

# Ricerca di Sistema elettrico



Studio e sviluppo di tamponature prefabbricate in legno con  
accumulo energetico integrato  
(LA3.12)

Simone Beozzo, Mattia Ricci

STUDIO E SVILUPPO DI TAMPONATURE PREFABBRICATE IN LEGNO CON ACCUMULO ENERGETICO INTEGRATO (LA3.12)

S. Beozzo, M. Ricci (ENEA)

Con il contributo di: M. Baldini, A. Cataldo, A. Colucci, B. Di Pietra, V. Fioriti, A. Marzo, A. Picca, G. Puglisi, I. Roselli, F. Saitta, P. Sdringola, C. Tripepi (ENEA)

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: 3.12

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work Package: Paolo Sdringola, ENEA

Responsabile Linea di Attività: ENEA

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

## Indice

1	Risultati attesi .....	7
2	Risultati ottenuti.....	8
3	Prodotti attesi .....	10
4	Prodotti sviluppati .....	11
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	12
6	Sintesi delle attività svolte .....	13
7	Dettaglio delle attività svolte.....	14
7.1	Individuazione materiali e tecnologie adatte .....	14
7.1.1	Pareti prefabbricate in legno .....	14
7.1.2	Accumulo elettrico a super condensatori .....	15
7.2	Definizione delle caratteristiche progettuali di massima .....	17
7.2.1	Pareti prefabbricate in legno .....	17
7.2.2	Accumulo elettrico .....	17
7.2.3	Integrazione dell'accumulo elettrico: analisi numeriche preliminari.....	20
7.3	Produzione dei prototipi per la caratterizzazione del sistema .....	21
7.3.1	Realizzazione prototipi per la caratterizzazione .....	23
7.3.2	Modifiche per il campione relativo alle prove sismiche .....	29
7.4	Caratterizzazione sismica, termica e acustica.....	32
7.4.1	Sintesi degli obiettivi .....	32
7.4.2	Prove sismiche.....	33
7.4.3	Prove termiche.....	43
7.4.4	Prove acustiche.....	52
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	64
9	Pubblicazioni scientifiche.....	65
10	Eventi di disseminazione .....	66

## Indice delle figure

Figura 1 – Prototipo di parete prefabbricata con accumulo integrato .....	8
Figura 2 – Sistema X-Lam.....	15
Figura 3 – Sistema a telaio.....	15
Figura 4 – Specifiche tecniche di batterie e supercondensatori .....	16
Figura 5 – Grafico relazione tra densità energetica e densità di potenza, permettendo un utile confronto anche fra tecnologie diverse, al fine di poter optare per la più adatta .....	16
Figura 6 – Andamento del mercato globale dei supercondensatori .....	16
Figura 7 – Stratigrafia tipo della parete prefabbricata in legno .....	17
Figura 8 – Dettaglio dei sistemi di accumulo .....	18
Figura 9 – Moduli sistemi di accumulo.....	18
Figura 10 – Dettaglio collegamenti elettrici .....	19
Figura 11 – Mesh di calcolo utilizzata per il modello agli elementi finita: vista globale (sinistra) e vista di dettaglio (destra).....	20
Figura 12 – Peso proprio: deformazioni totali (sinistra) e stress equivalente di von Mises (destra) .....	21
Figura 13 – Prova di cablaggio colonna di supercondensatori.....	22
Figura 14 – Prova di assemblaggio colonna di supercondensatori .....	22
Figura 15 – Parete campione per prove di inserimento e stratigrafia.....	23
Figura 16 – ID.1 225x245 cm (BxH) con spazio di inserimento supercondensatori ed isolante laterale, per test sismici.....	24
Figura 17 – ID.2 128x143 cm (BxH) per test termici ed acustici .....	25
Figura 18 – ID.3 125x100 cm (BxH) per test di compatibilità elettromagnetica .....	25
Figura 19 – ID.4 62,5x62,5 cm per test di isolamento e sicurezza.....	26
Figura 20 – Telaio campione di parete e pannello lato interno rimovibile con predisposizione per passaggio di corrugati elettrici.....	27
Figura 21 – Vista dei campioni realizzati per le prove di caratterizzazione .....	28
Figura 22 – Campioni adattati al carico e trasporto .....	28
Figura 23 – Preparazione telaio per parete a doppia colonna di supercondensatori.....	29
Figura 24 – Assemblaggio parete con doppia colonna di supercondensatori.....	30
Figura 25 – Una delle pareti del blocco tridimensionale, con cappotto installato .....	30
Figura 26 – Assemblaggio delle pareti che costituiranno il blocco da prove sismiche .....	31
Figura 27 – Assemblaggio del blocco prefabbricato di pareti e caricamento su pianale per il trasporto .....	31
Figura 28 – Spostamento dal camion di trasporto dell'intero blocco prefabbricato e posizionamento sulle tavole vibranti .....	32

Figura 29 - Spostamento del blocco prefabbricato direttamente da camion a tavola vibrante .....	33
Figura 30 - Blocco prefabbricato posizionato su tavola vibrante .....	34
Figura 31 - Parete contenente le due colonne di supercondensatori, solo una colonna coperta da cappotto e target posizionati.....	34
Figura 32 -Parete laterale con cappotto e target posizionati .....	35
Figura 33 - Vibrometro e target posizionati sulla parete laterale.....	35
Figura 34 - Particolare del vibrometro con target .....	36
Figura 35 - Particolare dei target e del vibrometro illuminati dalle telecamere infrarossi .....	36
Figura 36 - Parete con supercondensatori e parete laterale senza cappotto con target illuminati da infrarossi .....	37
Figura 37 - Particolare parete con supercondensatori e target illuminati.....	37
Figura 38 - Visualizzazione dei target di controllo e configurazione analisi .....	38
Figura 39 - Valutazione spostamento target di controllo .....	38
Figura 40 - Parete laterale con cappotto e parete con supercondensatori come analizzate tramite target .....	39
Figura 41 - Analisi SISO in direzione X: accelerometro 1.....	41
Figura 42 - Analisi SISO in direzione X: accelerometro 2 .....	41
Figura 43 - Analisi SISO in direzione Y: accelerometro 1 .....	42
Figura 44 - Analisi SISO in direzione Y: accelerometro 2 .....	42
Figura 45 - Vista esterna delle due camere climatiche aperte .....	43
Figura 46 - Modello 3D del sistema hot box .....	43
Figura 47 - Sezione verticale del sistema hot box.....	44
Figura 48 - Posizionamento delle termocoppie in camera calda .....	44
Figura 49 - Posizionamento delle termocoppie in camera fredda .....	44
Figura 50 - Termoflussimetro .....	45
Figura 51 - Vista del campione tradizionale lato camera calda prima dell'inserimento dell'isolante .....	46
Figura 52 - Vista del campione tradizionale lato camera calda dopo l'inserimento dell'isolante e la chiusura finale in cartongesso .....	46
Figura 53 - Vista del campione lato camera calda con l'inserimento dei sistemi di accumulo .....	47
Figura 54 - Vista del campione con sistemi di accumulo lato camera calda dopo l'inserimento dell'isolante e la chiusura finale in cartongesso .....	47
Figura 55 - Vista del campione con sistemi di accumulo lato camera fredda.....	48
Figura 56 - Pressione di vapore in funzione dello spessore equivalente di aria.....	49
Figura 57 - Andamento della temperatura e del flusso termico nei lati opposti per il campione tradizionale .....	50

Figura 58 - Andamento della temperatura e del flusso termico nei lati opposti per il campione tradizionale (armoniche principali e normalizzazione per il regime dinamico) .....	50
Figura 59 - Andamento della temperatura e del flusso termico nei lati opposti per il campione con sistemi di accumulo .....	51
Figura 60 - Andamento della temperatura e del flusso termico nei lati opposti per il campione con sistemi di accumulo (armoniche principali e normalizzazione per il regime dinamico) .....	51
Figura 61 - Pianta delle camere riverberanti accoppiate .....	52
Figura 62 - Sezione longitudinale delle camere riverberanti accoppiate .....	53
Figura 63 - Posizione numero 1 della sorgente sonora (in rosso) con i relativi microfoni (in blu) .....	53
Figura 64 - Posizione numero 2 della sorgente sonora (in rosso) con i relativi microfoni (in blu) .....	54
Figura 65 - Posizione numero 3 della sorgente sonora (in rosso) con i relativi microfoni (in blu) .....	54
Figura 66 - Posizione numero 4 della sorgente sonora (in rosso) con i relativi microfoni (in blu) .....	55
Figura 67 - Posizione numero 5 della sorgente sonora (in rosso) con i relativi microfoni (in blu) .....	55
Figura 68 - Vista del campione tradizionale con lana di roccia, prima della finitura interna ...	56
Figura 69 - Vista del campione tradizionale con lana di roccia, chiusura interna .....	57
Figura 70 - Vista del campione tradizionale con lana di roccia, chiusura interna (camera ricevente) .....	57
Figura 71 - Vista del campione tradizionale con lana di roccia, chiusura esterna (camera emittente) .....	58
Figura 72 - Vista del campione con sistemi di accumulo, prima della finitura interna (camera ricevente) .....	58
Figura 73 - Vista del campione con sistemi di accumulo, chiusura esterna (camera emittente) .....	59
Figura 74 - Andamento del potere fonoisolante R in bande di un terzo d'ottava tra 100 e 5000 Hz per il campione tradizionale .....	60
Figura 75 - Andamento del potere fonoisolante R in bande di un terzo d'ottava tra 100 e 5000 Hz per il campione con sistemi di accumulo .....	62
Figura 76 - Confronto dell'andamento del potere fonoisolante R in bande di un terzo d'ottava tra 100 e 5000 Hz per il campione con sistemi di accumulo e il campione tradizionale .....	62

## Indice delle tabelle

Tabella 1 - Caratteristiche dei moduli supercondensatori .....	19
Tabella 2 - Caratteristiche dei prototipi per le prove di caratterizzazione .....	23
Tabella 3 - Tipologia di caratterizzazione con la specifica test facility .....	32
Tabella 4 - Sequenza di prove effettuate su tavola vibrante .....	41
Tabella 5 - Posizionamento delle termocoppie nella camera climatica .....	45
Tabella 6 - Stratigrafia per la verifica igrometrica .....	48
Tabella 7 - Trasmittanza termica periodica del campione con sistemi di accumulo.....	51
Tabella 8 - Caratteristiche degli elementi utilizzati per la parete divisorie dichiarati dalla casa produttrice .....	56
Tabella 9 - Risultati delle misure effettuate sul campione tradizionale (lana di roccia) .....	60
Tabella 10 - Risultati delle misure effettuate sul campione con sistemi di accumulo .....	61

# 1 Risultati attesi

Lista dei risultati attesi come da capitolato vigente:

1. Analisi dei materiali/tecnologie più adatti alla soluzione oggetto di studio e definizione delle configurazioni ottimali (con il supporto di simulazioni numeriche quando necessarie).
2. Indicazioni progettuali di massima per la realizzazione dei prototipi dei singoli moduli, sulla base delle configurazioni ottimali simulate.
3. Realizzazione dei prototipi, sulla base delle specifiche identificate in termini di materiale e tecnologie.
4. Caratterizzazione delle prestazioni dal punto di vista energetico, acustico, sismico ed elettromagnetico.

## 2 Risultati ottenuti

Lista dei risultati ottenuti:

1. L'analisi di materiali e tecnologie ha portato alla definizione di strutture prefabbricate in legno sismicamente e termicamente efficienti. Si è scelto di utilizzare pareti in legno prefabbricato con struttura a telaio portante. Questo facilita la personalizzazione e l'adattamento alle dimensioni richieste nelle varie caratterizzazioni, nonché permette di avere lo spazio necessario all'inserimento degli accumuli energetici. Per l'accumulo si sono analizzate le tecnologie disponibili e sono stati individuati, come ottimali, i supercapacitori che presentano un impatto ambientale ed una vita utile molto superiore alle batterie presenti sul mercato. Questo permette l'inserimento in parti dell'edificio non andando a richiedere frequenti manutenzioni o sostituzioni.
2. La progettazione integrata della parete prefabbricata con accumulo ha permesso di superare le difficoltà date dalla necessità di integrare supercondensatori all'interno di pareti prefabbricate. Lo sviluppo di nuovi sistemi, con forme e dimensioni adeguate ha permesso di superare i problemi. La definizione di indicazioni progettuali di massima ha consentito la realizzazione di alcuni campioni per verificare la facilità e la correttezza dell'inserimento dei supercapacitori all'interno delle pareti prefabbricate.
3. La realizzazione di prototipi ha permesso di testare sul campo, in diverse tipologie di applicazioni, il reale funzionamento e l'integrazione dei componenti. Sono stati realizzati 7 prototipi (un esempio è mostrato in Figura 1), di 4 diverse dimensioni e capacità di accumulo energetico, per soddisfare le necessità delle varie caratterizzazioni.



Figura 1 – Prototipo di parete prefabbricata con accumulo integrato

4. La caratterizzazione delle prestazioni energetiche, acustiche, sismiche ed elettromagnetiche ha permesso di indagare il comportamento dei vari elementi e gli effetti della loro integrazione sotto diversi punti di vista. In particolare:
- Prove sismiche: la sostituzione del materiale isolante con due colonne di 12 supercondensatori (240 kg) non ha compromesso la stabilità strutturale.
  - Prove termiche: la parete con supercondensatori ha una trasmittanza leggermente superiore rispetto a quella con materiale isolante (0,26 W/m<sup>2</sup>K contro 0,19 W/m<sup>2</sup>K), ma conforme alla normativa per le strutture opache verticali in zona F. In regime dinamico, il sistema di accumulo migliora il ritardo di fase nonostante la riduzione della resistenza termica.
  - Prove acustiche: l'isolamento acustico delle pareti prefabbricate standard e delle pareti con supercondensatori è risultato simile, 47 dB la parete con isolante e 48 dB la parete con i supercondensatori. Questo valore è leggermente inferiore a quanto indicato a livello di normativa per le pareti di separazione tra unità immobiliari, pari a 50 dB, ma molto superiore per quelle relative alle pareti esterne, cioè 40 dB. Non vi sono poi indicazioni per l'isolamento all'interno della stessa abitazione. Un'ottimizzazione della stratigrafia potrebbe migliorare ulteriormente le performance isolanti.

I suddetti risultati pongono le basi per ulteriori sviluppi alla ricerca delle performance ottimali, con il miglioramento del comportamento complessivo.

#### BENEFICIO PER IL SISTEMA ELETTRICO NAZIONALE E I SUOI UTENTI

L'integrazione di sistemi di accumulo basati su supercondensatori direttamente nelle pareti degli edifici rappresenta una soluzione innovativa per migliorare l'efficienza strutturale ed energetica degli immobili. Questo approccio elimina la necessità di spazi aggiuntivi o volumi dedicati per l'installazione, offrendo al contempo una vita utile più lunga rispetto alle batterie convenzionali.

Un ulteriore vantaggio di questa tecnologia risiede nella sua adattabilità: può essere implementata sia durante la costruzione di nuovi edifici sia nelle ristrutturazioni, favorendone una rapida diffusione. Gli edifici dotati di accumulo elettrico integrato possono ottimizzare le prestazioni energetiche riducendo il carico sulla rete elettrica nazionale. Ciò consente di armonizzare la variabilità delle fonti energetiche rinnovabili e di limitare l'uso dei sistemi di regolazione basati su centrali a combustibili fossili.

### 3 Prodotti attesi

Lista dei prodotti attesi come da capitolato vigente:

- Rapporto Tecnico contenente una descrizione delle tecnologie indagate, delle specifiche delle simulazioni, della progettazione delle pareti nel loro insieme e dei risultati delle prove sperimentali utili alla caratterizzazione. Si descriveranno, eventualmente, le difficoltà legate alla realizzazione del prototipo di parete. Il rapporto tecnico conterrà anche le indicazioni sulla progettazione e sul processo produttivo, funzionali ad un avvicinamento alla fase di industrializzazione.
- Prototipi di tamponature prefabbricate in legno con accumulo energetico integrato.

## 4 Prodotti sviluppati

Lista dei prodotti sviluppati:

- È stato sviluppato il presente rapporto tecnico, contenente una descrizione delle tecnologie indagate, delle specifiche delle simulazioni, della progettazione delle pareti nel loro insieme e dei risultati delle prove sperimentali utili alla caratterizzazione.
- Sono stati realizzati N. 7 prototipi di diverse dimensioni e con numero variabile di elementi di accumulo, da dedicare alla caratterizzazione sismica, termica e acustica, nonché per le valutazioni sulla sicurezza elettrica e la compatibilità elettromagnetica realizzate dai Co-beneficiari UNIBO\_DEI\_1 (LA3.13) e UNIBO\_DEI\_2 (LA3.14) rispettivamente. In particolare:
  - N° 1 prototipo per le prove sismiche. Non essendo necessaria la presenza di un sistema di accumulo funzionante per le finalità delle prove, sono stati utilizzati dei simulacri di dimensione e massa pari a quelle dei supercondensatori, consentendo così una riduzione dei costi.
  - N° 2 prototipi per la caratterizzazione termica ed acustica.
  - N° 2 prototipi per le prove di compatibilità elettromagnetica (LA 3.13).
  - N° 2 prototipi per l'analisi sicurezza elettromagnetica (LA 3.14).

Le caratteristiche dei prototipi sono riportate in Tabella 2 a pag.23.

## 5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Per la LA3.12 non vi sono stati scostamenti tecnici rispetto al capitolato vigente.

In riferimento agli aspetti economici, lo scostamento sui costi di personale (A) è dovuto al passaggio di livello, da medio ad alto, di parte del personale coinvolto. Lo scostamento della voce di spesa per costi di esercizio (C) si lega ai seguenti aspetti:

- mancato acquisto di consumabili per prove meccaniche di resistenza a sollecitazioni sismiche, che sono state condotte utilizzando materiale già presente presso il CR ENEA Casaccia;
- realizzazione di spese con impegni economici inferiori rispetto a quelli inizialmente preventivati;
- quantificazione finale delle spese per viaggi e missioni, rispetto a quanto inizialmente preventivato.

Tali scostamenti non hanno influenzato il raggiungimento degli obiettivi e dei risultati attesi dalla LA3.12.

## 6 Sintesi delle attività svolte

Per la tipologia di parete da utilizzare si sono valutate diverse soluzioni: è stata scelta una parete prefabbricata in legno, a telaio portante, apprezzata per la facilità di personalizzazione. Come accumulo energetico è stata adottata la tecnologia dei supercapacitori, che presenta una durata media superiore a quella delle batterie, consentendo l'integrazione in parti dell'edificio senza richiedere manutenzione o sostituzioni frequenti. La configurazione a telaio portante, con tramezzi e materiale isolante, permette l'inserimento di moduli di supercondensatori in sostituzione dell'isolante stesso.

Si è proceduto al dimensionamento dei moduli, alla progettazione integrata parete-accumulo e alla realizzazione di prototipi destinati alla caratterizzazione delle prestazioni. Le prove sismiche su tavola vibrante a 6 gradi di libertà, con replica del sisma di Amatrice (2016) e di un sisma sintetico, hanno verificato la resistenza strutturale. Le prove termiche statiche e dinamiche in hotbox hanno permesso di calcolare la trasmittanza. Infine, il potere fonoisolante è stato misurato tra due camere anecoiche, valutando l'impatto dei supercondensatori.

## 7 Dettaglio delle attività svolte

### 7.1 Individuazione materiali e tecnologie adatte

Lo svolgimento di questa attività ha previsto la definizione delle tipologie di costruzione adatte alla realizzazione per le pareti prefabbricate e per le caratteristiche dell'accumulo elettrico che queste avrebbero dovuto contenere.

Si è proceduto realizzando una ricerca bibliografica ed informativa sulla base della letteratura scientifica esistente. Si sono successivamente consultati produttori ed esperti del settore, cercando di trovare la combinazione di tecnologie ottimale. Le riflessioni scaturite sono riportate di seguito.

#### 7.1.1 Pareti prefabbricate in legno

Le pareti degli edifici svolgono funzioni strutturali, isolanti e protettive, con soluzioni che variano tra muratura tradizionale, pannelli prefabbricati, sistemi a secco, legno e calcestruzzo aerato. La muratura tradizionale è affiancata da tecnologie più rapide e sostenibili, come il legno. Il confronto tra muratura e legno evidenzia vantaggi ecologici e sismici del legno, ma costi e manutenzione superiori. La scelta è caduta sulla realizzazione in legno in quanto più adattabile alle diverse dimensioni e facilità di personalizzazione per l'integrazione dell'accumulo elettrico. Inoltre, le strutture in legno colgono appieno l'idea di prefabbricazione prevista dall'attività in essere.

Le pareti prefabbricate in legno possono utilizzare sistemi X-Lam (Figura 2) o a telaio come elementi portanti (Figura 3). Il sistema X-Lam, realizzato con pannelli in legno massiccio a strati incrociati, offre alta resistenza strutturale. Il sistema a telaio, leggero e resistente, è composto da montanti in legno e isolanti. La struttura a telaio, per sua conformazione si rivela più adatta all'inserimento dei moduli di accumulo elettrico.



Figura 2 - Sistema X-Lam



Figura 3 - Sistema a telaio

### 7.1.2 Accumulo elettrico a super condensatori

I sistemi di accumulo energetico sono essenziali per bilanciare produzione e domanda di energia, favorire l'uso di fonti rinnovabili e sostenere la mobilità elettrica. I dispositivi presenti sul mercato si basano su batterie al piombo o, negli ultimi anni, su batterie al litio. Queste presentano il vantaggio di una elevata densità energetica, lunga durata e sistemi di controllo integrati, ma presentano costi più elevati e sfide di smaltimento. Una tecnologia in pieno sviluppo attualmente sono i supercondensatori, basati su doppio strato elettrochimico, offrono vantaggi in termini di cicli di carica/scarica e versatilità, ma sono limitati, per il momento, da costi elevati e minore energia specifica. Il confronto tra le tecnologie è presentato in Figura 4 e Figura 5.

Il settore di produzione ed utilizzo dei supercondensatori è in forte espansione negli ultimi anni (Figura 6), specialmente grazie agli sviluppi tecnologici dovuti all'interessamento del settore automotive.

Function	Supercapacitor	Lithium-ion (general)
Charge time	1 – 10 seconds	10 – 60 minutes
Cycle life	1 million or 30, 000h	500 and higher
Cell voltage	2.3 to 2.75V	3.6 to 3.7V
Specific energy (Wh / kg)	5 (typical)	100 – 200
Specific power (W / kg)	Upto 10, 000	1000 – 3000
Cost per Wh	\$20 (typical)	\$0.50 - \$1.00 (large system)
Service life (in vehicle)	10 to 15 years	5 to 10 years
Charge temperature	-40 to 65°C (-40 to 149°F)	0 to 45°C (32° to 113°F)
Discharge temperature	-40 to 65°C (-40 to 149°F)	-20 to 60°C (-4 to 140°F)

Figura 4 - Specifiche tecniche di batterie e supercondensatori

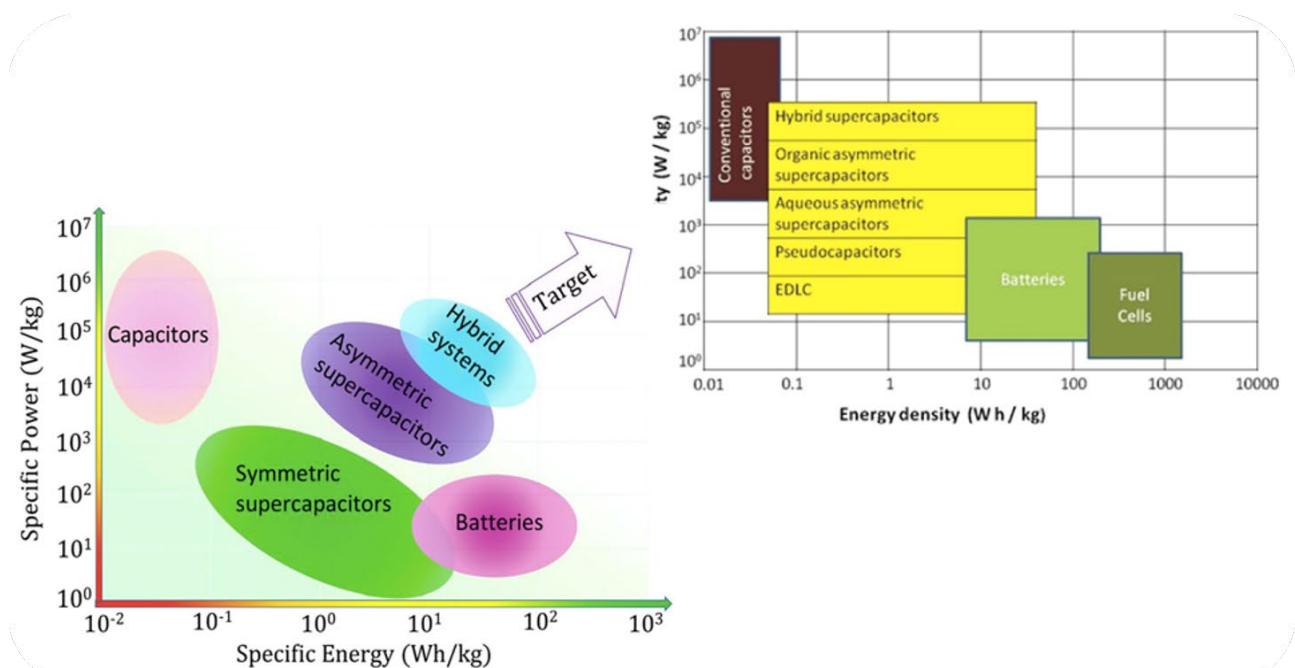


Figura 5 - Grafico relazione tra densità energetica e densità di potenza, permettendo un utile confronto anche fra tecnologie diverse, al fine di poter optare per la più adatta



Figura 6 - Andamento del mercato globale dei supercondensatori

Le innovazioni attuali includono metodi produttivi più efficienti, integrazione tecnologica e materiali sostenibili come la cellulosa, promettente per elettrodi e supporti.

I supercondensatori sono quindi i candidati ideali per lo sviluppo di sistemi da integrare nelle pareti prefabbricate.

## 7.2 Definizione delle caratteristiche progettuali di massima

### 7.2.1 Pareti prefabbricate in legno

Per la realizzazione della parete prefabbricata viene utilizzata la struttura a telaio portante, con una stratigrafia interna basata sulle versioni più comuni presenti sul mercato (Figura 7), in modo da poter essere considerata rappresentativa della maggior parte delle soluzioni esistenti.

I montanti sono posizionati con interasse di 62,5 cm, atti a contenere i moduli supercondensatori.

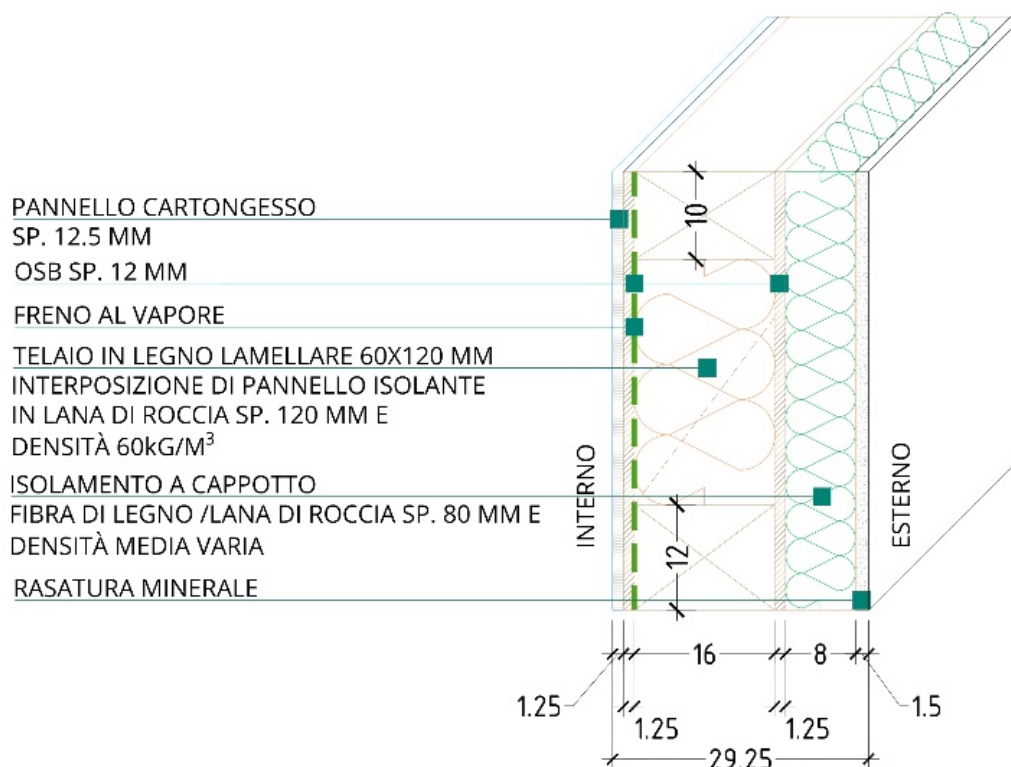


Figura 7 – Stratigrafia tipo della parete prefabbricata in legno

### 7.2.2 Accumulo elettrico

L'integrazione tra le caratteristiche della parete prefabbricata e le necessità di realizzare un sistema facilmente componibile di supercapacitori ha necessitato lo sviluppo di un sistema ad incastri e lamelle, con moduli ad elevato potenziale (Figura 8).

Valutando le possibili dimensioni e capacità utilizzabili si è scelto di operare con moduli del valore più prossimo possibile ad 1 kWh di accumulo, e tensione 48V, in modo da poter essere facilmente sostituibili con gli accumuli a batterie al litio ad oggi più utilizzati. Questo

dimensionamento di capacità consente inoltre una facile scalabilità per adattare la capacità totale alle necessità dell'abitazione. La letteratura e la verifica dei prodotti su mercato evidenziano come gli accumuli normalmente utilizzati nelle abitazioni abbiano una media di 6 kWh, con valori variabili tra i 2 kWh ed i 12 kWh in base al livello dei consumi elettrici e disponibilità di energia prodotta. Un sistema di accumulo ben dimensionato immagazzina l'energia in eccesso, permettendo di utilizzarla quando serve e massimizzando l'autoconsumo. Questo si traduce in una maggiore indipendenza dalla rete elettrica.

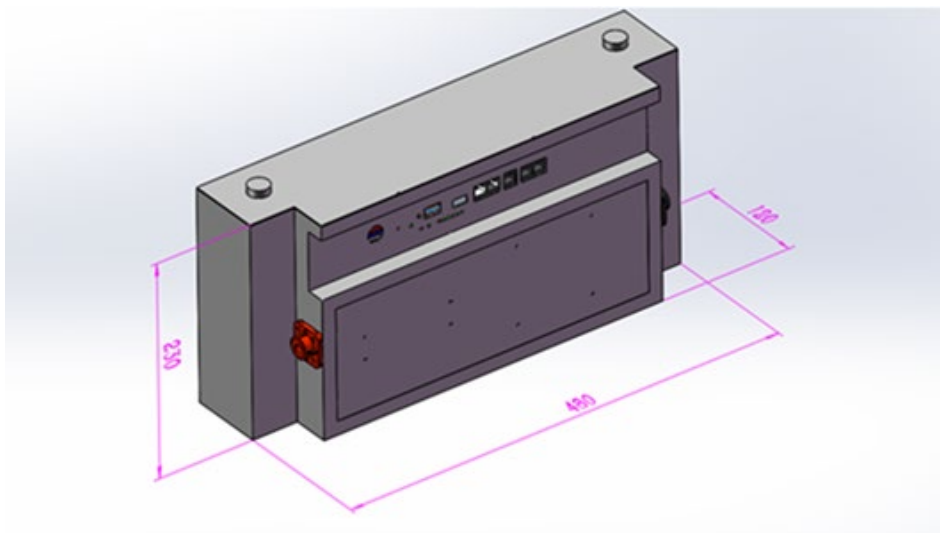


Figura 8 - Dettaglio dei sistemi di accumulo

La soluzione proposta prevede l'utilizzo di moduli a supercondensatori a 48V da 1050 Wh l'uno (Tabella 1). I moduli sono impilabili uno sopra l'altro, fino a 15 unità, rendendo semplice e veloce l'installazione del sistema d'accumulo. Inoltre, data la modularità della soluzione finale, può coprire tantissimi range di utilizzo e di necessità (Figura 9). Le prove di caratterizzazione si sono assestate su 12 moduli per le prove sismiche, ove la massa totale più rivelarsi critica, e una combinazione di gruppi composti da 2 e 3 moduli per le prove termiche ed acustiche.

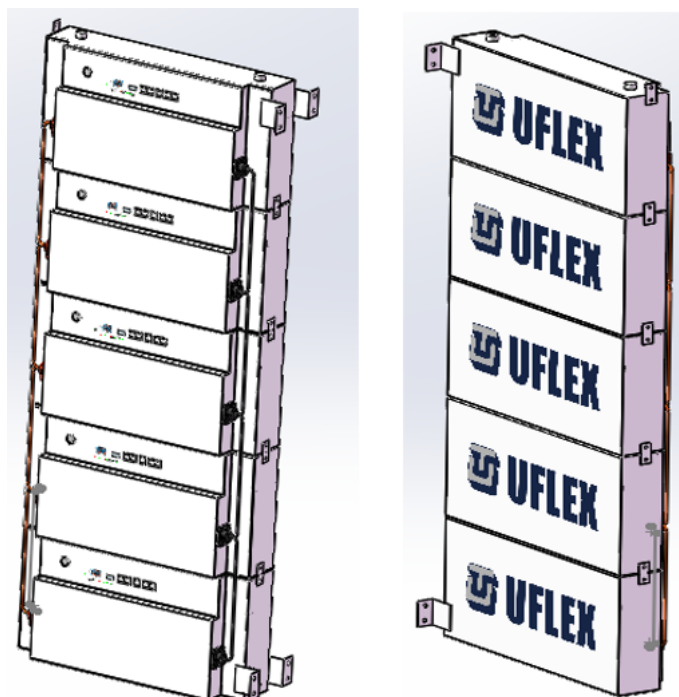


Figura 9 - Moduli sistemi di accumulo

I cablaggi sono studiati in modo tale da non dover occupare ulteriore spazio all'interno della parete, la forma del modulo è stata progettata per farli passare lungo i bordi senza uscire dall'ingombro massimo del modulo stesso (Figura 10).

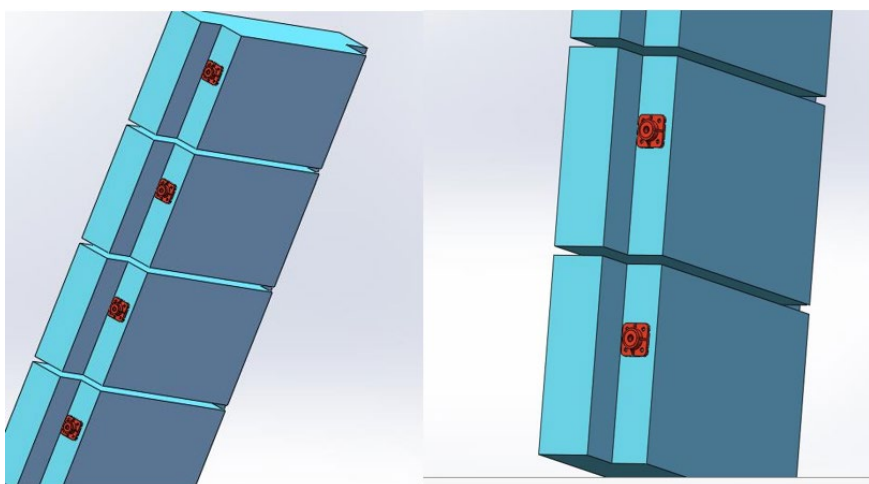


Figura 10 – Dettaglio collegamenti elettrici

<b>Caratteristica</b>	<b>Parametro</b>
Energia Nominale	1050 Wh (@10A)
Tensione massima di carica	58,8 VDC
Tensione minima di carica	42 VDC
Corrente di carica	Standard: 10A Massima: 20A
Corrente di scarica	Standard: 10A Massima: 20A
Temperatura di esercizio	Carica: 0-60°C Scarica -20 - 55 °C
Cicli di vita	20'000 cicli (@ 10A)
Temperatura di stoccaggio	-20 - +45 °C
Connessione in parallelo	15 unità
Dimensioni	Lunghezza: 480mm / Profondità: 120mm / Altezza: 230mm
Peso	12kg
Grado IP	IP30

Tabella 1 - Caratteristiche dei moduli supercondensatori

### 7.2.3 Integrazione dell'accumulo elettrico: analisi numeriche preliminari

Al fine di verificare che l'integrazione dell'accumulo elettrico non comporti problematiche di natura strutturale in prima analisi dovute al peso proprio, è stato implementato un modello in ANSYS agli elementi finiti. In particolare, Figura 11 mostra la mesh di calcolo utilizzata.

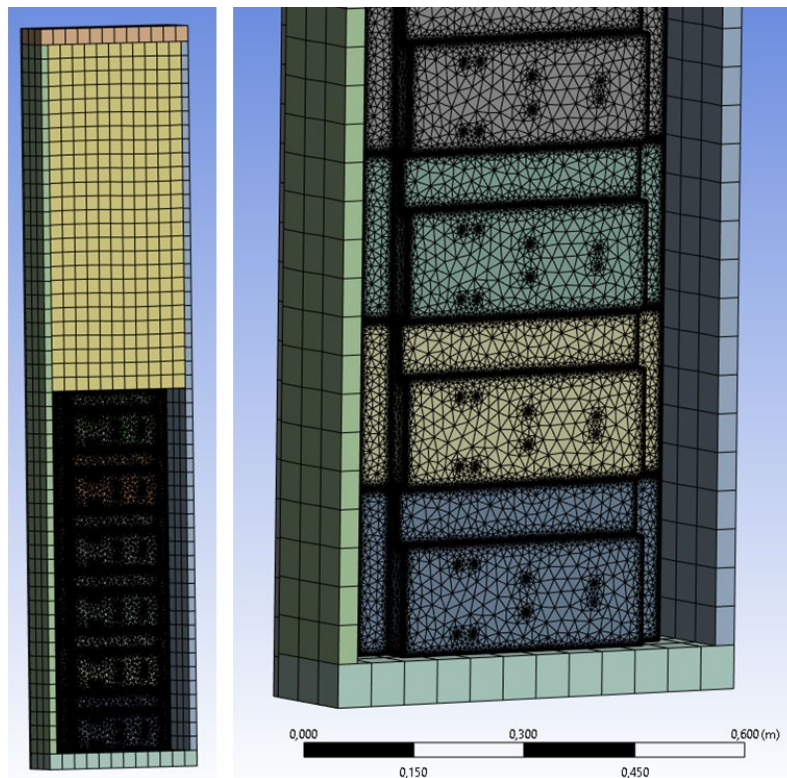


Figura 11 – Mesh di calcolo utilizzata per il modello agli elementi finiti: vista globale (sinistra) e vista di dettaglio (destra).

I risultati delle analisi preliminari svolte (carico dovuto al peso proprio) sono riportati in Figura 12 in termini di spostamenti totali (magnitudo) e stress equivalenti di von Mises. I test effettuati hanno mostrato che non sono presenti criticità nei contatti nemmeno per l'elemento di accumulo elettrico più caricato. Si è deciso quindi di proseguire l'attività mantenendo tale configurazione di assemblaggio.

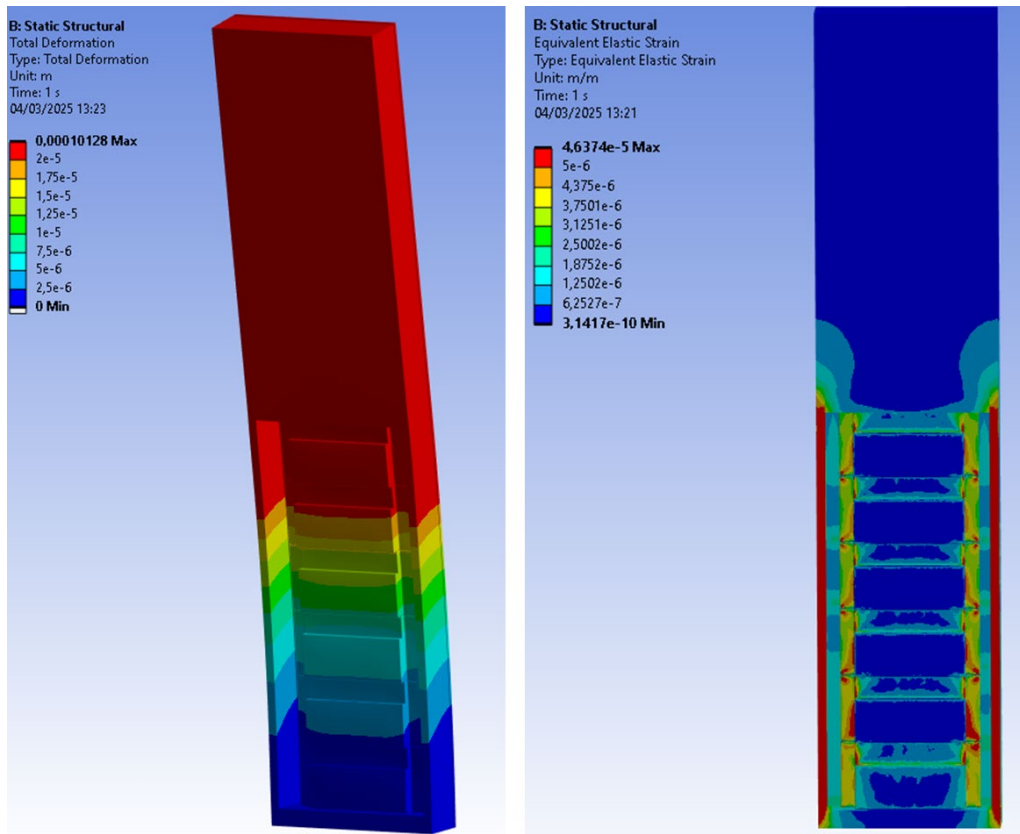


Figura 12 – Peso proprio: deformazioni totali (sinistra) e stress equivalente di von Mises (destra)

### 7.3 Produzione dei prototipi per la caratterizzazione del sistema

Definita la tipologia di parete e di accumulo è stato progettato un campione di parete prefabbricata idoneo ad alloggiare i supercondensatori.

Si sono realizzate prove di assemblaggio, impilaggio e di cablaggio tra gruppi di condensatori (Figura 13, Figura 14), per verificare la coerenza delle stesse con le specifiche di progetto.



Figura 13 - Prova di cablaggio colonna di supercondensatori



Figura 14 - Prova di assemblaggio colonna di supercondensatori

Il risultato ultimo di questa prima fase ha portato alla realizzazione di un campione di prova idoneo ad alloggiare al suo interno un supercapacitore (Figura 15).



Figura 15 – Parete campione per prove di inserimento e stratigrafia

### 7.3.1 Realizzazione prototipi per la caratterizzazione

È stata portata avanti un'attività di coordinamento con i diversi soggetti coinvolti nei successivi test di caratterizzazione, orientata alla definizione delle caratteristiche dei prototipi in termini di dimensioni e numerosità.

Sono stati quindi realizzati i suddetti prototipi, con dimensioni definite sulla base ai limiti imposti delle facility sperimentali.

L'elenco dei prototipi, con il relativo identificativo, è riportato in Tabella 2.

<b>Caratterizzazione</b>	<b>Test facility</b>	<b>Dimensioni campione</b>	<b>Q.tà</b>	<b>ID Campione</b>	<b>Figura</b>
<b>Sismica</b>	ENEA	225x245 cm	1	ID.1	Figura 16
<b>Termica</b>	UNIPG-DI	128x143 cm	1	ID.2	Figura 17
<b>Acustica</b>	UNIPG-DI	128x143 cm	1	ID.2	Figura 17
<b>Elettromagnetica</b>	Università di Bologna (LA3.14 UNIBO_DEI_2)	125x100 cm	2	ID.3	Figura 18
<b>Scariche ed invecchiamento</b>	Università di Bologna (LA3.13 UNIBO_DEI_1)	62,5x62,5 cm	2	ID.4	Figura 19

Tabella 2 – Caratteristiche dei prototipi per le prove di caratterizzazione

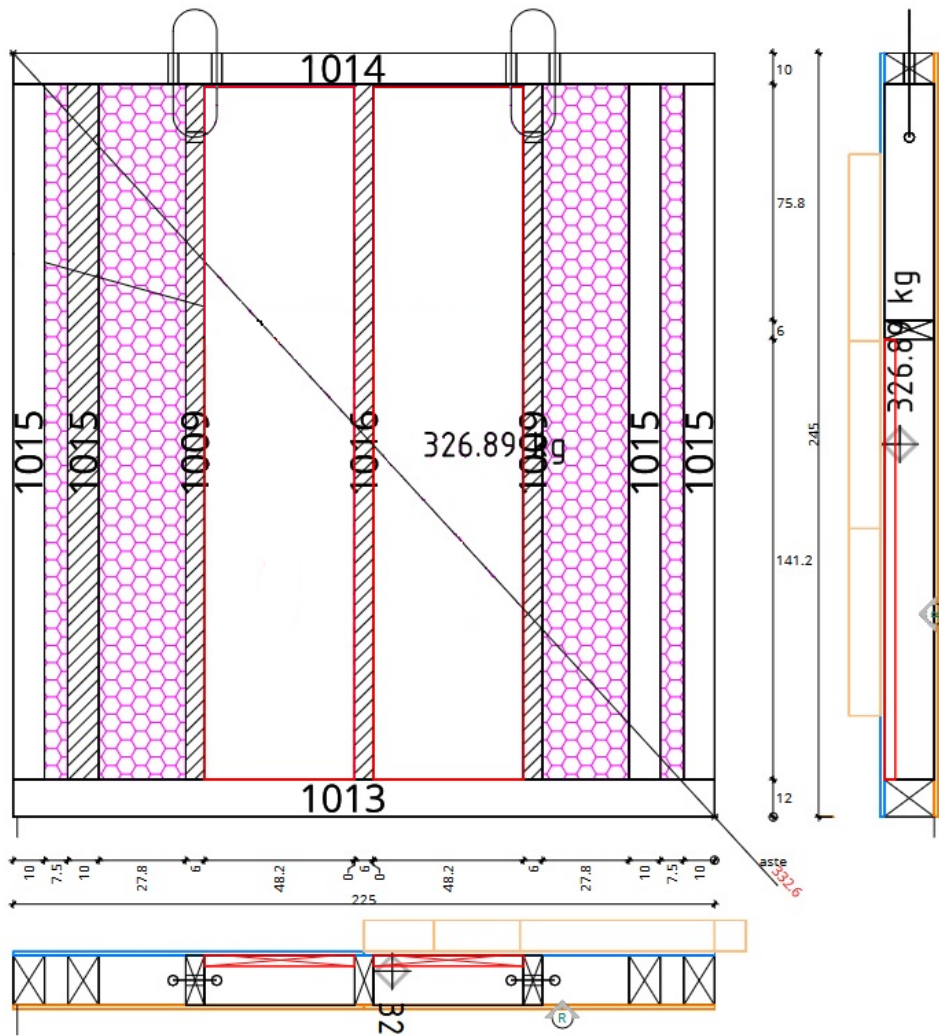


Figura 16 - ID.1 225x245 cm (BxH) con spazio di inserimento supercondensatori ed isolante laterale, per test sismici

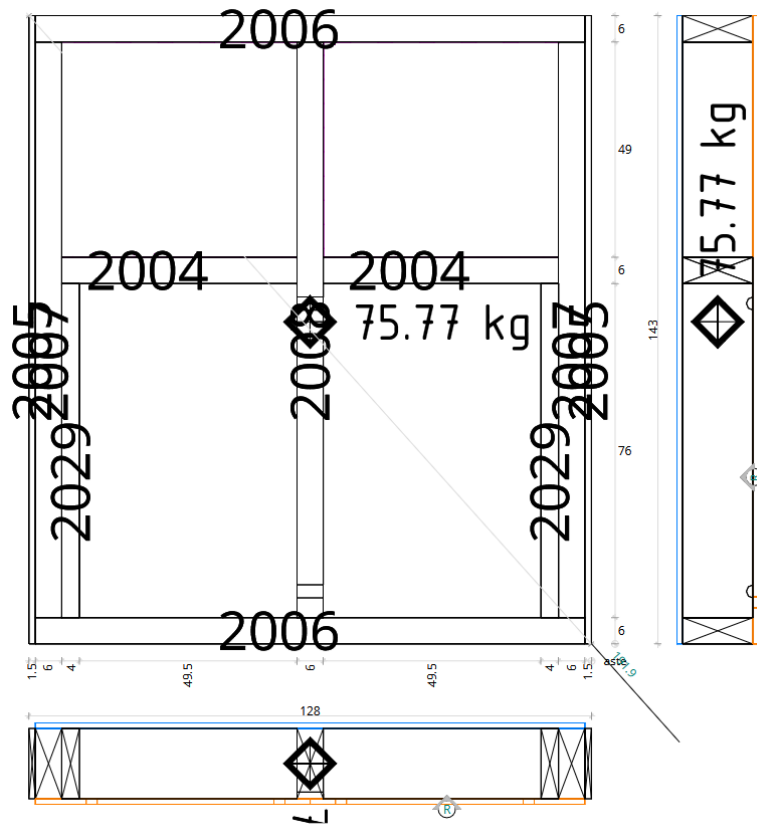


Figura 17 - ID.2 128x143 cm (BxH) per test termici ed acustici

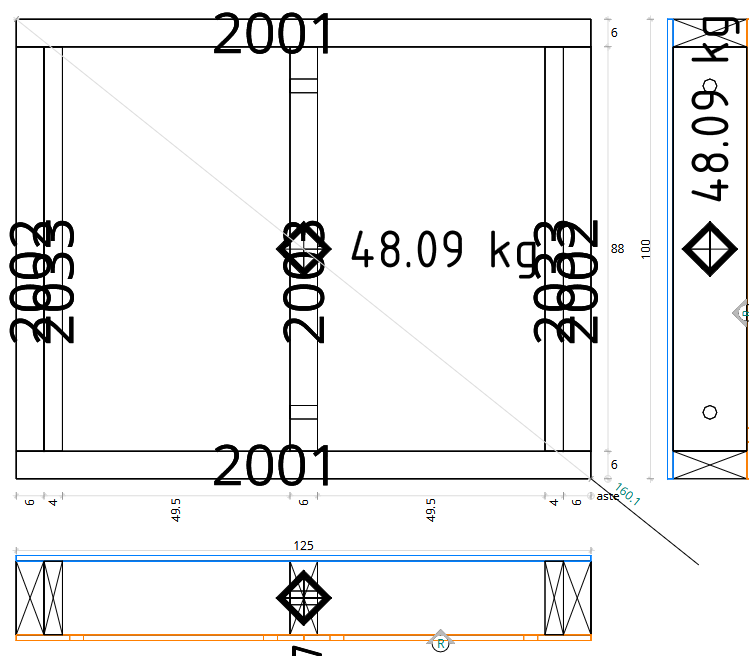


Figura 18 - ID.3 125x100 cm (BxH) per test di compatibilità elettromagnetica

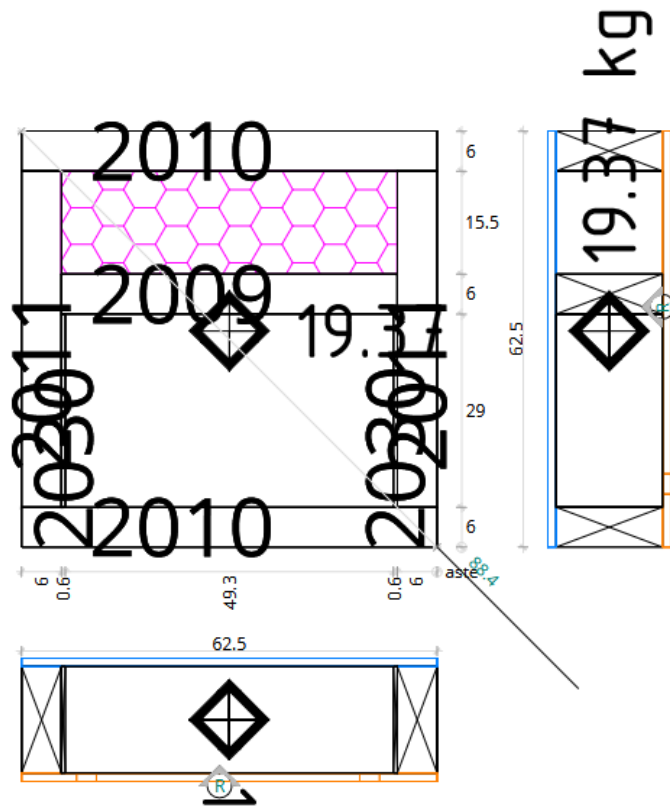


Figura 19 - ID.4 62,5x62,5 cm per test di isolamento e sicurezza

I campioni destinati alle prove acustiche e termiche, nonché quelli consegnati all'Università di Bologna (LA3.13 e LA3.14), sono stati realizzati con il lato interno rimovibile al fine di consentire sia l'inserimento dei supercondensatori che il loro collegamento elettrico (Figura 20).

La Figura 21 e la Figura 22 presentano i campioni imballati, pronti al trasporto e consegna.



Figura 20 - Telaio campione di parete e pannello lato interno rimovibile con predisposizione per passaggio di corrugati elettrici



Figura 21 - Vista dei campioni realizzati per le prove di caratterizzazione



Figura 22 - Campioni adattati al carico e trasporto

### 7.3.2 Modifiche per il campione relativo alle prove sismiche

Per le prove sismiche, è stato progettato un supporto a pianta quadrata per il campione. È infatti necessaria una struttura che sia autoportante e che sia sottoposta in maniera indipendente alle vibrazioni. La necessità di non usare strutture con lo scopo di reggere una singola parete è evitare l'utilizzo di fermi o sostegni che potrebbero falsare la prova. Una struttura a pianta quadrata replica la struttura di realizzazione di una stanza, utilizzando la stessa tipologia di unione tra le pareti. La presenza di un solaio permette il posizionamento di carichi statici simulanti la presenza di piani superiori.

Il campione prodotto è stato realizzato con dimensioni 248x248x248 cm, che corrisponde anche alla massima dimensione consentita per il trasporto su gomma senza incorrere in trasporti eccezionali. Questo ha permesso il totale assemblaggio del campione nella linea di produzione, con il successivo trasporto sino al luogo di test. In questo modo si è potuto collaudare nel suo massimo l'idea di struttura prefabbricata.

Per quanto riguarda l'integrazione degli elementi di accumulo, sono state realizzate due colonne di supercondensatori invece che la singola prevista, e su metà parete non è stato applicato il cappotto, che avrebbe potuto nascondere eventuali danni. Sono stati utilizzati simulacri di supercondensatori, di pari massa e dimensioni. Questo perché nella prova non è richiesto il funzionamento elettrico del sistema ma solo la parte di peso e solidità con la struttura. Questo ha permesso la riduzione del numero di supercondensatori necessari e di conseguenza la riduzione dei costi.

Realizzando la prova si è potuto così andare a valutare il comportamento della parete in una versione definibile pre-commerciale. Da Figura 23 a Figura 28 si evidenziano le fasi di assemblaggio delle pareti.



Figura 23 - Preparazione telaio per parete a doppia colonna di supercondensatori



Figura 24 - Assemblaggio parete con doppia colonna di supercondensatori

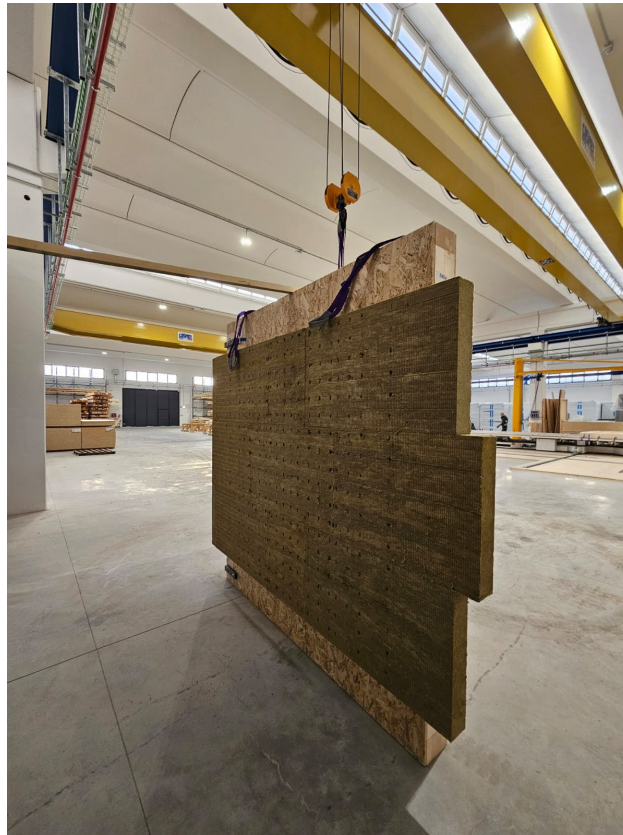


Figura 25 - Una delle pareti del blocco tridimensionale, con cappotto installato



Figura 26 - Assemblaggio delle pareti che costituiranno il blocco da prove sismiche



Figura 27 - Assemblaggio del blocco prefabbricato di pareti e caricamento su pianale per il trasporto



Figura 28 - Spostamento dal camion di trasporto dell'intero blocco prefabbricato e posizionamento sulle tavole vibranti

## 7.4 Caratterizzazione sismica, termica e acustica

La parete ad accumulo elettrico richiede un confronto con le pareti in versione standard per poterne verificare la validità nei vari ambiti comportamentali. In particolare, si rivela necessario valutare il comportamento in caso di sisma nonché le caratteristiche di isolamento termico ed acustico.

### 7.4.1 Sintesi degli obiettivi

La sintesi delle caratterizzazioni, con gli scopi e gli obiettivi che si desiderano verificare sono presentati in Tabella 3.

Caratterizzazione	Test facility	Scopo
<b>Sismica</b>	ENEA	Valutare che le masse dei condensatori, di peso molto superiore all'isolante normalmente inserito nelle pareti, non crei danni alla struttura stessa e quindi rischi per le persone.
<b>Termica</b>	UNIPG-DI	Confrontare il comportamento termico delle pareti con accumulo elettrico rispetto alle versioni standard. Quantificare il diverso grado di isolamento termico che la diversa stratigrafia della parete con accumulo presenta.
<b>Acustica</b>	UNIPG-DI	Confrontare il comportamento di isolamento acustico delle pareti con accumulo elettrico rispetto alle versioni standard. Quantificare il diverso grado di isolamento termico che la diversa stratigrafia della parete con accumulo presenta.

Tabella 3 - Tipologia di caratterizzazione con la specifica test facility

#### 7.4.2 Prove sismiche

La caratterizzazione sismica è stata realizzata presso la sede ENEA Casaccia, laboratorio Tavole Vibranti. Una volta posizionata la struttura prefabbricata sulla tavola vibrante, è stata fissata al piano e sono stati posizionati i marker necessari alla costellazione 3D di telecamere per il tracciamento degli spostamenti su tutte le superfici durante le prove. In seguito, la struttura prefabbricata è stata sottoposta a sismi di diverse tipologie ed intensità. Le figure da Figura 29 a Figura 37 mostrano il posizionamento del provino sulla tavola vibrante, l'installazione dei marker e degli accelerometri, mentre da Figura 38 a Figura 40 è mostrato il sistema di controllo che tramite telecamere acquisisce i dati di spostamento.



Figura 29 - Spostamento del blocco prefabbricato direttamente da camion a tavola vibrante

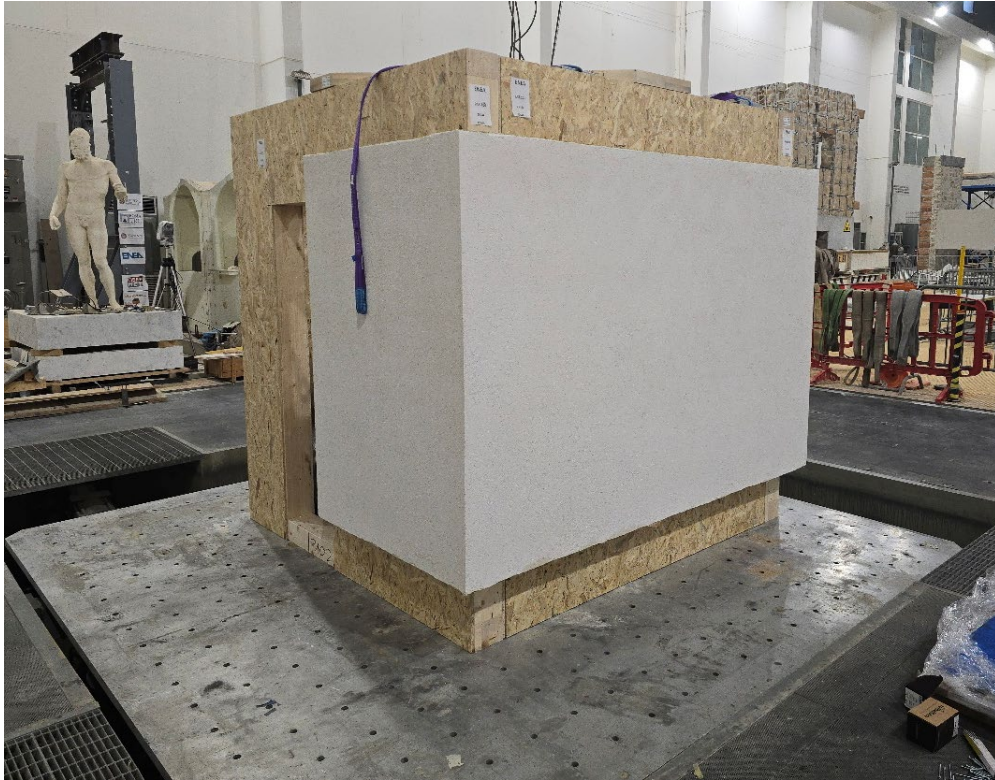


Figura 30 - Blocco prefabbricato posizionato su tavola vibrante



Figura 31 - Parete contenente le due colonne di supercondensatori, solo una colonna coperta da cappotto e target posizionati

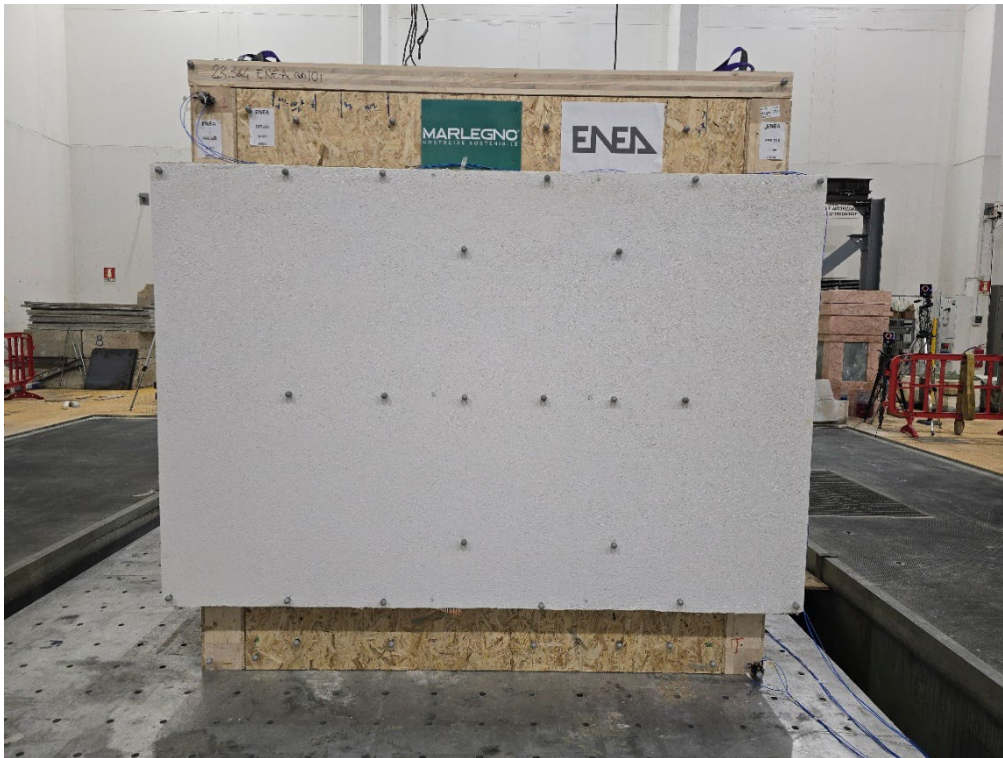


Figura 32 - Parete laterale con cappotto e target posizionati



Figura 33 - Vibrometro e target posizionati sulla parete laterale



Figura 34 - Particolare del vibrometro con target

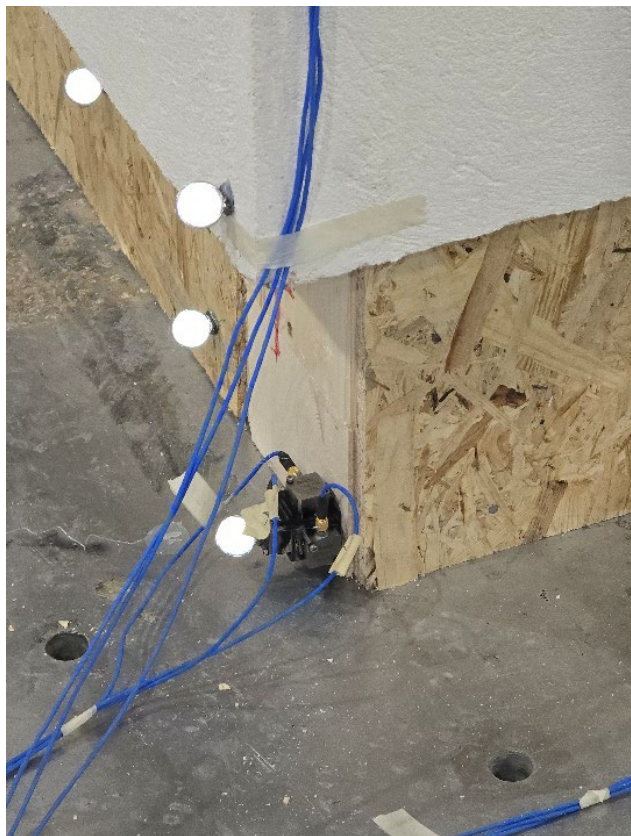


Figura 35 - Particolare dei target e del vibrometro illuminati dalle telecamere infrarossi



Figura 36 - Parete con supercondensatori e parete laterale senza cappotto con target illuminati da infrarossi



Figura 37 - Particolare parete con supercondensatori e target illuminati



Figura 38 - Visualizzazione dei target di controllo e configurazione analisi

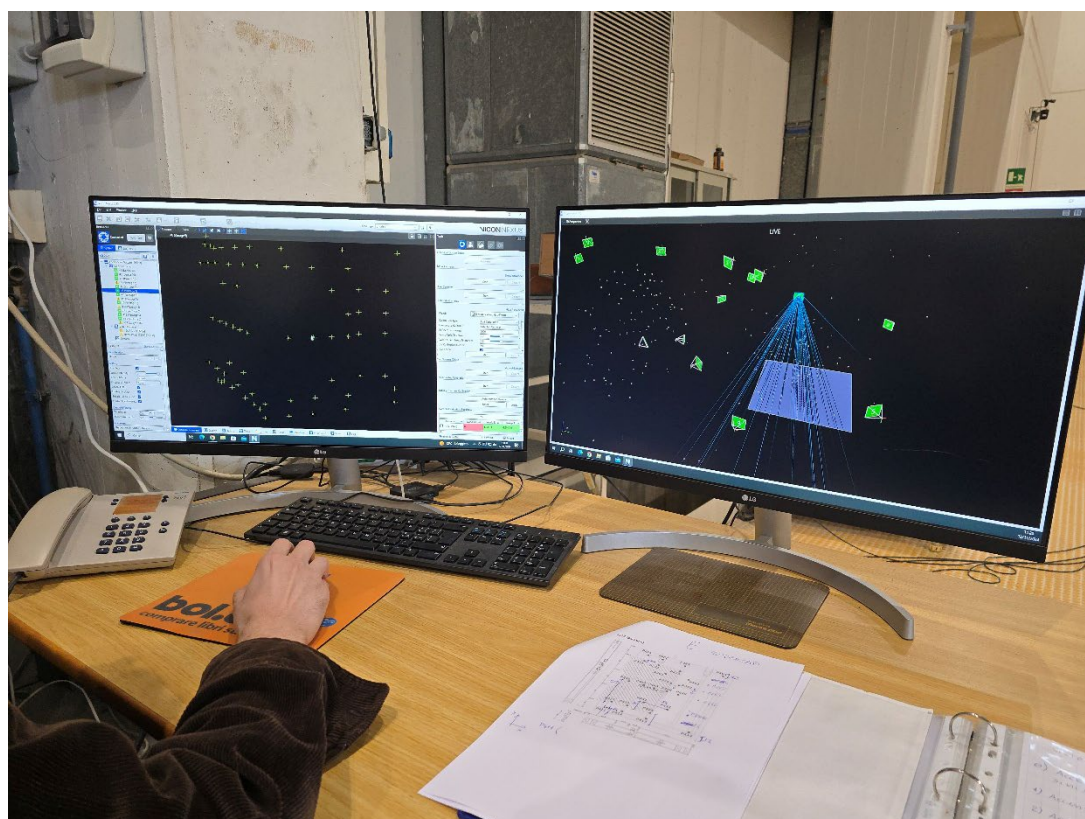


Figura 39 - Valutazione spostamento target di controllo

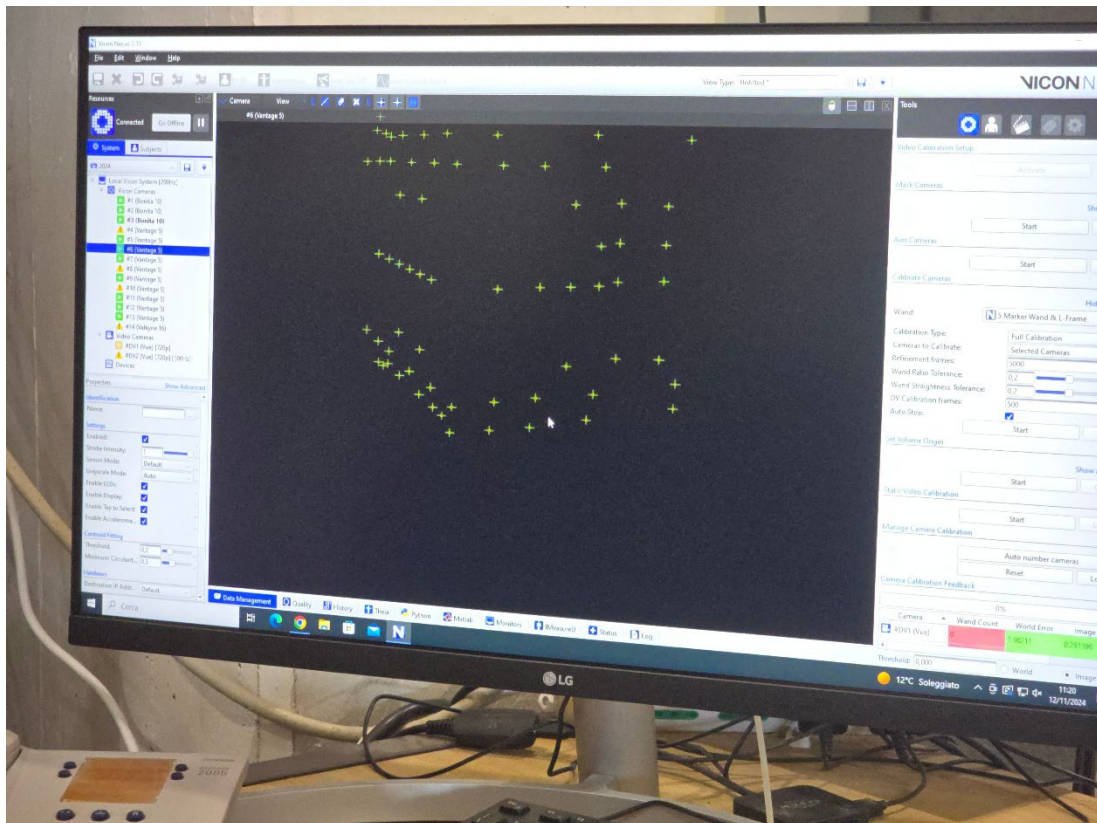


Figura 40 - Parete laterale con cappotto e parete con supercondensatori come analizzate tramite target

Sono state eseguite due diverse serie di prove sismiche, intervallate da prove random fondamentali per capire, in fase di post-processing, se il campione ha subito una modifica delle frequenze proprie, e quindi un danneggiamento. Dapprima è stato utilizzato il sisma registrato durante l'evento sismico di Amatrice (2016), scalando il segnale a passi del 20% fino ad arrivare al 200%. Al termine di questa prima sequenza di prove non sono stati rilevati danni visibili al campione. Quindi, al fine di comprendere se tale struttura fosse più sensibile ad un diverso contenuto in frequenza, è stata eseguita una seconda sequenza di test utilizzando un sisma sintetico avente un contenuto in frequenza da 10 Hz a 40 Hz ed una PGA da 0.2g a 1g. Anche al termine di questa seconda sequenza di prove non sono stati osservati danni al campione. La sequenza delle prove effettuate è riportata in Tabella 4.

<b>Sequenza</b>	<b>Sigla</b>	<b>Tipologia</b>	<b>Potenza</b>
<b>01</b>	Rnd 01	Random	
<b>02</b>	amt 20%	Amatrice	20%
<b>03</b>	Rnd 02	Random	
<b>04</b>	amt 40%	Amatrice	40%
<b>05</b>	Rnd 03	Random	
<b>06</b>	amt 60%	Amatrice	60%

<b>07</b>	Rnd 04	Random	
<b>08</b>	amt 80%	Amatrice	80%
<b>09</b>	Rnd 05	Random	
<b>10</b>	amt 100%	Amatrice	100%
<b>11</b>	Rnd 06	Random	
<b>12</b>	Rnd 06 _2	Random	
<b>13</b>	amt 80_2	Amatrice	80%
<b>14</b>	Rnd 07	Random	
<b>15</b>	amt 100%_2	Amatrice	100%
<b>16</b>	Rnd 08	Random	
<b>17</b>	amt 120%	Amatrice	120%
<b>18</b>	Rnd 09	Random	
<b>19</b>	amt 140%	Amatrice	140%
<b>20</b>	Rnd 10	Random	
<b>21</b>	amt 160%	Amatrice	160%
<b>22</b>	Rnd 11	Random	
<b>23</b>	amt 180%	Amatrice	180%
<b>24</b>	Rnd 12	Random	
<b>25</b>	amt 200%	Amatrice	200%
<b>26</b>	Rnd 13	Random	
<b>27</b>	amt100%_3REL	Amatrice	100%
<b>28</b>	Rnd 14	Random	
<b>29</b>	sint1040_02g	Sintetica	0.2G
<b>30</b>	Rnd 15	Random	
<b>31</b>	sint1040_04g	Sintetica	0.4G
<b>32</b>	Rnd 16	Random	
<b>33</b>	sint1040_06g	Sintetica	0.6G
<b>34</b>	Rnd 17	Random	
<b>35</b>	sint1040_08g	Sintetica	0.8G

<b>36</b>	Rnd 18	Random	
<b>37</b>	sint1040_10g	Sintetica	1.0G
<b>38</b>	Rnd 19	Random	

Tabella 4 - Sequenza di prove effettuate su tavola vibrante

Le analisi random hanno consentito di effettuare delle analisi SISO (Single-Input Single-Output) al fine di comprendere come le frequenze proprie del sistema si sono modificate durante l'esecuzione dei test. In particolare, le Figura 41 e Figura 42 mostrano l'analisi SISO relativa ai segnali in direzione X e Y fra l'accelerometro alla base della tavola e l'accelerometro 1, mentre le Figura 43 e Figura 44 mostrano i risultati ottenuti per l'accelerometro 2.

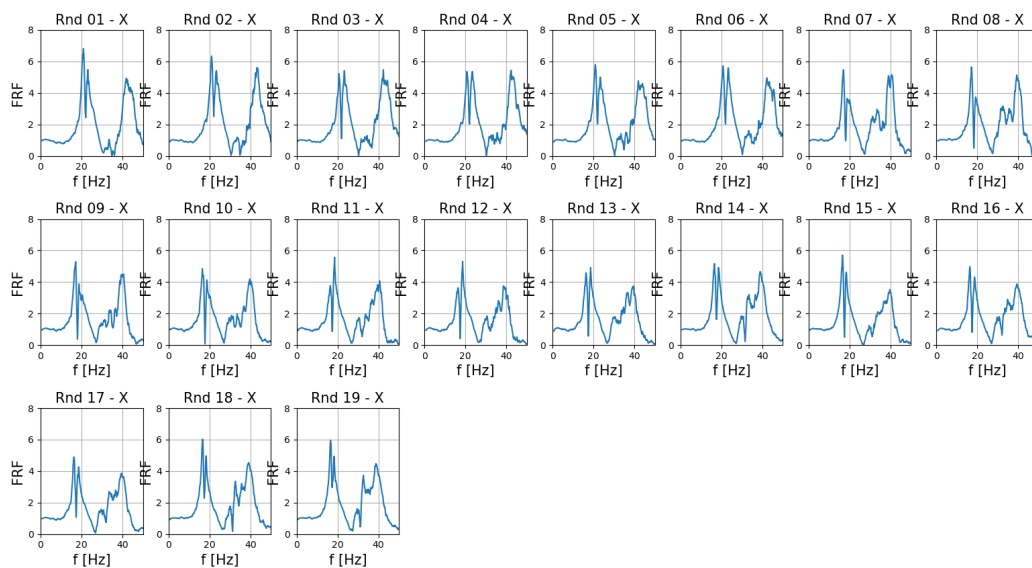


Figura 41 - Analisi SISO in direzione X: accelerometro 1

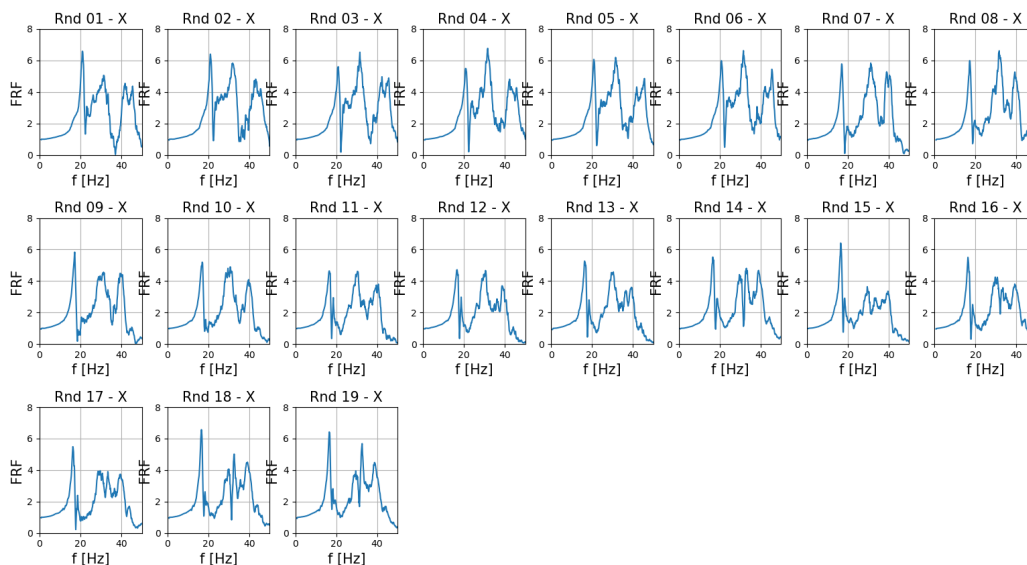


Figura 42 - Analisi SISO in direzione X: accelerometro 2

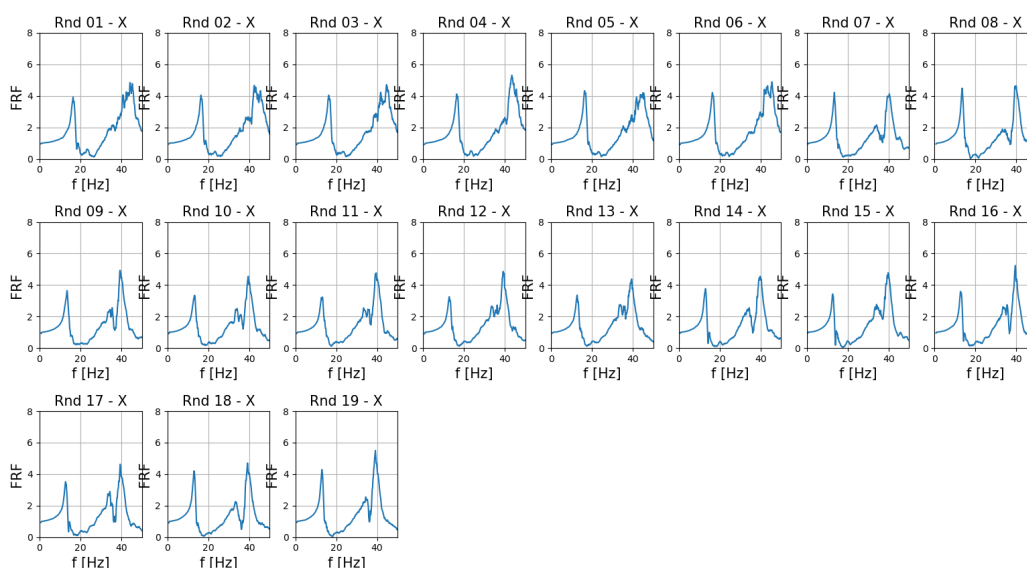


Figura 43 – Analisi SISO in direzione Y: accelerometro 1

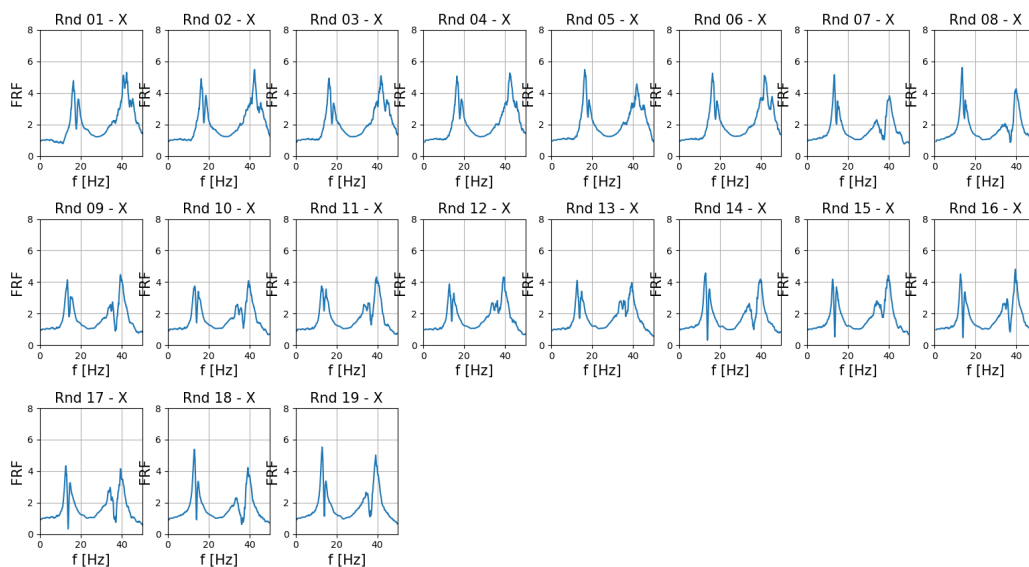


Figura 44 – Analisi SISO in direzione Y: accelerometro 2

I risultati ottenuti dalle SISO sia in direzione X che in direzione Y mostrano una lieve diminuzione della prima frequenza propria del sistema. Tale seppur lieve diminuzione delle frequenze proprie del sistema in entrambe le direzioni suggerisce una modesta perdita di rigidità della struttura, che potrebbe essere associata ad un piccolo danneggiamento, oppure anche ad un aggiustamento delle connessioni. Data la scala del provino si ritiene che questo comportamento possa manifestarsi anche considerando le installazioni reali.

### 7.4.3 Prove termiche

La caratterizzazione termica permette di misurare la trasmittanza termica della parete con i moduli di supercondensatori e confrontarne il valore sia rispetto alla parete in versione standard con il materiale isolante, sia rispetto a valori di altri materiali usati comunemente come i laterizi.

Le prove sono state eseguite presso i laboratori del Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia, dove è presente un sistema di misura hot box, conforme alla normativa, specifico per calcolare la trasmittanza.

La struttura comprende due camere climatiche, una calda e una fredda, ed un anello di supporto per il campione di misura (Figura 45 - Figura 47). Il controllo termico avviene con sistemi differenti: nella camera calda una serpentina di filo caldo porta la temperatura a 20 °C, mentre nella camera fredda una macchina frigorifera a compressione abbassa la temperatura, regolata poi con una serpentina a filo caldo per un controllo più preciso.



Figura 45 - Vista esterna delle due camere climatiche aperte

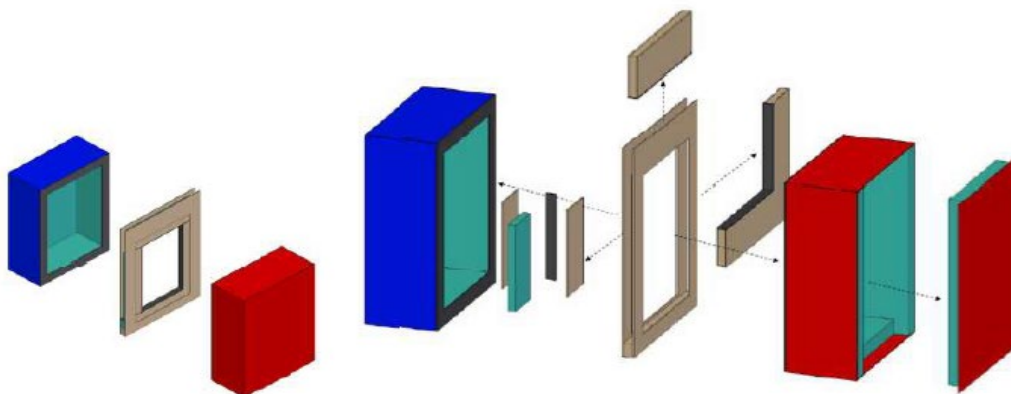
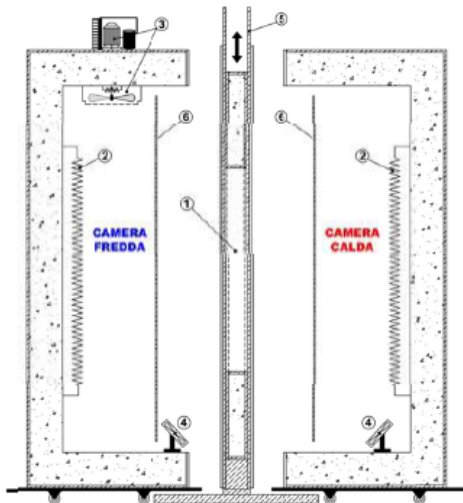


Figura 46 - Modello 3D del sistema hot box



**LEGENDA:**

- 1 - posizionamento campione di prova
- 2 - sistema di riscaldamento
- 3 - sistema di raffreddamento
- 4 - sistema di ventilazione
- 5 - struttura di supporto
- 6 - schermo radiativo

Figura 47 - Sezione verticale del sistema hot box

La temperatura è monitorata da 94 termocoppie interne, divise equamente nelle due camere (Figura 48, Figura 49, Tabella 5) e da 8 termoresistenze esterne.

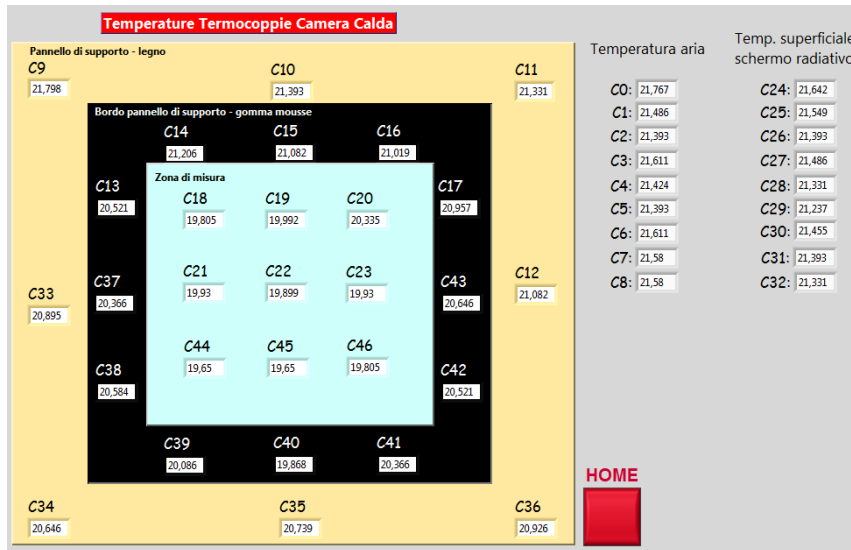


Figura 48 - Posizionamento delle termocoppie in camera calda

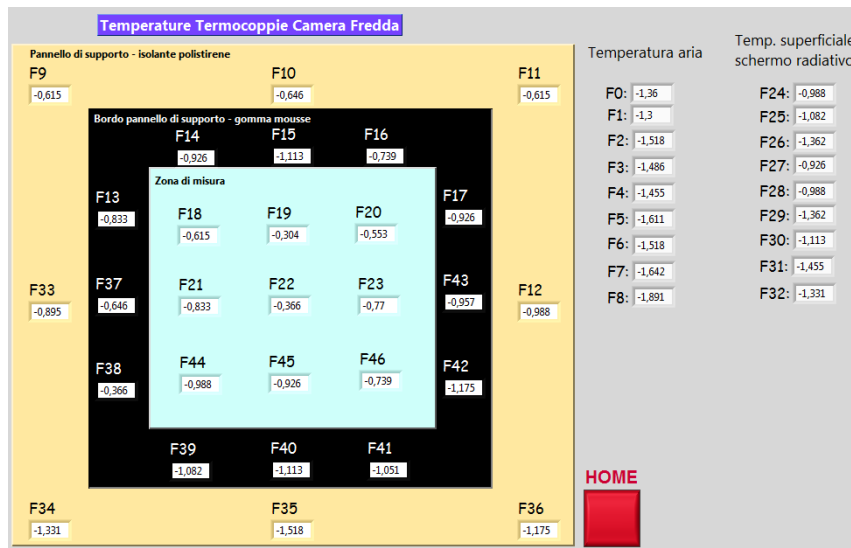


Figura 49 - Posizionamento delle termocoppie in camera fredda

ZONA DI APPLICAZIONE	NUMERO DI TERMOCOPPIE
Temperatura dell'aria	9
Schermo radiativo	9
Pannello di supporto	8
Bordo pannello di supporto	12
Pannello di calibrazione	9
<b>TOTALE</b>	<b>47</b>

Tabella 5 - Posizionamento delle termocoppie nella camera climatica

Per un controllo aggiuntivo vengono usati dei termoflussimetri (Figura 50), mentre la trasmittanza termica viene calcolata misurando la potenza introdotta in camera calda e il flusso termico attraverso il campione.



Figura 50 - Termoflussimetro

Per una misurazione efficace, è stata eseguita una sessione di misura sia sulla parete equipaggiata con un materiale isolante tradizionale, sia sulla stessa parete dopo la rimozione dell'isolante interno e la sua sostituzione con i supercondensatori. Nelle Figura 51 - Figura 55 è visibile l'installazione su hot box.



Figura 51 - Vista del campione tradizionale lato camera calda prima dell'inserimento dell'isolante



Figura 52 - Vista del campione tradizionale lato camera calda dopo l'inserimento dell'isolante e la chiusura finale in cartongesso



Figura 53 - Vista del campione lato camera calda con l'inserimento dei sistemi di accumulo



Figura 54 - Vista del campione con sistemi di accumulo lato camera calda dopo l'inserimento dell'isolante e la chiusura finale in cartongesso



Figura 55 - Vista del campione con sistemi di accumulo lato camera fredda

I risultati delle prove in regime stazionario in hot box sono riportati di seguito:

- Campione tradizionale con materiale isolante: 0,19 W/m<sup>2</sup>K
- Campione con sistemi di accumulo: 0,26 W/m<sup>2</sup>K

È evidente come le prestazioni della parete in regime stazionario non subiscano un degrado significativo quando una parte del materiale isolante viene sostituita con i supercondensatori.

Oltre alla misura sperimentale della trasmittanza è stata effettuata anche una stima numerica utilizzando la stratigrafia riportata nella Tabella 6.

Descrizione dello strato	$s$ [mm]	$\lambda$ [ $\frac{W}{mK}$ ]	$R$ [ $\frac{m^2K}{W}$ ]
<b>Cartongesso in lastre</b>	12.5	0.21	0.06
<b>Barriera al vapore</b>	1.2	0.15	0.01
<b>Camera debolmente ventilata</b>	40.0	0.556	0.07
<b>Supercondensatori</b>	120.0	0.23	0.52
<b>Pannelli di legno</b>	12.5	0.15	0.08
<b>Isolante esterno (cappotto)</b>	80.0	0.026	3.08

Tabella 6 - Stratigrafia per la verifica igrometrica

Le caratteristiche termofisiche degli strati mostrati in tabella portano ad ottenere una trasmittanza della parete pari a  $0.25 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Tale stratigrafia è stata utilizzata anche per la verifica igrometrica della struttura, considerandola ubicata in una località ricadente in zona climatica E. I risultati ottenuti mostrano che la struttura non è soggetta a fenomeni di condensa interstiziale (mese più critico: Gennaio, Figura 56).

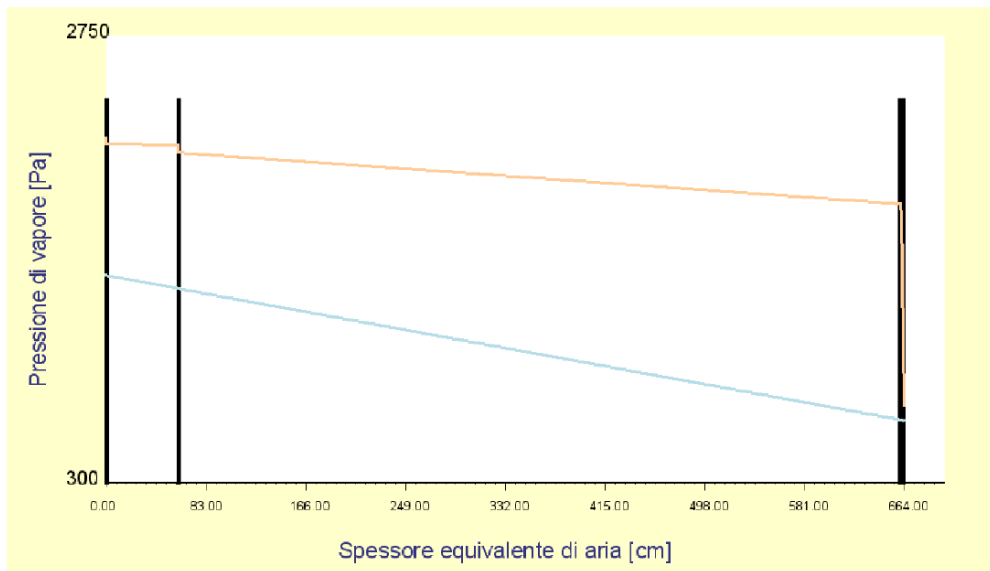


Figura 56 – Pressione di vapore in funzione dello spessore equivalente di aria

Una volta completate le prove termiche in regime statico, sono state effettuate le prove in regime dinamico, facendo variare la temperatura nella hot box a cicli giornalieri.

In Figura 57 è riportato l'andamento della temperatura in camera fredda (oscillazione sinusoidale, con periodo 24 ore e semiampiezza  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ), insieme al flusso termico specifico risultante in camera calda, per il campione tradizionale.

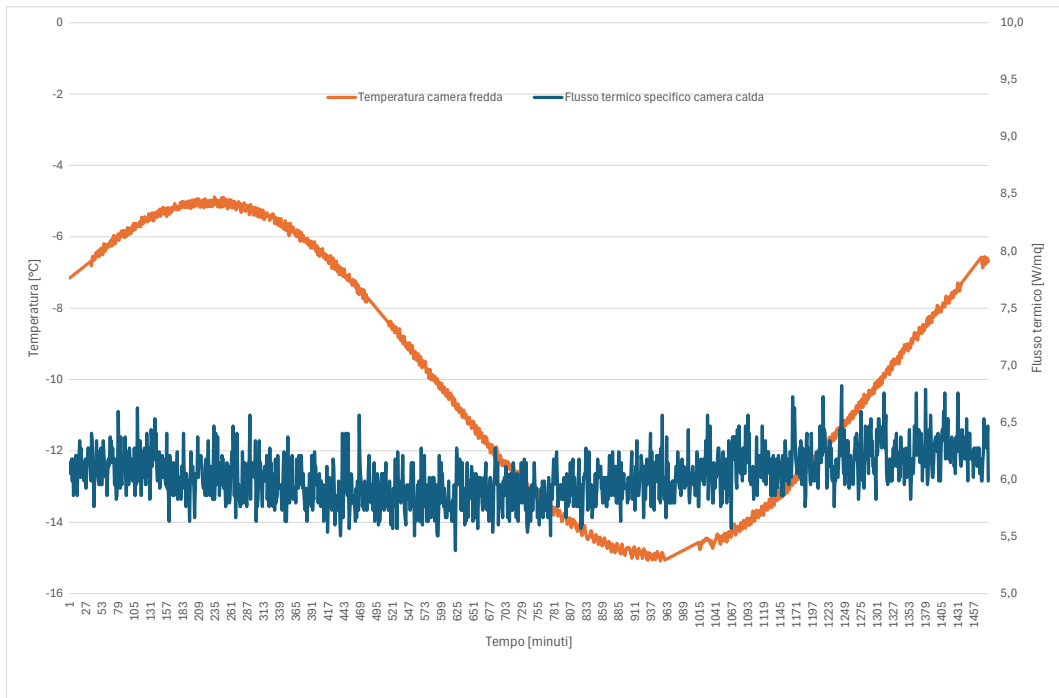


Figura 57 - Andamento della temperatura e del flusso termico nei lati opposti per il campione tradizionale

Le oscillazioni a media frequenza del flusso termico sono marcate. È stata quindi estratta l'armonica principale con periodo di 24 ore e rimossa la componente stazionaria. Lo stesso approccio è stato applicato alla temperatura, riportando l'oscillazione intorno al valor medio nullo (Figura 58).

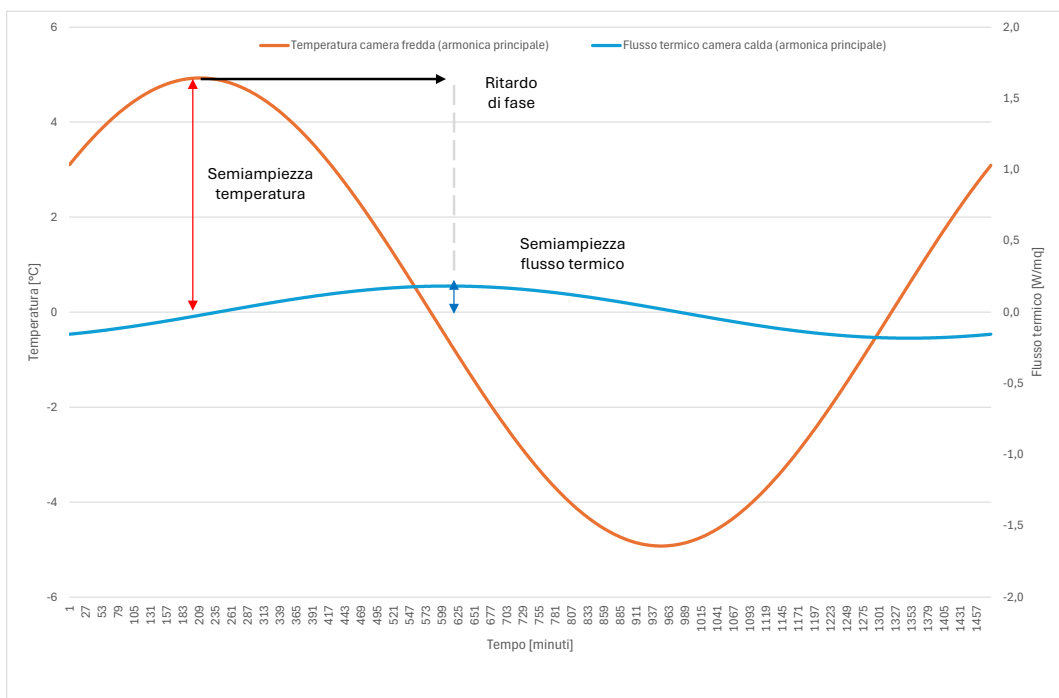


Figura 58 - Andamento della temperatura e del flusso termico nei lati opposti per il campione tradizionale (armoniche principali e normalizzazione per il regime dinamico)

Dal grafico si può osservare il rapporto tra le semiampiezze del flusso termico (pari a circa il 5%), così come il rispettivo ritardo di fase (circa 9 ore).

Le prove sono state poi ripetute identicamente per il campione con sistemi di accumulo; i relativi risultati sono riportati nelle Figura 59, Figura 60 e in Tabella 7.

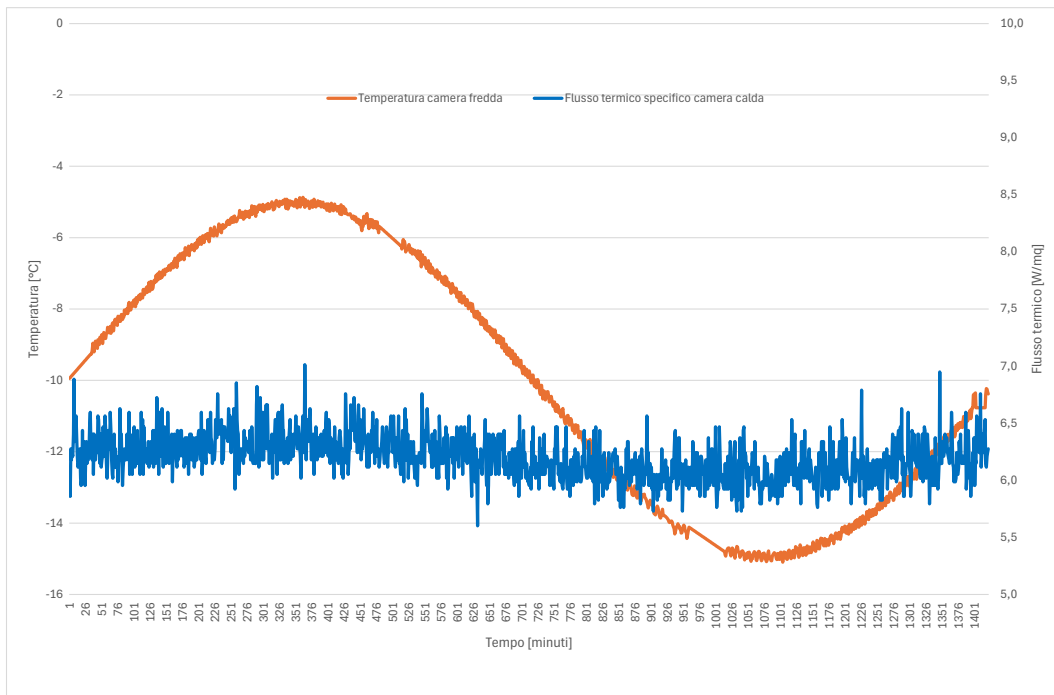


Figura 59 - Andamento della temperatura e del flusso termico nei lati opposti per il campione con sistemi di accumulo

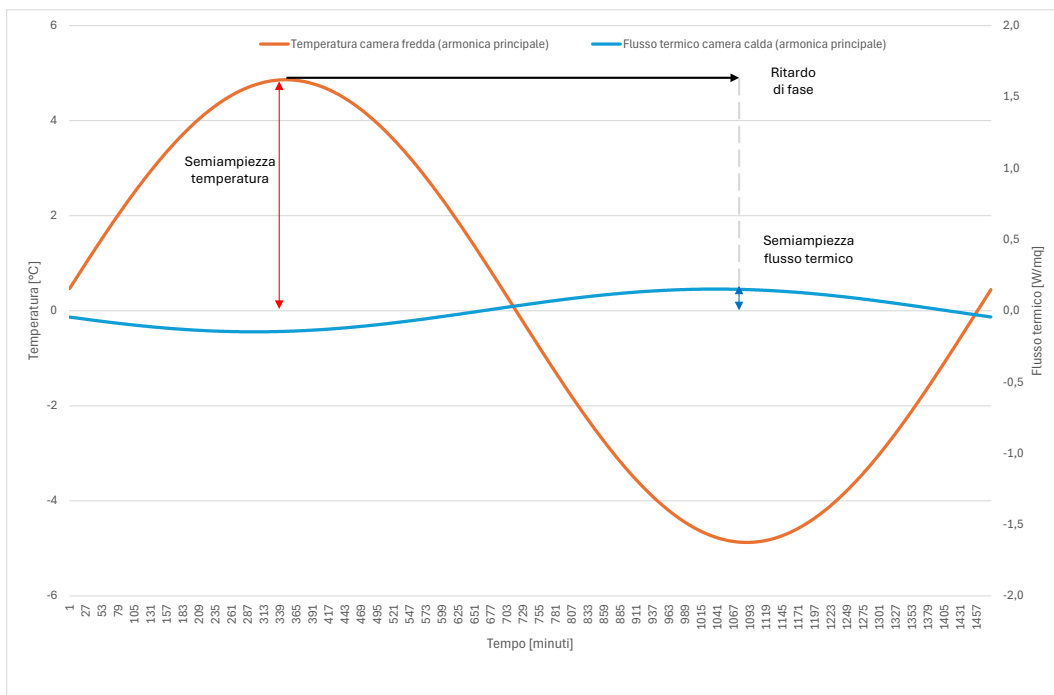


Figura 60 - Andamento della temperatura e del flusso termico nei lati opposti per il campione con sistemi di accumulo (armoniche principali e normalizzazione per il regime dinamico)

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>MOD</b>	<b>ARG</b>
<b>Trasmittanza termica periodica (W/m<sup>2</sup>K)</b>	-0.028	-0.007	0.029	-12.875

Tabella 7 - Trasmittanza termica periodica del campione con sistemi di accumulo



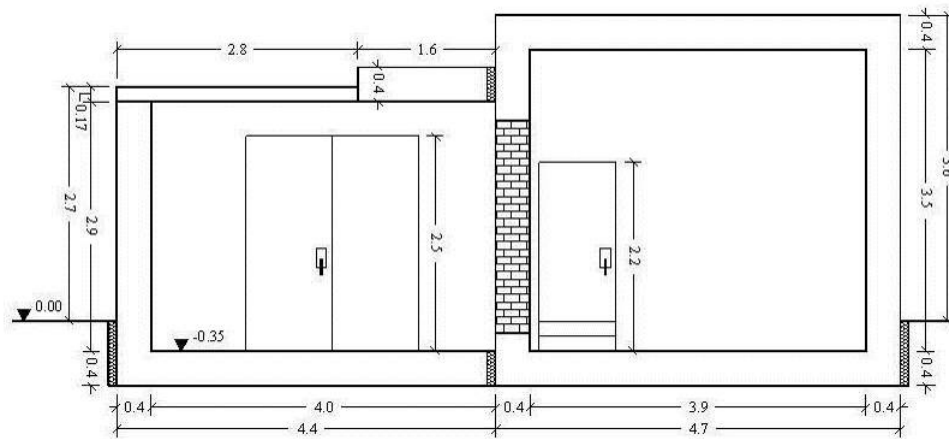


Figura 62 - Sezione longitudinale delle camere riverberanti accoppiate

Il test è stato condotto misurando in contemporanea i livelli di pressione sonora sia nella camera emittente (dove è posta la sorgente sonora che emette rumore) che nella camera ricevente (in bande di un terzo d'ottava tra 100 e 5000 Hz).

Sono state selezionate 5 posizioni ottimali per la sorgente, in base al volume della camera, con 5 posizioni microfoniche in ciascuna camera. Viene inoltre misurato il rumore di fondo nella camera ricevente per escludere interferenze esterne.

Da Figura 63 a Figura 67 sono riportate le posizioni della sorgente e dei microfoni utilizzate.

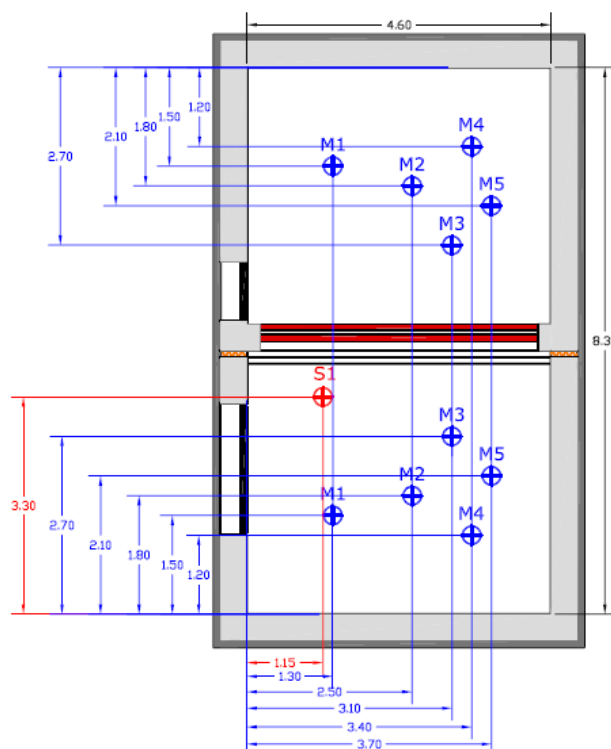


Figura 63 - Posizione numero 1 della sorgente sonora (in rosso) con i relativi microfoni (in blu)

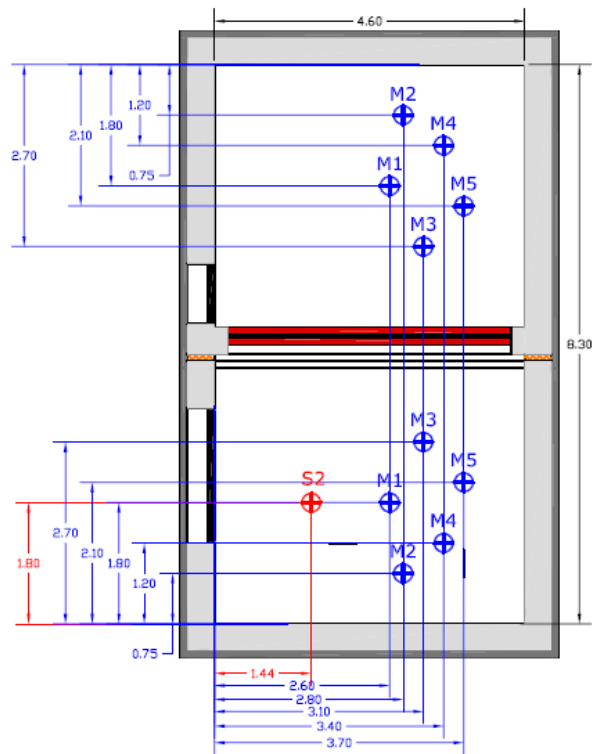


Figura 64 - Posizione numero 2 della sorgente sonora (in rosso) con i relativi microfoni (in blu)

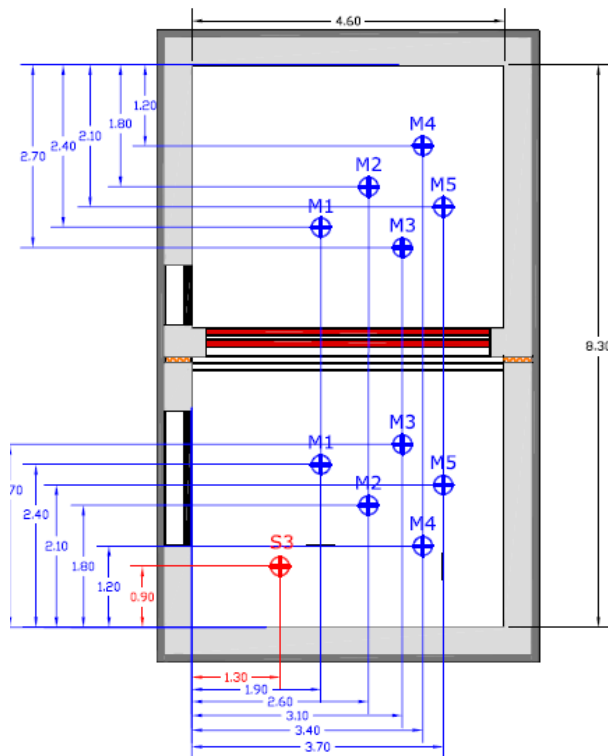


Figura 65 - Posizione numero 3 della sorgente sonora (in rosso) con i relativi microfoni (in blu)

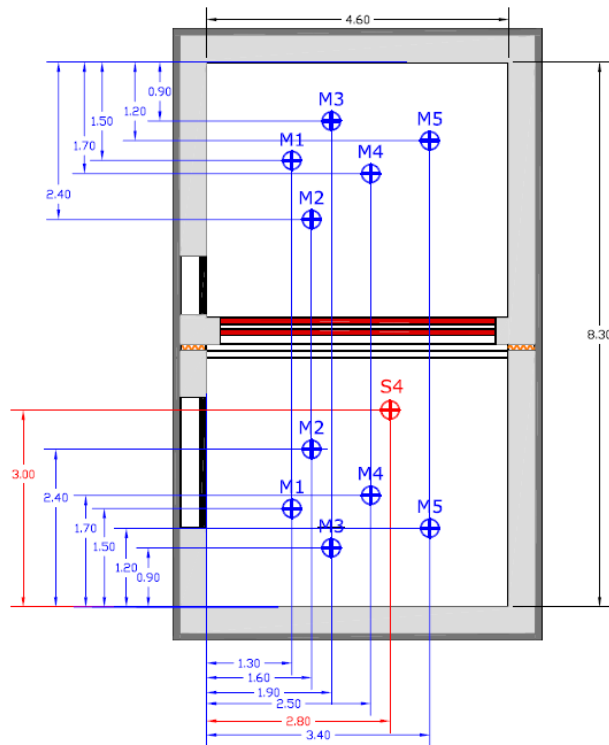


Figura 66 - Posizione numero 4 della sorgente sonora (in rosso) con i relativi microfoni (in blu)

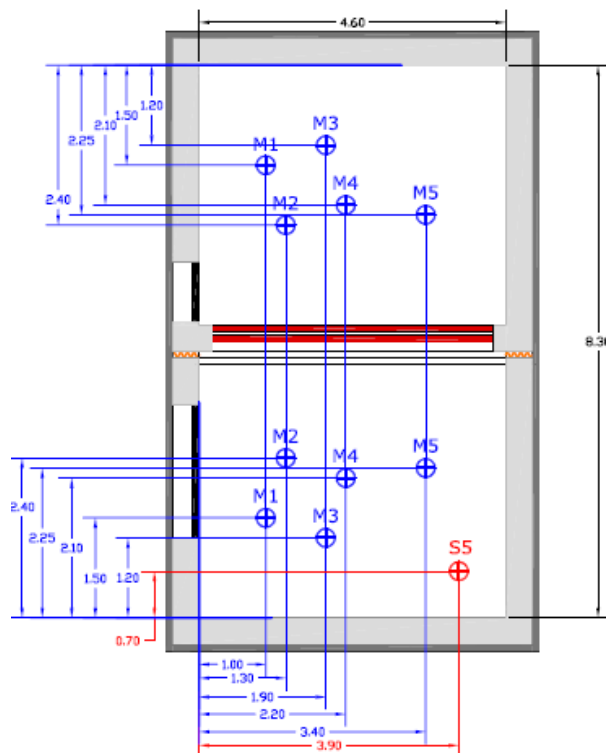


Figura 67 - Posizione numero 5 della sorgente sonora (in rosso) con i relativi microfoni (in blu)

Il divisorio tra le camere, con l'alloggiamento per i campioni, deve avere un fonoisolamento superiore a quello del campione testato. Per questo è stato realizzato con due file di Lecablocco Fonoisolante (20×20×25 cm), posate con il lato lungo allineato, per uno spessore

totale di 40 cm. La parete è stata intonacata su entrambi i lati. Le caratteristiche degli elementi utilizzati sono riportati in Tabella 8.

#### CARATTERISTICHE TECNICHE DI LECABLOCCO FONISOLENTE \*

Spessore	s	≥ 20	cm
Massa volumica del calcestruzzo di argilla espansa Leca	$\gamma$	≤ 1200 ÷ 1400	kg/m <sup>3</sup>
Percentuale di foratura	$\phi$	≤ 25	%
Indice di valutazione del potere fonoisolante	R <sub>w</sub>	≥ 54	dB
Resistenza caratteristica a compressione del blocco nella direzione dei carichi verticali	f <sub>bk</sub>	≥ 5	N/mm <sup>2</sup>
Resistenza caratteristica a compressione del blocco nella direzione dei carichi orizzontali nel piano della muratura	f'bk	≥ 1,5	N/mm <sup>2</sup>
Trasmittanza termica della parete interna intonacata (sp. blocco ≥25 cm)	U	≤ 0,8	W/m <sup>2</sup> K
Calore specifico	c <sub>p</sub>	1000	J/kgK
Permeabilità al vapore acqueo	$\delta$	25 · 10 <sup>-12</sup>	kg/smPa
Resistenza alla diffusione del vapore	$\mu$	8	-
Resistenza al fuoco	REI	≥ 180	min

\* I valori riportati sono indicativi. I dati dettagliati possono essere richiesti ai singoli produttori associati.

Tabella 8 - Caratteristiche degli elementi utilizzati per la parete divisoria dichiarata dalla casa produttrice

Per la tipologia di parete utilizzata è stato stimato un valore dell'indice del potere fonoisolante R<sub>w</sub> pari a circa 60 dB, nettamente superiore a quello delle porte oggi in commercio (solitamente R<sub>w</sub> < 45 dB).

Da Figura 68 a Figura 71 sono riportate le immagini relative alle prove di valutazione del potere fonoisolante del campione tradizionale.



Figura 68 - Vista del campione tradizionale con lana di roccia, prima della finitura interna



Figura 69 - Vista del campione tradizionale con lana di roccia, chiusura interna



Figura 70 - Vista del campione tradizionale con lana di roccia, chiusura interna (camera ricevente)



Figura 71 - Vista del campione tradizionale con lana di roccia, chiusura esterna (camera emittente)

Nelle Figura 72 e Figura 73 sono riportate le immagini relative alle prove di valutazione del potere fonoisolante del campione con sistemi di accumulo.



Figura 72 - Vista del campione con sistemi di accumulo, prima della finitura interna (camera ricevente)



Figura 73 - Vista del campione con sistemi di accumulo, chiusura esterna (camera emittente)

In Tabella 9 sono indicati i risultati relativi al campione tradizionale, mentre in Figura 74 è riportato il relativo grafico del potere fonoisolante.

<b>frequenza [Hz]</b>	<b>L1 [dB]</b>	<b>L2 [dB]</b>	<b>T60 [s]</b>	<b>Lfondo [dB]</b>	<b>R [dB]</b>
<b>100</b>	99,30	67,50	3,020	25,00	29,0
<b>125</b>	106,90	72,20	2,913	15,40	31,8
<b>160</b>	94,90	59,10	1,733	16,10	30,6
<b>200</b>	96,00	53,20	1,506	30,10	37,0
<b>250</b>	96,80	53,10	1,362	14,40	37,5
<b>315</b>	95,20	47,20	1,302	17,90	41,6
<b>400</b>	95,10	46,70	1,227	13,90	41,7
<b>500</b>	95,10	44,50	1,187	11,00	43,8
<b>630</b>	95,40	44,10	1,167	20,00	44,4
<b>800</b>	96,10	42,40	1,191	5,70	46,9
<b>1000</b>	95,20	39,80	1,208	6,50	48,7
<b>1250</b>	96,10	39,30	1,339	3,00	50,5
<b>1600</b>	97,30	39,20	1,243	2,70	51,5

<b>2000</b>	97,40	37,90	1,248	4,20	52,9
<b>2500</b>	97,50	36,40	1,186	4,10	54,3
<b>3150</b>	95,90	34,40	1,121	4,60	54,4
<b>4000</b>	96,60	33,70	1,029	5,40	55,5
<b>5000</b>	92,70	28,10	0,958	6,20	56,8

Tabella 9 - Risultati delle misure effettuate sul campione tradizionale (lana di roccia)

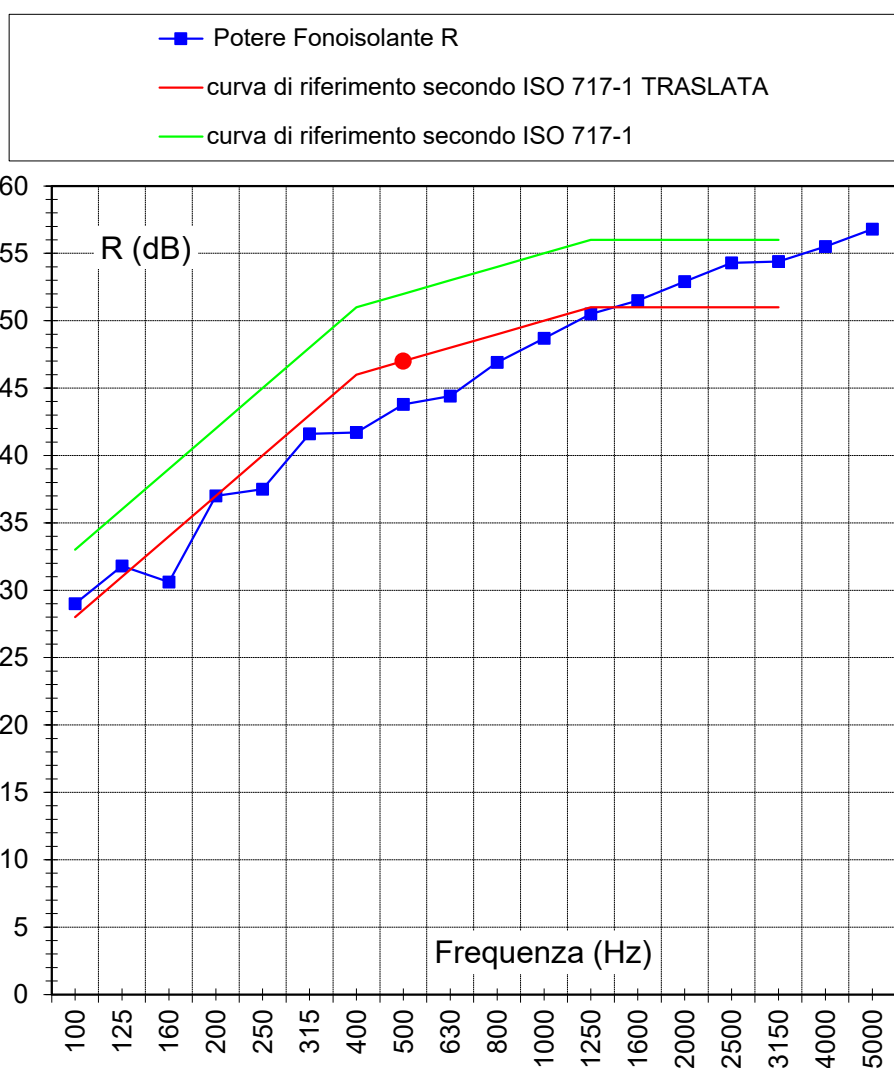


Figura 74 - Andamento del potere fonoisolante R in bande di un terzo d'ottava tra 100 e 5000 Hz per il campione tradizionale

In Tabella 10 sono indicati i risultati relativi al campione con sistemi di accumulo, mentre in Figura 75 è riportato il relativo grafico del potere fonoisolante.

In Figura 76 è riportato il confronto fra i poteri fonoisolanti delle due pareti.

<b>frequenza [Hz]</b>	<b>L1 [dB]</b>	<b>L2 [dB]</b>	<b>T60 [s]</b>	<b>Lfondo [dB]</b>	<b>R [dB]</b>
<b>100</b>	100,50	65,00	3,020	25,50	29,0
<b>125</b>	105,90	67,60	2,913	19,50	31,8
<b>160</b>	95,10	55,20	1,733	26,70	30,6
<b>200</b>	95,30	51,30	1,506	29,20	37,0
<b>250</b>	97,00	52,30	1,362	13,70	37,5
<b>315</b>	95,10	47,90	1,302	13,40	41,6
<b>400</b>	95,10	48,00	1,227	13,80	41,7
<b>500</b>	95,30	45,10	1,187	9,20	43,8
<b>630</b>	95,50	44,70	1,167	16,10	44,4
<b>800</b>	96,20	43,40	1,191	4,80	46,9
<b>1000</b>	95,10	40,20	1,208	5,40	48,7
<b>1250</b>	96,20	39,40	1,339	1,80	50,5
<b>1600</b>	97,30	39,30	1,243	2,10	51,5
<b>2000</b>	97,60	37,80	1,248	4,10	52,9
<b>2500</b>	97,50	36,30	1,186	3,90	54,3
<b>3150</b>	95,90	34,40	1,121	4,60	54,4
<b>4000</b>	96,90	34,00	1,029	5,40	55,5
<b>5000</b>	100,50	28,20	0,958	6,30	56,8

Tabella 10 - Risultati delle misure effettuate sul campione con sistemi di accumulo

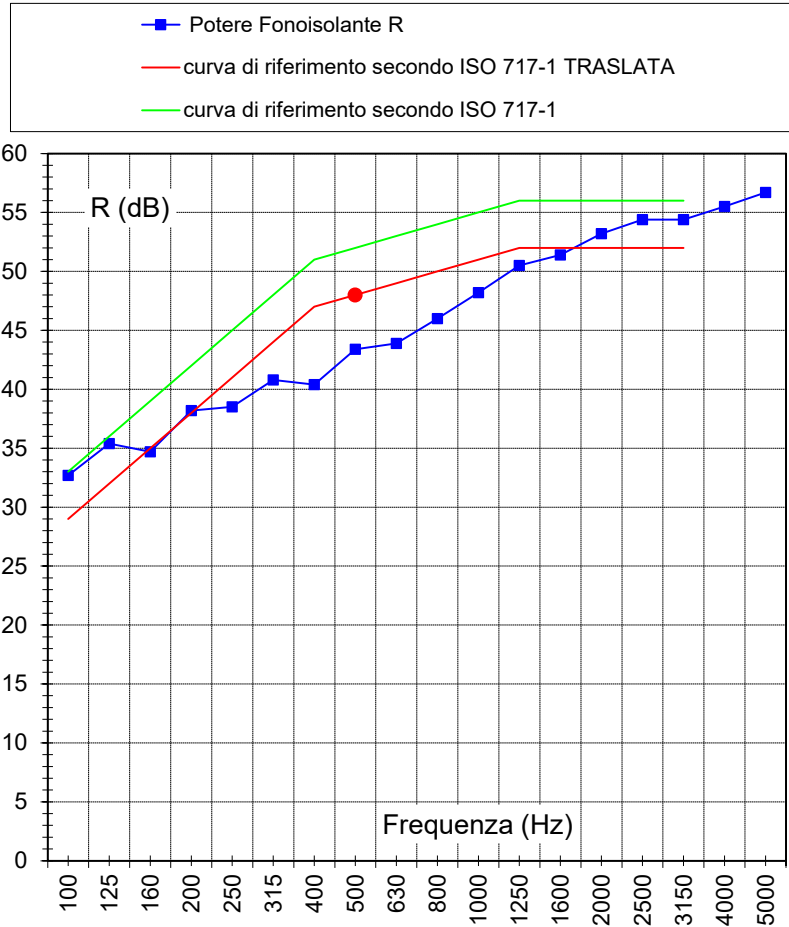


Figura 75 - Andamento del potere fonoisolante R in bande di un terzo d'ottava tra 100 e 5000 Hz per il campione con sistemi di accumulo

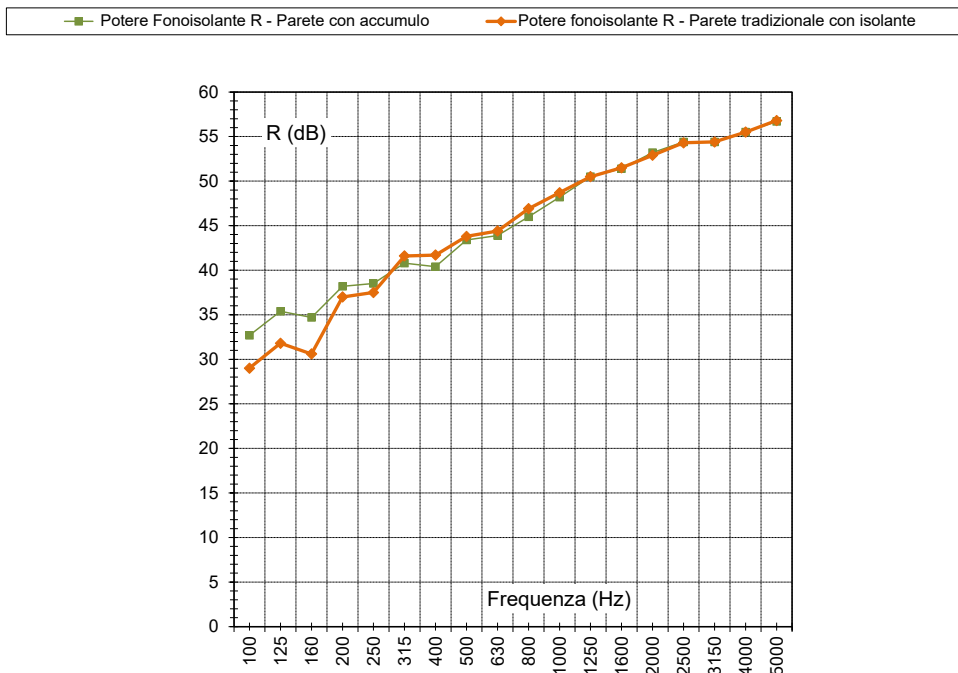


Figura 76 - Confronto dell'andamento del potere fonoisolante R in bande di un terzo d'ottava tra 100 e 5000 Hz per il campione con sistemi di accumulo e il campione tradizionale

Si evidenzia come l'aggiunta di massa generi un miglioramento delle performance di isolamento acustico, in particolare nello spettro relativo alle basse frequenze, seppure l'indice  $R_w$  complessivo mostri una crescita di entità piuttosto limitata (1 dB).

## 8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

All'interno della LA3.12 il capitolato vigente non prevede consulenze, né sono state utilizzate nel corso dello svolgimento della LA.

## 9 Pubblicazioni scientifiche

I risultati dell'attività di ricerca descritta nelle sezioni precedenti saranno oggetto delle seguenti pubblicazioni scientifiche:

- G. Baldinelli, S. Beozzo, M. Ricci, F. Scrucca, P. Sdringola, G. Murtaza, *Sound insulation properties of walls equipped with energy storage devices*, Forum Acusticum Euronoise 2025, 11th Convention of the European Acoustics Association, Malaga, Spagna, 23-26 giugno 2025.

## 10 Eventi di disseminazione

È stata effettuata la seguente attività di disseminazione:

- 27 novembre 2024. Convegno conclusivo del Progetto 1.5 del Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024 della Ricerca di Sistema elettrico nazionale (RdS) - Edifici ad alta efficienza per la transizione energetica - Risultanze dei WP3 e WP4, Roma. *“Studio e sviluppo di tamponature prefabbricate in legno con accumulo energetico integrato”* (S. Beozzo).

Come indicato nel capitolato vigente, al termine delle caratterizzazioni e dell'analisi dei dati si prevede la partecipazione a fiere di settore al fine di diffondere i risultati ottenuti e mostrare i prototipi realizzati. Nello specifico è stata pianificata la seguente attività di disseminazione:

- 5-7 marzo 2025. Presentazione dei risultati presso lo Stand ENEA alla fiera di settore Key-Energy, Rimini, evento europeo dedicato alle tecnologie, ai servizi, alle soluzioni integrate per l'efficienza energetica e le energie rinnovabili.

Inoltre, le attività progettuali sono state inserite all'interno dell'ambiente virtuale ENEA MetaSchool, al quale è possibile accedere online anche tramite Visore 3D. Sia il visore che il sito saranno utilizzati per la partecipazione ad eventi e fiere di settore e per la diffusione delle attività e dei risultati del progetto.