



# Progetto DPC-ReLUIS 2022-2024

## WP5: Interventi di rapida esecuzione a basso impatto ed integrati

### CASO STUDIO: EDIFICIO RESIDENZIALE IN CEMENTO ARMATO

#### SCHEDA DI SINTESI INTERVENTI

UR28: UNITN

Coordinatori: prof. ing. Ivan Giongo, prof. ing. Maurizio Piazza

#### **Gruppo di lavoro:**

- prof. ing. Rossano Albatici, prof. ing. Michela Dalprà, prof. ing. Gianluca Maracchini
- dr. ing. Francesco Smiroldo, ing. Andrea Bartolotti, ing. Davide Cassol, ing. Matteo Colombo, Claudia Maiova, ing. Isabella Paviani, ing. Giovanni Sommacal, ing. Stefano Zanon



# Sommario

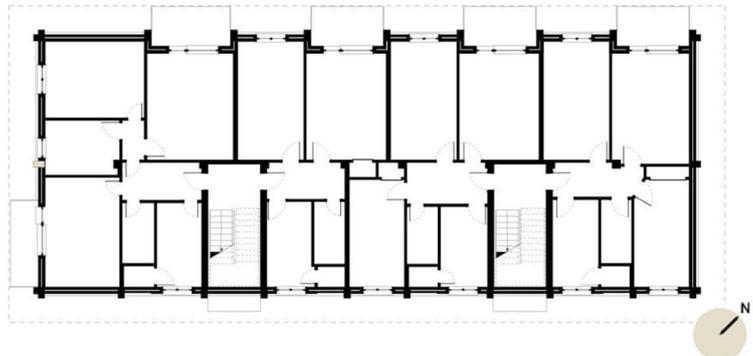
<b>1. EDIFICIO CASO STUDIO</b>	<b>3</b>
1.1 ANALISI STORICO CRITICA	5
1.2 SISTEMA STRUTTURALE E DETTAGLI COSTRUTTIVI	6
1.3 PROPRIETÀ DEI MATERIALI	9
<b>2. VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA</b>	<b>10</b>
2.1 PERICOLOSITÀ SISMICA DEL SITO	11
2.2 MODELLAZIONE STRUTTURALE	12
2.3 MODELLI DI VERIFICA E ANALISI MODALE	15
2.4 VERIFICA STATICA DELLO STATO DI FATTO ALLO SLE	16
2.5 VERIFICA STATICA DELLO STATO DI FATTO ALLO SLU	16
2.6 VERIFICA SISMICA DELLO STATO DI FATTO ALLO SLV	17
2.7 CALCOLO DELLA CLASSE DI RISCHIO SISMICO	19
<b>3. VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA ENERGETICA</b>	<b>21</b>
3.1 CALCOLO DELLA CLASSE ENERGETICA	21
3.2 VERIFICHE IGROMETRICHE SULL'INVOLUCRO	23
<b>4. STRATEGIE DI INTERVENTO INTEGRATE</b>	<b>27</b>
4.1 INTERVENTI PRELIMINARI	ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.
4.2 INTERVENTI DI LIVELLO 1	31
4.2.1 <i>APPLICAZIONE SOLUZIONE RC-TP<sub>ext</sub></i>	31
4.2.2 <i>RIDUZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA</i>	35
4.2.3 <i>CLASSE DI RISCHIO SISMICO</i>	40
4.2.4 <i>MIGLIORAMENTO DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO</i>	41
4.3 INTERVENTI DI LIVELLO 2	48
4.3.1 <i>RIDUZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA</i>	48
4.3.2 <i>CLASSE DI RICHIO SISMICO</i>	49
4.3.3 MIGLIORAMENTO DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO	51
4.4 INTERVENTI DI LIVELLO 3	57
4.3.4 <i>APPLICAZIONE SOLUZIONE RC-TP</i>	57
4.3.5 <i>RIDUZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA</i>	60
4.3.6 <i>CLASSE DI RISCHIO SISMICO</i>	66
4.3.7 <i>MIGLIORAMENTO DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO</i>	67
<b>5 ANALISI COMPARATIVA DEGLI INTERVENTI</b>	<b>73</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>77</b>

## 1. EDIFICIO CASO STUDIO

L'edificio oggetto di studio è sito nel Nord-Ovest italiano ed è stato realizzato nel 1955. Tale edificio fa parte di un intervento di edilizia economica popolare. Il fabbricato presenta una pianta rettangolare ed è costituito da un piano seminterrato, adibito ad autorimessa, cinque piani in elevazione adibiti ad attività commerciali ed alloggi, e sottotetto non praticabile. Per quanto riguarda il pianterreno, in cui trovano posto tre esercizi commerciali, esso occupa solo la metà della pianta che dà sulla strada, mentre l'altra metà si trova ad un livello rialzato rispetto alla quota stradale. L'accesso ai negozi avviene direttamente dal lato della strada, mentre l'accesso alle abitazioni avviene sul retro, in corrispondenza dei due vani scala. La copertura è composta da quattro falde inclinate e presenta un cornicione aggettante.



(a)



(b)

Figura 1-1: Ubicazione dell'edificio (a) e schema di planimetria del piano tipo (b)



(a)



(b)

Figura 1-2: Vista n°1 (a) e vista n°2 (b) dell'edificio.

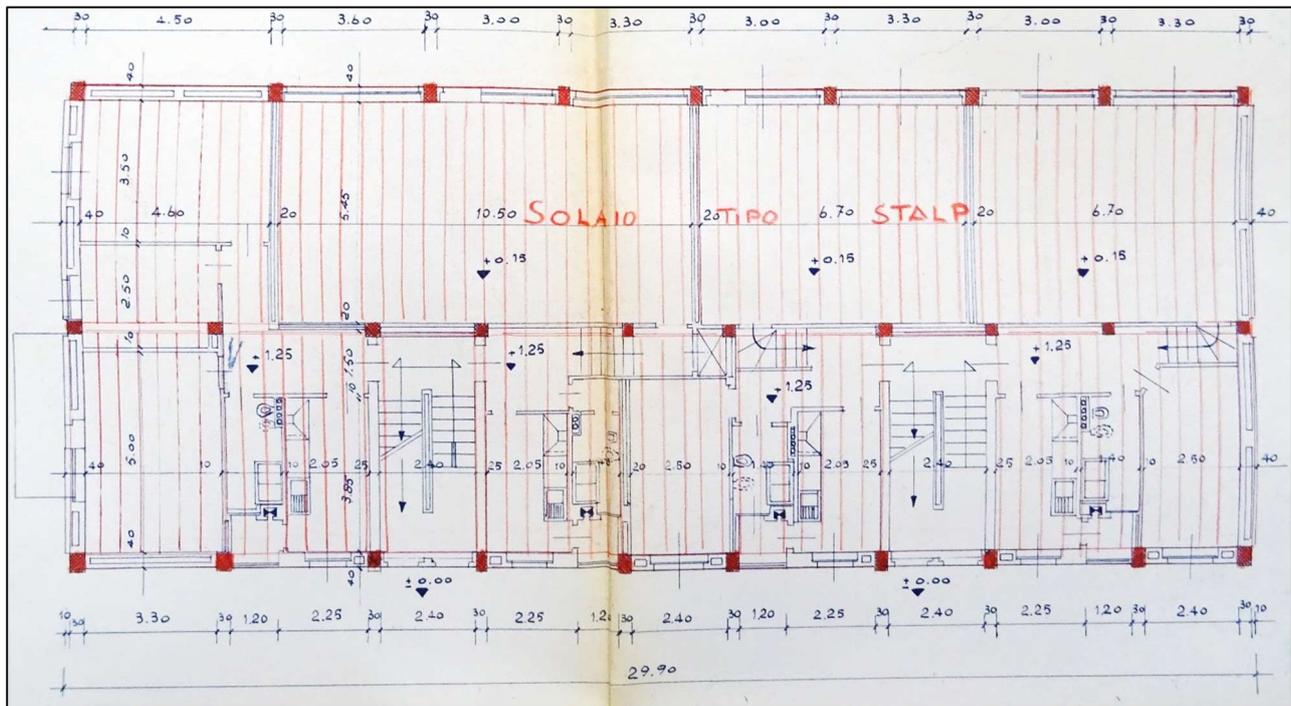
Figura 1-1b e Figura 1-2 confermano come la conformazione del caso studio oggetto di analisi sia tipica dell'edilizia residenziale anni '50.

L'edificio presenta uno schema strutturale a telaio multipiano con campate di luce variabile, realizzato con travi e pilastri in calcestruzzo armato, e solai latero-cementizi. Il sistema di fondazione è costituito da plinti isolati. Sono inoltre presenti quattro setti in calcestruzzo armato continui per tutta l'altezza dell'edificio e disposti parallelamente al lato minore.

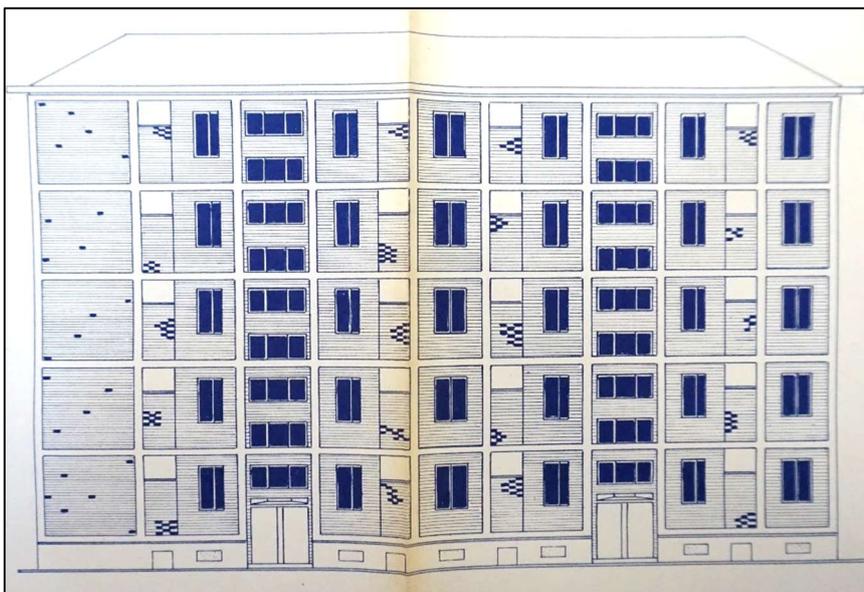
Le pareti di tamponamento in muratura sono state posizionate a filo interno rispetto al telaio portante. Questo fa sì che travi e pilastri, aventi larghezza maggiore rispetto a quella delle pareti, risultino sporgenti (Figura 1-2). Si nota inoltre come i pilastri abbiano un ulteriore aggetto rispetto alle travi. Tutti i prospetti, ad eccezione di quello a nord-est, presentano superfici finestrate. Sul lato nord-ovest del pianterreno, dove si trovano le vetrine e gli ingressi agli esercizi commerciali, le superfici sono interamente finestrate e quindi prive di elementi murari di tamponamento (Figura 1-2a). Sia nella facciata nord-ovest, che nella facciata sud ovest, infine, sono presenti balconi sporgenti.

## 1.1. ANALISI STORICO CRITICA

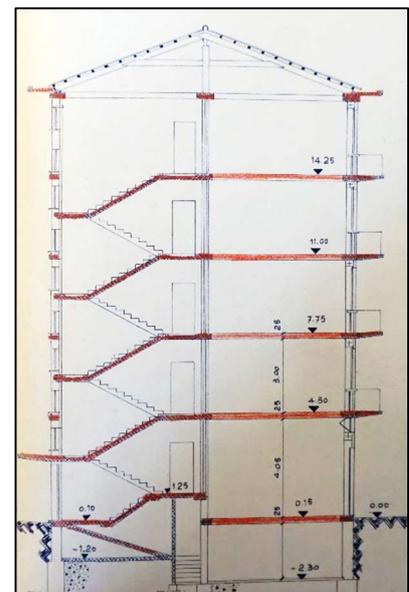
Il fabbricato ha una superficie complessiva calpestabile di circa 1800 m<sup>2</sup> e si sviluppa su cinque piani per un'altezza dell'ultimo impalcato pari a 17,50 m. La cubatura complessiva dell'edificio è di circa 5800 m<sup>3</sup>. La pianta del piano tipo, il prospetto Sud-Est e la sezione della dimensione minore sono riportate in Figura 1-3.



(a)



(b)



(c)

Figura 1-3: Pianta del piano terra (a), prospetto (b) e sezione (c).

## 1.2. SISTEMA STRUTTURALE E DETTAGLI COSTRUTTIVI

La struttura portante, costituita da travi e pilastri in c.a., risulta regolare in pianta ed in elevazione. La pianta è rettangolare e ha dimensioni pari a 30,10×12,20 m, mentre l'altezza di interpiano è pari a 3,25 m. Lungo la direzione maggiore dell'edificio (longitudinale) è la struttura a telai a svolgere il ruolo di controvento, mentre lungo la direzione minore (trasversale) oltre ai telai sono presenti i quattro setti dei vani scale.

I pilastri interni ed i pilastri perimetrali hanno rispettivamente sezione quadrata e rettangolare, mentre i pilastri angolari presentano una sezione ad "L". Le dimensioni in pianta e i quantitativi di armatura variano lungo l'altezza dell'edificio.

A titolo d'esempio, si riportano in Figura 1-4 i dettagli dei pilastri del piano terra.

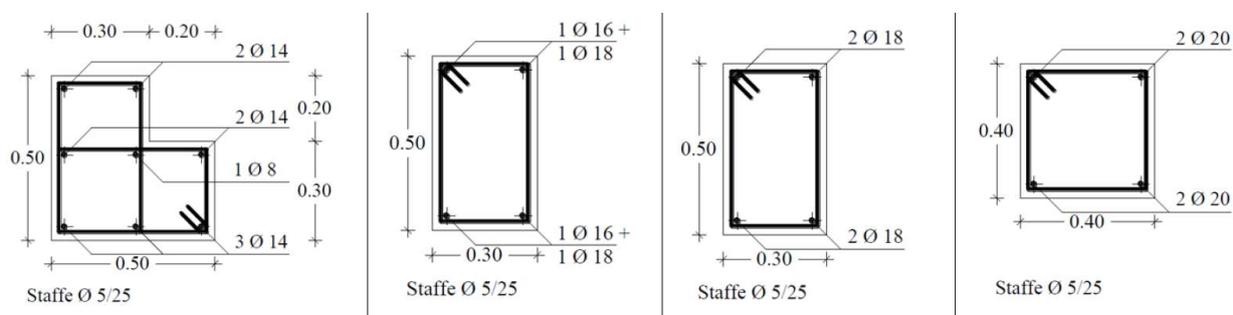


Figura 1-4: Dettagli pilastri piano terra

Le travi si presentano eterogenee sia nei confronti delle sezioni che del quantitativo di armatura. In conformità con le tecniche costruttive dell'epoca, si osserva la presenza di soli ferri reggistaffe in corrispondenza dell'estradosso nelle sezioni in campata, e l'uso di ferri piegati nelle sezioni d'estremità (Figura 1-5).

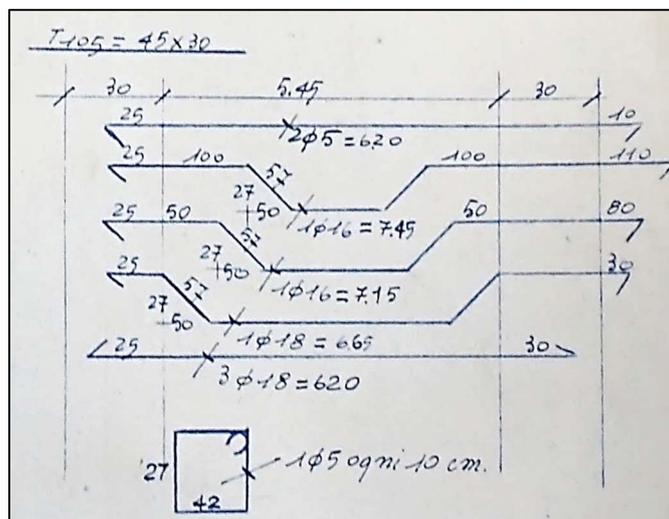
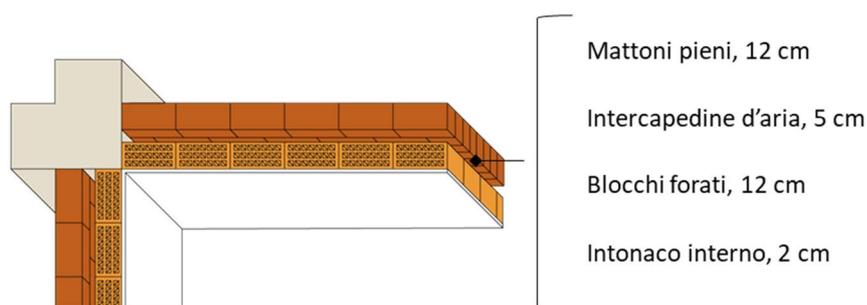


Figura 1-5: Trave perimetrale al piano terra

I quattro setti in c.a. hanno lunghezza costante lungo tutta l'altezza dell'edificio, mentre presentano una sezione maggiore alla base. Non disponendo di dettagli costruttivi, per il calcolo delle armature longitudinali e trasversali è stato utilizzato il R.D. del '39. A due a due, i setti definiscono i vani in cui si trovano le scale, di tipologia a "soletta rampante".

A causa di una mancanza di informazioni riguardo alla composizione delle pareti di tamponamento, si è proceduto valutando sia le informazioni reperibili da sopralluoghi visivi che informazioni presenti in letteratura. Si è dunque ipotizzato che la parete sia composta da due paramenti separati da un'intercapedine d'aria. Questa tipologia di tamponamento, diffusa nell'edilizia degli anni '50, prende il nome di parete a cassa vuota. In particolare, è stato considerato un paramento esterno costituito da mattoni pieni faccia a vista (riscontrabile in Figura 1-2) dello spessore di 12 cm. Il paramento interno, spesso anch'esso 12 cm, è stato invece considerato costituito da blocchi forati in laterizio. L'intercapedine d'aria che separa i due paramenti è stata assunta di 5 cm. Lo spessore totale della parete risulta quindi essere pari a 29 cm (escluso l'intonaco interno). Le caratteristiche dei tamponamenti sono riportate in Figura 1-6.



*Figura 1-6: Tamponamento perimetrale*

Gli orizzontamenti sono realizzati in latero-cemento con spessore 16,5+3,5 cm ed hanno orditura parallela alla direzione trasversale dell'edificio. Nelle successive analisi, verrà assunto uno spessore della cappa di calcestruzzo del solaio pari a 4 cm. La copertura, realizzata anch'essa in laterocemento, è sostenuta da travi inclinate e da una trave di colmo in calcestruzzo.

Di seguito, in Tabella 1-1, Tabella 1-2 e Tabella 1-3, si riporta l'analisi dei carichi effettuata.

*Tabella 1-1: Carichi solaio tipo*

Carico [-]	Elementi [-]	Parziale [kN/m <sup>2</sup> ]	Totale [kN/m <sup>2</sup> ]
G <sub>1</sub>	Laterizi		
	Travetti	2,20	<b>2,20</b>
	Soletta		
G <sub>2</sub>	Massetto livellante	0,70	
	Pavimento	0,40	<b>2,40</b>
	Incid. tramezzi	0,30	
	Intonaco	1,00	
Q <sub>k</sub>	Civ. abitazione	2,00	<b>2,00</b>

*Tabella 1-2: Carichi solaio di copertura*

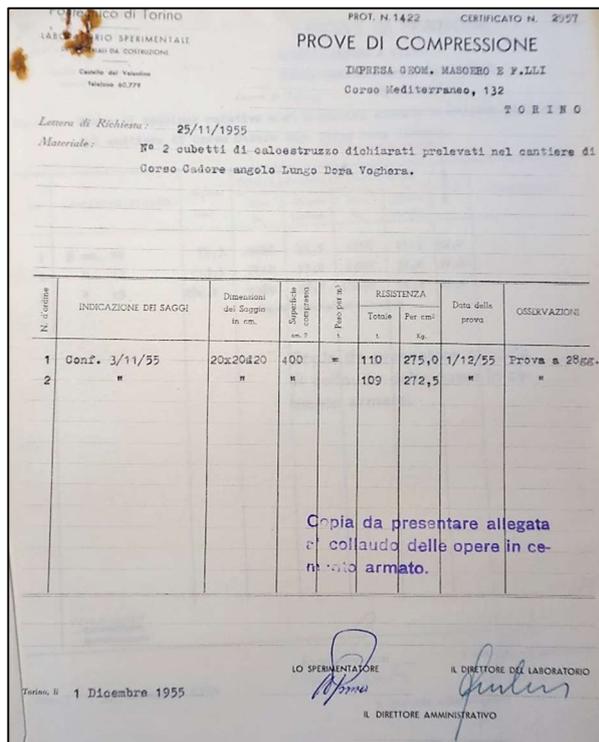
Carico [-]	Elementi [-]	Parziale [kN/m <sup>2</sup> ]	Totale [kN/m <sup>2</sup> ]
G <sub>1</sub>	Laterizi		
	Travetti	2,20	<b>2,20</b>
	Soletta		
G <sub>2</sub>	Coppi	0,30	
	Intonaco	0,30	
	Pannelli isolanti	0,10	<b>0,90</b>
	Listellatura	0,20	
	Copertura	0,50	<b>0,50</b>
Q <sub>n</sub>	Neve	1,12	<b>1,12</b>

*Tabella 1-3: Carichi tamponature esterne*

Carico [-]	Elementi [-]	Parziale [kN/m <sup>2</sup> ]	Totale [kN/m <sup>2</sup> ]
G <sub>2</sub>	Mattoni pieni	2,16	
	Blocchi forati	0,96	<b>3,48</b>
	Intonaco	0,36	

### 1.3. PROPRIETÀ DEI MATERIALI

Le proprietà meccaniche del calcestruzzo e dell'acciaio sono state determinate attraverso la consultazione di certificati di prova risalenti all'epoca di costruzione della struttura (Figura 1-7) e sulla base delle indicazioni fornite dalle NTC 2018 [1]. Le proprietà dei tamponamenti murari sono state determinate considerando sia le indicazioni fornite dalla Circolare n°617 del 2019 [2] che informazioni reperite in Letteratura [3-4]. Si assume inoltre un *Livello di Conoscenza LC2*.



PROVE DI COMPRESSIONE  
 IMPRESA GEOM. MASOERO & F.LLI  
 Corso Mediterraneo, 132 TORINO

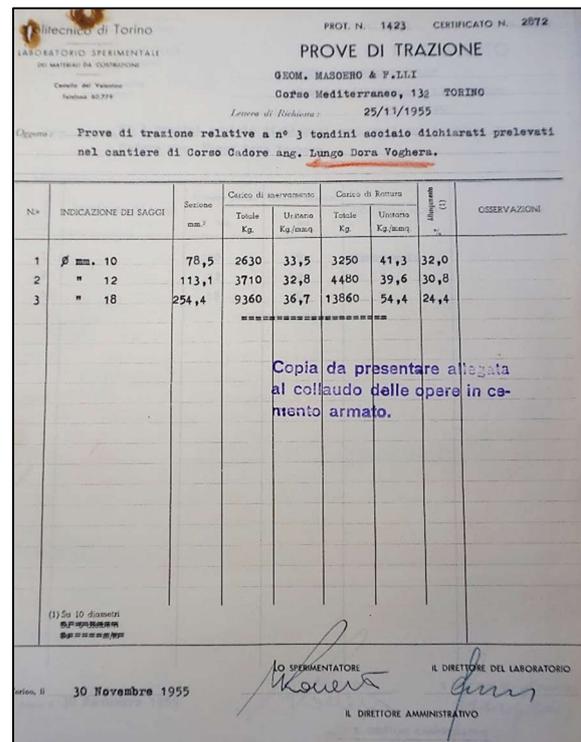
Lettera di Richiesta: 25/11/1955  
 Materiale: N° 2 cubetti di calcestruzzo dichiarati prelevati nel cantiere di Corso Cadore angolo Lungo Dora Voghera.

N. di ordine	INDICAZIONE DEI SAGGI	Dimensioni dei saggi in cm.	Spessore cubetto in cm.	Pesi (kg)	RESISTENZA		Data della prova	OSSERVAZIONI
					Totale t	Per cm <sup>2</sup> Kg.		
1	Conf. 3/11/55	20x20x20	400	=	110	275,0	1/12/55	Prova a 28gg.
2	"	"	"	"	109	272,5	"	"

Copia da presentare allegata al collaudo delle opere in cemento armato.

1 Dicembre 1955

(a)



PROVE DI TRAZIONE  
 GEOM. MASOERO & F.LLI  
 Corso Mediterraneo, 132 TORINO

Lettera di Richiesta: 25/11/1955  
 Oggetto: Prove di trazione relative a n° 3 tondini acciaio dichiarati prelevati nel cantiere di Corso Cadore ang. Lungo Dora Voghera.

N°	INDICAZIONE DEI SAGGI	Sezione mm <sup>2</sup>	Carico di avvertimento		Carico di rottura		Allungamento (%)	OSSERVAZIONI
			Totale Kg.	Unitario Kg./cm <sup>2</sup>	Totale Kg.	Unitario Kg./cm <sup>2</sup>		
1	Ø mm. 10	78,5	2630	33,5	3250	41,3	32,0	
2	" 12	113,1	3710	32,8	4480	39,6	30,8	
3	" 18	254,4	9360	36,7	13860	54,4	24,4	

Copia da presentare allegata al collaudo delle opere in cemento armato.

30 Novembre 1955

(b)

Figura 1-7: Certificati di prova risalenti all'epoca di costruzione – calcestruzzo (a), acciaio (b)

I dati di sintesi sono riportati in Tabella 1-4.

Tabella 1-4: Dati di sintesi

Anno di costruzione		1955
Livello di Conoscenza		LC2
Fattore di Confidenza FC		1,20
Calcestruzzo	$f_{cm}$ [MPa]	26,85
	$E_{cm}$ [MPa]	29585,92
Acciaio	$f_{ym}$ [MPa]	336,69
	$f_m$ [MPa]	3,45-1,70
	$\tau_0$ [MPa]	0,09-0,05
	$f_{v0}$ [MPa]	0,20-0,13
	$E_m$ [MPa]	1500-1150
	$G_m$ [MPa]	500-460
	$W_m$ [kN/m <sup>3</sup> ]	18-8

## 2. VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA

Nel seguente capitolo si illustrano la procedura di calcolo e le ipotesi effettuate per la valutazione della vulnerabilità sismica del sistema strutturale e per determinare l'indice di rischio  $\zeta_E$  definito nelle NTC 2018 [1] come il rapporto tra l'azione sismica massima sopportabile dalla struttura (comunemente espressa attraverso l'accelerazione orizzontale massima nel sito di riferimento che può essere sostenuta dalla struttura,  $PGA_C$ ) e l'azione sismica massima che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione (ovvero l'accelerazione orizzontale massima di progetto nel sito di riferimento,  $PGA_D$ ). L'intero processo ha riguardato le fasi di seguito dettagliate:

- Definizione dei parametri di pericolosità sismica del sito;
- Modellazione numerica della struttura;
- Analisi strutturale;
- Verifica sismica dello stato di fatto;
- Determinazione della classe di rischio sismico.

## 2.1. PERICOLOSITÀ SISMICA DEL SITO

Poiché l'edificio in oggetto è ad uso residenziale, ricade all'interno della *Classe d'uso II* secondo le NTC 2018 [1]; per cui, considerando una vita nominale  $V_N$  pari a *50 anni*, e tenendo conto del coefficiente d'uso pari a *1,0*, si ottiene un valore del periodo di riferimento dell'azione sismica  $V_R$  pari a *50 anni*.

Per quanto riguarda le caratteristiche del sito su cui è stato edificato il fabbricato, è stata considerata una categoria del sottosuolo *B* ed una superficie topografica  $T_1$ .

Di seguito si riportano in Tabella 2-1 una sintesi dei parametri di sito, e in Figura 2-1 gli spettri di risposta in termini di accelerazione allo SLD e allo SLV definiti in accordo con le NTC 2018 [1].

Tabella 2-1: Parametri di caratterizzazione della pericolosità sismica di sito.

Vita Nominale, $V_N$	50 anni
Classe d'uso	II
Coefficiente d'uso, $C_u$	1,0
Periodo di riferimento $V_R$	50 anni
Fattore di comportamento $q$	1,5
$a_g/g$ (SLV)	0.052 ( $T_R=475$ anni)
$a_g/g$ (SLD)	0.033 ( $T_R=50$ anni)
$F_0$ (SLV)	2,757
$T_C^*$ (SLV)	0,272 s
$C_C$	1,419
Categoria del sottosuolo	B
Superficie topografica	T1
$S_S$	1,200
$S_T$	1,000

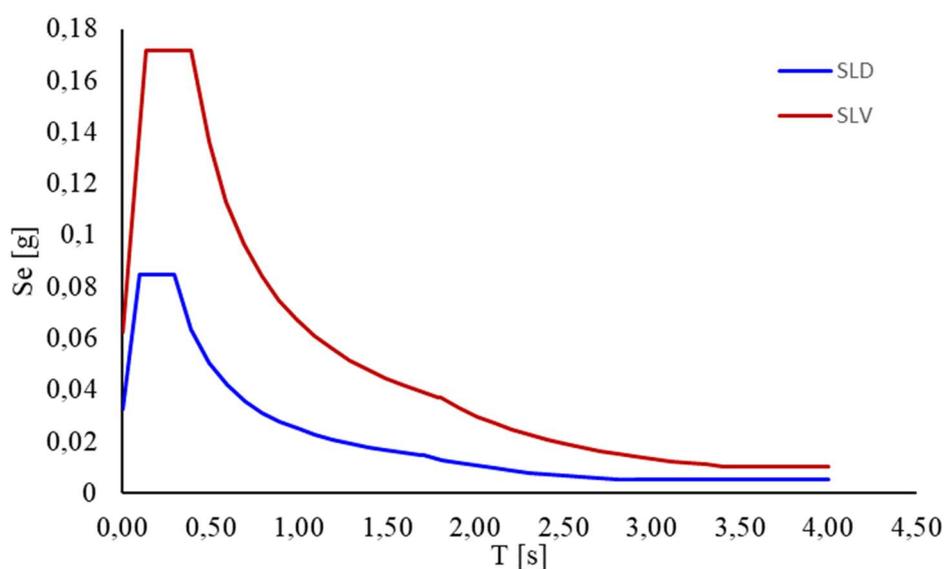


Figura 2-1: Spettri di risposta elastici per SLD e SLV.

## 2.2. MODELLAZIONE STRUTTURALE

Al fine di valutare la risposta sismica dell'edificio caso studio è stata utilizzata un'analisi dinamica lineare condotta secondo le indicazioni fornite dalle NTC 2018 [1]. Il modello strutturale dell'edificio agli elementi finiti (FEM) è stato realizzato con l'ausilio del software di calcolo strutturale *SAP2000* e prevede la modellazione, oltre che degli elementi strutturali, dei tamponamenti esterni (“*Struttura tamponata*”, Figura 2-2a). Per completezza, si riportano i risultati ottenuti considerando un modello numerico in cui i tamponamenti murari sono stati considerati solo in termini di massa (“*Struttura nuda*”, Figura 2-2b).

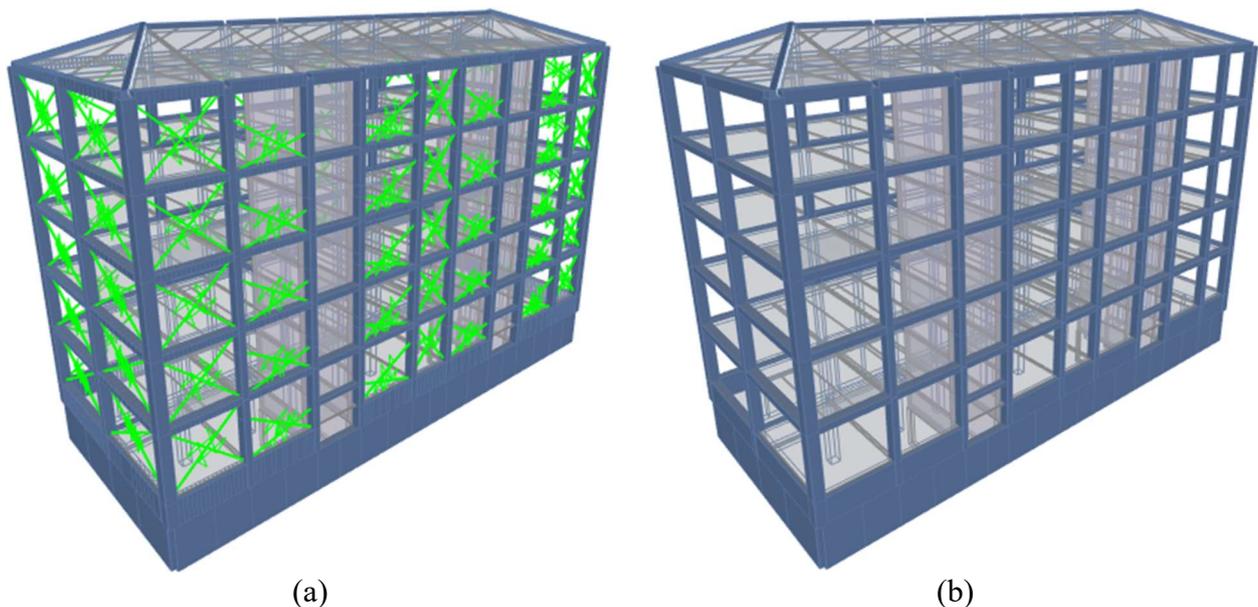


Figura 2-2: Modelli strutturali – “*Struttura tamponata*” (a), “*Struttura nuda*” con tamponamenti considerati solo in termini di massa (b)

Tutti gli elementi primari monodimensionali (travi e pilastri) sono stati modellati come elementi *frame*. Gli orizzontamenti, la copertura ed i setti sono invece stati rappresentati utilizzando elementi *shell*. Avendo fatto l'ipotesi che la soletta di solaio abbia spessore pari a 4 cm, agli orizzontamenti è stato assegnato un vincolo di tipo “*diaphragm*”.

Alla base dei pilastri sono stati assunti dei vincoli di tipo incastro. Nel caso dei setti, il vincolo alla base è stato simulato applicando più cerniere in linea. In questo modo, lungo la direzione “forte” il vincolo è assimilabile a quello di un incastro, mentre nella direzione “debole” sono consentite le rotazioni.

I tamponamenti in muratura sono stati rappresentati attraverso l'inserimento di puntoni diagonali equivalenti definiti secondo il modello proposto da Liberatore et al. (2018) [5]. In ogni maglia tamponata sono dunque stati applicati due puntoni incrociati per ogni paramento. Al fine di rispettare

l'ipotesi che il tamponamento lavori solo a compressione, e non potendo impedire che in analisi lineari anche il puntone teso risulti sollecitato, la rigidezza elastica di tutti i puntoni è stata dimezzata. Inoltre, l'edificio in esame presenta diverse tipologie di aperture: centrate, eccentriche, a nastro, o composte (presenza di porta e finestra o di due finestre). La disposizione dei puntoni diagonali e la relativa riduzione di rigidezza e resistenza è stata dunque definita in funzione delle caratteristiche delle aperture secondo le indicazioni di Tabeshpour M.R. et al. (2016) [6]. In particolare, in presenza di aperture eccentriche o finestre a nastro, tale procedura prevede che il puntone non venga collegato ai nodi trave-pilastro ma bensì agli elementi frame in corrispondenza dell'ultimo punto di contatto tra calcestruzzo e tamponamento (in Figura 2-3a è riportata la rappresentazione di un puntone eccentrico). Questa configurazione permette di computare automaticamente il taglio addizionale che il tamponamento trasferisce agli elementi strutturali in presenza di azioni orizzontali. Tali effetti locali incidono in modo preponderante sulla risposta degli elementi pilastro, mentre possono essere trascurati nel caso delle travi. Non si ritiene inoltre necessario computare valori di taglio addizionale su pilastri che presentino su ambo i lati pareti di tamponamento tali da confinare efficacemente l'elemento strutturale (ad esempio, in assenza di aperture o in caso di aperture centrate con superficie limitata, come rappresentato in Figura 2-3b). Infine, nel caso in cui i puntoni vengano collegati ai nodi di pilastri d'angolo, o a pilastri che presentino maglie adiacenti non tamponate o con grandi aperture, è necessario computare a posteriori il taglio addizionale  $V_{D,t}$  trasmesso ai pilastri (Figura 2-3c).

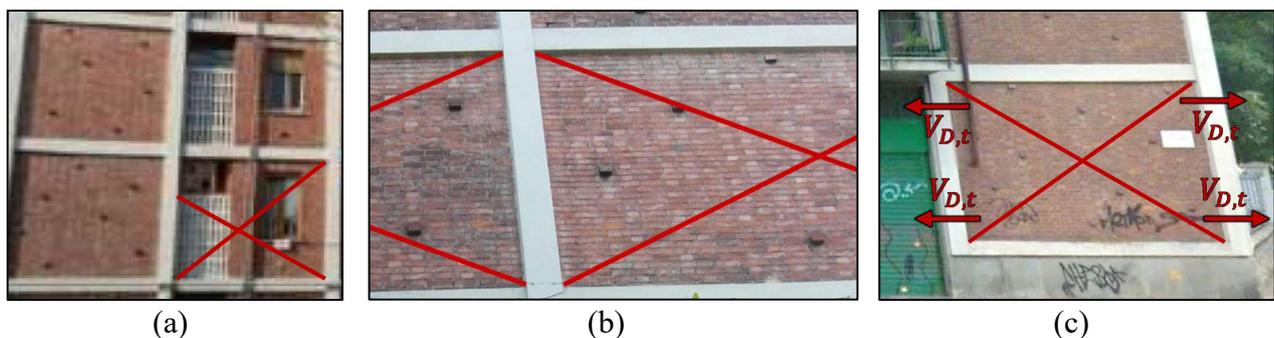


Figura 2-3: Applicazione dei puntoni diagonali equivalenti – eccentrico (a), concentrico (b), concentrico con taglio addizionale computato (c)

La procedura di analisi ha dunque previsto un primo step in cui è stato valutato lo stato di azione assiale presente sui puntoni, ed un secondo step in cui tale azione (avente come limite superiore la capacità massima del puntone) è stata trasferita agli elementi strutturali. Le formulazioni con cui è stato computato il taglio complessivo agente sugli elementi pilastro sono state ricavate da Celarec e Dolsek (2013) [7] e sono riportate di seguito:

$$V_{D,TOT} = V_{D,a} + V_{D,t} \quad V_{D,t} = \gamma_{c,t} * N_{s,max} \cos\vartheta$$

$$N_{s,max} = \max [(N_{ed,C} + N_{ed,T})_{direz. i}; (N_{ed,C} + N_{ed,T})_{direz. j}] \leq N_p$$

dove:

- $V_{D,TOT}$  è il taglio totale agente sul pilastro;
- $V_{D,a}$  è il taglio agente sul pilastro desunto dall'analisi dinamica lineare senza computare gli effetti locali;
- $V_{D,t}$  è il taglio addizionale trasferito dal tamponamento al pilastro;
- $\gamma_{c,t}$  è la quota di azione assiale del puntone che viene trasferita al pilastro e viene assunto pari a 0,5;
- $N_{s,max}$  è la massima azione di compressione agente sul puntone desunta dall'involuppo dei risultati ottenuti dall'analisi dinamica lineare;
- $\vartheta$  è l'angolo di inclinazione del puntone;
- $N_{ed,C}$  è il valore assoluto dell'azione assiale agente sul puntone compresso desunta dall'analisi dinamica lineare;
- $N_{ed,T}$  è il valore assoluto dell'azione assiale agente sul puntone teso desunta dall'analisi dinamica lineare;
- pedici  $i, j$  rappresentano le due direzioni di carico;
- $N_p$  è la capacità massima assiale del puntone.

Riguardo all'assegnazione dei carichi verticali, il peso degli elementi strutturali è stato automaticamente computato dal software a partire dalle proprietà assegnate ai materiali ed alle sezioni. I carichi permanenti portati ed i carichi variabili sono stati assegnati alle aree di solaio e sono dunque stati automaticamente ripartiti in funzione dell'orditura attraverso il comando “*uniform to frame – one way*”. Le azioni verticali derivanti dai tamponamenti, dai poggioni e dal cornicione in copertura sono state assegnate alle travi corrispondenti come carichi su metro lineare.

Per considerare gli effetti della fessurazione, si è fatto riferimento alle indicazioni riportate nella normativa tecnica statunitense ASCE 41-17 [8]. Tale normativa consente infatti di associare differenti coefficienti riduttivi alla rigidità flessionale ed alla rigidità assiale in funzione di quale sia l'elemento considerato (trave, pilastro o tamponamento), ed in funzione dello stato di coazione assiale agente.

## 2.3. MODELLI DI VERIFICA E ANALISI MODALE

L'analisi dei modi di vibrare è stata condotta in accordo con le prescrizioni fornite dalle NTC 2018 [1]. Si riportano in Tabella 2-2 e Tabella 2-3 le caratteristiche dei primi tre modi di vibrare rispettivamente associati alla “Struttura tamponata” ed alla “Struttura nuda”.

Tabella 2-2: “Struttura nuda” - Periodi e masse partecipanti dei primi tre modi di vibrare

Modo	T [s]	Mx [%]	My [%]	Rz [%]
1	1,289	68,6	0,0	0,0
2	0,714	0,0	0,4	61,2
3	0,520	0,0	61,9	0,4

Tabella 2-3: “Struttura tamponata” - Periodi e masse partecipanti dei primi tre modi di vibrare

Modo	T [s]	Mx [%]	My [%]	Rz [%]
1	0,862	71,6	0,0	0,1
2	0,521	0,0	9,7	53,8
3	0,466	0,0	53,1	10,2

**Errore. L'autoriferimento non è valido per un segnalibro.** mostra le rappresentazioni grafiche dei primi tre modi di vibrare della “Struttura tamponata”.

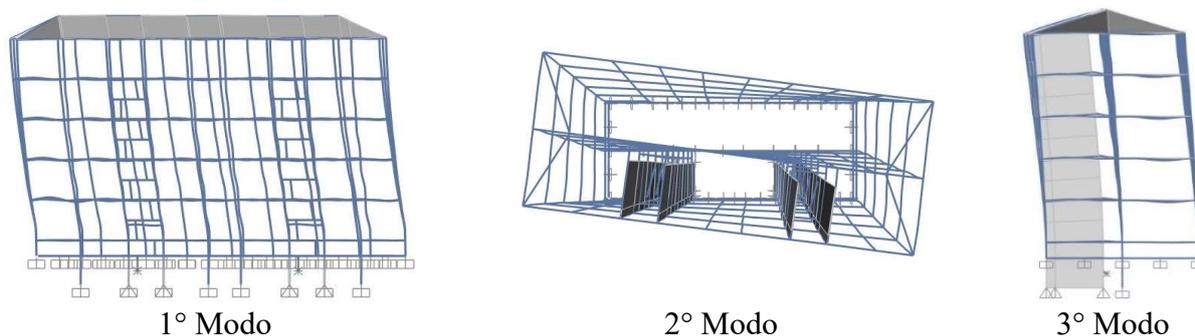


Figura 2-4: Rappresentazione grafica dei primi tre modi di vibrare della “Struttura tamponata”

Le verifiche statiche e sismiche sono state condotte mediante gli applicativi “VIS” ed “SPF” di SAP2000. Nella creazione dei modelli di verifica sono state fatte le seguenti ipotesi:

- legame costitutivo del calcestruzzo di tipo Stress-Block con fattore di resistenza  $\alpha=0,85$  e rapporto con asse neutro  $\beta=0,8$ ;
- effetti del II° ordine trascurati;
- passo delle staffe nelle sezioni d'estremità delle travi calibrato in modo da considerare il contributo nella resistenza a taglio dato dalla presenza dei ferri piegati;

Si sottolinea che il contributo nella resistenza a taglio dovuto alla presenza di ferri piegati è stato considerato anche nelle verifiche sismiche in quanto non si è riscontrata alcuna inversione del segno delle azioni taglianti sulle travi.

## 2.4. VERIFICA STATICA DELLO STATO DI FATTO ALLO SLE

La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sulle costruzioni esistenti, eccetto che per gli edifici in classe d'uso IV, possono essere eseguite con riferimento al solo SLU (punto 8.3 delle NTC 2018).

## 2.5. VERIFICA STATICA DELLO STATO DI FATTO ALLO SLU

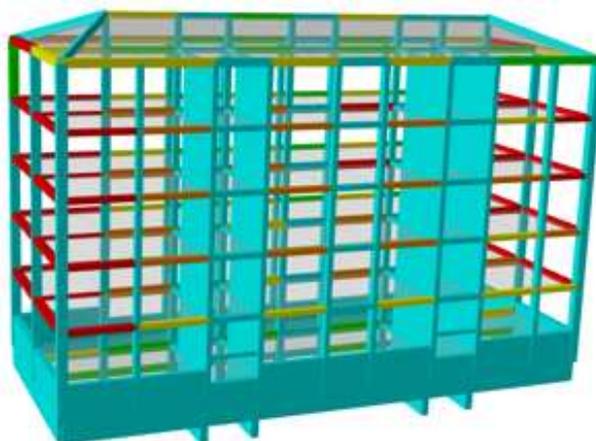
Si riporta di seguito il riepilogo dei risultati ottenuti nelle verifiche allo SLU.

La Tabella 2-4 riporta il numero complessivo di elementi che hanno raggiunto una condizione di collasso per carichi verticali, ed il massimo rapporto Domanda/Capacità (D/C) registrato.

*Tabella 2-4: Riepilogo risultati verifiche SLU dello stato di fatto – numero elementi collassati (n° EC), massimo rapporto Domanda/Capacità (D/C)*

Meccanismi di collasso		Duttili		Fragili	
		Travi	Pilastrini	Travi	Pilastrini
Struttura nuda	n° EC	41	\	\	\
	D/C	1,8	0,64	0,87	0,41
Struttura tamponata	n° EC	41	\	\	\
	D/C	1,7	0,56	0,87	0,42

In generale, non si osservano significative differenze tra la “Struttura nuda” e la “Struttura tamponata” nelle verifiche per carichi gravitazionali. In entrambe le strutture, 41 travi non risultano essere verificate a flessione per la combinazione di carico SLU. Tale risultato è dovuto ai limitati quantitativi di armatura flessionale in corrispondenza delle estremità delle travi. Le travi che non sono risultate essere verificate allo SLU nella “Struttura tamponata” sono evidenziate in rosso in Figura 2-5.



*Figura 2-5: Verifica SLU “Struttura tamponata” - Meccanismi flessionali travi*

## 2.6. VERIFICA SISMICA DELLO STATO DI FATTO ALLO SLV

Sono state eseguite le verifiche allo SLV sia per quanto riguarda i meccanismi duttili (flessione di travi, pilastri e setti), che per quelli fragili (taglio di travi, pilastri, setti e nodi trave-pilastro), che per il collasso delle pareti di tamponamento.

### VERIFICA DEI MECCANISMI DUTTILI

Si ricorda che, per le verifiche duttili degli elementi, le proprietà medie dei materiali ( $f_m$ ) devono essere scalate dal fattore di confidenza ( $FC$ ), ottenendo, così, le proprietà di progetto:

$$f_d = \frac{f_m}{FC}$$

In Tabella 2-5 è riportato il riepilogo dei risultati ottenuti dalla verifica dei meccanismi duttili.

*Tabella 2-5: Meccanismi duttili allo SLV dello stato di fatto – numero elementi collassati (n° EC), massimo rapporto Domanda/Capacità (D/C)*

<b>Meccanismi duttili</b>		Travi	Pilastri	Setti
Struttura nuda	n° EC	50	\	\
	D/C	1,66	0,87	0,43
Struttura tamponata	n° EC	27	\	\
	D/C	1,45	0,64	0,37

### VERIFICA DEI MECCANISMI FRAGILI

Nel seguito sono descritti i metodi di verifica utilizzati per le verifiche dei meccanismi fragili di travi, pilastri e nodi trave-pilastro. Si ricorda che, per le verifiche fragili degli elementi, le proprietà medie dei materiali ( $f_m$ ) devono essere scalate dal prodotto del fattore di confidenza ( $FC$ ) moltiplicato per il coefficiente parziale dei materiali ( $\gamma_m$ ), ottenendo, così, le proprietà di progetto:

$$f_d = \frac{f_m}{FC * \gamma_m}$$

La verifica a taglio di travi e pilastri e la verifica dei nodi è stata eseguita considerando le disposizioni riportate nella Circolare n°617 del 2019 [2] al punto C8.7.2.3.5.

Per la verifica dei pilastri è stato inoltre definito un taglio resistente ridotto  $V_{rd}^*$  tale da permettere agli applicativi di verifica di tenere automaticamente in conto del taglio addizionale trasmesso dai tamponamenti murari. Per valutare  $V_{rd}^*$  è stato dunque eseguito il seguente calcolo:

$$\frac{D}{C} = \frac{V_{D,TOT}}{V_{rd}} = \frac{V_{D,a} + V_{D,t}}{V_{rd}} = \frac{V_{D,a}}{V_{rd}^*} \rightarrow V_{rd}^* = \frac{V_{rd} \cdot V_{D,a}}{V_{D,a} + V_{D,t}}$$

dove

- $V_{D,TOT}$  è il taglio totale agente sul pilastro;
- $V_{rd}$  è il taglio resistente del pilastro calcolato secondo NTC 2018 [1]
- $V_{D,a}$  è il taglio agente sul pilastro desunto dall'analisi dinamica lineare senza computare gli effetti locali;
- $V_{D,t}$  è il taglio addizionale trasferito dal tamponamento al pilastro;
- $V_{rd}^*$  è il taglio resistente ridotto in modo da tenere indirettamente conto dell'azione trasferita dal tamponamento.

Si riporta in Tabella 2-6 il riepilogo dei risultati ottenuti dalla verifica dei meccanismi fragili.

Tabella 2-6: Meccanismi fragili allo SLV dello stato di fatto – numero elementi collassati (n° EC), massimo rapporto Domanda/Capacità (D/C)

Meccanismi fragili		Travi	Pilastri	Setti	Nodi
Struttura nuda	n° EC	\	8	\	4
	D/C	0,62	1,26	0,85	1,26
Struttura tamponata	n° EC	\	37	\	\
	D/C	0,59	2,24	0,76	\

I pilastri non verificati allo SLV nella “Struttura tamponata” sono evidenziati in rosso in Figura 2-6.

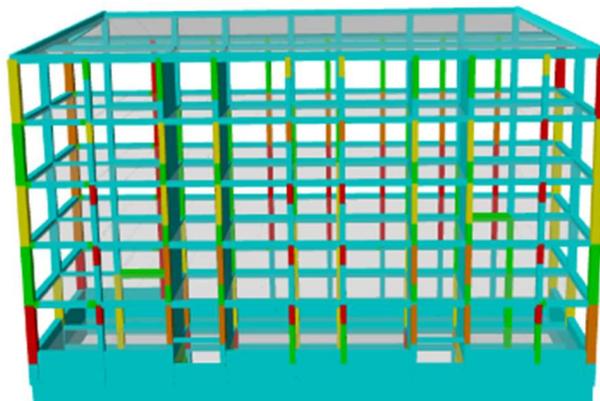


Figura 2-6: Verifica SLV “Struttura tamponata” - Meccanismi fragili pilastri

Si osserva come considerare la presenza dei tamponamenti nel modello di calcolo influenzi significativamente la risposta della struttura. In particolare, la presenza dei tamponamenti porta al trasferimento di azioni addizionali sui pilastri ed al conseguente manifestarsi di vulnerabilità a taglio. In particolare, nella “Struttura tamponata” si registra il collasso fragile di 37 pilastri allo SLV mentre, nel caso di “Struttura nuda”, tale tipologia di collasso è stata osservata per soli 8 elementi. Si evidenzia inoltre come il collasso di 4 nodi nella “Struttura nuda” non sia stato registrato nel caso della “Struttura tamponata”.

## VERIFICA DEI TAMPONAMENTI

Tabella 2-7 riporta i collassi associati alle pareti di tamponamento registrati dall'analisi della "Struttura tamponata".

*Tabella 2-7: Collasso dei tamponamenti allo SLV dello stato di fatto – numero elementi collassati (n° EC), massimo rapporto Domanda/Capacità (D/C)*

<b>Collasso tamponamenti</b>		Laterizi forati	Blocchi pieni
Struttura	n° EC	47	70
tamponata	D/C	1,79	3,07

Le verifiche di sicurezza nei confronti dei meccanismi fragili hanno evidenziato la ridotta capacità sismica del sistema strutturale in esame per effetto dell'attivazione di crisi a taglio nei pilastri. Ciò è in linea con i risultati di diversi studi presenti in letteratura [9-12] e con i danni osservati a seguito dei recenti eventi sismici sugli edifici in c.a. esistenti.

## **2.7. CALCOLO DELLA CLASSE DI RISCHIO SISMICO**

Al fine di determinare l'indice di sicurezza dello stato di fatto, è stato valutato il comportamento della struttura (modellata sia nella configurazione "nuda" che considerando la presenza dei tamponamenti) quando soggetta ad azioni sismiche associate a differenti tempi di ritorno  $T_r$  appartenenti al range 10-2475 anni. L'indice di sicurezza nei confronti delle azioni sismiche,  $\zeta_E$ , è stato preso come il rapporto tra  $PGA_C/PGA_D$  secondo quanto definito in precedenza. La procedura per la determinazione della  $PGA_C$  consiste nello scalare lo spettro di domanda fino ad ottenerne uno per il quale si attivi la prima crisi. Il valore della  $PGA_C$  non sarà altro che la  $PGA$  di ancoraggio di tale spettro trovato.

A seguito delle analisi effettuate, è stata calcolata la classe di rischio sismico per l'edificio in questione attraverso il metodo convenzionale suggerito dalle Linee guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni D.M. 24 del 2020 [13].

Si riportano in Tabella 2-8 i risultati ottenuti dal calcolo dell'*Indice di sicurezza all'SLV (Classe IS-V)* e dal calcolo della *Perdita Annuale Media attesa PAM (Classe PAM)*. Si precisa come la *Classe IS-V* sia direttamente determinabile a partire dal parametro  $\zeta_E$ , mentre la *Classe PAM* rappresenta il rapporto tra il costo degli interventi di riparazione causati dal sisma durante il periodo di vita della costruzione e il costo di ricostruzione, espresso in percentuale e ripartito annualmente

Tabella 2-8: Calcolo della classe di rischio sismico

Classe di Rischio Sismico	$T_r$ (anni)		Indice IS-V (%)	Classe IS-V	Indice PAM (%)	Classe PAM	Classe Risultante
	Meccanismi duttili	Meccanismi fragili					
Struttura nuda	10	172	14	F	8,22	G	G
Struttura tamponata	10	23	14	F	8,22	G	G

L'edificio caso studio ricade nella Classe di rischio G, determinata come il minimo tra la *Classe IS-V* e la *Classe PAM*. Si osserva inoltre come il  $T_r$  minimo dipenda fortemente dall'attivazione dei meccanismi duttili. Tale risultato è motivato dal fatto che le travi del caso studio in esame non risultano essere verificate a flessione in presenza dei soli carichi verticali in combinazione sismica.

### 3. VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA ENERGETICA

#### 3.1. CALCOLO DELLA CLASSE ENERGETICA

La prestazione energetica di un edificio è valutata in funzione della quantità di energia, calcolata o misurata, necessaria per soddisfare il fabbisogno energetico connesso ad un uso normale compresa, in particolare, l'energia utilizzata per il riscaldamento, il raffrescamento, la ventilazione, la produzione di acqua calda e l'illuminazione. Tale prestazione corrisponde all'energia totale consumata dall'edificio climatizzato per metro quadro di superficie ogni anno, ed è espressa in kWh/m<sup>2</sup> anno.

Nell'Unione Europea, l'edilizia è responsabile di circa il 40% del consumo energetico e del 36% delle emissioni totali di CO<sub>2</sub>. Conseguentemente, a livello normativo, è stata posta particolare attenzione ai consumi energetici legati all'edilizia, sia limitando la realizzazione di nuove costruzioni, sia monitorando e valutando i consumi degli edifici esistenti attraverso l'attestato di prestazione energetica (APE). In tale documento, riconosciuto dallo Stato, viene indicato l'indice di prestazione energetica globale (EPgl) ed i contributi dati dai diversi servizi che concorrono a determinarlo (e.g., riscaldamento, elettrodomestici, illuminazione). In base ai valori dell'EPgl, all'edificio viene assegnata una classe energetica, alla quale si associa un certo livello di efficienza energetica (Figura 3-1).



Figura 3-1: Classificazione energetica degli edifici

Negli edifici residenziali, che rappresentano oltre il 90% del patrimonio costruito in Europa, circa due terzi dei consumi totali sono causati dal riscaldamento degli ambienti. Ciò che incide

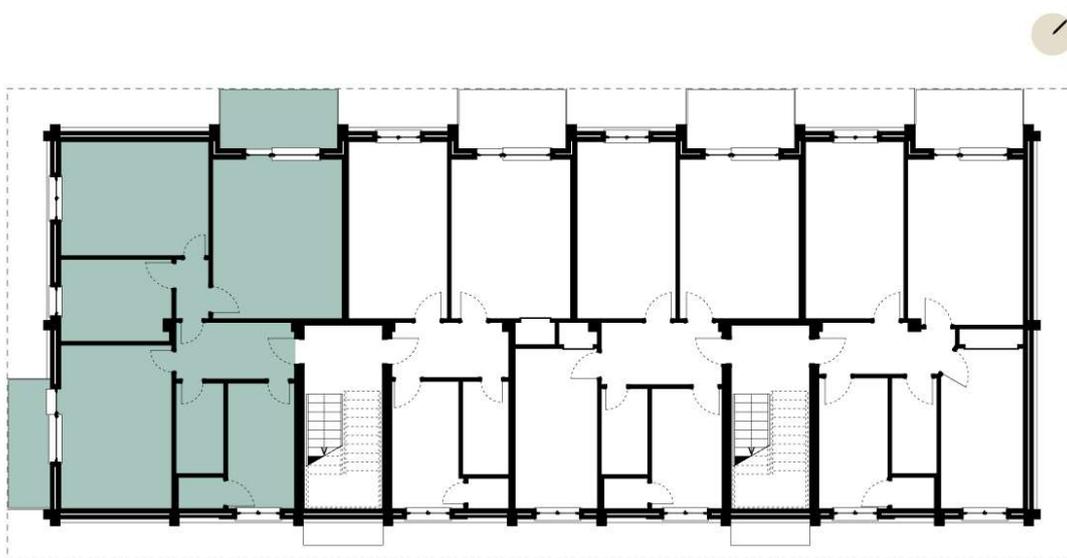
maggiormente nella prestazione energetica è dunque la quantità di calore dispersa dall'involucro edilizio [14].

L'edificio in esame presenta un involucro dalle caratteristiche fisiche tipiche dell'epoca di costruzione. Le pareti esterne sono infatti non isolate e gli elementi strutturali "a vista" fungono da "ponti termici".

Riguardo agli infissi, si è supposto che fossero stati sostituiti nel corso degli anni, e che attualmente presentino un telaio in PVC, vetrocamera costituita da doppio vetro con intercapedine d'aria ed avvolgibili in PVC. Soglie e davanzali sono in marmo, ma si ipotizza che con la sostituzione dell'infisso sia stato eseguito un taglio termico.

Per quanto concerne gli impianti, si è ipotizzato che il riscaldamento e la produzione di acqua calda sanitaria sia unico e autonomo per ogni appartamento. Il generatore è stato supposto costituito da una caldaia standard alimentata a gas, mentre il riscaldamento degli ambienti è stato attribuito a radiatori a parete in ghisa. Non è stato previsto invece alcun impianto di raffrescamento.

Per semplicità, trattandosi di un edificio condominiale, ci si è focalizzati su un solo appartamento, collocato ad un piano intermedio, per valutarne le prestazioni termiche in base al livello di intervento. L'appartamento analizzato è stato scelto per la sua esposizione su tre lati e per la presenza di entrambe le tipologie di balconi, quello rientrante verso nord-ovest e quello rivolto a sud-ovest (Figura 3-2).



*Figura 3-2: Appartamento di riferimento*

Utilizzando il software Termus, è stato possibile ottenere il valore dei parametri indicativi delle prestazioni termiche ed una stima della classe energetica dell'edificio.

Si riporta in Figura 3-3 la schematizzazione dei risultati ottenuti.

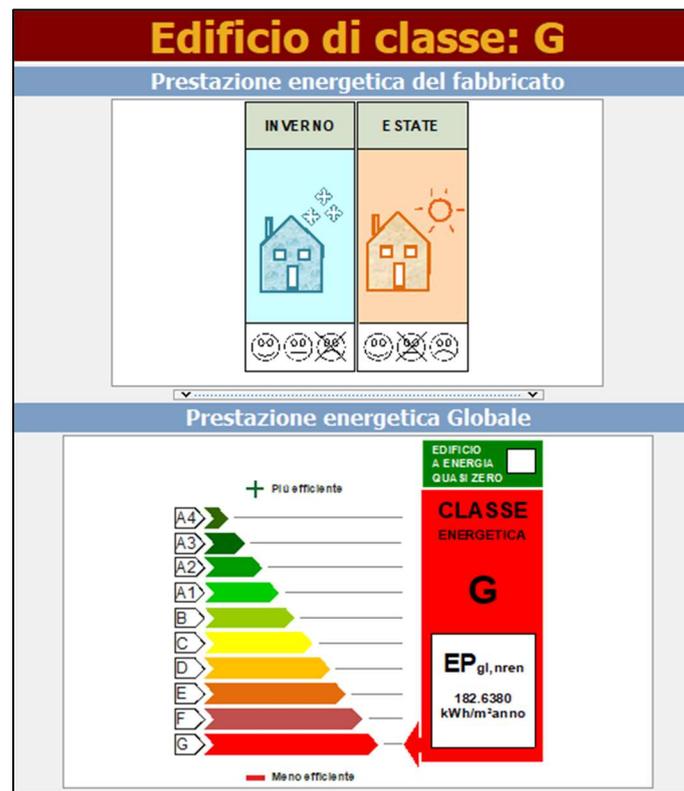


Figura 3-3: Risultati ottenuti dall'analisi energetica dello stato di fatto - Software TerMus

Come si può osservare dall'immagine, nelle condizioni esistenti l'appartamento risulta appartenere alla *Classe energetica G*. In particolare, le prestazioni nella stagione invernale risultano essere le più critiche.

### 3.2. VERIFICHE IGROMETRICHE SULL'INVOLUCRO

Nel caso di intervento che riguardi le strutture opache delimitanti il volume climatizzato verso l'esterno, si procede in conformità alla normativa tecnica vigente (UNI EN ISO 13788:2013 [15]), alla verifica dell'assenza:

- di rischio di formazione di muffe, con particolare attenzione ai ponti termici negli edifici di nuova costruzione;
- di condensazioni interstiziali (la norma specifica chiarisce che si può accettare la formazione di condensa all'interno delle murature nei limiti tali che possa essere smaltita durante l'anno e che non danneggi i materiali).

Il fenomeno della condensa è connesso con la diffusione del vapore attraverso gli elementi edilizi che separano ambienti caratterizzati da livelli di temperatura e umidità relativa differenti. Infatti, il vapore

acqueo, che tende a migrare verso ambienti aventi un'umidità relativa più bassa, può condensare sulla superficie oppure all'interno della stratigrafia della parete.

La condensa superficiale è visibile a occhio nudo e può dare origine a fenomeni di degrado del materiale oppure favorire la crescita di muffe.

La condensa interstiziale è più difficile da individuare e quindi può essere molto dannosa. Infatti, l'accumulo d'acqua all'interno dei materiali causa il loro deterioramento e abbatte l'efficienza non soltanto termica (uno strato isolante imbevuto d'acqua aumenta la sua conducibilità) ma anche strutturale, come nel caso dei fenomeni di corrosione che possono innescarsi nel cemento armato.

### PONTI TERMICI E RISCHIO MUFFA

Il ponte termico è una discontinuità, di tipo morfologico o strutturale, di una parete, attraverso la quale si ha un aumento del flusso termico trasmesso rispetto al resto della parete. Tali discontinuità possono essere costituite da spigoli fra pareti ortogonali (discontinuità morfologica) o dalla presenza di elementi che alterano la normale stratigrafia della parete quali pilastri o finestre (discontinuità strutturale).

In corrispondenza di queste discontinuità si assiste pertanto ad elevate dispersioni termiche, in particolare nei mesi invernali quando vi è una grande differenza di temperatura fra l'ambiente interno riscaldato e quello esterno (o un ambiente non riscaldato). In queste condizioni si verifica che sulla superficie interna del ponte termico la temperatura risulti più bassa, rendendo possibile la formazione di condensa superficiale. Essa può essere accettata temporaneamente e in piccole quantità, per esempio sulle finestre e sulle piastrelle nei bagni, se la superficie è impermeabile all'umidità e sono assunte misure adeguate a prevenirne il contatto con materiali adiacenti sensibili.

Per periodi di tempo di diversi giorni con umidità relativa superficiale maggiore di 0,8 c'è il rischio di formazione di muffe, microrganismi che deturpano le pareti e possono divenire causa di allergie e di patologie anche più gravi dell'apparato respiratorio.

Il metodo di calcolo utilizzato è riportato all'interno della norma UNI EN ISO 13788 [15]. In particolare, considerando lo stesso appartamento oggetto di approfondimento nel capitolo precedente, si è scelto di analizzare alcuni ponti termici significativi (Figura 3-4). Per ogni ponte termico, deve essere verificata la relazione  $f_{Rsi} > f_{Rsi,min}=0,73$ , dove  $f_{Rsi}$  è il fattore di temperatura sulla superficie interna calcolato per lo specifico elemento studiato, mentre  $f_{Rsi,min}$  è il fattore di temperatura minimo accettabile. Come condizioni climatiche esterne sono state prese quelle relative al mese di maggiore

umidità relativa esterna, vale a dire novembre. Si considera invece una temperatura interna fissata in accordo con le indicazioni nazionali di 20°C.

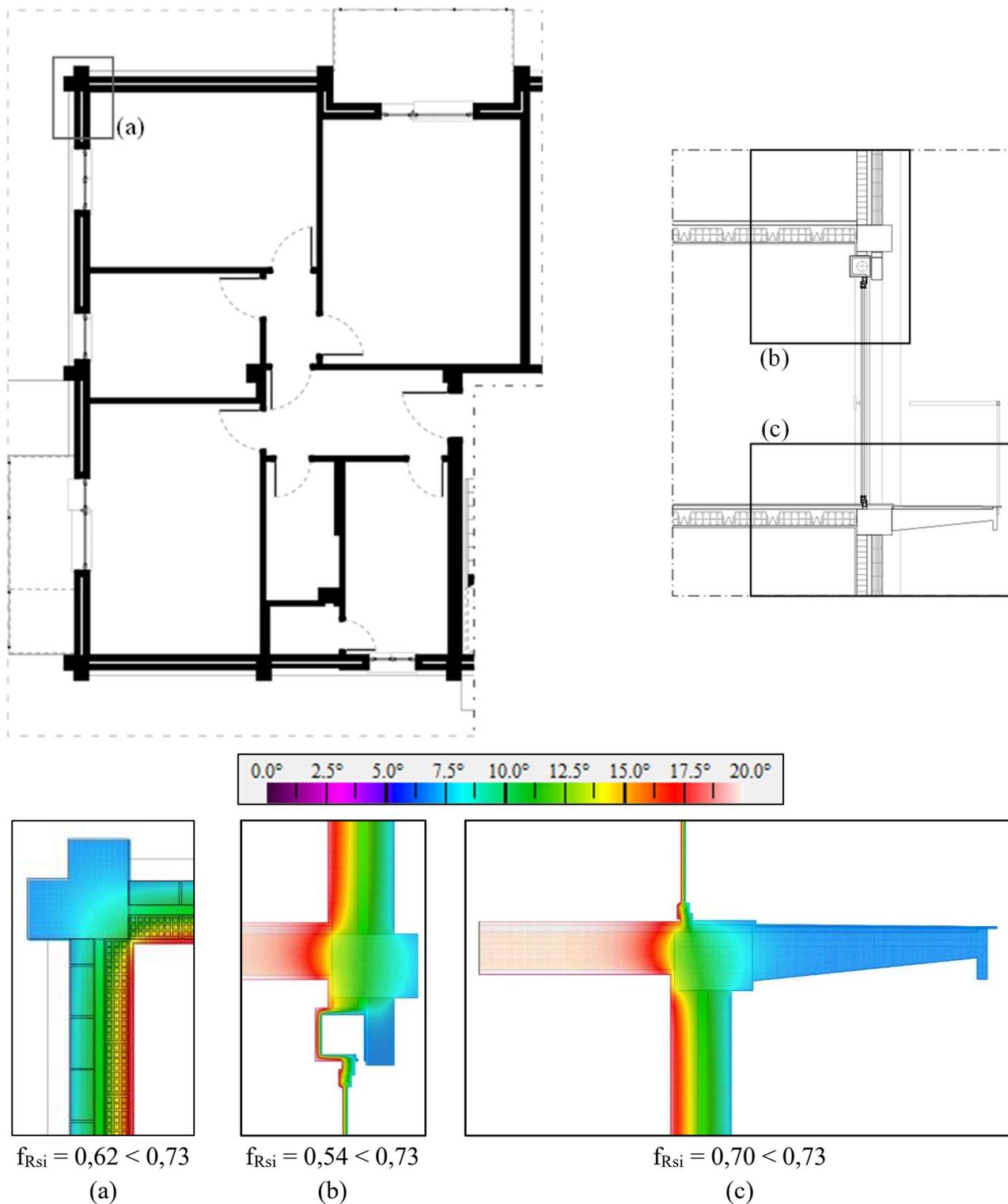


Figura 3-4: Analisi dei ponti termici – Stato di fatto – Angolo tra pareti verticali (a), collegamento superiore della finestra (b), balcone (c)

Come è possibile osservare, in tutti i casi studiati vi è il rischio di formazione di muffa in corrispondenza dei ponti termici nel caso dello stato di fatto.

### CONDENSA INTERSTIZIALE

La verifica di condensa interstiziale fa riferimento alla norma UNI EN ISO 13788 [15], che propone una procedura semplificata: “A partire dal primo mese in cui è prevista condensazione, vengono considerate le condizioni medie mensili esterne per calcolare la quantità di acqua condensata o evaporata in ciascuno dei dodici mesi dell’anno. La quantità di acqua condensata accumulata alla fine di quei mesi in cui è avvenuta condensazione viene confrontata con quella evaporata complessivamente durante il resto dell’anno. Si assumono condizioni stazionarie e geometria monodimensionale. Non si considerano moti dell’aria attraverso o all’interno degli elementi edilizi”.

Ogni parete da analizzare viene suddivisa in facce piane parallele, per ciascuna delle quali viene calcolata la resistenza termica e lo spessore equivalente di aria per la diffusione del vapore.

Per ogni mese dell’anno bisogna calcolare la distribuzione della temperatura, della pressione di saturazione e della distribuzione di vapore in corrispondenza di ciascuna interfaccia della stratigrafia, e controllare se si verifica condensazione interstiziale. Questa procedura viene mostrata in maniera grafica attraverso il diagramma di Glaser. Tale diagramma si basa sulla rappresentazione di una sezione trasversale della parete su cui vengono individuati i valori di interfaccia associati alla pressione di saturazione e alla pressione di vapore (“pressione nell’interfaccia”), dai quali vengono tracciate due linee spezzate che indicano l’andamento attraverso gli strati dei due parametri. Se le due linee si intersecano, significa che nel punto di intersezione si verifica condensazione interstiziale. Si riportano in Figura 3-5 i risultati ottenuti considerando una “parete tipo” nel mese di gennaio.

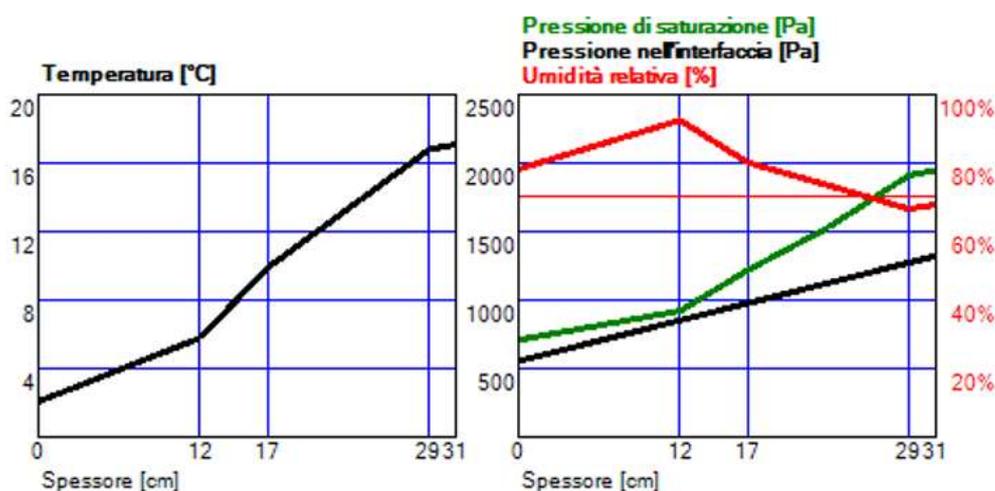


Figura 3-5: Parete tipo – Stato di fatto - Verifica rischio condensa

Le stratigrafie di progetto risultano essere esenti dal fenomeno di condensazione interstiziale. Infatti, in nessun mese si verifica che le due curve si intersechino.

## 4. STRATEGIE DI INTERVENTO INTEGRATE

Come evidenziato dall'analisi del caso studio in esame, il comportamento sia sismico che energetico delle strutture esistenti può scostarsi significativamente da quanto previsto per gli edifici di nuova costruzione. Dal punto di vista sismico, numerosi studi hanno evidenziato come le pratiche edilizie passate abbiano talvolta portato al manifestarsi di danni o collassi per azioni di entità inferiore a quelle considerate in fase di progetto per nuovi edifici. Inoltre, facendo specifico riferimento alle strutture in calcestruzzo, l'interazione tra elementi strutturali e non strutturali può indurre l'attivazione di fenomeni quali il ribaltamento fuori piano dei tamponamenti in muratura (Figura 4-1a), il collasso a taglio dei pilastri (favorito dalle azioni aggiuntive trasferite dai tamponamenti, Figura 4-1b), o l'attivazione di meccanismi di piano debole (causati da distribuzioni irregolari in pianta o in elevazione delle pareti di tamponamento, Figura 4-1c).

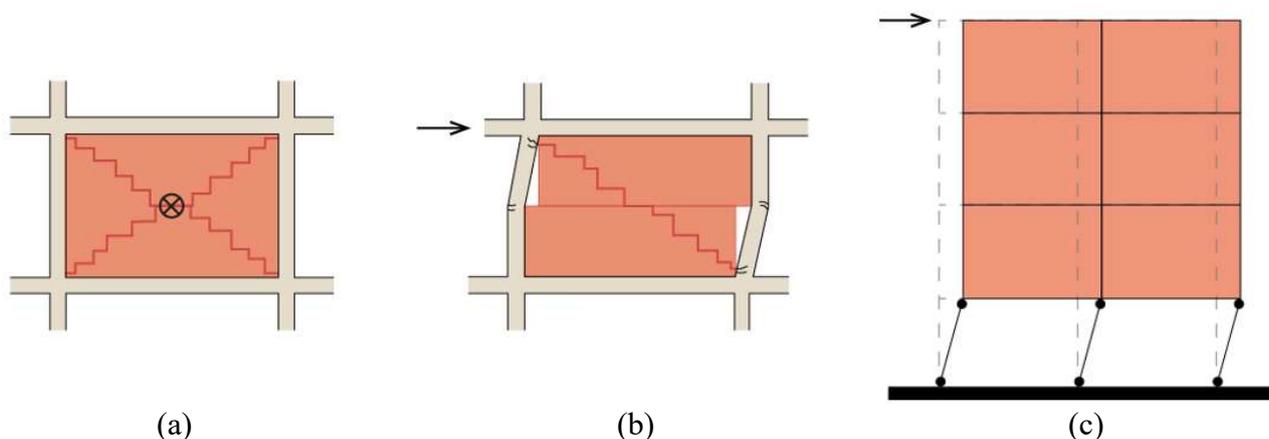


Figura 4-1: *Collassi edifici esistenti – ribaltamento fuori piano dei tamponamenti (a), collasso a taglio dei pilastri (b), meccanismi di piano debole (c)*

Dal punto di vista energetico invece, la maggior parte degli edifici residenziali esistenti dispone di sistemi impiantistici obsoleti, è priva di isolamento termico e presenta numerosi ponti termici. Tali inefficienze influiscono, oltre che sui costi di utilizzo e mantenimento, anche sul comfort e sul benessere degli occupanti. Conseguentemente, l'interesse della comunità scientifica verso lo sviluppo di nuove soluzioni per migliorare il comportamento sismico ed energetico degli edifici esistenti è in continua crescita. Tuttavia, l'utilizzo di strategie di intervento indipendenti volte o a ridurre le vulnerabilità sismiche, o a migliorare le performance energetiche, può comportare sia costi elevati che effetti contrastanti. Il modo più efficiente per affrontare tali problemi è dunque quello di proporre soluzioni di natura integrata al fine di ridurre al minimo tempi di implementazione e costi di lavorazione, evitando che si manifestino conflitti dei processi lavorativi e nella risposta complessiva.

Nel presente studio, si propone di applicare, in corrispondenza delle pareti perimetrali di tamponamento, dei pannelli con ruolo strutturale in Cross Laminated Timber (CLT) opportunamente connessi al sistema strutturale esistente. Tale soluzione mira a migliorare la risposta sismica dei telai in calcestruzzo sia nel piano che fuori piano, riducendo la vulnerabilità sismica dell'edificio ed isolandone l'involucro esterno.

In particolare, sono state sviluppate due tipologie di intervento alternative a differente invasività. La soluzione maggiormente invasiva, denominata RC-TP (*Reinforced Concrete-Timber Panels*) prevede la rimozione del paramento murario esterno (realizzato in mattoni pieni) e la sua sostituzione con un pannello in CLT. Il pannello viene inserito all'interno della maglia del telaio e collegato agli elementi strutturali attraverso un controtelaio ligneo e connettori metallici. La soluzione meno invasiva, RC-TPext (*Reinforced Concrete-external Timber Panels*), prevede invece l'applicazione del pannello in CLT dall'esterno, collegandolo direttamente agli elementi in calcestruzzo senza rimuovere i paramenti murari esistenti. Al fine di evitare che i tamponamenti trasferiscano azioni taglianti sui pilastri, tale soluzione prevede di eseguire dei tagli verticali lungo le pareti di tamponamento. La soluzione RC-TP comporta un maggiore impatto complessivo sull'edificio ma porta ad una riduzione della massa sismica e dello spessore complessivo delle pareti. Inoltre, siccome il pannello strutturale in CLT viene applicato all'interno della maglia dei telai, tale soluzione può fornire un contributo nella resistenza alle azioni verticali in caso di collassi o danneggiamenti negli elementi strutturali esistenti. La soluzione RC-TPext è invece caratterizzata da minori tempi di esecuzione e permette di limitare il disturbo per gli occupanti. Una trattazione approfondita di tali sistemi di intervento è riportata in [16-19].

Per il caso studio in esame, sono state fatte tre ipotesi di intervento ad invasività crescente. Le due soluzioni a minore invasività (Livello 1 e 2) prevedono la stessa soluzione dal punto di vista sismico (RC-TPext) mentre si differenziano dal punto di vista energetico. In particolare, la soluzione di Livello 1 ha l'obiettivo di minimizzare le lavorazioni ed i costi dell'intervento. La soluzione maggiormente invasiva (Livello 3) prevede invece l'utilizzo della soluzione più invasiva (RC-TP) ed è volta a massimizzare le performance sia sismiche che energetiche.

Si specifica che, nelle seguenti sezioni del presente elaborato, nel considerare lo stato di fatto verrà fatto riferimento alla sola "Struttura tamponata", essendo la "Struttura nuda" non rappresentativa del comportamento dell'edificio oggetto d'analisi.

In Figura 4-2 vengono riportati i Livelli di intervento proposti ed i principali risultati ottenuti.

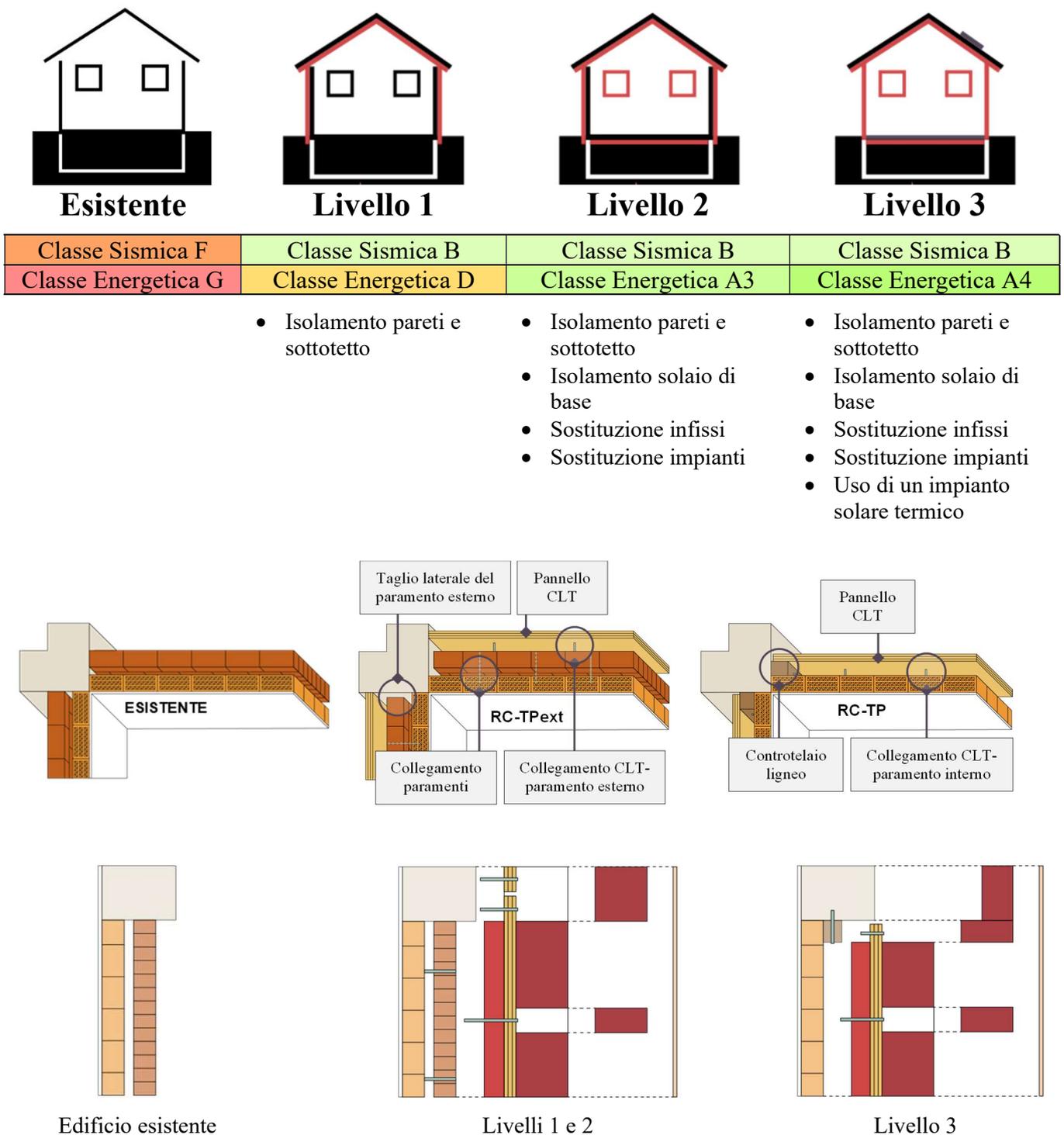


Figura 4-2: Riepilogo dei Livelli di intervento proposti e dei risultati ottenuti

## 4.1. INTERVENTI PRELIMINARI

Considerate le criticità che sono state evidenziate nello stato di fatto nella combinazione SLU, è stato ritenuto necessario, prima di applicare le strategie di intervento proposte, rendere idonei staticamente gli elementi non verificati per i carichi gravitazionali. In particolare, si è previsto di intervenire sulle travi non verificate a flessione identificando una strategia di intervento caratterizzata da:

- ridotta invasività, tale da privilegiare operazioni che possano venir eseguite dall'esterno della costruzione;
- possibilità di rinforzare le travi perimetrali senza che sia richiesta la rimozione parziale o totale dei tamponamenti;
- capacità di raggiungere incrementi di resistenza a flessione superiori all'80%.

Si è dunque scelto di eseguire i rinforzi allo SLU delle travi non verificate mediante incamiciature in acciaio del tipo a cerchiature attive (CAM).

- TRAVI PERIMETRALI

Il rinforzo delle travi perimetrali tramite CAM permette di concentrare i lavori esclusivamente all'esterno dell'edificio, senza intaccare i paramenti murari. L'intervento, realizzato a mezzo di piatti saldati e angolari metallici, assume di conseguenza una configurazione asimmetrica.

È stato scelto l'utilizzo di angolari continui si sezione 40×40×4 mm e di piatti di sezione 40×4 mm.

Il passo dei nastri impiegato è pari a 200 mm, con un doppio avvolgimento di questi ultimi nel caso di ogni cerchiatura. Benché in questo caso non fosse necessario ottenere alcun effetto di confinamento e miglioramento a taglio, è comunque necessaria l'introduzione di un quantitativo minimo di nastri pretesi sia al fine di migliorare l'aderenza degli angolari e dei piatti saldati al supporto, che per permettere al rinforzo a flessione di lavorare in maniera attiva.

In prossimità delle zone di estremità delle travi, agli angolari e ai piatti vengono saldate una o più barre di armatura. Queste servono a garantire la continuità del rinforzo a flessione anche agli appoggi.

Nel caso di trave terminale, la barra viene ancorata al pilastro tramite inghisaggio.

- TRAVI INTERNE

Il rinforzo a flessione nelle zone di estremità delle travi interne è stato eseguito tramite l'inserimento di piatti in acciaio all'estradosso delle travi, la cui continuità nell'appoggio è stata garantita tramite l'impiego di barre saldate sia fatte passare a filo pilastro, sia inghisate in quest'ultimo. Le dimensioni geometriche degli elementi metallici sono quelle adottate per le travi perimetrali.

La cerchiatura delle travi interne è stata eseguita attorno a tutta la sezione resistente, prevedendo la perforazione del solaio per permettere il passaggio dei nastri.

## 4.2. INTERVENTI DI LIVELLO 1

### 4.2.1. APPLICAZIONE SOLUZIONE RC-TPext

Nella prima ipotesi di intervento viene mantenuto il tamponamento esistente, che viene tagliato lateralmente lungo i pilastri in modo tale da impedire che in presenza di azioni orizzontali gli elementi murari trasferiscano azioni di taglio addizionali sui pilastri. Il pannello in CLT viene posto all'esterno della maglia del telaio e fissato alle travi superiore e inferiore. Questa soluzione è caratterizzata da maggiore rapidità esecutiva e minore impatto economico. Attraverso l'applicazione di un pacchetto parzialmente prefabbricato, si ha la possibilità di aumentarne le prestazioni energetiche con un adeguato isolamento, rispondendo alla necessità di limitare i consumi di energia e garantire un maggiore comfort degli ambienti interni. La procedura di intervento, descritta in [19], è riportata in Figura 4-3.

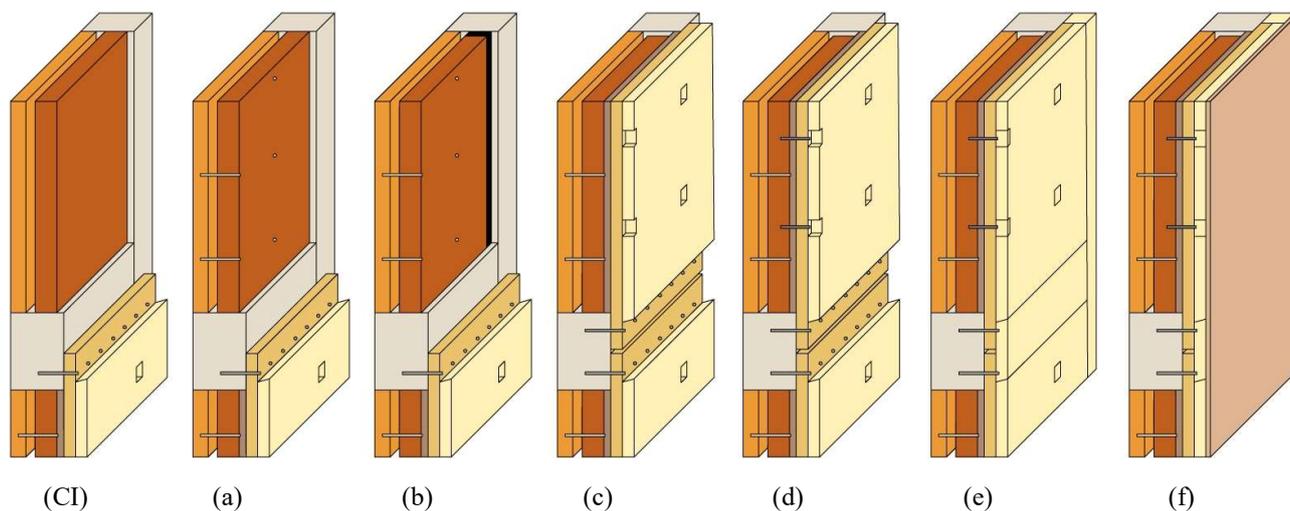


Figura 4-3: Intervento di Livello 1 e 2 (soluzione RC-TPext) - Messa in opera

Facendo riferimento a Figura 4-3, è possibile osservare come, a partire dalla configurazione iniziale (CI) di un generico piano, l'implementazione dell'intervento preveda le seguenti fasi:

- a) Collegamento dei paramenti murari;
- b) Taglio laterale del paramento esterno (evidenziato in nero);
- c) Applicazione del pacchetto prefabbricato comprendente il pannello in CLT e gli strati isolanti, e connessione del pannello al telaio in calcestruzzo;
- d) Collegamento del pannello al paramento murario esterno (tale connessione ha lo scopo di evitare ribaltamenti fuori piano dei tamponamenti);
- e) Applicazione degli strati isolanti sulle aree "scoperte";
- f) Applicazione degli strati di finitura.

Si riporta in Figura 4-4 la rappresentazione degli elementi e delle connessioni strutturali, ed in Figura 4-5 la stratigrafia completa della soluzione proposta.

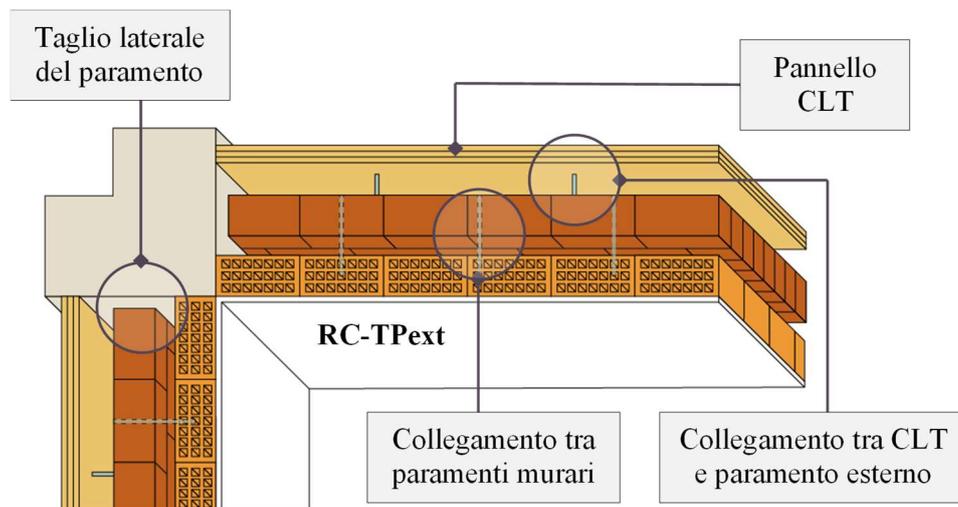


Figura 4-4: RC-TPext – Elementi strutturali e connessioni

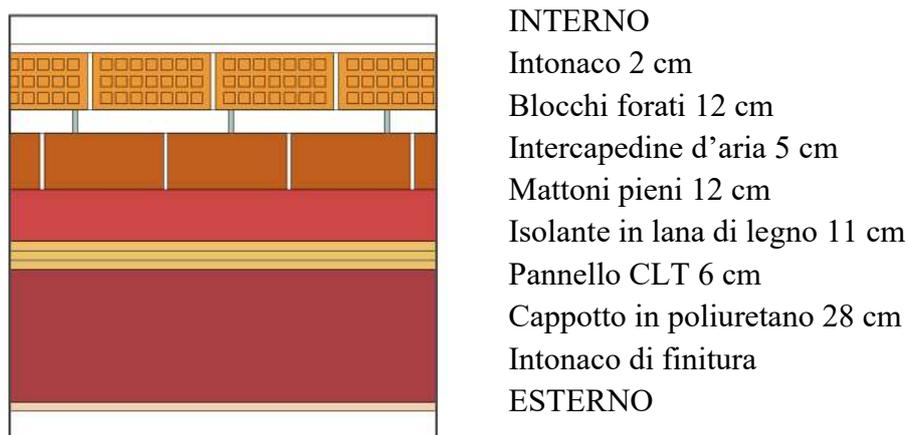
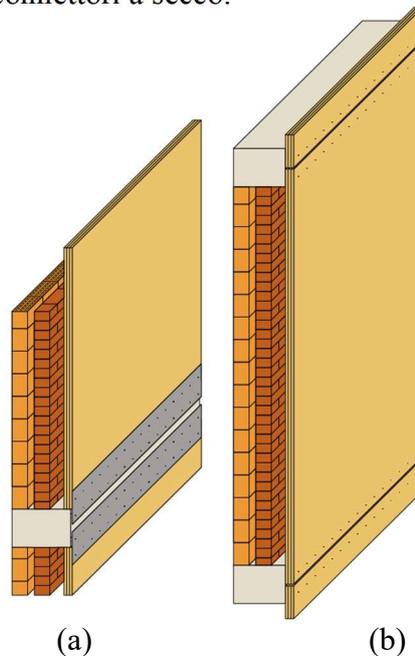


Figura 4-5: RC-TPext – Pacchetto isolante

Le connessioni tra i paramenti murari sono realizzate con barre filettate di diametro  $\Phi 8$ . A causa della presenza di blocchi in laterizio forato, si prevede l'inserimento di una calza e l'iniezione di resine epossidiche. La connessione tra il pannello in CLT e il paramento esterno può invece venire eseguita a secco, utilizzando connettori di diametro  $\Phi 10$ . In entrambi i casi, si prevedono circa 4 connettori per metro quadro.

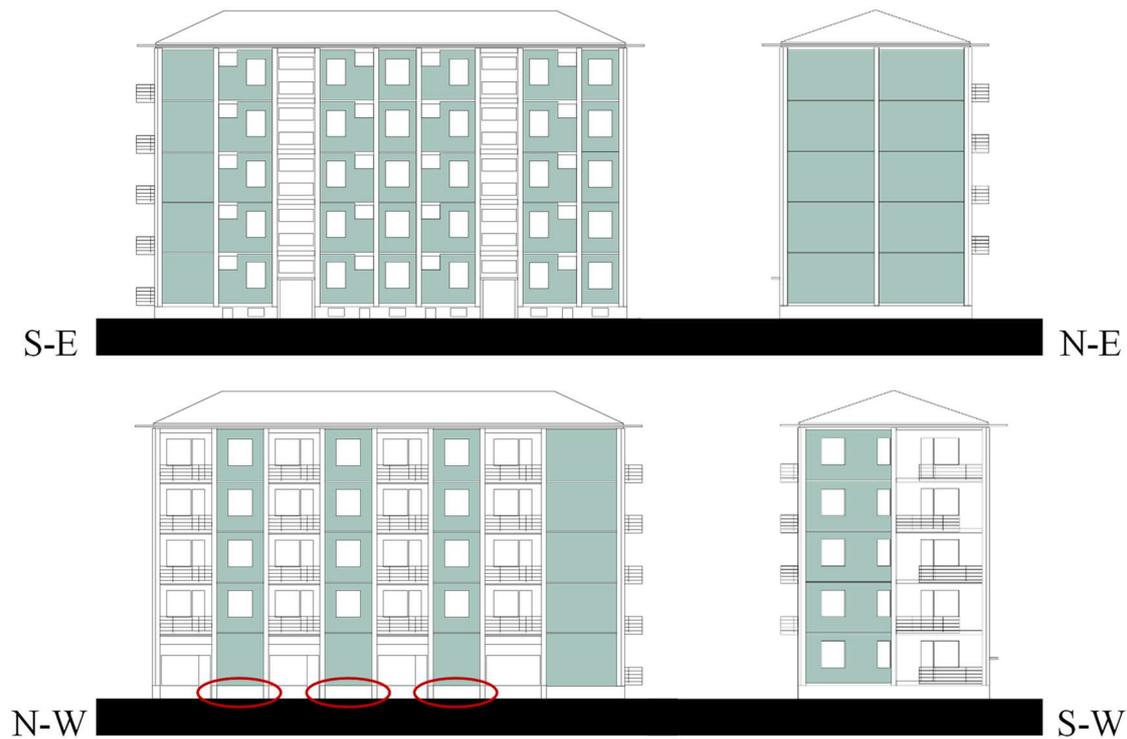
Il pannello viene fissato agli elementi in calcestruzzo tramite connettori metallici certificati per installazioni in zona sismica, con interasse di 20 cm. Sulle maglie che si trovano fra il primo ed il secondo piano è stata prevista una variazione nella connessione (Figura 4-6). In questo caso, infatti, essendo presenti travi di base pari a 45 cm anziché 40 cm come in tutti i piani superiori, l'attacco viene realizzato tramite delle piastre metalliche fissate al pannello mediante connettori legno-acciaio e fissate al calcestruzzo tramite connettori a secco.



*Figura 4-6: Connessioni alternative – primo piano (a), piani superiori (b)*

Al fine di consentire un'adeguata trasmissione dei carichi, la pannellatura va eseguita in maniera continua dalla sommità alla base dell'edificio. Al fine di garantire che le sollecitazioni vengano trasferite dalla struttura esistente al pannello unicamente a mezzo dei connettori, tra i diversi pannelli si impone una spaziatura di 3 cm.

La soluzione proposta è stata applicata in maniera estensiva nella maggior parte delle maglie dell'edificio (evidenziate in Figura 4-7).



*Figura 4-7: Maglie in cui viene applicato l'intervento RC-TPext*

Si fa notare come, al fine di rispettare la continuità dell'intervento dalla base alla sommità dell'edificio, alla base della facciata N-W sia necessario prevedere la chiusura di alcune maglie originariamente adibite a vetrine. Per consentire un corretto collegamento del pannello, si prevede inoltre la realizzazione dei cordoli in calcestruzzo evidenziati in rosso in Figura 4-7.

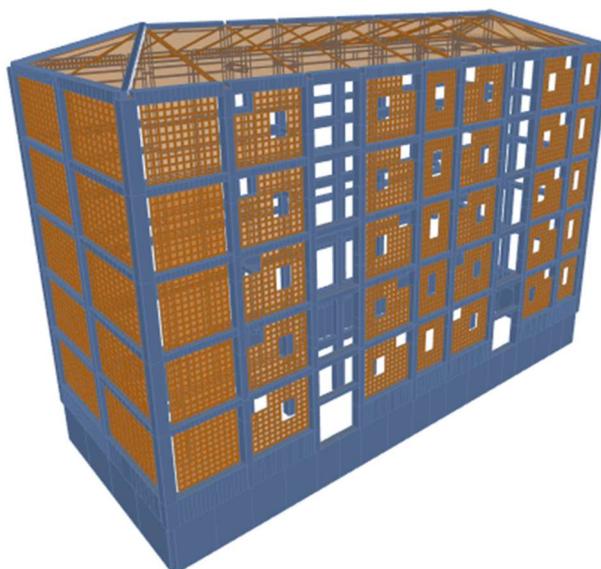
L'intervento RC-TPext non è stato applicato:

- in alcune campate dei telai più esterni della facciata N-W in quanto il tamponamento non è allineato con la maglia strutturale e dunque non può trasferire azioni addizionali;
- in presenza di vincoli geometrici non modificabili (quali i balconi della facciata S-W);
- nei casi in cui l'interazione tra tamponamento e telaio non rappresenta motivo di criticità a causa della presenza di aperture con area superiore al 50% della superficie della maglia.

In tali maglie, si è ipotizzato di intervenire unicamente per impedire il ribaltamento fuori piano dei tamponamenti murari applicando degli Strong-back verticali o orizzontali [20].

#### 4.2.2. RIDUZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA

L'intervento è stato modellato sull'intera struttura tramite l'impiego di un approccio numerico semplificato sviluppato sulle basi delle osservazioni riportate in [16-19]. In particolare, si è scelto di eseguire la connessione CLT-calcestruzzo applicando connettori unicamente lato trave, e adottando una spaziatura costante pari a 20 cm. Si riporta, in Figura 4-8, una rappresentazione grafica del modello numerico utilizzato.



*Figura 4-8: Modello strutturale – Intervento di Livello 1 (RC-TPext)*

I paramenti murari e la valutazione dei relativi effetti locali (taglio addizionale trasferito ai pilastri), sono stati computati impiegando gli stessi accorgimenti e metodi di modellazione utilizzati per la “Struttura tamponata”. Tuttavia, siccome nell'intervento RC-TPext la fodera in mattoni pieni viene tagliata lungo le estremità a contatto con i pilastri, è stato computato unicamente il taglio addizionale trasmesso dal paramento interno.

Si riportano in Tabella 4-1 le caratteristiche dei primi tre modi di vibrare.

*Tabella 4-1: Intervento Livello 1 - Periodi e masse partecipanti dei primi tre modi di vibrare*

<b>Modo</b>	<b>T [s]</b>	<b>Mx [%]</b>	<b>My [%]</b>	<b>Rz [%]</b>
<b>1</b>	0,805	63,8	0,0	0,0
<b>2</b>	0,480	0,0	42,1	0,2
<b>3</b>	0,284	0,0	0,5	50,1

La verifica dei meccanismi fragili e duttili, nonché la verifica dei tamponamenti sono state effettuate come descritto al paragrafo 2.5. Per permettere un agevole confronto con lo stato di fatto, nei prossimi paragrafi si riportano anche i risultati precedentemente ottenuti per la “Struttura tamponata”.

### VERIFICA DEI MECCANISMI DUTTILI

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dalla verifica dei meccanismi duttili (Tabella 4-2). A titolo d’esempio, si riportano anche i risultati ottenuti nell’ipotesi di non rinforzare le travi allo SLU (“Livello 1 No rinforzo SLU”).

*Tabella 4-2: Meccanismi duttili allo SLV – Stato di fatto, Livello 1 senza rinforzo SLU, Livello 1 con rinforzo SLU – numero elementi collassati (n° EC), massimo rapporto Domanda/Capacità (D/C)*

<b>Meccanismi duttili</b>		Travi	Pilastr	Setti
Struttura tamponata	n° EC	27	\	\
	D/C	1,45	0,64	0,37
Livello 1 No rinf. SLU	n° EC	17	\	\
	D/C	1,45	0,55	0,31
Livello 1 Con rinf. SLU	n° EC	2	\	\
	D/C	1,29	0,55	0,31

A seguito degli interventi effettuati, si osserva una significativa riduzione della vulnerabilità sismica legata ai meccanismi duttili di travi, pilastri e setti. Nello specifico, il principale miglioramento è associato alla risposta delle travi. Si passa infatti da 27 travi a collasso nello stato di fatto, a 2 travi nella configurazione post-intervento (Livello 1 con rinforzo SLU). Si osserva inoltre come, considerando la sola applicazione dell’intervento RC-TPext (Livello 1 senza rinforzo SLU), sia comunque possibile osservare un significativo miglioramento nel comportamento globale.

### VERIFICA DEI MECCANISMI FRAGILI

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dalla verifica dei meccanismi fragili (Tabella 4-3). A titolo d’esempio, si riportano anche i risultati ottenuti nell’ipotesi di non rinforzare le travi allo SLU (“Livello 1 No rinforzo SLU”).

Tabella 4-3: Meccanismi fragili allo SLV – Stato di fatto, Livello 1 senza rinforzo SLU, Livello 1 con rinforzo SLU – numero elementi collassati (n° EC), massimo rapporto Domanda/Capacità (D/C)

Meccanismi fragili		Travi	Pilastr	Setti	Nodi
Struttura tamponata	n° EC	\	37	\	\
	D/C	0,59	2,24	0,76	\
Livello 1 No rinf. SLU	n° EC	\	3	\	\
	D/C	0,75	1,07	0,66	\
Livello 1 Con rinf. SLU	n° EC	\	3	\	\
	D/C	0,73	1,07	0,66	\

Per quanto riguarda i meccanismi fragili, l'applicazione dei rinforzi agli SLU non influisce in modo significativo sulla risposta complessiva. Sia considerando sia trascurando i rinforzi agli SLU, si osserva un sostanziale miglioramento legato al collasso a taglio dei pilastri. In primo luogo, tale risultato è dovuto al fatto che la soluzione RC-TPext ha impedito che si verificassero le concentrazioni di sforzo dovute al contatto tra tamponamenti e pilastri osservate nel caso della "Struttura tamponata". In secondo luogo, l'aver previsto una connessione CLT-calcestruzzo realizzata unicamente lungo le travi ha ulteriormente favorito il trasferimento di azioni orizzontali da trave a trave, diminuendo in questo modo il tasso di lavoro dei pilastri. L'intervento ha dunque permesso di passare da 37 pilastri a collasso nello stato di fatto, a 3 elementi nella configurazione post-intervento.

#### VERIFICA DEI TAMPONAMENTI

Tabella 4-4 riporta i collassi associati alle pareti di tamponamento.

Tabella 4-4: Collasso dei tamponamenti allo SLV – Stato di fatto, Livello 1 senza rinforzo SLU, Livello 1 con rinforzo SLU – numero elementi collassati (n° EC), massimo rapporto Domanda/Capacità (D/C)

Collasso tamponamenti		Laterizi forati	Blocchi pieni
Struttura tamponata	n° EC	47	70
	D/C	1,79	3,07
Livello 1 No rinf. SLU	n° EC	34	44
	D/C	1,66	2,77
Livello 1 Con rinf. SLU	n° EC	34	44
	D/C	1,66	2,77

L'applicazione dell'intervento comporta un minor numero di elementi di tamponamento che superano la capacità massima allo SLV. Inoltre, l'aver predisposto sistemi di collegamento trasversale riduce la probabilità che si verificano ribaltamenti fuori piano.

## VERIFICA A RIBALTAMENTO FUORI-PIANO

La verifica a ribaltamento viene effettuata in accordo con le NTC 2018 [1] e relativa Circolare [2] definendo un'azione sismica di progetto gravante ortogonalmente alla singola maglia che tende a ribaltare il sistema di tamponamento verso l'esterno dell'edificio (Figura 4-9a) o verso l'interno (Figura 4-9b). In particolare, gli elementi di tamponamento vengono considerati solo in termini di massa, mentre il pannello in CLT viene verificato per flessione e taglio. Si verifica inoltre la connessione CLT-calcestruzzo per estrazione.

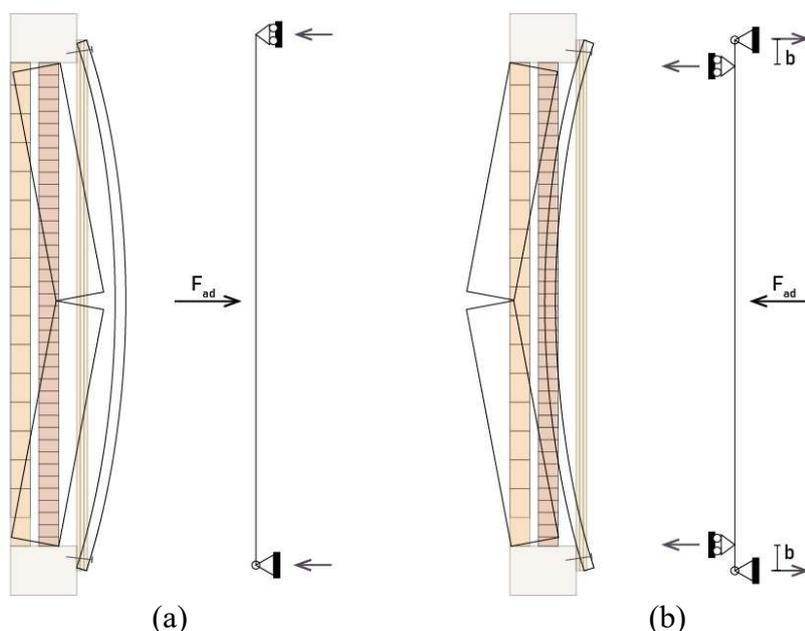


Figura 4-9: RC-TPext - Schemi di ribaltamento fuori-piano

Nelle verifiche riportate, è stata considerata una maglia del telaio collocata all'ultimo piano dell'edificio, dove il pericolo di ribaltamento fuori piano è maggiore (evidenziata in Figura 4-10).

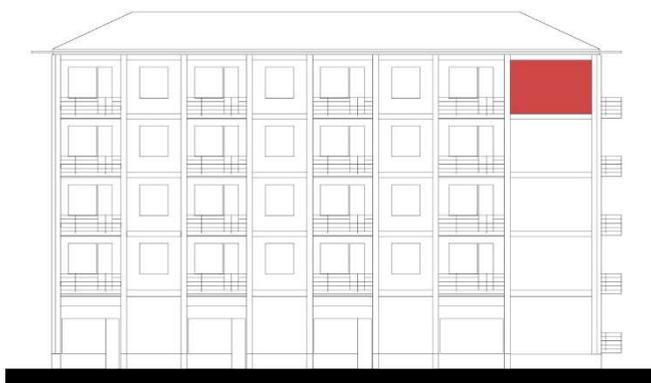


Figura 4-10: Maglia considerata per il calcolo del ribaltamento del sistema di tamponamento post-intervento

Si riportano in Tabella 4-5 i risultati ottenuti dalle seguenti verifiche:

- Flessione pannello CLT  $\rightarrow \sigma_m = \frac{M_y}{W_x} \leq f_{md}$
- Taglio pannello CLT  $\rightarrow \tau_d = \frac{S_x \cdot V_{Ed}}{I_x \cdot L} \leq f_{vd}$
- Estrazione connettori  $\rightarrow F_{ad} = \frac{S_a \cdot W_a}{q_a} \leq \min\{F_{ax,Rd}; N_{Rd}\} * n$

dove:

- $\sigma_m$  è lo sforzo di flessione nel pannello;
- $M_y$  è il momento flessionale di progetto, calcolato secondo lo schema statico di trave su due appoggi con forza concentrata in mezzzeria;
- $W_x$  è il modulo di resistenza della sezione sollecitata;
- $f_{md}$  è la resistenza a flessione di progetto del pannello;
- $\tau_d$  è lo sforzo di taglio nel pannello;
- $S_x$  è il momento statico della sezione;
- $V_{Ed}$  è il taglio di progetto, assumendo lo schema statico di trave su due appoggi, con una forza concentrata in mezzzeria;
- $I_x$  è il momento di inerzia del pannello;
- $L$  è la larghezza del pannello;
- $f_{vd}$  è la resistenza a taglio di progetto;
- $F_{ad}$  è l'azione agente sul singolo connettore;
- $S_a$  è l'accelerazione considerata;
- $W_a$  è il peso dell'elemento;
- $n$  è il numero di connettori usati sulla maglia;
- $q_a$  è il fattore di comportamento dell'elemento;
- $F_{ax,Rd}$  è la resistenza a penetrazione della testa della vite attraverso il pannello;
- $N_{Rd}$  è la resistenza ad estrazione del connettore dal calcestruzzo.

Tabella 4-5: Intervento Livello 1 - Riepilogo risultati verifiche per azioni fuori-piano

Verifica fuori-piano	D/C
Flessione pannello CLT	0,18
Taglio pannello CLT	0,019
Estrazione connettori	0,31

Si osserva come il sistema di tamponamento post-intervento risulti ampiamente verificato per azioni fuori-piano.

### 4.2.3. CLASSE DI RISCHIO SISMICO

La classe di rischio sismico è stata calcolata secondo la procedura illustrata al paragrafo 2.7.

Si riportano in Tabella 4-6 i risultati ottenuti dal calcolo dell'*Indice di sicurezza all'ISV (Classe IS-V)* e dal calcolo della *Perdita Annuale Media attesa PAM (Classe PAM)*. A titolo d'esempio, si riportano anche i risultati ottenuti nell'ipotesi di non rinforzare le travi allo SLU ("Livello 1 No rinforzo SLU").

Tabella 4-6: Calcolo della classe di rischio sismico

Classe di Rischio Sismico	$T_r$ (anni)		Indice IS-V (%)	Classe IS-V	Indice PAM (%)	Classe PAM	Classe Risultante
	Mecc. duttili	Mecc. fragili					
Struttura tamponata	10	23	14	F	8,22	G	G
Livello 1 No rinf. SLU	27	357	38	D	3,26	D	D
Livello 1 Con rinf. SLU	158	357	75	B	0,85	A	B

L'edificio caso studio, a seguito dell'intervento di Livello 1 con rinforzo SLU, ricade nella *Classe di rischio B*, determinata come il minimo tra la *Classe IS-V* e la *Classe PAM*. Si osserva inoltre come il  $T_r$  minimo dipenda fortemente dall'attivazione dei meccanismi duttili. Tale risultato è motivato dal fatto che si è ipotizzato di rinforzare le travi del caso studio in esame unicamente per le azioni desunte dalla combinazione fondamentale allo SLU.

#### 4.2.4. MIGLIORAMENTO DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO

Gli interventi di efficientamento energetico previsti per l'intervento di Livello 1 hanno l'obiettivo di limitare costi, tempi di esecuzione ed impatto complessivo sull'edificio. Inoltre, sono stati progettati per non rendere necessario l'accesso agli ambienti interni.

Si prevede di mantenere i serramenti e i sistemi di oscuramento esistenti, avendo fatto l'ipotesi che essi abbiano delle prestazioni energetiche adeguate, in termini di trasmittanza, rispetto alla normativa vigente.

L'isolamento termico viene pertanto applicato sulle pareti perimetrali e sul sottotetto. Tale operazione non reca alcun disturbo per gli occupanti in quanto il sottotetto non è praticabile.

Poiché viene modificato esclusivamente l'involucro edilizio (in misura maggiore del 25% della superficie lorda totale), senza intervenire sugli impianti, l'intervento di Livello 1 si può classificare come "ristrutturazione importante di secondo livello" secondo il Decreto Requisiti Minimi [21]. Come precedentemente anticipato, gli interventi di Livello 1 e di Livello 2 sono caratterizzati dalla stessa tipologia di intervento a livello di pareti verticali esterne. Siccome l'intervento di Livello 2 interessa più del 50% dell'involucro edilizio e anche gli impianti, ricade nella categoria "ristrutturazione importante di primo livello". Nel presente paragrafo si riportano dunque le analisi riguardanti le pareti esterne, facendo riferimento ai limiti normativi prescritti per le ristrutturazioni importanti sia di primo che di secondo livello.

#### COMPORTAMENTO INVERNALE

La trasmittanza termica stazionaria (indicata con  $U$ ) è una grandezza fisica che misura la quantità di potenza termica scambiata da un materiale o da un corpo per unità di superficie e unità di differenza di temperatura. Questa grandezza esprime cioè quanto calore disperde un certo materiale o una certa stratigrafia, ed è quindi utile per avere un'idea del comportamento dell'involucro edilizio posto in condizioni invernali.

Il DM Requisiti Minimi [21] riporta i requisiti specifici per gli edifici esistenti sottoposti a ristrutturazioni importanti, in base alla zona climatica di riferimento. In particolare, viene posto un limite alla trasmittanza media che devono raggiungere le componenti edilizie (Tabella 4-7 e Tabella 4-8). L'edificio in esame ricade in Zona climatica E.

Tabella 4-7: Trasmittanza termica  $U$  delle strutture opache verticali, verso l'esterno, di ambienti non climatizzati o contro terra

Zona climatica	U (W/m <sup>2</sup> K)	
	2015 <sup>(1)</sup>	2019/2021 <sup>(2)</sup>
A e B	0,45	0,43
C	0,38	0,34
D	0,34	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

Tabella 4-8: Trasmittanza termica  $U$  delle strutture opache verticali, verso l'esterno, soggette a riqualificazione

Zona climatica	U (W/m <sup>2</sup> K)	
	2015 <sup>(1)</sup>	2021 <sup>(2)</sup>
A e B	0,45	0,40
C	0,40	0,36
D	0,36	0,32
E	0,30	0,28
F	0,28	0,26

Per quanto riguarda le pareti del vano scale, il DM riporta: “Nel caso di strutture delimitanti lo spazio riscaldato verso ambienti non climatizzati, si assume come trasmittanza il valore della pertinente tabella diviso per il fattore di correzione dello scambio termico tra ambiente climatizzato e non climatizzato, come indicato nella norma UNI TS 11370-1 in forma tabellare” (Tabella 4-9).

Tabella 4-9: Fattore di correzione  $b_{tr,U}$

Ambiente confinante	$\dot{q}_{r,U}$
<b>Ambiente</b>	
- con una parete esterna	0,4
- senza serramenti esterni e con almeno due pareti esterne	0,5
- con serramenti esterni e con almeno due pareti esterne (per esempio autorimesse)	0,6
- con tre pareti esterne (per esempio vani scala esterni)	0,8
<b>Piano interrato o seminterrato</b>	
- senza finestre o serramenti esterni	0,5
- con finestre o serramenti esterni	0,8
<b>Sottotetto</b>	
- tasso di ventilazione del sottotetto elevato (per esempio tetti ricoperti con tegole o altri materiali di copertura discontinua) senza rivestimento con feltro o assito	1,0
- altro tetto non isolato	0,9
- tetto isolato	0,7
Aree interne di circolazione (senza muri esterni e con tasso di ricambio d'aria minore di 0,5 h <sup>-1</sup> )	0,0
Aree interne di circolazione liberamente ventilate (rapporto tra l'area delle aperture e volume dell'ambiente maggiore di 0,005 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	1,0
Solette sospese (solette sopra vespaio)	0,8
Pavimento o parete controterra	0,45

Per ciascuna delle stratigrafie definite nel progetto è stato verificato che il valore di trasmittanza raggiunto fosse inferiore a quello limite.

Come materiali isolanti sono stati scelti dei pannelli in fibra di legno per l'isolamento delle intercapedini e dei pannelli in poliuretano per il cappotto esterno.

### COMPORAMENTO ESTIVO

Nell'analisi del comportamento estivo, la variabilità dei fattori esterni, quali la radiazione solare, impone una valutazione più complessa rispetto al caso invernale. Infatti, è necessario ricorrere a delle analisi non più in regime stazionario, ma periodico, poiché bisogna tenere conto della variabilità del flusso di calore durante le 24 ore giornaliere. Le modalità di analisi vengono approfondite nella norma UNI EN ISO 13786 [22].

Nel Decreto del 2 aprile 2009 [23] si stabilisce che, per quanto riguarda le pareti opache, il progettista controlli i valori di  $I_{m,s}$  (irradianza media del mese di massima insolazione), e di almeno uno fra i due valori  $M_s$  (massa superficiale esclusi gli intonaci) e  $Y_{ie}$  (trasmittanza termica periodica). I requisiti sono poi stati aggiornati e riportati anche nel Decreto Requisiti Minimi [21].

Questi parametri devono rispettare dei valori limite:

- $I_{m,s} < 290 \text{ W/m}^2$
- $M_s > 230 \text{ kg/m}^2$
- $Y_{ie} < 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$

Inoltre, diversi studi effettuati sul comportamento estivo degli edifici, in particolare il rapporto redatto dall'agenzia ENEA [24] hanno sottolineato l'importanza della capacità termica areica (indicata con  $\chi$ ). Anche questa grandezza è stata recentemente introdotta nelle normative nazionali, in particolare nel Decreto interministeriale dell'11/01/2017 [25], nel quale si impone che negli edifici sottoposti a ristrutturazioni importanti di primo livello venga rispettato il valore limite di capacità termica areica interna periodica  $C_{ip} > 40 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ .

La verifica di questi requisiti è riportata in Figura 4-11 e Figura 4-12.

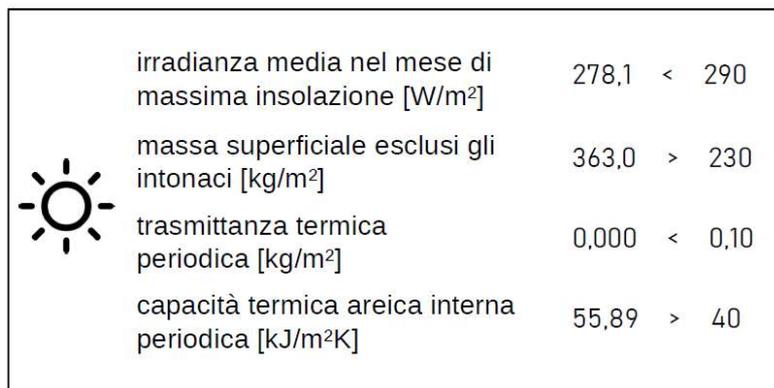
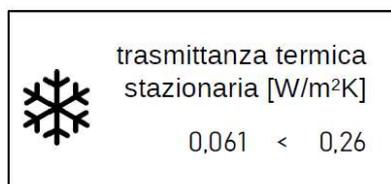
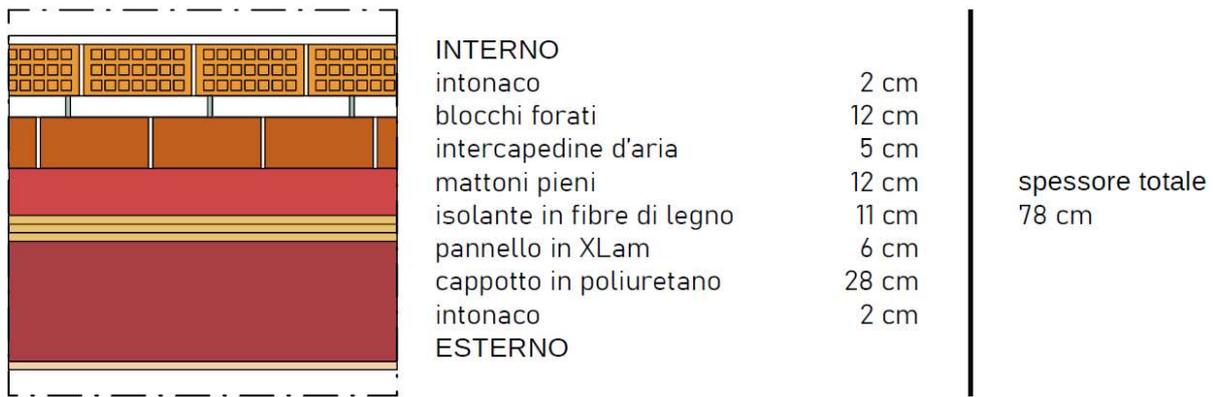


Figura 4-11: Parete con intervento RC-TPext nei casi di Livello 1 e 2 – Valutazione del comportamento invernale ed estivo

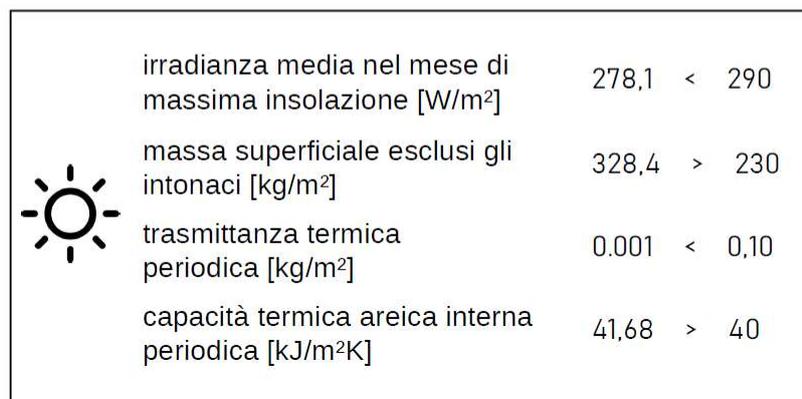
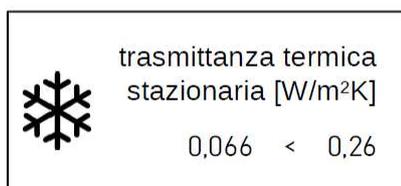
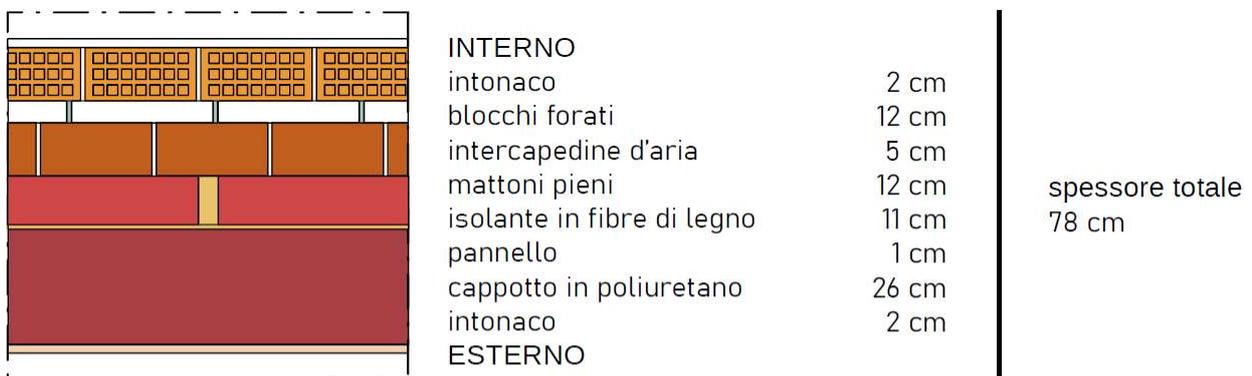


Figura 4-12: Parete con intervento di tipo Strong-back nei casi di Livello 1, 2 e 3 – Valutazione del comportamento invernale ed estivo

## CALCOLO DELLA CLASSE ENERGETICA

Si riporta in Figura 4-13 la schematizzazione dei risultati ottenuti.

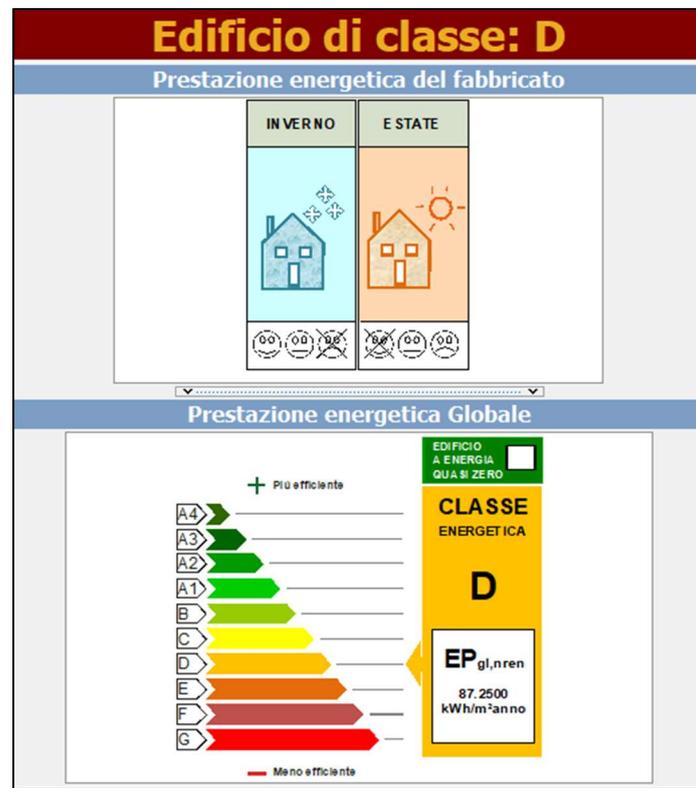


Figura 4-13: Risultati ottenuti dall'analisi energetica dell'intervento di Livello 1 - Software TerMus

Nel caso di interventi di Livello 1 l'appartamento risulta appartenere alla Classe energetica D. In particolare, le prestazioni nella stagione invernale risultano essere le più critiche.

## PONTI TERMICI E RISCHIO MUFFA

I ponti termici possono essere corretti prevedendo un isolamento termico su tutta la parete, senza interruzioni. È necessario quindi verificare che l'isolamento applicato mantenga la temperatura superficiale interna superiore ad un valore minimo accettabile, al di sotto del quale vi è la possibilità che si formi la muffa.

Per la verifica dei ponti termici è stata seguita una procedura analoga a quella descritta al paragrafo 3.2 individuando alcuni ponti termici significativi (Figura 4-14). Per ogni ponte termico, deve essere verificata la relazione  $f_{Rsi} > f_{Rsi,min}=0,73$ , dove  $f_{Rsi}$  è il fattore di temperatura sulla superficie interna calcolato per lo specifico elemento studiato, mentre  $f_{Rsi,min}$  è il fattore di temperatura minimo accettabile. Come condizioni climatiche esterne sono state prese quelle relative al mese di maggiore umidità relativa esterna, vale a dire novembre. Si considera invece una temperatura interna fissata in accordo con le indicazioni nazionali di 20°C.

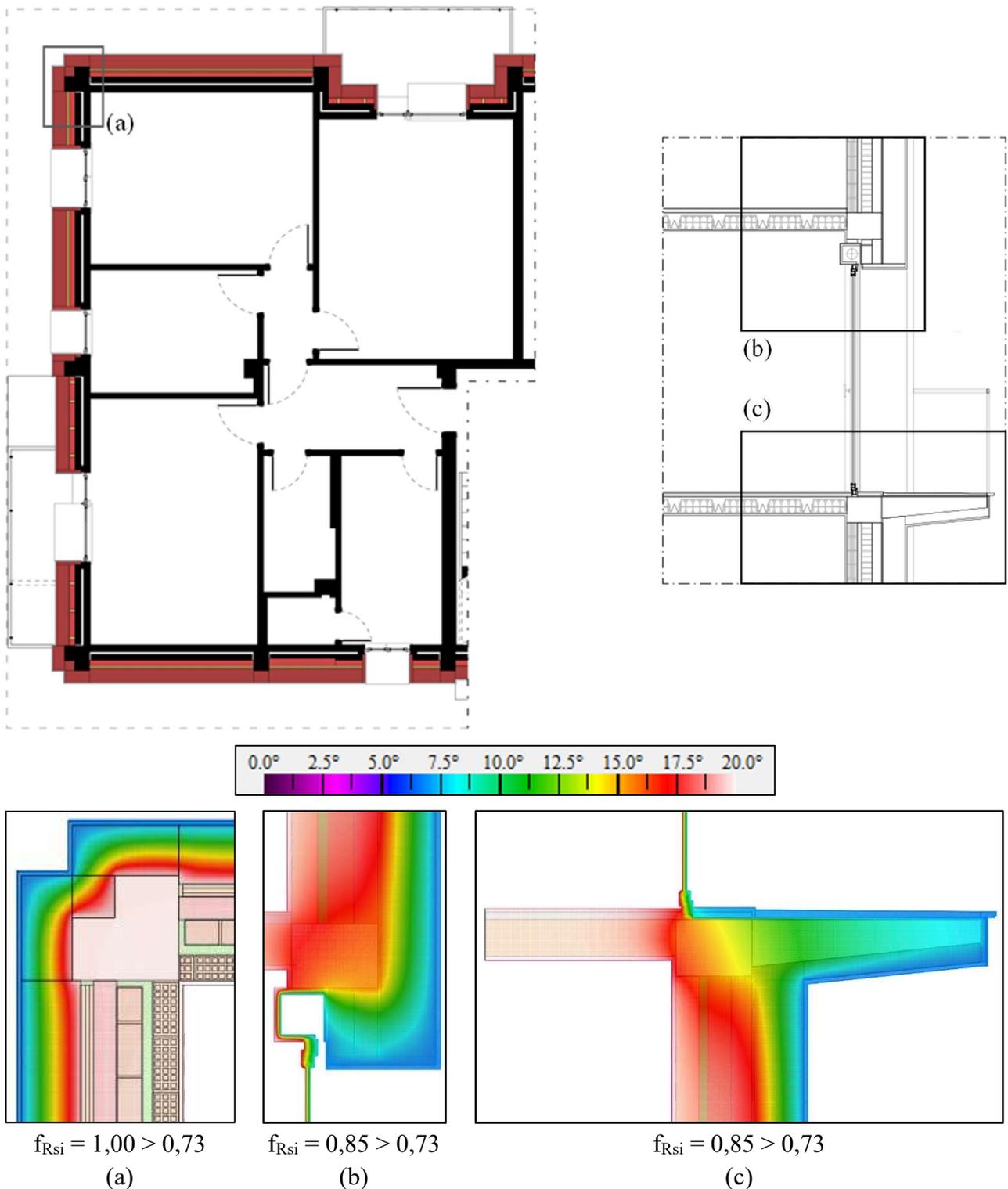


Figura 4-14: Analisi dei ponti termici – Intervento di Livello 1 – Angolo tra pareti verticali (a), collegamento superiore della finestra (b), balcone (c)

Come è possibile osservare, in tutti i casi studiati non vi è il rischio di formazione di muffa in corrispondenza dei ponti termici nel caso di intervento di Livello 1.

CONDENSA INTERSTIZIALE

La verifica di condensa interstiziale è stata eseguita in modo analogo a quanto descritto al paragrafo 3.2. Si riportano in Figura 4-15 i risultati ottenuti considerando una “parete tipo” soggetta all’intervento RC-TPext nel mese di gennaio.

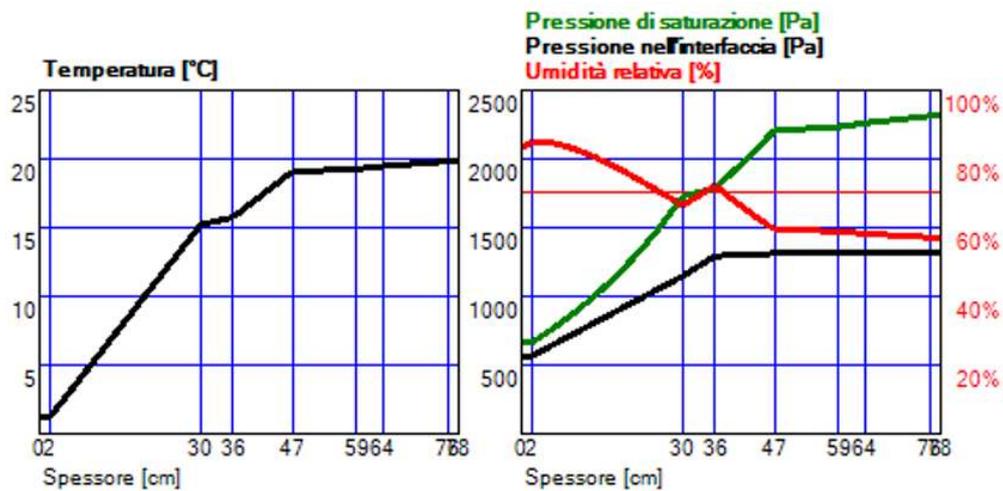


Figura 4-15: Parete tipo – Intervento di Livello 1 – Verifica rischio condensa

Le stratigrafie di progetto risultano essere esenti dal fenomeno di condensazione interstiziale. Infatti, in nessun mese si verifica che le due curve si intersechino.

### 4.3. INTERVENTI DI LIVELLO 2

Nell'ipotesi di Livello 2 vengono eseguite le stesse lavorazioni e gli stessi interventi di riduzione della vulnerabilità sismica descritti nell'ipotesi di Livello 1. Nello specifico, viene mantenuto il paramento murario esistente, che viene tagliato lateralmente lungo i pilastri in modo tale da impedire che in presenza di azioni orizzontali gli elementi murari trasferiscano azioni di taglio addizionali sui pilastri. Il pannello in CLT viene posto all'esterno della maglia del telaio e fissato alle travi superiore e inferiore. Nelle maglie in cui non viene applicato l'intervento RC-TPext, si ricorre all'uso di Strong Backs verticali o orizzontali [20].

La soluzione di Livello 2 si differenzia da quella di Livello 1 dal punto di vista energetico. Oltre all'isolazione del sottotetto e delle pareti verticali, infatti, si prevede l'isolamento del solaio di base e la sostituzione degli infissi.

#### 4.3.1. RIDUZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA

I risultati ottenuti dagli interventi di riduzione di vulnerabilità sismica coincidono con quelli riportati per l'ipotesi di Livello 1. Verranno pertanto riportati in forma tabellare.

Tabella 4-10: Intervento Livello 2 - Periodi e masse partecipanti dei primi tre modi di vibrare

Modo	T [s]	Mx [%]	My [%]	Rz [%]
1	0,805	63,8	0,0	0,0
2	0,480	0,0	42,1	0,2
3	0,284	0,0	0,5	50,1

Tabella 4-11: Meccanismi duttili allo SLV – Stato di fatto, Livello 2 senza rinforzo SLU, Livello 1 con rinforzo SLU – numero elementi collassati (n° EC), massimo rapporto Domanda/Capacità (D/C)

Meccanismi duttili		Travi	Pilastri	Setti
Struttura tamponata	n° EC	27	\	\
	D/C	1,45	0,64	0,37
Livello 2	n° EC	17	\	\
No rinf. SLU	D/C	1,45	0,55	0,31
Livello 2	n° EC	2	\	\
Con rinf. SLU	D/C	1,29	0,55	0,31

Tabella 4-12: Meccanismi fragili allo SLV – Stato di fatto, Livello 2 senza rinforzo SLU, Livello 2 con rinforzo SLU – numero elementi collassati (n° EC), massimo rapporto Domanda/Capacità (D/C)

Meccanismi fragili		Travi	Pilastrini	Setti	Nodi
Struttura tamponata	n° EC	\	37	\	\
	D/C	0,59	2,24	0,76	\
Livello 2	n° EC	\	3	\	\
No rinf. SLU	D/C	0,75	1,07	0,66	\
Livello 2	n° EC	\	3	\	\
Con rinf. SLU	D/C	0,73	1,07	0,66	\

Tabella 4-13: Collasso dei tamponamenti allo SLV – Stato di fatto, Livello 2 senza rinforzo SLU, Livello 2 con rinforzo SLU – numero elementi collassati (n° EC), massimo rapporto Domanda/Capacità (D/C)

Collasso tamponamenti		Laterizi forati	Blocchi pieni
Struttura tamponata	n° EC	47	70
	D/C	1,79	3,07
Livello 2	n° EC	34	44
No rinf. SLU	D/C	1,66	2,77
Livello 2	n° EC	34	44
Con rinf. SLU	D/C	1,66	2,77

Tabella 4-14: Intervento Livello 2 - Riepilogo risultati verifiche per azioni fuori-piano

Verifica fuori-piano	Domanda	Capacità	D/C
Flessione pannello CLT	3,35 MPa	18,31 MPa	0,18
Taglio pannello CLT	0,058 MPa	3,034 MPa	0,019
Estrazione connettori	11,16 kN	36,04 kN	0,31

#### 4.3.2. CLASSE DI RICHIO SISMICO

La classe di rischio sismico è stata calcolata secondo la procedura illustrata al paragrafo 2.7.

Si riportano in Tabella 4-15 i risultati ottenuti dal calcolo dell'Indice di sicurezza all'SLV (Classe IS-V) e dal calcolo della Perdita Annuale Media attesa PAM (Classe PAM). A titolo d'esempio, si riportano anche i risultati ottenuti nell'ipotesi di non rinforzare le travi allo SLU ("Livello 2 No rinforzo SLU").

Tabella 4-15: Calcolo della classe di rischio sismico

Classe di Rischio Sismico	T <sub>r</sub> (anni)		Indice IS-V (%)	Classe IS-V	Indice PAM (%)	Classe PAM	Classe Risultante
	Mecc. duttili	Mecc. fragili					
Struttura tamponata	10	23	14	F	8,22	G	G
Livello 2 No rinf. SLU	27	357	38	D	3,26	D	D
Livello 2 Con rinf. SLU	158	357	75	B	0,85	A	B

L'edificio caso studio, a seguito dell'intervento di Livello 2 con rinforzo SLU, ricade nella Classe di rischio B, determinata come il minimo tra la Classe IS-V e la Classe PAM.

### 4.3.3. MIGLIORAMENTO DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO

Gli interventi di efficientamento energetico previsti per l'intervento di Livello 2 prevedono limitati accessi agli ambienti interni ed hanno l'obiettivo di mantenere contenuti costi, tempi di esecuzione ed impatto complessivo sull'edificio.

Si prevede l'isolamento delle pareti, del sottotetto, del solaio contro terra e del vano scale, essendo quest'ultimo un ambiente non riscaldato. Inoltre, vengono sostituiti i serramenti esistenti ed i sistemi di oscuramento. I serramenti scelti per l'intervento sono composti da un telaio in PVC e da una vetrocamera a triplo vetro con rivestimento basso-emissivo.

Per quanto riguarda gli impianti, viene fatto riferimento al D.Lgs n.28 del 2011 [26]. Nel decreto viene stabilito l'obbligo di integrazione delle fonti rinnovabili negli edifici esistenti sottoposti a ristrutturazioni rilevanti. Più nello specifico, si afferma che, nel caso di edifici nuovi o edifici sottoposti a ristrutturazioni rilevanti, l'energia utile alla produzione di acqua calda sanitaria deve provenire per il 50% da fonti di energia rinnovabile. Inoltre, la somma delle energie necessarie stimate per riscaldamento, raffrescamento e acqua calda sanitaria deve essere coperta per il 50% da un impianto che utilizzi energia rinnovabile. Si è dunque previsto di installare un impianto fotovoltaico sul tetto dell'edificio, con una batteria di accumulo. Tale impianto viene abbinato a una pompa di calore che provveda al riscaldamento e al raffrescamento degli ambienti, e ad un bollitore elettrico per l'acqua calda sanitaria.

Da un predimensionamento dell'impianto fotovoltaico, emerge che la quantità di energia elettrica producibile non sarebbe sufficiente per soddisfare il fabbisogno dei 18 appartamenti presenti nel condominio nelle percentuali richieste. In questo caso il D.Lgs n.28 del 2011 [26] stabilisce che: "L'impossibilità tecnica di ottemperare, in tutto o in parte, agli obblighi di integrazione di cui ai precedenti paragrafi deve essere evidenziata dal progettista nella relazione tecnica di cui all'articolo 4, comma 25, del decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009, n. 59 e dettagliata esaminando la non fattibilità di tutte le diverse opzioni tecnologiche disponibili". Nel caso in cui questa impossibilità venisse accertata, bisognerebbe calcolare l'indice di prestazione energetica dell'edificio  $I$ , e verificare che risulti inferiore all'indice di prestazione energetica complessiva  $I_{192}$  reso obbligatorio ai sensi del decreto legislativo n. 192 del 2005 [27].

Poiché l'intervento, oltre a interessare l'involucro edilizio con un'incidenza superiore al 50% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio, comprende anche la ristrutturazione dell'impianto termico per il servizio di climatizzazione invernale e/o estiva asservito all'intero edificio, può essere classificato come "ristrutturazione importante di primo livello" secondo il Decreto Requisiti Minimi [21].

COMPORAMENTO INVERNALE ED ESTIVO

La valutazione del comportamento invernale ed estivo è stata condotta in accordo a quanto riportato nel paragrafo 4.2.4. La verifica di questi requisiti è riportata da Figura 4-16 a Figura 4-19.

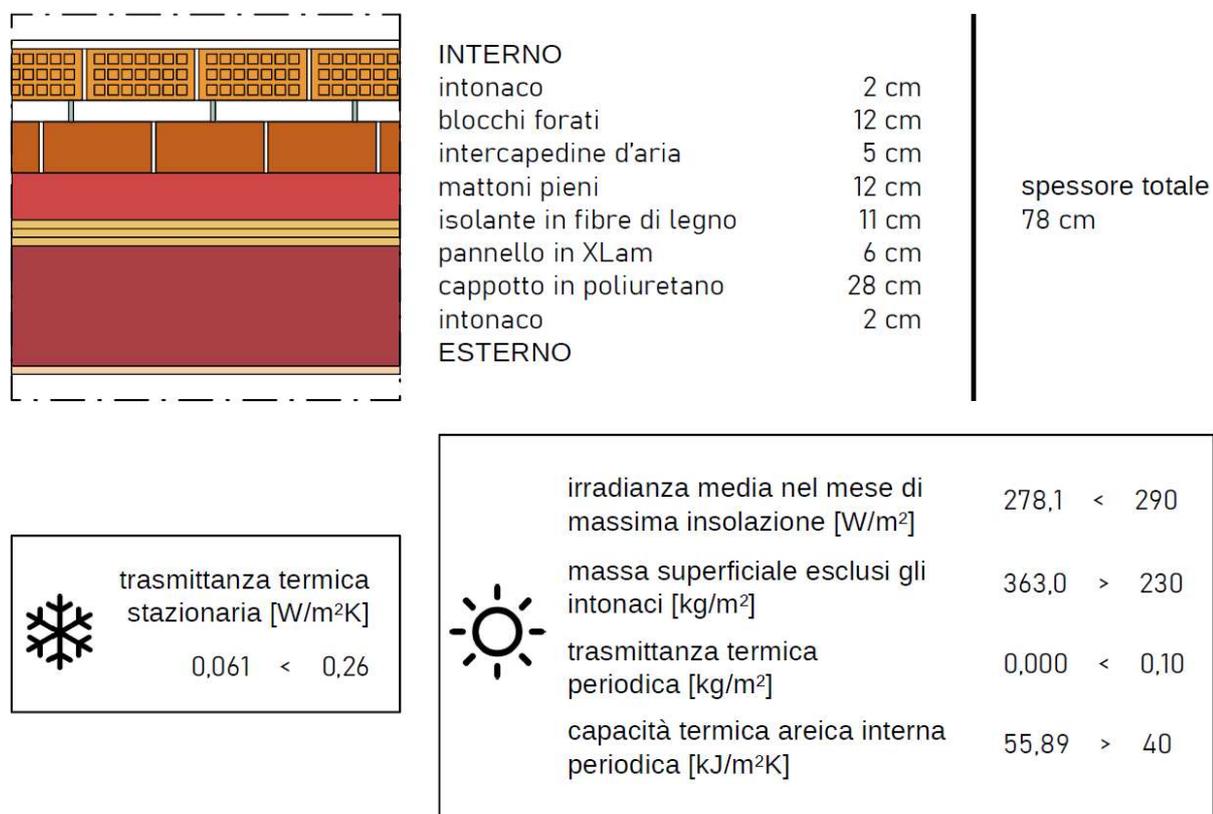


Figura 4-16: Parete con intervento RC-TPext nei casi di Livello 1 e 2 – Valutazione del comportamento invernale ed estivo

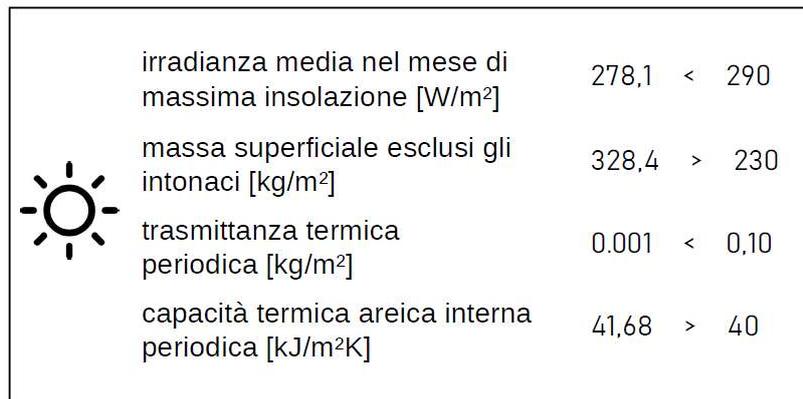
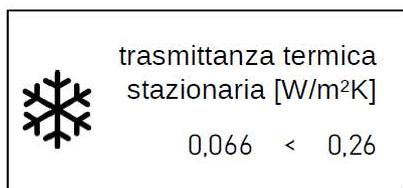
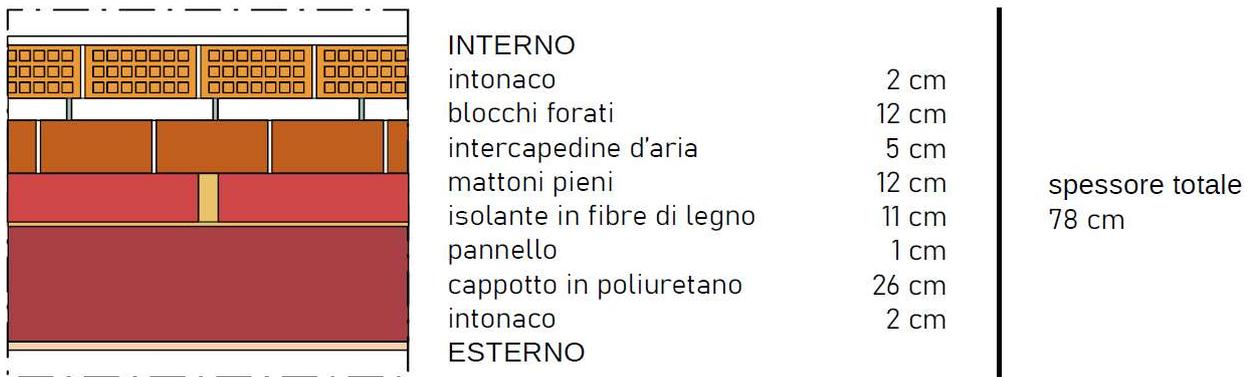


Figura 4-17: Figura 4 9: Parete con intervento di tipo Strong-back nei casi di intervento di Livello 1, 2 e 3 – Valutazione del comportamento invernale ed estivo

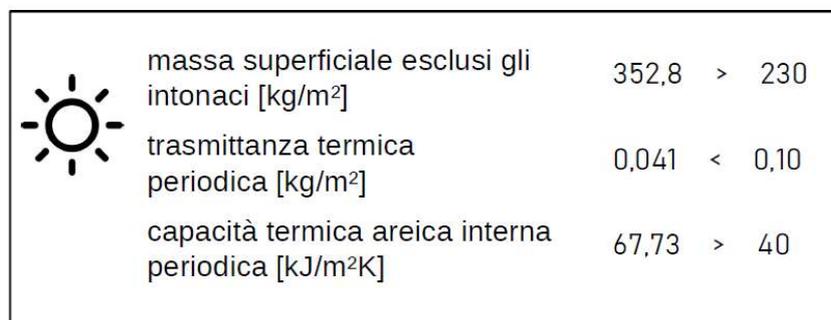
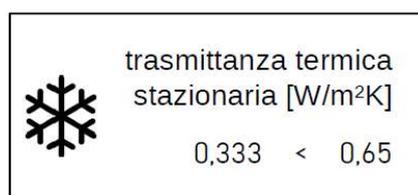


Figura 4-18: Parete vano scale 1 nei casi di intervento di Livello 2 e 3 – Valutazione del comportamento invernale ed estivo

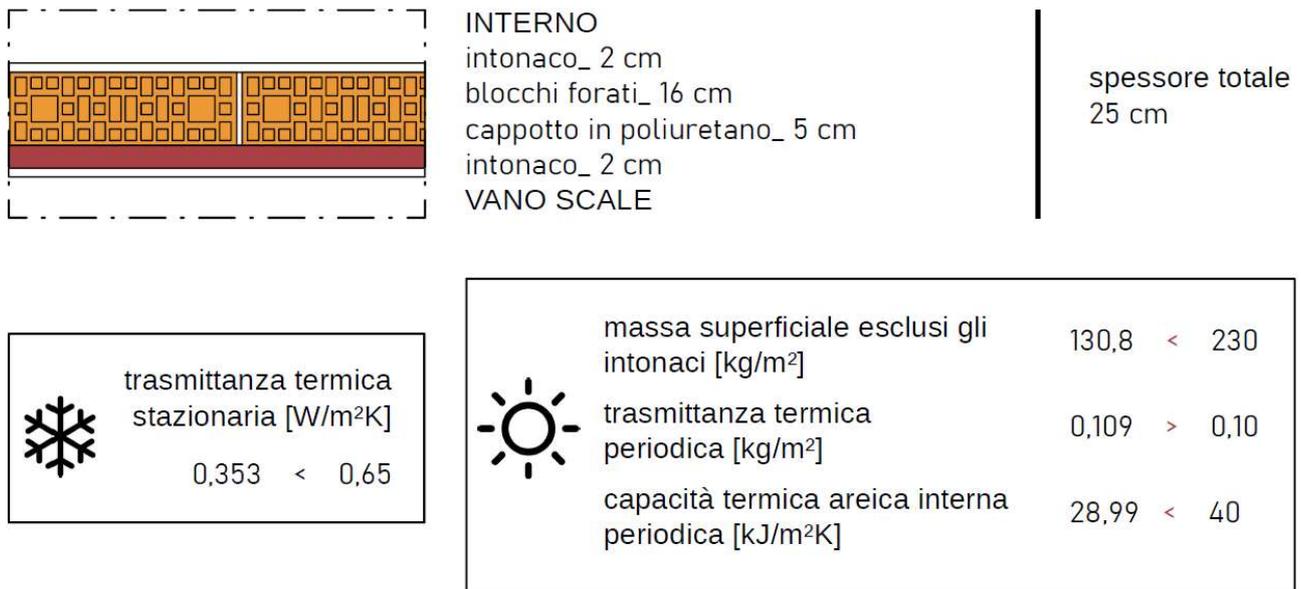


Figura 4-19: Parete vano scale 2 nei casi di intervento di Livello 2 e 3

**CALCOLO DELLA CLASSE ENERGETICA**

Si riporta in Figura 4-20 la schematizzazione dei risultati ottenuti.

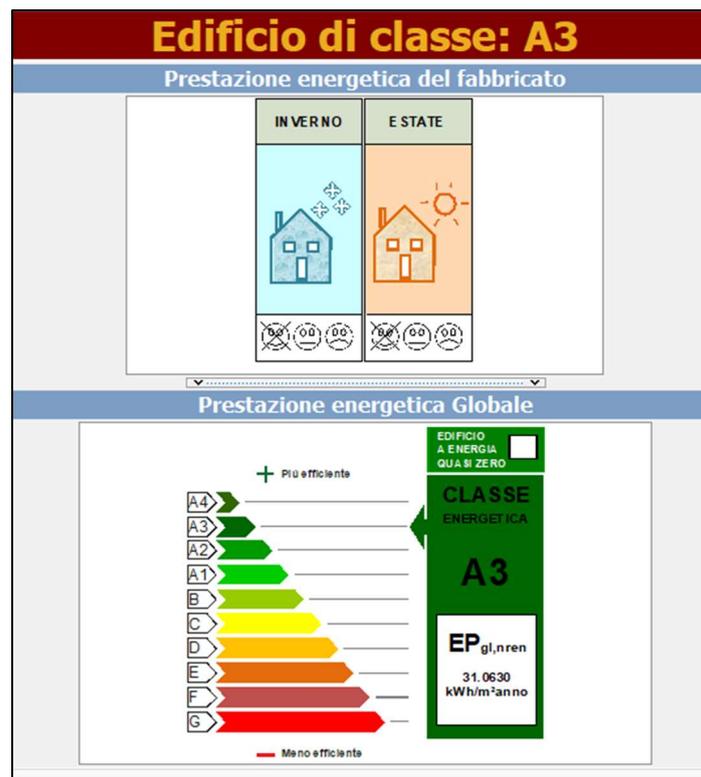


Figura 4-20: Risultati ottenuti dall'analisi energetica dell'intervento di Livello 2 - Software TerMus

Nel caso di interventi di Livello 2 l'appartamento risulta appartenere alla Classe energetica A3.

## PONTI TERMICI E RISCHIO MUFFA

I ponti termici sono stati verificati in accordo con quanto riportato al paragrafo 4.2.4. Si riportano in Figura 4-21 i risultati ottenuti.



Figura 4-21: Analisi dei ponti termici – Intervento di Livello 2 – Angolo tra pareti verticali (a), collegamento superiore della finestra (b), balcone (c)

Come è possibile osservare, in tutti i casi studiati non vi è il rischio di formazione di muffa in corrispondenza dei ponti termici nel caso di intervento di Livello 2.

### CONDENSA INTERSTIZIALE

La verifica di condensa interstiziale è stata eseguita in modo analogo a quanto descritto al paragrafo 3.2. Si riportano in Figura 4-22 i risultati ottenuti considerando una “parete tipo” soggetta all’intervento RC-TPext nel mese di gennaio.

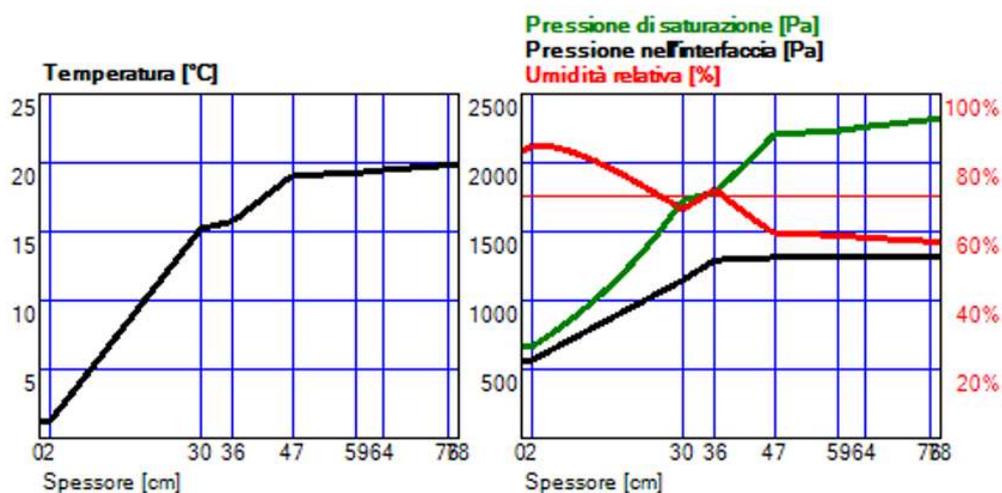


Figura 4-22: Parete tipo – Intervento di Livello 2 – Verifica rischio condensa

Le stratigrafie di progetto risultano essere esenti dal fenomeno di condensazione interstiziale. Infatti, in nessun mese si verifica che le due curve si intersechino.

## 4.4. INTERVENTI DI LIVELLO 3

### 4.4.1. APPLICAZIONE SOLUZIONE RC-TP

Nella terza ipotesi di intervento si suppone di rimuovere il tamponamento in mattoni pieni esistente, mantenendo invece quello più interno realizzato in laterizio forato. Il pannello in CLT viene quindi inserito all'interno della maglia strutturale per mezzo di un controtelaio ligneo, fissato tramite connettori metallici agli elementi in calcestruzzo armato. Tra il pannello in CLT e gli elementi in calcestruzzo viene lasciata una spaziatura di 2 centimetri (gap). Tale *gap* ha il ruolo sia di facilitare l'inserimento del pannello all'interno della maglia, che di fare sì che le sollecitazioni vengano trasferite solo a mezzo delle connessioni e non per contatto diretto. In questo modo, è possibile evitare che durante un'azione sismica il pannello funga da puntone diagonale e trasferisca azioni di taglio addizionale sui pilastri per contatto.

Questa soluzione è caratterizzata da una maggiore invasività ma può portare a dei vantaggi sia dal punto di vista energetico che strutturale. La rimozione di un paramento murario e l'inserimento del pannello in CLT all'interno della maglia di telaio porta infatti ad una complessiva riduzione degli spessori delle componenti strutturali, permettendo di destinare maggiori volumi alla coibentazione. Dal punto di vista sismico, invece, siccome il pannello in CLT viene inserito all'interno della maglia di telaio, può contribuire a resistere alle azioni verticali qualora si verificassero incrementi di carico o danneggiamenti degli elementi in calcestruzzo durante il sisma. Attraverso l'applicazione di un pacchetto parzialmente prefabbricato, è possibile velocizzare l'implementazione dell'intervento. La procedura di intervento, descritta in [19], è riportata in Figura 4-23.

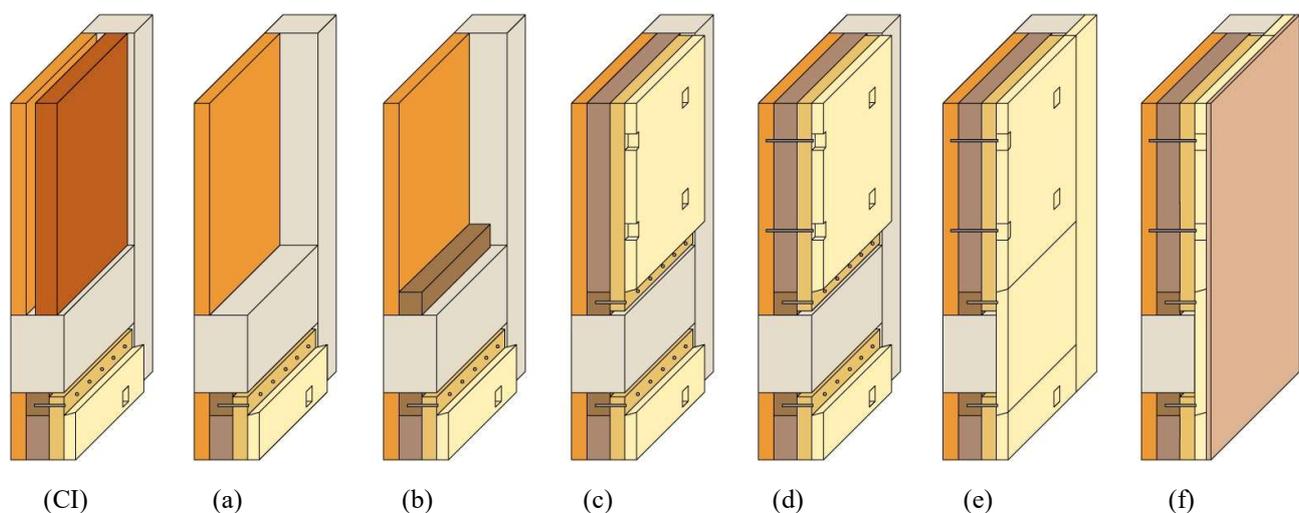


Figura 4-23: Intervento di Livello 3 (soluzione RC-TP) - Messa in opera

Facendo riferimento alla Figura 4-23, è possibile osservare come, a partire dalla configurazione iniziale (CI) di un generico piano, l'implementazione dell'intervento preveda le seguenti fasi:

- a) Rimozione del paramento esterno;
- b) Applicazione del controtelaio ligneo;
- c) Applicazione del pacchetto prefabbricato comprendente il pannello in CLT e gli strati isolanti, e connessione del pannello al controtelaio ligneo;
- d) Collegamento del pannello al paramento murario interno (tale connessione ha lo scopo di evitare ribaltamenti fuori piano del tamponamento);
- e) Applicazione degli strati isolanti sulle aree “scoperte”;
- f) Applicazione degli strati di finitura.

La connessione tra il pannello in CLT e il paramento interno è realizzata con barre filettate di diametro  $\Phi 8$ . A causa della presenza di blocchi in laterizio forato, si prevede l'inserimento di una calza e l'iniezione di resine epossidiche. Si prevedono circa 4 connettori per metro quadro.

Il pannello viene fissato al controtelaio in legno tramite viti a filetto parziale di diametro  $\Phi 10$  con interasse di 10 cm. La connessione tra controtelaio e calcestruzzo viene invece realizzata con connettori a secco o resinati di diametro  $\Phi 12$  certificati per installazioni in zona sismica, con spaziatura costante pari a 15 cm.

Si riporta in Figura 4-24 la rappresentazione degli elementi e delle connessioni strutturali, ed in Figura 4-25 la stratigrafia completa della soluzione proposta.

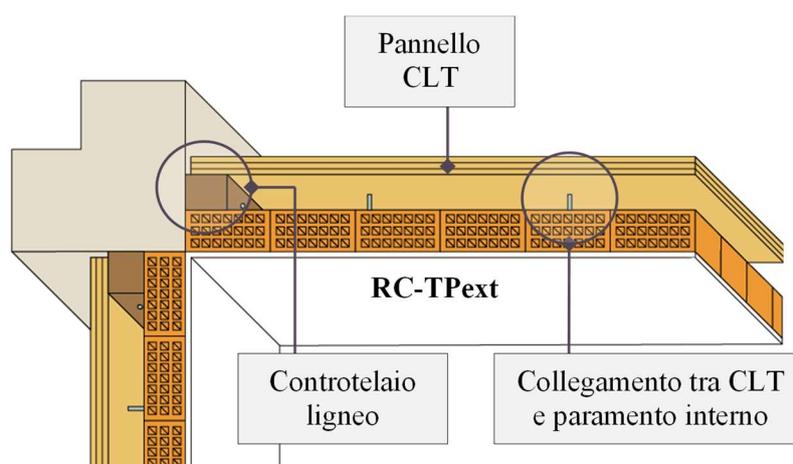


Figura 4-24: RC-TP – Elementi strutturali e connessioni

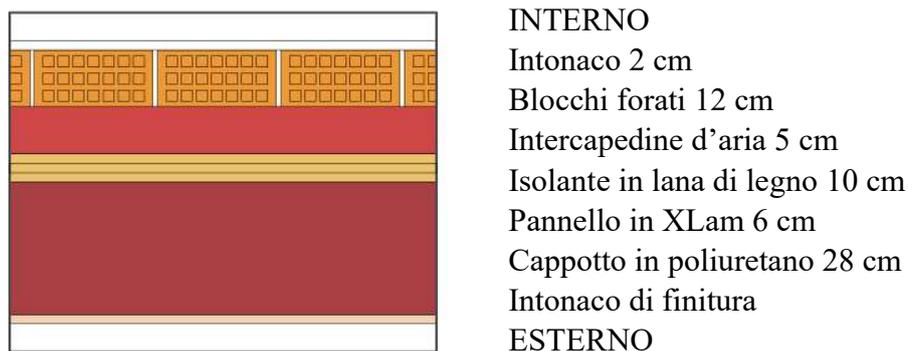


Figura 4-25: RC-TP – Pacchetto isolante

Al fine di consentire un'adeguata trasmissione dei carichi, la pannellatura va eseguita in maniera continua dalla sommità alla base dell'edificio.

La soluzione proposta è stata applicata in maniera estensiva nella maggior parte delle maglie dell'edificio (evidenziate in Figura 4-26).



Figura 4-26: Maglie in cui viene applicato l'intervento RC-TPext

Si fa notare come, analogamente a quanto visto per i Livelli 1 e 2, al fine di rispettare la continuità dell'intervento, alla base della facciata N-W sia necessario prevedere la chiusura di alcune maglie originariamente adibite a vetrine. Per consentire un corretto collegamento del pannello, si prevede la realizzazione dei cordoli in calcestruzzo evidenziati in Figura 4-26. Inoltre, l'intervento RC-TP è stato applicato in corrispondenza dei balconi nella facciata S-W dove, a causa dei vincoli geometrici, non è stato possibile prevedere di applicare l'intervento RC-TPext nelle ipotesi di Livello 1 e 2.

Nelle maglie in cui non è stato applicato l'intervento RC-TP, si è supposto di intervenire unicamente per impedire il ribaltamento fuori piano dei tamponamenti murari applicando degli Strong-back verticali o orizzontali [20].

#### 4.4.2. RIDUZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA

L'intervento è stato modellato sull'intera struttura tramite l'impiego di un approccio numerico semplificato sviluppato sulle basi delle osservazioni riportate in [16-19].

Il paramento murario interno e la valutazione dei relativi effetti locali (taglio addizionale trasferito ai pilastri), sono stati computati impiegando gli stessi accorgimenti e metodi di modellazioni utilizzati per la "Struttura tamponata".

Si riportano in Tabella 4-16 le caratteristiche dei primi tre modi di vibrare.

Tabella 4-16: Intervento Livello 3 - Periodi e masse partecipanti dei primi tre modi di vibrare

Modo	T [s]	Mx [%]	My [%]	Rz [%]
1	0,923	68,3	0,0	0,0
2	0,486	0,0	43,7	6,0
3	0,433	0,0	6,1	47,9

La verifica dei meccanismi fragili e duttili, nonché la verifica dei tamponamenti sono state effettuate come descritto al paragrafo 2.5. Per permettere un agevole confronto con lo stato di fatto, nei prossimi paragrafi si riportano anche i risultati precedentemente ottenuti per la "Struttura tamponata".

#### VERIFICA DEI MECCANISMI DUTTILI

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dalla verifica dei meccanismi duttili (Tabella 4-17). A titolo d'esempio, si riportano anche i risultati ottenuti nell'ipotesi di non rinforzare le travi allo SLU ("Livello 3 No rinforzo SLU").

Tabella 4-17: Meccanismi duttili allo SLV – Stato di fatto, Livello 3 senza rinforzo SLU, Livello 3 con rinforzo SLU – numero elementi collassati (n° EC), massimo rapporto Domanda/Capacità (D/C)

Meccanismi duttili		Travi	Pilastri	Setti
Struttura tamponata	n° EC	27	\	\
	D/C	1,45	0,64	0,37
Livello 3 No rinf. SLU	n° EC	14	\	\
	D/C	1,41	0,61	0,36
Livello 3 Con rinf. SLU	n° EC	3	\	\
	D/C	1,32	0,61	0,36

A seguito degli interventi effettuati, si osserva una significativa riduzione della vulnerabilità sismica legata ai meccanismi duttili di travi, pilastri e setti. Nello specifico, il principale miglioramento è associato alla risposta delle travi. Si passa infatti da 27 travi a collasso nello stato di fatto, a sole 3 travi nella configurazione post-intervento (Livello 3 con rinforzo SLU). Si osserva inoltre come, considerando la sola applicazione dell'intervento RC-TP (Livello 3 senza rinforzo SLU), sia comunque possibile osservare un significativo miglioramento nel comportamento globale.

#### VERIFICA DEI MECCANISMI FRAGILI

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dalla verifica dei meccanismi duttili (Tabella 4-18). A titolo d'esempio, si riportano anche i risultati ottenuti nell'ipotesi di non rinforzare le travi allo SLU ("Livello 3 No rinforzo SLU").

*Tabella 4-18: Meccanismi fragili allo SLV – Stato di fatto, Livello 3 senza rinforzo SLU, Livello 3 con rinforzo SLU – numero elementi collassati (n° EC), massimo rapporto Domanda/Capacità (D/C)*

<b>Meccanismi fragili</b>		Travi	Pilastri	Setti	Nodi
Struttura	n° EC	\	37	\	\
tamponata	D/C	0,59	2,24	0,76	\
Livello 3	n° EC	1	3	\	1
No rinf. SLU	D/C	1,16	1,07	0,74	1,01
Livello 3	n° EC	\	3	\	1
Con rinf. SLU	D/C	0,73	1,07	0,74	1,01

Sia considerando sia trascurando i rinforzi agli SLU, si osserva un sostanziale miglioramento legato al collasso a taglio dei pilastri. La rimozione dei tamponamenti esterni in mattoni pieni, nella soluzione RC-TP, ha impedito che si verificassero le concentrazioni di sforzo dovute al contatto tra tamponamenti e pilastri osservate nel caso di "Struttura tamponata". Inoltre, l'aver previsto una connessione tra pannello e calcestruzzo realizzata unicamente lungo le travi ha ulteriormente favorito il trasferimento di azioni orizzontali da trave a trave, diminuendo in questo modo il tasso di lavoro dei pilastri. L'intervento ha dunque permesso di passare da 37 pilastri a collasso nello stato di fatto, a 3 elementi nella configurazione post-intervento. Si fa inoltre notare come, a differenza di quanto osservato nella "Struttura tamponata" dove tutti i nodi sono risultati verificati, nel caso di intervento RC-TP si sia osservato il collasso di un nodo trave-pilastro. Tale collasso è tuttavia stato registrato unicamente "lato trazione" mentre si è ottenuta una complessiva riduzione del tasso di lavoro dei nodi "lato compressione". Inoltre, nel caso di intervento di Livello 3 in cui si suppone di non intervenire sulle travi allo SLU, si osserva il raggiungimento della condizione ultima per una trave. Si ricorda tuttavia che tale ipotesi (Livello 3 senza rinforzo SLU) viene riportata unicamente a titolo d'esempio.

VERIFICA DEI TAMPONAMENTI

Tabella 4-19 riporta i collassi associati alle pareti di tamponamento.

*Tabella 4-19: Collasso dei tamponamenti allo SLV – Stato di fatto, Livello 3 senza rinforzo SLU, Livello 3 con rinforzo SLU – numero elementi collassati (n° EC), massimo rapporto Domanda/Capacità (D/C)*

<b>Collasso tamponamenti</b>		Laterizi forati	Blocchi pieni
Struttura tamponata	n° EC	47	70
	D/C	1,79	3,07
Livello 3 No rinf. SLU	n° EC	49	/
	D/C	2,00	/
Livello 3 Con rinf. SLU	n° EC	49	/
	D/C	2,00	/

L'applicazione dell'intervento comporta un minor numero di elementi di tamponamento che superano la capacità massima allo SLV. Inoltre, l'aver predisposto sistemi di collegamento trasversale riduce la probabilità che si verifichino ribaltamenti fuori piano.

VERIFICA A RIBALTAMENTO FUORI-PIANO

La verifica a ribaltamento viene effettuata in accordo con le NTC 2018 [1] e relativa Circolare [2] definendo un'azione sismica di progetto gravante ortogonalmente alla singola maglia che tende a ribaltare il sistema di tamponamento verso l'esterno dell'edificio (Figura 4-27a) o verso l'interno (Figura 4-27b). In particolare, gli elementi di tamponamento vengono considerati solo in termini di massa, mentre il pannello in CLT viene verificato per flessione e taglio. Si verifica inoltre la connessione CLT-controtelaio per estrazione e la connessione controtelaio-calcestruzzo per taglio.

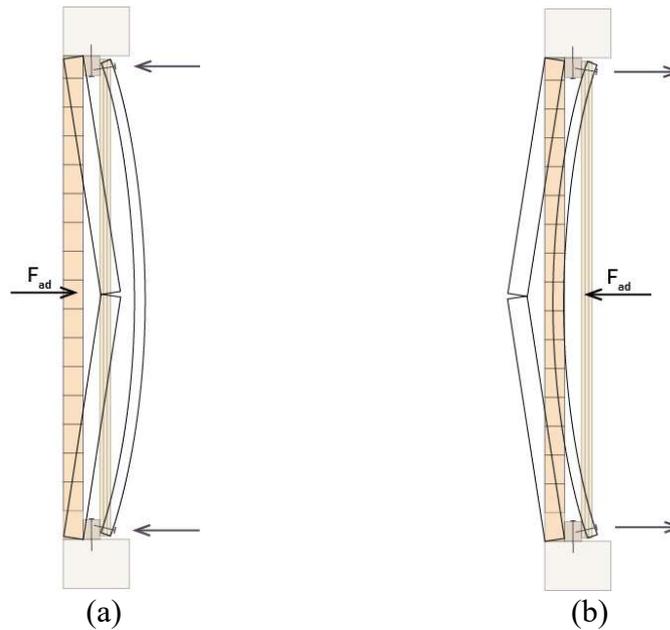


Figura 4-27: RC-TP - Schemi di ribaltamento fuori-piano

Si riportano di seguito i risultati ottenuti per una maglia del telaio collocata all'ultimo piano dell'edificio, dove il pericolo di ribaltamento fuori piano è maggiore (evidenziata in Figura 4-28).

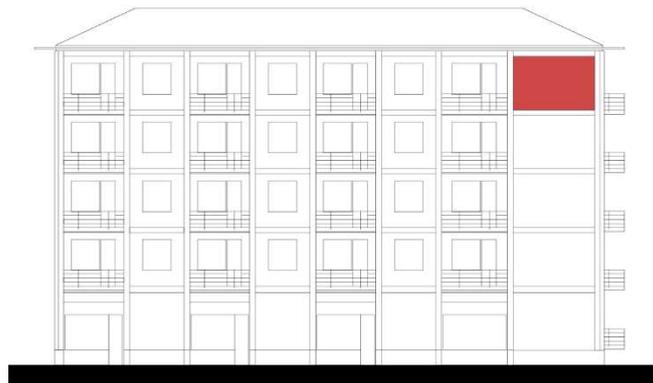


Figura 4-28: Maglia considerata per il calcolo del ribaltamento del sistema di tamponamento post-intervento

Si riportano in Tabella 4-20 i risultati ottenuti dalle seguenti verifiche:

- Flessione pannello CLT  $\rightarrow \sigma_{md} = \frac{M_y}{W_x} \leq f_{md}$
- Taglio pannello CLT  $\rightarrow \tau_d = \frac{S_x \cdot V_{Ed}}{I_x \cdot L} \leq f_{vd}$
- Estrazione connettori  $\rightarrow F_{ad} = \frac{S_a \cdot W_a}{q_a} \leq \min\{F_{ax,Rd}; N_{Rd}\} * n_{estr}$
- Taglio connettori  $\rightarrow F_{ad} = \frac{S_a \cdot W_a}{q_a} \leq F_{V,Rd} * n_{taglio}$

dove:

- $\sigma_{md}$  è lo sforzo di flessione nel pannello;

- $M_y$  è il momento flessionale di progetto, calcolato secondo lo schema statico di trave su due appoggi con forza concentrata in mezzzeria;
- $W_x$  è il modulo di resistenza della sezione sollecitata;
- $f_{md}$  è la resistenza a flessione di progetto del pannello;
- $\tau_d$  è lo sforzo di taglio nel pannello;
- $S_x$  è il momento statico della sezione;
- $V_{Ed}$  è il taglio di progetto, assumendo lo schema statico di trave su due appoggi, con una forza concentrata in mezzzeria;
- $I_x$  è il momento di inerzia del pannello;
- $L$  è la larghezza del pannello;
- $f_{vd}$  è la resistenza a taglio di progetto;
- $F_{ad}$  è l'azione agente sul singolo connettore;
- $S_a$  è l'accelerazione considerata;
- $W_a$  è il peso dell'elemento;
- $n_{estr}$  è il numero di connettori sollecitati ad estrazione;
- $n_{taglio}$  è il numero di connettori sollecitati a taglio;
- $q_a$  è il fattore di comportamento dell'elemento;
- $F_{ax,Rd}$  è la resistenza a penetrazione della testa della vite attraverso il pannello;
- $F_{V,Rd}$  è la resistenza a taglio calcolata secondo le indicazioni dell'Eurocodice 5 [28];
- $N_{Rd}$  è la resistenza ad estrazione del connettore dal calcestruzzo.

Tabella 4-20: RC-TP - Riepilogo risultati verifiche per azioni fuori-piano

Verifica fuori-piano	D/C
Flessione pannello CLT	0,18
Taglio pannello CLT	0,019
Taglio connettori	0,0075
Estrazione connettori	0,13

Si osserva come il sistema di tamponamento post-intervento risulti ampiamente verificato per azioni fuori-piano.

#### VERIFICA PER INCREMENTO CARICHI VERTICALI

L'ipotesi di intervento di Livello 3 prevede che il pannello venga collocato all'interno della maglia strutturale. Pertanto, è in grado di offrire un contributo in termini di resistenza qualora dovesse verificarsi il collasso o il danneggiamento degli elementi strutturali in calcestruzzo. Il pannello viene

verificato per compressione ed instabilità secondo lo schema di Figura 4-29a seguendo le indicazioni riportate in [29]. Al fine di considerare la situazione più gravosa, è stata considerata una maglia geometricamente analoga a quella considerata nelle precedenti analisi, ma localizzata alla base dell'edificio (Figura 4-29b).

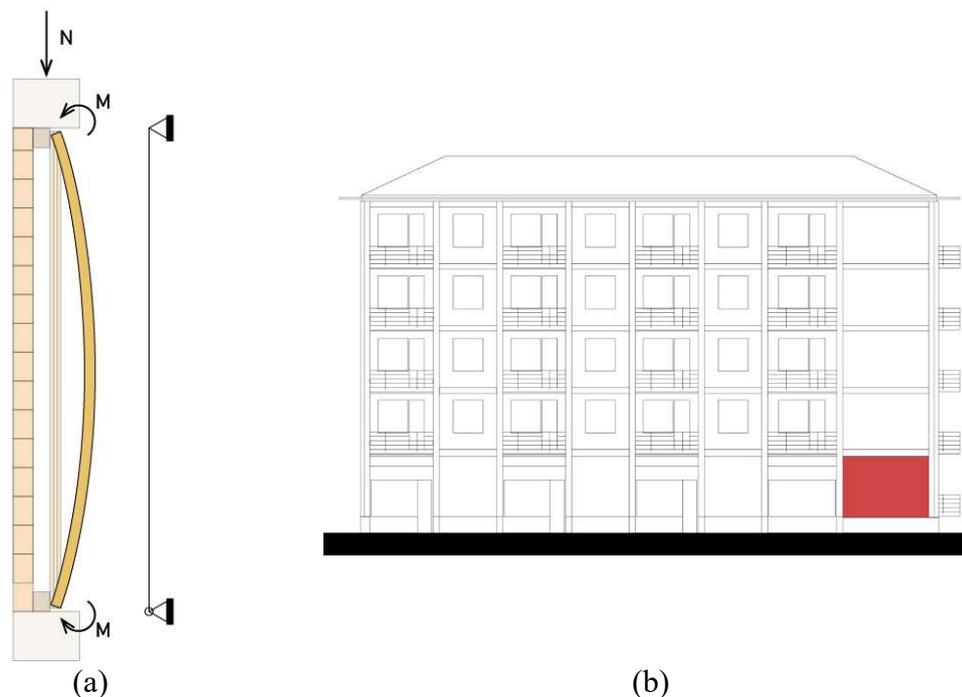


Figura 4-29: RC-TP – Verifica per carichi verticali – Schema adottato (a), maglia considerata (b)

Le verifiche vengono svolte facendo tre ipotesi distinte:

- collasso della trave superiore;
- collasso della trave e di un pilastro;
- collasso della trave e di entrambi i pilastri.

In ciascuno di questi casi, si suppone che il carico agente sugli elementi a collasso venga trasferito al pannello.

Si riportano in Tabella 4-20 i risultati ottenuti dalle seguenti verifiche:

- Compressione parallela alla fibratura del pannello CLT  $\rightarrow \sigma_{c,d} \leq f_{c,0d}$
- Instabilità del pannello CLT  $\rightarrow \frac{\sigma_{c,d}}{k_{c,y} \cdot f_{c,0d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{md}} \leq 1$

dove:

- $\sigma_{c,d}$  è lo sforzo di compressione nel pannello;
- $\sigma_m$  è lo sforzo di flessione nel pannello;
- $f_{c,0d}$  è la resistenza a compressione di progetto del pannello;
- $f_{md}$  è la resistenza a flessione di progetto del pannello;

- $k_{c,y}$  è un fattore di riduzione della resistenza, che consente di tenere conto degli effetti non lineari del secondo ordine.

Tabella 4-21: RC-TP - Riepilogo risultati verifiche per azioni verticali

Ipotesi di carico	D/C
Collasso trave	0,12
Collasso trave + un pilastro	0,82
Collasso trave + entrambi i pilastri	1,53

Come si osserva, nell'ipotesi di carico più gravosa (collasso della trave e di entrambi i pilastri), il sistema di intervento non risulta essere in grado di sopportare la totalità dei carichi verticali agenti. Nell'ottica di incrementare la sicurezza verso azioni verticali addizionali, è consigliabile prevedere pannelli in CLT di spessore maggiore alla base dell'edificio.

#### 4.4.3. CLASSE DI RISCHIO SISMICO

La classe di rischio sismico è stata calcolata secondo la procedura illustrata al paragrafo 2.7.

Si riportano in Tabella 4-22 i risultati ottenuti dal calcolo dell'*Indice di sicurezza all'SLV (Classe IS-V)* e dal calcolo della *Perdita Annuale Media attesa PAM (Classe PAM)*. A titolo d'esempio, si riportano anche i risultati ottenuti nell'ipotesi di non rinforzare le travi allo SLU ("Livello 3 No rinforzo SLU").

Tabella 4-22: Calcolo della classe di rischio sismico

Classe di Rischio Sismico	$T_r$ (anni)		Indice IS-V (%)	Classe IS-V	Indice PAM (%)	Classe PAM	Classe Risultante
	Mecc. duttili	Mecc. fragili					
Struttura tamponata	10	23	14	F	8,22	G	G
Livello 3 No rinf. SLU	47	316	51	C	2,02	C	C
Livello 3 Con rinf. SLU	158	357	75	B	0,85	A	B

L'edificio caso studio, a seguito dell'intervento di Livello 3 con rinforzo SLU, ricade nella *Classe di rischio B*, determinata come il minimo tra la *Classe IS-V* e la *Classe PAM*. Si osserva inoltre come il  $T_r$  minimo dipenda fortemente dall'attivazione dei meccanismi duttili. Tale risultato è motivato dal fatto che si è ipotizzato di rinforzare le travi del caso studio in esame unicamente per le azioni desunte dalla combinazione fondamentale allo SLU.

#### **4.4.4. MIGLIORAMENTO DEL COMPORTAMENTO ENERGETICO**

Gli interventi di efficientamento energetico previsti per l'intervento di Livello 3 hanno l'obiettivo di massimizzare le prestazioni dell'edificio.

Analogamente a quanto descritto per il Livello 2, si prevede l'isolamento delle pareti, del sottotetto, del solaio contro terra e del vano scale, essendo quest'ultimo un ambiente non riscaldato. Inoltre, vengono sostituiti i serramenti esistenti ed i sistemi di oscuramento. I serramenti scelti per l'intervento sono composti da un telaio in PVC e da una vetrocamera a triplo vetro con rivestimento basso-emissivo. Anche a livello impiantistico, valgono le stesse considerazioni riportate per l'intervento di Livello 2. Oltre all'utilizzo di una pompa di calore, di un bollitore e di un impianto fotovoltaico, nell'intervento di Livello 3 si prevede l'impiego di un impianto solare termico.

Poiché l'intervento, oltre a interessare l'involucro edilizio con un'incidenza superiore al 50% della superficie disperdente lorda complessiva dell'edificio, comprende anche la ristrutturazione dell'impianto termico per il servizio di climatizzazione invernale e/o estiva asservito all'intero edificio, può essere classificato come "ristrutturazione importante di primo livello" secondo il Decreto Requisiti Minimi [21].

#### COMPORTAMENTO INVERNALE ED ESTIVO

La valutazione del comportamento invernale ed estivo è stata condotta in accordo a quanto riportato nel paragrafo 4.2.4. La verifica di questi requisiti è riportata da Figura 4-30 a Figura 4-33.

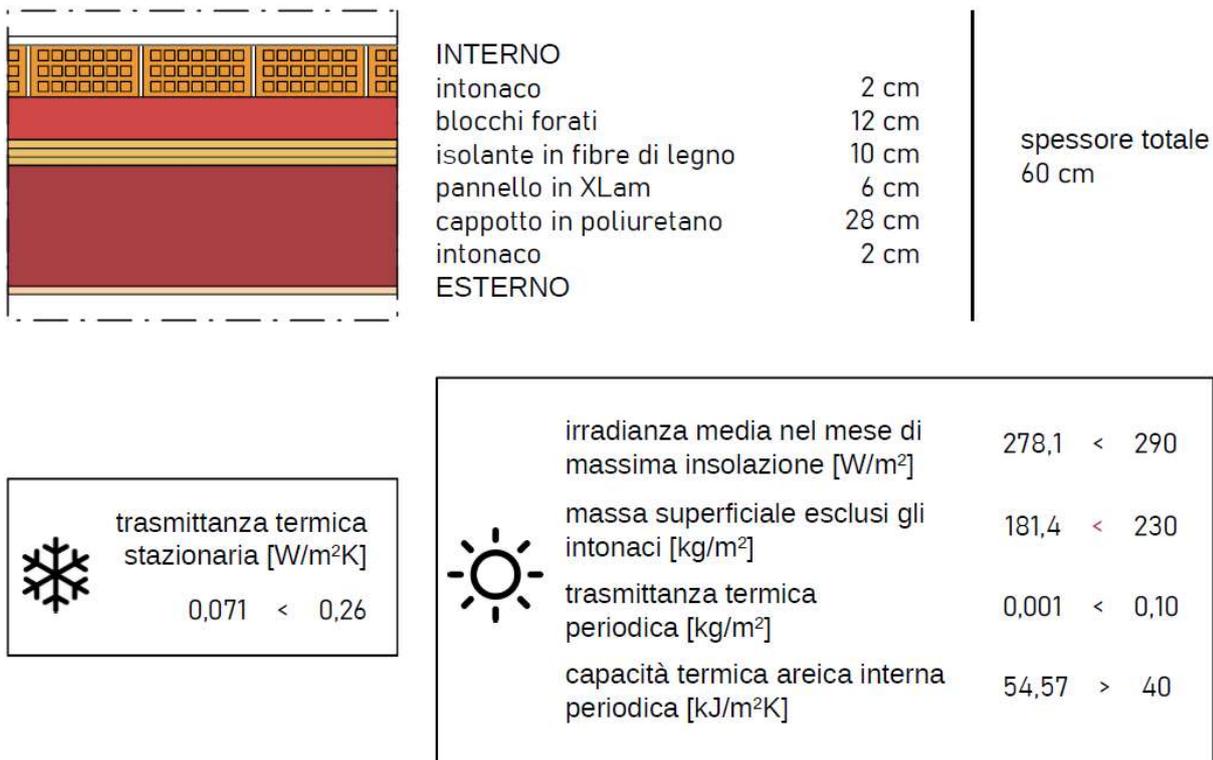


Figura 4-30: Parete con intervento RC-TP nel caso di Livello 3 – Valutazione del comportamento invernale ed estivo

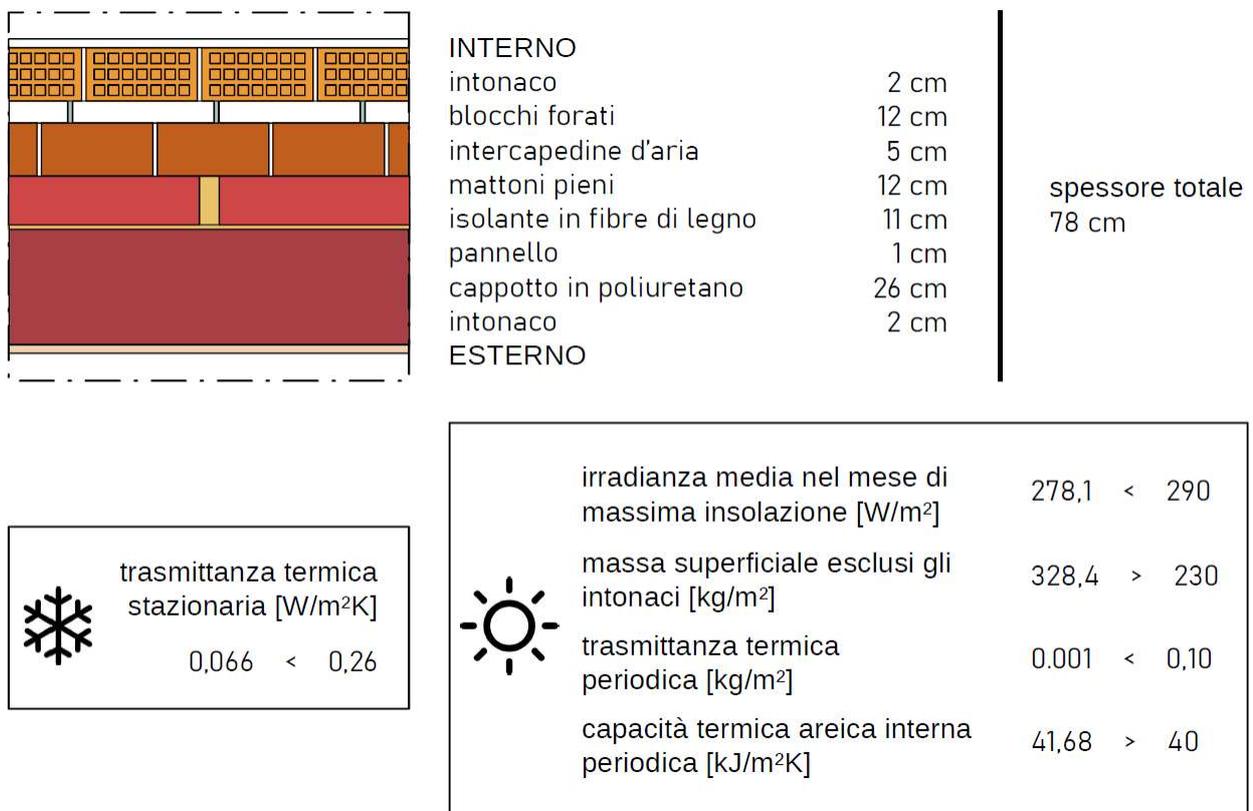


Figura 4-31: Parete con intervento di tipo Strong-back nei casi di Livello 1, 2 e 3 – Valutazione del comportamento invernale ed estivo

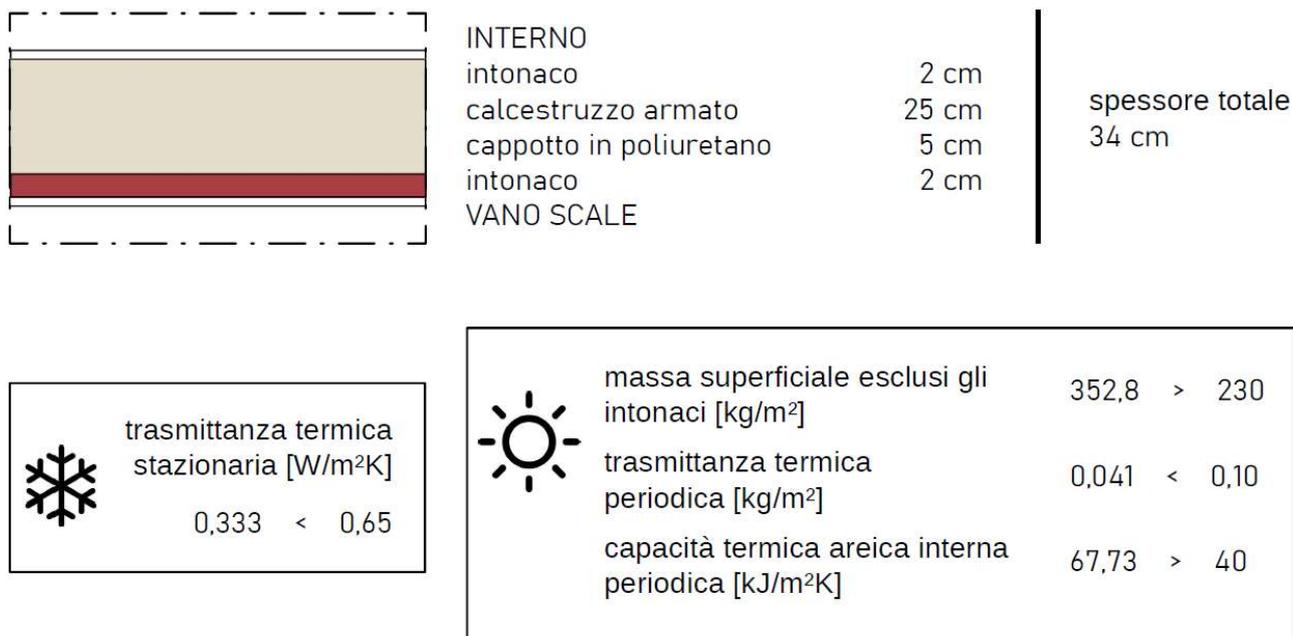


Figura 4-32: Parete vano scale 1 nei casi di intervento di Livello 2 e 3 – Valutazione del comportamento invernale ed estivo

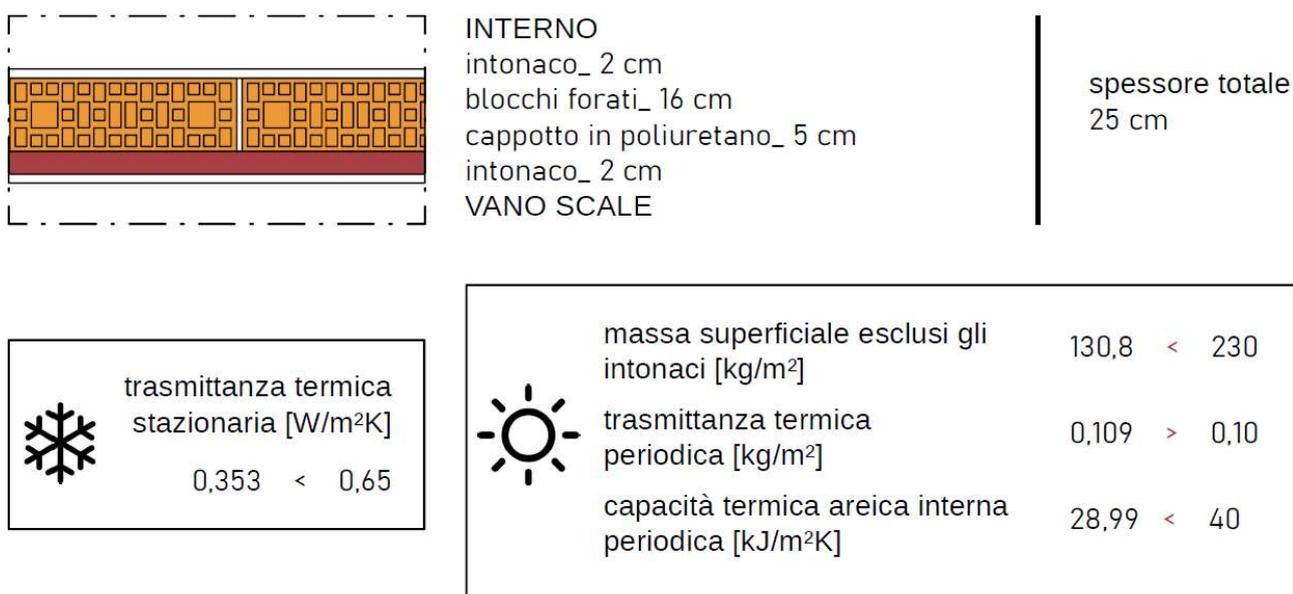


Figura 4-33: Parete vano scale 2 nei casi di intervento di Livello 2 e 3

## CALCOLO DELLA CLASSE ENERGETICA

Si riporta in Figura 4-34 la schematizzazione dei risultati ottenuti.

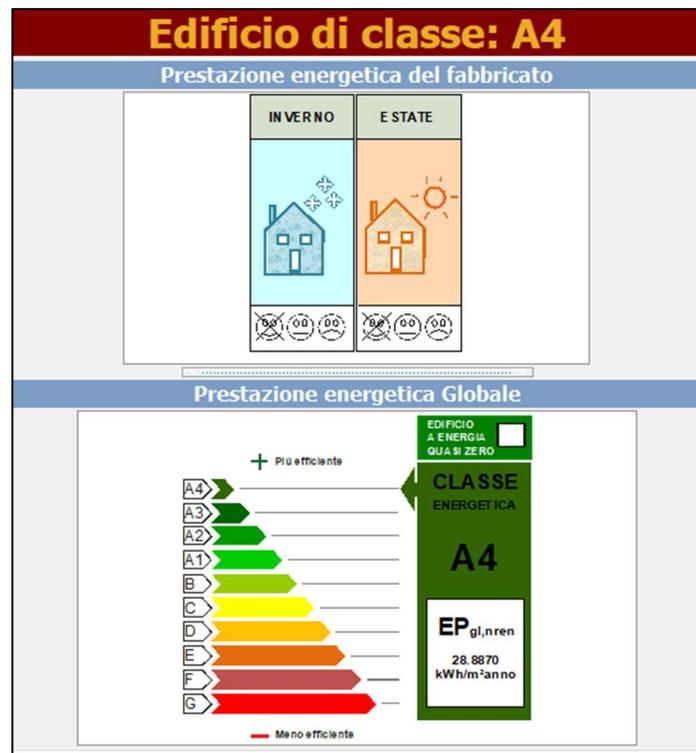


Figura 4-34: Risultati ottenuti dall'analisi energetica dell'intervento di Livello 3 - Software TerMus

Nel caso di interventi di Livello 3 l'appartamento risulta appartenere alla Classe energetica A4.

## PONTI TERMICI E RISCHIO MUFFA

I ponti termici sono stati verificati in accordo con quanto riportato al paragrafo 4.2.4. Si riportano in Figura 4-35 i risultati ottenuti.

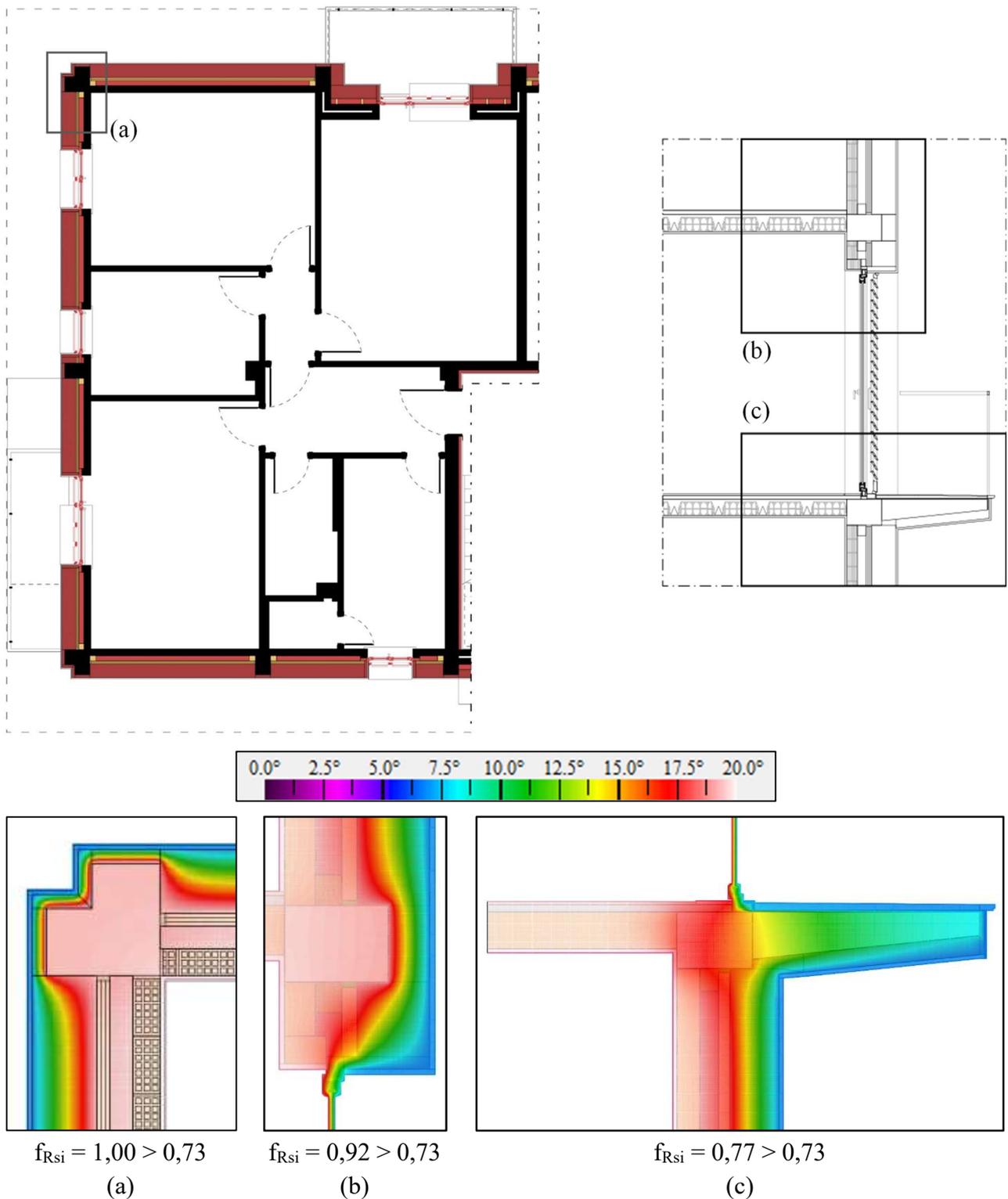


Figura 4-35: Analisi dei ponti termici – Intervento di Livello 3 – Angolo tra pareti verticali (a), collegamento superiore della finestra (b), balcone (c)

Come è possibile osservare, in tutti i casi studiati non vi è il rischio di formazione di muffa in corrispondenza dei ponti termici nel caso di intervento di Livello 3.

CONDENSA INTERSTIZIALE

La verifica di condensa interstiziale è stata eseguita in modo analogo a quanto descritto al paragrafo 3.2. Si riportano in Figura 4-36 i risultati ottenuti considerando una “parete tipo” soggetta all’intervento RC-TPext nel mese di gennaio.

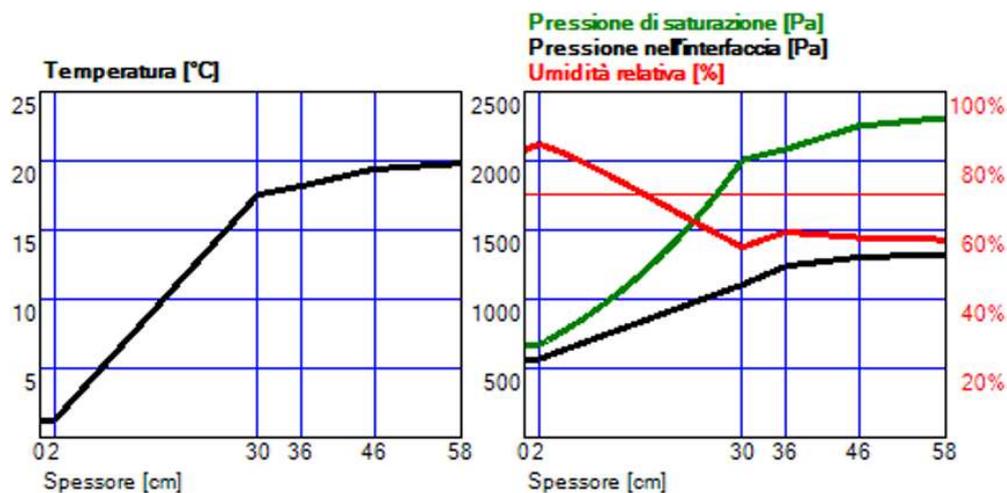


Figura 4-36: Parete tipo – Intervento di Livello 3 – Verifica rischio condensa

Le stratigrafie di progetto risultano essere esenti dal fenomeno di condensazione interstiziale. Infatti, in nessun mese si verifica che le due curve si intersechino.

## 5. ANALISI COMPARATIVA DEGLI INTERVENTI

### 5.1. ANALISI DELLE PRESTAZIONI SISMICHE ED ENERGETICHE

Di seguito, in Tabella 5-1 si riporta un quadro riassuntivo attraverso cui è possibile analizzare in maniera comparativa i livelli prestazionali in termini di sicurezza, riduzione delle perdite attese, ed efficientamento energetico ottenuto con i diversi livelli di intervento.

Tabella 5-1: Riassunto degli interventi e dei risultati conseguiti

Configurazione	Riduzione della vulnerabilità sismica		Miglioramento del comportamento energetico	
	Interventi	Classe Sismica	Interventi	Classe Energetica
 <b>Esistente</b>	\	<b>F</b> IS-V=14% PAM=8,22%	\	<b>G</b> EPgl 182,64 kWh/m <sup>2</sup> anno
 <b>Livello 1</b>	No rinforzo SLU • Applicazione CLT dall'esterno (RC-TPext) • Vincolo fuori piano tamp. (Strong-Backs)	<b>D</b> IS-V=38% PAM=3,26% <b>B</b> IS-V=75% PAM=0,85%	Eseguiti dall'esterno • Isolamento pareti e sottotetto	<b>D</b> EPgl 87,25 kWh/m <sup>2</sup> anno
 <b>Livello 2</b>	• Rinforzo travi allo SLU (CAM) • Applicazione CLT dall'esterno (RC-TPext) • Vincolo fuori piano tamp. (Strong-Backs)	No rinforzo SLU <b>D</b> IS-V=38% PAM=3,26% Con rinforzo SLU <b>B</b> IS-V=75% PAM=0,85%	Limitati accessi agli ambienti interni • Isolamento pareti, sottotetto, solaio di base e vano scale • Sostit. infissi • Sostit. impianti	<b>A3</b> EPgl 182,64 kWh/m <sup>2</sup> anno
 <b>Livello 3</b>	• Rinforzo travi allo SLU (CAM) • Sostit. paramento esterno con CLT (RC-TP) • Vincolo fuori piano tamp. (Strong-Backs)	No rinforzo SLU <b>C</b> IS-V=51% PAM=2,02% Con rinforzo SLU <b>B</b> IS-V=75% PAM=0,85%	Eseguiti dall'esterno e dall'interno • Isolamento pareti, sottotetto, solaio di base e vano scale • Sostit. infissi • Sostit. impianti • Impianto solare termico	<b>A4</b> EPgl 28,89 kWh/m <sup>2</sup> anno

## 5.2. ANALISI DEI COSTI

Tabella 5-2 Quadro sinottico dei costi associati ai diversi livelli di intervento

Intervento	Descrizione	Importo	Superficie	Volumetria	€/m <sup>2</sup>	€/m <sup>3</sup>
			calpestabile	[m <sup>3</sup> ]		
			[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]		
<b>Livello I</b> <i>(RC-TPext)</i>	Rinforzo CLT	119.763,14 €			68,44 €	21,06 €
	Demolizione e ripristino	4.769,89 €	1750	5688	2,73 €	0,84 €
	Smaltimento	50.815,92 €			29,04 €	8,93 €
	<b>Parziale opere strutturali</b>	<b>175.348,95 €</b>			<b>100,20 €</b>	<b>30,83 €</b>
	Pacchetto isolante	310.054,89 €	1750	5688	177,17 €	54,52 €
	Tinteggiatura	49.503,85 €			28,29 €	8,70 €
	<b>Parziale opere di efficientamento energetico</b>	<b>359.558,74 €</b>			<b>205,46 €</b>	<b>63,22 €</b>
	<b>Opere di cantierizzazione</b>	<b>139.128,85 €</b>	1750	5688	<b>79,50 €</b>	<b>24,46 €</b>
	<b>Oneri per la sicurezza</b>	<b>33.701,83 €</b>	1750	5688	<b>19,26 €</b>	<b>5,93 €</b>
	<b>TOTALE INTERVENTO</b>	<b>707.738,37 €</b>	1750	5688	<b>404,42 €</b>	<b>124,44 €</b>
<b>Livello II</b> <i>(RC-TPext)</i>	Rinforzo CLT	119.763,14 €			68,44 €	21,06 €
	Intervento CAM	144.780,26 €	1750	5688	82,73 €	25,46 €
	Demolizione e ripristino	9.815,47 €			5,61 €	1,73 €
	Smaltimento	50.852,22 €			29,06 €	8,94 €
	<b>Parziale opere strutturali</b>	<b>325.211,09 €</b>			<b>185,83 €</b>	<b>57,18 €</b>
	Pacchetto isolante	332.207,52 €	1750	5688	189,83 €	58,41 €
	Tinteggiatura	59.507,98 €			34,00 €	10,46 €
	Serramenti	242.984,30 €			138,85 €	42,72 €
	Impianti	227.500,00 €			130,00 €	40,00 €
	<b>Parziale opere di efficientamento energetico</b>	<b>862.199,80 €</b>			<b>492,69 €</b>	<b>151,60 €</b>
<b>Opere di cantierizzazione</b>	<b>139.128,85 €</b>	1750	5688	<b>79,50 €</b>	<b>24,46 €</b>	
<b>Oneri per la sicurezza</b>	<b>66.326,99 €</b>	1750	5688	<b>37,90 €</b>	<b>11,66 €</b>	
<b>TOTALE INTERVENTO</b>	<b>1.392.866,73 €</b>	1750	5688	<b>795,92 €</b>	<b>244,90 €</b>	
<b>Livello III</b> <i>(RC-TP)</i>	Rinforzo CLT	104.381,90 €			59,65 €	18,35 €
	Intervento CAM	144.780,26 €	1750	5688	82,73 €	25,46 €
	Demolizione e ripristino	14.972,92 €			8,56 €	2,63 €
	Smaltimento	55.789,59 €			31,88 €	9,81 €
	<b>Parziale opere strutturali</b>	<b>319.924,67 €</b>			<b>182,81 €</b>	<b>56,25 €</b>
	Pacchetto isolante	294.261,07 €	1750	5688	168,15 €	51,74 €
	Tinteggiatura	59.507,98 €			34,00 €	10,46 €
	Serramenti	242.984,30 €			138,85 €	42,72 €
	Impianti	284.375,00 €			162,50 €	50,00 €
	<b>Parziale opere di efficientamento energetico</b>	<b>881.128,35 €</b>			<b>503,50 €</b>	<b>154,92 €</b>
<b>Opere di cantierizzazione</b>	<b>139.128,85 €</b>	1750	5688	<b>79,50 €</b>	<b>24,46 €</b>	
<b>Oneri per la sicurezza</b>	<b>67.009,09 €</b>	1750	5688	<b>38,29 €</b>	<b>11,78 €</b>	
<b>TOTALE INTERVENTO</b>	<b>1.407.190,97 €</b>	1750	5688	<b>804,11 €</b>	<b>247,42 €</b>	

In Tabella 5-2 viene riportata in forma sintetica l'analisi dei costi relativi ai tre diversi livelli d'intervento descritti nel capitolo precedente. 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).

### 5.3. ANALISI DEI TEMPI DI ESECUZIONE DELLE LAVORAZIONI

Tabella 5-3 Analisi dei tempi di esecuzione delle lavorazioni per i diversi livelli di intervento

Intervento	Descrizione	Giorni lavorativi		
		1 squadra	2 squadre	3 squadre
<b>Livello I (RC-TPext)</b>	Rinforzo CLT	35,53	17,76	11,84
	Demolizione e ripristino	2,99	1,50	1,00
	Smaltimento	7,17	3,59	2,39
	<b>Parziale opere strutturali</b>	<b>45,69</b>	<b>22,85</b>	<b>15,23</b>
	Pacchetto isolante	17,69	8,84	5,90
	Tinteggiatura	43,46	21,73	14,49
	<b>Parziale opere di efficientamento energetico</b>	<b>17,69</b>	<b>8,84</b>	<b>5,90</b>
	<b>Opere di cantierizzazione</b>	<b>23,36</b>	<b>11,68</b>	<b>7,79</b>
	<b>TOTALE INTERVENTO</b>	<b>86,74</b>	<b>43,37</b>	<b>28,91</b>
		<b>4,3 mesi</b>	<b>2,2 mesi</b>	<b>1,4 mesi</b>
<b>Livello II (RC-TPext)</b>	Rinforzo CLT	35,53	17,76	11,84
	Intervento CAM	56,34	28,17	18,78
	Demolizione e ripristino	7,20	3,60	2,40
	Smaltimento	37,48	18,74	12,49
	<b>Parziale opere strutturali</b>	<b>91,87</b>	<b>45,93</b>	<b>30,62</b>
	Pacchetto isolante	24,46	12,23	8,15
	Tinteggiatura	52,84	26,42	17,61
	Serramenti	77,16	38,58	25,72
	Impianti	107,97	53,99	35,99
	<b>Parziale opere di efficientamento energetico</b>	<b>262,44</b>	<b>131,22</b>	<b>87,48</b>
<b>Opere di cantierizzazione</b>	<b>23,36</b>	<b>11,68</b>	<b>7,79</b>	
<b>TOTALE INTERVENTO</b>	<b>377,67</b>	<b>188,83</b>	<b>125,89</b>	
	<b>18,9 mesi</b>	<b>9,4 mesi</b>	<b>6,3 mesi</b>	
<b>Livello III (RC-TP)</b>	Rinforzo CLT	30,96	15,48	10,32
	Intervento CAM	56,34	28,17	18,78
	Demolizione e ripristino	11,40	5,70	3,80
	Smaltimento	42,32	21,16	14,11
	<b>Parziale opere strutturali</b>	<b>141,03</b>	<b>70,52</b>	<b>47,01</b>
	Pacchetto isolante	22,46	11,23	7,49
	Tinteggiatura	52,84	26,42	17,61
	Serramenti	77,16	38,58	25,72
	Impianti	134,97	67,48	44,99
	<b>Parziale opere di efficientamento energetico</b>	<b>287,43</b>	<b>143,71</b>	<b>95,81</b>
<b>Opere di cantierizzazione</b>	<b>23,36</b>	<b>11,68</b>	<b>7,79</b>	
<b>TOTALE INTERVENTO</b>	<b>451,82</b>	<b>225,91</b>	<b>150,61</b>	
	<b>22,6 mesi</b>	<b>11,3 mesi</b>	<b>7,5 mesi</b>	

In Tabella 5-3 sono riportati i tempi di esecuzione delle lavorazioni necessarie a raggiungere le prestazioni sismiche ed energetiche associate ai tre livelli di intervento descritti in dettaglio nel capitolo 4. Nello specifico, in tabella sono riportati i giorni lavorativi richiesti per portare a termine gli interventi proposti, ipotizzando scenari alternativi in cui operano una, due oppure tre squadre di cantiere tipo, ciascuna composta da un operaio specializzato, un operaio qualificato ed un operaio

semplice (costo totale di 105,35 €/h). Nella stima dei tempi necessari alla realizzazione del pacchetto isolante delle pareti, si sono conteggiate solamente le lavorazioni in cantiere (si vedano ad esempio Figura 4-3(e-f) e Figura 4-23(e-f)), escludendo le fasi di assemblaggio del sistema prefabbricato eseguite in stabilimento.

## 6. Bibliografia

- [1] NTC—Norme Tecniche per le Costruzione. “Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni”, decreto 17-1-2018, Gazzetta Ufficiale 42, 20-02-2018, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti; 2018.
- [2] NTC-Circolare, Circolare 2 febbraio 2019, n. 617 Istruzioni per l’ applicazione delle “Norme tecniche per le costruzioni” di cui al D. M. 14 gennaio 2008. 2008.
- [3] Masi A., Manfredi V., Ventura G. (2015). Progettazione integrata di interventi per il miglioramento delle prestazioni sismiche e termiche di edifici esistenti in c.a.
- [4] Canal N. (2006). Resistenza meccanica di blocchi forati a fori orizzontali. Consorzio POROTON Italia.
- [5] Liberatore, L.; Noto, F.; Mollaioli, F.; Franchin, P. In-plane response of masonry infill walls: Comprehensive experimentally-based equivalent strut model for deterministic and probabilistic analysis. *Engineering Structures*. 2018, 781 167, pp. 533-548.
- [6] Tabeshpour, M.R.; Noorifard, A. A new procedure to determine equivalent strut of infill walls with openings for engineering applications. *Struct. Build.* 2020, 173, 585–601.
- [7] D. Celarec, M. Dolšek. Practice-oriented probabilistic seismic performance assessment of infilled frames with consideration of shear failure of columns. *Earthquake Eng Struct Dyn*, 42 (9) (2013), pp. 1339-1360.
- [8] ASCE 41-17. *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*; American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, 2017.
- [9] R. Frascadore et al., “Local strengthening of reinforced concrete structures as a strategy for seismic risk mitigation at regional scale,” *Earthq. Spectra*, vol. 31, no. 2, pp. 1083–1102, 2015.
- [10] Reese A, Stavridis A. A simplified method for the estimation of the seismic resistance of RC Frames with Weak Infill Panels. In: Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, *Frontiers of Earthquake Engineering*. Anchorage, Alaska, 21-25 July; 2014.
- [11] Ning N, Ma ZJ, Zhang P, Yu D, Wang J. Influence of masonry infills on seismic response of RC frames under low frequency cyclic load. *Eng Struct* 2019;183: 70–82. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.083>.

- [12] Kadysiewski S, Mosalam KM. Modeling of Unreinforced Masonry Infill Walls Considering In-Plane and Out-of-Plane Interaction. Pacific Earthquake Engineering Research Center. Berkeley: University of California; 2009.
- [13] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, D.M. n. 24 del 9/1/2020 recante: “Linee guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni nonché le modalità per l’attestazione, da parte di professionisti abilitati, dell’efficacia degli interventi effettuati”.
- [14] Fedrizzi, R., & Dipasquale, C. (2015, aprile). Fabbisogni energetici: case e uffici sotto la lente. *Casa&Clima*(54), 10-12.
- [15] UNI EN ISO 13788:2013. Prestazione igrotermica dei componenti e degli elementi per edilizia - Temperatura superficiale interna per evitare l’umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale - Metodi di calcolo.
- [16] Smiroldo F., Giongo I., Piazza M.: Seismic retrofit of masonry infilled frames by using timber panels. In 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendai, Japan, 2020.
- [17] Smiroldo F., Viel D., Giongo I., Piazza M.: A numerical study on a timber-based retrofit intervention for masonry infilled concrete frames. In 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, COMPDYN 2021, Athens, Greece, 27–30 June 2021.
- [18] Smiroldo, F.; Giongo, I.; Piazza, M. Use of timber panels to reduce the seismic vulnerability of concrete frame structures. *Engineering Structures*. 2021, 244. doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112797.
- [19] Smiroldo, F.; Paviani, I.; Giongo, I.; Zanon, S.; Albatici, R.; Piazza, M. An Integrated Approach to Improve Seismic and Energetic Behaviour of RC Framed Buildings Using Timber Panels. *Sustainability* 2021, 13, 11304. <https://doi.org/10.3390/su132011304>.
- [20] Cassol, D., Giongo, I., Ingham, J., & Dizhur, D. Seismic out-of-plane retrofit of URM walls using timber strong-backs. *Construction and Building Materials*. 2020, 269(4).
- [21] Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del mare, Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti, and Ministero per la semplificazione e la pubblica amministrazione, “Decreto interministeriale 26 giugno 2015 - Adeguamento linee guida nazionali per la certificazione energetica degli edifici,” *Gazz. Uff.*, 2015.
- [22] UNI EN ISO 13786:2018. Thermal Performance of Building Components—Dynamic Thermal Characteristics—Calculation Methods; Ente Italiano di Normazione (UNI): Milano, Italy, 2018.
- [23] Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009, n. 59. (s.d.). "Regolamento di

- attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia".
- [24] ENEA (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile). (s.d.). Strutture leggere in legno e calcestruzzo. Tratto da [https://www.enea.it/it/Ricerca\\_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema\\_elettrico/condizionamento/allegati\\_rse08/report\\_enea\\_c\\_struttureleggere.doc/view](https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/ricerca-di-sistema_elettrico/condizionamento/allegati_rse08/report_enea_c_struttureleggere.doc/view)
- [25] Ministero dello sviluppo economico, Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del mare, “Decreto interministeriale 11 gennaio 2017 - Nuove regole per i Certificati Bianchi,” Gazz. Uff., 2017.
- [26] Decreto legislativo 3 marzo 2011, n. 28 - "Attuazione della direttiva 2009/28/CE sulla promozione dell'uso dell'energia da fonti rinnovabili, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive 2001/77/CE e 2003/30/CE". (s.d.).
- [27] Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009, n. 59. (s.d.). "Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia".
- [28] EN 1995-1-1:2004/A2. Eurocode 5 (2014): Design of timber structures. Part 1–1: General. Common rules and rules for buildings. CEN, Brussels, Belgium.
- [29] Swedish Wood. (2019). *The CLT Handbook. CLT structures - facts and planning*. Stockholm: Eric Borgstroem, Johan Froebel.