

Ricerca di Sistema elettrico



Soluzioni standardizzate per coperture di edifici rappresentativi del parco edilizio italiano con applicazione al caso reale. Individuazione di soluzioni complementari ai sistemi Off-Site per configurazioni particolari di pareti: realizzazione prototipo per test di verifica delle prestazioni (LA2.13)

Maria-Anna Segreto, Alessandro Tallini, Ivan Roselli, A. Marzo, F. Saitta, C. Tripepi, I. Iovinella

Soluzioni standardizzate per coperture di edifici rappresentativi del parco edilizio italiano con applicazione al caso reale. Individuazione di soluzioni complementari ai sistemi Off-Site per configurazioni particolari di pareti: realizzazione prototipo per test di verifica delle prestazioni

M.-A. Segreto, A. Tallini (ENEA - DUEE SPS SIE)

I. Roselli (ENEA - TERIN ICER ICS)

A. Marzo, F. Saitta, C. Tripepi, I. Iovinella (ENEA - SSPT IMPACT SPAC)

Hanno collaborato: F. Baldi, S. Beozzo, A. Gugliandolo, T. Susca (ENEA - DUEE SPS SIE)

C. Romeo (ENEA - DUEE SPS ESU), V. Fioriti, A. Colucci, A. Picca (ENEA - TERIN ICER ICS)

A. Cataldo (TERIN-DEC-ACEL), Baldini M. (ISER-SPP)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione*

Progetto: *Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica*

Linea di attività: 2.13

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Paolo Sdringola, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 07/2023

Mese inizio effettivo: 07/2023

Mese fine previsto: 12/2024

Mese fine effettivo: 12/2024

Indice

1	Risultati attesi	4
1.1	Obiettivi attesi.....	4
2	Risultati ottenuti.....	5
2.1	Obiettivi raggiunti.....	5
3	Prodotti attesi	6
3.1	Schede a catalogo delle soluzioni standardizzate	6
3.2	Integrazione della matrice Dinamica di scelta.....	6
3.3	Rapporto tecnico su modello numerico e risultati sperimentali per indicazioni progettuali dell'intervento OnSite	6
4	Prodotti sviluppati	7
4.1	Schede a catalogo delle soluzioni standardizzate	7
4.2	Integrazione della matrice Dinamica di scelta.....	7
4.3	Rapporto tecnico su modello numerico e risultati sperimentali per indicazioni progettuali dell'intervento OnSite	7
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	8
6	Sintesi delle attività svolte	9
7	Dettaglio delle attività svolte.....	10
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	25
9	Pubblicazioni scientifiche	26
9.1	Pubblicazioni diverse da articoli.....	26
9.2	Partecipazione a convegni e congressi.....	26
10	Eventi di disseminazione	27

Indice delle figure

Figura 1: Tabella con alcune delle simulazioni effettuate nelle 6 differenti fasce climatiche italiane prendendo in considerazione 3 diversi scenari di riqualificazione percorribili.	5
Figura 2: edificio ricorrente (PTR 2019-2021).	11
Figura 3: Tabelle dei risultati delle modellazioni energetiche per le 18 città rappresentative con le 4 differenti soluzioni.....	12
Figura 4: Tabelle dei risultati relativi alle emissioni di CO ₂ per le 18 città rappresentative con le 4 differenti soluzioni.	13
Figura 5: analisi degli spessori necessari dei materiali selezionati in funzione della città (zona climatica).	13
Figura 6: scheda esempio.	14
Figura 7: Tabelle di comparazione per la verifica dell'efficacia degli interventi.....	14
Figura 8: schema dei tempi di realizzazione delle differenti soluzioni sia semplici che combinate.	15
Figura 9: performances raggiungibili con scenari complessi (kWh/m ² anno).	15
Figura 10: grafici relativi agli scenari complessi simulati.....	16
Figura 11: percentuali di risparmio raggiungibili per le 6 differenti fasce climatiche italiane....	16
Figura 12: suddivisione per fascia climatica degli edifici italiani esistenti.....	17
Figura 13: numeri edifici italiani esistenti suddivisi per fascia climatica.	17
Figura 14: valutazione scenari di risparmio a breve e lungo termine.....	17
Figura 15: risparmi raggiungibili in kWh/m ² a per gli scenari 1-2-3.	18
Figura 16. scenari a breve e lungo termine.	18
Figura 17. Modello ad elementi finiti della struttura: a) modello completo; b) telaio in c.a.; c) tamponature; d) doppio strato di rete.....	22
Figura 18. Modi da modello ad elementi finiti.....	22
Figura 19. Fasi di costruzione del prototipo in c.a. tamponato a due livelli: realizzazione dell'armatura del cordolo di fondazione (a); maturazione della gettata di calcestruzzo del cordolo di fondazione (b); preparazione delle casseforme per la gettata dei pilastri e del solaio del secondo livello (c); realizzazione della tamponatura (d).	23
Figura 20. Dettaglio della sezione della tamponatura.	24
Figura 21. Test di caratterizzazione dinamica del prototipo su tavola vibrante: (a) immagine della sala controllo durante le fasi di prova; (b) identificazione della frequenza modale del primo modo flessionale in y; (c) e in x.....	24

1 Risultati attesi

1. Elenco di configurazioni standardizzate a catalogo in funzione della zona climatica e nel rispetto dei requisiti minimi imposti dalla normativa sull'efficienza energetica
2. Analisi di un caso reale atto a definire le prestazioni in opera di almeno una delle soluzioni individuate.
3. Soluzioni OnSite: definizione della soluzione ottimale e sperimentazione a supporto di corretta realizzazione e di indicazioni progettuali di riferimento.

1.1 Obiettivi attesi

L'obiettivo che ci si è posti, in merito ai primi due punti, è quello di definire delle soluzioni a catalogo tecnicamente ed economicamente efficaci su tutto il territorio nazionale.

Le soluzioni così definite sono sottoposte a modellazione e simulazione con verifica attraverso un caso reale. Parametri necessari sono l'integrabilità con le soluzioni sviluppate nel PTR 2019-2021 ed il rispetto dei requisiti minimi di legge.

Per il punto 3, è stata definita una soluzione per un intervento integrato di miglioramento sismico-energetico, la cui realizzazione ha diversi vantaggi nell'esecuzione on-site sia in termini di velocità e praticità di esecuzione sia in termini di ottimizzazione dell'utilizzo dei materiali, evitando eccessivi sfridi di lavorazione. La soluzione suddetta è stata studiata su un prototipo a due livelli rappresentativo di comuni edifici esistenti in c.a. realizzato presso il C. R. ENEA Casaccia. La sperimentazione dal punto di vista sismico è stata effettuata tramite test su tavola vibrante.

2 Risultati ottenuti

1. Schede delle configurazioni standardizzate a catalogo in funzione della zona climatica e nel rispetto dei requisiti minimi imposti dalla normativa sull'efficienza energetica. Obiettivo raggiunto come da capitolato.
2. Integrazione della matrice dinamica con le nuove configurazioni. Obiettivo raggiunto come da capitolato.
3. Tabelle relative alle simulazioni convalidate da analisi di un caso reale. Obiettivo raggiunto come da capitolato.
4. Tabelle relative ai risparmi ottenibili. Obiettivo raggiunto come da capitolato.
5. Tabelle di possibili scenari complessi e valutazione di applicazione a breve e lungo termine sull'intero territorio nazionale. Obiettivo non previsto nella stesura iniziale del capitolato e successivamente implementato. Tale risultato ha contribuito a dare un ulteriore valore aggiunto al progetto poiché ha consentito di stimare i risparmi raggiungibili a breve e lungo termine sul territorio italiano evidenziando come le soluzioni studiate possano contribuire all'obiettivo di decarbonizzazione del Paese e alla riqualificazione profonda dello stock edilizio esistente.
6. Soluzioni OnSite: validazione tramite modellazione numerica e caratterizzazione sperimentale a supporto di corretta realizzazione e per indicazioni progettuali di riferimento di un intervento integrato di miglioramento sismico-energetico.

2.1 Obiettivi raggiunti

In merito ai punti da 1 a 5 sopra esposti si precisa che studio fornisce una serie di risultati frutto delle simulazioni stazionarie e dinamiche effettuate, evidenziando i vantaggi tecnico economici della realizzazione Off-Site Construction nel caso di riqualificazione profonda delle coperture.

Le simulazioni (effettuate su città rappresentative valutate grazie a dati statistici ed analisi effettuate su dati ISTAT) sono state, inoltre, convalidate da verifiche in campo che hanno confermato la bontà dei risultati delle modellazioni ed hanno permesso di ampliare il campo delle simulazioni effettuate creando una serie di possibili scenari (Figura 1) applicabili all'intero territorio nazionale.

Tali scenari sono finalizzati alla stima dei risparmi ottenibili con l'applicazione delle soluzioni standardizzate e gli stessi sono stati ulteriormente ampliati rispetto a quanto definito nel capitolato iniziale. Sono stati, infatti, simulati alcuni scenari completi in cui sono prese in considerazione sia le soluzioni standardizzate per coperture definite nel presente PTR (2022-2024) che quelle definite per le pareti nel PTR 2019-2021 considerando anche soluzioni con integrazione di nuova impiantistica e di FER.

Zona climatica		A	B	C	D	E	F
SCENARI COMPLESSI		LAMPEDUSA	PALERMO	CAGLIARI	ROMA	BOLOGNA	BELLUNO
	SDF	64,6	76,3	112,5	135	240,2	315,4
Copertura con isoventilato+parete+PDC+FV (SC1)	SC1	8,00	9,60	16,00	19,50	48,70	83,60
Risparmio raggiungibile	SC1	88%	87%	86%	86%	80%	73%
Copertura con isoventilato+parete (SC2)	SC2	37,20	44,00	63,50	72,30	129,00	184,60
Risparmio raggiungibile	SC2	42%	42%	44%	46%	46%	41%
Copertura con isoventilato+parete+infissi (SC3)	SC3	33,50	39,80	53,60	59,20	105,50	145,80
Risparmio raggiungibile	SC3	48%	48%	52%	56%	56%	54%

Figura 1: Tabella con alcune delle simulazioni effettuate nelle 6 differenti fasce climatiche italiane prendendo in considerazione 3 diversi scenari di riqualificazione percorribili.

3 Prodotti attesi

- a) Schede a catalogo delle soluzioni standardizzate.
- b) Integrazione della Matrice Dinamica di scelta.
- c) Rapporto tecnico su modello numerico e risultati sperimentali per indicazioni progettuali dell'intervento OnSite.

3.1 Schede a catalogo delle soluzioni standardizzate

Il capitolato prevede la realizzazione di schede relative alle soluzioni standardizzate studiate che saranno implementate sul portale Ambiente Costruito.

3.2 Integrazione della matrice Dinamica di scelta

È prevista l'integrazione della Matrice Dinamica, già esistente per le pareti, con le nuove configurazioni a catalogo per le coperture

3.3 Rapporto tecnico su modello numerico e risultati sperimentali per indicazioni progettuali dell'intervento OnSite

È previsto un rapporto tecnico contenente i dettagli sul modello numerico sviluppato e sui risultati sperimentali di caratterizzazione del comportamento strutturale di un prototipo di edificio a supporto di indicazioni progettuali dell'intervento OnSite.

4 Prodotti sviluppati

- a) Schede a catalogo delle soluzioni standardizzate.
- b) Integrazione della Matrice Dinamica di scelta.
- c) Rapporto tecnico su modello numerico e risultati sperimentali per indicazioni progettuali dell'intervento OnSite.

4.1 Schede a catalogo delle soluzioni standardizzate

Sono state elaborate schede relative alle possibili configurazioni in caso di riqualificazione delle coperture. La scheda riporta la tipologia a cui la soluzione è applicabile (tetto piano o a falda), le zone climatiche e la zona sismica di applicabilità e la possibilità di integrazione con FER. Viene, inoltre, riportata la possibilità di ricorrere a detrazioni fiscali o altri meccanismi incentivanti. Viene, infine, data indicazione qualitativa sui costi di realizzazione (alto-medio-basso) affiancata da una valutazione qualitativa di efficacia in termini energetici (alto-medio-basso).

4.2 Integrazione della matrice Dinamica di scelta

La Matrice Dinamica, presente all'indirizzo www.ambientecostruito.enea.it realizzata durante il PTR 2019-2021 per l'inserimento delle soluzioni a catalogo per le pareti è stata integrata con le soluzioni a catalogo studiate per le coperture. Il compito di ENEA è stato quello di realizzare le schede e fornire le indicazioni tecniche sulle scelte da implementare. Le attività implementative di natura informatica e di sviluppo sono state eseguite dall'Università di Messina.

4.3 Rapporto tecnico su modello numerico e risultati sperimentali per indicazioni progettuali dell'intervento OnSite

È stato redatto un rapporto tecnico contenente i dettagli sul modello numerico sviluppato, sulla base del quale sono state eseguite delle simulazioni e delle analisi strutturali di un prototipo di edificio a due livelli in c.a. per valutare l'efficacia dell'intervento OnSite proposto, nonché delle prove sperimentali di caratterizzazione del comportamento strutturale su tavola vibrante a supporto della definizione di indicazioni progettuali dell'intervento OnSite.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non sono state individuate particolari criticità nell'esecuzione delle attività per i mesi M19-M24 e sono stati raggiunti tutti gli obiettivi previsti.

6 Sintesi delle attività svolte

Le attività svolte hanno condotto alla redazione di Schede a Catalogo per soluzioni di riqualificazione energetica delle coperture, le stesse sono state implementate con informazioni sull'efficacia in termini energetici ed economici e sulla possibilità di accesso a detrazioni fiscali e/o meccanismi incentivanti. Le schede realizzate sono state implementate all'interno della Matrice Dinamica già esistente ed elaborata per i sistemi a parete.

In merito alla parte OnSite, è stata sviluppata una soluzione di intervento integrato di miglioramento sismico-energetico da eseguire con metodologie costruttive sostenibili, durevoli e di semplice posa in opera. L'intervento proposto è stato progettato e studiato su prototipo di edificio in c.a. a due livelli.

Le attività hanno anche previsto una parte di disseminazione e diffusione dei risultati attraverso articoli, presentazioni a workshop, conferenze e seminari divulgativi.

7 Dettaglio delle attività svolte

La prima parte delle attività ha previsto lo studio dei sistemi di copertura, piani e inclinati, con focus particolare sui punti critici, quali nodi e giunti. I sistemi di copertura, siano essi piani o inclinati, svolgono un ruolo cruciale nella protezione degli edifici dagli agenti atmosferici e nella regolazione termica. L'analisi strutturale di tali sistemi si concentra in particolare sui punti critici, ovvero nodi e giunti, dove si verificano le maggiori sollecitazioni meccaniche e termiche. Nei tetti piani, l'attenzione è rivolta alla corretta gestione delle pendenze per il deflusso delle acque, all'impermeabilizzazione dei giunti e alla resistenza alle sollecitazioni da vento e carico neve. Nei tetti inclinati, invece, la progettazione dei collegamenti tra le falde, il colmo e i sistemi di ancoraggio è essenziale per garantire stabilità e durabilità. Lo studio approfondito dei nodi consente di ottimizzare i materiali e le tecniche costruttive, migliorando la resistenza strutturale e l'efficienza energetica dell'intero sistema di copertura. Un nodo mal progettato, infatti, può generare ponti termici, riducendo la capacità isolante della copertura e aumentando il fabbisogno energetico per il riscaldamento e il raffrescamento dell'edificio. I ponti termici nei nodi di una copertura si verificano a causa di discontinuità nei materiali isolanti o di interruzioni nella stratigrafia del tetto, le attività svolte (principalmente attraverso simulazioni energetiche) hanno confermato le cause del verificarsi delle criticità e quali siano le possibili soluzioni per evitarli:

- Uso di materiali a bassa conducibilità termica nei punti di giunzione tra pannelli isolanti
- Evitare interruzioni nell'isolamento (isolamento continuo) attraverso la sovrapposizione degli elementi e l'uso di schiume poliuretatiche o nastri sigillanti a tenuta termica
- Utilizzo di giunti termicamente ottimizzati: nei tetti piani, i giunti tra elementi prefabbricati vengono progettati con inserti isolanti per evitare dispersioni di calore. Nei tetti inclinati, si utilizzano sistemi di sfiato e ventilazione per ridurre la trasmissione del calore.

Ulteriore elemento di criticità è quello relativo all'accumulo di umidità nei nodi che può compromettere le prestazioni termiche della copertura e causare danni strutturali. Per evitare la formazione di condensa interstiziale e umidità nei giunti si può procedere con le seguenti soluzioni:

- Utilizzo di barriere al vapore che vanno posizionate correttamente in funzione della stratigrafia del tetto per impedire la migrazione del vapore acqueo nei materiali isolanti
- Utilizzo di sistemi di ventilazione che nei tetti inclinati, grazie all'uso di intercapedini ventilate nei giunti del colmo e delle falde, permette di evacuare l'umidità accumulata, migliorando il comfort termico.
- Utilizzo di membrane traspiranti che consentono il passaggio del vapore dall'interno all'esterno senza compromettere l'impermeabilità del sistema.

Un'efficace gestione dell'isolamento nei nodi permette di mantenere un elevato valore di resistenza termica (R_{value}) e un basso coefficiente di trasmittanza termica (U_{value}):

- Nei tetti piani, la continuità dell'isolante è garantita da pannelli rigidi in XPS o PIR con giunti a battente
- Nei tetti inclinati, l'isolamento può essere posizionato sopra le travi (tetto caldo), tra le travi (tetto intermedio) o sotto le travi (tetto freddo), in base al comportamento termico desiderato

- Nei nodi tra copertura e pareti perimetrali, si adottano raccordi con pannelli isolanti continui per evitare dispersioni.

L'ottimizzazione dei nodi può essere altresì migliorata attraverso soluzioni tecnologiche avanzate:

- Isolamento con nanotecnologie: l'impiego di materiali come l'aerogel nei punti critici consente di ottenere un'alta resistenza termica con spessori ridotti
- Membrane riflettenti e cool roofing: nei tetti piani, l'uso di membrane ad alta riflettanza solare riduce il surriscaldamento estivo, migliorando l'efficienza energetica
- Nodi per coperture ventilate: un'intercapedine ventilata tra manto di copertura e strato isolante permette di dissipare il calore in estate e ridurre il rischio di condensa in inverno.

A seguito di questo studio sono stati valutati i materiali, ad oggi in commercio, maggiormente utilizzati e che al contempo riescano a garantire il rispetto dei requisiti di legge. I materiali sui quali è stata concentrato lo studio sono: la lana di roccia, l'EPS sandwich (pannello sandwich in EPS standard o grafitato con un rivestimento gas impermeabile di alluminio multistrato su entrambe le facce), l'EPS isoventilato e l'EPS standard. Fatta la scelta, attraverso l'utilizzo di appositi software di modellazione energetica è stata realizzata un'analisi del rispetto dei requisiti di legge in termini termo-igrometrici verificando il rispetto delle trasmittanze di legge (per accesso a detrazioni fiscali) ed effettuando una verifica di Glaser. L'analisi è stata fatta utilizzando, per le modellazioni, le 18 città rappresentative già studiate per le pareti verticali. Come edificio base da cui partire per il calcolo dei risparmi raggiungibili, è stato considerato l'edificio ricorrente studiato nel PTR 2019-2021:

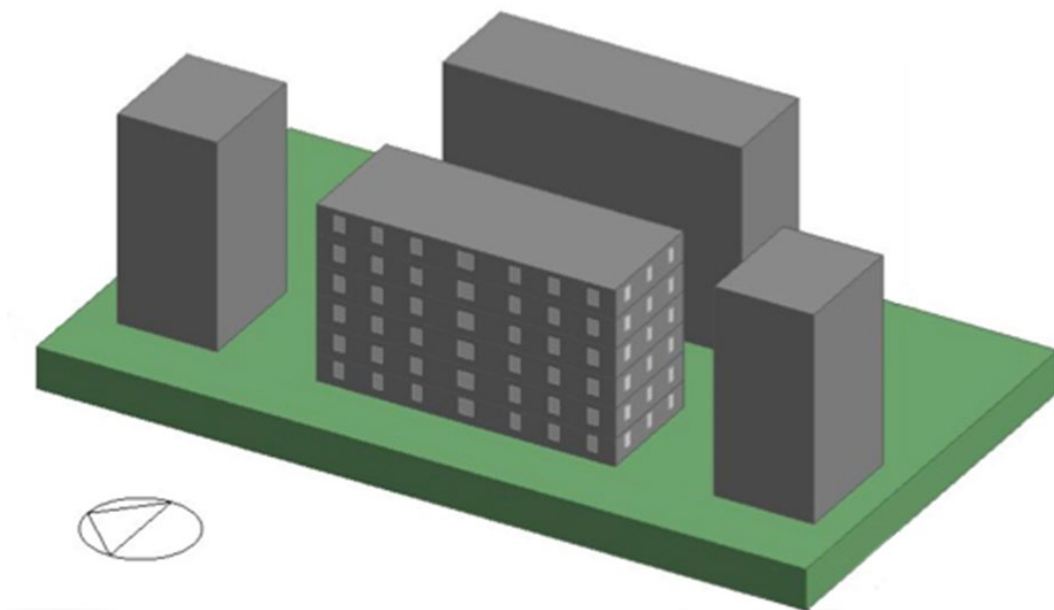


Figura 2: edificio ricorrente (PTR 2019-2021).

I risultati della modellazione per le 4 tipologie di materiali comprendono: performances post-intervento, emissioni CO₂, percentuale di risparmio, spessori necessari per ogni differente città (zona climatica). Il capitolato iniziale prevedeva simulazioni per almeno 3 soluzioni a latitudine diverse, per coerenza con i risultati del PTR 2019-2021, si sono scelte le 18 località sotto riportate. Per ognuna di esse sono state valutate le performances ante e post-intervento (per ognuna delle soluzioni scelte), le percentuali di risparmio energetico e le performances in termini di CO₂ emessa e relative percentuali di risparmio (vedi Figura 2 e Figura 3). Dalle simulazioni effettuate, considerando la sola riquilificazione delle coperture, tenendo conto delle diverse fasce climatiche e delle diverse soluzioni ipotizzate si ottiene un risparmio percentuale tra l'11 ed il 18%.

SOLUZIONI MODELLATE	LAMBDA MATERIALE	PESCARA	CROTONE	SALERNO	TRIESTE	GENOVA	BRESCIA	ASCOLI PICENO	CAMPOBASSO	TORINO
Performance ante intervento (kWh/m ² anno)	-	158,5	82,2	106,9	175	131,2	239,2	210,1	222,4	246
Performance con LANA DI ROCCIA (kWh/m ² anno)	0,039	134,2	71,1	92,8	151	112,6	212	185,8	195,5	218,6
Performance con EPS SANDWICH* (kWh/m ² anno)	0,022	137,1	70,8	92,4	150,7	112,4	212,1	187,8	195,6	218,6
Performance con EPS ISOVENTILATO (kWh/m ² anno)	0,026	137,5	71,1	92,8	151,2	112,7	212	185,5	195,5	218,6
Performance con EPS (kWh/m ² anno)	0,033	137,3	71,1	92,8	150,9	112,5	212,3	185,7	195,8	218,9
Performance con LANA DI ROCCIA+PDC+FV (kWh/m ² anno)	0,039	41,2	19,7	25	47,6	31,8	79,2	66,6	66,8	83,6
Performance con EPS SANDWICH+PDC+FV (kWh/m ² anno)	0,022	41,1	19,7	24,9	47,5	31,8	79,2	66,6	66,8	83,6
Performance con EPS ISOVENTILATO+PDC+FV (kWh/m ² anno)	0,026	41,2	19,7	25	47,6	31,9	79,1	66,6	66,8	83,6
Performance con EPS+PDC+FV (kWh/m ² anno)	0,033	41,2	19,7	25	47,5	31,8	79,3	66,6	66,9	83,7
Performance ante intervento (kg CO ₂ /anno)		36,32	18,84	24,48	40,09	30,06	54,81	48,15	50,94	56,37
Performance con LANA DI ROCCIA (kg CO ₂ /anno)	0,039	31,47	16,29	21,25	34,6	25,8	48,57	42,58	44,79	50,08
Performance con EPS SANDWICH (kg CO ₂ /anno)	0,022	31,41	16,22	21,17	34,53	25,74	48,59	43	44,81	50,09
Performance con EPS ISOVENTILATO (kg CO ₂ /anno)	0,026	31,51	16,29	21,25	34,64	25,83	48,57	42,49	44,79	50,08
Performance con EPS (kg CO ₂ /anno)	0,033	31,45	16,29	21,26	34,57	25,78	48,64	42,55	44,86	50,15
Performance con LANA DI ROCCIA+PDC+FV (kg CO ₂ /anno)	0,039	9,15	4,38	5,56	10,57	7,07	17,58	14,8	14,84	18,57
Performance con EPS SANDWICH+PDC+FV (kg CO ₂ /anno)	0,022	9,13	4,37	5,54	10,54	7,05	17,59	14,8	14,85	18,58
Performance con EPS ISOVENTILATO+PDC+FV (kg CO ₂ /anno)	0,033	9,16	4,38	5,56	10,58	7,08	17,58	14,8	14,84	18,57
Performance con EPS+PDC+FV (kg CO ₂ /anno)	0,033	9,14	4,39	5,56	10,56	7,06	17,62	14,8	14,87	18,6

SOLUZIONI MODELLATE	LAMBDA MATERIALE	BARI	CAGLIARI	FIRENZE	BOLZANO	PERUGIA	VERONA	BOLOGNA	ROMA	PALERMO
Performance ante intervento (kWh/m ² anno)	-	120,4	112,5	148,5	209,6	228,5	226,1	240,2	135	76,3
Performance con LANA DI ROCCIA (kWh/m ² anno)	0,039	104,9	98,2	127,5	182,4	200,9	199,2	197,10	116,50	66,10
Performance con EPS SANDWICH* (kWh/m ² anno)	0,022	104,5	97,9	127,3	182,5	200,9	199,3	197,20	116,30	65,90
Performance con EPS ISOVENTILATO (kWh/m ² anno)	0,026	104,9	98,2	127,7	182,4	200,9	199,2	197,10	116,70	66,10
Performance con EPS (kWh/m ² anno)	0,033	104,9	98,3	127,5	182,7	201,2	199,5	197,40	116,40	66,20
Performance con LANA DI ROCCIA+PDC+FV (kWh/m ² anno)	0,039	30,5	26,9	36,1	57,9	69,7	71,5	74,30	32,90	18,20
Performance con EPS SANDWICH+PDC+FV (kWh/m ² anno)	0,022	30,4	26,7	36,1	58	69,7	71,6	74,30	32,80	18,10
Performance con EPS ISOVENTILATO+PDC+FV (kWh/m ² anno)	0,026	30,5	26,9	36,2	57,9	69,7	71,5	74,30	33,00	18,20
Performance con EPS+PDC+FV (kWh/m ² anno)	0,033	30,6	26,9	36,1	58	69,8	71,7	74,40	32,90	18,20
Performance ante intervento (kg CO ₂ /anno)		27,58	25,78	34,02	48,02	52,35	51,81	55,02	30,94	17,48
Performance con LANA DI ROCCIA (kg CO ₂ /anno)	0,039	24,04	22,51	29,22	41,8	46,03	45,64	45,17	26,70	15,15
Performance con EPS SANDWICH (kg CO ₂ /anno)	0,022	23,94	22,42	29,16	41,81	46,04	45,65	45,18	26,64	15,09
Performance con EPS ISOVENTILATO (kg CO ₂ /anno)	0,026	24,04	22,51	29,26	41,8	46,03	45,64	45,17	26,73	15,15
Performance con EPS (kg CO ₂ /anno)	0,033	24,04	22,52	29,2	41,87	46,09	45,71	45,23	26,68	15,16
Performance con LANA DI ROCCIA+PDC+FV (kg CO ₂ /anno)	0,039	6,79	5,97	8,03	12,87	15,48	15,89	16,50	7,31	4,05
Performance con EPS SANDWICH+PDC+FV (kg CO ₂ /anno)	0,022	6,76	5,94	8,01	12,87	15,48	15,9	16,50	7,30	4,03
Performance con EPS ISOVENTILATO+PDC+FV (kg CO ₂ /anno)	0,033	6,79	5,97	8,04	12,87	15,48	15,89	16,50	7,32	4,05
Performance con EPS+PDC+FV (kg CO ₂ /anno)	0,033	6,79	5,97	8,02	12,9	15,51	15,92	16,53	7,31	4,05

Figura 3: Tabelle dei risultati delle modellazioni energetiche per le 18 città rappresentative con le 4 differenti soluzioni.

SOLUZIONI MODELLATE	LAMBDA	PESCARA	PESCARA risparmi %	CROTONE	CROTONE risparmi %	SALERNO	SALERNO risparmi %	TRIESTE	TRIESTE risparmi %	GENOVA	GENOVA risparmi %	BRESCIA	BRESCIA risparmi %	ASCOLI PICENO	ASCOLI PICENO risparmi %	CAMPOBASSO	CAMPOBASSO risparmi %	TORINO	TORINO risparmi %
Performance ante intervento (kg CO ₂ /anno)		36,32	-	18,84	-	24,48	-	40,09	-	30,06	-	54,81	-	48,15	-	50,94	-	56,37	-
Performance con LANA DI ROCCIA (kg CO ₂ /anno)	0,039	31,47	13%	16,29	14%	21,25	13%	34,6	14%	25,8	14%	48,57	11%	42,58	12%	44,79	12%	50,08	11%
Performance con EPS SANDWICH (kg CO ₂ /anno)	0,022	31,41	14%	16,22	14%	21,17	14%	34,53	14%	25,74	14%	48,59	11%	43	12%	44,81	12%	50,09	11%
Performance con EPS ISOVENTILATO (kg CO ₂ /anno)	0,026	31,51	13%	16,29	14%	21,25	13%	34,64	14%	25,83	14%	48,57	11%	42,49	12%	44,79	12%	50,08	11%
Performance con EPS (kg CO ₂ /anno)	0,033	31,45	13%	16,29	14%	21,26	13%	34,57	14%	25,78	14%	48,64	11%	42,55	12%	44,86	12%	50,15	11%
Performance con LANA DI ROCCIA+PDC+FV (kg CO ₂ /anno)	0,039	9,15	75%	4,38	77%	5,56	77%	10,57	74%	7,07	76%	17,58	68%	14,8	69%	14,84	71%	18,57	74%
Performance con EPS SANDWICH+PDC+FV (kg CO ₂ /anno)	0,022	9,13	75%	4,37	77%	5,54	77%	10,54	74%	7,05	77%	17,59	68%	14,8	69%	14,85	71%	18,58	74%
Performance con EPS ISOVENTILATO+PDC+FV (kg CO ₂ /anno)	0,033	9,16	75%	4,38	77%	5,56	77%	10,58	74%	7,08	76%	17,58	68%	14,8	69%	14,84	71%	18,57	74%
Performance con EPS+PDC+FV (kg CO ₂ /anno)	0,033	9,14	75%	4,39	77%	5,56	77%	10,56	74%	7,06	77%	17,62	68%	14,8	69%	14,87	71%	18,6	74%

SOLUZIONI MODELLATE	LAMBDA	BARI	BARI risparmi %	CAGLIARI	CAGLIARI risparmi %	FIRENZE	FIRENZE risparmi %	BOLZANO	BOLZANO risparmi %	PERUGIA	PERUGIA risparmi %	VERONA	VERONA risparmi %	BOLOGNA	BOLOGNA risparmi %	ROMA	ROMA risparmi %	PALERMO	PALERMO risparmi %
Performance ante intervento (kg CO ₂ /anno)		27,58	-	25,78	-	34,02	-	48,02	-	52,35	-	51,81	-	55,02	-	30,94	-	17,48	-
Performance con LANA DI ROCCIA (kg CO ₂ /anno)	0,039	24,04	13%	22,51	13%	29,22	14%	41,8	13%	46,03	12%	45,64	12%	45,17	18%	26,70	14%	15,15	13%
Performance con EPS SANDWICH (kg CO ₂ /anno)	0,022	23,94	13%	22,42	13%	29,16	14%	41,81	13%	46,04	12%	45,65	12%	45,18	18%	26,64	14%	15,09	14%
Performance con EPS ISOVENTILATO (kg CO ₂ /anno)	0,026	24,04	13%	22,51	13%	29,26	14%	41,8	13%	46,03	12%	45,64	12%	45,17	18%	26,73	14%	15,15	13%
Performance con EPS (kg CO ₂ /anno)	0,033	24,04	13%	22,52	13%	29,2	14%	41,87	13%	46,09	12%	45,71	12%	45,23	18%	26,68	14%	15,16	13%
Performance con LANA DI ROCCIA+PDC+PV (kg CO ₂ /anno)	0,039	6,79	75%	5,97	77%	8,03	76%	12,87	73%	15,48	70%	15,89	69%	16,50	70%	7,31	76%	4,05	77%
Performance con EPS SANDWICH+PDC+PV (kg CO ₂ /anno)	0,022	6,76	75%	5,94	77%	8,01	76%	12,87	73%	15,48	70%	15,9	69%	16,50	70%	7,30	76%	4,03	77%
Performance con EPS ISOVENTILATO+PDC+PV (kg CO ₂ /anno)	0,033	6,79	75%	5,97	77%	8,04	76%	12,87	73%	15,48	70%	15,89	69%	16,50	70%	7,32	76%	4,05	77%
Performance con EPS+PDC+PV (kg CO ₂ /anno)		6,79	75%	5,97	77%	8,02	76%	12,9	73%	15,51	70%	15,92	69%	16,53	70%	7,31	76%	4,05	77%

Figura 4: Tabelle dei risultati relativi alle emissioni di CO₂ per le 18 città rappresentative con le 4 differenti soluzioni.

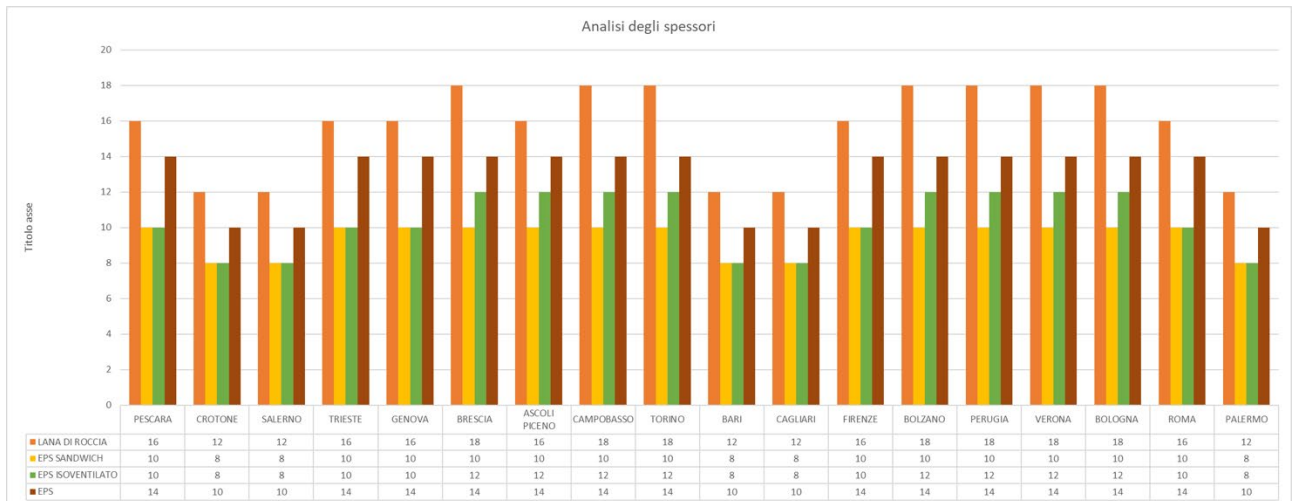


Figura 5: analisi degli spessori necessari dei materiali selezionati in funzione della città (zona climatica).

Le modellazioni sono state ripetute per soluzioni di isolamento della copertura (con le 4 ipotesi precedenti) combinate con integrazione FV e sostituzione dell'impianto con nuova tipologia di generatore a Pompa di Calore (vedi Figura 2 e Figura 3) ottenendo un range di risparmi raggiungibili tra il 66 ed il 77%.

Per le soluzioni a catalogo sono state create le relative schede che sono state implementate nella Matrice Dinamica. La Matrice consente, inserendo pochi parametri specifici (tipologia costruttiva, tipologia di copertura (piana o inclinata), zona climatica, integrazione con FER...) di selezionare una o più soluzioni compatibili con gli input inseriti.



C1

Isolante	Tipologia Impianto	Costi di investimento	Efficienza	Complessità impianto	Integrazione FER	Detraibilità
Lana di roccia	-	1	2	1	2	3
		Valutazione complessiva				

Detrazioni fruibili	Ristrutturazione	Ecobonus



SOLUZIONE	U raggiungibile (W/m²K)	Costi involucro (€/mq)
Soluzione ante intervento	1,629	-
Soluzione con LANA DI ROCCIA	0,19 - 0,27	110-150

Figura 6: scheda esempio.

Le attività successive hanno condotto ad eseguire un'attività in campo di misurazione ante e post-intervento su una struttura reale che ci ha consentito di avallare le scelte effettuate e di verificare rispetto dei requisiti di legge, tempistiche di intervento e validità economica delle scelte oltre che efficacia della soluzione applicata.

Sono state effettuate verifiche in merito all'efficacia delle soluzioni e sono state elaborate tabelle di riferimento in merito:

SOLUZIONE	U (W/m²K)	Costi involucro (€/mq)	Costi PdC+FV (€)	Tempi di realizzazione (giorni)
Soluzione ante intervento	1,629	-	-	-
Soluzione con LANA DI ROCCIA	0,19 - 0,27	110-150	-	7 - 10
Soluzione con EPS SANDWICH*	0,19 - 0,27	130-170	-	4 - 7
Soluzione con EPS ISOVENTILATO	0,19 - 0,27	220-250	-	2 - 3
Soluzione con EPS	0,19 - 0,27	110-150	-	4 - 7
Soluzione con LANA DI ROCCIA+PDC+FV	0,19 - 0,27	110-150	90.000-13.0000	19 - 22
Soluzione con EPS SANDWICH+PDC+FV	0,19 - 0,27	130-170	80.000-110.000	14 - 17
Soluzione con EPS ISOVENTILATO+PDC+FV	0,19 - 0,27	220-250	90.000-100.000	11 - 12
Soluzione con EPS+PDC+FV	0,19 - 0,27	110-150	80.000-110.000	14 - 17

* tutti i materiali usati sono CAM e rispetto DNSH

** copertura da 360 m²

*** impianto FV da 20 kW con 40 kWh di accumulazione

**** PdC da 90 kW

Figura 7: Tabelle di comparazione per la verifica dell'efficacia degli interventi.

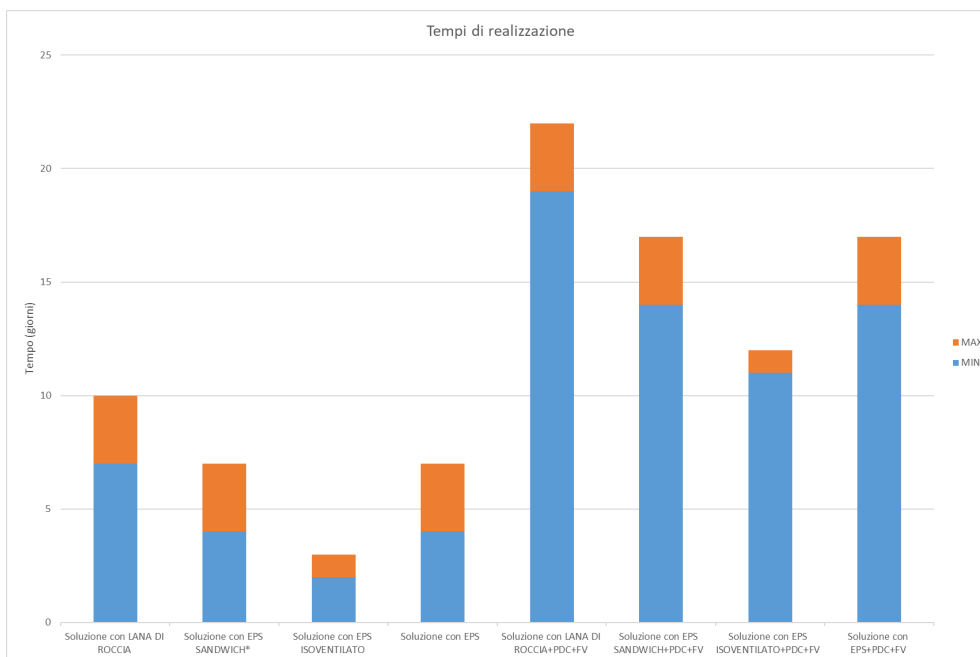


Figura 8: schema dei tempi di realizzazione delle differenti soluzioni sia semplici che combinate.

Il passo successivo previsto è relativo all'esecuzione di una serie di simulazioni per la valutazione delle performances raggiungibili considerando scenari complessi. La tipologia edilizia sottoposta a simulazione ha come destinazione d'uso il settore residenziale si è scelto di effettuare le simulazioni in 6 diverse località rappresentative per ognuna delle 6 fasce climatiche italiane. Le località scelte sono: Lampedusa (zona A), Palermo (zona B), Cagliari (zona C), Roma (zona D), Bologna (zona E), Belluno (zona F). Sono state eseguite le modellazioni prendendo in considerazione 3 differenti scenari complessi:

- Scenario 1 (SC1): riqualificazione della copertura con la soluzione isoventilato integrato con impianto FV, realizzazione di isolamento delle pareti (prendendo come soluzione quella più adatta tra le 21 elaborate nel PTR 2019-2021), riqualificazione dell'impianto termico con passaggio a pompa di Calore.
- Scenario 2 (SC2): riqualificazione della copertura con la soluzione isoventilato realizzazione di isolamento delle pareti (prendendo come soluzione quella più adatta tra le 21 elaborate nel PTR 2019-2021).
- Scenario 3 (SC3): riqualificazione della copertura con la soluzione isoventilato, realizzazione di isolamento delle pareti (prendendo come soluzione quella più adatta tra le 21 elaborate nel PTR 2019-2021), sostituzione degli infissi.

L'immagine sotto riportata evidenzia risparmi raggiungibili e percentuali di abbattimento rispetto allo stato di fatto iniziale (SDF):

Zona climatica		A	B	C	D	E	F
SCENARI COMPLESSI		LAMPEDUSA	PALERMO	CAGLIARI	ROMA	BOLOGNA	BELLUNO
	SDF	64,6	76,3	112,5	135	240,2	315,4
Copertura con isoventilato+parete+PDC+FV (SC1)	SC1	8,00	9,60	16,00	19,50	48,70	83,60
Risparmio raggiungibile	SC1	88%	87%	86%	86%	80%	73%
Copertura con isoventilato+parete (SC2)	SC2	37,20	44,00	63,50	72,30	129,00	184,60
Risparmio raggiungibile	SC2	42%	42%	44%	46%	46%	41%
Copertura con isoventilato+parete+infissi (SC3)	SC3	33,50	39,80	53,60	59,20	105,50	145,80
Risparmio raggiungibile	SC3	48%	48%	52%	56%	56%	54%

Figura 9: performances raggiungibili con scenari complessi (kWh/m²anno).

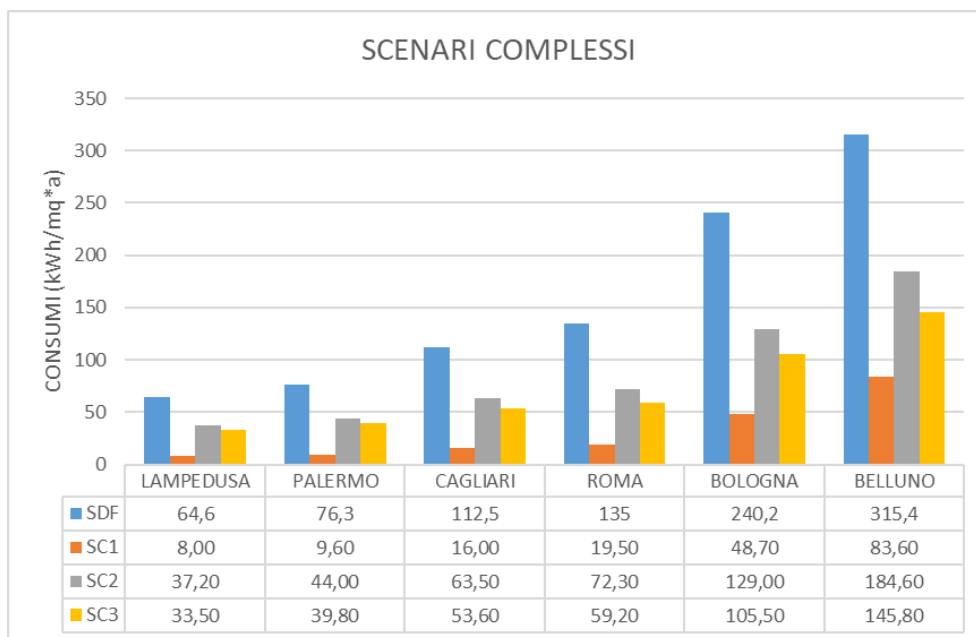


Figura 10: grafici relativi agli scenari complessi simulati.

Percentualmente i risparmi annui raggiungibili si trovano compresi in un range che va dal 41 all'88%.

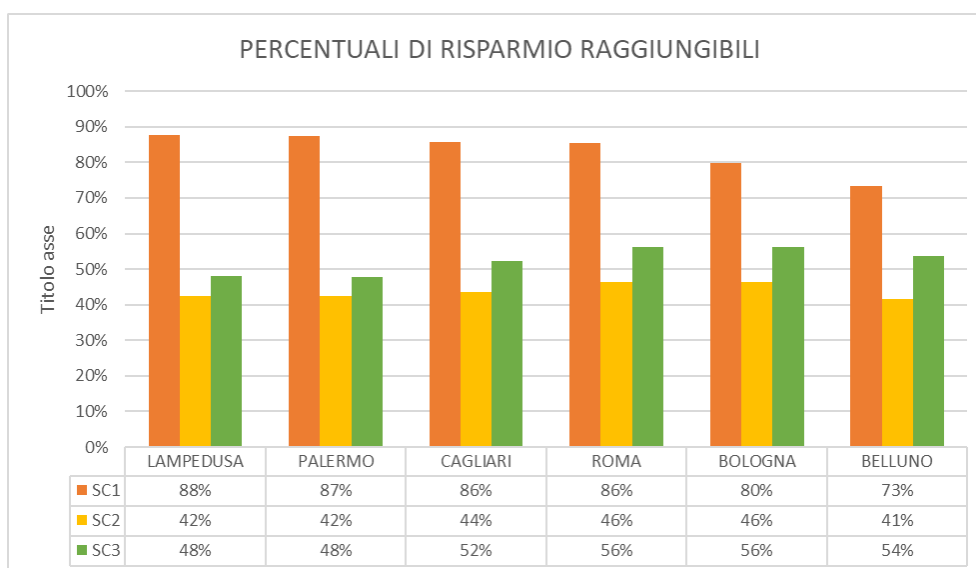


Figura 11: percentuali di risparmio raggiungibili per le 6 differenti fasce climatiche italiane.

Per gli scenari come sopra identificati sono state fatte delle valutazioni a breve e lungo termine. Le ipotesi di partenza prendono vita da dati ISTAT secondo i quali il trend degli ultimi anni è quello di un 5% di edifici riqualificati annualmente. Considerando il numero di edifici e le corrispondenti superfici suddivise per fascia climatica sono state effettuate simulazioni di risparmio (Figura 10) per un singolo anno per i tre scenari e lo stesso è stato effettuato da oggi al 2030 (Figura 14).

Edifici residenziali, numero e superficie, nel 2018 per zona climatica	N. Edifici	Superficie (m ²)
Zona A*	5217	170.118.357
Zona B*	710.079	
Zona C	2.737.222	615.486.151
Zona D	2.896.204	734.707.925
Zona E	5.340.672	1.383.758.265
Zona F	731.009	145.735.486
Totale	12.420.403	3.049.806.184

* Nel calcolo dei risparmi raggiungibili con la riqualificazione si considerano come fossero tutti gli edifici in fascia B poiché la fascia A incide sul totale delle due fasce per 0,7%

Figura 12: suddivisione per fascia climatica degli edifici italiani esistenti.

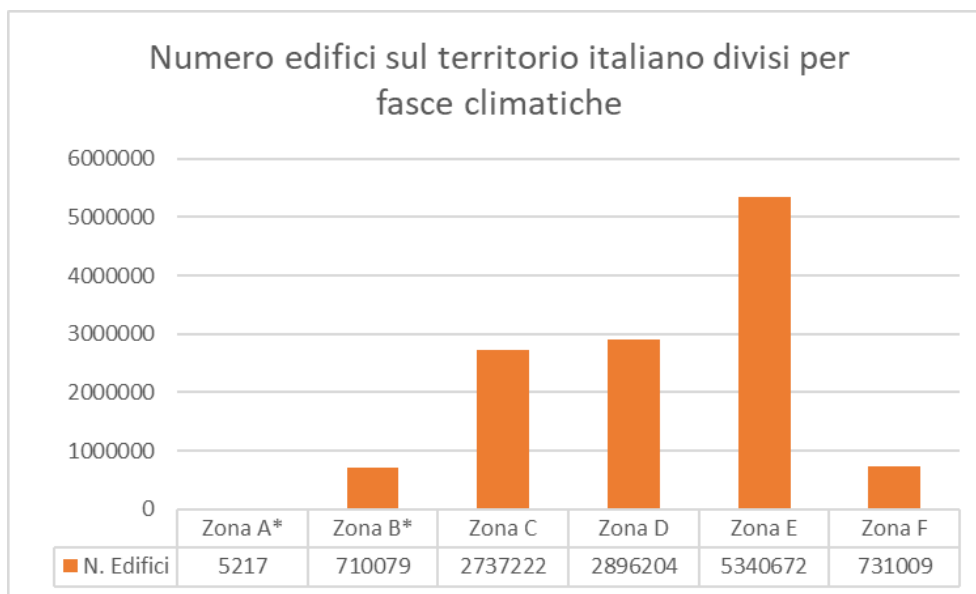


Figura 13: numeri edifici italiani esistenti suddivisi per fascia climatica.

Edifici residenziali, numero e superficie, nel 2018 per zona climatica	Superficie (m ²)	Risparmio medio (kWh/m ² anno)				% di parco riqualificato all'anno	SC1 Risparmio raggiungibile in 1 anno (GWh)	SC1 Risparmio raggiungibile al 2030 (GWh)	SC2 Risparmio raggiungibile in 1 anno (GWh)	SC2 Risparmio raggiungibile al 2030 (GWh)	SC3 Risparmio raggiungibile in 1 anno (GWh)	SC3 Risparmio raggiungibile al 2030 (GWh)
		Copertura con isoventilato + parete +PDC+FV	Copertura con isoventilato + parete	Copertura con isoventilato+ parete+infissi								
Zona A*	170.118.357	66,70	32,30	115,50	5%	567	2837	275	1374	982	4.912	
Zona B*												
Zona C	615.486.151	97	49,00	58,90	5%	2.970	14.849	1.508	7.540	1.813	9.063	
Zona D	734.707.925	116	62,70	75,80	5%	4.243	21.215	2.303	11.517	2.785	13.923	
Zona E	1.383.758.265	192	111,20	134,70	5%	13.249	66.247	7.694	38.468	9.320	46.598	
Zona F	145.735.486	232	130,80	169,60	5%	1.689	8.445	953	4.766	1.236	6.179	
Totale	3.049.806.184					22.719	113.593	12.733	63.664	16.135	80.675	

Figura 14: valutazione scenari di risparmio a breve e lungo termine.

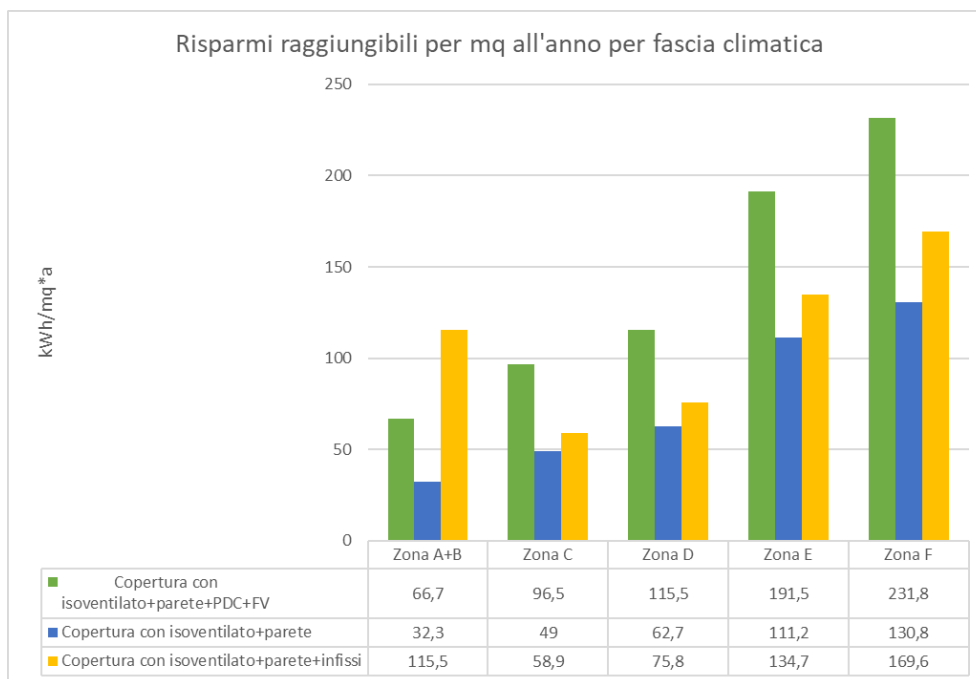


Figura 15: risparmi raggiungibili in kWh/m²a per gli scenari 1-2-3.

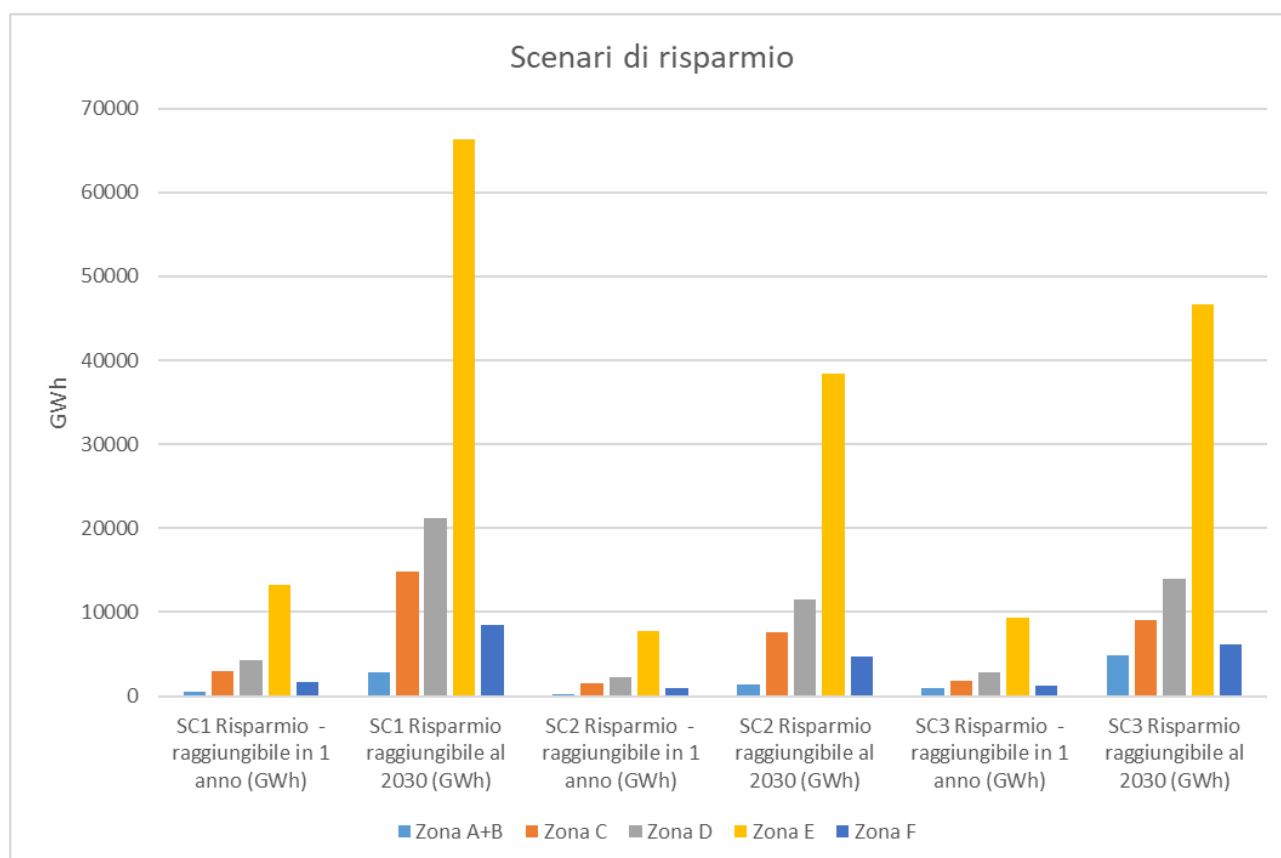


Figura 16. scenari a breve e lungo termine.

Le valutazioni effettuate conducono a poter affermare che le soluzioni individuate aprono la possibilità a interessanti scenari di riqualificazione dello stock edilizio esistente sul territorio

italiano. Tali risultati potrebbero essere ulteriormente ampliati se applicati anche a edifici diversi dal settore residenziale.

Ulteriore spinta potrebbe essere data dal nascere di nuovi incentivi mirati alla riqualificazione profonda degli immobili che tengano conto, ad esempio, di cifre a fondo perduto assegnate con plafond diversi in funzione della percentuale di risparmio raggiungibile.

In merito alle soluzioni On-Site, con il fine di garantire il miglioramento sismico ed energetico di una costruzione in cemento armato esistente raggiungendo un livello di sicurezza strutturale, soprattutto sismica, previsto dalle disposizioni normative vigenti, garantire prestazioni energetiche a norma con quanto richiesto per gli edifici di nuova costruzione ed impiegare metodologie costruttive sostenibili, durevoli e di semplice posa in opera è stato progettato e studiato un innovativo sistema di rinforzo.

Il sistema prevede l'utilizzo di una rete strutturale preformata in fibra di vetro alcali-resistente e impregnata con resina epossidica (Glass Fibre Reinforced Polymer, GFRP), fissata agli elementi di cemento armato del telaio e alla tamponatura in laterizio per mezzo di connettori anch'essi in GFRP e immersa in uno strato di poliuretano espanso, che garantisce ottime prestazioni termoisolanti e adesive. La soluzione si basa su quanto proposto negli ultimi anni nella ricerca scientifica, ma in questo progetto viene data particolare rilevanza alla efficienza del sistema legata alla rapidità della messa in opera, alla versatilità (intesa, ad esempio, come capacità di adattarsi a superfici con geometrie complesse), alla sostenibilità (intesa come minimizzazione degli sfridi), nonché alla validazione mediante prove sismiche su tavola vibrante in scala reale.

Il sistema di rinforzo è stato predimensionato mediante analisi strutturali preliminari. E' stata impiegata una rete preformata in GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) prodotta con tecnologia Textrusion™, maglia 66x66 mm, con barre costituite da fibre di vetro lunghe alcali-resistenti (AR) impregnate con resina termoindurente di tipo epossidico-vinilestere. La rete è commercializzata da Fibre Net SpA (Pavia di Udine, UD), con la denominazione FBMesh66X66T96AR.

La rete, di grammatura pari a 420 gr/mq, ha maglia quadrata di lato 66x66 mm ed una resistenza a trazione caratteristica per metro lineare di 64.5 kN. I connettori in GFRP utilizzati per la connessione al supporto, sono realizzati con fibra di vetro AR pretensionata e impregnata con resina termoindurente di tipo vinilestere-epossidico. Questi hanno il compito di garantire il trasferimento delle sollecitazioni dal supporto alla rete in GFRP e sono installati a quinconce con una densità di 4/mq, previa esecuzione nel supporto di fori non passanti di diametro 18mm, da inghiassare poi con resina epossidica.

L'isolamento termico è affidato ad una schiuma autoespandente di poliuretano espanso, posata a completo ricoprimento dell'involucro dell'edificio, ivi inclusi i pannelli di tamponatura in muratura e gli elementi del telaio in cemento armato (travi, pilastri e nodi) inglobando quindi anche la rete ed i connettori ed impedendo la formazione di ponti termici. Le schiume autoespandenti poliuretaniche sono usate in edilizia per molteplici scopi, tra i quali l'isolamento termo-acustico di telai di porte, finestre e cassonetti per tapparelle, il riempimento e isolamento di cavità tra materiali da costruzione di natura diversa, il fissaggio del controtelaio durante il montaggio di serramenti, il riempimento e isolamento della cavità tra telaio e controtelaio o tra controtelaio e muro, durante le operazioni di montaggio di porte e finestre, l'isolamento di tubazioni passanti in impianti termoidraulici, di condizionamento e refrigerazione, il riempimento e isolamento di dettagli costruttivi di tetti e coperture, il riempimento e isolamento di dettagli costruttivi nei rivestimenti a cappotto, l'incollaggio di elementi d'impiantistica incassati, come guaine e scatole di derivazione, anche in pareti in

cartongesso, la sigillatura delle casseforme che devono essere a tenuta durante il getto di calcestruzzi fluidi.

La schiuma utilizzata è di tipo monocomponente composta da una miscela di prepolimero poliuretano, da particolari agenti schiumogeni e speciali additivi, totalmente esenti da CFC e quindi non dannose per l'ozono. La schiuma ha un temperatura di esercizio compresa nell'intervallo $[-40 \div 90]$ °C ed un tempo di indurimento completo massimo di 5 h. Per effetto dell'umidità atmosferica dopo l'estrusione, la schiuma si espande in volume ed indurisce, formando una struttura stabile a cellule chiuse, con ottime caratteristiche meccaniche ed elevate proprietà di isolamento termico e acustico. Una volta indurita, la schiuma è impermeabile, resistente al caldo e al freddo.

Per le prove sismiche su tavola vibrante è stato realizzato un prototipo in cemento armato (c.a.), costituito da una struttura a telaio a due piani, con base quadrata di lato 350 cm, con 4 pilastri e due orizzontamenti (a quota 350 cm e 700 cm), ciascuno dei quali ha quattro travi perimetrali ed un solaio latero-cementizio.

Il progetto del prototipo in c.a. è stato eseguito nel rispetto dei seguenti vincoli:

- tipologia strutturale di edifici tipici degli anni '70 nel panorama italiano;
- dimensioni della superficie di piano entro i limiti dimensionali massimi consentiti dalla tavola vibrante (4x4 m);
- altezza di piano di un edificio standard;
- norma tecnica di riferimento D.M. 30 maggio 1972 "Norme tecniche alle quali devono uniformarsi le costruzioni in conglomerato cementizio, normale e precompresso ed a struttura metallica" (MLLPP, 1972), per la scelta di dimensioni e armature minime degli elementi strutturali;

Il telaio in c.a. è stato progettato per soli carichi verticali seguendo le classiche regole della tecnica delle costruzioni e utilizzando il metodo delle tensioni ammissibili, in uso per gli edifici non recenti. Data la geometria del telaio, per travi e pilastri sono state sufficienti le armature dimensionate secondo i minimi richiesti. In particolare, non sono state considerate le armature indicate dalle normative per le costruzioni in zona sismica, a partire dalla circolare 65/1997, per aumentare la duttilità in corrispondenza delle zone nodali. Il telaio è pertanto rappresentativo del costruito esistente non recente, con comportamento non dissipativo.

Per esigenze legate ai carichi massimi accettabili sulla tavola, le dimensioni del telaio sono scalate rispetto ad un edificio reale con un rapporto di circa 2:3, essendo l'interpiano di 2 m. Anche le sezioni dei pilastri sono state ridotte rispetto ai minimi usuali. I materiali adottati sono calcestruzzo classe C20/25 e acciaio del tipo B450C mentre per le tamponature sono stati utilizzati laterizi tipo forato delle dimensioni di 5x14x28 cm per il paramento interno e 8x14x28 cm per il paramento esterno.

Per la sperimentazione ci si è avvalsi delle apparecchiature e delle strumentazioni della Hall sismica presso l'edificio F65 del Centro Ricerche ENEA di Casaccia. In particolare, è stata utilizzata una tavola vibrante di 4 x 4 m a 6 Gradi Di Libertà che consente di effettuare prove sismiche triassiali riproducendo i reali campi di sollecitazione nelle strutture sottoposte ad esame.

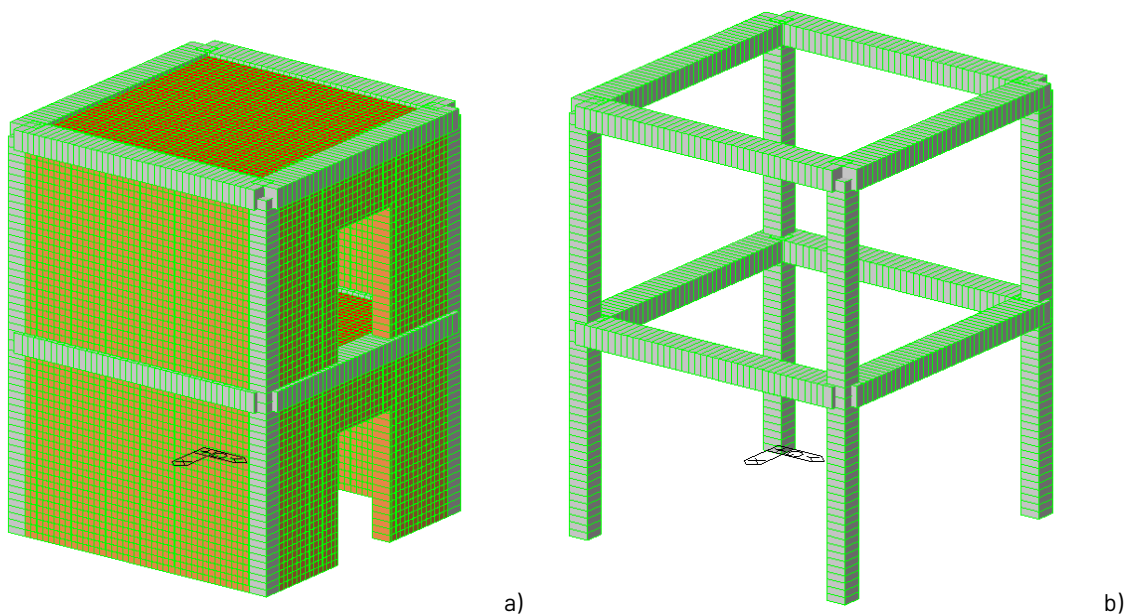
Le prove sono state eseguite somministrando una sequenza di input dinamici al prototipo di edificio in c.a. Una volta fissato quest'ultimo alla base della tavola è stata installata la strumentazione di misura, costituita da:

- accelerometri;
- sistema 3DVision per la misura degli spostamenti.

Ciò significa che, in aggiunta alla sensoristica convenzionale tipicamente utilizzata in ambito sismico, e rappresentata dagli accelerometri, è stato impiegato un sistema di motion capture 3D (denominato 3DVision appunto) per la misura degli spostamenti, che si basa su tecniche di acquisizione del moto di punti nello spazio 3D acquisiti mediante una "costellazione" di 13 telecamere all'infrarosso.

L'intervallo di campionamento delle storie di accelerazione da applicare alle prove su tavola vibrante è stato modificato rispetto ai valori originali rispettando le regole di similitudine meccanica tra struttura reale e modello in scala. Essendo il rapporto 1.5, si trova $\Delta t_M = \Delta t_R / \sqrt{1.5}$. Questo determina uno spostamento delle frequenze dominanti del segnale verso valori più elevati, coerentemente con la maggior frequenza del modello rispetto alla struttura a scala reale.

Al fine di valutare il comportamento statico e dinamico della struttura, e selezionare l'input sismico da assegnare in sede di prova su tavola, è stato definito un modello ad elementi finiti in ambiente Midas Gen. Il modello ha un totale di 28832 nodi e 43978 elementi come mostrato in Figura 17.



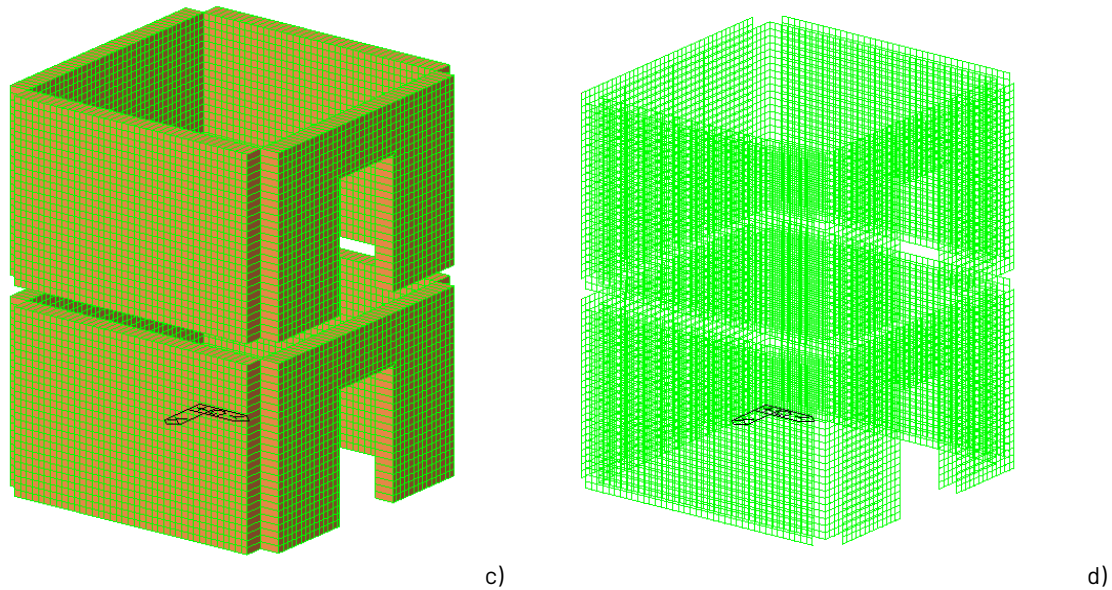


Figura 17. Modello ad elementi finiti della struttura: a) modello completo; b) telaio in c.a.; c) tamponature; d) doppio strato di rete.

In questo studio sono stati utilizzati solo modelli lineari nei quali è stato assunto un unico modulo elastico per la muratura trascurando gli aspetti legati all'orientamento dei blocchi e dei letti di malta. Al fine di valutare gli effetti del sisma sulla rete di armatura in fibra, sono stati considerati tre diversi moduli elastici della tamponatura: quello della muratura non fessurata, e due moduli ridotti, pari al 50% e pari al 10% di quello riferibile alla muratura non fessurata. Lo strato di isolamento non è stato modellato ed è stata considerata la massa aggiuntiva derivante, sommata a quella propria della tamponatura.

Le analisi hanno mostrato come la rigidità offerta dalla tamponatura possa determinare una rilevante variabilità nelle frequenze proprie della struttura considerando che anche il grado di vincolo al contatto tra telaio e pannello in muratura influenza fortemente la risposta dinamica della struttura. In Figura 18 si riportano i risultati delle analisi modali.

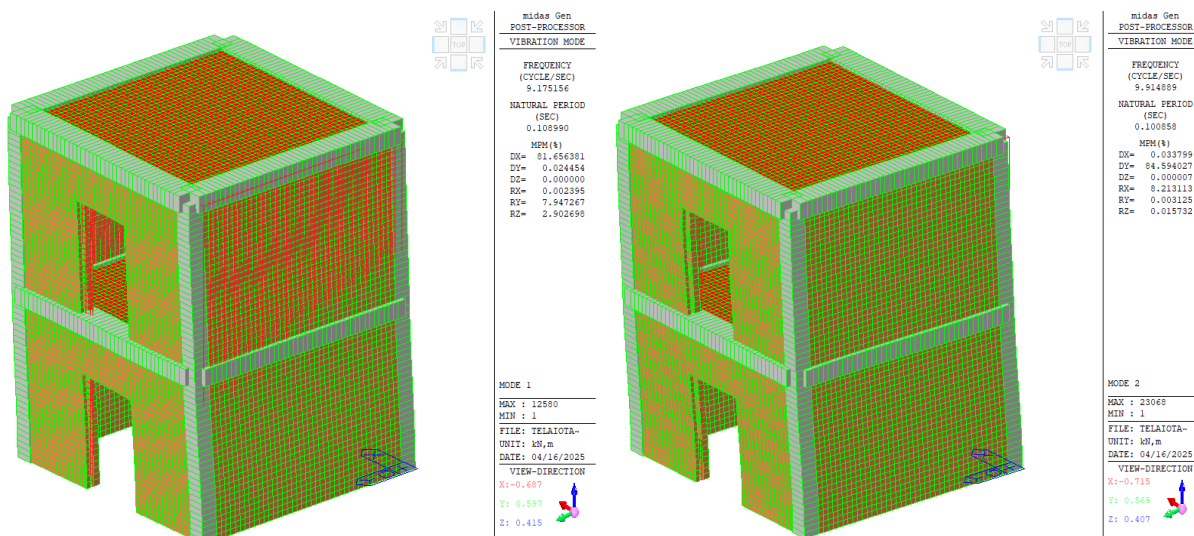


Figura 18. Modi da modello ad elementi finiti.

Si riportano in Figura 19 alcune fasi realizzative del provino all'interno della Hall Sismica del Centro Ricerche Enea di Casaccia. Il dettaglio della tamponatura con i due paramenti è mostrato in Figura 20.

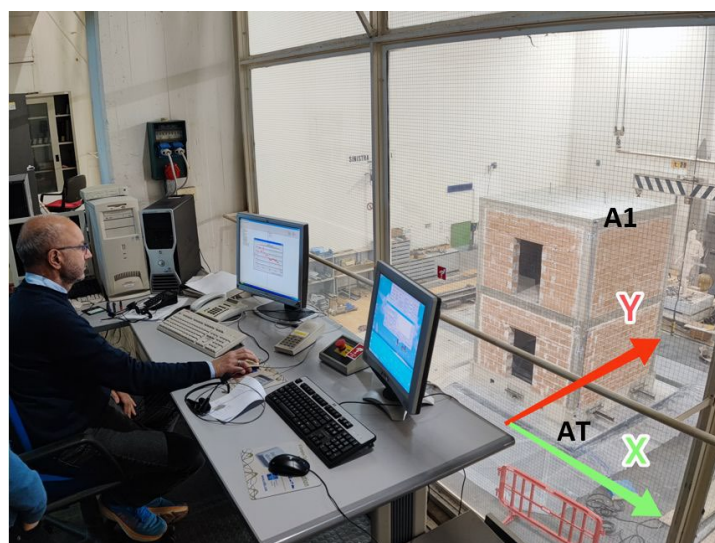


Figura 19. Fasi di costruzione del prototipo in c.a. tamponato a due livelli: realizzazione dell'armatura del cordolo di fondazione (a); maturazione della gettata di calcestruzzo del cordolo di fondazione (b); preparazione delle casseforme per la gettata dei pilastri e del solaio del secondo livello (c); realizzazione della tamponatura (d).

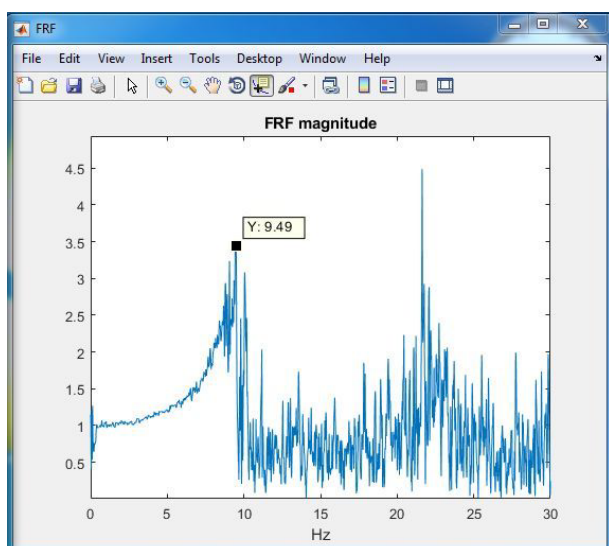


Figura 20. Dettaglio della sezione della tamponatura.

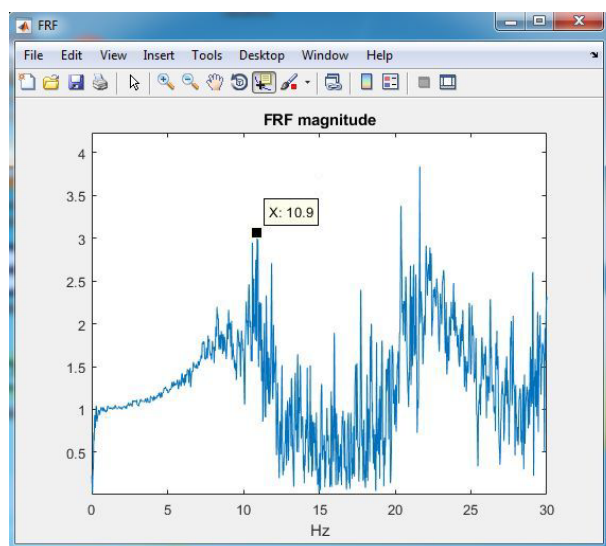
In Figura 21 sono riportate le immagini dello svolgimento della prova di caratterizzazione dinamica del prototipo su tavola vibrante e i relativi risultati in termini di identificazione delle principali frequenze modali tramite il calcolo delle Funzioni di Risposta in Frequenza (FRF) da cui è possibile riconoscere il primo modo flessionale, che è tipicamente il più importante ai fini della valutazione dello stato di danneggiamento strutturale complessivo dell'edificio, e quindi di particolare rilevanza ai fini dello studio dell'efficacia dei sistemi di rinforzo per il miglioramento sismico, nelle due direzioni orizzontali X ed Y. Le due suddette frequenze modali sono risultate pari a $f_x = 10.90$ Hz e $f_y = 9.49$ Hz a rispettivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 21. Test di caratterizzazione dinamica del prototipo su tavola vibrante: (a) immagine della sala controllo durante le fasi di prova; (b) identificazione della frequenza modale del primo modo flessionale in y; (c) e in x.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze esterne all'interno della LA2.13

9 Pubblicazioni scientifiche

1. Italian Buildings Deep Renovation Through Off-Site Construction (https://doi.org/10.1007/978-3-031-71867-0_27)
2. The DE-Sign Urban Lab: the pilot case of Cosenza city, energy efficiency as a driver for social inclusion, resilience and integrated urban regeneration
3. ON SITE: nessuna

9.1 Pubblicazioni diverse da articoli

n° 3 capitoli all'interno del Volume "Humanizing Energy"

- a) Il caso studio ENEA "Ambiente Costruito"
- b) Definizione di "Ambiente Costruito"
- c) Off-Site Construction e Deep Renovation

9.2 Partecipazione a convegni e congressi

- RDPE 2023 (Varsavia) - Identifying the potential for Off-Site Construction in the deep renovation of residential buildings: a focus on HVAC systems RES integrated
- GCCC 2024 (Lisbona) - Off-site Construction as a means for building deep renovation and urban regeneration: ENEA case studies
- WCEE 2024 (Milano) - RC frames equipped with coatings for energy efficiency: numerical modeling and experimental tests. A. Marzo, M. Ricci, I. Roselli, F. Saitta, C. Tripepi
- WCEE 2024 (Milano) - Double-leaf Infill Masonry Walls Connection: Numerical Investigation on its effectiveness - I. Iovinella, F. Saitta

10 Eventi di disseminazione

WORKSHOP

1. Ambiente Costruito – Nuovi scenari per la rigenerazione urbana – ROADSHOW Humanizing Energy (7 Maggio 2024), Bologna
2. Ambiente Costruito – Nuovi scenari per la rigenerazione urbana – ROADSHOW Humanizing Energy (21 Maggio 2024), Pescara
3. Interventi di risparmio energetico nelle costruzioni in legno. Applicazione dell'Off-Site Construction agli edifici in legno. (25-26 Giugno 2024), Camigliatello Silano (CS)
4. Off-Site Construction: nuovo paradigma per il settore delle costruzioni: il caso studio ENEA (27 Giugno 2024), Bologna
5. Il futuro della riqualificazione energetica. Off-Site Construction, nuovo paradigma per il settore delle costruzioni (10 Ottobre 2024), Evento Logical Soft, Bologna

FIERE

6. R2B, (Giugno 2024), Bologna
7. SAIE, (Ottobre 2024), Bologna
8. OIS Open Innovation Scout – (Novembre 2024), Bologna