



Progetto DPC-ReLUIS 2019-2021

WP5: Interventi di rapida esecuzione a basso impatto ed integrati

**CASO STUDIO: SCUOLA DELL'INFANZIA "P. CAPUZI"
VISSO (MC)**

Gruppo di lavoro:

Prof. S. Lagomarsino, Prof. S. Cattari, S. Alfano, D. Ottonelli (UniGE), per la parte strutturale
G.Prof. M. De Carli (UniPD), per la parte di efficientamento energetico
V. Paolillo (UniNA), per il computo metrico

Sommario

1	EDIFICIO CASO STUDIO	1
1.1	DESCRIZIONE GENERALE DEL COMPLESSO SCOLASTICO	1
1.2	ANALISI STORICO CRITICA	2
1.3	SISTEMA STRUTTURALE E DETTAGLI COSTRUTTIVI	3
1.4	PROPRIETA' DEI MATERIALI	5
1.5	CHIUSURE TRASPARENTI	5
1.6	IMPIANTI E AMBIENTI INTERNI	6
1.6.1	<i>SISTEMA DI GENERAZIONE</i>	6
1.6.2	<i>TERMINALI DI IMPIANTO</i>	6
1.6.3	<i>ILLUMINAZIONE</i>	6
1.6.4	<i>LOCALI</i>	6
1.7	DESTINAZIONE D'USO	7
2	VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA' SISMICA	9
2.1	PERICOLOSITA' SISMICA DEL SITO	9
2.2	MODELLAZIONE STRUTTURALE	10
2.3	ANALISI STRUTTURALE	14
2.4	VERIFICA STATO DI FATTO ALLO SLV	18
2.5	VERIFICA STATO DI FATTO ALLO SLE	19
2.6	CALCOLO DELLA CLASSE DI RISCHIO SISMICO	19
3	VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA ENERGETICA	21
3.1	DEFINIZIONE DEI MODELLI	21
3.1.1	<i>MODELLO QUASI-STAZIONARIO</i>	21
3.1.1.1	Dati generali	21
3.1.1.2	Input grafico, dati involucro	22
3.1.1.3	Dati impianti	22
3.1.2	<i>MODELLO DINAMICO</i>	23
3.1.2.1	Definizione dati generali modello	23
3.1.2.2	Definizione delle zone termiche	24
3.1.3	<i>RISULTATI EDIFICIO STATO DI FATTO</i>	25
3.1.3.1	Modello quasi-stazionario	26
3.1.3.2	Modello dinamico	26
4	STRATEGIE DI INTERVENTO	29

4.1	IRRIGIDIMENTO/CONSOLIDAMENTO DELLE STRUTTURE ORIZZONTALI AL FINE DI MIGLIORARE IL COMPORTAMENTO SCATOLARE	31
4.1.1	<i>ANALISI COMPARATIVA IN TERMINI DI RISPOSTA STRUTTURALE</i>	35
4.1.2	<i>ANALISI COMPARATIVA IN TERMINI DI CLASSE di RISCHIO e PAM</i>	37
4.2	INTERVENTI ENERGETICI PREVISTI UNITAMENTE ALL'IRRIGIDIMENTO DEI SOLAI PER LO SCENARIO 1	37
4.2.1	<i>RISULTATI INTERVENTI MIGLIORATIVI ENERGETICI RELATIVI ALLO SCENARIO 1</i>	39
4.2.1.1	Classe energetica (modello quasi-stazionario)	39
4.2.1.2	Energia utile (modello dinamico)	40
4.2.1.3	Energia primaria e costi (modello dinamico)	40
4.3	CONSOLIDAMENTO DELLE STRUTTURE VERTICALI	41
4.3.1	<i>ANALISI COMPARATIVA IN TERMINI DI RISPOSTA STRUTTURALE</i>	49
4.3.2	<i>ANALISI COMPARATIVA IN TERMINI DI CLASSE di RISCHIO e PAM</i>	51
4.4	INTERVENTI ENERGETICI PREVISTI UNITAMENTE ALL'IRRIGIDIMENTO DEI SOLAI E LE STRUTTURE VERTICALI PER LO SCENARIO 2 E 3	52
4.4.1	<i>RISULTATI INTERVENTI MIGLIORATIVI ENERGETICI RELATIVI ALLO SCENARIO 2</i>	53
4.4.1.1	Classe energetica (modello quasi-stazionario)	53
4.4.1.2	Energia utile (modello dinamico)	53
4.4.1.3	Energia primaria e costi (modello dinamico)	54
4.4.2	<i>RISULTATI INTERVENTI MIGLIORATIVI ENERGETICI RELATIVI ALLO SCENARIO 3</i>	55
4.4.2.1	Classe energetica (modello quasi-stazionario)	55
4.4.2.2	Energia utile (modello dinamico)	55
4.4.2.3	Energia primaria e costi (modello dinamico)	55
4.5	ANALISI DEI COSTI DEGLI INTERVENTI DI TIPO ENERGETICO	57
4.6	RIEPILOGO INTERVENTI E COSTI	58
5	ANALISI COMPARATIVA DEGLI INTERVENTI	61
5.1	ANALISI DI PAREGGIO DEI DIVERSI INTERVENTI PROPOSTI	ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.
5.2	INCENTIVI GSE	ERRORE. IL SEGNALIBRO NON È DEFINITO.
5.2.1	<i>CALCOLO INCENTIVI</i>	<i>Errore. Il segnalibro non è definito.</i>
5.2.2	<i>INCENTIVO COMPLESSIVO SCENARI</i>	<i>Errore. Il segnalibro non è definito.</i>
5.2.3	<i>CONVENIENZA E RITORNO INVESTIMENTI</i>	<i>Errore. Il segnalibro non è definito.</i>
5.3	ANALISI DEI TEMPI DI ESECUZIONE DELLE LAVORAZIONI	64
6	CONSIDERAZIONI FINALI	66
	BIBLIOGRAFIA	70

1 EDIFICIO CASO STUDIO

Il caso studio analizzato si ispira alla Scuola dell'Infanzia "Pietro Capuzi" del comune di Visso (MC). La costruzione era stata gravemente colpita dagli eventi sismici che hanno interessato il Centro Italia tra il 2016 e il 2017, tanto da poi essere demolita.

La scuola faceva inoltre parte degli edifici pubblici monitorati permanentemente dall'"Osservatorio Sismico delle Strutture (OSS)" (contratto tra il DPC e il RTI n° 789 del 24/08/2009). Grazie al monitoraggio permanente operato dall'OSS tramite il Dipartimento della Protezione Civile, erano quindi disponibili sulla struttura altri dati, relativi alle registrazioni dell'evento (alla base e in diversi punti della scuola) nonché all'identificazione delle proprietà dinamiche. In aggiunta a questo erano disponibili informazioni sulla caratterizzazione geometrica e dei dettagli costruttivi della costruzione. La disponibilità di questi dati accurati rende il caso studio particolarmente emblematico ed esso è stato selezionato nell'ambito anche di altri task dei progetti DPC-ReLUIIS nel corso degli anni. In particolare, nel documento "Uso dei software di calcolo nella verifica sismica degli edifici in muratura v1.0", scaricabile dal sito www.reluis.it, il caso studio è una delle strutture benchmark proposte per effettuare valutazioni e considerazioni sull'uso sull'affidabilità di software di calcolo; per gli eventuali interessati, in tale documento sono disponibili dati sufficienti a riprodurre il caso studio.

Nel contesto dell'approfondimento illustrato nel seguito, il caso studio è invece adottato per valutare l'efficacia di diversi interventi di consolidamento ed efficientamento energetico, anche dal punto di vista economico. A scopo puramente esemplificativo, è stato considerato uno stato di fatto "convenzionale" della scuola che non corrisponde a quello della struttura reale ma vuole essere rappresentativo di una condizione più vulnerabile, rappresentativa dello stato in cui versano alcuni edifici esistenti. Alla progettazione degli interventi descritti nel seguito, nel 2018 avevano contribuito a vario titolo nell'ambito delle attività del WP3 anche altre unità di ricerca, quali in particolare quelle di Chieti e Pescara (Responsabili Proff. Enrico Spacone e Guido Camata) e Brescia (Prof. Marco Preti).

1.1 DESCRIZIONE GENERALE DEL COMPLESSO SCOLASTICO

L'edificio scolastico è caratterizzato da una pianta irregolare assimilabile ad una T, costituita da due corpi rettangolari ben ammassati tra loro. Il fabbricato ha un'area in pianta di 600 m² e si sviluppa prevalentemente su due piani, l'andamento in altezza è regolare, con altezza d'interpiano di 4.40 m. La scuola ha un ulteriore locale seminterrato (che ricopre un'area più piccola dei piani successivi,

avente la funzione di magazzino) e un sottotetto. La cubatura complessiva è di circa 4800 m³. Il piano terra, ad una quota di 70 cm rispetto al piano di campagna, presenta aule, mensa, servizi, archivi ed uffici della direzione, mentre il piano primo si divide tra aule e servizi

La Figura 1-1 riporta le piante del piano terra e del primo piano.

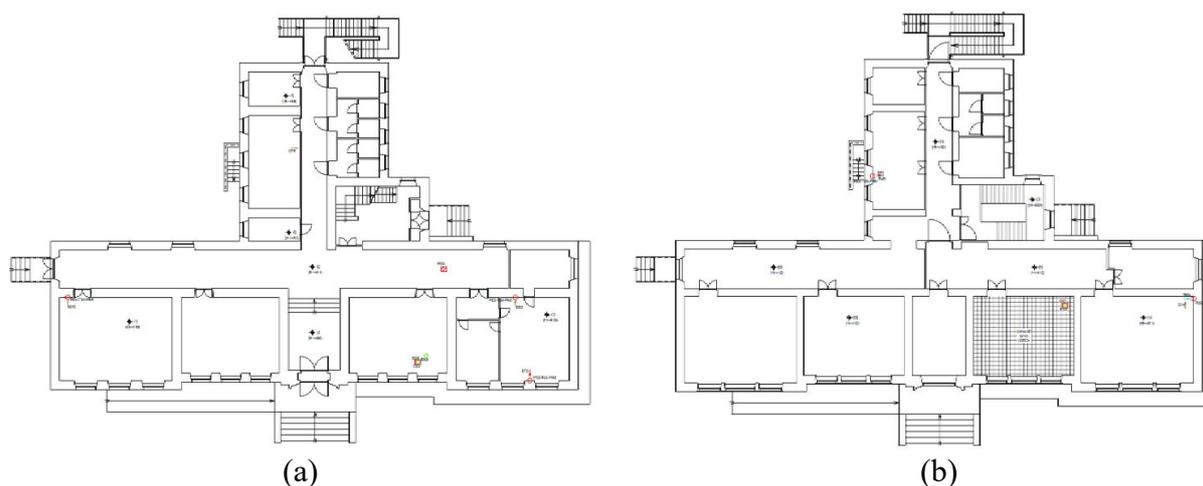


Figura 1-1: Planimetria del piano terra (a) e del primo piano (b).



Figura 1-2: Viste dell'edificio danneggiato durante il terremoto del centro Italia 2016.

1.2 ANALISI STORICO CRITICA

Il fabbricato è stato costruito negli anni '30 ed è stato oggetto di alcuni interventi di miglioramento avviati negli anni '90 a seguito del terremoto delle Marche e dell'Umbria del 1997.

1.3 SISTEMA STRUTTURALE E DETTAGLI COSTRUTTIVI

La struttura verticale è costituita prevalentemente da muratura portante in blocchi di pietra a spacco con buona tessitura ad eccezione di quattro pilastri ed alcune pareti nel loro intorno realizzate con mattoni pieni e malta di calce. La muratura è sufficientemente regolare e caratterizzata da buona qualità di malta.

I maschi murari sono continui dalle fondazioni alla copertura e presentano spessore variabile tra i 65-70 cm al piano terra e tra i 50-70 cm al primo piano (Figura 1-3).

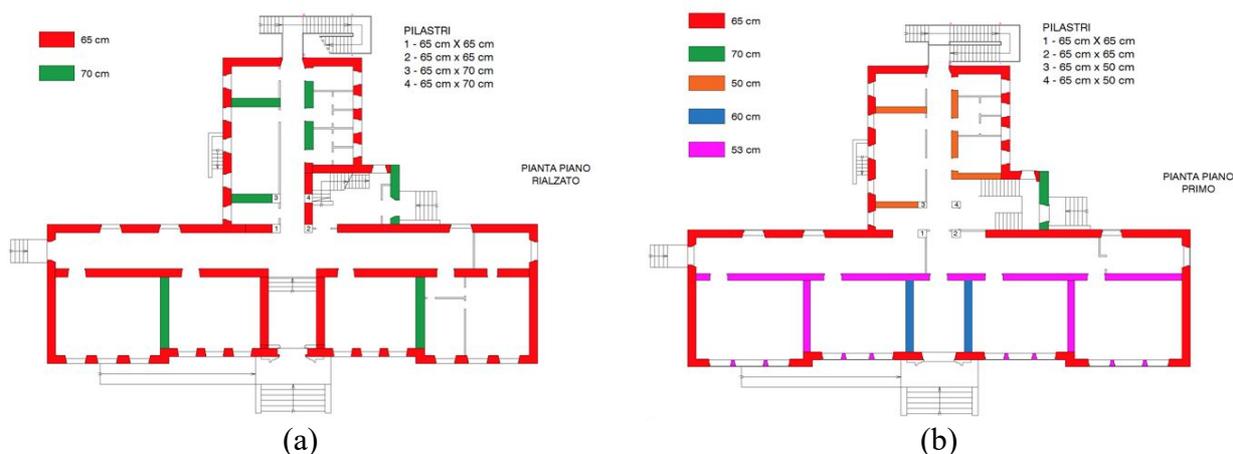


Figura 1-3: Spessori del piano terra (a) e del primo piano (b).

Le fasce di piano sono realizzate con blocchi di pietra a spacco con buona tessitura, sono assunte deboli e non vi è presenza di elementi resistenti a trazione quali cordoli o catene. Il loro spessore in alcuni casi è ridotto rispetto alle porzioni di muratura adiacenti. La seguente figura chiarisce questo aspetto.

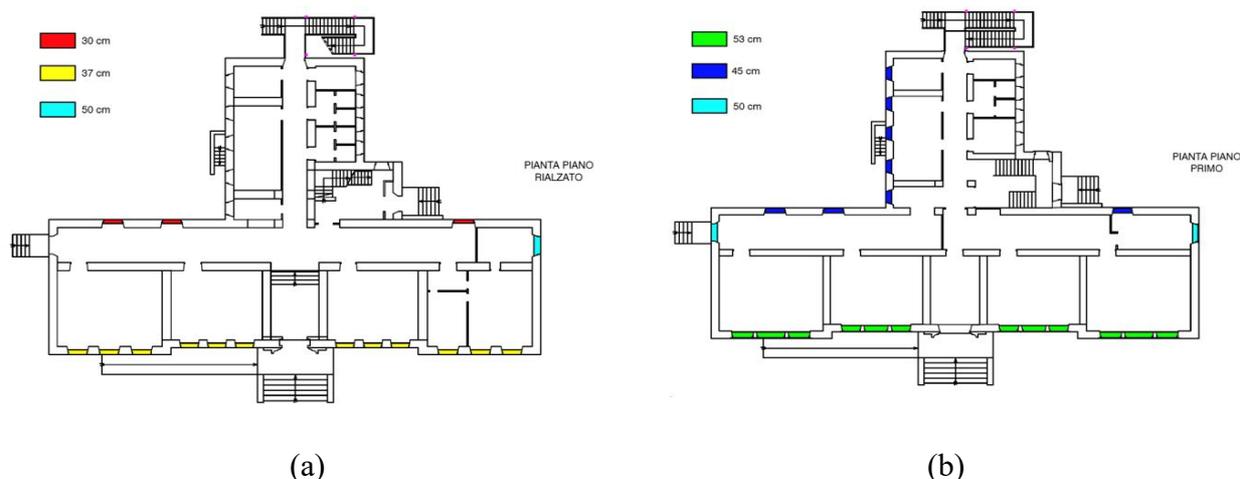


Figura 1-4: Spessore delle fasce di piano del piano terra (a) e del primo piano (b).

L'ammorsamento tra pareti è considerato efficace al punto tale da limitare la formazione di meccanismi locali: lo studio è centrato sulla risposta globale nel piano.

In corrispondenza della “gamba” della T sono presenti travi in c.a. di cls di classe C12/15 e armatura con caratteristiche tipiche degli “anni 30”, poggianti sia su pilastri in muratura che pannelli murari.

Il piano di sottotetto non è esplicitamente modellato, ma si considera la porzione di muratura soprastante il secondo impalcato attraverso un carico equivalente applicato linearmente sulle pareti perimetrali e su quelle interne, corrispondente ad un volume di muratura di spessore pari a quello della muratura del primo piano e altezza pari ad h_{eq} (Figura 1-5).

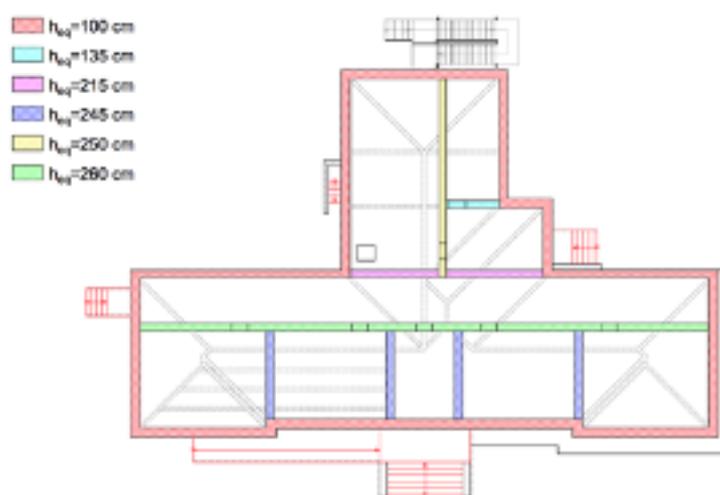


Figura 1-5: Pianta sottotetto ed altezze equivalenti.

Le strutture orizzontali del piano terra e del piano primo sono composte da solai lignei con doppio tavolato. I carichi ad essi associati sono descritti in Tabella 1-1.

La copertura è a falde con capriata, tavelloni e soletta in c.a. di circa 2 cm; non è stata modellata esplicitamente e il suo carico è applicato direttamente sul solaio del primo piano

Le indagini condotte hanno consentito di raggiungere un livello di conoscenza LC2, corrispondente ad un fattore di confidenza FC=1.2.

Tabella 1-1: Analisi dei carichi sui solai.

Solaio piano terra, piano primo e copertura	
G_k	1.9 kN/m ²
$G_{k,COP}$	1.5 kN/m ²
Q_k	3,00 kN/m ²

Le scale non sono modellate esplicitamente, ma sono tenute in considerazione attraverso un carico accidentale a livello di solaio pari a 4 kN/m².

1.4 PROPRIETA' DEI MATERIALI

Le proprietà dei materiali sono state determinate a mezzo di indagini in-situ non distruttive in accordo con le prescrizioni delle NTC2018 [1] condotte da Settembre 2010 a Febbraio 2011 da parte dei Tecnici SGM.srl per conto della Presidenza del Consiglio dei Ministri, del Dipartimento della Protezione Civile e dell'ufficio Valutazione, Prevenzione e Mitigazione del Rischio Sismico e Attività ed Opere Post-Emergenza. Tali prove sono state utilizzate in fase di conoscenza dell'edificio per indentificare i parametri caratterizzanti il fabbricato, in particolare le murature e i solai.

Le strutture verticali sono caratterizzate dalle seguenti tipologie murarie: i) blocchi di pietra a spacco con buona tessitura, presente in modo esteso nell'edificio; ii) mattoni pieni e malta di calce, presente in modo sporadico nell'edificio (pilastri murari e alcune pareti nel loro intorno), caratterizzata dalla presenza di giunti sottili o malta buona (coefficiente migliorativo pari a 1.5 già applicato in Tabella 1-2). Si sottolinea come per le analisi in campo nonlineare, i moduli E e G siano stati dimezzati.

Tabella 1-2: Parametri meccanici associati alle murature presenti nell'edificio

Tipologia di muratura	f_m [N/cm²]	τ_0 [N/cm²]	E [N/mm²]	G [N/mm²]	w [kN/m³]
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	320	6.5	1740	580	21
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	480	11.4	2250	750	18

Le travi in c.a. sono realizzate con barre longitudinali lisce 4+4Ø8 e staffe Ø6 due bracci con passo 25 cm. Al piano terra hanno dimensioni 65x22 cm mentre al primo piano 65x14 cm e 50x14 cm. Il calcestruzzo è di classe cls C12/15 e l'acciaio ha le seguenti caratteristiche: $f_{yk} = 300$ N/mm², $f_{tk} = 420$ N/mm², allungamento a rottura pari al 20%.

Le strutture orizzontali sono considerate come solai mediamente flessibili, con travetti ipotizzati ben collegati e il tavolato ben ammorsato alla muratura perimetrale. Si adottano i seguenti valori di rigidità: $G = 100$ MPa; $E_x = 12000$ MPa; $E_y = 1000$ MPa.

1.5 CHIUSURE TRASPARENTI

Per quanto riguarda le chiusure trasparenti, importanti dal punto di vista energetico ma non dal punto di vista strutturale non c'è una documentazione particolare al riguardo. Dalla documentazione fotografica a disposizione si possono riconoscere dei serramenti con infissi metallici e vetro singolo. Si possono distinguere due diverse tipologie di finestre:

- **FIN1:** tipologia di finestra presente nel corpo principale più allungato NO-SE nel quale sono presenti le aule e il corridoio principale. Da quanto emerge dalla documentazione fotografica sono finestre a doppia anta con soprafinestra. L'apertura complessiva del foro finestra è pari a 160 cm di larghezza per 220 cm di altezza.
- **FIN2:** tipologia di finestra presente nel corpo secondario in direzione SO-NE nel quale sono presenti i bagni, la mensa e il laboratorio. L'apertura complessiva del foro finestra è pari a 100 cm di larghezza e 180 cm di altezza.

1.6 IMPIANTI E AMBIENTI INTERNI

Per eseguire le valutazioni di tipo energetico è necessaria una conoscenza degli impianti presenti nell'edificio.

1.6.1 SISTEMA DI GENERAZIONE

L'edificio presenta un impianto di riscaldamento centralizzato. Si presume che la caldaia sia situata al piano seminterrato. Dalle informazioni a disposizione risulta essere installata una caldaia a condensazione, la cui potenza nominale può essere stimata intorno ai 200 kW. La regolazione si presume sia centralizzata in caldaia.

Per quanto riguarda la produzione di acqua calda sanitaria si considera la produzione combinata con il sistema di riscaldamento.

1.6.2 TERMINALI DI IMPIANTO

Da quanto si è potuto osservare nella documentazione fotografica, l'impianto di riscaldamento è costituito da radiatori in ghisa a parete, allocati sotto le finestre.

1.6.3 ILLUMINAZIONE

L'intero edificio presenta corpi illuminanti a fluorescenza. La potenza complessiva installata si può stimare attorno ai 15 kW.

1.6.4 LOCALI

L'altezza media tra pavimento e solaio è di circa 4.2 m, non risulta essere presente nessun tipo di controsoffitto.

1.7 DESTINAZIONE D'USO

Ai fini della valutazione energetica dell'edificio è necessario identificare la destinazione d'uso dei locali in modo da valutare il periodo di accensione degli impianti, l'occupazione dei vari locali, l'accensione delle luci, ecc.

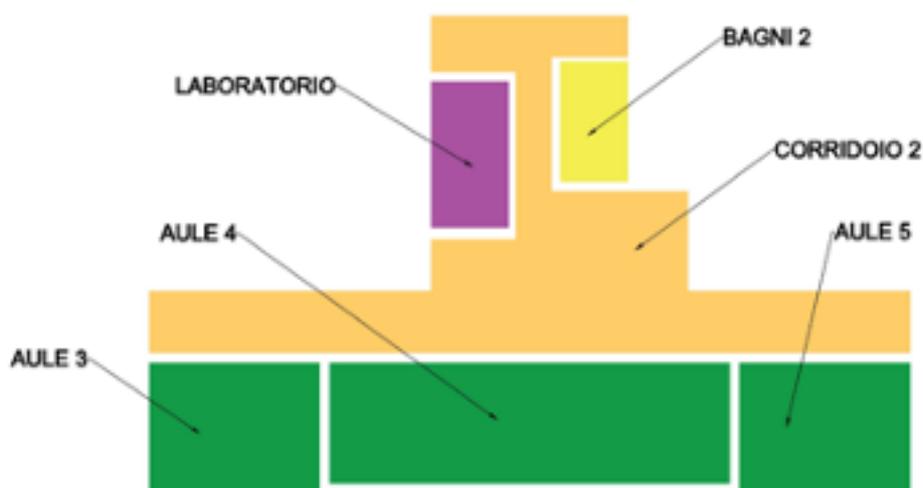


Figura 1-6: Zone termiche piano primo.

Viene di seguito proposta la suddivisione dei locali a seconda della destinazione d'uso e la suddivisione nelle diverse zone termiche, definite accorrendo locali con caratteristiche simili di esposizione solare, occupazione, tipo di impianti da cui sono servite e relative temperature di set point, ecc.

Il numero di zone termiche in totale è pari a 15.

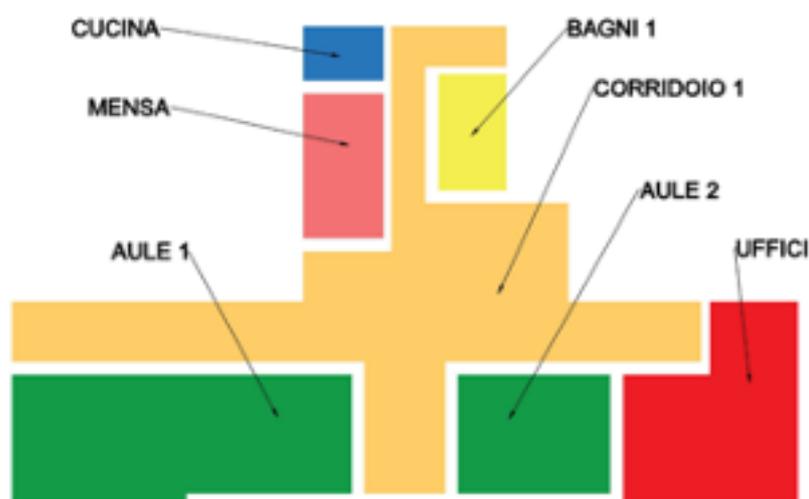


Figura 1-7: Zone termiche piano rialzato.

Le zone termiche definite sono riportate nella tabella seguente:

Tabella 1-3: Zone termiche definite nei modelli

<i>Zona termica</i>	<i>Destinazione d'uso</i>	<i>Area pianta [m²]</i>	<i>Volume climatizzato[m³]</i>
1	Seminterrato	91.86	275
2	Corridoio 1	202.08	828.528
3	Corridoio 2	205.25	841.525
4	Aule 1	101.5	416.15
5	Aule 2	43.11	176.751
6	Uffici	69.52	285.032
7	Mensa	27.23	111.643
8	Cucina	10.12	41.492
9	Bagni 1	19.92	81.672
10	Aule 3	55.36	226.976
11	Aule 4	118.75	486.875
12	Aule 5	55.36	226.976
13	Laboratorio	27.61	113.201
14	Bagni 2	20.76	85.116
15	Sottotetto	519	1167

2 VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITA' 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 ζ_E definito nelle NTC2018 [1] come il rapporto tra l'azione sismica massima sopportabile dalla struttura (comunemente espressa attraverso l'accelerazione orizzontale massima sul 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 sul sito di riferimento, PGA_D). L'intero processo ha riguardato le seguenti fasi di seguito dettagliate:

- Definizione dei parametri di pericolosità sismica di sito;
- Modellazione numerica della struttura;
- Analisi strutturale;
- Verifiche allo Stato Limite Salvaguardia della Vita (SLV) allo stato di fatto;
- Determinazione della PAM (perdita annuale media) e della classe di rischio sismico.

2.1 PERICOLOSITA' SISMICA DEL SITO

Poiché l'edificio in oggetto è ad uso scolastico, ricade all'interno della Classe d'uso III, 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 1,5, si ottiene un valore periodo di riferimento dell'azione sismica V_R pari a 75 anni.

Per quanto riguarda le caratteristiche del sito su cui è stato edificato il fabbricato, la categoria del sottosuolo è B e la superficie topografica è T_1 .

Di seguito si riportano Tabella 2-1 una sintesi dei parametri di sito.

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

Vita Nominale, V_N	50 anni
Classe d'uso	III
Coefficiente d'uso, C_u	1,5
Periodo di riferimento V_R	75 anni
a_g/g (SLV)	0.285 ($T_R=712$ anni)
a_g/g (SLD)	0.120 ($T_R=75$ anni)
F_0 (SLV)	2.376
T_C^* (SLV)	0.335 s
C_C (SLV)	1.369
Categoria del sottosuolo	B
Superficie topografica	T1
S_S (SLV)	1.129
S_T	1.000

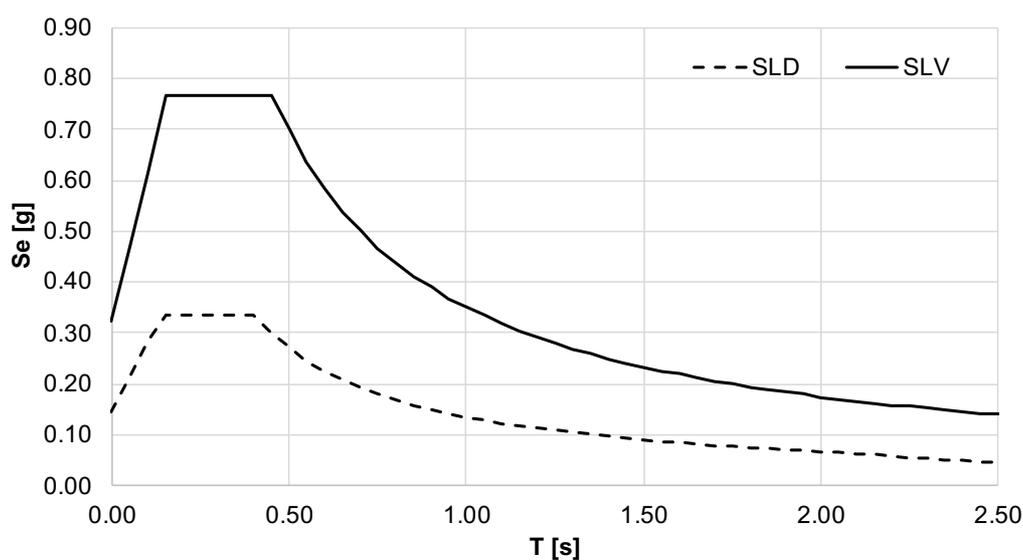


Figura 2-1: Spettri di risposta elastici per SLD e SLV

2.2 MODELLAZIONE STRUTTURALE

Per l'analisi della risposta globale del caso studio è stato elaborato e calibrato un modello a telaio equivalente della struttura attraverso il software TREMURI [4, 5], sviluppato presso l'Università degli Studi di Genova a partire dal 2001, successivamente implementato nel software commerciale 3Muri distribuito dalla S.r.l. S.T.A Data (2012). L'approccio a telaio equivalente è esplicitamente previsto

sia nelle Norme Tecniche delle Costruzioni [1, 2], nel caso di edifici ordinari, che nelle “Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale” [6]. In accordo con i principi della modellazione a telaio equivalente, che si ispira ad una concezione scatolare della struttura in muratura, la struttura portante è identificata dalle pareti murarie e dai diaframmi orizzontali (volte in muratura o solai lignei, metallici o in calcestruzzo armato). Le pareti sono propriamente gli elementi portanti, mentre i diaframmi orizzontali, oltre a trasferire i carichi gravitazionali sulle pareti, sono considerati come elementi di collegamento e irrigidimento, da cui dipende la distribuzione delle azioni sismiche inerziali orizzontali fra le varie pareti. Il ruolo degli orizzontamenti è rilevante, in particolare quando nell’edificio sono presenti allineamenti murari di diversa rigidezza e resistenza. Il comportamento flessionale locale dei solai e la risposta fuori piano delle pareti non sono considerati in questo modello che analizza la risposta globale dell’edificio governata dal comportamento nel piano delle pareti. Secondo la rappresentazione a telaio, ipotizzando un comportamento delle pareti nel piano, ciascuna parete dell’edificio è suddivisa in maschi (pannelli murari) e fasce (travi di collegamento in muratura), collegati da porzioni rigide (nodi). L’osservazione dei danni dovuti al sisma mostra, infatti, che solo raramente (nel caso di geometria molto irregolare o aperture molto ridotte) si riscontrano danneggiamenti nei nodi, la cui deformazione può essere considerata trascurabile rispetto a quella degli elementi (maschi e fasce) che in essi convergono; questo è vero in particolare nella fase non lineare di questi ultimi (è questa la ragione per la quale non ci si può aspettare da un modello a telaio equivalente una perfetta aderenza alla risposta elastica, derivata da un’identificazione dinamica modale). [L’idealizzazione in telaio equivalente delle pareti murarie può essere eseguita riferendosi a diverse regole di natura sostanzialmente empirica e che si ispirano all’osservazione sistematica del danno. Nel caso specifico sono state assunte a riferimento le regole proposte in Lagomarsino et al. \(2013\) \[5\] e implementate nel software 3Muri.](#) Gli elementi in muratura, coerentemente con quanto proposto nelle NTC2018 al Paragrafo 7.8.1.5.4 [1], sono modellati come elementi trave non lineare (nello specifico caratterizzati da sei gradi di libertà con un legame a resistenza limitata e degrado della rigidezza in fase non lineare).

Nelle verifiche allo stato di fatto di fatto e di progetto dell’edificio è stato adottato un legame bilineare secondo NTC2018 [1] sia per i maschi che per le fasce (per le quali è stato trascurato il contributo di eventuale resistenza residua). La resistenza dei maschi murari è calcolata secondo le espressioni riportate: al 7.8.2.2.1 delle NTC2018 [1] nel caso del meccanismo a pressoflessione (equazione 7.8.2); al capitolo C8.7.1 della Circolare [2] nel caso del meccanismo a taglio per fessurazione diagonale (equazione C8.7.1.16). Nel caso delle fasce murarie, sono stati assunti i criteri proposti al 7.8.2.2.4 delle NTC2018 [1]. La condizione di collasso dell’elemento è definita, nel caso di legame

secondo NTC2018 [1], in funzione della soglia assunta per il drift limite, differenziata per le risposte a taglio e a pressoflessione.

I diaframmi orizzontali (solai o volte) sono modellati come elementi membrana ortotropi, con 3 o 4 nodi (con due gradi di libertà per ciascun nodo); assegnato uno spessore alla lastra, in funzione della direzione principale di orditura sono definiti il modulo di Young E_1 , quello nella direzione perpendicolare E_2 , il coefficiente di Poisson ν ed il modulo di taglio G_{12} . Le grandezze E_1 e E_2 simulano pertanto il collegamento che il solaio esercita tra le pareti della relativa direzione; G_{12} rappresenta invece la rigidità a taglio del solaio nel piano, che governa la ripartizione delle azioni orizzontali tra le diverse pareti. L'elemento finito di riferimento considerato è quindi un elemento piano in stato piano di tensione.

La possibilità di modellare i solai come elementi membrana caratterizzati da rigidità finita risulta particolarmente cruciale nel caso di manufatti caratterizzati da orizzontamenti per i quali l'ipotesi di rigidità infinita (adottata in altri programmi di calcolo) risulta del tutto inadeguata; è il caso di solai lignei oppure orizzontamenti voltati.

I pilastri in muratura sono modellati come elementi tridimensionali, ovvero in grado di sopportare azioni orizzontali secondo qualsiasi direzione (diversamente dai maschi murari che funzionano solo nel piano). I criteri di resistenza sono gli stessi dei maschi e, nel caso di pressoflessione deviata, viene assunto cautelativamente un dominio di resistenza rettilineo.

Infine, si precisa che è anche possibile modellare con comportamento non lineare ulteriori elementi strutturali quali catene metalliche, travi (in legno o in acciaio) ed elementi in cemento armato (travi, pilastri, setti). Quest'ultima caratteristica è rilevante quando si vuole valutare l'efficace di diverse tecniche di consolidamento, che spesso fanno uso di elementi di moderna tecnologia, affiancati agli elementi originali.

Dal punto di vista operativo il software di calcolo 3Muri opera attraverso un pre-processor suddiviso in tre diverse fasi:

1. ambiente "Pareti": vengono inseriti gli allineamenti in pianta di tutte le pareti che sono presenti ai diversi piani dell'edificio; tali assi coincidono in genere con il piano medio della parete ma nel caso di pareti con rastremazioni non simmetriche ai diversi piani è necessario scegliere un piano medio unico rappresentativo per l'intera parete; pareti in falso possono essere considerate ma è opportuno modellare esplicitamente il disallineamento solo quando davvero significativo; ciascuna parete deve, di norma, essere collegata almeno a due pareti incidenti (tendenzialmente ortogonali) alle estremità, in modo da creare il comportamento scatolare necessario quando si assume per le pareti la sola risposta nel piano;

2. ambiente “Struttura”: operando per livelli, in ciascuna parete vengono precisate le caratteristiche geometriche (spessore), meccaniche (materiali) e le aperture presenti, oltre ad altri dettagli quali la presenza di cordoli o catene; in tale fase si definiscono anche gli orizzontamenti (tipologia ed orditura) e gli altri elementi strutturali (pilastri, travi, setti, ecc.);
3. ambiente “Analisi”: in questo ambiente viene creata automaticamente dal software una mesh a telaio equivalente (dimensioni dei maschi e delle fasce, forma dei nodi rigidi, ecc.), minimizzando i gradi libertà del modello ma garantendo l’assenza di labilità.

Di seguito si riporta la vista 3-D del modello strutturale (Figura 2-2) e il numero delle pareti in pianta (Figura 2-3).

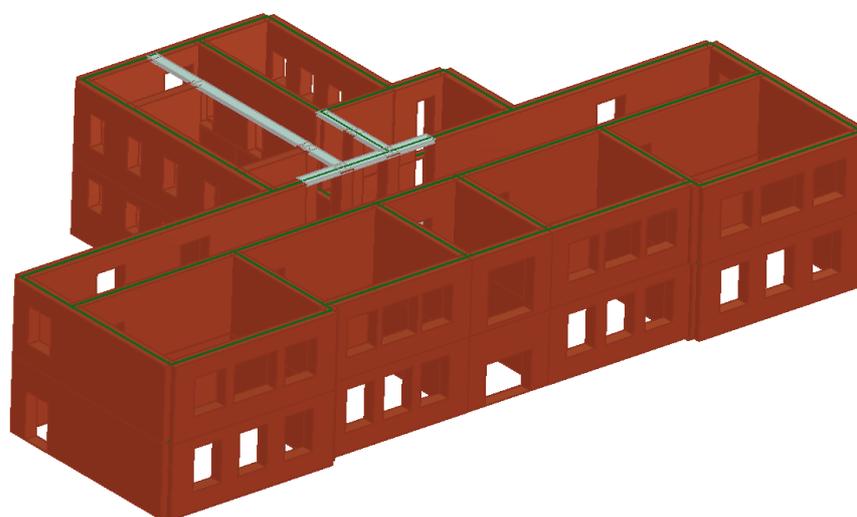


Figura 2-2: Vista assonometrica del modello strutturale.

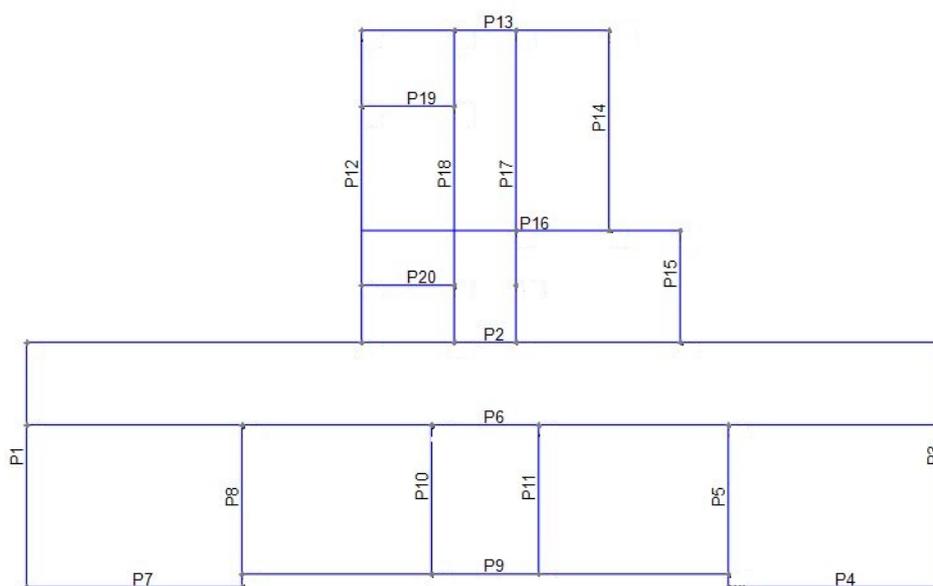


Figura 2-3: Numerazione delle pareti del modello di calcolo

2.3 ANALISI STRUTTURALE

L'analisi strutturale è stata condotta in accordo con le prescrizioni fornite dalle NTC [1]. Tale analisi consiste nell'applicare all'edificio, oltre ai carichi gravitazionali nella combinazione $G_k + 0,6Q_k$, due diverse distribuzioni di forze orizzontali. L'analisi è usualmente svolta in controllo misto forze-spostamenti per cogliere anche la fase di softening della curva globale. In particolare, lo spostamento di un punto di controllo della struttura d_c viene incrementato progressivamente ricercando la risultante delle forze orizzontali tale da equilibrare la configurazione deformata. La norma prevede che vengano applicate due distribuzioni di forze sulla struttura, in questo studio preliminare si è fatto riferimento alle due distribuzioni usate più frequentemente: Uniforme (rappresentativo di quando nell'edificio si forma un meccanismo di piano debole a piano terra) e Triangolare Inversa (coerente con l'amplificazione dinamica che si realizza nella fase elastica iniziale) in modo da avere un'idea sulla sensibilità della risposta a tale scelta.

Preliminarmente a tali analisi, è stata condotta un'analisi modale, per definire i modi principali di vibrazione della struttura e le corrispondenti masse partecipanti: le deformate modali sono una caratteristica intrinseca della struttura e mettono in evidenza il suo comportamento, comprese le eventuali debolezze. Nella seguente tabella sono riportati i risultati dell'analisi, considerando i primi 10 modi di vibrazione ed evidenziando quelli più significativi.

Dall'analisi modale, osservando sia le masse partecipanti che le figure che illustrano le forme modali, si osserva come l'edificio sia caratterizzato dalla presenza di modi locali e non abbia conseguentemente un comportamento d'insieme più regolare, dovuto alla presenza di solai mediamente flessibili.

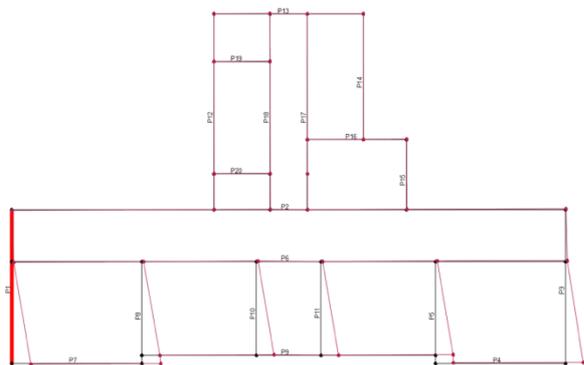
Tabella 2-2: Risultati dell'analisi modale.

Modo	T [s]	m_x [kg]	M_x [%]	m_y [kg]	M_y [%]	m_z [kg]	M_z [%]
1	0.310	634511	26.34	1671	0.07	58	0
2	0.274	27923	1.16	1658138	68.84	570	0.02
3	0.266	460502	19.12	133735	5.55	85	0
4	0.241	1536	0.06	84147	3.49	16	0
5	0.209	12815	0.53	189094	7.85	2310	0.1
6	0.198	822546	34.15	16662	0.69	986	0.04
7	0.189	1754	0.07	557	0.02	72	0
8	0.187	37359	1.55	441	0.02	69	0
9	0.180	35272	1.46	1969	0.08	762	0.03
10	0.156	109	0	2210	0.09	289	0.01

Di seguito invece si riportano le forme modali più significative.

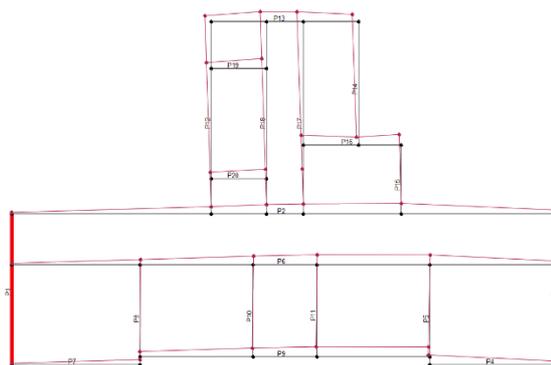
Modo 1: Traslazione locale in direzione X

Non coinvolge la struttura nel suo complesso ma solamente le pareti P7, P9, P4.



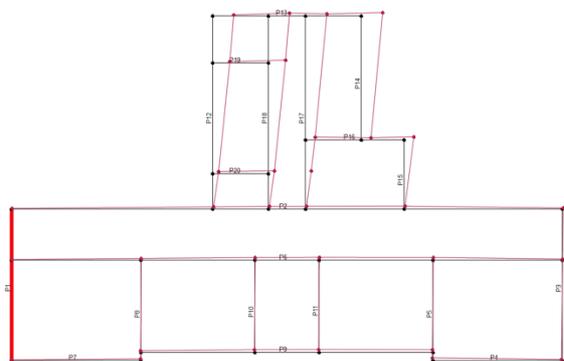
Modo 2: Traslazione in direzione Y

Viene coinvolta quasi il 70% della massa partecipante, favorendo la partecipazione di un elevato numero di elementi del sistema sismoresistente. Nonostante la presenza di solai mediamente flessibili è comunque garantito un comportamento globale della struttura dovuto ad una buona simmetria in questa direzione.

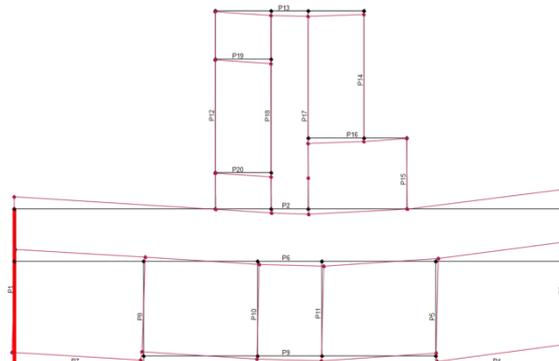


Modo 3: Traslazione locale in direzione X

Analogamente al modo di vibrazione 1, si ha una traslazione direzione X che coinvolge solamente alcuni elementi strutturali.



Modo 5: Traslazione in direzione Y



Modo 6: Traslazione locale in direzione X

Viene coinvolta il 34% della massa partecipante in direzione X. La struttura è coinvolta nel suo complesso con un buon numero di elementi strutturali.

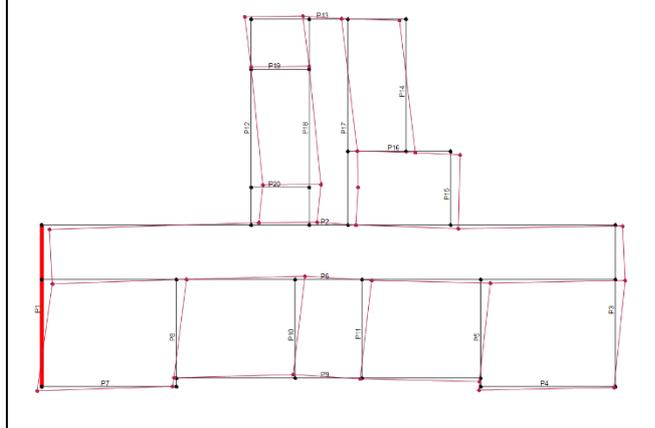


Figura 2-4: Forme modali più significative

Successivamente alle analisi modali sono state eseguite le analisi statiche nonlineari (pushover) per valutare la sicurezza sismica del manufatto e confrontare il beneficio ottenuto adottando diverse tecniche di consolidamento sismico, in modo da individuare la strategia di intervento più idonea.

Da esse sono state ottenute le curve che riportano il taglio di base del fabbricato in funzione dello spostamento medio dei nodi situati all'ultimo livello pesato sulla massa gravante in ciascuno (si precisa che l'ultimo livello è quello di gronda, non essendo stata modellata la struttura del tetto, considerato solo come massa equivalente aggiunta). Valutando separatamente gli effetti dell'applicazione delle forze per le due direzioni X e Y sono state inizialmente effettuate in totale 8 analisi non lineari (push-over), senza eccentricità, per limitare l'onere computazionale. Nel confronto finale (§4.3.2) con i successivi stati di progetto consolidati sono state condotte le 24 analisi considerando l'eccentricità accidentale per tenere in considerazione che una distribuzione delle masse differente da quanto previsto possa essere penalizzante ai fini della sicurezza. La normativa prevede di traslare ad ogni piano il centro di massa del 5% della dimensione massima ortogonale all'azione sismica.

In Figura 2-5 si riportano a titolo esemplificativo due curve pushover.

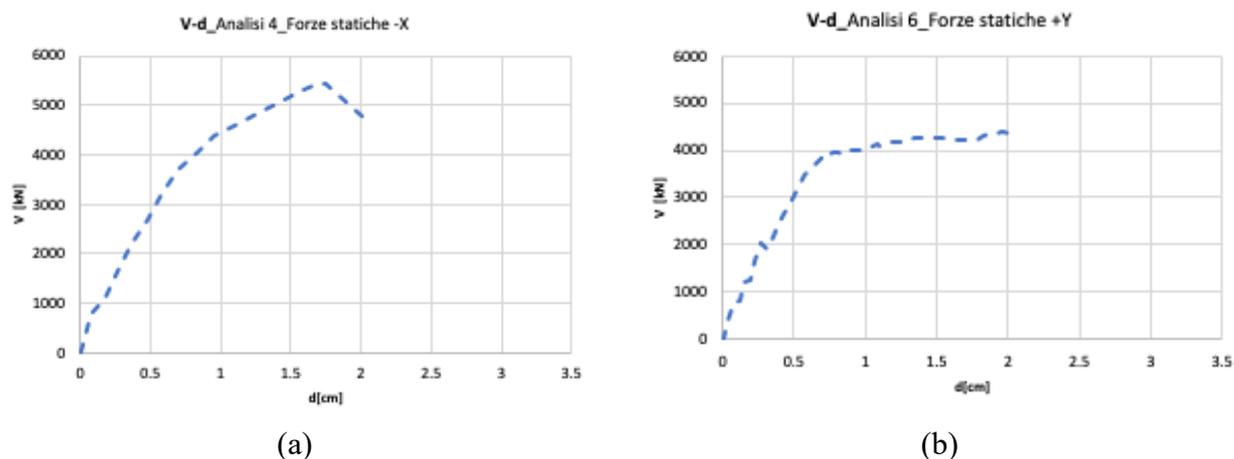


Figura 2-5: Un esempio di curva pushover per la direzione X (a) e per direzione Y (b)

Dall'analisi dei risultati, controllando la distribuzione del taglio di base nelle diverse pareti, con l'obiettivo di definire quelle che assorbono le percentuali più elevate, si osserva come in direzione X siano presenti due pareti predominanti, P2 e P6, che assorbono circa il 60% del taglio di base.

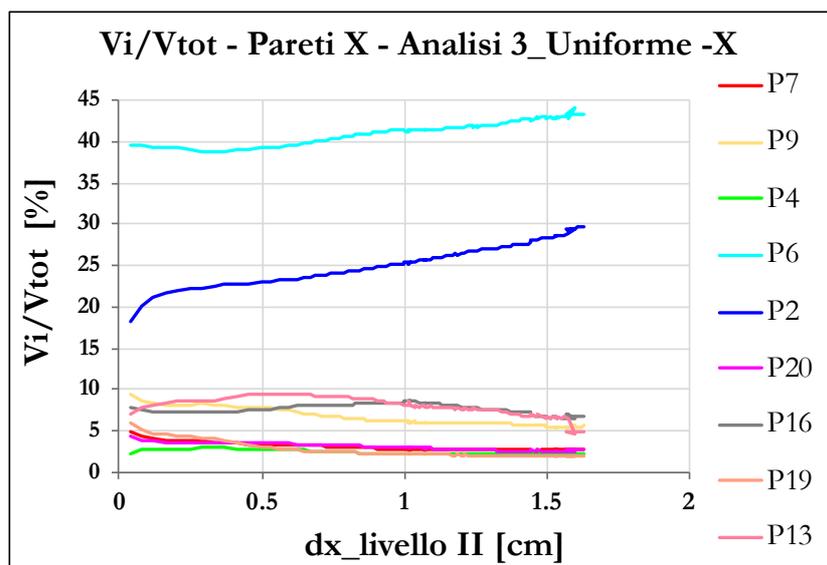


Figura 2-6: Esempio dell'andamento del taglio di base per un'analisi in direzione X

In direzione Y si individuano tre comportamenti analoghi: le pareti P12 e P17 caratterizzate da elevate aperture e bassa resistenza; le pareti P14 e P15 assorbono basse percentuali di taglio e non sono significative nell'analisi; le pareti P1, P8, P10, P11, P5 e P3 caratterizzate quasi totalmente da maschi murari di elevate dimensioni, hanno una notevole rigidezza e complessivamente assorbono l'80% del taglio di base.

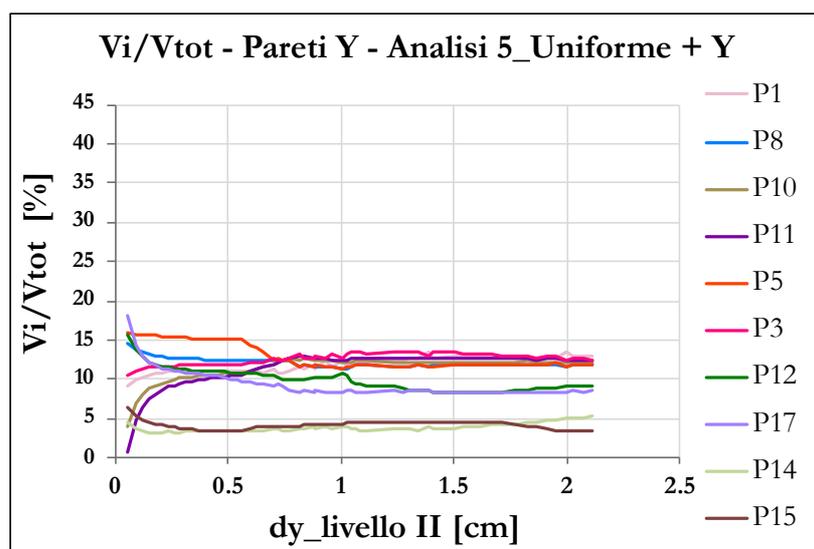


Figura 2-7: Esempio dell'andamento del taglio di base per un'analisi in direzione Y

Dall'analisi del danneggiamento delle pareti si osserva come esso sia distribuito uniformemente su entrambi i livelli, a causa della flessibilità dei solai. Tuttavia, in direzione Y, la conformità della costruzione, come evidenziato anche dall'analisi modale, garantisce una migliore collaborazione tra le pareti, permettendo una redistribuzione complessiva dell'azione. Anche dall'osservazione dei drift di interpiano si riscontrano deformazioni omogenee su tutte le pareti, senza elementi con deformazioni decisamente maggiori. In direzione X, al contrario, tale redistribuzione non avviene: la perdita percentuale di taglio assorbito dalla P2 non viene redistribuita alle altre pareti causando l'arresto della Pushover. In generale, la presenza di pareti che ad un certo punto dell'analisi subiscono un incremento significativo del danneggiamento e quindi che assumono un comportamento indipendente, è sinonimo della presenza di solai flessibili.

2.4 VERIFICA STATO DI FATTO ALLO SLV

Al fine di condurre le verifiche di sicurezza, le curve pushover sono state convertite in curve di capacità, adottando i criteri proposti nelle Norme Tecniche. Il confronto della curva di capacità con la domanda è stato eseguito adottando i principi delle NTC [1] e della Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri - Patrimonio Culturale del 9/02/2011 - Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale [6]. Tra i diversi approcci proposti in letteratura per il confronto tra la domanda e la capacità, nelle Norme Tecniche delle Costruzioni è adottato il Metodo N2 [7] che si basa sull'adozione di spettri anelastici.

Il metodo richiede necessariamente la conversione della curva pushover originaria in bilineare equivalente. Essa è stata definita sulla base dei criteri suggeriti nella Circolare al capitolo C7.3.4.2 [2]. Lo spostamento ultimo della curva pushover è stato definito inoltre in ottemperanza ai criteri

indicati al capitolo C8.7.1.3.1, ossia come minimo tra quello corrispondente al taglio residuo pari all'80% e quello corrispondente al raggiungimento della soglia limite della deformazione angolare a SLC in tutti i maschi murari di un qualunque livello di una qualunque parete ritenuta significativa ai fini della sicurezza.

Definita la bilineare equivalente e stabilita la soglia di spostamento associata allo stato limite assunto a riferimento, si è proceduto al calcolo del valore dell'accelerazione massima $a_{g,SL}$ compatibile con il soddisfacimento dei diversi stati limite, i relativi periodi di ritorno e la relativa frequenza media annua di superamento per ogni Stato Limite. Noti i valori di $a_{g,SL}$ è possibile procedere alla verifica computando, per ciascun stato limite, il fattore di sicurezza ζ_E , pari al rapporto $a_{g,SL}/a_{g,T_{R,SL}}$.

In Tabella 2-3 sono riportati i parametri di verifica, le analisi più gravose nelle due direzioni, sono evidenziate in giallo. In tabella il parametro ζ è chiamato α . E' possibile notare come tali coefficienti siano ampiamente minori di 1, indice di una notevole debolezza causata prevalentemente dalla presenza di solai mediamente flessibili che non svolgono la funzione di ripartizione dell'azione sismica tra le pareti competenti.

Tabella 2-3: Prospetto riassuntivo dell'analisi sismica

N.	Inserisci in relazione	Dir. sisma	Carico sismico	Eccentricità [cm]	Dmax SLV [cm]	Du SLV [cm]	q* SLV	Dmax SLD [cm]	Du SLD [cm]	Dmax SLO [cm]	Do SLO [cm]	α SLV	α SLD	α SLO
1	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Uniforme	0.00	3.10	2.57	2.60	1.16	1.45	0.84	1.45	0.855	1.184	1.505
2	<input checked="" type="checkbox"/>	+X	Forze statiche	0.00	3.56	2.70	2.92	1.41	1.61	1.05	1.61	0.787	1.117	1.421
3	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Uniforme	0.00	3.39	1.85	2.95	1.33	1.48	0.98	1.48	0.598	1.092	1.389
4	<input checked="" type="checkbox"/>	-X	Forze statiche	0.00	3.83	2.03	3.04	1.55	1.74	1.17	1.74	0.574	1.102	1.403
5	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Uniforme	0.00	3.62	2.01	3.57	1.41	1.79	1.04	1.26	0.606	1.218	1.162
6	<input checked="" type="checkbox"/>	+Y	Forze statiche	0.00	4.08	2.01	4.27	1.65	1.34	1.24	0.94	0.533	0.837	0.795
7	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Uniforme	0.00	3.41	2.31	3.35	1.30	1.85	0.94	1.38	0.719	1.329	1.335
8	<input checked="" type="checkbox"/>	-Y	Forze statiche	0.00	3.86	1.97	4.01	1.54	1.38	1.15	0.97	0.555	0.913	0.876

2.5 VERIFICA 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 ai soli SLU (punto 8.3 delle NTC 2018 [1]).

2.6 CALCOLO DELLA CLASSE DI RISCHIO SISMICO

A seguito delle analisi effettuate, è stata calcolata la PAM, perdita economica annuale media attesa, parametro economico che definisce il costo di riparazione dei danni prodotti dagli eventi sismici che

si manifestano nel corso della vita della costruzione, ripartito annualmente ed espresso come percentuale del costo di ricostruzione, CR. A partire dal valore di PAM e dall'indice di sicurezza ζ_{SLV} è possibile associare all'edificio una Classe di Rischio Sismico, ad esempio attraverso il metodo convenzionale suggerito dalle Linee guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni D.M. 9 Gennaio del 2020 [8]. Sebbene tale classificazione sia stata calibrata specificatamente per gli edifici residenziali e dunque non estendibile tout court all'edilizia scolastica, in questo lavoro viene applicata a titolo puramente indicativo al fine di fornire una indicazione generale sui benefici in termini di salto di classe ottenuti dall'implementazione degli interventi di rinforzo sismico.

Per il metodo convenzionale proposto nel D.M. 58 del 2017 [8], la PAM è l'area sottesa alla curva rappresentante le perdite economiche dirette definita dai valori di frequenza media annua di superamento, λ_{SLi} e i valori di perdita associati presenti nelle suddette Linee Guida [8]. L'edificio in questione ricade nella Classe di rischio_D, determinata come il minimo della classe corrispondente all'Indice di sicurezza all'SLV ($Classe_{IS-V}$) e la $Classe_{PAM}$ PAM (Perdita Media Annuata attesa).

3 VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA ENERGETICA

3.1 DEFINIZIONE DEI MODELLI

La valutazione energetica dello stato di fatto e degli interventi migliorativi è stata fatta utilizzando due modelli diversi:

- Modello quasi stazionario mediante l'utilizzo del software commerciale *Blumatica*.
- Modello dinamico mediante l'utilizzo del software *TRNSYS*.

Il primo modello permette di effettuare la valutazione energetica secondo la normativa vigente che non prevede un calcolo particolarmente dettagliato. Il modello permette di determinare la prestazione energetica dell'edificio, corrispondente all'energia totale consumata dall'edificio climatizzato per metro quadro di superficie ogni anno (kWh/m²anno). Individuato il fabbisogno è poi possibile determinare la classe di efficienza energetica dell'edificio.

Il secondo modello permette di eseguire una stima più precisa. Infatti, un modello dinamico prevede una simulazione dell'edificio ora per ora, a differenza del modello quasi stazionario che utilizza degli intervalli di tempo di un mese e restituisce dei valori indicativi sufficienti per determinare la classe energetica, ma spesso non molto precisi in particolar modo per il regime estivo, quando gli apporti solari sono predominanti. Il modello dinamico, tuttavia, non permette di valutare direttamente il fabbisogno di energia primaria dell'edificio, ma soltanto il fabbisogno sensibile di energia termica finale per la climatizzazione invernale ed estiva.

3.1.1 MODELLO QUASI-STAZIONARIO

La creazione del modello quasi-stazionario prevede i seguenti passaggi:

- Definizione dei componenti dell'involucro delimitanti il volume climatizzato.
- Definizione dei volumi climatizzati e non e delle superfici disperdenti e non attraverso la creazione, mediante un input grafico, della geometria dell'edificio
- Suddivisione in zone termiche e locali secondo la destinazione d'uso
- Definizione degli impianti

3.1.1.1 Dati generali

Definizione della destinazione d'uso dell'edificio come E.7, adibito ad attività scolastiche a tutti i livelli e assimilabili.

I dati climatici sono relativi al comune di Visso.

3.1.1.2 Input grafico, dati involucro

Attraverso l'input grafico è possibile definire la geometria dell'edificio per ogni livello impostando come confini i vari componenti dell'involucro.

Oltre al disegno in pianta con le tipologie murarie vengono definiti il pavimento e il soffitto del livello o del particolare locale, la quota del pavimento e l'altezza interpiano. Per ogni contorno chiuso viene definito un locale, da assegnare a una delle zone termiche definite, e il programma calcola in automatico superficie in pianta e volume climatizzato. Occorre inoltre definire le informazioni relative alla temperatura interna, al ricambio d'aria interno a seconda della destinazione d'uso e alla potenza installata per l'illuminazione. Oltre al disegno in pianta con le tipologie murarie vengono definiti il pavimento e il soffitto del livello o del particolare locale, la quota del pavimento e l'altezza interpiano. Per ogni contorno chiuso viene definito un locale, da assegnare a una delle zone termiche definite, e il programma calcola in automatico superficie in pianta e volume climatizzato. Occorre inoltre definire le informazioni relative alla temperatura interna, al ricambio d'aria interno a seconda della destinazione d'uso e alla potenza installata per l'illuminazione.

3.1.1.3 Dati impianti

La sezione dedicata agli impianti permette di definire i sistemi di impianto di cui è dotato l'edificio. C'è la possibilità di definire i seguenti tipi di impianti. Nella creazione del modello sono stati definiti soltanto l'impianto di riscaldamento centralizzato e l'impianto per la produzione di acqua calda sanitaria, combinato con il riscaldamento.

Il regime di funzionamento, secondo il calcolo regolamentare per una valutazione di tipo A.2, è continuo. La valutazione dei rendimenti di emissione, regolazione e distribuzione dipende dai tipi di impianti presenti.

- Emissione: radiatori su parete esterna non isolata con temperatura di mandata di progetto di 70°C. Il rendimento è pari a 90%
- Regolazione: di tipo manuale, con solo termostato di caldaia. Il rendimento è pari a 89%
- Distribuzione: impianto centralizzato con montanti non isolati correnti nel lato interno delle pareti esterne. Il rendimento è pari a 93.8%.

Per quanto riguarda la generazione si considera una caldaia a condensazione a gas naturale con potenza utile nominale pari a 200 kW. Rendimento a carico nominale 93.3%, rendimento a carico intermedio 99.3%.

3.1.2 MODELLO DINAMICO

Per la determinazione del fabbisogno di energia termica (solo sensibile) per la climatizzazione estiva e invernale è stato creato un modello dinamico attraverso l'uso del software *TRNSYS*.

Lo sviluppo del modello per la stima del fabbisogno del caso studio in esame può essere distinto in due fasi differenti:

- Creazione del modello dell'edificio multi-zona tramite l'utilizzo di TRNBUILD. Esso è un'interfaccia grafica che permette di definire i parametri della Type 56 da utilizzare nella simulazione, vista la complessità dei parametri degli edifici multi-zona
- Creazione del modello dinamico tramite l'utilizzo di *Simulation Studio*, attraverso il collegamento della Type dell'edificio definita in TRNBUILD con altre Type di input definite dall'utente (dati climatici, temperature di riscaldamento, occupazione dei locali, ecc.).

3.1.2.1 Definizione dati generali modello

Prima di effettuare la suddivisione in zone termiche vengono definiti i dati generali dell'edificio relativi all'involucro, alle temperature di set point, alla ventilazione e ai carichi interni.

- **Componenti opachi involucro**

Per definire i componenti dell'involucro sono stati immessi manualmente i dati di conduttività, densità e capacità di tutti i materiali di cui sono costituiti i singoli componenti.

Tabella 3-1: Componenti opachi.

<i>Struttura</i>	<i>Trasmittanza [W/m²·K]</i>
Mur ext 65	1.42
Mur ext 85	1.23
Mur int 10	3.30
Mur int 50	1.172
Mur int 65	1.42
Sol 0	1.01
Sol 1	1.69
Sol 2	2.31
Tetto	2.00

Sono state effettuate delle semplificazioni nella definizione della stratigrafia dei componenti dell'involucro, tenendo conto dei principali materiali che determinano le proprietà termiche delle strutture.

- **Componenti vetrati involucro**

I componenti finestrati sono stati definiti tenendo conto del rapporto tra la superficie del telaio e la superficie totale del serramento. Sono state considerati vetri singoli con le proprietà definite dalla libreria di *TRNSYS* e telaio metallico con trasmittanza pari a 7 W/m²·K. I coefficienti convettivi di

scambio termico, come per le superfici opache, sono stati posti pari a $3.05 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ lato interno e $17.78 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ lato esterno.

- **Ventilazione e infiltrazione**

Per quanto riguarda il ricambio d'aria all'interno dell'edificio sono stati definiti:

- Infiltrazione base, pari a un ricambio orario di 0.15 volumi/h. Questo è costante per tutto il periodo della simulazione
- Ventilazione data dall'areazione dei locali, pari a un ricambio orario di 0.25 volumi/h attivo soltanto per il tempo di occupazione dei locali e nullo nei periodi in cui i locali sono chiusi. Il controllo sulla ventilazione avviene tramite uno scheduling inserito nei dati di input nel modello dinamico in *Simulation studio*.

- **Riscaldamento e raffrescamento**

La temperatura di set point per il riscaldamento è stata posta pari a 20°C per gli orari di occupazione e 16°C per il tempo restante. Sono stati definiti due diversi controlli al riscaldamento poiché gli uffici hanno degli orari diversi rispetto alle aule scolastiche. Anche in questo caso il controllo di accensione e spegnimento avviene tramite uno scheduling apposito. La potenza disponibile viene ipotizzata illimitata per permettere al modello di raggiungere subito le condizioni di temperatura interna desiderata e calcolare in maniera precisa il fabbisogno.

- **Guadagni interni**

I carichi interni generati dalle persone sono già presenti nelle librerie e vengono impostati nelle singole zone termiche. Il carico termico dato dalle lampade si stima pari a 10 W/m^2 .

- **Input**

Si sono definiti diversi input esterni da collegare alla type dell'edificio multi-zona all'interno di *Simulation Studio*. Gli input esterni servono per il controllo sull'attivazione di riscaldamento, raffrescamento, ventilazione, illuminazione, occupazione.

3.1.2.2 Definizione delle zone termiche

Per ogni zona termica è necessario definire le superfici disperdenti verso l'esterno, verso le zone adiacenti e le superfici dei muri interni alla zona termica stessa. È inoltre necessario definire il tipo di infiltrazione, ventilazione, riscaldamento, raffrescamento, guadagni termici interni. Le zone termiche sono le stesse riportate nella Figura 1-6 e Figura 1-7.

- **Definizione degli input**

Gli input necessari alla simulazione dinamica sono i dati climatici, la temperatura del terreno, gli orari di funzionamento degli impianti di riscaldamento e raffrescamento, gli orari di occupazione degli uffici e accensione luci. Il file di input è composto da una sequenza di 0 e 1 ad indicare la

presenza/accensione o assenza/spengimento per un totale di valori pari al numero di ore in un anno (8760). Per definire i file è stata impostata una giornata tipo e poi ripetuta secondo una certa sequenza considerando anche eventuali chiusure stagionali

- **Dati climatici**

Per l'inserimento dei dati climatici è stato usato il Test Reference Year di Perugia essendo la località disponibile più vicina. Il file climatico è stato scaricato dal sito di *Energyplus*.

- **Accensione impianti e occupazione**

L'accensione dell'impianto di riscaldamento è regolata secondo gli orari di occupazione delle zone termiche durante il periodo che va dal 15 ottobre al 15 aprile (periodo di accensione degli impianti per la zona climatica E).

L'occupazione delle zone termiche è stata definita dal lunedì al sabato con i seguenti orari:

- Aule, corridoi e laboratori: 8:00 – 16:00.
- Uffici: 8:00 – 18:00.
- Mensa e cucina: 11:00 – 13:00.

- **Simulazione dinamica**

Una volta definiti la Type dell'edificio multi-zona e tutti gli input necessari alla simulazione dinamica si è creato il modello in *Simulation Studio*:

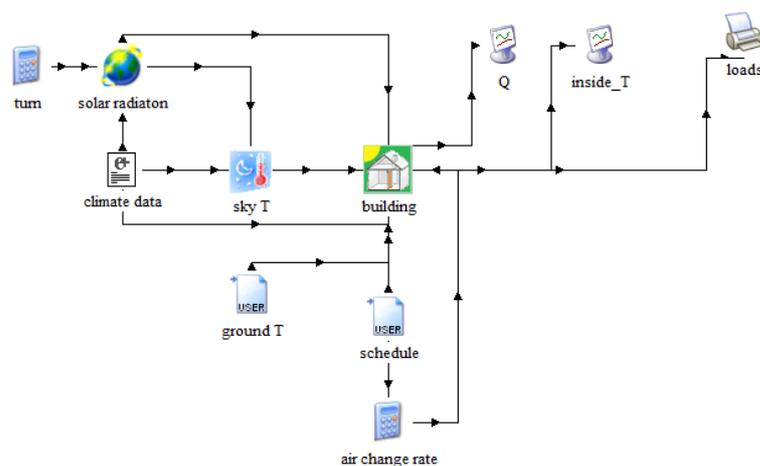


Figura 3-1: Schermata del modello *Simulation Studio*

Il tempo di simulazione è stato impostato di un anno con cadenza oraria, per un totale quindi di 8760 step.

3.1.3 RISULTATI EDIFICIO STATO DI FATTO

I risultati dei modelli dell'edificio allo stato attuale servono per confrontare le varie proposte di intervento dal punto di vista della classificazione energetica (modello quasi-stazionario) e dal punto

di vista della riduzione dei consumi energetici e del risparmio energetico annuo ottenuto (modello dinamico).

3.1.3.1 Modello quasi-stazionario

Dal modello quasi-stazionario l'edificio allo stato di fatto risulta essere in classe energetica "F", con un indice di prestazione energetica pari a 423.62 kWh/(m²·anno).

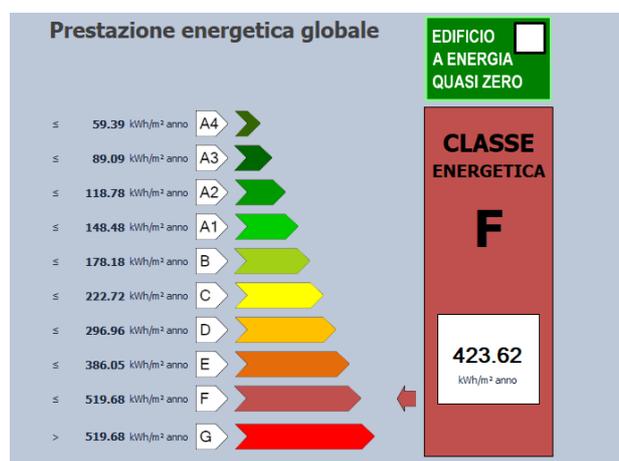


Figura 3-2: Prestazione energetica globale dell'edificio riportata nell'APE

Si riportano i fabbisogni di energia primaria suddivisi secondo il servizio energetico:

Tabella 3-2: Risultati fabbisogno energia primaria

Servizio energetico	Fabbisogno energia primaria [kWh]
Servizio H	319827.20
Servizio W	1625.94
Servizio L	100657.48
GLOBALE	422110.62

3.1.3.2 Modello dinamico

Dal modello dinamico il risultato della simulazione permette di determinare il fabbisogno di energia utile per il riscaldamento. I fabbisogni di energia utile per la produzione di acqua calda sanitaria e per l'illuminazione sono stati valutati con il modello quasi-stazionario.

- **Energia utile**

Il fabbisogno di energia utile per i servizi di riscaldamento, produzione di ACS e illuminazione è riportato nella seguente tabella.

Tabella 3-3: Fabbisogno energia utile modello dinamico, stato di fatto.

Mese	Riscaldamento [kWh]	ACS [kWh]	Illuminazione [kWh]
gennaio	26528	30	3533
febbraio	23825	27	3191

marzo	19682	30	3533
aprile	5371	29	3419
maggio	40	30	3533
giugno	0	29	3419
luglio	0	30	3533
agosto	0	30	3533
settembre	1	29	3419
ottobre	4415	30	3533
novembre	14414	29	3419
dicembre	20695	30	3533
TOTALE	114970	353	41594

• Energia primaria

Per passare dal fabbisogno di energia utile al fabbisogno di energia primaria sono stati definiti dei rendimenti globali per ogni servizio energetico:

- η_{risc} : 72.6%
- η_{ACS} : 87.9%
- η_{ill} : 100%

Il fabbisogno di energia primaria è dato da:

$$E_{primaria} = \frac{E_{utile}}{\eta} \quad (3)$$

Si riportano i valori dei fabbisogni di energia primaria nella tabella seguente.

Tabella 3-4: Fabbisogno energia utile modello dinamico, stato di fatto.

<i>Mese</i>	<i>Riscaldamento [kWh]</i>	<i>ACS [kWh]</i>	<i>Illuminazione [kWh]</i>
gennaio	36540	34	3533
febbraio	32817	31	3191
marzo	27110	34	3533
aprile	7398	33	3419
maggio	55	34	3533
giugno	0	33	3419
luglio	0	34	3533
agosto	0	34	3533
settembre	1	33	3419
ottobre	6081	34	3533
novembre	19854	33	3419
dicembre	28505	34	3533
TOTALE	158361	401	41594

• Costi di esercizio

Per poter stimare il risparmio annuo generato da interventi di efficientamento energetico è necessario determinare i costi di esercizio dell'edificio allo stato di fatto. È stato ipotizzato un costo specifico per kWh di energia primaria a seconda del vettore energetico:

- Gas naturale: 0.10 €/kWh
- Energia elettrica: 0.22 €/kWh

I risultati sono riportati nella tabella seguente.

Tabella 3-5: Costi annui di esercizio per servizio energetico, stato di fatto.

<i>Servizio Energetico</i>	<i>Costo annuo di esercizio [€]</i>
Riscaldamento	15 836
Produzione ACS	40
Illuminazione	9 150
TOTALE	25 026

4 STRATEGIE DI INTERVENTO

La maggior parte degli interventi riguardanti l'edilizia privata e scolastica negli ultimi anni hanno riguardato l'attuazione di misure per la riduzione dei consumi e il miglioramento dell'efficienza energetica degli edifici. In pochi casi, e prevalentemente al seguito di eventi sismici o per edifici considerati di interesse rilevante o strategico [9, 10], si sono attuati interventi di rinforzo sismico. Diversi studi scientifici sono disponibili in letteratura che propongono metodologie e tecniche efficaci per il miglioramento sismico ed energetico di edifici esistenti [10]. Tuttavia, essi riguardano prevalentemente la progettazione di singoli interventi mirati ad incrementare la sicurezza strutturale o l'efficienza energetica. In questo lavoro si vuole invece proporre una strategia di progettazione integrata che miri ad incrementare sia le prestazioni strutturali che l'efficienza energetica di edifici scolastici esistenti in muratura. Tale esigenza nasce dalla necessità di incrementare la sicurezza, le prestazioni ed il grado di comfort dell'edilizia scolastica tipica del territorio italiano, caratterizzata da elevata vulnerabilità sismica e scarsa efficienza energetica.

La metodologia qui proposta mira a implementare una strategia di retrofit incrementale a livello di invasività crescente che integri interventi strutturali ed energetici. Il punto di partenza è la risoluzione delle criticità maggiori della risposta strutturale cui parallelamente si sviluppa il progetto energetico. È necessario tener conto che nell'ottica degli interventi integrati, sono da considerarsi fattibili solo quelle combinazioni di interventi che sono reciprocamente compatibili. Nello specifico, bisogna rispettare la condizione che entrambi i tipi di interventi (strutturale ed energetico) debbano essere applicati ai medesimi elementi strutturali (strutture orizzontali e verticali), prevedere lo stesso livello di invasività e le stesse tempistiche di esecuzione. Inoltre, al fine di evitare di aumentare il valore economico esposto e suscettibile di danneggiamento a seguito di eventi sismici anche di moderata intensità, è opportuno che l'incremento del valore dei componenti che garantiscano una maggiore efficienza energetica sia affiancato da interventi strutturali che prevedano un pari aumento di sicurezza e prestazioni globali del sistema strutturale, al fine di garantire, oltre che la sicurezza degli occupanti, anche la protezione dei contenuti. Quest'ultimo aspetto è di fondamentale importanza al fine di evitare di attuare interventi integrati di invasività diverse; si potrebbe incorrere nell'errore, ad esempio, di effettuare interventi energetici più efficienti ed invasivi rispetto a quelli strutturali, andando così ad aumentare il valore esposto con conseguente rischio di maggiori perdite in caso di evento sismico.

In tutti i casi, nella definizione degli interventi e nell'implementazione all'edificio caso studio selezionato saranno rispettati i requisiti di sicurezza e le procedure previste dalle vigenti norme tecniche per le costruzioni NTC [1].

In particolare, la quantificazione dell'efficacia degli interventi farà riferimento a due indici di prestazione:

- ζ_E : indice di sicurezza allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV), per ciò che riguarda gli interventi di rinforzo sismico, che rappresenta il rapporto tra PGA_C e la PGA_D secondo quanto definito in precedenza. Per le costruzioni di classe III ad uso scolastico la norma impone in caso di interventi di miglioramento che tale indice non sia minore di 0.6;
- PEC : consumo totale di energia primaria, relativo al retrofit energetico, misurato in $[kWh/m^2a]$.

Con riferimento specifico alla risposta strutturale del caso studio, a seguito della fase di valutazione, sono state attuate due diverse possibili strategie di intervento distinte l'una dall'altra per livello di invasività e tempistiche di esecuzione. In linea generale, si possono distinguere gli interventi di retrofit in due macro-categorie con cui si raggiungono anche due obiettivi diversi:

- **Irrigidimento/consolidamento delle strutture orizzontali** ben ammortate alla muratura al fine di garantire e migliorare il comportamento scatolare, con conseguente redistribuzione dell'azione sismica tra le pareti;
- **Irrigidimento/consolidamento delle strutture orizzontali e verticali**, che prevedono una modifica del comportamento strutturale più significativa, al fine di aumentare la resistenza e la capacità di spostamento dei maschi murari a cui è maggiormente affidata la risposta sismica.

Sulla base degli interventi di miglioramento strutturale dell'edificio sono stati previste diverse soluzioni di intervento dal punto di vista energetico. In particolare:

- **Unitamente all'intervento sugli orizzontamenti come interventi energetici sono stati proposti:** interventi sugli impianti di climatizzazione, produzione di ACS e illuminazione, isolamento solai verso l'esterno e verso locali non climatizzati, sostituzione degli infissi (chiamati **Scenario 1** nel seguito).
- **Unitamente all'intervento sugli orizzontamenti e le strutture verticali come interventi energetici sono stati proposti:** gli stessi interventi previsti dallo scenario 1 più la coibentazione superfici opache verticali verso l'esterno (chiamati **Scenario 2** nel seguito).
- **Unitamente all'intervento sugli orizzontamenti e le strutture verticali come interventi energetici sono stati proposti:** gli stessi interventi previsti dallo scenario 2 più l'installazione di impianto fotovoltaico con scambio sul posto (chiamati **Scenario 3** nel seguito).

Nello specifico gli interventi incrementali proposti prevedono un incremento dell'indice di sicurezza sismico ed un decremento dei consumi energetici a fronte di una maggiore invasività dell'intervento e tempistiche di esecuzione.

Di seguito, con riferimento al caso studio selezionato, sono descritti gli interventi proposti, le analisi effettuate per la progettazione, i relativi dettagli tecnici e costruttivi, le prestazioni raggiunte ed i costi necessari all'attuazione degli interventi di rinforzo sismico ed efficientamento energetico.

4.1 IRRIGIDIMENTO/CONSOLIDAMENTO DELLE STRUTTURE ORIZZONTALI AL FINE DI MIGLIORARE IL COMPORTAMENTO SCATOLARE

In questo paragrafo sono descritti gli interventi previsti per il rinforzo strutturale, le ipotesi di calcolo, il numero di interventi e le operazioni necessarie per l'implementazione. Dal punto di vista degli interventi di rinforzo strutturale, l'analisi precedentemente svolta ha evidenziato che garantendo un comportamento scatolare dell'intero edificio, attraverso l'irrigidimento dei solai, è possibile pervenire ad incrementi significativi del livello di sicurezza. Inoltre, la presenza di fasce di piano deboli necessita l'inserimento di elementi resistenti a trazione, a livello dell'orizzontamento, per incrementarne la resistenza.

Gli interventi proposti sono i seguenti.

1. Il consolidamento dei solai mediante pannelli lignei e piatti in acciaio

Questa tipologia di intervento è stata condotta sia solo sul II livello (chiamato nel seguito Consolidamento 1.A) che su entrambi i livelli (chiamato nel seguito Consolidamento 1.B). La prima proposta è mirata a ridurre l'invasività dell'intervento. Tale intervento è previsto all'estradosso del solaio esistente e consiste nell'installazione di un diaframma estradosale realizzato con pannelli in legno multistrato collegati al solaio esistente mediante strisce chiodate. La superficie del singolo piano è pari a 456 m²; piatti in acciaio ad "L" di dimensioni 60x40x12 mm, disposti come in Figura 4-1, a realizzare correnti di piano nelle due direzioni principali dell'edificio. Inoltre, garantiscono un effetto cordolo in corrispondenza delle pareti adiacenti. La lunghezza totale dei profili per il solo livello II è pari a 245 m mentre per il livello I è pari a 368 m. Il collegamento solaio-muratura in direzione di orditura, oltre che mediante l'utilizzo dei profili a L, viene migliorato andando a collegare attraverso piastre e barre passanti le travi di solaio con la muratura, Figura 4-2. La lunghezza della muratura nella quale si esegue il collegamento risulta complessivamente di 322 m per il solo livello II e 483 m per il livello I. L'incremento di massa di piano rispetto al solaio esistente è pari a 0.15 kN/m².

Poiché la copertura non è modellata esplicitamente: l'effetto irrigidente realizzato dal diaframma in copertura viene considerato nel modello di calcolo a livello del sottotetto amplificandone le proprietà di 1.5 volte. Le caratteristiche, già amplificate, del diaframma del II livello sono riportate in Tabella 4-1 e Tabella 4-2.

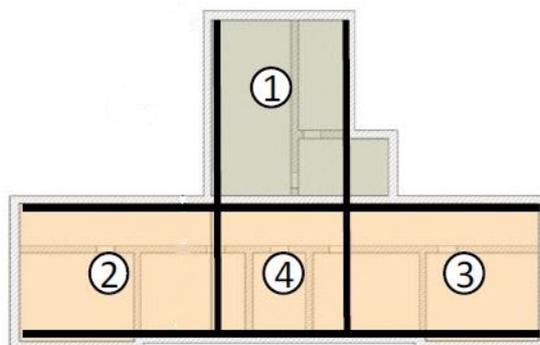
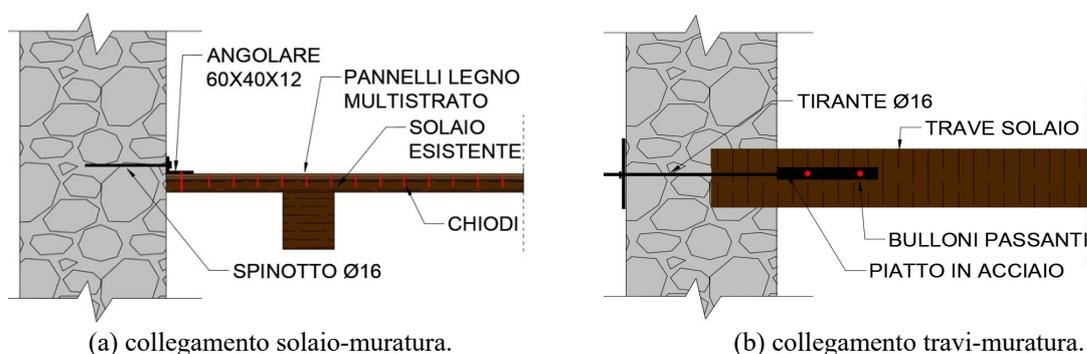


Figura 4-1: Disposizione dei correnti e suddivisione in zone dell'impalcato



(a) collegamento solaio-muratura.

(b) collegamento travi-muratura.

Figura 4-2: Analisi dei collegamenti degli orizzontamenti con la muratura

Tabella 4-1: Caratteristiche meccaniche del diaframma irrigidito II livello.

Correnti modellati esplicitamente	AREA 1	AREA 2	AREA 3	AREA 4
E_1 [MPa]	2403	2403	2403	1431
E_2 [MPa]	2403	2403	2403	1431
G_2 [MPa]	1820	1820	1820	1202
ν [-]	0.15	0.15	0.15	0.15
t_w [mm]	42	42	42	42

Tabella 4-2: Caratteristiche meccaniche del diaframma irrigidito I livello.

Correnti modellati esplicitamente	AREA 1	AREA 2	AREA 3	AREA 4
E_1 [MPa]	1602	1602	1602	954
E_2 [MPa]	1602	1602	1602	954
G_2 [MPa]	1213	1213	1213	801

ν [-]	0.1	0.1	0.1	0.1
t_w [mm]	27.5	27.5	27.5	27.5

2. Consolidamento con controventi di piano e cordoli UPN180 o piatti 180x10 mm

L'utilizzo di cordoli in acciaio, per inserire elementi resistenti a trazione a livello della fascia, ben si presta alla contemporanea installazione di controventi di piano in acciaio con l'ulteriore finalità di garantire un irrigidimento di piano. Questo intervento, chiamato nel seguito Consolidamento 2, è un intervento da eseguire all'intradosso del solaio e per tale motivo meno invasivo degli interventi estradossali. L'intervento si realizza attraverso l'utilizzo di cordoli in acciaio realizzati con profili UPN180 o piatti 180x10 mm, uno interno ed uno esterno, collegati da tiranti $\varnothing 20$ ogni 50 cm. La lunghezza totale dei cordoli è pari a 590 m; controventi di piano in acciaio realizzati con piatti 80x20 mm. La lunghezza totale è pari a 520 m.

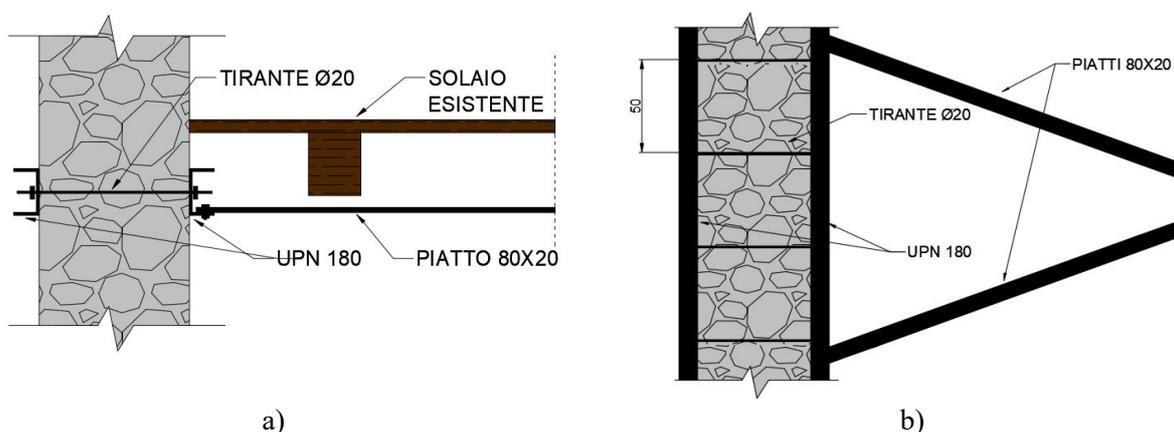


Figura 4-3: Sezione trasversale (a) e vista in pianta (b)

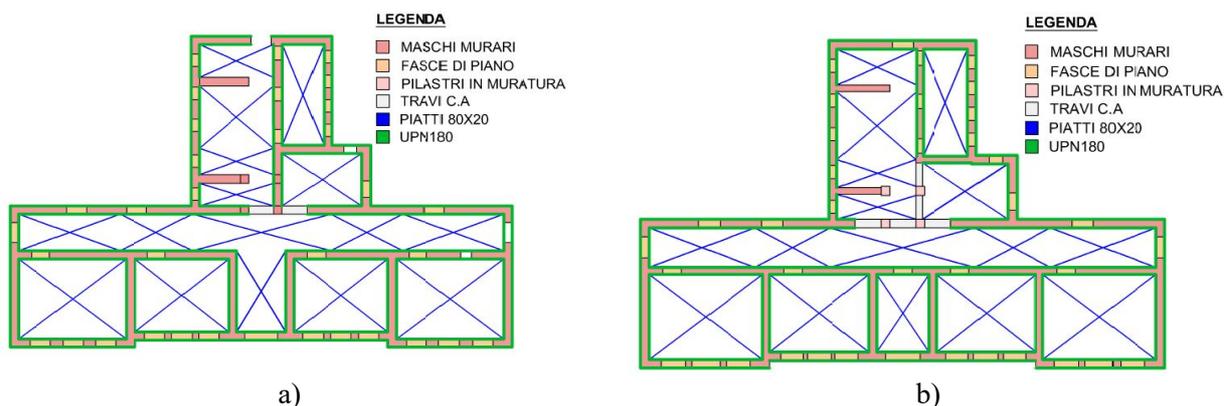


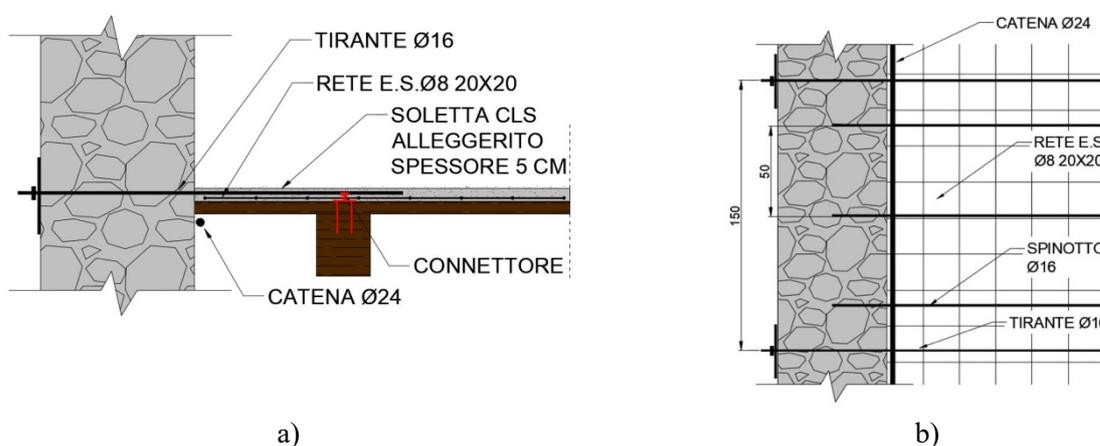
Figura 4-4: Disposizione piatti 80x20 e UPN180 piano terra (a) e piano primo (b)

3. Consolidamento con soletta in c.a. e catene $\varnothing 24$

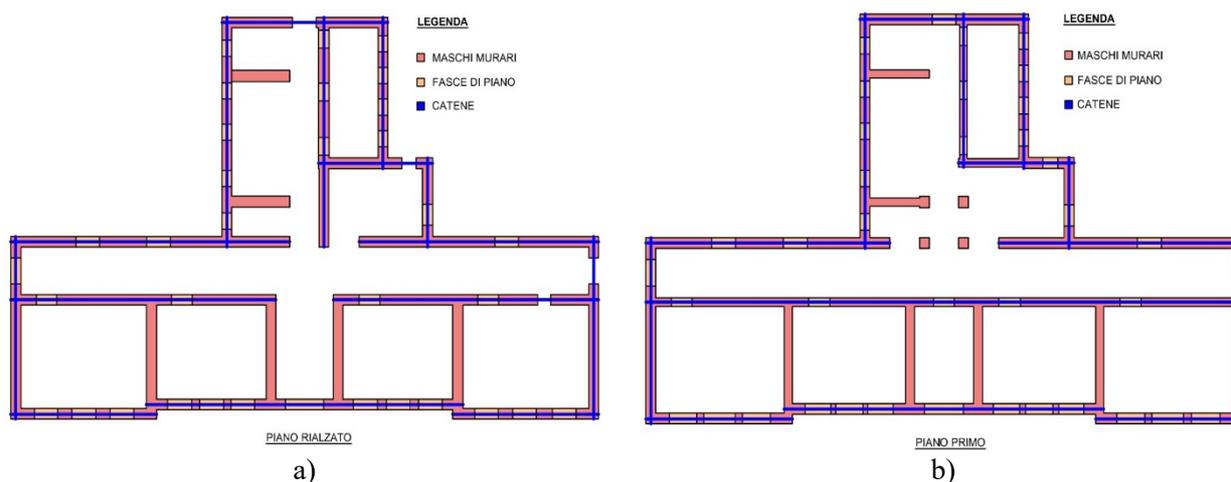
L'intervento (chiamato nel seguito Consolidamento 3) è previsto all'estradosso del solaio, le cui travi sono ben collegate alla muratura. Al di sopra del doppio tavolato del solaio esistente viene realizzata una soletta in c.a. dello spessore di 5 cm interconnessa mediante connettori in acciaio. La superficie

del singolo piano è pari a 456 m^2 . La soletta è realizzata con calcestruzzo leggero strutturale ad alta resistenza (proprietà: $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$, $R_{ck} = 35 \text{ MPa}$, $R_{ck} = 20000 \text{ MPa}$) e rete elettrosaldata $\text{Ø}8 \text{ 20x20}$. La soletta in c.a. è ben ammorsata nella muratura su tutti i suoi lati mediante spinotti passanti per $3/4$ dello spessore, con passo 50 cm e mediante tiranti passanti per tutto lo spessore della muratura con passo 150 cm . Il collegamento è eseguito su una lunghezza di 305 m per il singolo piano. Vengono inserite catene in acciaio S235 e con diametro $\text{Ø}24$ in aderenza alla muratura. La disposizione è rappresentata in Figura 4-6 ed è pensata sia per migliorare il comportamento delle fasce sia per garantire un comportamento scatolare. La lunghezza totale delle catene è pari a 39 m . L'incremento di peso rispetto al solaio esistente è pari a 0.8 kN/m^2 .

Il solaio consolidato presenta le seguenti caratteristiche: spessore = 5 cm , $G = 8333 \text{ MPa}$, $E_x = 32000 \text{ MPa}$, $E_x = 20000 \text{ MPa}$, $\nu = 0.2$.



a) b)
Figura 4-5: Sezione trasversale (a) e vista in pianta (b)



a) b)
Figura 4-6: Localizzazione catene piano terra (a) e piano primo (b)

4.1.1 ANALISI COMPARATIVA IN TERMINI DI RISPOSTA STRUTTURALE

In questa sezione vengono riportati i parametri strutturali significativi al fine di interpretare la risposta della costruzione e consentire un opportuno confronto tra i diversi stati di progetto.

Innanzitutto, si riporta il confronto in termini di Massa Partecipante sul primo modo di vibrazione, per fare emergere come un primo importante risultato di tutti gli interventi di irrigidimento sui solai proposti sia quello di garantire un maggior comportamento d'insieme, quindi un aumento della suddetta massa, come si verifica in Figura 4-7.

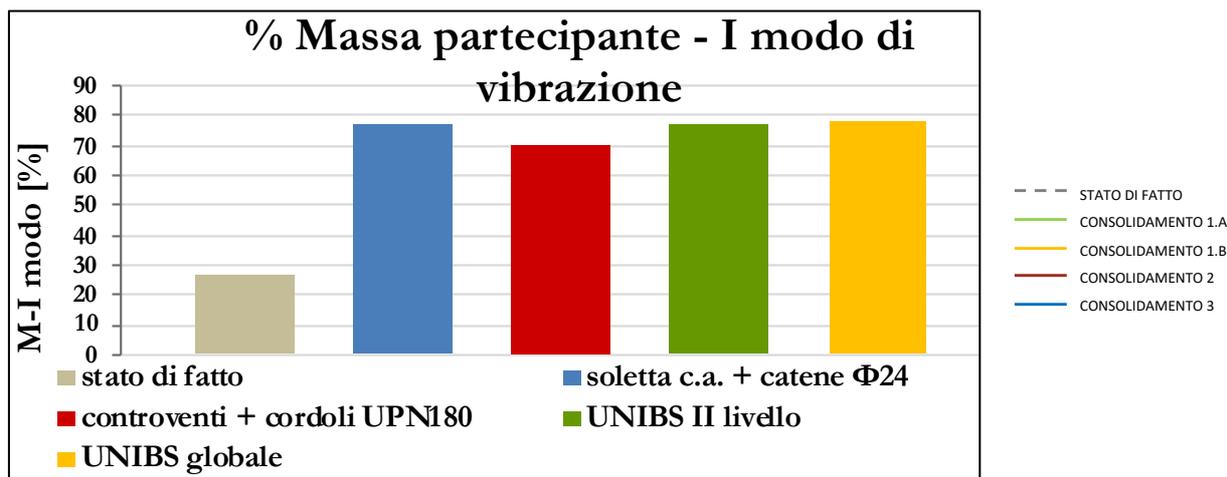


Figura 4-7: Confronto in termini di Massa Partecipante

Successivamente sono state svolte le Analisi Statiche Non Lineari in entrambe le direzioni e verso (+/-X e +/-Y), con le due distribuzioni di forze (uniforme e triangolare inversa – chiamata in figura statica), in questa fase di analisi sono state quindi eseguite 8 analisi di base, senza eccentricità, per limitare l'onere computazionale.

Si riporta nel seguito un confronto in termini di andamento della Pushover.

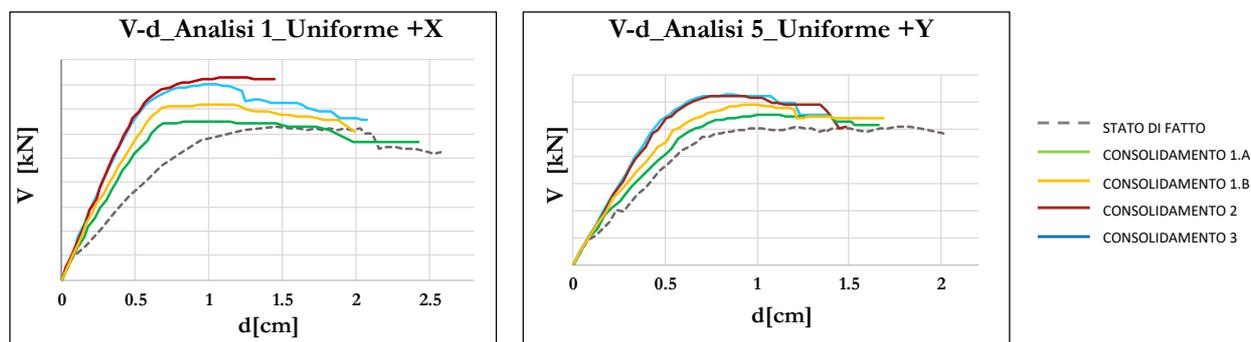
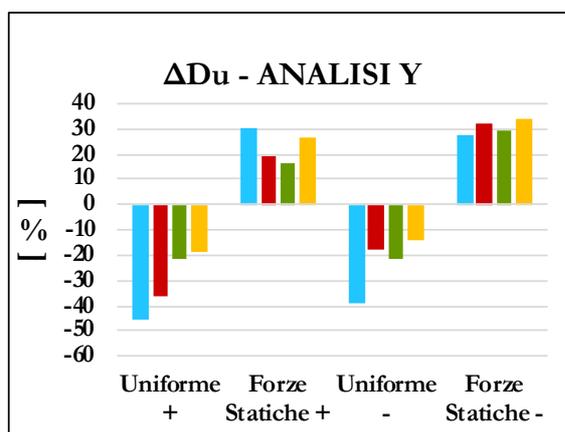
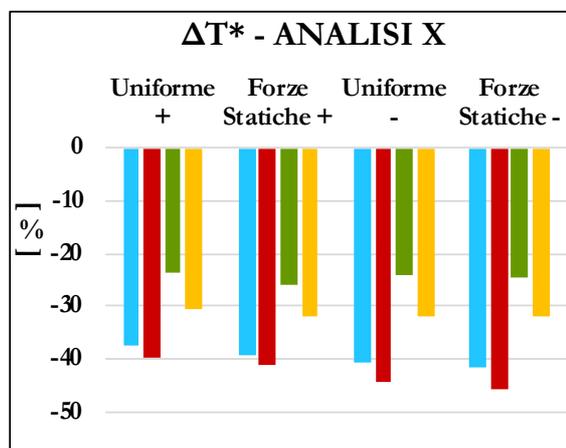
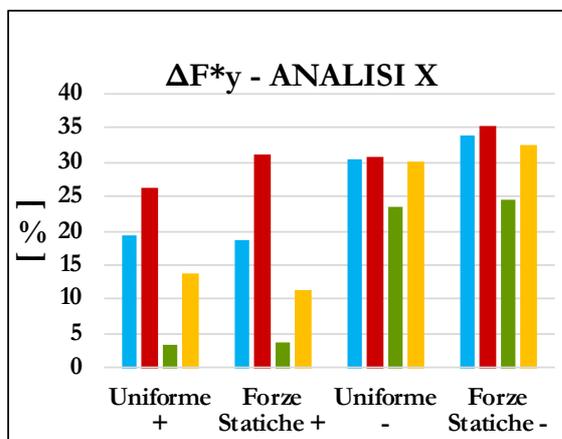


Figura 4-8: Confronto in termini di Pushover

A partire dallo stato di fatto, inoltre, è vantaggioso rappresentare la variazione percentuale dei principali parametri che caratterizzano la bilineare equivalente rispetto agli stati di progetto per avere, a prima vista, un impatto con gli effetti positivi ed eventualmente negativi che produce l'intervento

di consolidamento. Lo scarto percentuale dei diversi parametri strutturali, PS, viene calcolato con la seguente relazione:

$$\Delta PS_j = \frac{PS_{cosn,j} - PS_{st.fatto}}{PS_{st.fatto}} \quad (2)$$



- STATO DI FATTO
- CONSOLIDAMENTO 1.A
- CONSOLIDAMENTO 1.B
- CONSOLIDAMENTO 2
- CONSOLIDAMENTO 3

Figura 4-9: Confronto in termini di variazione percentuale dei principali parametri che caratterizzano la bilineare equivalente

Un ulteriore elemento di confronto è l'indice di sicurezza rappresentato in Figura 4-10, dove si richiama come le analisi dalla 1 alla 4 sono in direzione X (1 - 2, verso positivo; 3 - 4 verso negativo), mentre quelle dalla 5 alla 8 sono in direzione Y (5 - 6, verso positivo; 7 - 8 verso negativo). Nessuna analisi raggiunge l'unità, ma si coglie già con questi interventi un miglioramento della risposta soprattutto in direzione -X e in direzione +/- Y con la distribuzione triangolare inversa.

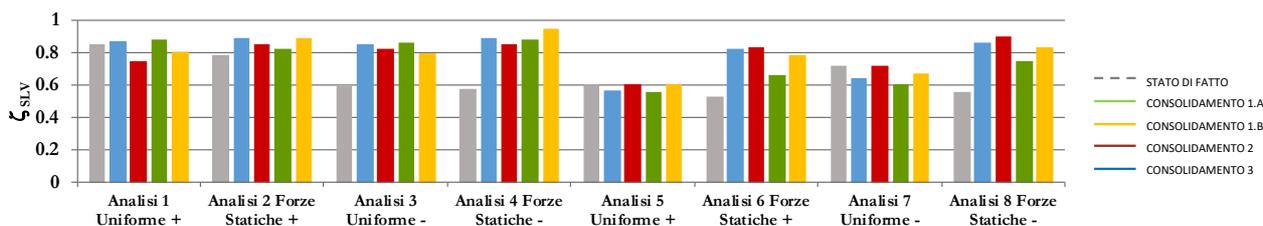


Figura 4-10: Confronto in termini di ζ_{SLV}

4.1.2 ANALISI COMPARATIVA IN TERMINI DI CLASSE di RISCHIO e PAM

Come introdotto al §2.6, un ulteriore elemento di confronto tra lo stato di fatto e le diverse scelte progettuali adottate è la PAM. A partire dal valore di PAM e dell'indice di sicurezza ζ_{SLV} è possibile associare all'edificio la Classe di Rischio Sismico.

In Figura 4-11 è rappresentato l'andamento dei valori di PAM associati allo stato di fatto e ai diversi interventi, con anche la relativa Classe di Rischio.

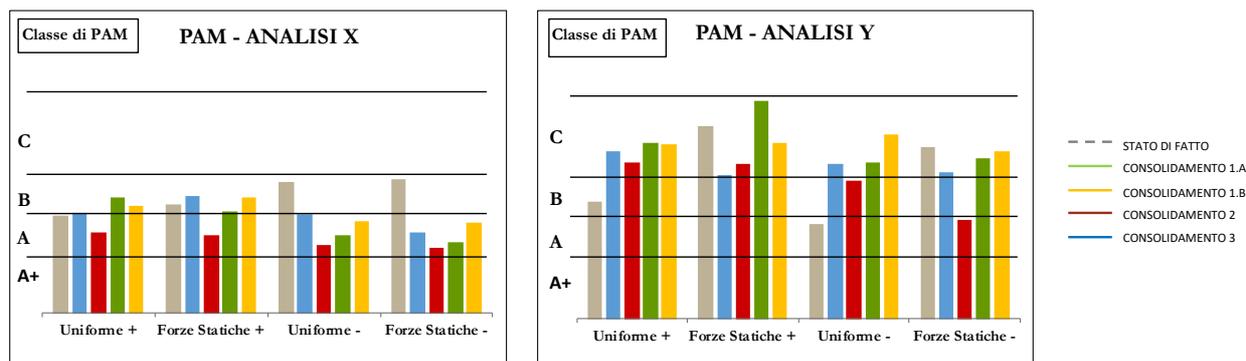


Figura 4-11: Confronto in termini di PAM

4.2 INTERVENTI ENERGETICI PREVISTI UNITAMENTE ALL'IRRIGIDIMENTO DEI SOLAI PER LO SCENARIO 1

Di seguito vengono riportate nel dettaglio le soluzioni ipotizzate per gli interventi previsti che riguardano principalmente la componente impiantistica.

1. Impianto radiante a pavimento

Si prevede di sostituire i terminali di impianto a radiatori con un impianto radiante a pavimento a bassa temperatura, dato che è comunque previsto l'intervento di rinforzo dei solai per il miglioramento del comportamento strutturale dell'edificio.

2. Pompa di calore riscaldamento

Si prevede la sostituzione della caldaia con una pompa di calore aria-acqua, che accoppiata all'impianto radiante a pavimento permette di operare con elevati valori di COP.

3. Unità di trattamento aria

Si prevede di installare un'unità di trattamento d'aria in modo da garantire una buona qualità dell'aria negli ambienti. È necessario prevedere la linea di canali per la portata d'aria di rinnovo nelle aule e negli uffici e per la ripresa nei bagni e nei corridoi. Si prevede inoltre di installare uno scambiatore di calore rigenerativo tra la portata d'aria di immissione e di espulsione. In questo modo è possibile ridurre il carico termico delle batterie di riscaldamento e deumidificazione dell'UTA.

4. Impianto tutta aria mensa

Per la mensa, dato il ridotto volume d'aria rispetto alla possibile occupazione, si è previsto di installare un impianto a tutta aria con una UTA dedicata in modo da garantire un sufficiente ricambio d'aria di rinnovo durante l'orario di occupazione per il pranzo.

5. Impianto climatizzazione estiva uffici

Siccome non si è previsto di dotare l'edificio di un impianto di raffrescamento estivo, essendo destinato ad uso scolastico, si è ipotizzato di dotare i locali adibiti a uffici di un impianto di climatizzazione dedicato che preveda l'installazione di un sistema a splitter.

6. Produzione Acqua calda sanitaria

Per la produzione di acqua calda sanitaria si prevede l'installazione di un piccolo impianto a pompa di calore dedicato in modo da garantire un'elevata efficienza dell'impianto di riscaldamento, vista anche la ridotta richiesta di ACS.

7. Sostituzione corpi illuminanti

Si prevede la sostituzione dell'attuale impianto di illuminazione con lampade a fluorescenza con nuove lampade a LED ad elevata efficienza.

8. Sostituzione serramenti

Si prevede la sostituzione delle attuali finestre a vetro singolo con serramenti con telaio in alluminio con taglio termico e vetrocamera a tripla lastra di vetro con trattamento basso emissivo e isolata con gas.

9. Isolamento solai

Si prevede di isolare termicamente il pavimento verso terra, dato che è prevista la realizzazione dell'impianto radiante a pavimento, e il solaio del primo piano confinante con il sottotetto non climatizzato.

10. Servizi energetici

Il fabbisogno di energia utile per l'edificio allo stato di fatto comprende solo i servizi energetici per il riscaldamento, la produzione di ACS e l'illuminazione.

Con la nuova configurazione impiantistica non si prevede più l'utilizzo del gas naturale e tutto l'edificio è servito esclusivamente da energia elettrica. Anche in questo caso per passare dai fabbisogni di energia utile ai fabbisogni di energia finale e quindi ai costi di esercizio è necessario introdurre dei rendimenti globali di conversione.

I risultati ottenuti per i vari servizi energetici secondo la configurazione proposta sono i seguenti.

Tabella 4-3: Servizi energetici Scenario 1 e rendimenti di conversione energia primaria.

Servizio energetico	η globale energia primaria	η_{gn}	η_d	η_{rg}	η_e
Riscaldamento	270%	3	0.938	0.99	0.97
Produzione ACS	232%	2.5	0.926	-	-

Batteria risc. UTA	242%	3	0.85	0.95	-
Batteria deum. UTA	202%	2.5	0.85	0.95	-
Raffrescamento uffici	238%	2.5	0.97	0.98	-
Riscaldamento mensa	271%	3	0.95	0.95	-
Raffr. /deum. mensa	226%	2.5	0.95	0.95	-

Si sottolinea che per uno Scenario 0 in cui non si prevede un intervento strutturale sui solai che porta alla sostituzione della pavimentazione e l'inserimento della soletta in c.a., gli interventi previsti dal punto di vista energetico possono essere quelli definiti precedentemente dal punto 2 (l'inserimento della pompa di calore) al punto 8 (sostituzione dei serramenti).

4.2.1 RISULTATI INTERVENTI MIGLIORATIVI ENERGETICI RELATIVI ALLO SCENARIO 1

In questa sezione si riportano i risultati ottenuti con i due diversi modelli per i tre diversi scenari di intervento.

I risultati del modello quasi-stazionario servono soltanto per classificare l'edificio dal punto di vista normativo, quindi non si dà molto peso ai risultati ottenuti in termini di consumi per i vari servizi energetici, poiché l'analisi più dettagliata per quanto riguarda i consumi e la stima dei costi annui di esercizio è stata fatta attraverso il modello dinamico.

Come già riportato lo Scenario 1 è quello che complessivamente va ad agire in maniera più profonda nell'edificio, rivoluzionando il sistema impiantistico e in parte l'involucro con le finestre e l'isolamento dei solai.

4.2.1.1 Classe energetica (modello quasi-stazionario)

La classe energetica (valutata servendosi del modello quasi-stazionario) risulta essere la "D", con un indice di prestazione energetica pari a 91.61 kWh/m²·a:



Figura 4-12: Prestazione energetica edificio Scenario 1

4.2.1.2 Energia utile (modello dinamico)

I risultati per il fabbisogno di energia utile sono stati valutati attraverso il modello dinamico ad esclusione del fabbisogno per l'ACS che rimane invariato rispetto allo stato di fatto e del fabbisogno per l'illuminazione che è stato valutato attraverso il modello quasi-stazionario riducendo la potenza complessiva installata dovuta al maggiore rendimento delle lampade.

Nella tabella seguente si riportano i risultati mensili dei fabbisogni di energia utile per i diversi servizi energetici previsti dallo Scenario 1.

Tabella 4-4: Fabbisogni di energia utile Scenario 1.

<i>Mese</i>	<i>Risc.</i>	<i>Risc. UTA</i>	<i>Deum. UTA</i>	<i>Risc. mensa</i>	<i>Deum. mensa</i>	<i>Raffr. uffici</i>	<i>ACS</i>	<i>Ill.</i>
gennaio	16532	110	0	469	69	0	3533	973
febbraio	14863	89	0	423	112	0	3191	879
marzo	12318	58	0	301	46	0	3533	973
aprile	2979	220	0	80	102	4	3419	941
maggio	5	1204	1385	3	82	52	3533	973
giugno	0	1169	2047	0	66	59	3419	941
luglio	0	1144	3071	0	122	230	3533	973
agosto	0	601	1582	0	60	110	3533	973
settembre	0	1098	2947	0	175	88	3419	941
ottobre	2242	25	0	2	146	14	3533	973
novembre	8349	35	0	126	161	19	3419	941
dicembre	12801	74	0	541	96	4	3533	973
TOTALE	70089	5827	11032	1946	1236	582	41594	11453

4.2.1.3 Energia primaria e costi (modello dinamico)

Come per l'edificio allo stato di fatto è possibile ricavare il fabbisogno di energia primaria e i costi di esercizio per i vari servizi energetici a partire dal fabbisogno di energia utile attraverso l'utilizzo di fattori di conversione (rendimento globale e costo specifico al kWh).

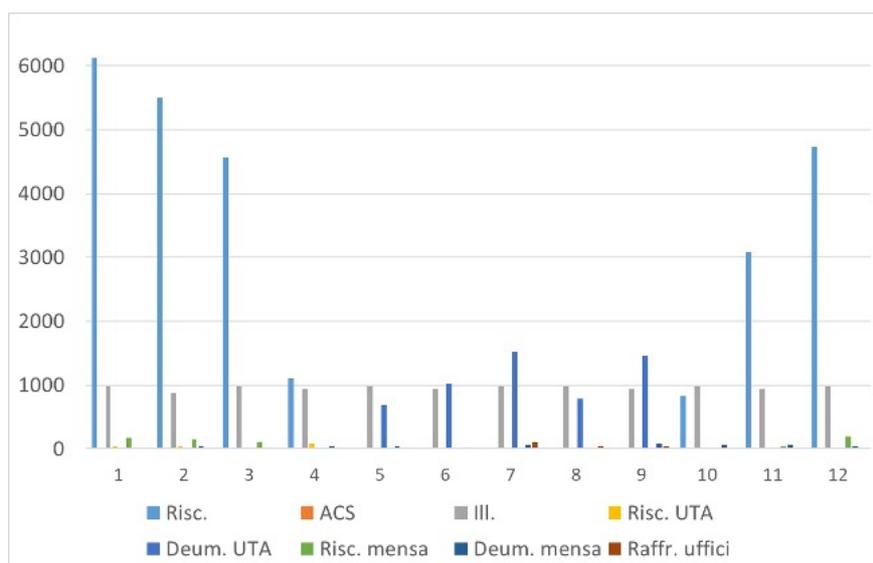


Figura 4-13: Fabbisogno mensile di energia utile per i vari servizi energetici, Scenario 1

Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

Tabella 4-5: Energia primaria e costi di esercizio Scenario 1.

<i>Servizio energetico</i>	<i>Energia primaria [kWh]</i>	<i>Costo annuo di esercizio [€]</i>
Riscaldamento.	25937.08	5706.16
ACS	152.48	33.55
Illuminazione	11453.10	2519.68
Riscaldamento UTA	251.96	55.43
Deumidificazione UTA	5464.80	1202.26
Riscaldamento mensa	718.76	158.13
Deumidificazione mensa	547.82	120.52
Raffrescamento uffici	227.50	50.05
TOTALE	44753.50	9845.77

I costi di esercizio dell'edificio allo stato di fatto erano di circa 25'000 €, quindi la configurazione prevista dallo Scenario 1 permette di ottenere un risparmio annuo di circa 15'000 €.

4.3 CONSOLIDAMENTO DELLE STRUTTURE VERTICALI

In questo paragrafo sono illustrate le scelte progettuali, le ipotesi di calcolo ed i dettagli costruttivi per gli interventi da attuare per il consolidamento delle strutture verticali, che presentano un livello di invasività maggiore rispetto a quelli previsti per le strutture orizzontali. L'obiettivo di questi interventi è quello di migliorare ulteriormente le prestazioni strutturali dell'intero edificio.

In particolare, la ristilatura dei giunti e le iniezioni di malta agiscono riducendo la domanda di spostamento, D_{max} . Se, il periodo del sistema equivalente, T^* , è sempre compreso tra T_B e T_C è possibile fare le seguenti considerazioni: D_{max}^* diminuisce al diminuire di T^* , aumentando cioè la

rigidezza del sistema equivalente, k^* , o al diminuire del fattore di struttura q^* , cioè all'aumentare della resistenza del sistema equivalente, F_y^* . L'applicazione, invece, di FRP permette di agire sulla duttilità. L'incremento della capacità di spostamento, D_u , è legato alla deformazione massima che possono subire i singoli maschi murari. È quindi possibile operare nei seguenti modi: inducendo gli elementi a collassare per flessione e non a taglio, in modo da aumentare la capacità di spostamento; incrementare la resistenza degli elementi.

Come detto al §2.3, in direzione X, la risposta sismica è affidata alle pareti P2 e P6. Dall'analisi del danneggiamento nello stato di fatto è risultato fondamentale consolidare la P6 ad entrambi i livelli e la P2 solamente al I livello. La P9 e la P16 raggiungevano la rottura al I livello prima dell'occorrenza dello SLV, per tale motivo sono state consolidate. La superficie dei maschi murari è pari a 1948 m². In direzione Y, dove lo stato di fatto presenta maggior criticità, l'analisi del danneggiamento ha mostrato la presenza di singole pareti che si danneggiano in modo più marcato: P12, P14 e P15. La P12 e la P15 giungono a rottura al I livello prima dell'occorrenza dello stato limite SLV, dando origine ad un piano debole. La P14 subisce un collasso generale ad entrambi i livelli. Esse saranno oggetto di intervento. Le restanti pareti che dominano l'analisi, cioè la P1, P8, P10, P11, P5, P3 e P17, a seconda della distribuzione di forze, all'ultimo passo subiscono rotture contemporanee per pressoflessione o taglio, indistintamente per i due livelli, causando una perdita di resistenza globale maggiore del 20%. Gli interventi sono applicati ad entrambi i livelli mantenendo la simmetria. Considerando entrambe le facce della parete, la superficie dei maschi murari è pari a 1358 m².

Gli interventi proposti sono i seguenti.

a. La ristilatura dei giunti

È una tecnica che consente di incrementare contemporaneamente rigidezza e resistenza della struttura: come da indicazioni delle NTC2018 [1], l'intervento si traduce in un aumento dei parametri f_m , τ_0 , E, G. In particolare, le norme consentono di applicare un coefficiente migliorativo pari a 1.3 ai suddetti parametri. La struttura verticale mediamente ha uno spessore variabile tra 50-70 cm ed è costituita prevalentemente da muratura portante in blocchi di pietra a spacco con buona tessitura, risultando idonea all'esecuzione della ristilatura dei giunti. Per la sua esecuzione si eseguono le seguenti operazioni: per ripristinare la qualità dei giunti, viene eseguita la scarnitura della vecchia malta, lavatura e stuccatura profonda su entrambe le facce della parete. Le pareti di Figura 4-14 sono consolidate su entrambe le facce della parete e la ristilatura interessa 1860 m².

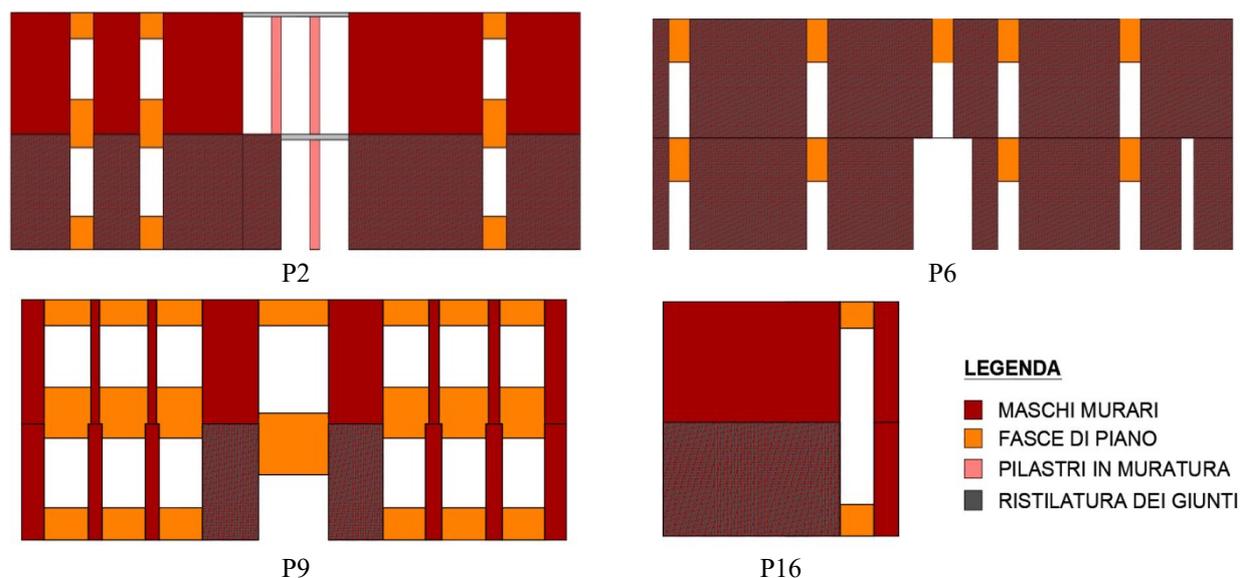


Figura 4-14: Localizzazione dell'intervento sulle pareti in direzione X

La ristilatura è eseguita su entrambe le facce ed interessa 1016 m², cioè il 75% della superficie totale.

Nelle figure sottostanti si riportano le pareti nelle quali viene eseguito l'intervento.

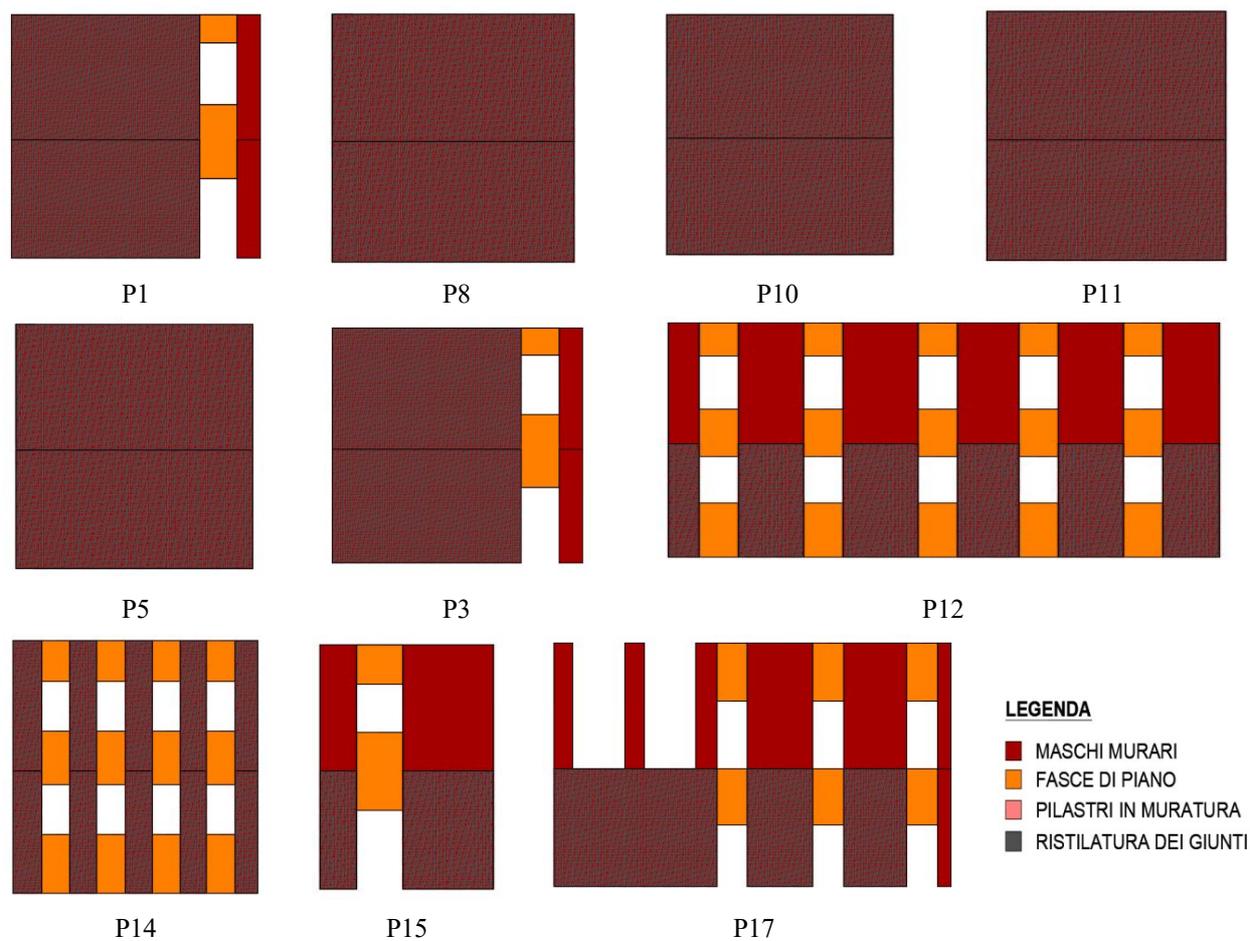


Figura 4-15: Localizzazione dell'intervento sulle pareti in direzione Y

b. Iniezioni di malta

L'iniezione di malta è una tecnica che consente di incrementare contemporaneamente rigidità e resistenza della struttura: su indicazioni delle NTC [1], l'intervento si traduce in un aumento dei parametri f_m , τ_0 , E , G . In particolare, le norme consentono di applicare un coefficiente migliorativo pari a 1.5 ai suddetti parametri.

La struttura verticale mediamente ha uno spessore variabile tra 50-70 cm ed è costituita prevalentemente da muratura portante in blocchi di pietra a spacco con buona tessitura, risultando idonea all'esecuzione dell'iniezione di malta. Per la sua esecuzione si eseguono le seguenti operazioni: per ripristinare la qualità dei giunti, viene eseguita la scarnitura della vecchia malta, lavatura e stuccatura profonda su entrambe le facce della parete; l'esecuzione dell'iniezione con boiaccia fluida di cemento tipo 32.5 con ubicazione di 4 fori $\varnothing 20$ a m^2 . L'iniezione di malta è funzione dello spessore della muratura e della percentuale di vuoti che la caratterizzano. Per la valutazione dei mc di malta iniettati è necessario conoscere la superficie sulla quale vengono installati i tubetti per l'esecuzione dell'intervento: 926 m^2 . Nelle figure sottostanti si riportano le pareti nelle quali viene eseguito l'intervento.

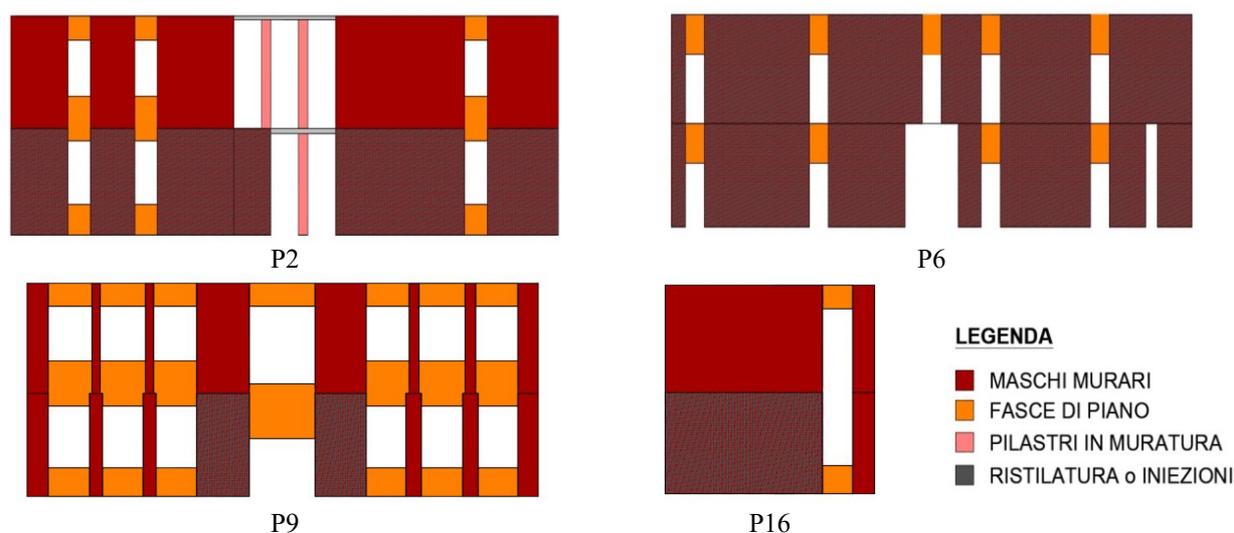
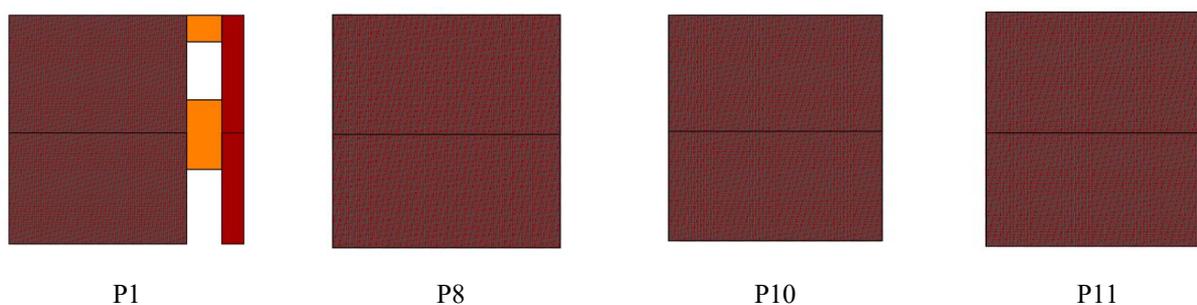


Figura 4-16: Localizzazione dell'intervento sulle pareti in direzione X

La superficie sulla quale vengono installati i tubetti per l'esecuzione dell'intervento: 508 m^2 .



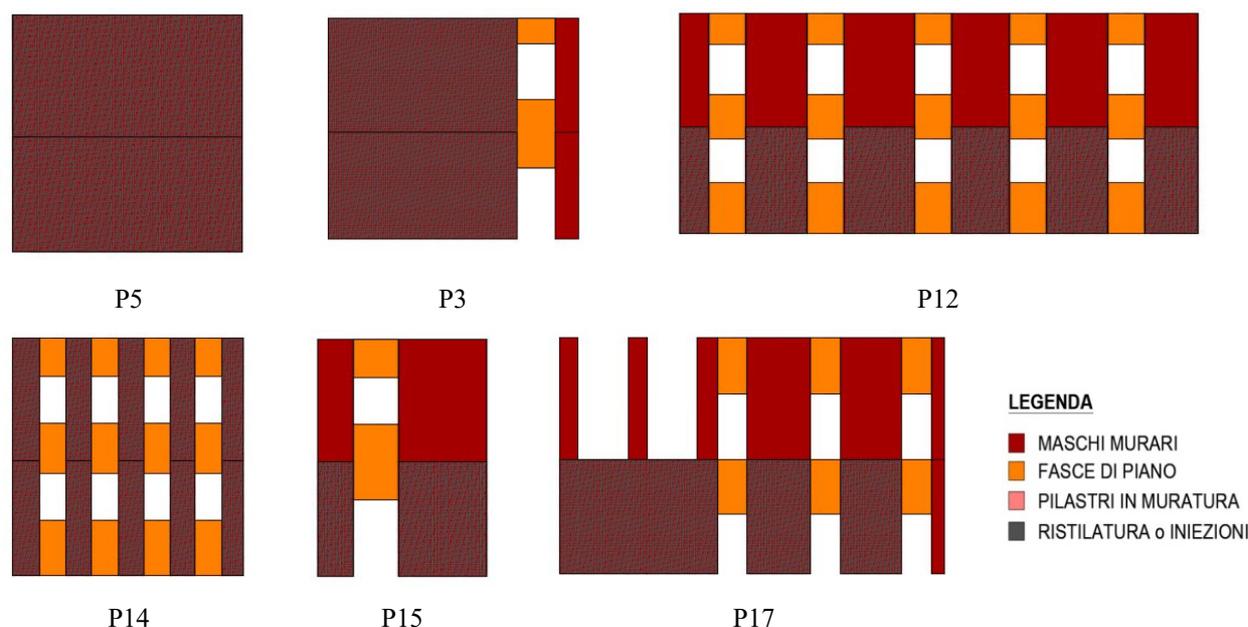
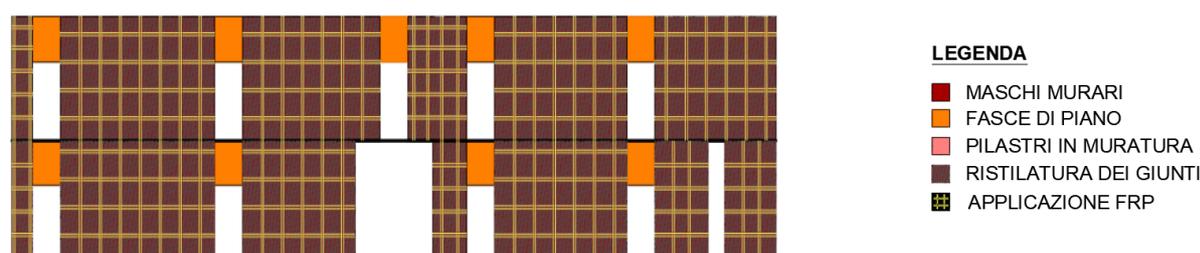


Figura 4-17: Localizzazione dell'intervento sulle pareti in direzione Y

c. Ristilatura dei giunti e applicazione FRP

Per la sua esecuzione si adotta materiale fibrorinforzato impregnato in situ in un unico strato installato su entrambe le facce della parete e secondo le seguenti fasi: applicazione di primer, resina adesiva, fibre, secondo strato di resina adesiva; si creano maglie quadrate o rettangolari in modo da conferire benefici nei confronti di entrambe le modalità di rottura. Le caratteristiche tecniche del materiale sono le seguenti: densità 1.8 g/cm^3 , modulo elastico a trazione $E_{\text{fib}} = 230 \text{ GPa}$, tensione a rottura a trazione del filato $f_{\text{fib}} = 4800 \text{ MPa}$, allungamento a rottura $\varepsilon_{\text{fib}} = 1.9\%$, spessore $t_f = 0.21 \text{ mm}$, larghezza $b_f = 100 \text{ mm}$.

L'Analisi Pushover eseguita per il modello caratterizzato dal consolidamento con ristilatura dei giunti ha consentito di individuare gli elementi critici che dovranno essere consolidati ulteriormente. In direzione X, si interviene sulla parete P6 andando ad applicare l'FRP su tutto il primo livello al fine di evitare la formazione di piano debole. Si installa un unico strato di FRP su entrambe le facce della parete con il seguente passo: maglia $100 \times 100 \text{ cm}$ nei maschi di dimensioni maggiori e $80 \times 80 \text{ cm}$ nei maschi minori. Complessivamente per le due facce, in questa direzione si applicano 121 m^2 di FRP.



P6

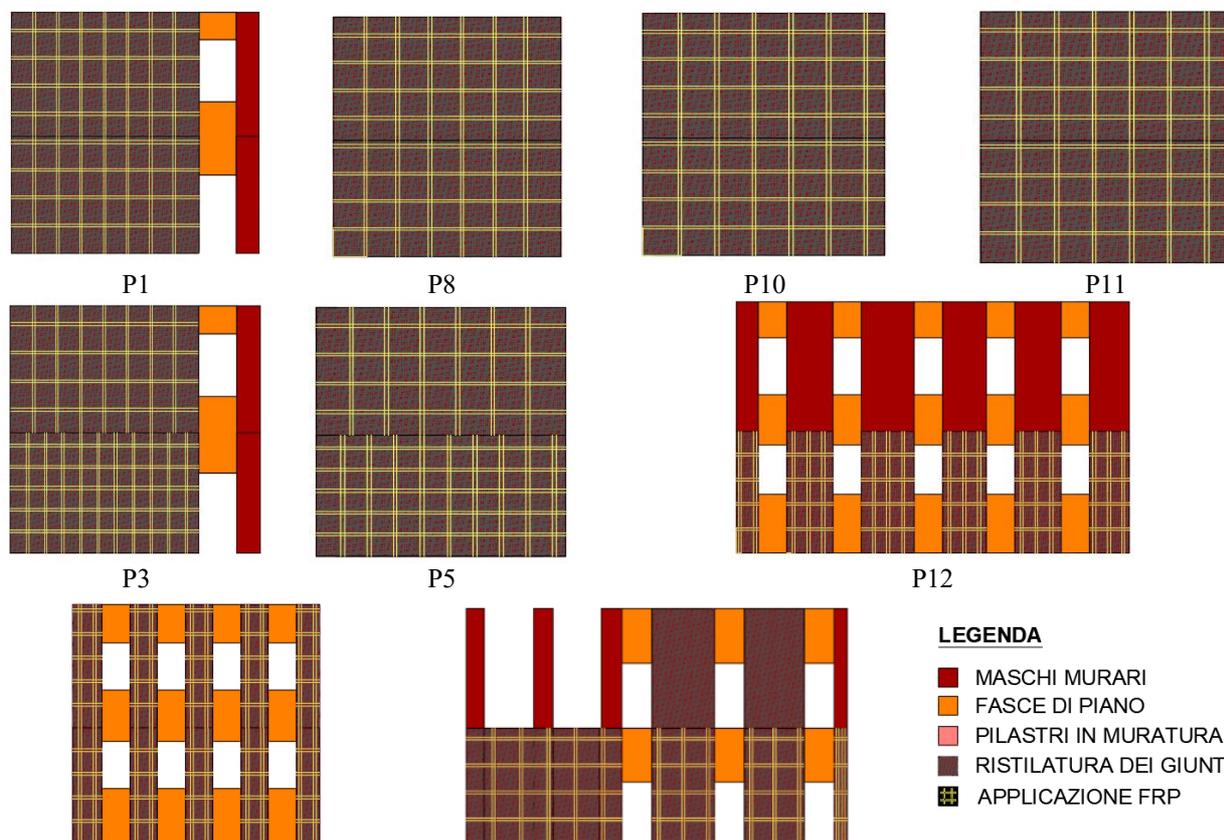
Figura 4-18: Localizzazione dell'intervento sulle pareti in direzione X

In direzione Y, l'analisi ha mostrato la rottura contemporanea all'ultimo passo di carico delle P3, P5, P10, P11 e P14 ad entrambi i livelli. Le P12 e P17 sono caratterizzate da maschi murari del I livello che giungono a rottura per pressoflessione o taglio prima dell'arresto dell'analisi, facendo pensare ad una eventuale formazione di piano debole.

Considerando la simmetria della costruzione in questa direzione e la finalità di ottenere un buon miglioramento, si applica FRP alle P1, P3, P5, P8, P10, P11 e P14 ad entrambi i livelli. In P12 e P17 per evitare la formazione del piano debole viene applicato FRP solamente al I livello. Di seguito si riportano il passo ed il livello dove viene installato l'FRP, applicato in un unico strato e su entrambe le facce della parete:

- P1, P8, P10, P11: maglia 100x100 cm per entrambi i livelli;
- P3, P5: maglia 75x75 cm al I livello e 100x100 cm per il II;
- P12: maglia 50x85 cm a tutti i maschi del I livello;
- P14: maglia 50x85 cm per entrambi i livelli;
- P17: maglia 100x100 cm a tutti i maschi del I livello ad eccezione dell'unico maschio di ridotte dimensioni che presenta una maglia di 25x100 cm.

Complessivamente per le due facce, in questa direzione si applicano 330 m² di FRP



P14

P17

Figura 4-19: Localizzazione dell'intervento sulle pareti in direzione Y

d. Iniezioni di malta e applicazione FRP

Le caratteristiche del FRP sono analoghe a quelle proposte precedentemente, insieme alla ristilatura dei giunti. Ma l'Analisi Pushover eseguita, questa volta, per il modello caratterizzato dal consolidamento con iniezioni di malta ha consentito di individuare ulteriori elementi critici che dovranno essere consolidati. In direzione X, si interviene sulla parete P6 andando ad applicare l'FRP nei due maschi che giungevano a rottura nel modello caratterizzato dal consolidamento con iniezioni di malta e determinavano l'arresto dell'analisi. Si installa un unico strato di FRP su entrambe le facce della parete con il seguente passo: P6: maglia 80x80 cm. Complessivamente per le due facce, in questa direzione si applicano 8 m² di FRP.

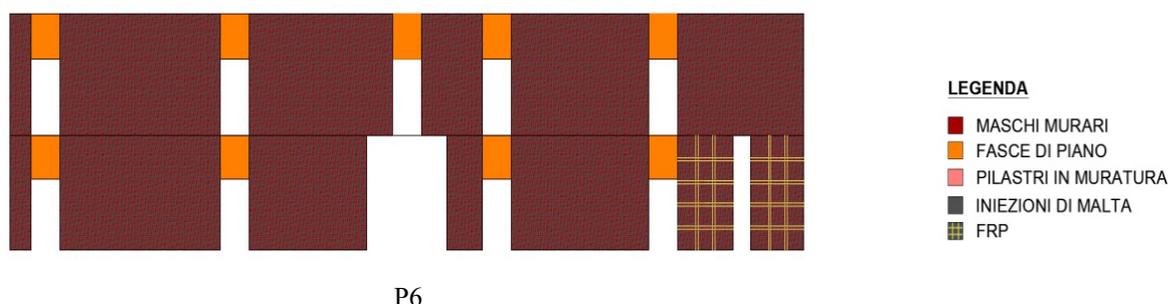


Figura 4-20: Localizzazione dell'intervento sulla parete P6 in direzione X

In direzione Y, l'analisi ha mostrato la rottura contemporanea all'ultimo passo di carico delle P3, P5, P10 e P11 al I livello. La P12 è caratterizzata da maschi murari del I livello che giungono a rottura per pressoflessione prima dell'arresto dell'analisi, facendo pensare ad una eventuale formazione di piano debole. Considerando la simmetria della costruzione in questa direzione e la finalità di raggiungere l'adeguamento sismico, si applica FRP alle P1, P3, P5, P8, P10, P11. In P12 si vuole evitare la formazione del piano debole e viene applicato FRP solamente al I livello.

Di seguito si riportano il passo ed il livello dove viene installato l'FRP, applicato in un unico strato e su entrambe le facce della parete:

- P1, P8, P10, P11: maglia 100x100 cm per entrambi i livelli;
- P3, P5: maglia 75x75 cm al I livello e 100x100 cm per il II;
- P12: maglia 50x85 cm a tutti i maschi del I livello.

Complessivamente per le due facce, in questa direzione si applicano 137 m² di FRP

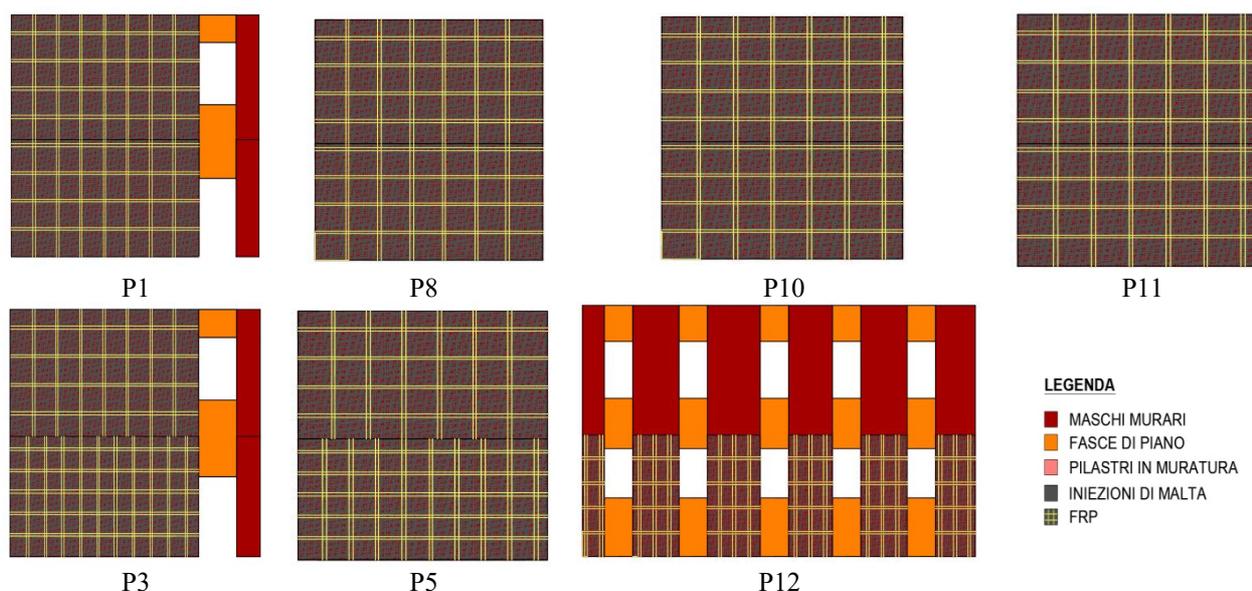


Figura 4-21: Localizzazione dell'intervento sulle pareti in direzione Y

e. Consolidamento con ristilatura, iniezioni e FRCM

L'esecuzione di questo intervento prevede: su entrambe le facce della parete un placcaggio a fasce con tessuto unidirezionale in fibra di acciaio ad alta resistenza e collegato alla muratura mediante matrice inorganica (SRG) e la presenza di connettori di ancoraggio ad "L" in acciaio inox e fissato mediante malta in numero $4/m^2$ per eseguire il collegamento trasversale. Inoltre, è seguito dalla realizzazione di intonaco dello spessore di 2 cm. Le caratteristiche meccaniche del materiale sono:

- Grammatatura tessuto in acciaio inox, $1000 g/m^2$;
- Modulo elastico a trazione nastro, $E_f = 190 GPa$;
- Carico ultimo a trazione nastro, $f_f = 1081 N/mm^2$;
- Deformazione a trazione, $\varepsilon_f = 0.57\%$;
- Spessore equivalente di calcolo nastro, $t_f = 0.084 mm$.

Mentre, le caratteristiche geometriche del rinforzo sono:

- Larghezza nastro, $b_f = 100 mm$;
- Interasse (baricentrico), $p_f = 200 mm$.

In funzione delle suddette proprietà meccaniche e geometriche del rinforzo, è stato applicato un coefficiente migliorativo alla resistenza a taglio, τ_0 , pari a 1.32.

In direzione X, si decide di intervenire sulla parete P6 ed applicare FRCM ai due maschi che giungevano a rottura. L'intervento è eseguito su entrambe le facce, complessivamente si applicano $790 m^2$ di FRCM.

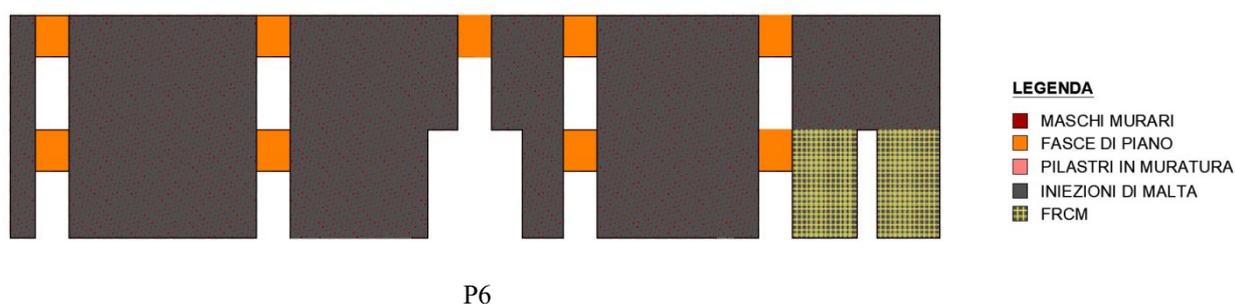


Figura 4-22: Localizzazione dell'intervento sulla parete P6 in direzione X

In Direzione Y, la direzione critica di analisi, l'analisi del danneggiamento ha mostrato la rottura contemporanea per taglio all'ultimo passo di carico delle P3, P5, P10 e P11 al I livello. Considerando la simmetria della costruzione in questa direzione, si applica FRCM oltre che alle pareti sopra citate, anche alle P1 e P8. Si estende l'intervento anche al II livello. Considerando entrambe le facce, complessivamente si applicano 746 m² di FRCM.

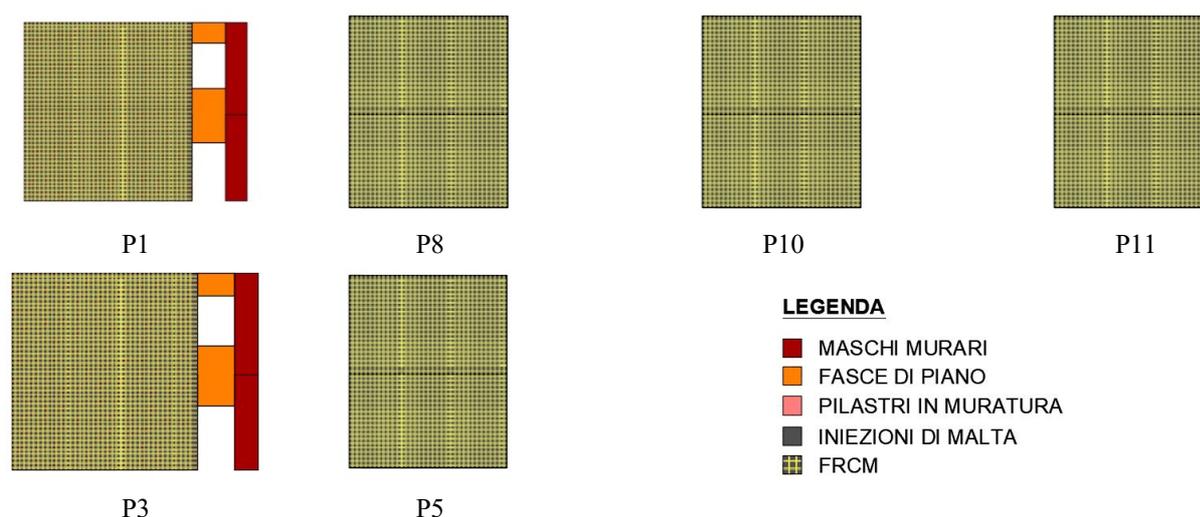


Figura 4-23: Localizzazione dell'intervento sulle pareti in direzione Y

4.3.1 ANALISI COMPARATIVA IN TERMINI DI RISPOSTA STRUTTURALE

In questa sezione vengono riportati i parametri strutturali significativi al fine di interpretare la risposta della costruzione e consentire un opportuno confronto tra i diversi stati di progetto. Nel caso delle soluzioni progettuali che prevedono anche il consolidamento delle strutture verticali, per quanto riguarda le strutture orizzontali si fa sempre riferimento alla soluzione Consolidamento 3 (§4.1), con soletta in c.a. e catene Ø24. Nel seguito, quindi, tutti i modelli saranno analizzati considerando il suddetto intervento con, in aggiunta, l'intervento previsto sulle strutture verticali dalla soluzione *a* alla *e* (§4.2).

Si riporta nel seguito un confronto in termini di: andamento della Pushover (Figura 4-24); variazione percentuale dei principali parametri che caratterizzano la bilineare equivalente rispetto agli stati di

progetto (Figura 4-25); indice di sicurezza rappresentato in Figura 4-26. Si richiama come le analisi dalla 1 alla 4 sono in direzione X (1 - 2, verso positivo; 3 - 4 verso negativo), mentre quelle dalla 5 alla 8 sono in direzione Y (5 - 6, verso positivo; 7 - 8 verso negativo). Nessuna analisi raggiunge l'unità, ma si coglie già con questi interventi un miglioramento della risposta soprattutto in direzione -X e in direzione +/- Y con la distribuzione triangolare inversa (chiamata statica in figura).

Si sottolinea che quando sono presenti le iniezioni di malta contestualmente è anche prevista la ristilatura (Consolidamento 3.b, Consolidamento 3.d e Consolidamento 3.e).

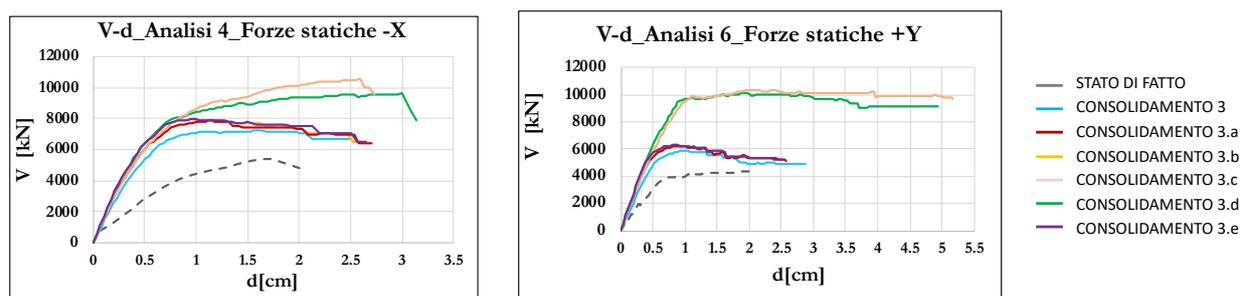


Figura 4-24: Confronto in termini di Pushover

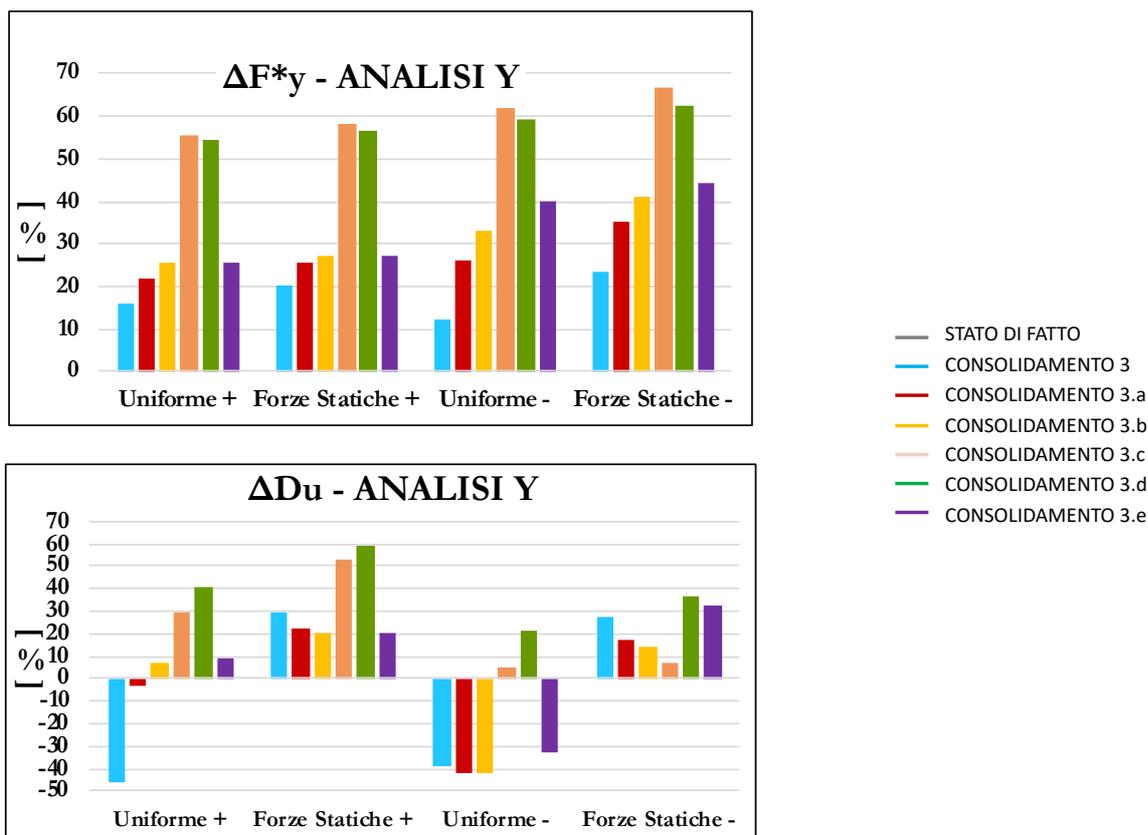


Figura 4-25: Confronto in termini di variazione percentuale dei principali parametri che caratterizzano la bilineare equivalente

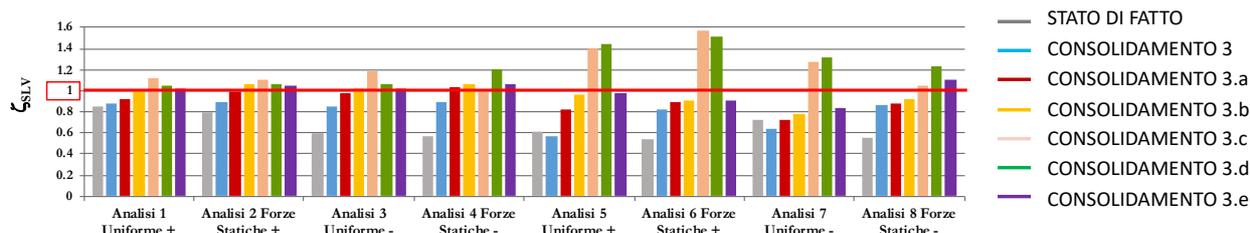


Figura 4-26: Confronto in termini di ζ_{SLV}

4.3.2 ANALISI COMPARATIVA IN TERMINI DI CLASSE di RISCHIO e PAM

Come introdotto al §2.6, un ulteriore elemento di confronto tra lo stato di fatto e le diverse scelte progettuali adottate è la PAM. A partire dal valore di PAM e dell'indice di sicurezza ζ_{SLV} è possibile associare all'edificio la Classe di Rischio Sismico.

In Figura 4-27 è rappresentato l'andamento dei valori di PAM associati allo stato di fatto e ai diversi interventi, con anche la relativa Classe di Rischio. Per il calcolo della PAM sono state condotte 24 analisi considerando direzione (X e Y), verso (+/-), due diverse distribuzioni di forze (uniforme e triangolare inversa) con le relative eccentricità. Si nota come, considerando l'eccentricità, lo stato di fatto risulta in Classe D.

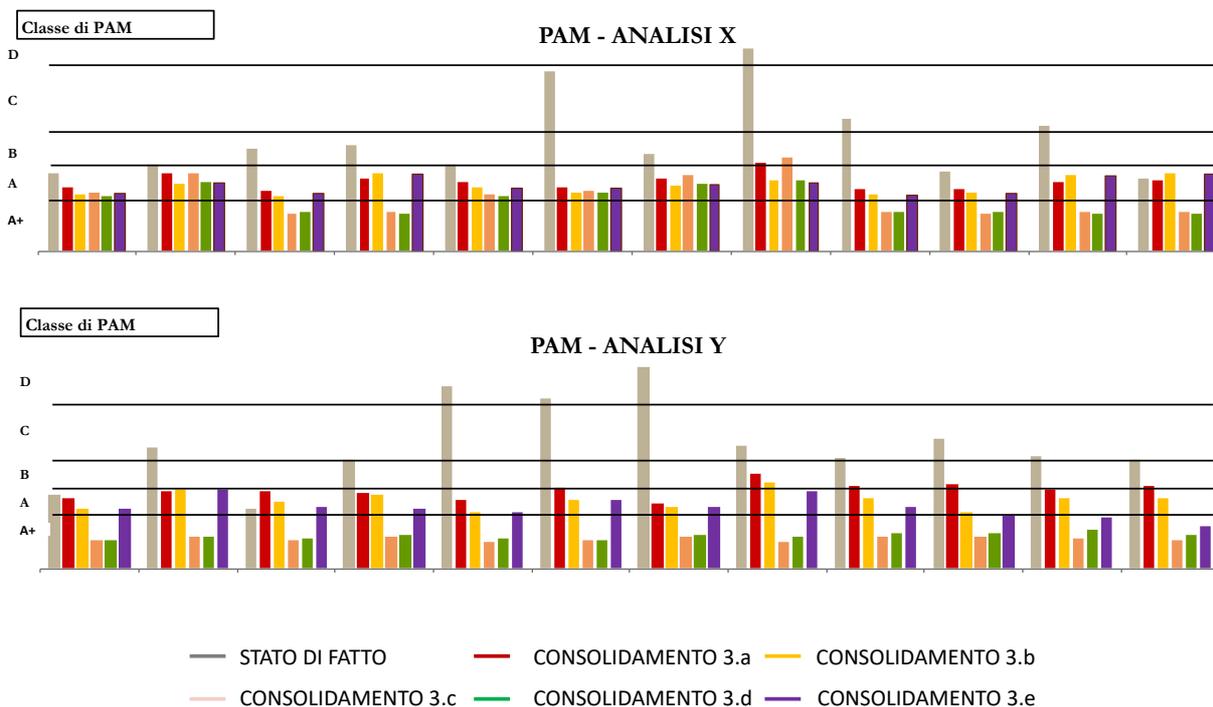


Figura 4-27: Confronto in termini di PAM

4.4 INTERVENTI ENERGETICI PREVISTI UNITAMENTE ALL'IRRIGIDIMENTO DEI SOLAI E LE STRUTTURE VERTICALI PER LO SCENARIO 2 e 3

Lo Scenario 2 ricalca gli stessi interventi previsti dallo Scenario 1 con l'aggiunta della coibentazione delle pareti verticali delimitanti il volume climatizzato poiché è stato previsto nel caso di interventi di rinforzo strutturale dei muri verticali.

L'intervento ipotizzato è la realizzazione di un cappotto esterno in XPS dello spessore di 12 cm.

Lo Scenario 3 prevede le stesse soluzioni dello Scenario 2 con l'aggiunta dell'installazione di un impianto fotovoltaico sul tetto della scuola in modo da garantire una copertura del fabbisogno di energia richiesto da fonti rinnovabili. L'obiettivo è il raggiungimento dello status di edificio nZEB, ovvero ad energia quasi zero.

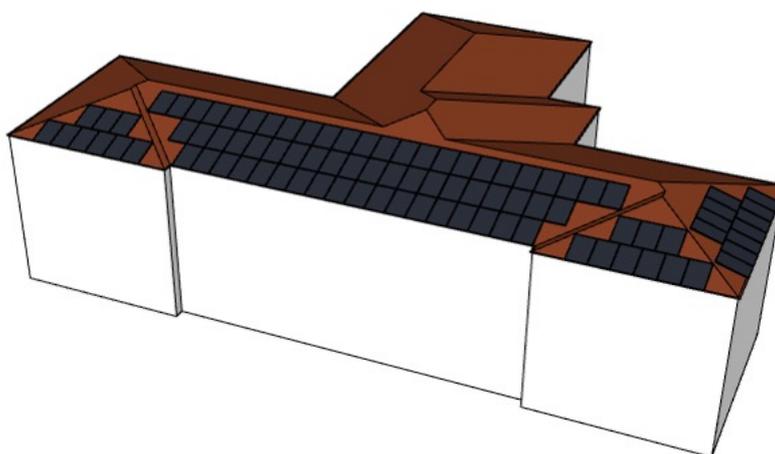


Figura 4-28: Configurazione dell'impianto fotovoltaico prevista dallo Scenario 3

Si prevede di utilizzare dei moduli da 375 kW_p, per un totale di 29.37 kW_p installati. La suddivisione sulle falde del tetto è rappresentata nella Figura 4-28 e più nel dettaglio nella tabella seguente.

Tabella 4-6: Dettaglio moduli impianto fotovoltaico.

<i>Orientamento falda</i>	<i>N° pannelli</i>	<i>Potenza [kW]</i>	<i>Area[m²]</i>
SW 1	9	2.97	15.3
SW 2	60	19.8	102
SW 3	9	2.97	15.3
SE 4	11	3.63	18.7
TOTALE	89	29.37	151.3

Il bilancio di energia tra l'energia prodotta e auto consumata, l'energia immessa in rete perché prodotta in eccesso e l'energia prelevata dalla rete per non sufficiente produzione è stato fatto su base mensile.

Dal bilancio di energia elettrica è possibile definire anche un bilancio dei costi per l'energia valutato nel seguente modo:

- Costo energia prelevata dalla rete: 0.22 €/kWh
- Costo energia immessa in rete (venduta): 0.05 €/kWh

4.4.1 RISULTATI INTERVENTI MIGLIORATIVI ENERGETICI RELATIVI ALLO SCENARIO 2

Lo Scenario 2 prevede di andare migliorare le proprietà termiche dell'involucro mantenendo la stessa configurazione impiantistica ipotizzata nello Scenario 1. I risultati attesi saranno quindi un minore fabbisogno di energia utile in modo particolare per il riscaldamento.

4.4.1.1 Classe energetica (modello quasi-stazionario)

La classe energetica (valutata servendosi del modello quasi-stazionario) risulta essere la "A3", con un indice di prestazione energetica pari a 28.93 kWh/m²·a



Figura 4-29: Prestazione energetica edificio Scenario 2

4.4.1.2 Energia utile (modello dinamico)

Nella tabella seguente si riportano i risultati mensili dei fabbisogni di energia utile per i diversi servizi energetici previsti dallo Scenario 2.

Tabella 4-7: Fabbisogni di energia utile Scenario 2.

Mese	Risc.	Risc. UTA	Deum. UTA	Risc. mensa	Deum. mensa	Raffr. uffici	ACS	Ill.
gennaio	2489	97	0	3	57	0	2489	97
febbraio	2141	75	0	4	101	0	2141	75
marzo	1041	37	0	1	34	0	1041	37
aprile	38	2	0	0	94	0	38	2
maggio	0	1094	1942	0	109	227	0	1094
giugno	0	1066	2566	0	132	378	0	1066
luglio	0	1046	3565	0	212	516	0	1046
agosto	0	538	1901	0	121	309	0	538
settembre	0	975	3566	0	263	388	0	975
ottobre	0	0	0	0	210	0	0	0
novembre	11	1	0	0	179	0	11	1
dicembre	972	51	0	0	83	0	972	51
TOTALE	6692	4983	13542	8	1595	1818	6692	4983

4.4.1.3 Energia primaria e costi (modello dinamico)

Il fabbisogno di energia primaria per il riscaldamento è ridotto in maniera sensibile rispetto alla configurazione proposta nello Scenario 1, come si può evincere dalla seguente figura.

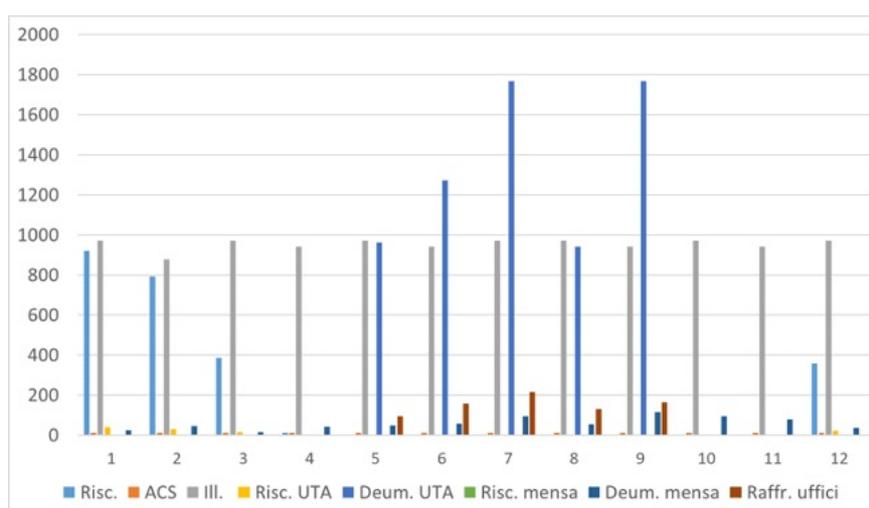


Figura 4-30: Fabbisogno mensile di energia utile per i vari servizi energetici, Scenario 2

Si riportano di seguito i risultati complessivi di energia primaria e costi di esercizio ottenuti per lo Scenario 2.

Tabella 4-8: Energia primaria e costi di esercizio Scenario 1.

Servizio energetico	Energia primaria [kWh]	Costo annuo di esercizio [€]
Riscaldamento.	2476.52	544.84
ACS	152.48	33.55
Illuminazione	11453.10	2519.68
Riscaldamento UTA	108.91	23.96
Deumidificazione UTA	6708.12	1475.79
Riscaldamento mensa	2.97	0.65

Deumidificazione mensa	706.97	155.53
Raffrescamento uffici	765.03	168.31
TOTALE	22374.10	4922.30

I costi di esercizio dell'edificio allo stato di fatto erano di circa 25'000 €, quindi la configurazione prevista dallo Scenario 2 permette di ottenere un risparmio annuo di circa 19'000 €.

4.4.2 RISULTATI INTERVENTI MIGLIORATIVI ENERGETICI RELATIVI ALLO SCENARIO 3

Lo Scenario 3 prevede di adottare le stesse soluzioni dello Scenario 2 con l'integrazione di un impianto fotovoltaico da circa 30 kW_p.

4.4.2.1 Classe energetica (modello quasi-stazionario)

La classe energetica (valutata servendosi del modello quasi-stazionario) risulta essere la "A4", con un indice di prestazione energetica pari a 2.70 kWh/m²·a

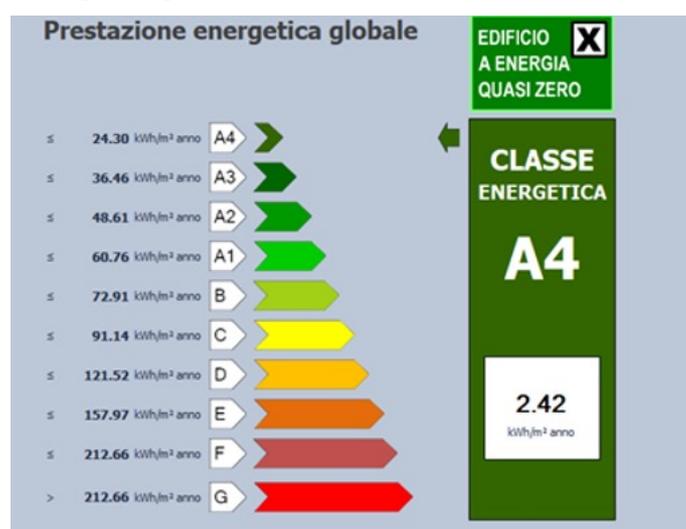


Figura 4-31: Prestazione energetica edificio Scenario 2

L'edificio risulta rispettare tutti i requisiti per essere considerato a energia quasi zero (nZEB).

4.4.2.2 Energia utile (modello dinamico)

Il fabbisogno di energia utile per i vari servizi energetici risulta essere lo stesso dello Scenario 2 quindi i risultati sono esattamente quelli riportati nella Tabella 4-7.

4.4.2.3 Energia primaria e costi (modello dinamico)

Come anticipato nel §4.4, conoscendo la producibilità dell'impianto fotovoltaico è possibile definire un bilancio di energia elettrica e un bilancio dei costi.

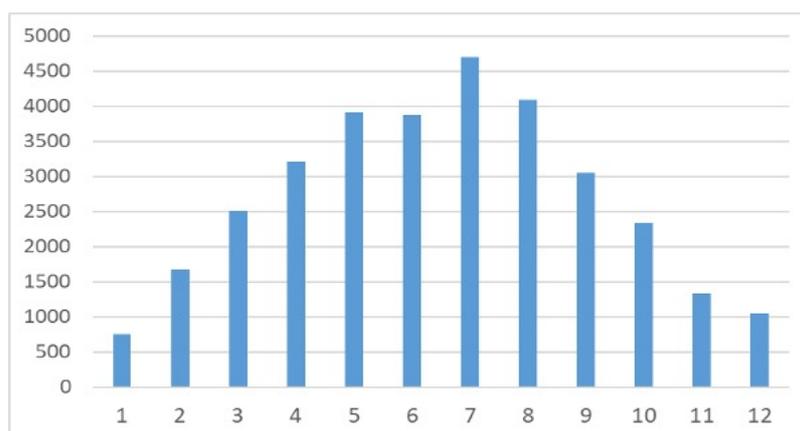


Figura 4-32: Producibilità mensile impianto fotovoltaico [kWh].

Tabella 4-9: Bilancio mensile di energia elettrica impianto fotovoltaico.

<i>Mese</i>	<i>Producibilità [kWh]</i>	<i>Energia immessa in rete [kWh]</i>	<i>Energia prelevata dalla rete [kWh]</i>
gennaio	754	0	1973
febbraio	1681	0	956
marzo	2513	1111	0
aprile	3216	2205	0
maggio	3912	1820	0
giugno	3882	1440	0
luglio	4705	1642	0
agosto	4100	1988	0
settembre	3055	54	0
ottobre	2338	1259	0
novembre	1332	294	0
dicembre	1054	0	1031
TOTALE	32540	11814	3960

Si riportano di seguito i risultati di energia primaria e costi di esercizi ottenuti per lo Scenario 3.

Tabella 4-10: Bilancio mensile di energia elettrica impianto fotovoltaico

<i>Servizio energetico</i>	<i>Energia primaria [kWh]</i>	<i>Costo annuo di esercizio [€]</i>
Riscaldamento.	921.08	202.64
ACS	12.96	2.85
Illuminazione	2824.00	621.28
Riscaldamento UTA	92.08	20.26
Deumidificazione UTA	0.00	0.00
Riscaldamento mensa	2.64	0.58
Deumidificazione mensa	107.12	23.57
Raffrescamento uffici	0.00	0.00
En. imm. in rete	11813.67	-590.68
TOTALE	15773.56	280.49

I costi di esercizio dell'edificio con gli interventi previsti dallo Scenario 3 diventano quasi nulli e permettono di ottenere un risparmio annuo di quasi 25'000 €.

4.5 ANALISI DEI COSTI DEGLI INTERVENTI DI TIPO ENERGETICO

Oltre a valutare i benefici generati dalle diverse soluzioni di intervento è necessario stimare quelli che sono i costi di investimento necessari per la realizzazione delle opere previste.

Per valutare i costi di investimento per gli interventi è stato utilizzato il “Prezzario ufficiale 2020 della Regione Marche in materia di lavori pubblici e di sicurezza e salute nei cantieri temporanei e mobili” [11].

Si riportano di seguito tutti gli interventi proposti per la realizzazione dei tre diversi scenari e i relativi costi necessari alla loro realizzazione.

Tabella 4-11: Dettaglio costo singoli interventi

<i>INTERVENTI</i>	<i>Costo [€]</i>	<i>Costo specifico [€/m²-kW_p]</i>
Isolamento pareti verticali	43252	38
Isolamento Solai	35977	35
Sostituzione infissi	85482	421
Impianto radiante	76613	81
Sostituzione LED	39946	42
Canalizzazione aria	20907	-
Riscaldamento	10861	-
UTA scuola	12698	-
Mensa	3576	-
Clima uffici	1813	-
Produzione ACS	3096	-
Impianto fotovoltaico	64312	2144
TOTALE	398534	-

In particolare, il costo complessivo di investimento dello Scenario 1 è dato dalla somma di tutti i costi relativi agli impianti, all'isolamento dei solai e alla sostituzione dei serramenti. Il totale risulta essere pari a **290'970 €**.

Il costo complessivo di investimento dello Scenario 2 è dato dalla somma dei costi dello Scenario 1 più il costo di realizzazione del cappotto esterno in XPS. Il totale risulta essere pari a **334'222 €**.

Il costo complessivo di investimento dello Scenario 3 è dato dalla somma dei costi dello Scenario 2 più il costo di realizzazione dell'impianto fotovoltaico. Il totale risulta essere pari a **398'534 €**.

4.6 RIEPILOGO INTERVENTI E COSTI

Al fine di quantificare i costi di intervento relativi agli interventi strutturali connessi all'implementazione degli interventi locali esterni ed interni è stato stilato un computo metrico estimativo in accordo con il prezzario regionale della Regione Abruzzo 2018 [12]. Esso è stato integrato con le opere previste per gli interventi di tipo energetico, il cui costo è riportato al §4.5.

Di seguito si riporta in Tabella 4-12 il riepilogo dei costi di intervento suddivisi per opere strutturali, opere di demolizione e ripristino finiture ed opere di efficientamento energetico, computati valutando separatamente gli oneri per la sicurezza. I costi sono stati anche adimensionalizzati in funzione dei metri quadri di superficie calpestabile ed in funzione della volumetria dell'edificio.

Tabella 4-12: Riepilogo dei costi per l'implementazione degli interventi proposti sugli orizzontamenti

Intervento proposto	Descrizione	Importo	Superficie calpestabile	Volumetria		
	OPERE CIVILI	[€]	[m ²]	[m ³]	€/m ²	€/m ³
Consolidamento 1.A e Scenario 0 energetico	Opere strutturali	44171	920	3800	48.01	11.62
	Opere di demolizione e ripristino finiture	44187			48.03	11.63
	Parziale strutturale	88358			96.04	23.25
	Opere di efficientamento energetico	-			-	-
	TOTALE INTERVENTI	88358			96.04	23.25
Consolidamento 1.B e Scenario 0 energetico	Opere strutturali	88342	920	3800	96.02	23.25
	Opere di demolizione e ripristino finiture	81903			89.02	21.55
	Parziale strutturale	170245			185.05	44.80
	Opere di efficientamento energetico	-			-	-
	TOTALE INTERVENTI	170245			185.05	44.80
Consolidamento 2 e Scenario 0 energetico	Opere strutturali	188359	920	3800	204.74	49.57
	Opere di demolizione e ripristino finiture	-			-	-
	Parziale strutturale	188359			204.74	49.57
	Opere di efficientamento energetico	-			-	-
	TOTALE INTERVENTI	188359			204.74	49.57
Consolidamento 3 strutturale e Scenario 1 energetico	Opere strutturali	74803	920	3800	81.31	19.69
	Opere di demolizione e ripristino finiture	81903			89.02	21.55
	Parziale strutturale	156706			170.33	41.24
	Opere di efficientamento energetico	290970			316.27	76.57
	TOTALE INTERVENTI	447676			486.60	117.81
	ONERI DELLA SICUREZZA (PSC)					
	Oneri comuni ai vari livelli di progettazione	47000	920	3800	51.09	12.37

Tabella 4-13: Riepilogo dei costi per l'implementazione degli interventi proposti sulle strutture verticali

Intervento proposto	Descrizione	Importo	Sup. calpes.	Vol.		
	OPERE CIVILI	[€]	[m ²]	[m ³]	€/m ²	€/m ³
Consolidamento a e Scenari 2 e 3	Opere strutturali	143343	920	3800	155.81	37.72
	Opere di demolizione e ripristino finiture	27312			29.69	7.19
	Parziale strutturale	170655			185.5	44.9
	Opere di efficientamento energetico – Scenario 2/3	43252 / 107564			47.01 / 116.92	11.38 / 28.31
	TOTALE INTERVENTI	213907 / 278219			232.51 / 302.41	56.29 / 73.22
Consolidamento b e Scenari 2 e 3	Opere strutturali	136122	920	3800	148	35.8
	Opere di demolizione e ripristino finiture	-			-	-
	Parziale strutturale	136122			148	35.8
	Opere di efficientamento energetico – Scenario 2/3	43252 / 107564			47.01 / 116.92	11.38 / 28.31
	TOTALE INTERVENTI	179374 / 243686			194.97 / 264.88	47.20 / 64.13
Consolidamento c e Scenari 2 e 3	Opere strutturali	72395	920	3800	78.7	19.1
	Opere di demolizione e ripristino finiture	-			-	-
	Parziale strutturale	72395			78.7	19.1
	Opere di efficientamento energetico – Scenario 2/3	43252 / 107564			47.01 / 116.92	11.38 / 28.31
	TOTALE INTERVENTI	115647 / 179959			125.70 / 195.61	30.43 / 47.36
Consolidamento d e Scenari 2 e 3	Opere strutturali	31810	920	3800	34.6	8.4
	Opere di demolizione e ripristino finiture	-				
	Parziale strutturale	31810			34.6	8.4
	Opere di efficientamento energetico – Scenario 2/3	43252 / 107564			47.01 / 116.92	11.38 / 28.31
	TOTALE INTERVENTI	75062 / 139374			81.59 / 151.49	19.75 / 36.68
Consolidamento e e Scenari 2 e 3	Opere strutturali	169970	920	3800	184.7	44.7
	Opere di demolizione e ripristino finiture	-			-	-
	Parziale strutturale	169970			184.7	44.7
	Opere di efficientamento energetico – Scenario 2/3	43252 / 107564			47.01 / 116.92	11.38 / 28.31
	TOTALE INTERVENTI	213222 / 277534			231.76 / 301.67	56.11 / 73.04
	ONERI DELLA SICUREZZA (PSC)					
	Oneri comuni ai vari livelli di progettazione	47000	920	3800	51.09	12.37

5 ANALISI COMPARATIVA DEGLI INTERVENTI

Il caso di studio proposto, nello stato di fatto è caratterizzato da solai deformabili e fasce di piano deboli: condizione che vuole essere rappresentativa e caratterizzante di una parte degli edifici esistenti in muratura. L'analisi della risposta strutturale ha consentito di interpretare al meglio il comportamento, definendo le criticità e gli elementi che ne governano la risposta. In particolare, è stato possibile notare che in direzione X sono presenti due pareti che, insieme, assorbono circa il 60% del taglio di base, mentre, in direzione Y, che è la direzione risultata più critica, sono presenti sei pareti costituite quasi totalmente da maschi murari ciechi, quindi caratterizzati da elevata rigidità, che complessivamente assorbono l'80% del taglio di base, in maniera piuttosto equiparata.

La presenza di solai deformabili ed un comportamento non scatolare, non consente la redistribuzione delle azioni tra le pareti una volta raggiunto un elevato livello di danneggiamento, limitando ed arrestando l'evoluzione della curva pushover. Le pareti ed i solai si comportano in modo indipendente.

La prima strategia di intervento ha, quindi, il compito di consolidare gli orizzontamenti, il loro collegamento con la muratura e garantire un comportamento scatolare: si vuole ottenere un diaframma di piano sufficientemente rigido e ben collegato tale da garantire una migliore redistribuzione delle forze tra le pareti. La presenza di elementi resistenti a trazione quali catene o profili in acciaio ha il compito di incrementare la connessione tra pareti ortogonali ed aumentare la resistenza delle fasce di piano.

Considerando aspetti come l'invasività dell'intervento, l'incremento di massa, l'efficacia ed il costo, sono stati pensati e confrontati diversi stati di progetto.

L'intervento di consolidamento che prevede la realizzazione della soletta in c.a. con cls alleggerito e l'inserimento di catene è quello che, in questo caso di studio specifico, è risultato ottimizzare l'analisi costi-benefici, apportando importanti miglioramenti strutturali pur con spese di realizzazione contenute. Nonostante però il notevole progresso nel comportamento globale, la costruzione non risulta aver raggiunto un livello di sicurezza accettabile in quanto la risposta è governata prevalentemente dai maschi murari, per cui è fondamentale il loro consolidamento.

L'obiettivo che è stato prefissato è raggiungere l'adeguamento sismico o comunque coefficienti di vulnerabilità $\zeta \geq 0.7$, tenendo presente che lo stato di fatto era caratterizzato da $\zeta \cong 0.5$.

L'analisi della qualità della risposta strutturale attraverso opportuni fattori quantitativi ha consentito di individuare quali sono i parametri su cui agire e dove localizzare gli interventi.

A partire dal modello che prevede la realizzazione della soletta in c.a. con cls alleggerito e l'inserimento di catene, sono stati proposti diversi stati di progetto che prevedono il consolidamento della struttura verticale e confrontati sia in termini economici sia in termini di miglioramenti indotti. Tramite la tecnica della ristilatura dei giunti e dell'iniezione di malta si è agito per ridurre la domanda di spostamento del sistema, D_{max} , aumentandone la rigidezza e la resistenza. La normativa differenzia i due interventi semplicemente applicando un diverso coefficiente ai parametri strutturali. È intuibile, però, che l'esecuzione di iniezioni conferisca un miglior legame ed una maggiore compattezza alle pareti della muratura, andando a ridurre la percentuale di vuoti che caratterizzava lo stato di fatto. Se eseguita ad opera d'arte ed unita alla ristilatura dei giunti per evitare la fuoriuscita del materiale iniettato, l'intervento si ritiene molto più efficace rispetto alla sola ristilatura.

Nel seguito, in Tabella 5-1, si riporta comunque un quadro sinottico 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 ed i relativi costi unitari degli stessi. Si sottolinea che quando sono presenti le iniezioni di malta contestualmente è anche prevista la ristilatura.

La validazione dell'analisi dei costi, comprensivi dell'intervento di consolidamento eseguito sia sulla struttura orizzontale sia sulla struttura verticale, è stata eseguita confrontando i risultati e ottenendo una buona coerenza con quanto presentato nel *Libro bianco sulla ricostruzione privata fuori dai centri storici nei comuni colpiti dal sisma dell'Abruzzo del 6 aprile 2009* [13].

Tabella 5-1: Quadro sinottico dei costi degli interventi

Intervento proposto	Descrizione	Importo	Sup. cal.	Vol.		
	OPERE CIVILI	[€]	[m ²]	[m ³]	€/m ²	€/m ³
Consolidamento 3.a e Scenario 2/3 ($\zeta_{SLV}=0.73$, PAM=1.49%) +2 classi Sismiche +7 Classi Energy (Sc. 2) +8 Classi Energy (Sc. 3)	Opere strutturali	102115	920	3800	111	27
	Opere di demolizione e ripristino finiture	225246			245	59
	Parziale strutturale	327361			356	86
	Opere di efficientamento energetico – Scenario 2/3	334222 / 398534			363 / 433	88 / 105
	TOTALE INTERVENTI	661583 / 725895			719 / 789	174 / 191
Consolidamento 3.b e Scenario 2/3 ($\zeta_{SLV}=0.78$, PAM=1.33%) +2 classi Sismiche +7 Classi Energy (Sc. 2) +8 Classi Energy (Sc. 3)	Opere strutturali	238237	920	3800	259	63
	Opere di demolizione e ripristino finiture	225246			245	59
	Parziale strutturale	463483			504	122
	Opere di efficientamento energetico – Scenario 2/3	334222 / 398534			363/ 433	88 / 105
	TOTALE INTERVENTI	797705 / 862017			867 / 937	210 / 227
Consolidamento 3.c e Scenario 2/3 ($\zeta_{SLV}=1.05$, PAM=1.18%) +2 classi Sismiche +7 Classi Energy (Sc. 2) +8 Classi Energy (Sc. 3)	Opere strutturali	174510	920	3800	190	46
	Opere di demolizione e ripristino finiture	225246			245	59
	Parziale strutturale	399756			434.5	105
	Opere di efficientamento energetico – Scenario 2/3	334222 / 398534			363 / 433	88 / 105
	TOTALE INTERVENTI	733978 / 798290			797.5 / 867.5	193 / 210
Consolidamento 3.d e Scenario 2/3 ($\zeta_{SLV}=1.04$, PAM=0.79%) +3 classi Sismiche +7 Classi Energy (Sc. 2) +8 Classi Energy (Sc. 3)	Opere strutturali	270047	920	3800	294	71
	Opere di demolizione e ripristino finiture	225246			245	59
	Parziale strutturale	495293			538	130
	Opere di efficientamento energetico – Scenario 2/3	334222 / 398534			363 / 433	88 / 105
	TOTALE INTERVENTI	829515 / 893827			901 / 971	218 / 235
Consolidamento 3.e e Scenario 2/3 ($\zeta_{SLV}=0.98$, PAM=1.22%) +3/2 classi Sismiche +7 Classi Energy (Sc. 2) +8 Classi Energy (Sc. 3)	Opere strutturali	408207	920	3800	444	107
	Opere di demolizione e ripristino finiture	225246			245	59
	Parziale strutturale	633453			688.5	167
	Opere di efficientamento energetico – Scenario 2/3	334222 / 398534			363 / 433	88 / 105
	TOTALE INTERVENTI	967675 / 1031987			1051.5 / 1121.5	255 / 272
	ONERI DELLA SICUREZZA (PSC)					
	Oneri comuni ai vari livelli di progettazione	47000	920	3800	51.09	12.37

5.1 ANALISI DEI TEMPI DI ESECUZIONE DELLE LAVORAZIONI

Nel seguente paragrafo si analizzano le tempistiche necessarie alla realizzazione delle varie lavorazioni per i livelli di intervento proposti precedentemente. Per ogni lavorazione prodotta è stata calcolata l'incidenza di manodopera, ipotizzando poi la possibilità di servirsi da una a tre "squadre tipo" per lavorazione. Per "squadra tipo" si intende, nel seguente caso, una squadra composta da: n°1 operaio specializzato, n°1 operaio qualificato, n°1 manovale. È bene precisare, onde evitare possibili incomprensioni nella lettura della tabella che segue, che mentre per quanto riguarda la parte di opere strutturali relativo alle strutture verticali, l'utilizzo di una o più squadre che lavorano in contemporanea, riduce notevolmente i tempi di lavorazione, ciò non si può affermare, invece, per la parte di opere energetiche. In questo caso, infatti, sono molteplici i parametri che concorrono alla stima di una tempistica necessaria alla realizzazione delle opere e che non dipendono dal quantitativo di squadre di lavoratori impiegate contemporaneamente; un semplice esempio di quanto affermato può essere la sostituzione dei serramenti esterni della struttura, in cui, una volta rimossi quest'ultimi, vi è una fase relativa alla realizzazione in fabbrica dei nuovi infissi che si configura come una situazione che non dipende dalle squadre di lavoratori impiegate in cantiere, tantomeno dai tempi di lavorazione del cantiere, che nel frattempo va avanti. Stessa cosa dicasi delle opere impiantistiche. Fatta questa premessa, di seguito si riporta la tabella relativa all'analisi dei tempi di esecuzione dei lavori.

Tabella 5-2: Analisi dei tempi di esecuzione degli interventi.

Intervento proposto	Descrizione	Giorni lavorativi		
	OPERE CIVILI	1 squadra	2 squadre	3 squadre
Strutture orizzontali: Consolidamento 3 e Scenario 1 energetico	Opere strutturali	79	39	33
	Opere di efficientamento energetico	77	39	39
	Sicurezza e cantiere	14	7	7
	TOTALE INTERVENTI	170	85	79
Strutture orizzontali e verticali: Consolidamento 3.a e Scenario 2/3	Opere strutturali	162	81	60
	Opere di efficientamento energetico	99/118	49/59	49/59
	Sicurezza e cantiere	21	11	11
	TOTALE INTERVENTI	282/301	141/151	120/130
Strutture orizzontali e verticali: Consolidamento 3.b e Scenario 2/3	Opere strutturali	232	116	82
	Opere di efficientamento energetico	99/118	49/59	49/59
	Sicurezza e cantiere	21	11	11
	TOTALE INTERVENTI	352/371	176/186	142/152
Strutture orizzontali e verticali: Consolidamento 3.c e Scenario 2/3	Opere strutturali	199	100	73
	Opere di efficientamento energetico	99/118	49/59	49/59
	Sicurezza e cantiere	21	11	11
	TOTALE INTERVENTI	319/338	160/170	133/143
Strutture orizzontali e verticali: Consolidamento 3.d e Scenario 2/3	Opere strutturali	248	124	89
	Opere di efficientamento energetico	99/118	49/59	49/59
	Sicurezza e cantiere	21	11	11
	TOTALE INTERVENTI	368/387	184/194	149/159
Strutture orizzontali e verticali: Consolidamento 3.e e Scenario 2/3	Opere strutturali	336	168	118
	Opere di efficientamento energetico	99/118	49/59	49/59
	Sicurezza e cantiere	21	11	11
	TOTALE INTERVENTI	456/475	228/238	178/188

In generale, si riportano alcune considerazioni: per le lavorazioni previste occorrono tra i 9 ed i 12 mesi per completare gli interventi; per la rimozione e il riposizionamento degli infissi vista anche la dimensione del complesso una squadra è sufficiente; per le lavorazioni concernenti gli oneri di sicurezza all'aumentare dell'importo si è ipotizzato al più l'impiego di due squadre.

6 CONSIDERAZIONI FINALI

Nel presente lavoro è stata effettuata un'analisi sismica ed energetica a partire da uno stato di fatto "convenzionale" della Scuola dell'infanzia "Pietro Capuzi" di Visso (MC), con lo scopo di proporre e valutare degli interventi di efficientamento energetico basati su diversi livelli di intervento di tipo strutturale, finalizzati all'adeguamento sismico della struttura.

La scuola analizzata è stata studiata nella configurazione caratterizzata da solai deformabili e fasce di piano deboli, condizione che vuole essere rappresentativa e caratterizzante di una parte degli edifici esistenti in muratura. Nella sua configurazione reale, la scuola (oggi demolita) cui si ispira il caso studio era invece costituita da solai rigidi in latero-cemento con soletta in calcestruzzo armato e da elementi accoppiati alle fasce murarie, quali cordoli in cemento armato realizzati sistematicamente in tutto l'edificio. La scelta di considerare uno stato di fatto "convenzionale" diverso da quello effettivo è stata motivata dalla volontà nell'approfondimento proposto di presentare interventi strutturali che a titolo esemplificativo: interessassero sia gli elementi strutturali orizzontali che verticali dell'edificio; e che fossero diretti ad incrementare non solo le capacità della struttura dal punto di vista della resistenza della muratura, ma anche del comportamento d'insieme. I risultati ottenuti dal punto di vista economico e di classi di rischio sismico risultano piuttosto impattanti quando si consideri come stato di partenza quello "convenzionale" (particolarmente vulnerabile). Tuttavia, avere considerato sia l'impatto economico che quello sulla sicurezza strutturale prima delle soluzioni che riguardano solo gli interventi alle strutture orizzontali e poi in maniera incrementale anche su quelle verticali consente di fare valutazioni anche qualora lo stato di partenza potesse confidare nella presenza di orizzontamenti sufficientemente rigidi e ben collegati.

Dal punto di vista energetico, l'edificio allo stato di fatto può essere considerato un edificio "standard" privo di accorgimenti mirati a garantire una buona efficienza energetica. Si è quindi proceduto con l'effettuare una valutazione dello stato di fatto attraverso la definizione di due diversi modelli: un modello di tipo quasi-stazionario necessario per la determinazione della classe energetica, dato che la normativa prevede l'utilizzo di questo preciso metodo di calcolo; un modello dinamico che permette di ottenere un maggiore grado di dettaglio, necessario per effettuare una stima più veritiera del comportamento dell'edificio e dei relativi consumi e costi per i vari servizi energetici.

Le ipotesi di intervento sono state fatte sulla base delle proposte di intervento di rinforzo strutturale, quindi in alcuni casi si è optato anche per soluzioni che, se prese singolarmente, risulterebbero abbastanza invasive (ad esempio il pavimento radiante). Considerando, però, che è previsto di

intervenire per l'adeguamento sismico, alcune soluzioni si possono considerare comunque convenienti.

La prima strategia di intervento strutturale consiste nel consolidare gli orizzontamenti, in particolare la proposta prevede l'inserimento di una soletta in c.a. più catene Ø24 (Consolidamento 3) che presenta importanti miglioramenti strutturali, garantendo un comportamento di insieme, ma ancora insufficiente per ottenere l'adeguamento sismico imposto dalle NTC [1]. L'analisi approfondita del modello, nel quale è previsto l'intervento, ha consentito di individuare le pareti dominanti che caratterizzano la risposta della costruzione in entrambe le direzioni, rendendo così efficienti ed ottimizzati gli interventi di miglioramento sulla struttura verticale.

I modelli relativi al Consolidamento 3.a e Consolidamento 3.b non consentono l'adeguamento sismico ma permettono di raggiungere un buon miglioramento rispetto allo stato di fatto. Confrontandoli, il Consolidamento 3.a risulta essere più efficace allo SLD e SLO ed inoltre meno costoso rispetto al 3.b (Tabella 5-1). Entrambi i modelli hanno comunque raggiunto un accettabile livello di sicurezza, con $\zeta_{SLV} \geq 0.73$ ed un incremento massimo rispetto allo stato di fatto in entrambe le direzioni del 40-45% nelle 8 analisi di base.

Sulla base del consolidamento strutturale, l'intervento energetico prevede il rinnovo totale degli impianti di riscaldamento (generazione, regolazione, emissione), produzione ACS e illuminazione. Si è inoltre valutato di sostituire i serramenti con finestre basso emissive ad elevata efficienza e di isolare i solai verso il terreno e il sottotetto. Questa soluzione permette di diminuire in minima parte il fabbisogno di energia termica per il riscaldamento (finestre e solai), ma soprattutto di aumentare l'efficienza globale dell'edificio riducendo il fabbisogno di energia primaria. Va considerato inoltre un miglioramento del comfort termico e della qualità dell'aria dei diversi ambienti. In particolare, lo Scenario 1 permette di ottenere un salto di 2 classi energetiche (dalla F alla D) e di conseguire un risparmio annuo di circa 15'000 € a fronte di un investimento iniziale di 277'033 €.

Dal punto di vista strutturale, nonostante il notevole progresso nel comportamento globale in direzione dell'adeguamento sismico, dopo aver analizzato il comportamento e la modalità di rottura che caratterizzava i modelli relativi al Consolidamento 3.a e Consolidamento 3.b, si è trovato nell'applicazione localizzata di FRP la soluzione ideale per migliorare ulteriormente la risposta della costruzione; agendo sulla duttilità del sistema si incrementa la capacità di spostamento, D_u , agendo sulla resistenza a taglio si pilota la rottura verso la pressoflessione.

L'aumento di costo dovuto all'applicazione di FRP vale per i modelli Consolidamento 3.c e Consolidamento 3.d. Essi consentono l'adeguamento sismico garantendo $\zeta_{SLV} > 1$ ed un incremento massimo del livello di sicurezza rispetto allo stato di fatto in direzione X di oltre il 50% e in direzione

Y di circa il 65%, mentre rispetto ai Consolidamento 3.a e Consolidamento 3.b in direzione X del 10% ed in direzione Y del 30%. Il modello Consolidamento 3.c risulta essere meno costoso rispetto al 3.d (Tabella 5-1). A partire dal modello Consolidamento 3.b, è stata prevista l'applicazione di uno strato di FRCM in determinati maschi murari (Consolidamento 3.e); l'incremento di resistenza al taglio che ne consegue risulta essere molto esiguo e assolutamente non sufficiente a raggiungere l'adeguamento sismico. Vengono garantiti, nelle prime otto analisi, coefficienti $\zeta_{SLV} > 1$ in direzione X e $\zeta_{SLV} > 0.83$ in direzione Y. In termini economici è quello che richiede in assoluto un investimento iniziale maggiore rispetto a tutte le altre soluzioni. Dal punto di vista strutturale, in sintesi, sono state individuate due possibili strade di intervento.

- La prima soluzione proposta è costituita dalla realizzazione della soletta in c.a., l'inserimento di catene e la ristilatura dei giunti localizzata (Consolidamento 3.a). Questa soluzione è la più economica ($\approx 327'361$ € senza oneri di sicurezza) ma comunque capace di soddisfare la maggior parte delle verifiche imposte dalla normativa ($\zeta \geq 0.73$). La Perdita economica Annuale Media attesa (PAM) passa dalla classe D dello stato di fatto alla classe B.
- La seconda è costituita dalla realizzazione della soletta in c.a., l'inserimento di catene, la ristilatura, l'iniezione di malta e l'applicazione di FRP localizzata (Consolidamento 3.e). Questa soluzione è più dispendiosa rispetto alla precedente ($\approx 495'293$ € senza oneri di sicurezza) ma capace di soddisfare tutte le verifiche, portando la costruzione in uno stato di adeguamento sismico, un PAM di classe A.

Unitamente a questi interventi, dal punto di vista energetico è possibile andare ad intervenire sull'isolamento dei muri perimetrali dall'esterno attraverso l'applicazione di un cappotto in XPS. Questo tipo di intervento permette di ridurre in maniera significativa il fabbisogno di energia utile per quanto riguarda la climatizzazione. Di conseguenza determina una notevole diminuzione anche dei consumi energetici, in modo particolare per il riscaldamento, e dei costi di esercizio. Lo Scenario 2 permette di ottenere un salto di 7 classi energetiche (dalla F alla A3, 5 ulteriori classi rispetto allo Scenario 1) e di conseguire un risparmio annuo di circa 20'000 € a fronte di un investimento iniziale di 334'222 €.

Oltre all'isolamento e all'intervento sulla parte impiantistica è stato ipotizzato anche uno scenario che prevede l'installazione di un impianto fotovoltaico da circa 30 kW_p per la produzione di energia elettrica (Scenario 3), in modo da garantire una minore richiesta di energia elettrica dalla rete e rendere l'edificio il più possibile indipendente. Questa soluzione permette di conseguire la classe energetica più elevata e di rendere l'edificio ad energia quasi zero. Essa risulta la migliore anche dal punto di vista di convenienza dell'investimento poiché, sebbene richieda un maggiore costo iniziale

(398'534 € contro i 334'222 € e 290'970 € delle altre configurazioni), permette di raggiungere un risparmio annuo quasi totale rispetto alla spesa dell'edificio allo stato di fatto. Inoltre, lo status di edificio a energia quasi zero dà la possibilità di accesso a degli incentivi erogati dal GSE sensibilmente maggiore rispetto agli altri casi.

Bibliografia

- [1] NTC 2018. Italian Technical Code, Decreto Ministeriale 17/1/2018. “Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni”. Ministry of Infrastructures and Transportation, G.U. n.42 of 20/2/2018 (In Italian)
- [2] Circolare 21 gennaio 2018, n.7 C.S.LL.PP., Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni” di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018
- [3] Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, D.M. 16 febbraio 2016 recante : “Aggiornamento della disciplina per l’incentivazione di interventi di piccole dimensioni per l’incremento dell’efficienza energetica e per la produzione di energia termica da fonti rinnovabili”, pubblicato in GU n. 51 del 02/03/2016.
- [4] Lagomarsino S, Penna A, Galasco A, Cattari S. (2012), TREMURI program: Seismic Analyses of 3D Masonry Buildings, Release 2.0, University of Genoa, Italy; (mailto: tremuri@gmail.com).
- [5] Lagomarsino S, Penna A, Galasco A, Cattari S. (2013), TREMURI program: an equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings, *Engineering Structures*, 56, pp. 1787-1799, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.08.002>. Lagomarsino S, Penna A, Galasco A, Cattari S (2013) *TREMURI program: an equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings*, *Engineering Structures*, 56: 1787-1799.
- [6] Direttiva P.C.M. 9 febbraio 2011. Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle Norme tecniche per le costruzioni di cui al decreto del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti del 14 gennaio 2008. G.U. 26-2-2011, N. 47 - suppl.ord. N. 54.
- [7] Fajfar, P., 1999, Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 28, 979-993.
- [8] D.M. n.24 09 gennaio 2020. “Ministero delle infrastrutture e dei trasporti, “D . M . 9 gennaio 2020 , n . 24 recante : “ Sisma Bonus - Linee guida per la classificazione del rischio sismico delle costruzioni.”.
- [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] M. Dolce *et al.*, “An integrated design approach for the retrofit of existing RC school buildings,” 2019.

- [11] Dipartimento Edilizia e Lavori Pubblici Regione Abruzzo, “Prezzario ufficiale 2020 della Regione Marche in materia di lavori pubblici e di sicurezza e salute nei cantieri temporanei e mobili,” 2020.
- [12] Dipartimento opere pubbliche Regione Abruzzo, “Prezzi informativi delle opere edili,” 2018.
- [13] Dolce M, Manfredi G (a cura di) (2015) Libro bianco sulla ricostruzione privata fuori dai crateri storici nei comuni colpiti dal sisma dell’Abruzzo del 6 aprile 2009, ReLUIS, FINTECNA, CINEAS. ISBN 978-88-89972-50-2..