lavorativi con 1 squadra tipo.

[2] L'analisi di costo fa riferimento al Prezziario regionale dei lavori pubblici della Regione Lombardia dell'anno 2022. I costi per unità di superficie sono suddivisi in: costi per il rafforzamento strutturale (Str), costi per l'efficientamento energetico (En), oneri per la sicurezza (On).

Caso studio 4: edificio residenziale in cemento armato sito in provincia di Torino

https://www.reluis.it/doc/DPC-ReLUIS-2022-2024/WP5/10_TORINO_residenziale_CA.pdf

TIPOLOGIA	
Destinazione d'uso	Residenziale e commerciale
Sistema costruttivo	Telai (entrambe le direzioni) e setti (direzione trasversale) in ca
Epoca di costruzione	1955
Numero di piani	5 fuori terra
Area in pianta	1800 mq a piano
Superficie calpestabile	9000 mq
Regolare in pianta	Sì
Reg. in elevazione	Sì
Classe d'uso	II





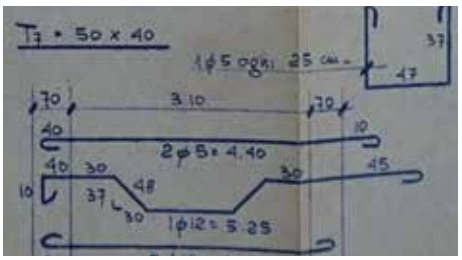
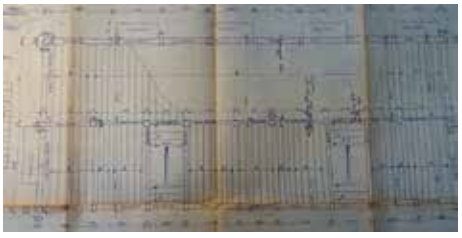
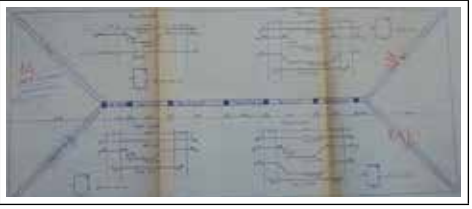
PARAMETRI DI DOMANDA			
Zona Sismica: 3			**Zona Climatica: E**
$a_{g\ SLV}$ = 0,052 [g]	Classe di suolo: B	Cat. top: T1	Gradi giorno: 2617

INTERVENTI PROPOSTI		
	Intervento sismico	**Intervento energetico**
Int. Livello 1[1]	Presidio antiribaltamento delle tamponature perimetrali tramite elementi di rinforzo in legno (*strong-backs*). Rinforzo globale tramite applicazione di pannelli lignei dall'esterno (*sistema RC-TPext*)	Applicazione dell'intervento integrato senza rimozione dei tamponamenti esistenti; isolamento termico delle pareti esterne e del sottotetto
Int. Livello 2[1]	Come intervento 1	Come intervento 1, con aggiunta di: isolamento termico del solaio di base e del vano scale; sostituzione degli infissi e degli impianti
Int. Livello 3[1]	Presidio antiribaltamento delle tamponature perimetrali tramite elementi di rinforzo in legno (*strong-backs*). Rinforzo globale attraverso sostituzione del paramento esterno delle tamponature con pannelli di legno (sistema RC-TP)	Applicazione dell'intervento integrato sostituendo il paramento esterno delle tamponature; isolamento termico delle pareti esterne e del sottotetto; isolamento termico del solaio di base; sostituzione degli infissi; sostituzione degli impianti; uso di un impianto solare termico

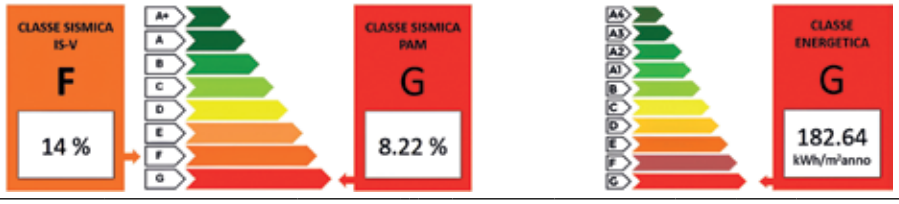
[1] Nelle analisi è stato considerato anche uno scenario in cui, oltre agli interventi di miglioramento sismico, è previsto il rinforzo delle travi allo SLU per carichi gravitazionali (rinforzo tramite metodo CAM).

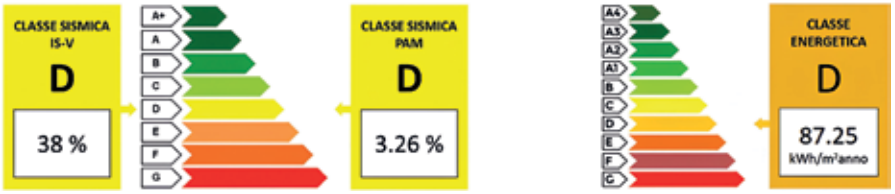
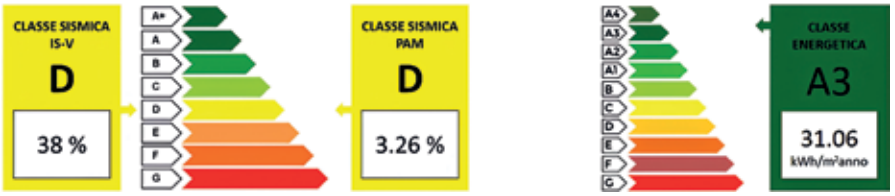
METODI DI ANALISI	
Analisi sismica: Dinamica lineare	**Analisi energetica:** Regime stazionario

CARATTERISTICHE STRUTTURALI			
Elemento	**Classe/ Proprietà**	**Note**	**Schema/Foto**
Nodi trave-pilastro	Assenza di staffe nel pannello di nodo	I nodi presentano pilastri fuori sagoma	

Pilastri	Bassa quantità di armatura trasversale	Sezioni quadrate, rettangolari e ad "elle" (agli angoli).	
Travi	Bassa quantità di armatura longitudinale e trasversale	Particolarmente vulnerabili ai carichi verticali	
Solai	Solaio latero cementizio con soletta di spessore 3,50 cm		
Copertura	A quattro falde inclinate in laterocemento		

RISULTATI					
CONFIGURAZIONE *AS-BUILT*	**Note (S)** Travi e pilastri vulnerabili a flessione e taglio **Note (E)** Ponti termici e scarse prestazioni invernali				
IS-V	14%	**PAM**	8,22%	**EP**	182,00 kWh/(m²y)



INTERVENTO LIVELLO 1[4]	**Tempi**[2]	1,4 mesi	**Costi**[3]	707.738 €	404,42 €/m²
IS-V	38%	**PAM**	3,26%	**EP**	87,25 kWh/(m²y)
					
INTERVENTO LIVELLO 2[4]	**Tempi**[2]	6,3 mesi	**Costi**[3]	1.392.867 €	795,92 €/m²
IS-V	38%	**PAM**	3,26%	**EP**	31,06 kWh/(m²y)
					
INTERVENTO LIVELLO 3[4]	**Tempi**[2]	7,5 mesi	**Costi**[3]	1.407.191 €	804,11 €/m²
IS-V	51%	**PAM**	2,02%	**EP**	28,89 kWh/(m²y)
					

[2] Considerando 3 squadre per opere civili ed energetiche.

[3] Il valore unitario del costo economico associato alla singola lavorazione è stato determinato sulla base del documento: "Prezzi Informativi dell'Edilizia DEI – Recupero Ristrutturazione Manutenzione" (Tipografia del Genio Civile. Secondo semestre 2022). Per alcune voci di spesa, non presenti nel suddetto documento, si è fatto riferimento all'Elenco Prezzi della Regione Piemonte (2023).

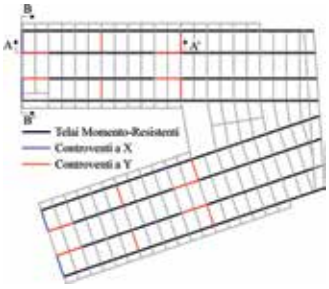
[4] Considerando anche il rinforzo delle travi agli SLU con metodo CAM, in ciascun livello di intervento (1, 2 e 3) si raggiungono le classi "B" e "A" rispettivamente per IS-V (75%) e PAM (0,85).

Caso studio 5: edificio ad uso pubblico strategico in acciaio sito a Napoli

https://www.reluis.it/doc/DPC-ReLUIS-2022-2024/WP5/11_NAPOLI_Genio_Civile_Acciaio.pdf

TIPOLOGIA	
Destinazione d'uso	Edificio pubblico strategico
Sistema costruttivo	Sistema Ibrido (MRF; X-CBF; Y-CBF)
Epoca di costruzione	1960-1970
Numero di piani	6 fuori terra
Area in pianta	1400 mq piano tipo; 1200 ultimi due piani
Superficie calpestabile	8000 mq
Regolare in pianta	No
Reg. in elevazione	No
Classe d'uso	III

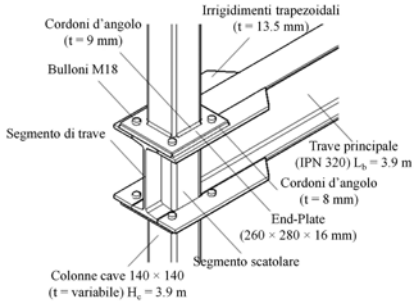
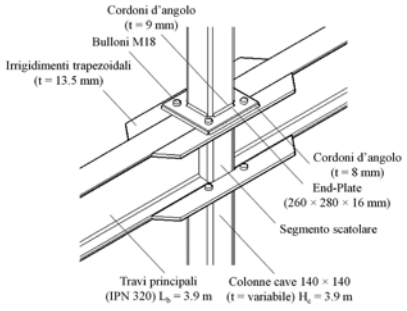


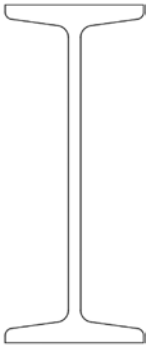
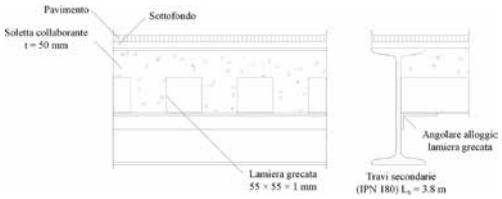
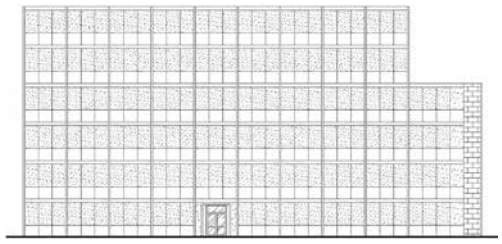


PARAMETRI DI DOMANDA			
Zona Sismica: 2			**Zona Climatica: -**
$a_{g\ SLV}$ = 0,192 [g]	Classe di suolo: C	Cat. top: T1	Gradi giorno: -

INTERVENTI PROPOSTI		
	Intervento sismico	**Intervento energetico**
Int. 1	**Interventi locali** che prevedono l'efficientamento sismico dei nodi-trave colonna momento-resistenti. Questi ultimi vanno in crisi a seguito della prematura frattura delle saldature lato colonna.	
Int. 2	**Interventi globali** dove si prevede l'adeguamento sismico globale della struttura attraverso l'installazione di controventi X-CBF di nuova realizzazione, i quali vanno a sostituire quelli esistenti affetti da i) crisi premature di tipo fragile (rottura per area netta delle sezioni d'estremità) e ii) significativa eccentricità dovuta al disallineamento degli assi strutturali.	
Int. 3	**Intervento locale e globale**: dove si prevede l'adozione congiunta degli interventi previsti negli Int.1 e Int.2.	

METODI DI ANALISI	
Analisi sismica: Pushover	**Analisi energetica:** -

CARATTERISTICHE STRUTTURALI			
Elemento	**Classe/ Proprietà**	**Note**	**Schema/Foto**
Nodi trave-colonna MRF	Bulloni Classe 8.8 Saldature a cordone d'angolo Aq 55	Sono identificabili due geometrie differenti di nodi: nodi d'angolo, nodi interni	 

Colonne	Acciai di alta qualità Aq 55	Profili tubolari laminati a caldo (SHS) con ingombro costante.	 SHS 140x140 t var.
Travi	Acciai di alta qualità Aq 42	Le travi secondarie sono realizzate con profili ad I aventi sezioni costanti per tutti gli impalcati.	 Travi secondarie (IPN 180)  Travi principali (IPN 180)
Solai	Solaio misto acciaio-cls		
Copertura	Copertura piana		

RISULTATI					
CONFIGURAZIONE *AS-BUILT*	**Note (S)** Scarsa capacità sismica a causa di crisi fragili di nodi ed eccessiva deformabilità laterale				
IS-V 78% **PAM** 1,1% 					
INTERVENTO 1	**Tempi**[1]	3,0 mesi	**Costi**[2]	295.000 €	120,00 €/m²
IS-V 88% **PAM** 0,57% 					
INTERVENTO 2	**Tempi**[1]	5,0 mesi	**Costi**[2]	165.000 €	68,00 €/m²
IS-V >100% **PAM** 0,57% 					
INTERVENTO 3	**Tempi**[1]	6,5 mesi	**Costi**[2]	460.000 €	188,00 €/m²
IS-V >100% **PAM** 0,47% 					

[1] Considerando 2 squadre per opere civili.

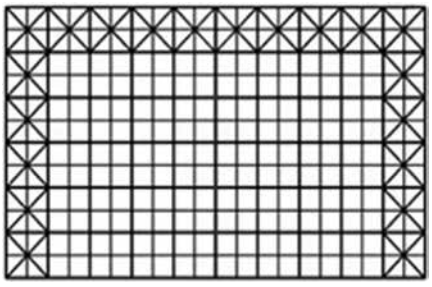
[2] L'analisi di costo fa riferimento al Prezziario regionale dei lavori pubblici della Regione Campania dell'anno 2020. I costi sono comprensivi di oneri per la sicurezza.

Caso studio 6: edificio industriale in acciaio sito in provincia di Avellino

https://www.reluis.it/doc/DPC-ReLUIS-2022-2024/WP5/12_NUSCO_capannone_Acciaio.pdf

TIPOLOGIA	
Destinazione d'uso	Edificio industriale
Sistema costruttivo	Telai con colonne in composizione saldata e travature reticolari
Epoca di costruzione	1992-1997
Numero di piani	Edificio monopiano
Area in pianta	1998 mq
Superficie calpestabile	1998 mq
Regolare in pianta	Sì
Reg. in elevazione	Sì
Classe d'uso	II

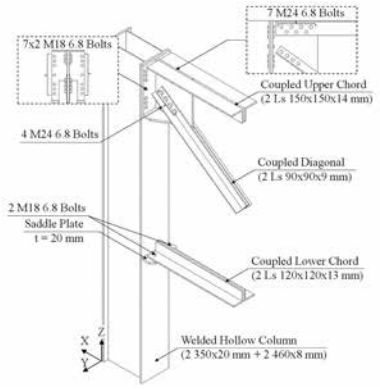


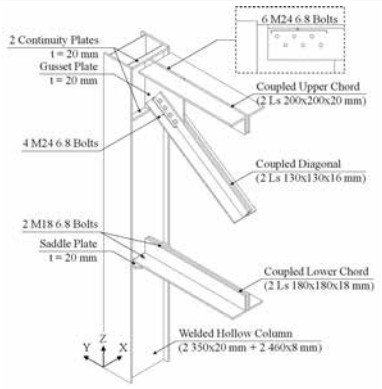
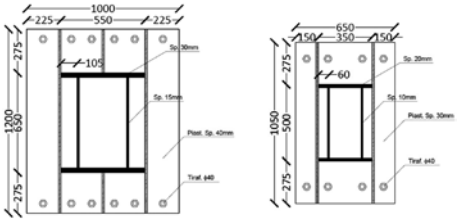
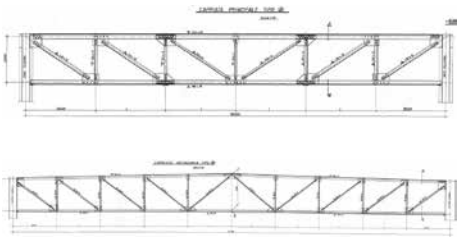
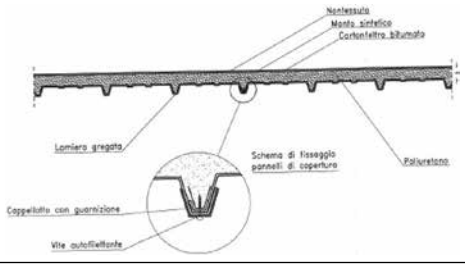


PARAMETRI DI DOMANDA			
Zona Sismica: 2			**Zona Climatica: -**
$a_{g\ SLV}$ = 0,243 [g]	Classe di suolo: C	Cat. top: T1	Gradi giorno: -

INTERVENTI PROPOSTI		
	Intervento sismico	**Intervento energetico**
Int. 1	**Interventi locali e globali:** Intervento locale per incrementare la capacità del collegamento, nella quale sono state incrementate il numero di superfici a taglio, incrementati il numero e la classe dei bulloni. Intervento globale tramite l'aggiunta di esoscheletri ortogonali in acciaio, in cui l'intervento è progettato per evitare qualsiasi danno allo SLV, assicurando che l'intero sistema (sia l'esoscheletro che le strutture esistenti) sia in campo elastico.	
Int. 2	**Interventi locali e globali:** Intervento locale come intervento 1. Intervento globale tramite l'aggiunta di esoscheletri ortogonali in acciaio, in cui l'intervento è progettato per consentire la deformazione plastica all'interno dell'elemento dell'esoscheletro, evitando il collasso allo SLV.	

METODI DI ANALISI	
Analisi sismica: Pushover	**Analisi energetica:** -

CARATTERISTICHE STRUTTURALI			
Elemento	**Classe/ Proprietà**	**Note**	**Schema/Foto**
Nodi colonna-capriata	Unione bullonata con bulloni M18 e M24 Classe 6.8	Sono identificabili 2 geometrie differenti di nodi: nodi colonna-capriata direzione longitudinale; nodi colonna-capriata direzione trasversale;	

			
Colonne	Acciaio strutturale S235	I profili delle colonne del sistema sismo resistente sono realizzati in composizione saldata	
Capriate	Acciaio strutturale S235	Le membrature utilizzate per le capriate sono dei profili ad L (singoli o accoppiati), con sezioni trasversali variabili	
Copertura	Pannello di copertura con lamiera grecata e poliuretano espanso		

RISULTATI					
CONFIGURAZIONE *AS-BUILT*	**Note (S)** Scarsa capacità sismica a causa di crisi fragili dei nodi ed eccessiva deformabilità laterale				
IS-V 24% **PAM** 3,7% 					
INTERVENTO 1	**Tempi**[1] 3,5 mesi		**Costi**[2] 476.000 €		238 €/m²
IS-V >100% **PAM** 0,49% 					
INTERVENTO 2	**Tempi**[1] 6 mesi		**Costi**[2] 399.000 €		199,7 €/m²
IS-V >100% **PAM** 0,7% 					

[1] Considerando 2 squadre per opere civili.
[2] L'analisi di costo fa riferimento al Prezziario regionale dei lavori pubblici della Regione Campania dell'anno 2021. I costi sono comprensivi di oneri per la sicurezza.

Caso studio 7: edificio ad uso pubblico in muratura in provincia di Ancona

https://www.reluis.it/doc/DPC-ReLUIS-2022-2024/WP5/01_Fabriano_MUR.pdf

TIPOLOGIA	
Destinazione d'uso	Uso pubblico
Sistema costruttivo	Muratura
Epoca di costruzione	1940-1950
Numero di piani	4 fuori terra
Area in pianta	1300 mq a piano
Superficie calpestabile	4880 mq
Regolare in pianta	No
Reg. in elevazione	Sì
Classe d'uso	IV



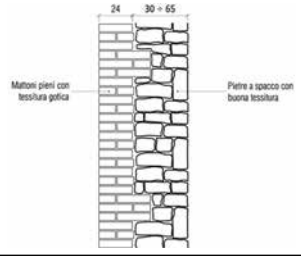
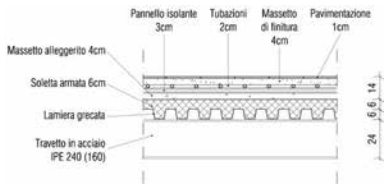
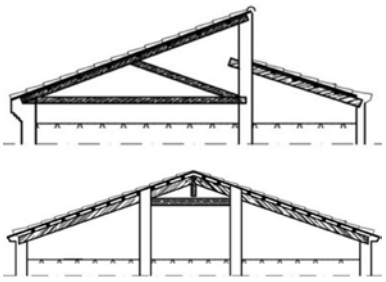


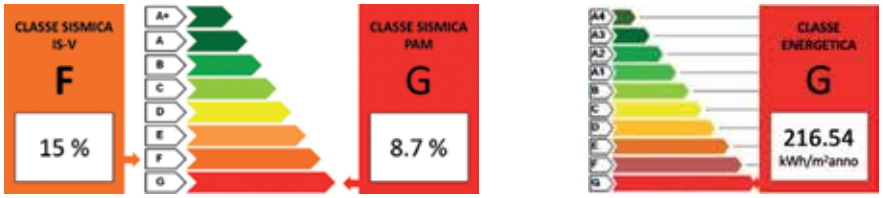
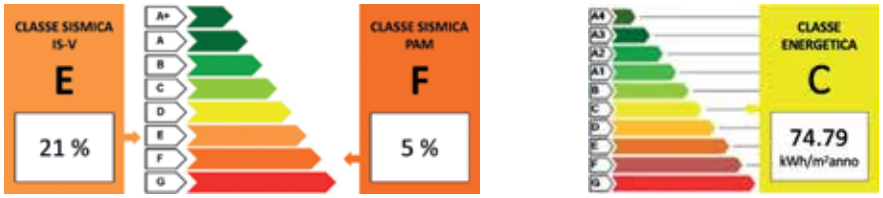
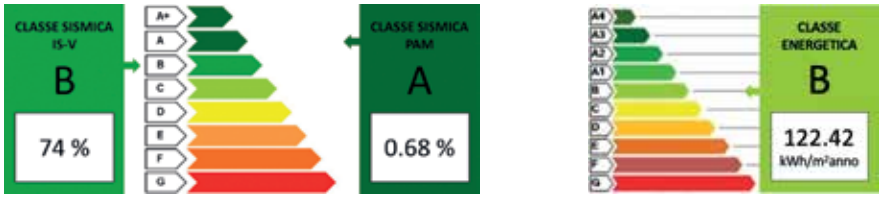
PARAMETRI DI DOMANDA			
Zona Sismica: 2			**Zona Climatica: E**
$a_{g\ SLV}$ = 0,228 [g]	Classe di suolo: B	Cat. top: T1	Gradi giorno: 2198

INTERVENTI PROPOSTI		
	Intervento sismico	**Intervento energetico**
Int. 1	**Miglioramento** – Interventi sulle strutture verticali. Iniezioni di malta su pareti esterne, intervento combinato di iniezioni di malta e intonaco armato sulle pareti interne.	Isolamento pareti, sostituzione serramenti.
Int. 2	**Miglioramento** – Interventi sulle strutture orizzontali. Irrigidimento nel piano dei solai.	Isolamento solai, sostituzione impianti.
Int. 3	**Adeguamento** – Combinazione degli interventi 1 e 2. Iniezioni di malta su pareti esterne, intervento combinato di iniezioni di malta e intonaco armato sulle pareti interne, irrigidimento nel piano dei solai	Isolamento pareti e solai, sostituzione impianti, sostituzione serramenti.
Int. 4	Come intervento 3	**NZEB:** Come intervento 3, con aggiunta di impianto fotovoltaico.

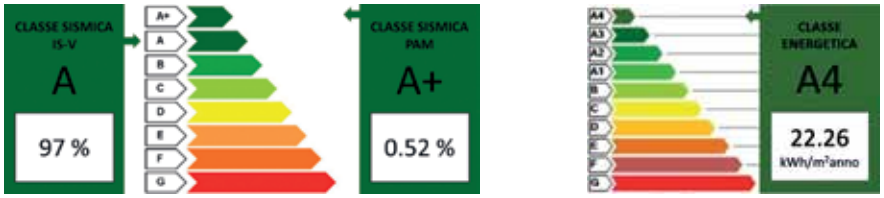
METODI DI ANALISI	
Analisi sismica: Pushover	**Analisi energetica:** Quasi stazionario, dinamico

CARATTERISTICHE STRUTTURALI			
Elemento	**Classe/ Proprietà**	**Note**	**Schema/Foto**
MUR1 – Muratura interna principale	Pietre a spacco con buona tessitura	Tipologia muraria propria dei principali setti interni e delle pareti perimetrali del piano secondo e sottotetto	

MUR2 – Muratura interna secondaria	Mattoni pieni	Tipologia muraria propria di alcuni setti interni secondari	
MUR3 – Muratura perimetrale	Pietre a spacco con buona tessitura e mattoni a facciavista	Tipologia muraria propria delle pareti perimetrali del piano terra e primo	
SOL1-2	Putrelle in acciaio e voltine in laterizio forato	Solaio del piano rialzato e piano 1	
SOL3	Profili in acciaio IPE e lamiera grecata	Solaio del piano 2	
SOL4	Profili in acciaio Ω e tavolato in legno	Solaio non calpestabile del sottotetto	
Copertura	Copertura a falde con capriate lignee		

RISULTATI					
CONFIGURAZIONE *AS-BUILT*	**Note (S)** Scarsa capacità di ripartizione delle forze di piano tra le pareti. **Note (E)** Impianti scadenti.				
IS-V 15%	**PAM** 8,7%		**EP** 216,54 kWh/(m²y)		
					
INTERVENTO 1	**Tempi**[1] 9 mesi		**Costi**[2] 1.951.225 €	399,84 €/m²	
IS-V 21%	**PAM** 5,0%		**EP** 74,79 kWh/(m²y)		
					
INTERVENTO 2	**Tempi*** 8,5 mesi		**Costi†** 1.881.150 €	385,50 €/m²	
IS-V 74%	**PAM** 0,68%		**EP** 122,42 kWh/(m²y)		
					
INTERVENTO 3	**Tempi*** 16 mesi		**Costi†** 3.577.225 €	733,04 €/m²	
IS-V 97%	**PAM** 0,52%		**EP** 65,72 kWh/(m²y)		
					

INTERVENTO 4		Tempi*	16 mesi	Costi†	3.750.225 €	768,49 €/m²
IS-V	97%	**PAM**	0,52%	**EP**		22,26 kWh/(m²y)



[1] Considerando 4 squadre per opere civili e 2 squadre per opere energetiche.
[2] L'analisi di costo fa riferimento al Prezziario regionale dei lavori pubblici della Regione Marche dell'anno 2019. I costi sono comprensivi di oneri per la sicurezza.

Caso studio 8: edificio scolastico in muratura in provincia di Macerata

https://www.reluis.it/doc/DPC-ReLUIS-2022-2024/WP5/02_ScuolaVisso_MUR.pdf

TIPOLOGIA	
Destinazione d'uso	Uso pubblico
Sistema costruttivo	Muratura
Epoca di costruzione	1930-1940
Numero di piani	2 fuori terra
Area in pianta	600 mq a piano
Superficie calpestabile	920 mq
Regolare in pianta	No
Reg. in elevazione	Sì
Classe d'uso	III

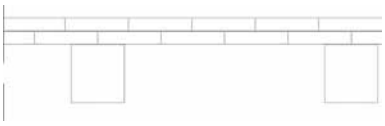
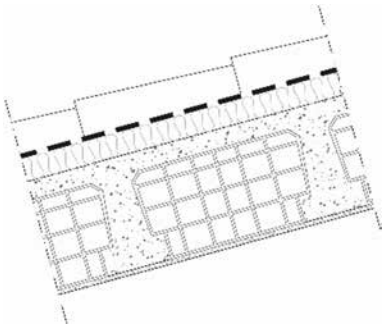


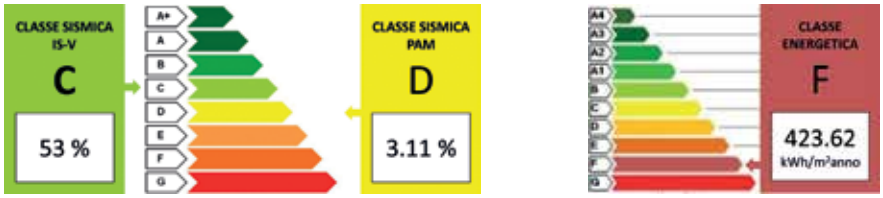
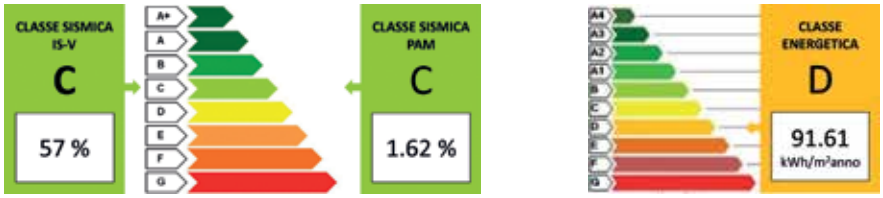
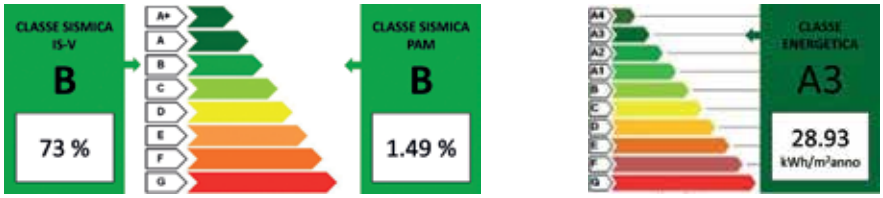
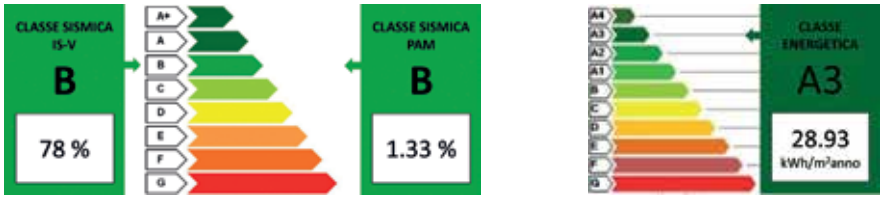


PARAMETRI DI DOMANDA			
Zona Sismica: 1			**Zona Climatica: E**
$a_{g\ SLV}$ = 0,285 [g]	Classe di suolo: B	Cat. top: T1	Gradi giorno: 2.350

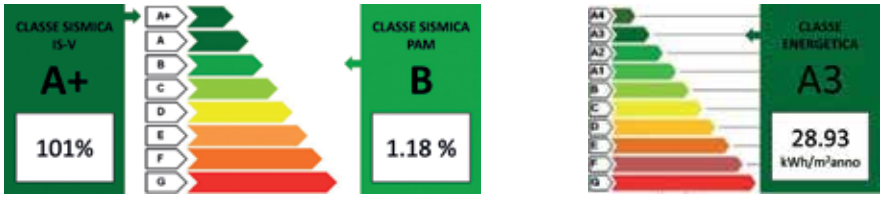
INTERVENTI PROPOSTI		
	Intervento sismico	**Intervento energetico**
Int. 1 *Interventi solo sulle strutture orizzontali*	**Miglioramento** – Realizzazione di una soletta in c.a. con calcestruzzo alleggerito al di sopra del doppio tavolato ligneo interconnessa mediante connettori in acciaio e l'inserimento di catene in aderenza alla muratura.	Impianto radiante a pavimento, sostituzione della caldaia con una pompa di calore aria-acqua (per riscaldamento e ACS), installazione di un'unità di trattamento d'aria (UTA), installazione di impianto di raffrescamento, sostituzione delle lampade a neon con lampade LED, sostituzione dei serramenti, isolamento del pavimento verso terra e del solaio del primo piano confinante con il sottotetto non climatizzato.
Int. 2	**Miglioramento** – Come intervento 1, con ristilatura dei giunti su entrambe le facce per alcune specifiche pareti.	Come intervento 1, con coibentazione delle superfici opache verticali.
Int. 3	**Miglioramento** – Come intervento 1, con iniezioni di malta su entrambe le facce per alcune specifiche pareti.	Come intervento 2
Int. 4	**Adeguamento** – Come intervento 1, con ristilatura dei giunti e applicazione FRP su entrambe le facce del paramento murario in alcune specifiche pareti.	Come intervento 2
Int. 5	**Adeguamento** – Come intervento 1, con iniezioni di malta e applicazione FRP su entrambe le facce del paramento murario in alcune specifiche pareti.	Come intervento 2
Int. 6	**Adeguamento** – Come intervento 1, con ristilatura dei giunti, iniezioni di malta e placcaggio con FRCM su entrambe le facce del paramento in alcune specifiche pareti.	Come intervento 2
Int. 7	**Adeguamento** – Come intervento 5	**NZEB**: Come intervento 2, con la realizzazione di impianto fotovoltaico da circa 30 kWp.

METODI DI ANALISI	
Analisi sismica: Pushover	**Analisi energetica:** Quasi stazionario, dinamico

CARATTERISTICHE STRUTTURALI			
Elemento	**Classe/ Proprietà**	**Note**	**Schema/Foto**
MUR1 – Muratura esterna e interna principale	Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	Tipologia muraria dei muri perimetrali dell'edificio e della maggior parte dei muri interni	
MUR2 – Muratura interna secondaria	Muratura in mattoni pieni e malta di calce	Tipologia muraria dei muri perimetrali dell'edificio e della maggior parte dei muri interni	
SOL1-2	Solaio ligneo con doppio tavolato	Solaio del piano 1 e 2	
Copertura	La copertura è a falde con capriata, tavelloni e soletta in c.a.		

RISULTATI				
CONFIGURAZIONE *AS-BUILT*				
IS-V 53%	**PAM** 3,11%	**EP** 423,62 kWh/(m²y)		
				
INTERVENTO 1	**Tempi**[1] 6 mesi	**Costi**[2] 494.676 €	537,69 €/m²	
IS-V 57%	**PAM** 1,62%	**EP** 91,61 kWh/(m²y)		
				
INTERVENTO 2	**Tempi*** 10 mesi	**Costi†** 708.583 €	770,09 €/m²	
IS-V 73%	**PAM** 1,49%	**EP** 28,93 kWh/(m²y)		
				
INTERVENTO 3	**Tempi*** 12 mesi	**Costi†** 844.705 €	918,09 €/m²	
IS-V 78%	**PAM** 1,33%	**EP** 28,93 kWh/(m²y)		
				

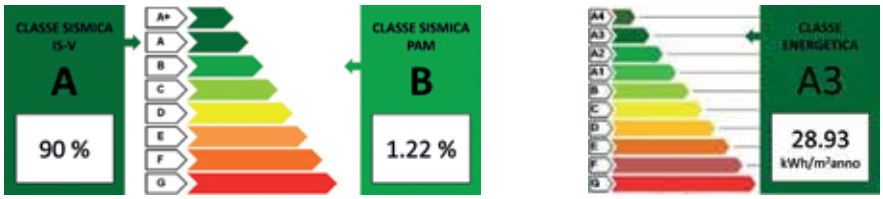
INTERVENTO 4	Tempi*	11 mesi	Costi†	780.978 €	848,59 €/m²
IS-V 101%	**PAM** 1,18%		**EP** 28,93 kWh/(m²y)		



INTERVENTO 5	Tempi*	13 mesi	Costi†	876.515 €	952,09 €/m²
IS-V 104%	**PAM** 0,89%		**EP** 28,93 kWh/(m²y)		



INTERVENTO 6	Tempi*	16 mesi	Costi†	1.014.675 €	1.102,59 €/m²
IS-V 90%	**PAM** 1,22%		**EP** 28,93 kWh/(m²y)		



INTERVENTO 7	Tempi*	13 mesi	Costi†	940.827 €	1.022,09 €/m²
IS-V 104%	**PAM** 0,89%		**EP** 2,42 kWh/(m²y)		



[1] Considerando 1 squadra per opere civili e 1 squadra per opere energetiche.
[2] L'analisi di costo fa riferimento al Prezziario regionale dei lavori pubblici della Regione Marche dell'anno 2019. I costi sono comprensivi di oneri per la sicurezza.

Caso studio 9: edificio ad uso pubblico in muratura in provincia di Trento

https://www.reluis.it/doc/DPC-ReLUIS-2022-2024/WP5/03_GAT_Comano_MUR.pdf

TIPOLOGIA	
Destinazione d'uso	Struttura ricettiva
Sistema costruttivo	Muratura
Epoca di costruzione	fine XIX sec.
Numero di piani	5 fuori terra[1]
Area in pianta	718 mq a piano
Superficie calpestabile	3291 mq
Regolare in pianta	No
Reg. in elevazione	No
Classe d'uso	II





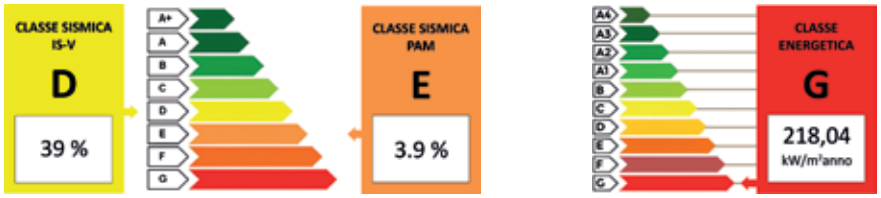
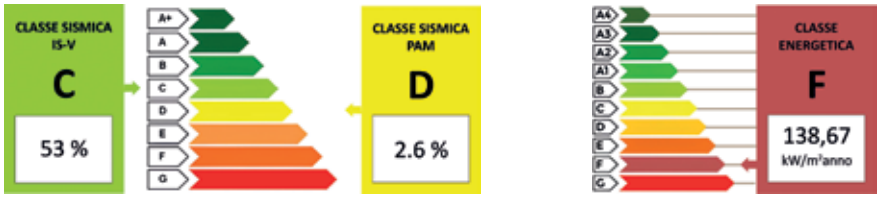
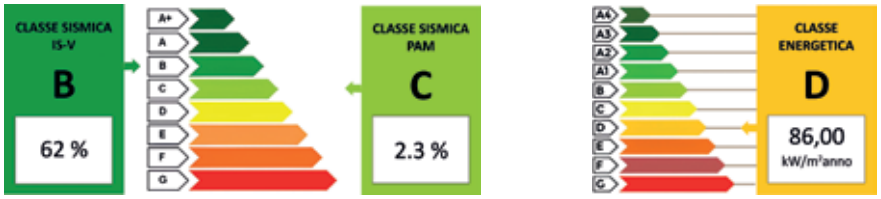
[1] Il quinto livello fuori terra (piano quarto), non visibile nell'immagine, è costituito dalla sopraelevazione parziale del piano terzo nella zona a nord (sopraelevazione realizzata negli anni '60).

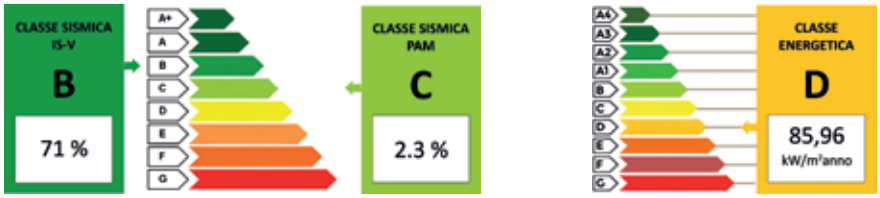
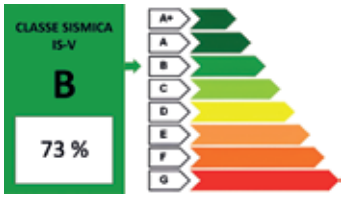
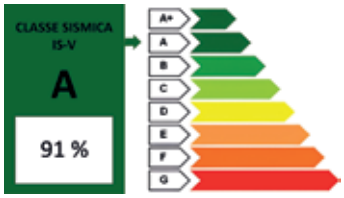
PARAMETRI DI DOMANDA Nota: sono stati considerati i parametri sismici di Stenico (TN) e L'Aquila (AQ)			
Zona Sismica: 2 (AQ) 4 (TN)			**Zona Climatica: F (TN) E (AQ)**
$a_{g\,SLV}$ = 0,074 [g] (TN) $a_{g\,SLV}$ = 0,261 [g] (AQ)	Classe di suolo: C	Cat. top: T1	Gradi giorno: 3411 (TN) 2514 (AQ)

INTERVENTI PROPOSTI		
	Intervento sismico	**Intervento energetico**
Int. 1	**Miglioramento:** Intervento di rinforzo dei solai lignei di interpiano e della copertura	Isolamento solaio di copertura.
Int. 2	**Miglioramento:** Intervento di rinforzo dei solai e della copertura, rinforzo dei maschi murari e delle fasce di piano appartenenti alle sole pareti perimetrali del piano terra e del primo piano mediante l'uso di pannelli in CLT	Isolamento solaio di copertura e pareti perimetrali.
Int. 3	**Miglioramento:** Intervento di rinforzo dei solai e della copertura, rinforzo dei maschi murari e delle fasce di piano appartenenti alle sole pareti perimetrali del piano terra, del primo piano e del secondo piano mediante l'uso di pannelli in CLT	Isolamento solaio di copertura e pareti perimetrali.
Int. 4	**Miglioramento:** Intervento di rinforzo dei solai e della copertura e rinforzo di tutti i maschi murari e le fasce di piano appartenenti alle sole pareti perimetrali mediante l'uso di pannelli in CLT	Isolamento solaio di copertura e pareti perimetrali.
Int. 5	**Miglioramento:** Intervento di rinforzo con CRM applicato su un solo lato delle pareti perimetrali esterne e della corte interna	-
Int. 6	**Adeguamento:** Intervento di rinforzo con CRM applicato su un entrambi i lati di tutte le pareti portanti della struttura	-

METODI DI ANALISI	
Analisi sismica: Pushover	**Analisi energetica:** Quasi stazionario

CARATTERISTICHE STRUTTURALI			
Elemento	**Classe/Proprietà**	**Note**	**Schema/Foto**
Muratura principale piano terra, piano primo e piano secondo	Muratura in pietra calcarea, costituita da blocchi di forme varie ed irregolari disposte in modo casuale con interposizione di scaglie e frammenti delle stesse pietre	Tipologia muraria dei principali setti interni e delle pareti perimetrali dei piani: terra, primo e secondo	
Muratura principale piano terzo	Muratura in mattoni pieni e malta di calce	Tipologia muraria propria delle pareti interne e perimetrali del piano terzo e quarto	
Solaio 1	Solaio travi in legno di abete e riempimento in "malta-paglia"	Solai dei piani: terra, primo, secondo e terzo	
Solaio 2	Solaio in laterocemento	Alcune porzioni nella zona nord di tutti i solai dal piano terra al piano quarto	
Solaio 3	Solaio con putrelle metalliche e conglomerato di calce	Alcune porzioni nella zona sud-est del solaio del piano terra	
Copertura	Copertura a falde con capriate lignee		

RISULTATI					
CONFIGURAZIONE *AS-BUILT*					
IS-V	39,6%	**PAM**	3,9%	**EP**	218,04 kWh/(m²y)
					
INTERVENTO 1		**Tempi**[2]	109 giorni	**Costi**[3]	593.691 € 180,41 €/m²
IS-V	53%	**PAM**	2,6%	**EP**	138,67 kWh/(m²y)
					
INTERVENTO 2		**Tempi***	142 giorni	**Costi†**	779.306 € 385,50 €/m²
IS-V	55%	**PAM**	2,3%	**EP**	86,00 kWh/(m²y)
					
INTERVENTO 3		**Tempi***	150 giorni	**Costi†**	829.069 € 251,93 €/m²
IS-V	62%	**PAM**	2,3%	**EP**	86,00 kWh/(m²y)
					

INTERVENTO 4		**Tempi***	161 giorni	**Costi†**	895.472 €	272,11 €/m²
IS-V	71%	**PAM**	2,3%	**EP**		85,96 kWh/(m²y)
						
INTERVENTO 5		**Tempi***	5 mesi	**Costi†**	804.090 €	244,40 €/m²
IS-V	73%	**PAM**	-	**EP**		-
					-	
INTERVENTO 6		**Tempi***	8 mesi	**Costi†**	1.307.730 €	397,49 €/m²
IS-V	91%	**PAM**	-	**EP**		-
					-	

[2] I risultati riportati fanno riferimento ai parametri sismici ed energetici dell'Aquila (AQ). Sono stati studiati ulteriori livelli di intervento che prevedono l'applicazione del rinforzo anche sulle pareti interne e che considerano sia il caso di rinforzo applicato solo su maschi murari, sia su maschi murari e fasce di piano. Tali interventi fanno raggiungere all'edificio le classi A+ e B rispettivamente per IS-V (100%) e PAM (1,5). Utilizzando invece i parametri sismici di Stenico (TN), ove è situato l'edificio, esso risulta in classe D e, a seguito dell'intervento di livello I oppure all'intervento R1, passa in classe A+. Gli interventi di tipo R1 e R2 sono stati studiati facendo riferimento anche ad uno scenario alternativo che vede l'edificio situato a Udine (UD).
Considerando 3 squadre.
[3] L'analisi di costo fa riferimento al Prezziario della Provincia autonoma di Trento. I costi sono comprensivi di oneri per la sicurezza.

Caso studio 10: edificio scolastico in muratura in provincia di Macerata

https://www.reluis.it/doc/DPC-ReLUIS-2022-2024/WP5/04_ScuolaCaldarola_MUR.pdf

TIPOLOGIA	
Destinazione d'uso	Uso pubblico
Sistema costruttivo	Muratura
Epoca di costruzione	1930-1940
Numero di piani	2 fuori terra
Area in pianta	750 mq a piano
Superficie calpestabile	1500 mq
Regolare in pianta	No
Reg. in elevazione	Sì
Classe d'uso	III



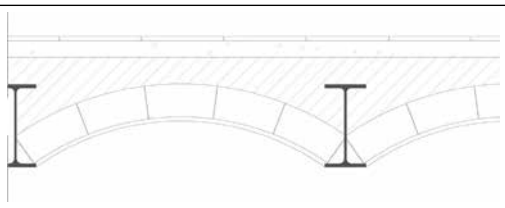
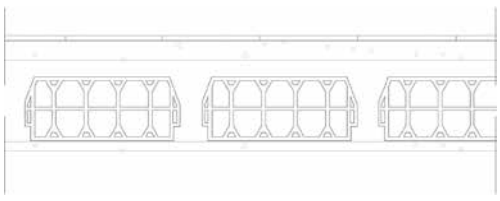
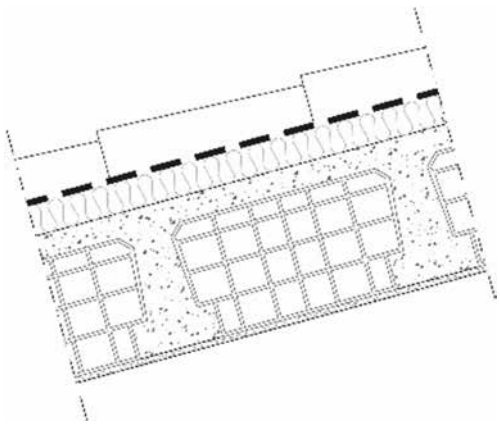


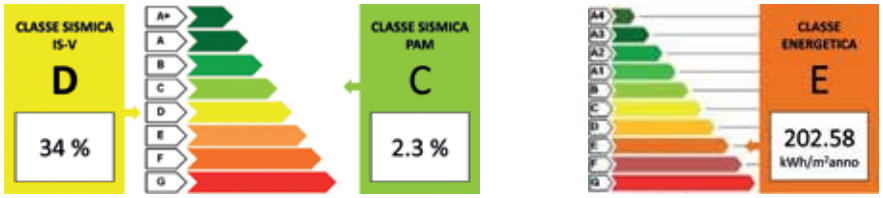
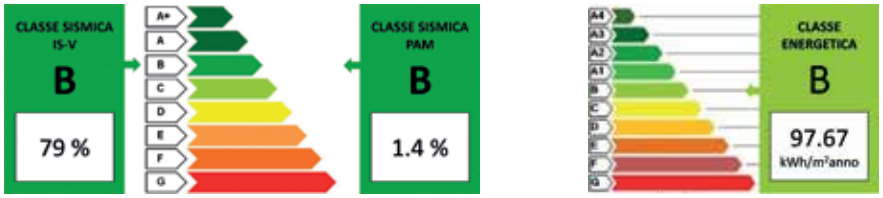
PARAMETRI DI DOMANDA			
Zona Sismica: 2			**Zona Climatica: D**
$a_{g\ SLV}$ = 0,244 [g]	Classe di suolo: B	Cat. top: T1	Gradi giorno: 2007

INTERVENTI PROPOSTI		
	Intervento sismico	**Intervento energetico**
Int. 1	**Miglioramento** – Inserimento sistematico di catene progettate con approccio di tipo duttile e realizzazione di intervento tramite FRM su entrambi i lati dei pannelli murari, esteso a tutte le pareti murarie.	Coibentazione delle superfici opache verticali, sostituzione degli infissi, sostituzione delle lampade neon con lampade LED, sostituzione della caldaia tradizionale con caldaia a condensazione ad alta efficienza.
Int. 2	**Adeguamento** – Come intervento 1, con l'inserimento di cerchiature in tutte le aperture delle pareti esterne orientate sul lato corto dell'edificio (direzione Y), ad entrambi i livelli.	Coibentazione delle superfici opache verticali, sostituzione degli infissi, sostituzione delle lampade neon con lampade LED, sostituzione della caldaia tradizionale con pompa di calore aria/acqua.

METODI DI ANALISI	
Analisi sismica: Pushover	**Analisi energetica:** Quasi stazionario, dinamico

CARATTERISTICHE STRUTTURALI			
Elemento	**Classe/ Proprietà**	**Note**	**Schema/Foto**
MUR1 – Muratura interna ed esterna	Muratura a conci sbozzati, con paramenti di spessore disomogeneo	Tipologia muraria di tutti i muri dell'edificio	

SOL1	Voltine in muratura e travetti	Solaio del piano terra/ primo	
SOL2	Pignatte armate	Solaio del piano primo/ sottotetto	
Copertura	Copertura a falde con pignatte armate		

RISULTATI					
CONFIGURAZIONE *AS-BUILT*					
IS-V	34%	**PAM**	2,3%	**EP**	202,58 kWh/(m²y)
					
INTERVENTO 1		**Tempi**[1]	15 mesi	**Costi**[2]	1.024.655 € 853,88 €/m²
IS-V	79%	**PAM**	1,4%	**EP**	97,67 kWh/(m²y)
					
INTERVENTO 2		**Tempi***	17 mesi	**Costi†**	1.152.756 € 960,63 €/m²
IS-V	100%	**PAM**	0,99%	**EP**	56,99 kWh/(m²y)
					

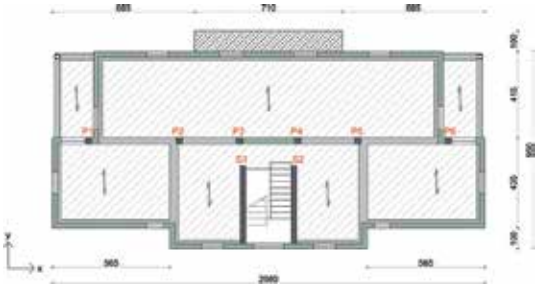
[1] Considerando 1 squadra per opere civili e 1 squadra per opere energetiche.
[2] L'analisi di costo fa riferimento al Prezziario regionale dei lavori pubblici della Regione Marche dell'anno 2019. I costi sono comprensivi di oneri per la sicurezza.

Caso studio 11: edificio residenziale in muratura in provincia di Bergamo

https://www.reluis.it/doc/DPC-ReLUIS-2022-2024/WP5/05_Dalmine_MUR.pdf

TIPOLOGIA	
Destinazione d'uso	Edificio residenziale
Sistema costruttivo	Muratura in mattoni con fori in orizzontale
Epoca di costruzione	1950
Numero di piani	3 fuori terra
Area in pianta	179 mq a piano
Superficie calpestabile	536 mq
Regolare in pianta	No
Reg. in elevazione	Si
Classe d'uso	II

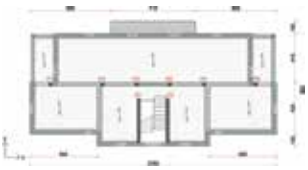


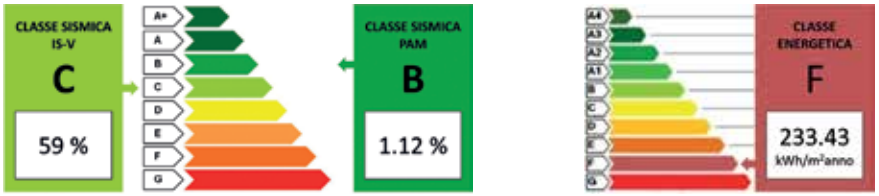


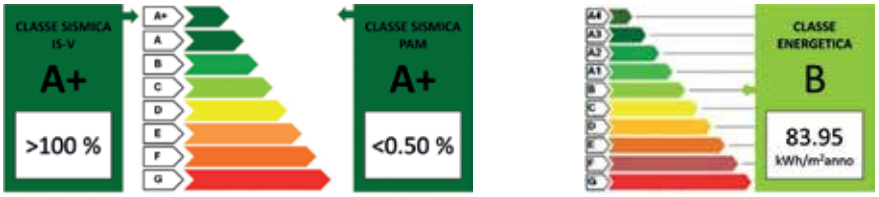
PARAMETRI DI DOMANDA			
Zona Sismica: 2			**Zona Climatica: E**
$a_{g\ SLV}$ = 0,158 [g]	Classe di suolo: C	Cat. top: T1	Gradi giorno: 2473

INTERVENTI PROPOSTI		
	Intervento sismico	**Intervento energetico**
Int. 1	**Intervento globale mediante 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. L'esoscheletro è concepito in modo tale da costituire un rinforzo del solaio esistente (attraverso la fascia marcapiano), e evitare sovrasollecitazioni negli impalcati stessi.	Coibentazione degli elementi opachi verticali mediante l'aggiunta di un rivestimento termoisolante e sostituzione dei serramenti esterni con nuovi elementi ad alta efficienza energetica. Per quanto riguarda l'involucro opaco, lungo le pareti viene aggiunto uno strato di pannelli in stiferite di spessore 14 cm (ad eccezione della facciata nord in cui lo spessore è 8 cm).
Int. 2	**Intervento globale mediante esoscheletro** composto da pareti sismo-resistenti reticolari installate in prossimità delle facciate dell'edificio. In particolare, vengono adottate pareti controventate in acciaio. L'esoscheletro è concepito in modo tale da 1) costituire un rinforzo del solaio esistente (attraverso la fascia marcapiano), e 2) evitare sovrasollecitazioni negli impalcati stessi.	Come Intervento 1.
Int. 3	**Intervento globale mediante esoscheletro** composto da pareti sismo-resistenti in profili di acciaio e pannello d'anima in lamiera. Soluzione è simile alla 2, salvo che in questo caso si adottano pareti con pannelli d'anima in lamiera d'acciaio. L'esoscheletro è concepito in modo tale da 1) costituire un rinforzo del solaio esistente (attraverso la fascia marcapiano), e 2) evitare sovrasollecitazioni negli impalcati stessi.	Come Intervento 1.
Int. 4	**Intervento globale mediante esoscheletro** a guscio in legno che si estende su tutta la facciata, realizzato con pannelli XLAM e rinforzato con telai in acciaio in prossimità delle aperture. L'esoscheletro è concepito in modo tale da 1) costituire un rinforzo del solaio esistente (attraverso la fascia marcapiano), e 2) evitare sovrasollecitazioni negli impalcati stessi.	Come Intervento 1.
Int. 5	**Intervento globale di adeguamento sismico mediante isolamento sismico**: Disposizione di isolatori nella parte basamentale dell'edificio, in corrispondenza del piano di fondazione, sfruttando la presenza del piano seminterrato dell'edificio adibito a cantina. Contestuale irrigidimento dei solai privi di cappa di completamento mediante l'utilizzo di controventi metallici intradossali e di strisce discontinue in FRP.	Come Intervento 1.

METODI DI ANALISI	
Analisi sismica: Pushover	**Analisi energetica:** Analisi Statica

CARATTERISTICHE STRUTTURALI			
Elemento	**Classe/Proprietà**	**Note**	**Schema/Foto**
Pianta	La struttura ha pianta simmetrica di forma prevalentemente rettangolare (20,8x9,5) m e presenta una sporgenza di 1 m nella parte centrale della facciata nord.	Disposizione irregolare in pianta degli elementi sismo resistenti.	
Regolare in elevazione		Elementi sismo resistenti continui in elevazione.	
Struttura portante	Struttura portante realizzata con mattoni forati, con fori disposti in orizzontale + 1 telai di spina in c.a. (pilastri 30x30cme travi 30x40cm).	Studi sperimentali ed i rilievi effettuati a valle dei recenti terremoti (es. terremoto di Salò (BS) del 2004) hanno mostrato un meccanismo di rottura fragile associato a questa tipologia costruttiva, dovuto allo schiacciamento del piede del maschio stesso con conseguente perdita di capacità nei confronti dei carichi verticali.	
Solai	Solai in laterocemento con travetti prefabbricati. Altezza totale 16,5 cm (senza cappa in c.a.).		

<table>
<tr><th colspan="6">RISULTATI</th></tr>
<tr><td colspan="2">CONFIGURAZIONE AS-BUILT</td><td colspan="4"></td></tr>
<tr><td colspan="6">IS-V 59% PAM 1,06% EP


classe sismica B classe energetica F</td></tr>
<tr><td>INTERVENTO 1</td><td>Tempi[1]</td><td>6 mesi</td><td>Costi[2]</td><td>373.430 €</td><td>Str: 402,00 €/m²
En: 137,00 €/m²
D/F[3]: 122,00 €/m²
On: 38,00 €/m2</td></tr>
<tr><td>INTERVENTO 2</td><td>Tempi</td><td>4,5 mesi</td><td>Costi</td><td>287.356 €</td><td>Str: 242,00 €/m²
En: 137,00 €/m²
D/F: 122,00 €/m²
On: 38,00 €/m²</td></tr>
<tr><td>INTERVENTO 3</td><td>Tempi</td><td>4 mesi</td><td>Costi</td><td>268.048 €</td><td>Str: 206,00 €/m²
En: 137,00 €/m²
D/F: 122,00 €/m²
On: 38,00 €/m²</td></tr>
<tr><td>INTERVENTO 4</td><td>Tempi</td><td>5 mesi</td><td>Costi</td><td>304.396 €</td><td>Str: 274,00 €/m²
En: 137,00 €/m²
D/F: 122,00 €/m²
On: 38,00 €/m²</td></tr>
<tr><td colspan="6">INTERVENTI 1-4 (iso-performance strutturale ed energetica)
Note: Gli Interventi 1-4 sono stati progettati per essere isoperformance. I risultati verranno pertanto riportati una sola volta.</td></tr>
<tr><td colspan="6">IS-V 155% PAM 0,40% EP


classe sismica A+ classe energetica B</td></tr>
</table>

INTERVENTO 5	Tempi	Costi
Isolamento alla base raggiunge le stesse performance dei precedenti.		

IS-V >100% **PAM** <0,50% **EP**



classe sismica A+ **classe energetica B**

[1] GG Lavorativi con 1 squadra tipo.
[2] L'analisi di costo fa riferimento al Prezziario regionale dei lavori pubblici della Regione Lombardia dell'anno 2022. I costi sono comprensivi degli oneri per la sicurezza (On).
[3] D/F: Demolizioni e finiture utili anche alla riqualificazione architettonica.

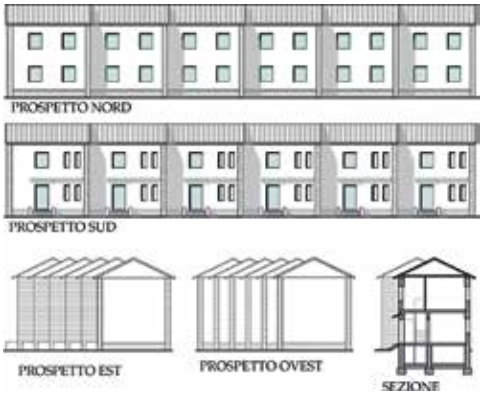
Caso studio 12: edificio residenziale in muratura in provincia di Macerata

https://www.reluis.it/doc/DPC-ReLUIS-2022-2024/WP5/06_Pieve_Torina_MUR.pdf

TIPOLOGIA	
Destinazione d'uso	Residenziale
Sistema costruttivo	Muratura
Epoca di costruzione	1962-63
Numero di piani	2 fuori terra / 1 interrato
Area in pianta	52 mq (unità) / 312 mq (totali)
Superficie calpestabile	104 mq (unità) / 624 mq (totali)
Regolare in pianta	No
Reg. in elevazione	Sì
Classe d'uso	II





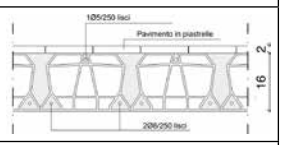
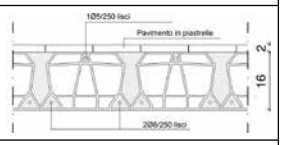
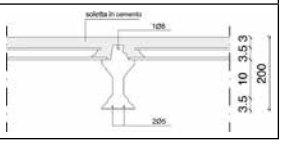


PARAMETRI DI DOMANDA			
Zona Sismica: 1			**Zona Climatica: E**
$a_{g\,SLV}$ = 0,226 [g]	Classe di suolo: B	Cat. top: T1	Gradi giorno: 2189

INTERVENTI PROPOSTI		
	Intervento sismico	**Intervento energetico**
Int. 1	**Miglioramento** – Intonaco armato FRCM solo lato esterno delle pareti; catene sulle celle di estremità; irrigidimento nel piano dei solai con controventi e della copertura con cappa armata	Isolamento pareti, sostituzione serramenti, isolamento copertura; cambio caldaia e inserimento valvole termostatiche su termosifoni esistenti
Int. 2	**Adeguamento** – Iniezioni e tirantini trasversali sulle pareti; catene sulle celle di estremità; irrigidimento nel piano dei solai con controventi e della copertura con cappa armata	Isolamento pareti, sostituzione serramenti, isolamento copertura; sostituzione termosifoni con soffitto radiante e sostituzione caldaia con pompa di calore
Int. 3	**Miglioramento** – Intonaco armato FRCM solo lato esterno delle pareti; catene su tutte le celle; irrigidimento nel piano dei solai con cappa armata nella copertura e nei solai	Isolamento pareti, sostituzione serramenti, isolamento copertura; sostituzione termosifoni con pavimento radiante e sostituzione caldaia con pompa di calore

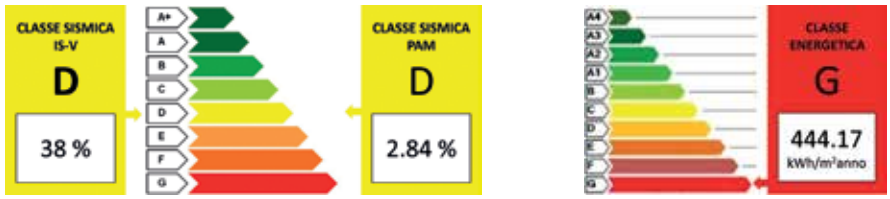
METODI DI ANALISI	
Analisi sismica: Pushover su modello a telaio equivalente	**Analisi energetica:** Quasi stazionario

CARATTERISTICHE STRUTTURALI			
Elemento	**Classe/Proprietà**	**Note**	**Schema/Foto**
MUR1 – Muratura perimetrale principale	Conci sbozzati	Pietrame calcareo a spacco di cava con dimensione molto variabile murato con malta cementizia; sezione a due paramenti accostati	

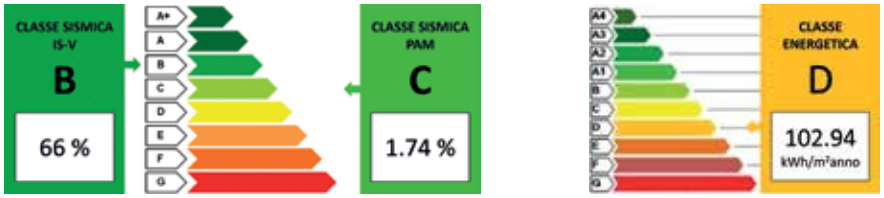
MUR2 – Muratura perimetrale secondaria	Conci squadrati su una faccia a corsi di altezza irregolare	Conci in calcare con la sola superficie a vista tagliata regolarmente murati in malta cementizia; sezione a due paramenti accostati. Impiegata nelle angolate	
MUR3 – Muratura perimetrale della scala e portante interna	Blocchi forati in laterizio con malta cementizia	Blocchi posati con i fori paralleli ai letti di malta. Impiegata nella parete della scala e nel setto portante interno	
SOL1	Solaio in laterizio armato SAP 16+3 con cappa non armata	Solaio del pianterreno e del primo piano	
SOL2	Solaio in laterizio armato SAP 12+3 con cappa non armata	Solaio del sottotetto non calpestabile	
Copertura	Travetti tipo Varese in cap con interposti tavelloni in laterizio	Solaio non calpestabile del sottotetto	

RISULTATI	
CONFIGURAZIONE *AS-BUILT*	**Note (S)** Scarso collegamento tra paramenti murari. **Note (E)** Impianti scadenti.

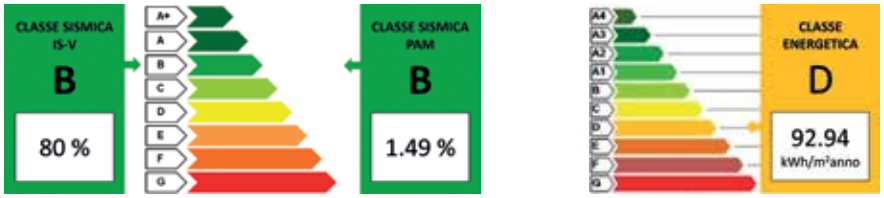
IS-V 38% **PAM** 2,84% **EP** 444,17 kWh/(m²y)



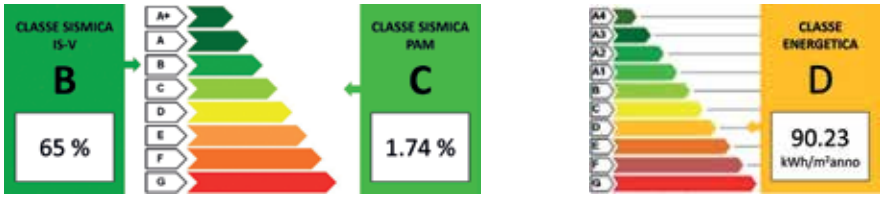
INTERVENTO 1	Tempi[1] 3,5 mesi	Costi[2] 505.080 €	841,80 €/m²
IS-V 66%	**PAM** 1,74%	**EP** 102,94 kWh/(m²y)	



INTERVENTO 2	Tempi* 4 mesi	Costi† 580.820 €	968,03 €/m²
IS-V 80%	**PAM** 1,49%	**EP** 92,94 kWh/(m²y)	



INTERVENTO 3	Tempi* 5 mesi	Costi† 648.090 €	1.080,15 €/m²
IS-V 65%	**PAM** 1,74%	**EP** 90,23 kWh/(m²y)	



[1] Considerando 2 squadre per opere civili ed energetiche.
[2] L'analisi di costo fa riferimento al Prezziario regionale dei lavori pubblici della Regione Marche dell'anno 2019. I costi sono comprensivi di oneri per la sicurezza.

Finito di stampare nel mese di luglio 2024 per conto di Doppiavoce
presso Officine Grafiche Francesco Giannini & Figli S.p.A. – Napoli