

UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE



FACOLTÀ DI INGEGNERIA
LAUREA MAGISTRALE
in Ingegneria Edile

*STUDIO SPERIMENTALE SUL COMPORTAMENTO TERMICO
E STRUTTURALE DI UNA PARETE IN BLOCCHI DI
LEGNO-CEMENTO.*

*EXPERIMENTAL STUDY ON THE THERMAL AND STRUC-
TURAL BEHAVIOR OF A WALL IN WOOD-CEMENT BLOCKS.*

Relatrice:

Prof.ssa Francesca Stazi

Laureando:

Valeria Petterini

Correlatori:

Prof. Michele Serpilli

Prof. Costanzo Di Perna

Anno Accademico 2020/2021

INDICE

ABSTRACT	6
1. STATO DELL'ARTE	8
1.1 Interesse dello studio.....	8
1.2 Nascita del sistema e normativa.....	8
1.3 Articoli internazionali in letteratura	9
1.3.1 Stato dell'arte studio strutturale	9
1.3.2 Stato dell'arte studio termico	10
Risparmio energetico.....	10
Inerzia termica	11
1.4 Obiettivi dello studio.....	12
2. SISTEMA LEGNO-CEMENTO	13
3. DETTAGLIO DEL PROGRAMMA SPERIMENTALE.....	17
3.1 Campioni di indagine.....	17
3.1.1 Campioni per i test strutturali.....	18
3.1.2 Campioni per i test termici.....	21
3.2 Studio sperimentale strutturale.....	26
3.2.1 Caratteristiche tecniche dei materiali.....	26
EPS con grafite.....	26
Blocco cassero in legno-cemento	27
Calcestruzzo.....	28
Armatura.....	28
3.2.2 Strumentazione.....	30
Telaio laboratorio UNIVPM	30
Pc e software.....	31
Datalogger	31
Trasduttori di spostamento.....	32
Martinetto idraulico.....	32
3.2.3 Prova di compressione.....	34
Set-up e svolgimento della prova di compressione.....	35
Metodi per la prova di compressione.....	36
3.2.4 Prova di taglio con precompressione	37
Set-up e svolgimento della prova di taglio con precompressione.....	37

Metodi per la prova di taglio con precompressione.....	40
3.3 Studio sperimentale termico.....	42
3.3.1 Metodo di analisi regime stazionario.....	42
Trasmittanza termica.....	42
Calcolo trasmittanza termica.....	45
3.3.2 Metodi di analisi regime dinamico.....	48
Parametri termici dinamici.....	52
Calcolo parametri dinamici.....	57
3.3.3 Strumentazione.....	60
Sensori.....	60
Acquisitore dati.....	60
Lampade solari.....	61
Ventilatori.....	62
Camera climatica.....	64
3.3.4 Set-up e svolgimento della prova in regime stazionario.....	65
Campione B1.....	65
Campione B2.....	67
Campione B3.....	69
3.3.5 Set-up e svolgimento della prova in regime dinamico.....	70
4. RISULTATI.....	72
4.1 Risultati strutturali.....	72
4.1.1 Prova di compressione campione A1.....	72
4.1.2 Prova di taglio con precompressione campione A1.....	74
4.1.3 Prova di taglio con precompressione campione A2.....	77
4.1.4 Criteri di rottura.....	81
Criteri di rottura prova di taglio con precompressione.....	81
4.2 Risultati termici.....	84
4.2.1 Comportamento in regime stazionario.....	84
Sperimentazione senza lampade solari.....	84
Sperimentazione con lampade solari.....	86
4.2.2 Comportamento in regime dinamico.....	89
4.2.3 Termografie.....	93
Campione B1.....	93
Campione B2 con radiazione solare.....	94
5. DISCUSSIONE.....	95
5.1 Comportamento strutturale.....	95

5.1.1 Confronto con la letteratura	97
Analisi qualitativa dei risultati: modalità di rottura	97
Analisi quantitativa dei risultati	98
5.2 Comportamento termico.....	103
Confronto del comportamento stazionario campione B1-B2	104
Confronto del comportamento stazionario campione B2-B2 con radiazione solare	106
Confronto del comportamento stazionario dei campioni B3 Prater – B3 Maracana.....	108
Confronto del comportamento stazionario di tutti i campioni con radiazione solare.....	110
Confronto del comportamento dinamico dei campioni con radiazione solare.....	112
6. CONCLUSIONE.....	114
BIBLIOGRAFIA	116

ABSTRACT

La presente tesi ricade all'interno di quei progetti volti allo sviluppo di soluzioni innovative nella progettazione di edifici, analizzando aspetti che possono migliorare contemporaneamente sia il loro comportamento meccanico che quello energetico.

Lo scopo della presente ricerca è duplice, ovvero consiste nell'indagare, attraverso prove strutturali e simulazioni termiche, le prestazioni termiche e strutturali di una parete in blocchi cassero di legno-cemento.

Dato che il sistema legno-cemento non può essere considerato come una struttura in cemento armato, non essendo soddisfatte le condizioni per il confinamento del calcestruzzo, né può essere considerato nella categoria delle murature ordinarie, per l'analisi delle sue caratteristiche meccaniche sono quindi necessarie prove specifiche, anche se il suo comportamento è simile a quello delle murature armate.

La capacità portante del pannello murario è assicurata dalla struttura reticolare interna in cemento armato, composta da colonne verticali e nervature orizzontali, armata con barre d'acciaio verticali e orizzontali.

In letteratura, dagli studi scientifici internazionali meccanici della tecnologia, sono dimostrati il miglioramento del comportamento sismico e l'efficacia delle pareti in blocchi di legno-cemento in termini di capacità nel piano e dissipazione di energia.

Mentre sono ancora da approfondire le caratteristiche termiche dei blocchi, in quanto ad oggi gli unici studi energetici disponibili sono quelli sviluppati dalla ditta produttrice, i quali dimostrano il miglioramento sul comfort abitativo data l'eccezionale inerzia termica, in grado di ridurre al minimo all'interno dell'abitazione, la variazione di temperatura che si ha abitualmente durante l'arco della giornata.

Si studiano quindi provini che riproducono, oltre alla tecnologia prettamente strutturale impiegata in cantiere, anche una parete-ventilata, completa di intonaco interno ed esterno e una lamiera striata che ne consente la ventilazione.

Il presente lavoro discute i risultati dell'attività sperimentale meccanica e quella monitorata termicamente.

La risposta meccanica di pareti in cemento armato gettate in casseforme permanenti in legno-cemento è stata valutata con prove sperimentali, che hanno portato alla determinazione della rigidità e della resistenza a taglio con precompressione. Inoltre sono stati

effettuati studi qualitativi delle modalità di rottura e confronti con studi in letteratura e la normativa.

Mentre nella sperimentazione energetica, attraverso l'impiego della camera climatica che simula l'ambiente interno dell'involucro, sono stati assegnati sia degli input costanti nel tempo (in regime stazionario) che armonici (in regime dinamico) al fine di determinarne i relativi parametri e capire se vi è una correlazione tra le condizioni imposte nell'ambiente interno e quello esterno.

Per quanto concerne la prova di compressione delle pareti, come ci si aspettava, è emerso che la conformazione del blocco unita al getto in calcestruzzo, ha scaturito un'elevata rigidità, tanto che per motivi tecnici non si è potuto concludere la prova.

Mentre nello studio termico della parete si è visto come, la schermatura solare di una lamiera striata grazie al suo ombreggiamento, migliora il suo comportamento termico sia nel lato esterno che interno dove diminuiscono temperatura e flusso termico.

La ventilazione nell'intercapedine migliora le caratteristiche di inerzia termica delle pareti, poiché attenua le escursioni termiche nell'ambiente interno e ciò in misura tanto maggiore quanto minore è la capacità termica della parete stessa.

1. STATO DELL'ARTE

1.1 Interesse dello studio

L'aumento della richiesta di sostenibilità ambientale, ottimizzazione delle prestazioni strutturali e termiche-acustiche degli edifici ha portato allo sviluppo di moderne tecnologie e materiali costruttivi. In questo scenario, le pareti portanti in cemento armato progettate in casseforme permanenti in legno-cemento, di seguito identificate come tecnologia legno-cemento, hanno grandi potenzialità costruttive per rispondere a tali esigenze.

Il blocco in legno mineralizzato, combinato ad uno strato isolante, assolve alle funzioni di cassero permanente e di isolamento termico e acustico degli interni, mentre la resistenza strutturale è assicurata dalla struttura reticolare interna in cemento armato, composta da colonne verticali e nervature orizzontali.

Tale sistema non può essere considerato come una struttura in cemento armato (non essendo soddisfatte le condizioni per il confinamento del calcestruzzo) né può essere considerato nella categoria delle murature ordinarie, anche se il suo comportamento meccanico è simile a quello delle murature armate. Dunque per l'analisi delle prestazioni di queste pareti sono necessarie quindi prove specifiche.

1.2 Nascita del sistema e normativa

Il sistema legno-cemento ha origini nel Nord Europa, dove l'interesse era volto alla realizzazione di costruzioni residenziali di modesta altezza, nelle quali le esigenze richieste riguardavano principalmente prestazioni termiche e acustiche, dato che le prestazioni strutturali sono relativamente facili da soddisfare. Pertanto nella letteratura scientifica sono disponibili pochi studi e, nella normativa vigente, sono limitate le disposizioni relative al comportamento strutturale.

In Europa l'unico documento che considera esplicitamente i sistemi di cassetta basati su blocchi forati sono le Linee Guida per il Benessere Tecnico Europeo ETAG 009 [1], ciononostante, ad eccezione dell'allegato B in cui si suggerisce un metodo per l'analisi strutturale delle pareti attraverso schemi strutturali del tipo a griglia, non vengono affrontati i requisiti prestazionali del nucleo interno in calcestruzzo.

Altre norme da prendere in esame sono la Norma Europea EN 15498:2008 [2] che stabilisce prestazioni e metodi di prova per i blocchi cassero in legno truciolare, e le Linee

Guida italiane del 2011 [3], che forniscono indicazioni costruttive per la progettazione di edifici costituiti da pareti in cemento armato gettate in casseformi permanenti, intese secondo l'Eurocodice 8 [4], come Large Lightly Reinforced Walls.

1.3 Articoli internazionali in letteratura

1.3.1 Stato dell'arte studio strutturale

Come è riportato nel recente articolo “Elementi strutturali in cemento armato gettati in casseri in cemento-truciolato sottoposti a compressione e flessione fuori piano” [5], pubblicato nel 2021, i primi lavori scientifici sono stati realizzati da Ceccoli [6,7]: sfruttando la conformazione periodica di una parete, ottenuta dalla ripetizione indefinita di una cella elementare, è stata utilizzata la teoria dell'omogeneizzazione per individuare i parametri elastici macroscopici da utilizzare per la descrizione meccanica della parete.

Nei lavori di Gasparini e Malavolta [8], vengono presentate prove cicliche pseudo-statiche su pareti di taglio per valutare le prestazioni sismiche di pannelli portanti leggermente in ca.

Più recentemente, Comodini [9–11] ha analizzato il comportamento meccanico di LLRW realizzati con blocchi cassero permanente a base di legno, eseguendo prove secondo le Linee guida italiane [3]: prove di compressione assiale e diagonale su porzioni di pannello, prove di compressione verticale su pannelli snelli, e prove su pannelli in scala reale sottoposti a carichi verticali e azioni orizzontali cicliche.

Nel lavoro di Minotto [12], i risultati mostrano l'efficacia delle pareti in blocchi di legno-cemento in termini di capacità nel piano e dissipazione di energia.

Sono stati inoltre eseguiti recenti test per valutare la risposta strutturale dei pannelli compositi legno-cemento utilizzati come casseforme permanenti.

Li [13] hanno eseguito prove di flessione su tre punti per valutare le prestazioni meccaniche del materiale e simulazioni agli elementi finiti per valutare gli effetti della pressione laterale dovuta al calcestruzzo fresco.

Infine, la ricerca di Dominguez-Santos [14] ha analizzato se l'aggiunta di legno al cemento consente la produzione di blocchi di calcestruzzo con comportamento sismico migliorato rispetto al calcestruzzo ordinario.

1.3.2 Stato dell'arte studio termico

Come preannunciato nei paragrafi precedenti, a differenza degli studi meccanici del sistema legno-cemento, ad oggi la caratterizzazione sperimentale termo-acustica deve ancora essere approfondita.

Di seguito si riportano delle ricerche effettuate in laboratorio da parte dalla ditta produttrice Isotex s.r.l. riguardanti il comfort abitativo, in particolare gli aspetti analizzati riguardano il risparmio energetico e l'inerzia termica.

Risparmio energetico

Il legno cemento mineralizzato, nasce dall'unione fra due ottimi materiali da costruzione, il legno ed il cemento. La mineralizzazione, permette al legno di perdere le sue proprietà organiche, rendendolo inerte (quindi inattaccabile da agenti esterni, come insetti, parassiti, muffe), ma allo stesso tempo la mineralizzazione lascia inalterate le caratteristiche di isolamento-termo acustico proprie del legno.

La porosità del materiale permette anche la completa traspirazione della parete e ne regola l'umidità, impedendo la formazione di condense e muffe.

Il risultato è un ottimo confort abitativo ed un notevole risparmio energetico che si traduce in un minor costo del riscaldamento d'inverno e del condizionamento d'estate.

Una conferma tangibile di quanto detto sopra arriva dalle certificazioni Classe A+ e Gold, ottenute dall'Associazione Nazionale per l'Isolamento termico ed Acustico ANIT.

Il blocco in legno-cemento impiegato in questa ricerca, modello HDIII 38/14 isolato con polistirene espanso con grafite, è stato sottoposto dall'Istituto Giordano s.p.a al calcolo della trasmittanza termica secondo i criteri della norma UNI 10355:1994 [15] e della norma UNI EN ISO 6946:2008 [16], a partire dai valori di conducibilità dichiarati dal produttore Isotex. Sono stati determinati i seguenti valori del blocco:

$$\text{Conduttanza (G)} = 0,224 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{Resistenza termica (R)} = 4,470 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$\text{Trasmittanza termica (U)} = 0,213 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{Resistenza termica della parete intonacata (R)} = 4,691 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$\text{Conducibilità termica equivalente del blocco } (\lambda_{eq}) = 0,085 \text{ W/mK}$$

Inerzia termica

I blocchi cassetto, essendo posati a secco e riempiti con calcestruzzo debolmente armato, consentono di realizzare una parete “massiva” con un’inerzia termica eccezionale in grado di ridurre al minimo, all’interno dell’abitazione, la variazione di temperatura che si ha abitualmente durante l’arco della giornata.

Questa caratteristica incide molto sul comfort abitativo perché mantiene costante la temperatura all’interno dell’abitazione sia in inverno che in estate riducendo molto i consumi per riscaldamento e raffreddamento.

La prova di inerzia termica svolta in laboratorio da Istituto Giordano, analizza la variazione di temperatura nell’arco della giornata estiva. La prova parte da una temperatura di 0°C nei due ambienti separati dalla parete Isotex da 30 cm.

Un ambiente viene portato a +20°C iniziali per poi salire a +45°C e infine scendere a -5°C. La variazione di temperatura nell’ambiente a fianco è di +1°C, quindi impercettibile, come mostrato dal diagramma di Glaser:

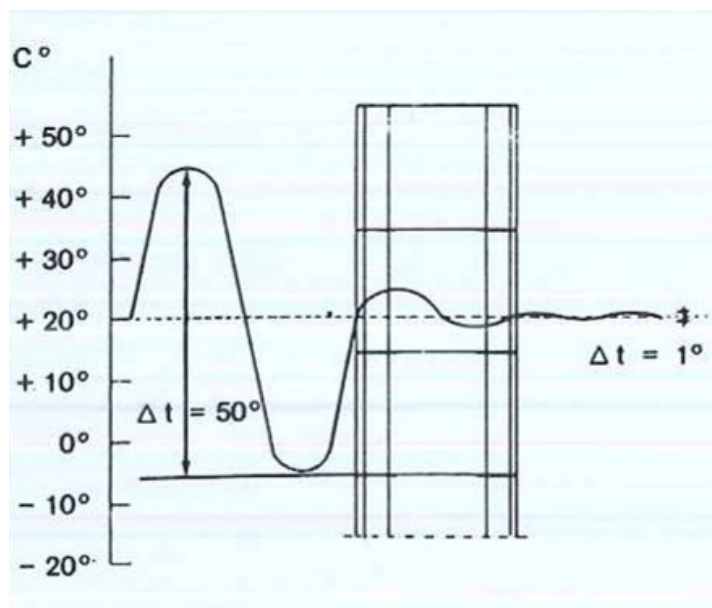


Fig.1 - Diagramma di Glaser prova inerzia termica

1.4 Obiettivi dello studio

Lo scopo della presente ricerca è duplice, ovvero consiste nell'indagare, attraverso prove strutturali e simulazioni termiche, se le prestazioni termiche e strutturali di una parete in blocchi cassero di legno-cemento vengono ottimizzate.

La risposta meccanica di pareti in cemento armato gettate in casseforme permanenti in legno-cemento è stata valutata con prove sperimentali, che hanno portato alla determinazione della resistenza a compressione e resistenza a taglio con precompressione. Inoltre sono stati effettuati studi qualitativi delle modalità di rottura.

Mentre nella sperimentazione energetica, attraverso l'impiego della camera climatica che simula l'ambiente interno dell'involucro, sono stati assegnati sia degli input costanti nel tempo (in regime stazionario) che armonici (in regime dinamico) al fine di determinarne i relativi parametri e capire se vi è una correlazione tra le condizioni imposte nell'ambiente interno e quello esterno.

2. SISTEMA LEGNO-CEMENTO

Il metodo costruttivo Isotex è un esempio di edilizia innovativa, in quanto con un'unica operazione di posa si soddisfano perfettamente tutte le caratteristiche previste dalle norme vigenti in termini di sicurezza sismica, di resistenza al fuoco (REI 120 e REI 240), di resistenza allo scoppio, e di isolamento acustico ("Classe I"). Ottenendo inoltre un'ottima inerzia termica, permeabilità al vapore e impermeabilità all'aria.

In questo modo viene ridotto sensibilmente l'impiego di manodopera che pesa del 50% sui costi di costruzione degli edifici.

Allo stesso modo diminuiscono notevolmente sia i tempi di realizzazione ridotti dalla posa a secco, che gli errori durante la messa in opera dovuti all'intervento di più figure che devono coordinarsi fra loro in quanto gli operatori devono solamente applicare uno schema di posa già predefinito nei dettagli, con riduzione degli scarti di lavorazione.

Ecco perché l'edificio realizzato con il metodo costruttivo Isotex diventa più prestazionale e meno costoso.



Fig.1 - Vantaggi del blocco-cassero Isotex

Sono realizzati in legno mineralizzato, detto anche legno-cemento, ottenuto da materie prime del tutto naturali, da un conglomerato di legno 100% riciclato e cemento.

Il legno viene lavorato con l'impiego di un minerale naturale (da qui l'appellativo "legno mineralizzato") che lo rende inerte (inorganico), quindi resistente al fuoco, agli agenti atmosferici e inattaccabile da insetti e muffe.

In particolare il legno cemento di Isotex proviene da legno di abete recuperato al 100% e non trattato, quindi privo di additivi e sostanze inquinanti e dunque non nocive alla salute dell'uomo.



Fig.2 - Materiali costitutivi del blocco cassero

Gli elementi costruttivi Isotex sono blocchi cavi atti ad ospitare armature verticali, orizzontali e il getto di calcestruzzo in opera.

Vengono posati in maniera sfalsata e a secco, eliminando in questo modo i diversi inconvenienti causati dall'utilizzo della malta, successivamente vengono riempiti di calcestruzzo, infine viene inserita al loro interno un'armatura verticale ed orizzontale garantendo in questo modo un'ottima struttura portante.



Fig.3 - HDIII 38/14 Grafite

Il calcestruzzo impiegato per il getto all'interno dei blocchi cassero deve avere una classe di consistenza (fluidità) non inferiore a S4, con classe di consistenza derivante dalle esigenze di calcolo, la granulometria degli inerti (< 16 mm), in modo da consentire un sicuro riempimento dei blocchi.

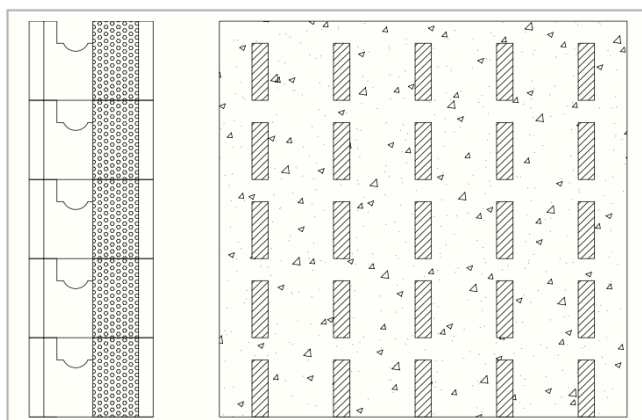


Fig.4 - Distribuzione del cls all'interno dei blocchi

In concomitanza al getto in calcestruzzo, si colloca l'armatura (tondini di acciaio ad aderenza migliorata di tipo B40C aventi un diametro almeno di 10 mm), posta sia orizzontalmente che verticalmente all'interno dei blocchi.

Le barre orizzontali vengono appoggiate nella lunetta con un distanziatore, ad ogni corso dei blocchi, assicurando una sovrapposizione del 50% superiore rispetto a quanto previsto dalle norme tecniche vigenti.

Mentre le barre verticali vengono poste in posizione centrale del pilastrino, allineata con il segno verticale inciso nell'EPS, come mostrato dalla seguente immagine.

In questo modo, a getto effettuato, si viene a creare una sorta di "lama" portante lungo tutto il perimetro dell'edificio. Queste pareti presentano un resistente reticolo in calcestruzzo costituito da colonne verticali unite tra loro da tozze travi orizzontali a passo regolare.

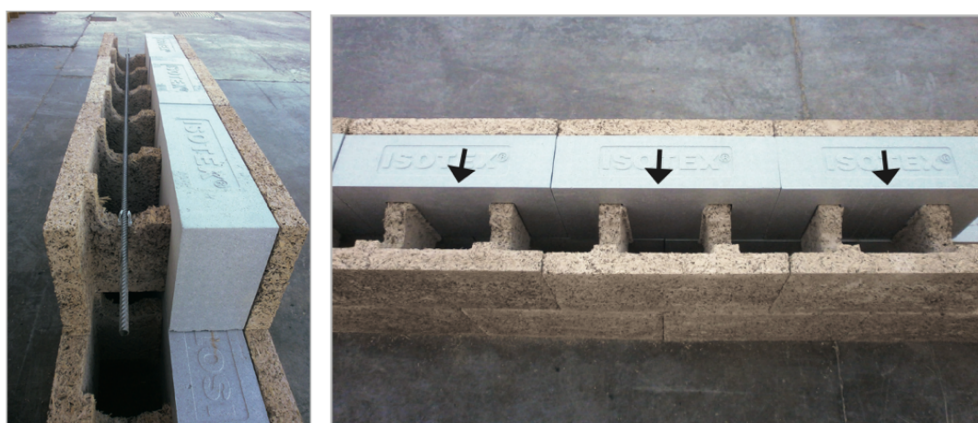


Fig.5 - Collocazione dell'armatura all'interno dei blocchi

Il sistema costruttivo viene completato con l'applicazione di uno strato di intonaco (premiscelato o tradizionale) il più possibile uniforme di 15 mm, che deve essere eseguita esclusivamente su superfici asciutte.

Per evitare spessori notevoli di intonaco tali da divenire potenziali punti di cavillatura, prima di procedere all'applicazione dell'intonaco, si deve procedere alla chiusura di eventuali fughe tra i blocchi causati da una non corretta posa.

Durante la realizzazione della fondazione occorre prevedere l'inserimento dell'armatura verticale con passo 25 cm (il passo dei fori dei blocchi).

La lunghezza di ancoraggio, conforme alle norme tecniche, dovrà essere indicata dal progettista; l'altra possibilità è di inserire con le resine queste armature verticali, a fondazione realizzata con il primo corso di blocchi posato.

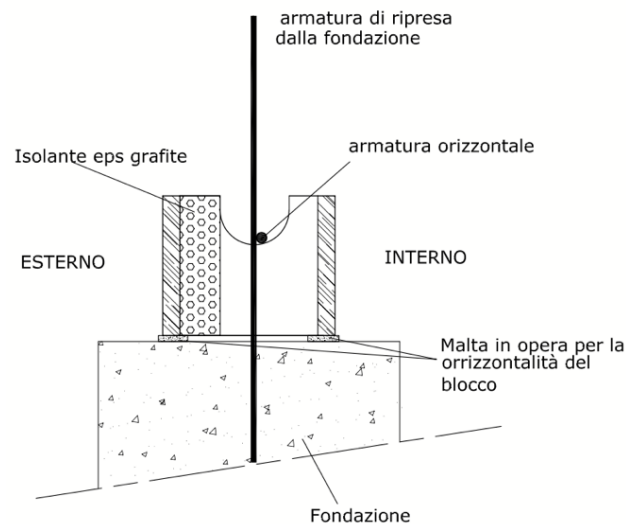


Fig.6 – *Nodo parete-fondazione*

La posa del primo corso viene fatta su due strati di malta posizionati solo in corrispondenza delle pareti dei blocchi, per avere la possibilità di metterlo bene a livello (è consigliato l'uso della bolla); è da evitare lo strato di malta su tutta la larghezza del blocco. È importante posizionare gli angolari a piombo e tirare il filo tra gli stessi. Inoltre durante la posa dei blocchi è importante rispettare la distanza dal filo, per garantire l'assenza del fuori piombo, l'orizzontalità dei corsi e la planarità della parete.

3. DETTAGLIO DEL PROGRAMMA SPERIMENTALE

In questo capitolo vengono indicate, nello specifico, tutte le informazioni riguardanti i campioni di indagine e le modalità di esecuzione dei test sperimentali.

I test strutturali sono stati effettuati nel Laboratorio Ufficiale Prove, Materiali e Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura; mentre i test termici si sono svolti nel laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche.

3.1 Campioni di indagine

I campioni di indagine che sono stati utilizzati nei due studi sperimentali, strutturale e termico, sono pareti costituite da blocchi cassero prodotti dalla Isotex Srl di Poviglio (RE) e assemblati in laboratorio.

Il blocco utilizzato nell'attuale attività di ricerca per la realizzazione delle pareti, è il modello “Blocco Cassero HDIII 38/14 Grafite”, dove il blocco pre-accoppiato ad un isolamento di polistirene espanso additivato con grafite di spessore 14 cm, svolge la doppia funzione di elemento per parete e di cassero per il contenimento del getto di irrigidimento in calcestruzzo.



Fig.7 - Blocco cassero HDIII 38/14 grafite utilizzato

In concomitanza al getto in calcestruzzo è stata collocata l'armatura (tondini di acciaio ad aderenza migliorata di tipo B40C aventi un diametro di 10 mm), posta sia orizzontalmente che verticalmente all'interno dei blocchi. Per il getto all'interno dei blocchi è stato impiegato un calcestruzzo avente una classe di consistenza S4, come indicato nel manuale operativo di montaggio fornito dalla Isotex. I provini sono stati lasciati in ambiente di laboratorio per 28 giorni.

3.1.1 Campioni per i test strutturali

Per i test strutturali sono stati effettuati due campioni A1 e A2 (*Fig.8*), aventi le medesime caratteristiche e dimensioni. Nello specifico sono costituiti da una parete di dimensioni 1,25x1,25 m realizzata impiegando il “Blocco Cassero HDIII 38/14 Grafite” in combinazione ad un cordolo in c.a. di sezione 0,50x0,25 m dotato di armatura longitudinale e staffe (*Fig.9*) e, opportunamente collegato alla parete sovrastante attraverso l'armatura di ripresa (*Fig.10*), al fine di simulare un fissaggio alla base come quello previsto in cantiere, ovvero su una fondazione in cemento armato come illustrato nel *Capitolo 2*.



Fig.8 - Provini A1 e A2 utilizzati nei test



Fig.9 – Armatura del cordolo in c.a.



Fig.10 – Armatura di ripresa

Le seguenti figure (Fig.11, 12) riassumono i componenti e le loro dimensioni:

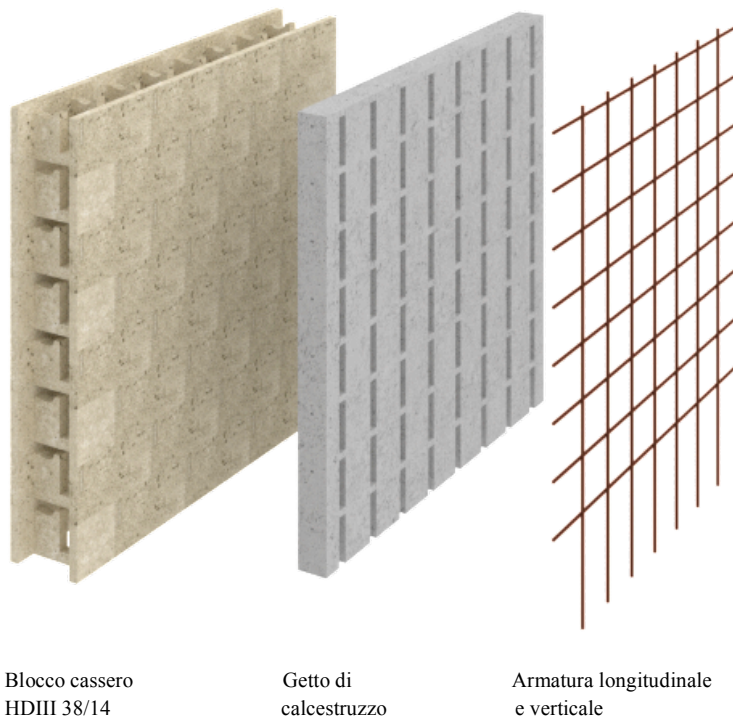


Fig.11- Componenti della parete

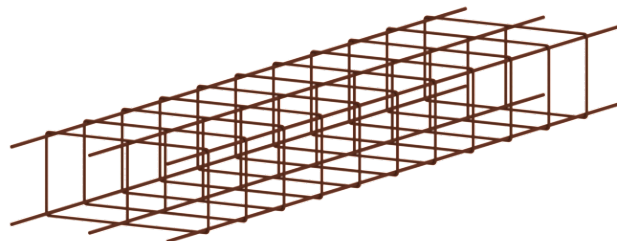


Fig.12 - Armatura di progetto del cordolo

Nelle figure 13 e 14 sono illustrati i particolari costruttivi relativi ai campioni A1 e A2.

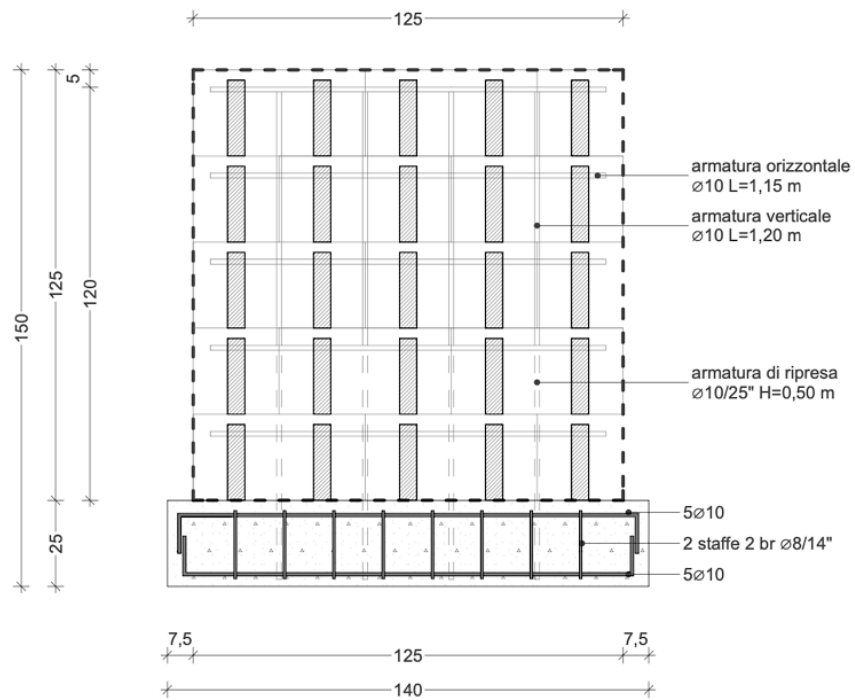


Fig.13- Particolare costruttivo campioni A1 e A2

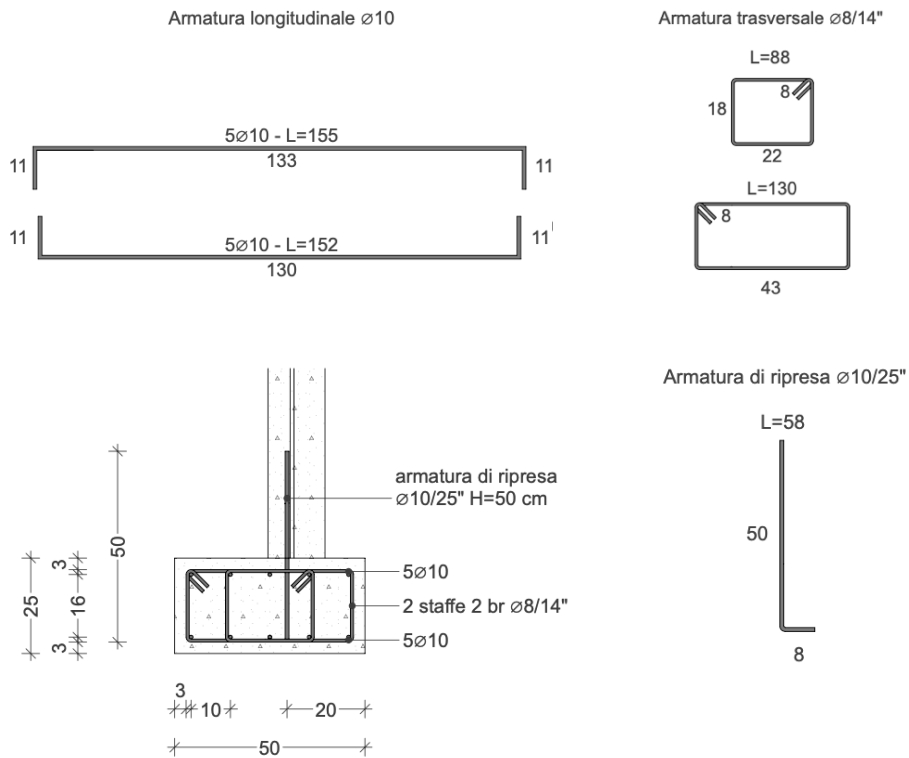


Fig.14 - Particolare costruttivo cordolo in c.a.

Inoltre è stato realizzato un getto di calcestruzzo di spessore 5 cm in sommità alla parete, in modo da distribuire uniformemente il carico assegnato durante le prove di compressione e di taglio.

3.1.2 Campioni per i test termici

Al fine di confrontare il comportamento termico di una parete costituita da “Blocco Cassero HDIII 38/14 Grafite” realizzata a step, per i test termici sono stati sviluppati 3 campioni (B1, B2 e B3).

La parete B1 di dimensioni 1,00x1,00 m è costituita da blocchi cassero cavi, semplicemente posati gli uni sugli altri in maniera sfalsata. Successivamente sono stati stilati i giunti attraverso stucco sigillante in modo da scongiurare eventuali fughe d'aria durante il monitoraggio del campione.



Fig.15 - Campione B1

La parete B2 (*Fig.16*), per una questione di peso del campione (oltre 500 kg), ha dimensioni ridotte (1,00x0,75 m), essa rappresenta la tecnologia costruttiva Isotex ultimata, ovvero completa di getto di calcestruzzo, di armatura longitudinale e verticale posta all'interno dei blocchi e di uno spessore di intonaco tradizionale di 1,5 cm interno ed esterno.

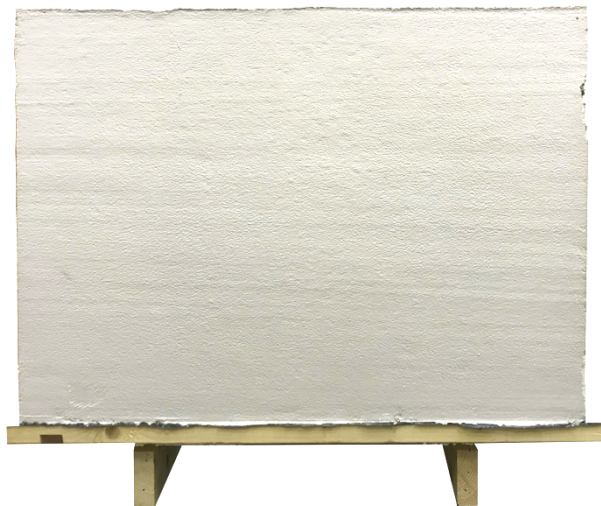


Fig.16 - Campione B2

La parete B3 (Fig. rappresenta la tecnologia della parete ventilata, ottenuta a partire dalla parete B2 a cui è stata aggiunta una lamiera stirata in alluminio che ne garantisce la ventilazione dell'aria. Per irrigidire e fissare la lamiera stirata si è pensato di realizzare un telaio (Fig.17) costituito da profili scatolari di alluminio di spessore 0,15 cm, due posti orizzontalmente di sezione rettangolare (2,00x5,00 cm) e due verticalmente di sezione quadrata (5,00x5,00 cm).

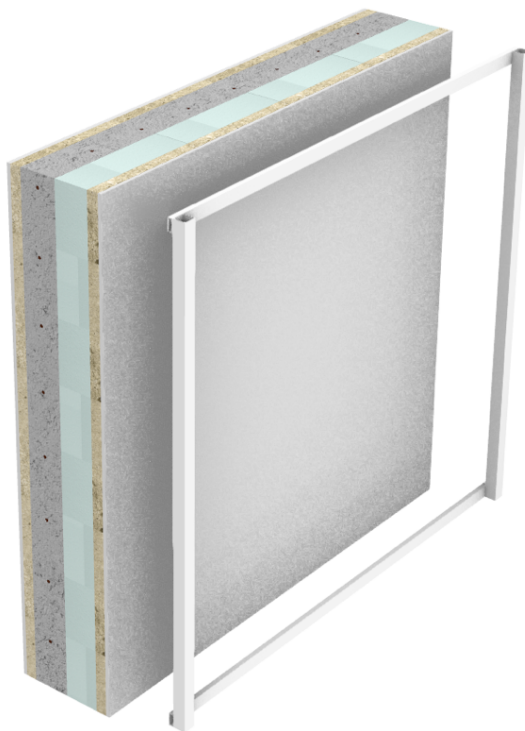


Fig.17 - Dettaglio telaio di irrigidimento lamiera

La lamiera è sorretta ai quattro angoli da dei profili sagomati in laboratorio come mostrato in (Fig.18), in questo modo si viene a creare un'intercapedine d'aria tra la lamiera e la superficie esterna della parete di 10 cm.

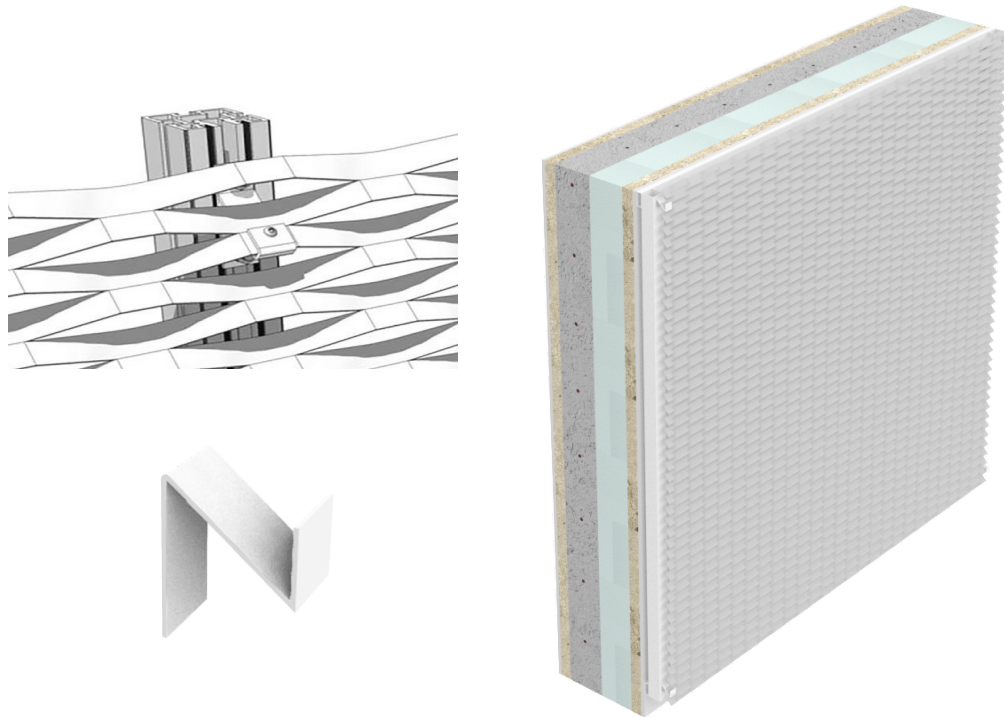


Fig.18 - Dettaglio collegamento lamiera-telaio

Mentre il collegamento alla parete avviene attraverso un tassello ancorante metallico (Fig.19) idoneo per calcestruzzo, costituito da una vite filettata da 0,8 cm (avente una profondità di ancoraggio pari a 25 cm).

L'inserimento del tassello è avvenuto previa foratura ed aspirazione del foro, inserimento della camicia metallica e della barra filettata. Infine tutto il tassello è stato tirato e contrastato attraverso la rondella e il dado.

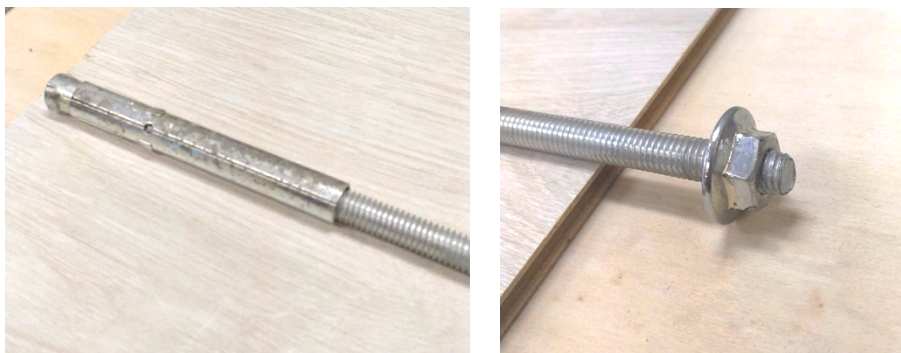


Fig.19 – Tassello ancorante metallico

Sono stati scelti due modelli di lamiera stirata prodotta dall'azienda Fratelli Mariani S.p.a., che differiscono sia per sagoma della maglia che per la percentuale di vuoto/pieno (*Fig.20*), in particolare la lamiera MARACANA (campione B3 Maracana) ha un'open area di 55% mentre la PRATER (campione B3 Prater) pari a 76%.

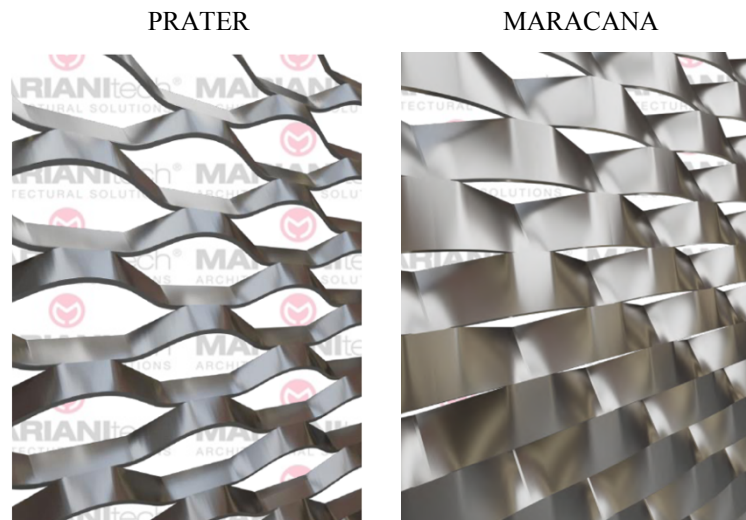


Fig.20 – Modelli lamiera stirata utilizzati

Sono stati dunque classificati due campioni della parete B3 (*Fig.21, 22*): la parete è denominata “B3 Maracana” quando appunto è impiegato il modello di lamiera stirata con una minore percentuale di foratura, mentre per il “B3 Prater” è stata adottata una lamiera che consente una minore schermatura solare.



Fig.21 - Campione B3 Prater



Fig.22 - Campione B3 Maracana

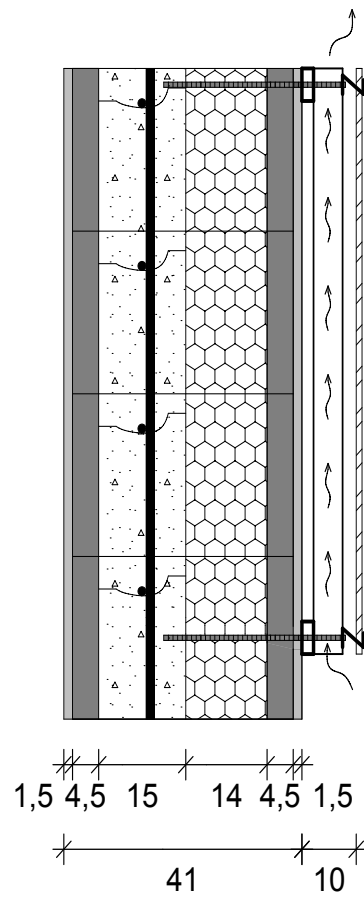


Fig.23 – Particolare costruttivo campioni B3

3.2 Studio sperimentale strutturale

In questa sezione si vuole indagare sul comportamento a compressione ed a taglio con precompressione delle pareti costruite con blocchi cassero in legno-cemento.

Si ricorda, come indicato nel *Capitolo 3.1*, che i due campioni testati A1 e A2 hanno le medesime caratteristiche e dimensioni.

Si riporta di seguito il tipo di prova programmata per ogni campione.

PARETI IN BLOCCHI CASSERO	
Prova per la determinazione della resistenza a compressione [21]	A1
Prova per la determinazione della resistenza a taglio con precompressione	A1 A2

Tab.1 – Programma delle prove sperimentali

3.2.1 Caratteristiche tecniche dei materiali

EPS con grafite

Il blocco cassero Isotex HDIII 38/14 è dotato di un nucleo isolante in EPS additivato con grafite, avente uno spessore di 14 cm.

Il polistirene espanso sinterizzato (EPS, expanded polystyrene), noto come polistirolo, è un materiale di sintesi che viene ricavato partendo da un derivato del petrolio, lo stirene manomero. È composto principalmente dal 98% circa di aria, carbonio e idrogeno e rappresenta uno dei materiali isolanti più utilizzati in ambito edilizio.

Lo strato di isolante appartenente ad ogni blocco cassero, viene ricavato da elementi preventivamente stagionati tramite il taglio col filo caldo.

L'aggiunta di polveri di grafite all'interno della materia prima aiuta ad abbassare il contributo dell'irraggiamento alla trasmissione del calore attraverso la lastra.

La lastra contiene una percentuale di EPS riciclato o recuperato pari o superiore al 10% in peso e viene prodotta senza l'utilizzo di ritardanti di fiamma proibiti ed agenti espandenti con potenziale di riduzione dell'ozono superiore a zero.

Il produttore ne garantisce la conformità ai CAM (Criteri ambientali Minimi, D.M. dell'11 Ottobre 2017 [17]).

L'EPS additivato con grafite, oltre ad avere ottime proprietà di isolante termico, ha una buona resistenza all'umidità, è facilmente lavorabile ed è imputrescibile e atossico.

La densità media dell'isolante utilizzato è di 17 kg/m³. Nella tabella vengono indicate alcune delle caratteristiche tecniche del nucleo isolante utilizzato nei campioni, fornite dall'azienda produttrice. In particolare, vengono riportate solo le caratteristiche meccaniche di tale materiale.

Densità media [kg/m ³]	Resistenza a flessione [kPa]	Resistenza a compressione al 10% di deformazione [kPa]	Resistenza a trazione [kPa]
17	≥ 150	≥ 100	≥ 150

Tab.2 - Caratteristiche tecniche dell'EPS con grafite

La resistenza a flessione dell'isolante in EPS additivato con grafite è stata determinata dall'azienda con riferimento alla norma EN 12089 [18]. La resistenza a compressione al 10% di schiacciamento e la resistenza a trazione sono state ottenute rispettivamente con le norme EN 826 [19] e la EN 1607 [20].

Blocco cassero in legno-cemento

Il legno-cemento è un materiale che combina le vantaggiose caratteristiche del cemento con quelle del legno. La sua struttura è realizzata in fibre di legno che sono uniformemente agglomerate dal cemento tipo Portland.

Il legno viene lavorato con l'impiego di un minerale naturale (da qui l'appellativo "legno mineralizzato") che lo rende inerte (inorganico), quindi resistente al fuoco, agli agenti atmosferici e inattaccabile da insetti e muffe

Grazie alle sue caratteristiche fisiche e meccaniche, viene considerato come uno dei migliori materiali per le costruzioni di peso leggero.

Di seguito nella *Tab. 2* le sue caratteristiche meccaniche.

Densità media [kg/m ³]	Resistenza a flessione [kPa]	Resistenza a carico distribuito [kg]	Resistenza a trazione verticale [kPa]
1350	min 9	9000	0,5

Tab.3 - Caratteristiche tecniche del legno mineralizzato

Calcestruzzo

Le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo dipendono dai componenti che lo costituiscono e dai loro rapporti relativi in termini di quantità in volume o in peso e, per questo motivo viene considerato come un materiale non omogeneo e non isotropo.

Dal punto di vista meccanico presenza una buona resistenza ed un modulo elastico relativamente elevato a compressione, mentre gli stessi parametri sono notevolmente ridotti nei confronti delle sollecitazioni di trazione.

Il calcestruzzo impiegato per il getto all'interno dei blocchi cassero ha una classe di resistenza a compressione C25/30 e una classe di consistenza (fluidità) S4.

Il materiale è caratterizzato dai seguenti parametri.

Densità [kg/m ³]	R_{ck} Resistenza a compressione [MPa]	f_{ck} [MPa]	E Modulo elastico [MPa]	f_{ctm} [MPa]
2300	30	25	31500	2,57

Tab.4 - Caratteristiche tecniche del cls

Armatura

Le barre di armatura inserite all'interno delle cavità degli elementi cassero per realizzare la parete e, quelle adottate per il cordolo in c.a., sono tondini di acciaio ad aderenza migliorata di tipo B40C aventi un diametro di 10 mm.

Mentre l'armatura trasversale del cordolo è costituita da barre Ø8 mm.

Peso [kg/m]	\emptyset Diametro tondino [mm]	A_s Area resistente [mm ²]	f_y Tensione di snervamento [MPa]	f_t Tensione di rottura [MPa]
0,617	10	79	450	540

Tab.5 - *Caratteristiche tecniche barre di armatura*

3.2.2 Strumentazione

L'esecuzione delle prove è stata eseguita nel Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture del dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura dell'Università Politecnica delle Marche. È stato quindi scelto il telaio da impiegare per lo svolgimento delle prove e le varie strumentazioni, tra cui martinetti idraulici e trasduttori di spostamento. Di seguito vengono descritte nel dettaglio i vari strumenti e strutture utilizzati per il monitoraggio e l'esecuzione delle prove.

Telaio laboratorio UNIVPM

Il telaio scelto per poter eseguire le prove, disponibile nel laboratorio di strutture dell'Univpm, poggia sul pavimento del laboratorio ed è composto da una traversa mobile bullonata su due montanti. Per eseguire i test, è stato quindi necessario posizionare la traversa a circa 2,00 m dal piano di lavoro, mediante carro-ponte, per permettere il posizionamento dei campioni e dei dispositivi di prova e misurazione. Lo spazio disponibile per l'esecuzione della prova è dunque di circa 2,40 x 2,00 x 0,45 m. Il telaio scelto è rappresentato in Fig.24.

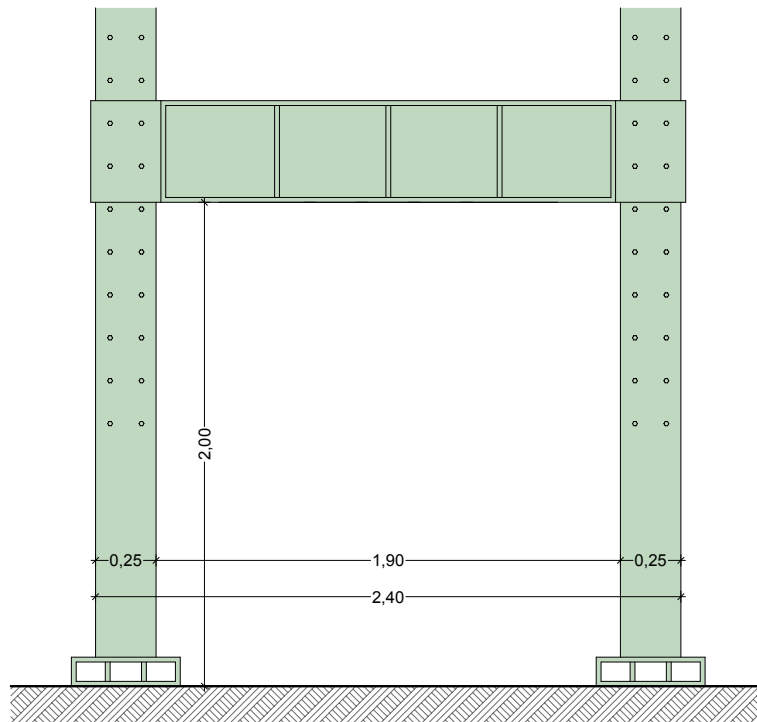


Fig.24 - Dettagli del telaio utilizzato

Pc e software

Una volta che il campione viene posizionato sotto il telaio, si procede col setup strumentale, necessario per registrare tutti i dati necessari. Per l'acquisizione dei dati è stato utilizzato il software Catman della HBM che permette di settare i vari strumenti e le modalità con cui vengono acquisiti tali dati. Nel nostro caso l'acquisizione è stata effettuata in automatico, con il datalogger, con frequenza di 2 Hz, cioè un'acquisizione ogni 0,5 secondi per tutti gli strumenti connessi al datalogger.



Fig.25 - Postazione di monitoraggio

Datalogger

I segnali provenienti dagli strumenti vengono ricevuti ed elaborati dal datalogger Spider8 della HBM. Tale strumento dispone di otto canali per l'acquisizione dei dati. Nel nostro caso sono stati utilizzati solo cinque/tre canali: quattro (nella prova a taglio con precarico), due (nella prova a compressione) per l'acquisizione dei segnali provenienti dai trasduttori di spostamento e uno per l'acquisizione dei segnali provenienti dal trasduttore di pressione. I dati sono poi inviati al software Catman.



Fig.26 - Sistema per acquisizione dati Spider8

Trasduttori di spostamento

I trasduttori utilizzati per l'acquisizione dello spostamento, sono tutti della stessa tipologia, basati sul principio di misurazione dell'induttore differenziale (half bridge induttivo). Il "completamento" del ponte di Wheatstone, alla base della misurazione, viene effettuato dal datalogger Spider8. La lettura della deflessione nel piano viene effettuata in modo continuo nel tempo.

Questa tipologia di trasduttori, prodotti sempre dalla HBM, ha fondoscala di circa 50 mm (W50).



Fig.27 - Trasduttore di spostamento halfbridge

Martinetto idraulico

Per l'applicazione del carico è stato utilizzato un martinetto Enerpac da 50 tonnellate (490 kN) con corsa massima di 150 mm, mostrato in *Fig.28*.

Lo stesso, dopo essere stato saldato su una piastra bullonata al telaio in acciaio del laboratorio, è stato collegato a una centralina Enerpac (*Fig.29*), una pompa elettrica con un massimo di 700 bar. Un trasduttore di pressione è stato collegato alla centralina e utilizzato per ricavare il valore della pressione applicata all'interno del martinetto. Il trasduttore di pressione (bar) è stato quindi inviato allo strumento di acquisizione dei dati e convertito, sul software Catman, in forza (kN).

Inoltre, nella prova di taglio con precompressione, per motivi funzionali di contrasto degli spostamenti, è stato aggiunto un ulteriore martinetto orizzontale nella parte inferiore del campione per l'applicazione, tramite una pompa manuale, di un carico.



Fig.28 – Martinetto idraulico Enerpac



Fig.29 – Centralino Enerpac (Fullbridge)

Il carico viene poi distribuito sulla parte superiore del campione mediante una piastra in acciaio, come mostrato in *Fig.30*. Le modalità di applicazione del carico, effettuato mediante tale elemento, vengono definite in dettaglio nel seguente capitolo.



Fig.30 – Piastra utilizzata per distribuire il carico

3.2.3 Prova di compressione

Per determinare il comportamento a compressione della parete si è effettuata una prova di compressione assiale. Per il procedimento si è fatto riferimento alla norma UNI EN 1052-1 [21] in cui si misura la resistenza a compressione di elementi in laterizio.

La norma specifica un metodo per determinare la resistenza a compressione della muratura. Vengono date indicazioni circa la preparazione dei provini, il condizionamento richiesto prima della prova, la macchina di prova, il metodo di prova, il metodo di calcolo e i contenuti del resoconto di prova.

Il principio della prova è l'applicazione di una forza di compressione uniforme sulla superficie sommitale della parete, viene registrato il carico massimo (F_{max}) raggiunto, ma in questo caso il test è terminato dopo aver assegnato il massimo carico possibile trasferito dai martinetti idraulici.

I dati registrati durante la prova sono stati utilizzati per definire le curve forza-spostamento e sforzo-deformazione del campione A1.

Al termine della prova si individuano eventuali deformazioni o rotture locali sul pannello attraverso un'ispezione visiva.



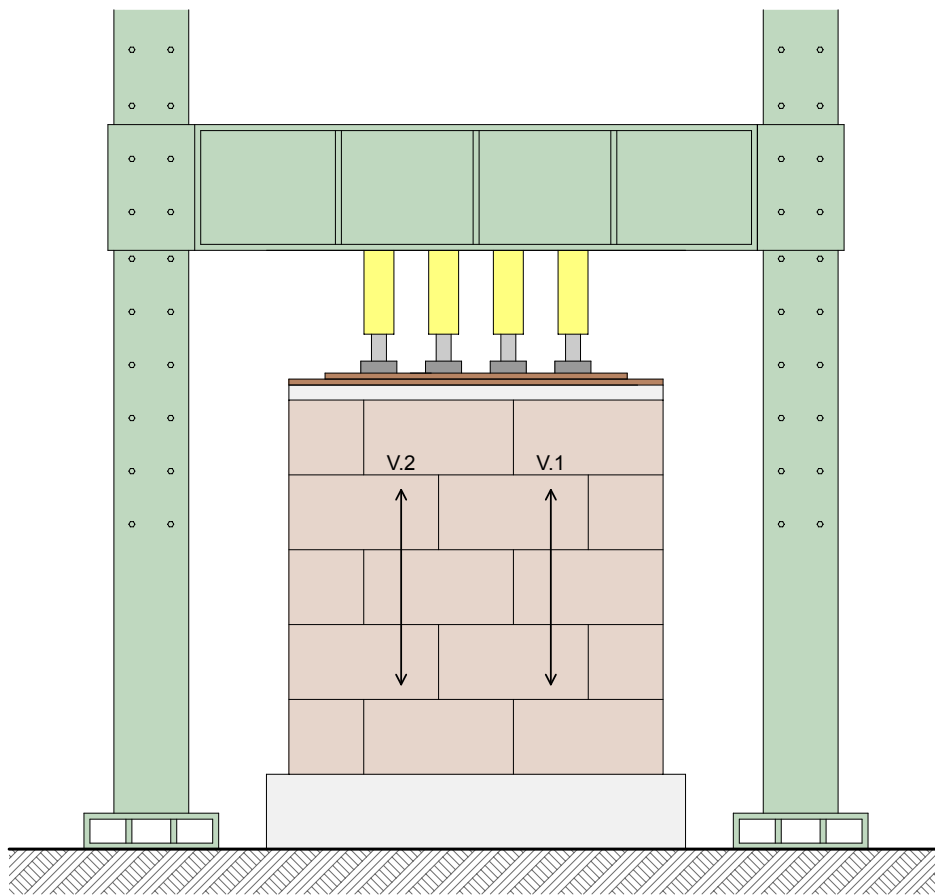
Fig.31 – Provino A1 dopo la costruzione in laboratorio

Set-up e svolgimento della prova di compressione

I due trasduttori utilizzati per l'acquisizione dello spostamento nella prova di compressione assiale, sono della stessa tipologia, basati sul principio di misurazione dell'induttore differenziale (half bridge induttivo).

In particolare i due trasduttori, **V.1** e **V.2**, hanno una lunghezza in condizione di riposo pari a 65 cm e vengono fissati direttamente sulla superficie del campione A1 al fine di misurare gli spostamenti verticali della parete.

Di seguito è mostrata la loro posizione rispetto al campione (*Fig.32*):



LEGENDA:

V.1 Trasduttore spostamento verticale posto sulla superficie della parete

V.2 Trasduttore spostamento verticale posto sulla superficie della parete

Fig.32 – Set-up prova di compressione

Il campione è posizionato verticalmente ed è sollecitato a compressione da martinetti posizionati nella parte superiore della parete, i quali esercitano una forza verticale massima di 1850 kN.

Essendo arrivati al limite di portata dei martinetti idraulici, per ragioni tecniche, la prova non si è potuta concludere, è stato comunque possibile ricavare la rigidità del provino, ossia il Modulo di Young.

Metodi per la prova di compressione

Dalla prova di compressione assiale è possibile ricavare la curva forza-spostamento e la curva sforzo-deformazione.

Nella curva forza-spostamento, i valori della forza verticale di compressione sono quelli assegnati attraverso i martinetti posti in sommità al campione, mentre gli spostamenti vengono registrati dai trasduttori verticali applicati sulla superficie della parete.

Per tracciare il diagramma Sforzo-Deformazione, si opera nel seguente modo:

- le forze F_i applicate sul provino derivano dalla lettura delle pressioni dei manometri del sistema oleodinamico.

Conoscendo la superficie netta della base del campione ($A_i = b s$, dove b è la base del provino in mm, s è lo spessore del provino in mm), è possibile ricavare lo sforzo σ , utilizzando la seguente formula:

$$\sigma = \frac{F_i}{A_i} \quad [MPa]$$

- la deformazione ε è ottenuta a partire dalla deformazione attraverso la seguente formula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad [\%]$$

dove ΔL rappresenta l'allungamento del provino registrato attraverso dai trasduttori verticali.

3.2.4 Prova di taglio con precompressione

Per determinare il comportamento di taglio con precompressione della parete si è effettuata una prova il cui procedimento si riferisce all'articolo "Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6" [22] e allo studio sperimentale "Experimental study of the mechanical behaviour of a new extruded earth block masonry" [23]

Set-up e svolgimento della prova di taglio con precompressione

La prova di taglio con precarico è stata eseguita su entrambi i campioni esaminati A1 e A2, aventi le stesse dimensioni e costruiti con lo stesso tipo di blocco cassetto in legno-cemento.

Le due spinte verticale e orizzontale sono applicate uniformemente. In entrambi i casi la forza verticale di precompressione trasferita dai martinetti in sommità è di 500 kN, mentre la spinta orizzontale applicata alle pareti è pari a 290 kN (campione A1) e 300 kN (campione A2).

Inoltre, nella prova di taglio con precompressione, per motivi funzionali di contrasto degli spostamenti, è stato aggiunto un ulteriore martinetto orizzontale nella parte inferiore del campione per l'applicazione, tramite una pompa manuale, di un carico.

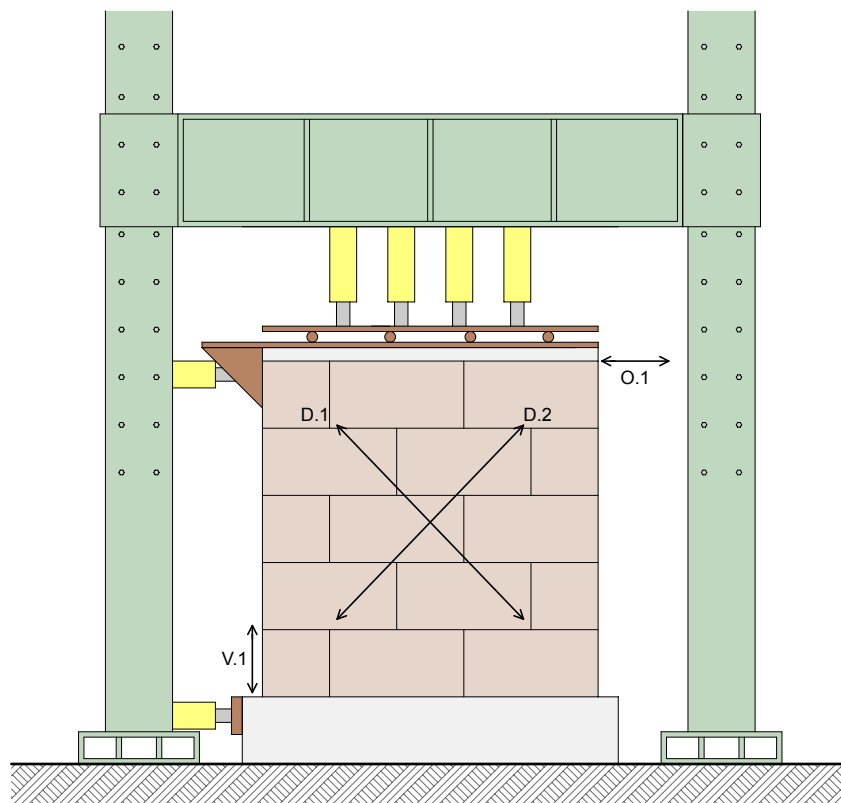
Al fine di ottenere un valore dello spostamento epurato da eventuali scorrimenti, viene registrato anche lo spostamento orizzontale in sommità del campione. Il valore dello spostamento orizzontale superiore della parete durante lo svolgimento della prova, verrà quindi sottratto per ottenere il "drift" del pannello.

Viene inoltre registrato attraverso un ulteriore trasduttore l'eventuale sollevamento (verticale) del pannello, nella parte del pannello ipotizzata a trazione, dovuta alla rotazione rigida del pannello.

Di seguito sono descritti i trasduttori in base alla loro funzione e posizione rispetto al campione (*Fig.34*):

- **O.1** Il trasduttore viene posizionato in testa al campione e viene utilizzato per la lettura dello spostamento orizzontale del pannello. Attraverso la sua misurazione consente di definire il "drift" subito dalla parete, depurando quindi eventuali scorrimenti (*Fig.35*);

- **V.1** Il trasduttore è fissato a terra e viene posizionato sul cordolo in c.a. al fine di misurare lo spostamento verticale del pannello. Tale spostamento viene registrato dato che, durante la fase di carico, è ipotizzabile una rotazione rigida del pannello (*Fig.36*).
- **D.1** Il trasduttore viene utilizzato per la misurazione dello spostamento obliquo e viene posizionato sulla diagonale del pannello. Questo trasduttore consente una lettura delle componenti verticali e orizzontali degli spostamenti interni alla parete (*Fig.37*).
- **D.2** Il trasduttore viene utilizzato per la misurazione dello spostamento obliquo e viene posizionato sulla diagonale, opposta a quella di D.1, del pannello. Questo trasduttore permette una lettura delle componenti verticali e orizzontali degli spostamenti interni al pannello (*Fig.37*).



LEGENDA:

- O.1 Trasduttore spostamento orizzontale in testa
- V.1 Trasduttore spostamento verticale su cordolo in c.a.
- D.1 Trasduttore spostamento diagonale
- D.2 Trasduttore spostamento diagonale

Fig.34 - Posizione e legenda dei trasduttori prova a taglio con precompressione



Fig.35 – Predisposizione del trasduttore O.1



Fig.36 – Predisposizione del trasduttore V.1



Fig.37 – Predisposizione dei trasduttori D.1 e D.2

Metodi per la prova di taglio con precompressione

Dall'elaborazione dei dati sperimentali della prova di taglio con precompressione, è possibile tracciare il diagramma Tensione-Scorrimento angolare, le cui grandezze sono:

- la tensione tangenziale τ è determinata attraverso la seguente formula

$$\tau = \frac{F_i}{A_n} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$$

dove:

τ è la sollecitazione di taglio di un singolo provino $\left[\frac{N}{mm^2} \right]$

F_i è il taglio applicato parallelamente al pannello [N]

A_n è l'area netta della superficie normale al verso di applicazione della forza, ed è uguale a $A_n = b s$, dove b è la base del provino in mm, s è lo spessore del provino in mm

- lo scorrimento angolare γ stato ricavato come, cioè tramite il rapporto tra lo spostamento orizzontale del campione e la sua altezza:

$$\gamma = \frac{\Delta_L}{H} \quad [\%]$$

dove:

Δ_L è lo spostamento orizzontale misurato dal trasduttore;

H è l'altezza del campione esaminato.

Per determinare la resistenza a taglio, si considera lo sforzo massimo di taglio τ_{\max} .

3.3 Studio sperimentale termico

3.3.1 Metodo di analisi regime stazionario

Trasmittanza termica

La norma UNI EN ISO 6946:2008 [16] definisce per gli elementi opachi la resistenza termica e la trasmittanza termica.

La trasmittanza termica U , nell'ipotesi di regime stazionario, flusso monodirezionale ambienti isotermi, rappresenta quanto flusso di calore attraversa una struttura di 1 m^2 con differenza di ambienti di 1 K . La sua unità di misura è $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, viene calcolata in regime stazionario (cioè non dipendente dal tempo) fissando una temperatura interna media (T_i) e una temperatura esterna (T_e) costante come quella minima raggiungibile nella località. La trasmittanza termica viene calcolata come l'inverso della resistenza termica totale della struttura (R_T) che confina tra due ambienti a temperatura dell'aria diversa:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

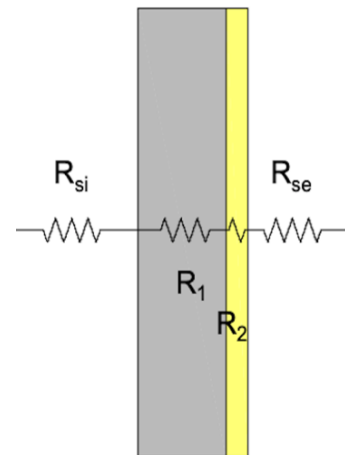
La resistenza termica R_T differisce in base alla tipologia di strato, si hanno dunque le due seguenti formule:

- per *strati omogenei* la resistenza termica è calcolata come:

$$R_T = R_{si} + \sum_i R_i + R_{se}$$

dove R_{si} = resistenza termica superficiale interna

R_{se} = resistenza termica superficiale esterna



In condizioni normali si possono usare i valori di resistenza termica superficiale interna (R_{si}) e di resistenza termica superficiale esterna (R_{se}) forniti dalla norma, come di seguito riportati.

Condizioni normali esterne:

$$\varepsilon = 0,9$$

h_{ro} relativo a 0 °C

$$v = 4 \text{ m/s}$$

Condizioni normali interne:

$$\varepsilon = 0,9$$

h_{ro} relativo a 20 °C

		Direzione del flusso termico		
		Ascendente	Orizzontale	Discendente
Resistenze superficiali	R_{si}	0,10	0,13	0,17
	R_{se}	0,04	0,04	0,04

Le R_i sono le resistenze termiche dei singoli strati di un componente, quando questi sono costituiti da materiali omogenei sono calcolate attraverso la relazione:

$$R_i = \frac{d}{\lambda} \left[\frac{K}{W} \right]$$

dove d = spessore dello strato del componente

λ = conducibilità termica utile ricavata da valori tabulati riportati nella UNI 10351:2015 [24]

La resistenza termica R_i di un'intercapedine d'aria vi presa da valori tabellati forniti dalla norma, quando:

- essa è limitata da due facce effettivamente parallele o perpendicolari alla direzione del flusso termico e con un'emissività non minore di 0,8;
- il suo spessore (nella direzione del flusso termico) sia minore del 10% delle altre due dimensioni e comunque minore di 0,3 m.

Resistenza termica (in $m^2 \times K/W$) di intercapedini d'aria non ventilate: superfici ad alta emissività

Spessore intercapedine d'aria mm	Senso del flusso termico		
	Ascendente	Orizzontale	Discendente
0	0,00	0,00	0,00
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
50	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23

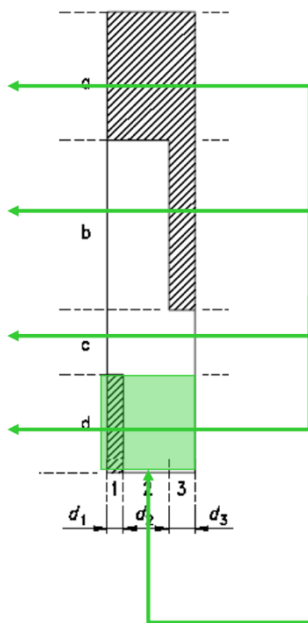
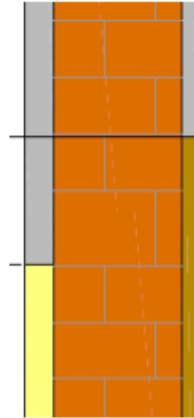
Nota - I valori intermedi possono essere ottenuti per interpolazione lineare.

Per strati omogenei ed eterogenei la resistenza termica si calcola mediante la relazione:

$$R_T = \frac{R_T' + R_T''}{2} \quad \left[\frac{K}{W} \right]$$

dove: R_T' = limite superiore della resistenza termica totale

R_T'' = limite inferiore della resistenza termica totale

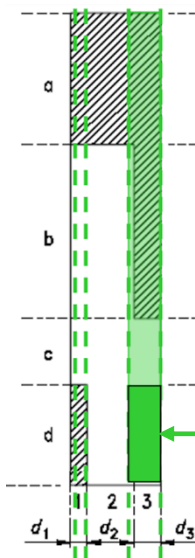


Il limite superiore R_T' della resistenza termica totale è determinato supponendo il flusso termico unidirezionale e perpendicolare alle superfici:

$$\frac{1}{R_T'} = \frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \frac{f_c}{R_{Tc}} + \frac{f_d}{R_{Td}} + \dots + \frac{f_q}{R_{Tq}} \quad (\text{resistenze in parallelo})$$

Resistenza termica totale R_{Td} relativa a ciascuna sezione calcolata come visto in precedenza per gli strati omogenei:

$$R_{Td} = R_{si} + \sum_i R_i + R_{se}$$



Il limite inferiore R_T'' della resistenza termica totale lo si determina supponendo che tutti i piani paralleli alla superficie del componente siano isotermi:

$$R_T'' = R_{si} + R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_{se} \quad (\text{resistenze in serie})$$

$$\frac{1}{R_3} = \frac{f_a}{R_{a3}} + \frac{f_b}{R_{b3}} + \frac{f_c}{R_{c3}} + \frac{f_d}{R_{d3}} + \dots + \frac{f_q}{R_{q3}}$$

Calcolo trasmittanza termica

Nel caso specifico, dato che ciascun blocco-cassero che costituisce i campioni di indagine presenta due elementi trasversali all'interno della parete, il calcolo della trasmittanza termica è stato sviluppato secondo le relazioni precedentemente illustrate relative a strati omogenei ed eterogenei.

Nelle seguenti tabelle sono riassunti i materiali e le caratteristiche degli stessi, necessarie per il calcolo della trasmittanza stazionaria U (W/m^2K).

Campione B1: parete priva del cemento armato

PARETE SENZA MONTANTE

		spessore (cm)	λ (W/mK)	R (mq K/W)	
	Rsi			0,13	
1	Legno mineralizzato	4,50	0,07	0,64	
2	Eps con grafite	14,00	0,035	4,00	
3	Intercapedine aria	15,00		0,19	
4	Legno mineralizzato	4,50	0,07	0,64	
	Rse			0,04	
				Rtot	5,641
				Utot	0,177

Tab.6 – Caratteristiche dei componenti della parete B1 non considerando il montante

PARETE CON MONTANTE

		spessore (cm)	λ (W/mK)	R (mq K/W)	
	Rsi			0,13	
1	Legno mineralizzato	4,50	0,07	0,64	
2	Eps con grafite	14,00	0,035	4,00	
3	Legno mineralizzato trasversale	5,00	0,07	0,71	
4	Legno mineralizzato	4,50	0,07	0,64	
	Rse			0,04	
				Rtot	6,170
				Utot	0,162

Tab.7 – Caratteristiche dei componenti della parete B1 considerando il montante

Da cui risulta che il campione B1 ha una trasmittanza termica finale pari a:

$$U = \frac{1}{R_{\text{tot}}} = \mathbf{0,18 \text{ W/m}^2\text{K.}}$$

Campione B2: parete completa di getto e intonaco

PARETE SENZA MONTANTE

		spessore (cm)	λ (W/mK)	R (mq K/W)	
	Rsi			0,13	
1	Intonaco esterno	1,50	1,00	0,02	
2	Legno mineralizzato	4,50	0,07	0,64	
3	Eps con grafite	14,00	0,035	4,00	
4	Cemento armato	15,00	2,30	0,07	
5	Cemento armato	5,00	2,30	0,02	
6	Legno mineralizzato	4,50	0,07	0,64	
7	Intonaco esterno	1,50	1,00	0,02	
	Rse			0,04	
				Rtot	5,573
				Utot	0,179

Tab.8 – Caratteristiche dei componenti della parete B2 non considerando il montante

PARETE CON MONTANTE

		spessore (cm)	λ (W/mK)	R (mq K/W)	
	Rsi			0,13	
1	Intonaco esterno	1,5	1	0,02	
2	Legno mineralizzato	4,5	0,07	0,64	
3	Eps con grafite	14	0,035	4,00	
4	Cemento armato	15	2,3	0,07	
5	Legno mineralizzato trasversale	5	0,07	0,71	
6	Legno mineralizzato	4,5	0,07	0,64	
7	Intonaco esterno	1,5	1	0,02	
	Rse			0,04	
				Rtot	6,265
				Utot	0,160

Tab.9 – Caratteristiche dei componenti della parete B2 non considerando il montante

Da cui risulta che il campione B2 ha una trasmittanza termica finale pari a:

$$U = \frac{1}{R_{\text{tot}}} = \mathbf{0,18 \text{ W/m}^2\text{K}}.$$

Come ci si aspettava, dai calcoli sviluppati si evidenzia come il valore della trasmittanza termica calcolato per il campione B1 (privo di calcestruzzo e di intonaco) sia uguale a quello relativo al campione B2, in virtù del fatto che l'isolante eps additivato con grafite all'interno delle due pareti è lo stesso ed è questo strato a dettare il valore della trasmittanza.

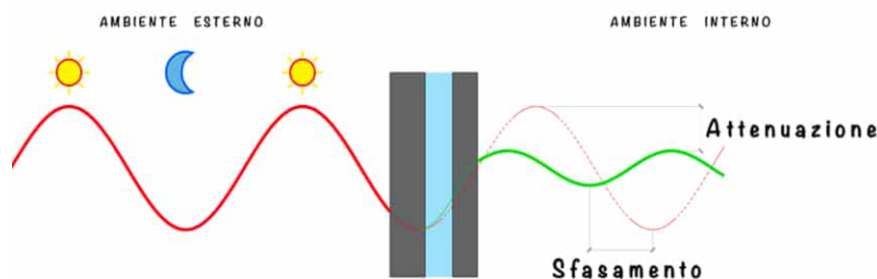
Inoltre la correttezza dei risultati è avvalorata dal medesimo valore di trasmittanza fornito dal produttore dei blocchi cassero.

3.3.2 Metodi di analisi regime dinamico

Sebbene in genere per semplicità il calcolo delle dispersioni termiche attraverso le pareti esterne viene eseguito in regime stazionario, per un'analisi del comportamento delle pareti più vicina alla realtà, il calcolo delle dispersioni termiche deve essere condotto in regime termico dinamico.

Esso viene misurato determinando, durante l'arco della giornata, variazioni tra la temperatura esterna e quella interna secondo leggi che si possono approssimare a sinusoidi.

L'effetto combinato dell'accumulo termico o capacità termica e della resistenza termica che subisce la parete, viene denominato inerzia termica.



Il ritardo con cui l'onda termica proveniente dall'esterno, si manifesta alla faccia interna della parete, può consentire di avere ambienti con involucri freschi quando all'esterno si ha il massimo dell'irraggiamento solare o della temperatura dell'aria.

Gli effetti più importanti dell'inerzia termica di una parete sono lo sfasamento e lo smorzamento.

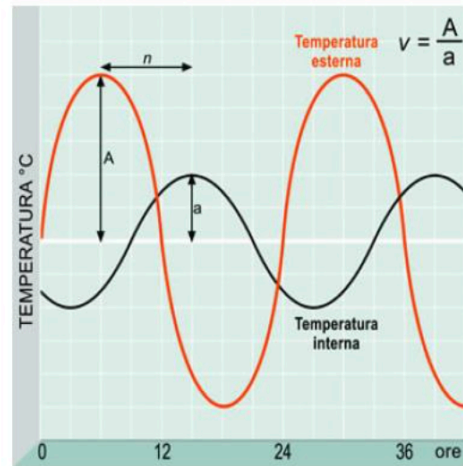
Lo sfasamento è lo slittamento temporale del passaggio di calore dall'esterno all'interno di una superficie, mentre lo smorzamento dell'ampiezza dell'onda è la riduzione dell'intensità dell'energia che attraversa la struttura.

Questo significa che, grazie all'inerzia termica, una parete è in grado di assorbire energia in un dato momento, accumularla e rilasciarla nell'ambiente confinante in un momento successivo. Grazie a questi meccanismi, si riducono notevolmente le oscillazioni interne delle temperature.

I vantaggi descritti diventano chiari se la valutazione e la simulazione del comportamento dell'edificio vengono fatti secondo un regime dinamico (più simile alla realtà), piuttosto che secondo un calcolo statico che non tiene conto del variare giornaliero delle temperature.

La caratterizzazione del comportamento delle pareti in regime dinamico, ovvero in condizioni al contorno variabili (temperatura esterna, radiazione solare incidente, ecc..) è complessa, ma può essere semplificata secondo un'armonica semplice di periodo temporale costante come, ad esempio, una sinusoide.

La procedura ipotizza che le temperature e i flussi termici abbiano la forma di sinusoidi che, attraversando la parete, subiscono una attenuazione ed uno sfasamento.



Secondo l'approccio indicato nella EN ISO 13786 [25], nelle ipotesi di flusso termico monodimensionale, di un mezzo omogeneo ed isotropo con diffusività termica α e, in assenza di generazione interna di calore, per affrontare lo studio della conduzione in regime dinamico è necessario risolvere l'equazione di Fourier:

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0 \quad \text{dove } \alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p}$$

Si suppone che sulla faccia di entrata della parete, ossia per $x=0$, la temperatura vari con la legge:

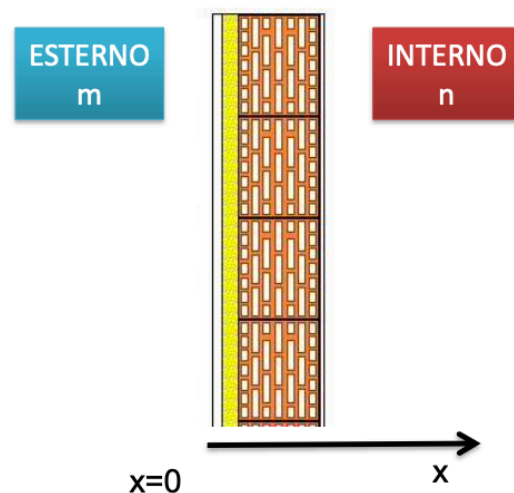
$$T_{x=0} = A \cdot \text{sen}(\omega t)$$

dove con:

A ampiezza dell'onda sinusoidale

ω pulsazione (frequenza angolare)

t tempo



L'ampiezza dell'onda A dipende dall'escursione termica giornaliera estiva e viene determinata secondo la relazione:

$$A = \frac{\Delta\theta_{\max}}{2}$$

nella quale i valori di $\Delta\theta_{\max}$ variano in base alla provincia in cui si trova l'edificio e vengono riportati nel Prospetto XVI – Temperatura ed ampiezza massima estiva della UNI 10349:2016 [26].

Prospetto XVI — Temperatura ed ampiezza massime estive

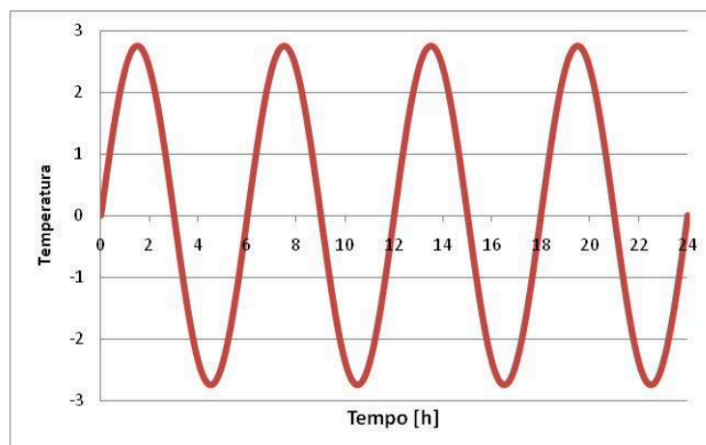
N°	Sigla Provincia	Località	Altitudine m	θ_{\max} °C	$\Delta\theta_{\max}$ °C
1	AG	Agrigento	230	33,0	10
2	AL	Alessandria	95	30,5	11
3	AN	Ancona	16	30,1	5,5
4	AO	Aosta	583	28,7	13

La pulsazione dell'onda sinusoidale ω , determinata dal periodo P, produce una traslazione del grafico della funzione e misura la velocità con cui viene effettuata un'oscillazione completa.

È definita attraverso la seguente espressione:

$$\omega = \frac{2\pi}{P}$$

dove P rappresenta il periodo, ovvero il tempo necessario per far compiere al segnale lo stesso percorso, viene considerato pari a 24 ore.

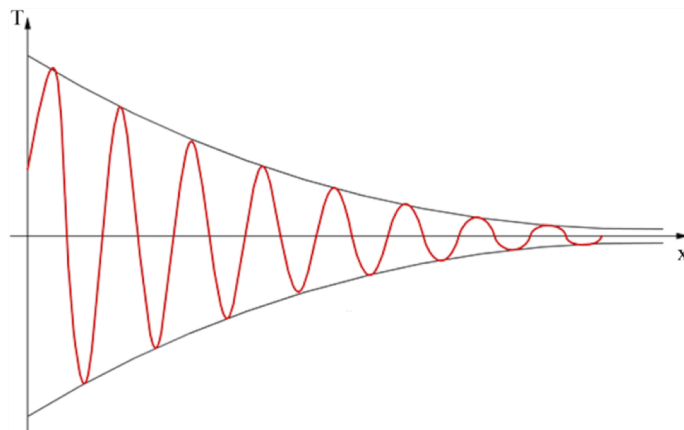


È ragionevole pensare che, in ogni punto interno alla parete, la temperatura oscilli seguendo il ritmo della faccia esterna e che l'ampiezza delle oscillazioni vada decrescendo man mano che si penetri nella parete.

In corrispondenza della profondità x , la temperatura assumerà la seguente espressione:

$$T_x = B(x) \cdot \text{sen}(\omega t - bx)$$

in questo caso, la grandezza $B(x)$ indica l'ampiezza della sinusoidale mentre bx rappresenta lo sfasamento dell'onda.



Sostituendo T_x nell'equazione di Fourier

$$T_x = B(x) \cdot \text{sen}(\omega t - bx) \longrightarrow \frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$$

e imponendo le seguenti condizioni al contorno

$$\text{per } x = 0 \quad T_x = A \cdot \text{sen}(\omega t)$$

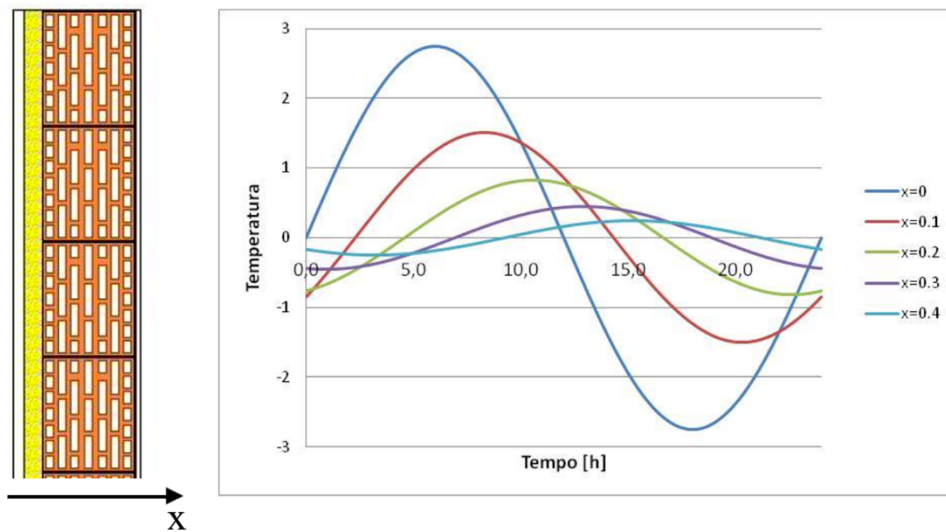
$$\text{per } x = \infty \quad T_x = 0 \quad (\text{strato semi-infinito})$$

si ottiene:

$$b = \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$$

da cui si arriva alla seguente espressione:

$$T_x = A e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x} \cdot \text{sen}\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x\right)$$



Poiché, man mano che si penetra nella parete, le oscillazioni più rapide vanno estinguendosi (vengono attenuate e ritardate di più di quelle lente), una volta raggiunta una certa profondità, l'onda di temperatura sarà praticamente sinusoidale, cioè ridotta alla fondamentale di periodo 24 ore.

La profondità a cui accade quanto appena affermato, dipende non solo dalla frequenza, ma anche dalla diffusività α del mezzo attraversato.

Parametri termici dinamici

Per il calcolo dei parametri termici dinamici l'analisi energetica deve essere condotta in regime dinamico o transitorio, ovvero il fattore "tempo" non può essere trascurato, poiché l'accumulo ed il rilascio energetico istante per istante delle varie componenti fa parte del fenomeno da analizzare.

Pertanto in questo caso, a differenza del regime stazionario, all'interno della struttura il flusso non è più costante e la distribuzione della temperatura non è più legata esclusivamente alla conduttività dei materiali.

Considerando un componente, sottoposto da un lato ad una sollecitazione termica periodica e con temperatura costante nell'altra estremità, nella norma UNI 13786:2008 [24] si definiscono i seguenti parametri termici dinamici:

- trasmittanza termica periodica Y_{ie} , definita come il rapporto tra il flusso termico periodico che attraversa l'unità di superficie su un lato del componente (lato interno, pedice "i" o "1") e la sollecitazione termica periodica sull'altro lato (lato

esterno, pedice “e” o “2”) nell’ipotesi che la temperatura ambiente sul primo lato sia costante:

$$Y_{ie} = \frac{\hat{q}_i}{\hat{\theta}_e}$$

dove con

\hat{q}_i ampiezza complessa del flusso termico sul lato interno;

$\hat{\theta}_e$ ampiezza complessa del flusso termico sul lato esterno;

- ammettenza Y , è il rapporto tra il flusso termico periodico che attraversa l’unità di superficie su un lato del componente e la sollecitazione termica periodica sullo stesso lato nell’ipotesi che la temperatura ambiente sull’altro lato del componente sia costante; si hanno in generale due ammettenze diverse sui due lati di un componente, un’ammettenza interna Y_{ii} ed una esterna Y_{ee} :

$$Y_{ii} = \frac{\hat{q}_i}{\hat{\theta}_i} \quad Y_{ee} = \frac{\hat{q}_e}{\hat{\theta}_e}$$

dove con

\hat{q}_i / \hat{q}_e ampiezza complessa del flusso termico sul lato interno ed esterno;

$\hat{\theta}_i / \hat{\theta}_e$ ampiezza complessa della temperatura sul lato interno ed esterno;

- capacità termica areica K , è il rapporto tra la variazione di energia accumulata per unità di superficie in un componente nel periodo di tempo e la sollecitazione termica periodica su un lato nell’ipotesi che la temperatura ambiente sull’altro lato del componente sia costante; a seconda che si consideri la sollecitazione sul lato interno o sul lato esterno si parla di capacità termica interna K_i o esterna K_e ;
- attenuazione o fattore di decremento f , è il rapporto tra il modulo della trasmittanza termica periodica e la trasmittanza termica in condizioni stazionarie U :

$$f = \frac{|Y_{ie}|}{U}$$

- sfasamento o ritardo temporale dell'onda termica φ , si definisce come il periodo di tempo tra il valore massimo della sollecitazione termica ed il massimo del suo effetto;
- profondità di penetrazione periodica δ , che si definisce come la profondità alla quale l'ampiezza delle variazioni di temperatura è ridotta di un fattore e (base dei logaritmi naturali e $\approx 2,718$) in un materiale omogeneo di spessore infinito soggetto a variazioni sinusoidali di temperatura sulla sua superficie:

$$\delta = \sqrt{\frac{P \lambda}{\pi c \rho}} = \sqrt{\frac{P}{\pi} \alpha}$$

dove con

P periodo dell'oscillazione [s]; nella letteratura tecnica e nella normativa gli indici prestazionali del comportamento termico dinamico di una parete vengono riferiti a $P=24h$;

λ conduttività termica del materiale [W/(mK)];

c capacità termica specifica [J/kgK];

ρ densità o massa volumica [kg/m³];

α diffusività termica, parametro utile a valutare l'attitudine di un materiale alla riduzione dell'onda termica estiva: minore è il suo valore, maggiore risulterà il contributo del materiale nell'attenuare e sfasare l'onda termica entrante;

Il metodo di calcolo per i parametri termici dinamici è contenuto nella UNI EN ISO 13786:2008 [24]: si basa sulla risoluzione dell'equazione del calore con condizioni al contorno periodiche, di periodo P .

Per uno strato omogeneo con conduttività λ , densità ρ e calore specifico c , la distribuzione di temperatura θ ed il flusso specifico q , si ricavano dalle equazioni:

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = \frac{\lambda}{c \rho} \frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial x^2}$$

$$q(x, t) = -\lambda \frac{\partial \theta(x, t)}{\partial x}$$

Supponendo quindi di avere condizioni di periodo P sui due lati e sviluppando in serie di Fourier, si ottengono le seguenti equazioni della temperatura e del flusso in funzione del tempo:

$$\theta_n(t) = \bar{\theta}_n + |\hat{\theta}_n| \cos(\omega t + \psi) = \bar{\theta}_n + \frac{1}{2} [\hat{\theta}_{+n} e^{j\omega t} + \hat{\theta}_{-n} e^{-j\omega t}]$$

$$q_n(t) = \bar{q}_n + |\hat{q}_n| \cos(\omega t + \varphi) = \bar{q}_n + \frac{1}{2} [\hat{q}_{+n} e^{j\omega t} + \hat{q}_{-n} e^{-j\omega t}]$$

dove

$\bar{\theta}_n$ e $\bar{\Phi}_n$ sono i valori medi della temperatura e del flusso termico;

$|\hat{\theta}_n|$ e $|\hat{q}_n|$ sono le ampiezze delle variazioni della temperatura e del flusso termico;

$\hat{\theta}_{\pm n}$ e $\hat{q}_{\pm n}$ sono le ampiezze complesse definite da:

$$\hat{\theta}_{\pm n} = |\hat{\theta}_n| e^{\pm j\psi} \quad \hat{q}_{\pm n} = |\hat{q}_n| e^{\pm j\varphi}$$

ω è la frequenza angolare delle variazioni.

La soluzione al problema dinamico può essere rappresentata in forma matriciale attraverso la matrice Z, con la quale si mettono in relazione le ampiezze complesse della temperatura e del flusso termico su un lato di un componente con le ampiezze complesse della temperatura e del flusso termico sull'altro lato:

$$\begin{pmatrix} \hat{\theta}_2 \\ \hat{q}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\theta}_1 \\ \hat{q}_1 \end{pmatrix}$$

in cui gli elementi della matrice sono calcolati come segue:

$$Z_{11} = Z_{22} = \cosh(\xi) \cos(\xi) + j \sinh(\xi) \sin(\xi)$$

$$Z_{12} = -\frac{\delta}{2\lambda} \{ \sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi) + j [\cosh(\xi) \sin(\xi) - \sinh(\xi) \cos(\xi)] \}$$

$$Z_{21} = -\frac{\lambda}{\delta} \{ \sinh(\xi) \cos(\xi) - \cosh(\xi) \sin(\xi) + j [\sinh(\xi) \cos(\xi) + \cosh(\xi) \sin(\xi)] \}$$

dove ξ è il rapporto tra lo spessore e la profondità di penetrazione:

$$\xi = \frac{d}{\delta}$$

Nel caso in cui lo strato è costituito da un'intercapedine d'aria, la capacità specifica ($C = c \cdot \rho$) viene trascurata, per cui la matrice risulta:

$$Z_a = \begin{pmatrix} 1 & -R \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La matrice di trasferimento di strutture composte da N strati omogenei viene calcolata come prodotto delle matrici di ogni strato (inclusi gli strati liminari), partendo dallo strato più esterno fino a quello più interno:

$$Z_a = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} = Z_e Z_1 Z_2 \dots Z_N Z_i$$

dove $Z_1 Z_2 \dots Z_N$ sono le matrici degli N strati con Z_e e Z_i matrici degli strati liminari rispettivamente esterno ed interno.

Conoscendo la matrice completa è possibile ricavare i parametri dinamici della parete.

La trasmittanza termica periodica Y_{ie} è data da:

$$Y_{ie} = \frac{1}{|Z_{12}|}$$

Le ammettenze termiche interna Y_{ii} ed esterna Y_{ee} si ricavano come:

$$Y_{ie} = \left| \frac{Z_{11}}{Z_{12}} \right| \quad Y_{ee} = \left| \frac{Z_{22}}{Z_{12}} \right|$$

Mentre la variazione temporale delle ammettenze interna φ_{ii} ed esterna φ_{ee} è data da:

$$\varphi_{ii} = \frac{T}{2\pi} \arg(Y_{ii}) \quad \varphi_{ee} = \frac{T}{2\pi} \arg(Y_{ee})$$

Il fattore di decremento f è dato da:

$$f = \frac{|Y_{ie}|}{U}$$

Le capacità termiche areiche interna K_1 ed esterna K_2 si calcolano nel seguente modo:

$$K_1 = \frac{T}{2\pi} \left| \frac{Z_{11}-1}{Z_{12}} \right| \quad K_2 = \frac{T}{2\pi} \left| \frac{Z_{22}-1}{Z_{12}} \right|$$

Calcolo parametri dinamici

Seguendo il metodo di calcolo presente nella UNI EN ISO 13786:2008 [24], ed illustrato nel paragrafo precedente, sono stati calcolati i parametri dinamici relativi ai campioni analizzati (*Fig.38 e Fig.39*).

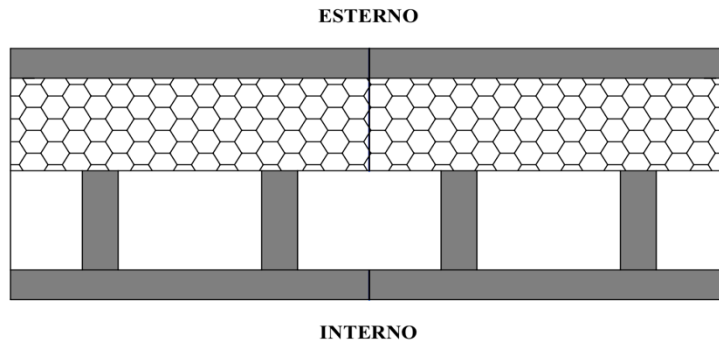


Fig.38 – Sezione campione B1

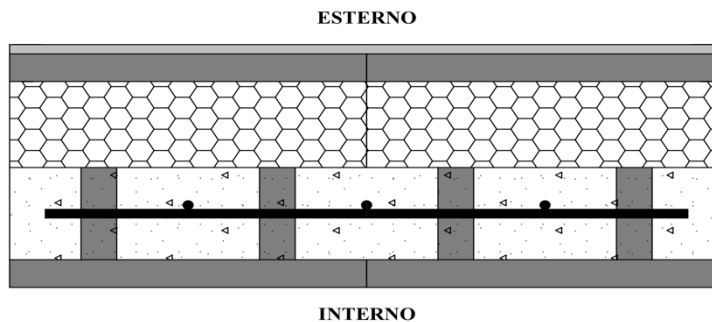


Fig.39 – Sezione campione B2

In particolare per la loro determinazione, la procedura è stata implementata in un file di calcolo tipo excel che, a differenza dei numerosi programmi di calcolo presenti in commercio che forniscono direttamente i risultati finali, consente una valutazione più dettagliata dei vari passaggi che portano al risultato finale e quindi ciò si traduce in un maggior controllo dei parametri che influiscono il comportamento dinamico della parete.

È stato adottato un periodo P pari a 24 ore, mentre i valori della resistenza termica superficie interna R_{si} ed esterna R_{se} sono stati considerati rispettivamente di $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ e di $0,04 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Successivamente sono state inserite nella tabella le caratteristiche dei materiali che costituiscono gli strati della parete (*Tab.10, Tab.11*):

Tipo di componente edilizio		Periodo delle variazioni termiche (ore)							24	
Chiusura verticale		Periodo delle variazioni termiche T							[sec]	86400
		Resistenza termica sup interna Rsi							[m2K/W]	0,13
		Resistenza termica sup esterna Rse							[m2K/W]	0,04
Descrizione degli strati		Spessore (s) [m]	Conduttività termica (l) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/KgK]	Densità (p) [Kg/m3]	Resistenza termica aria [m2K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m2K/w]
Rsi	aria	Strato laminare interno								0,130
1		legno mineralizzato	0,045	0,070	1880	160		0,080	0,562	0,643
2		eps 100 con grafite	0,140	0,035	1350,00	20		0,189	0,741	4,000
7		intercapedine d'aria					0,180	-	-	-
4		legno mineralizzato	0,045	0,070	1880	160		0,080	0,562	0,643
5								-	-	-
6								-	-	-
8								-	-	-
9								-	-	-
10								-	-	-
Rse	aria	Strato laminare esterno								0,040

Tab.10 – Caratteristiche dei materiali campione B1

Tipo di componente edilizio		Periodo delle variazioni termiche (ore)							24	
Chiusura verticale		Periodo delle variazioni termiche T							[sec]	86400
		Resistenza termica sup interna Rsi							[m2K/W]	0,13
		Resistenza termica sup esterna Rse							[m2K/W]	0,04
Descrizione degli strati		Spessore (s) [m]	Conduttività termica (l) [W/mK]	Resistenza termica [mqK/W]	Calore specifico (c) [J/KgK]	Densità (p) [Kg/m3]	Resistenza termica aria [m2K/W]	Profondità di penetrazione al periodo T (δ) [m]	ξ = s/d [-]	Resistenza termica [m2K/w]
Rsi	aria	Strato laminare interno								0,130
1		intonaco interno	0,015	0,570	1	1750		2,993	0,005	0,026
2		legno mineralizzato	0,045	0,070	1880	160		0,080	0,562	0,643
3		cemento armato	0,150	2,300	1000,00	2400		0,162	0,924	0,065
4		eps 100 con grafite	0,140	0,035	1350,00	20		0,189	0,741	4,000
5		legno mineralizzato	0,045	0,070	1880	160		0,080	0,562	0,643
6		intonaco esterno	0,015	0,570	1	1750		2,993	0,005	0,026
7								-	-	-
8								-	-	-
9								-	-	-
10								-	-	-
Rse	aria	Strato laminare esterno								0,040

Tab.11 – Caratteristiche dei materiali campione B2

In questo modo, seguendo la procedura della normativa, si ricavano automaticamente le caratteristiche termiche dinamiche della parete analizzata (Tab.12, Tab.13):

RISULTATI							
Regime periodico stabilizzato			T = 24 ore	Regime stazionario			
Fattore di decremento - attenuazione	fd	[-]	0,8753	Massa superficiale	Ms	[kg/m2] 17,20	
Ritardo fattore di decremento - sfasam	φ	[h]	3,83	Resistenza termica totale	Rt	[m2K/W] 5,456	
Trasmittanza termica periodica	Yie	[W/m2K]	0,1604	Trasmittanza	U	[W/m2K] 0,183	
Ammettenza termica lato interno	Yii	[W/m2K], [h]	0,924	-8,02	Conduttanza	C	[W/m2K] 0,189
Ammettenza termica lato esterno	Yee	[W/m2K], [h]	0,964	-7,73	Capacità termica areica	Cta	[kJ/m2K] 30,85
Capacità termica areica lato interno	Cip(2007)	[kJ/m2K]	14,59	13,85	Costante di tempo	τ	[h] 46,76
Capacità termica areica lato esterno	Cep(2007)	[kJ/m2K]	14,59	14,53			
Fattore di smorzamento superficiale interno			(esterno)				
Parete disperdente	fsd	[-]	0,880	0,875			
Parete interna	fsi	[-]	0,869	0,863			

Tab.12 – Caratteristiche termiche dinamiche campione B1

RISULTATI							
Regime periodico stabilizzato			T = 24 ore	Regime stazionario			
Fattore di decremento - attenuazione	fd	[-]	0,0495		Massa superficiale	Ms [kg/m ²]	429,70
Ritardo fattore di decremento - sfasament	φ	[h]	9,63		Resistenza termica totale	Rt [m ² K/W]	5,574
Trasmittanza termica periodica	 Yie 	[W/m ² K]	0,0089		Trasmittanza	U [W/m ² K]	0,179
Ammettenza termica lato interno	Yii	[W/m ² K], [h]	1,283	-11,16	Conduttanza	C [W/m ² K]	0,185
Ammettenza termica lato esterno	Yee	[W/m ² K], [h]	0,936	-7,87	Capacità termica areica	Cta [kJ/m ² K]	390,90
Capacità termica areica lato interno	Cip(2007)	[kJ/m ² K]	21,20	17,76	Costante di tempo	τ [h]	605,20
Capacità termica areica lato esterno	Cep(2007)	[kJ/m ² K]	13,24	12,99			
Fattore di smorzamento superficiale interno				(esterno)			
<i>Parete disperdente</i>	fsd	[-]	0,833	0,878			
<i>Parete interna</i>	fsi	[-]	0,832	0,877			

Tab.13 – Caratteristiche termiche dinamiche campione B2

3.3.3 Strumentazione

Nella sperimentazione termica sono stati utilizzati diverse apparecchiature, di seguito si riportano la loro funzione di utilizzo e le loro caratteristiche tecniche.

Sensori

Per la misurazione delle variazioni di temperatura e di flusso termico sono stati utilizzati:

- 10 termoresistente (*Fig.40*), sensori posizionati in aderenza alla superficie della parete consentono di rilevare la temperatura e l'umidità;
- 2 termoflussimetri (*Fig.41*), piastre poste sulla parete misurano il flusso di calore che attraversa la parete esaminata;
- 2 sonde (*Fig.42*), per la rilevazione della temperatura dell'aria;

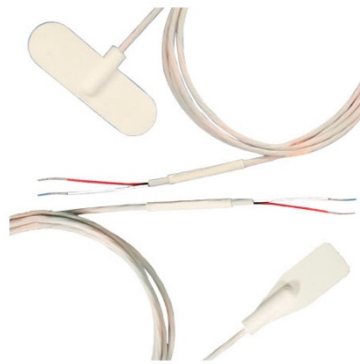


Fig.40 – Termoresistenza



Fig.41 – Termoflussimetro



Fig.42 – Sonda

Acquisitore dati

Per l'acquisizione ed interpolazione dei dati misurati dai sensori posti sulla parete, ci si è serviti di un Datalogger (*Fig.43*), programmabile tramite computer collegabile con una connessione seriale di tipo RS232.

Per registrare i dati acquisiti dal datalogger è necessario un software (Fig.44) utilizzabile dal web o direttamente dal computer, il quale consente di supervisionare e programmare i logger.



Fig.43 – Datalogger

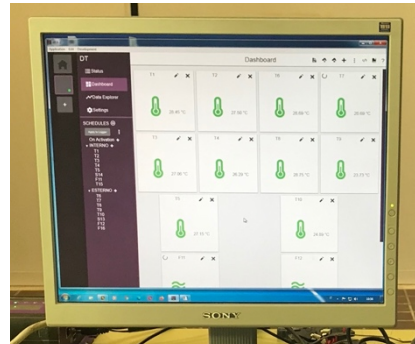


Fig.44 – Software

Lampade solari

Per simulare l'effetto di irraggiamento solare sui campioni, è stato costruito un supporto su cui collegare 4 lampade solari (Fig. 45) da 300 W.

Per aver una condizione verosimile alla realtà, il fascio di luce è stato direzionato sulla parete di un'inclinazione di circa 45° (pari alla latitudine di Ancona, dove si trova il laboratorio dell'Università Politecnica delle Marche nel quale si sta svolgendo la prova).

In questo modo, l'ombreggiamento garantito dalla lamiera è maggiore rispetto ad aver posizionato le lampade perpendicolarmente alla superficie.

Le lampade, poste ad una distanza di 60 cm dalla parete, forniscono sulla superficie della parete una radiazione solare di circa 1000 Watt/mq.



Fig.45 – Lampade solari

Ventilatori

Il movimento naturale dell'aria nel camino è “chiamato” effetto camino ed è guidato dal galleggiamento. La galleggiabilità è una forza verso l'alto che si verifica a causa di una differenza nella densità dell'aria dall'interno all'esterno derivante principalmente dalle differenze di temperatura.

L'aria che sale nel camino crea un tiraggio che aspira aria dal basso. Maggiore è la differenza termica tra la temperatura dell'aria interna ed esterna e l'altezza della struttura, maggiore è la forza di galleggiamento e quindi l'effetto camino.

La velocità dell'aria nel canale di ventilazione è espressa attraverso la seguente equazione:

$$v^2 = \frac{2Hg(\rho_e - \rho_i)}{\rho_i(fH/d + 1.5)}$$

dove:

v = velocità media dell'aria nella cavità [m/s];

H = altezza della cavità [m];

i = densità dell'aria esterna e interna [kg/m³], in funzione della temperatura, pressione e umidità dell'aria;

g = accelerazione gravitazionale [m/s²];

f=coefficiente di attrito;

d=diametro equivalente [m].

Per comprendere il comportamento di una parete è importante analizzare la differenza di temperatura tra l'aria esterna e l'aria nel canale che è la forza motrice dell'effetto camino.

La velocità dell'aria all'interno dell'intercapedine d'aria di 10 cm è stata regolata per mezzo di un set di ventilatori DC controllati a modulazione di larghezza di impulso (PWM). 13 ventilatori sono stati installati sopra il condotto dell'aria e collegati in serie all'alimentazione. Sono stati selezionati ventilatori ad alta velocità, con dimensioni nominali di 60 x 60 x 25 mm³ e portata d'aria massima di 67 m³/h (Fig. 46).

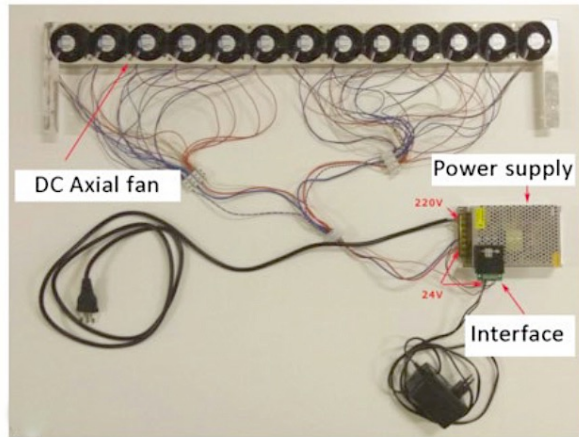


Fig.46 – Sistema di ventilazione

L'ingresso di potenza era regolato da un controller che traduceva l'ingresso di tensione analogico in un segnale PWM equivalente. L'intero sistema è stato supervisionato tramite un LabVIEW Virtual Instrument personalizzato. La Fig.47 mostra il prototipo ventilante sopra il condotto d'aria del campione.

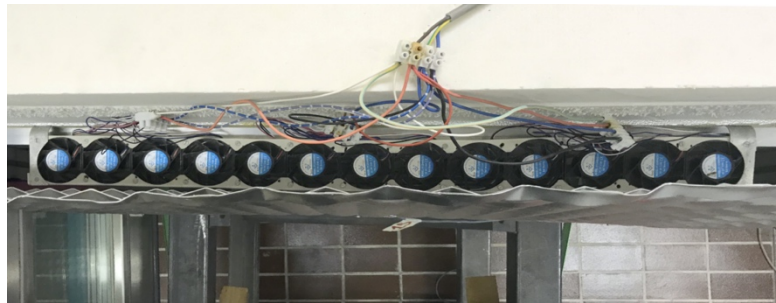


Fig.47 – Posizionamento dei ventilatori

Al fine di simulare un tiraggio realistico all'interno dell'intercapedine, attraverso l'anemometro (Fig.48) sono state fatte delle misurazioni della velocità dell'aria (Fig.49). Si è scelto di regolare il sistema di ventilazione a finché il tiraggio durante la sperimentazione sia di 0,2 m/s.



Fig.48 – Anemometro

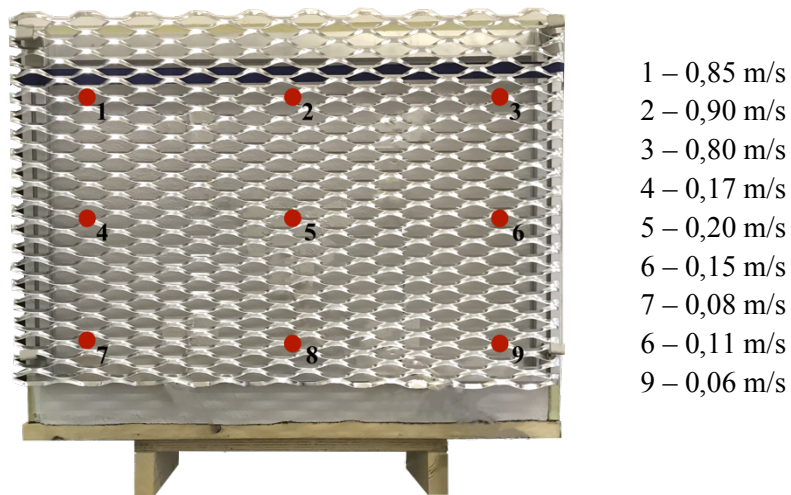


Fig.49 – Misurazione della velocità dell'aria

Camera climatica

La camera climatica utilizzata HYGROS H120, è caratterizzata da delle dimensioni interne di 1000x1097x890 mm, consente di ricreare delle condizioni climatiche da -40°C a +180°C, con una precisione di temperatura nel tempo di $\pm 0,25^\circ\text{C}$.

L'umidità relativa può essere impostata dal 10% al 98%, con una precisione che varia dal ± 1 al $\pm 3\%$. Mentre il punto di rugiada può variare da 2 a 94°C.



Fig.50 – Camera climatica

3.3.4 Set-up e svolgimento della prova in regime stazionario

Prima di effettuare il monitoraggio termico delle pareti esaminate, è stato necessario preparare l'ambiente ed i campioni per le misurazioni dei parametri termici.

Inizialmente sono stati collegati i sensori (termoresistenze, termoflussimetri, sonda di misurazione dell'aria), al datalogger per l'acquisizione e archiviazione dei dati rilevati.

Il datalogger è stato programmato affinché registrasse i dati ad intervalli di 30 secondi.

I sensori sono stati disposti nelle medesime posizioni per tutti i campioni esaminati.

La durata del monitoraggio è stata di 15 ore.

Per la valutazione del comportamento delle pareti in regime stazionario, in tutte le sperimentazioni stazionarie l'ambiente di laboratorio è stato considerato il lato esterno della parete, mentre la camera climatica ha simulato l'ambiente interno, nel quale sono state fissate le seguenti condizioni: temperatura costante per 5°C e 50% di umidità.



Fig.51 – Condizioni stazionarie

Campione B1

Si ricorda dal sottocapitolo 3.1.2, che il provino B1 (*Fig.52*), di dimensione 1,00x1,00 m, è costituito da blocchi cassero cavi, semplicemente posati gli uni sugli altri in maniera sfalsata. I giunti sono stilati attraverso stucco sigillante in modo da scongiurare eventuali fughe d'aria durante il monitoraggio del campione.

Inoltre sono stati aggiunti alle estremità dei pannelli isolanti, in modo da garantire una separazione dei due ambienti considerati.

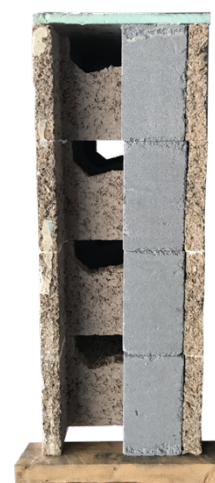


Fig.52 – Campione B1

Il campione è stato posizionato in modo tale che il suo lato esterno sia rivolto verso l'ambiente di laboratorio (considerato lato esterno), estremità dove è posizionato lo strato di 14 cm di eps additivato con grafite; mentre l'altro lato della parete è rivolto verso la camera climatica.

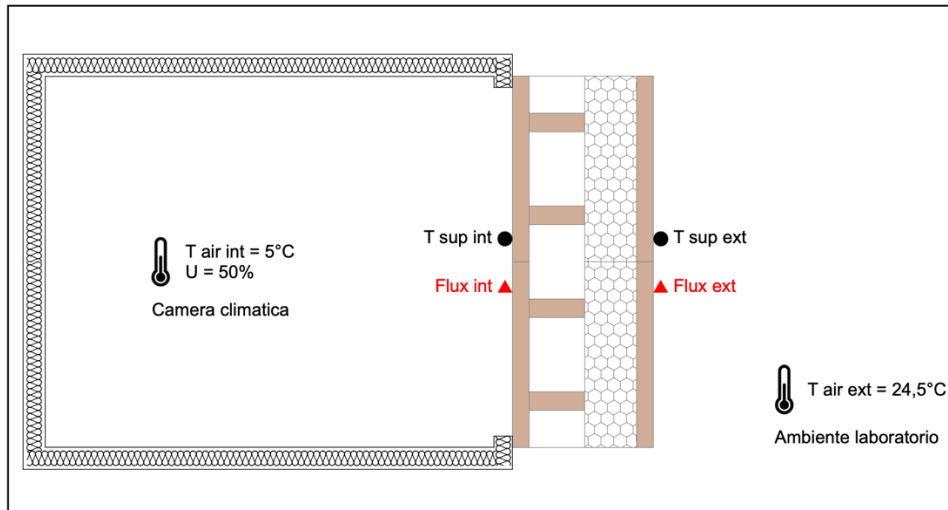


Fig.53 – Set-up regime stazionario campione B1



Fig.54 – Posizionamento dei sensori campione B1

Campione B2

Si ricorda dal sottocapitolo 3.1.2, che il provino B2 (*Fig.55*), di dimensione 1,00x0,75 m, è costituito da blocchi cassero al cui interno è stata inserita l'armatura metallica ed eseguito un getto di calcestruzzo. Inoltre è stato effettuato per uno spessore di 1,5 cm l'intonaco in entrambi i lati della parete.



Fig.55 – Campione B2

Il campione è stato posizionato in modo tale che il suo lato esterno sia rivolto verso l'ambiente di laboratorio, estremità dove è posizionato lo strato di 14 cm di eps additivato con grafite; mentre l'altro lato della parete è rivolto verso la camera climatica.

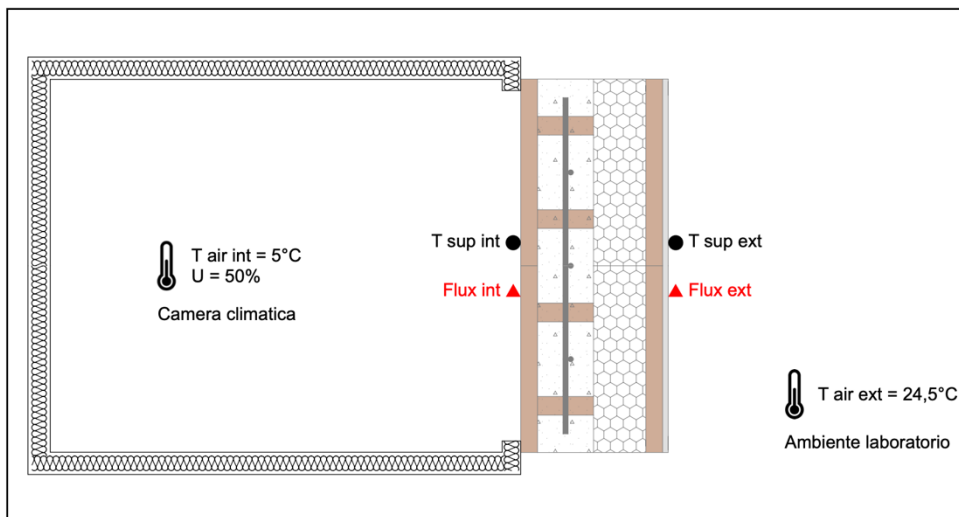


Fig.56 – Set-up regime stazionario campione B2

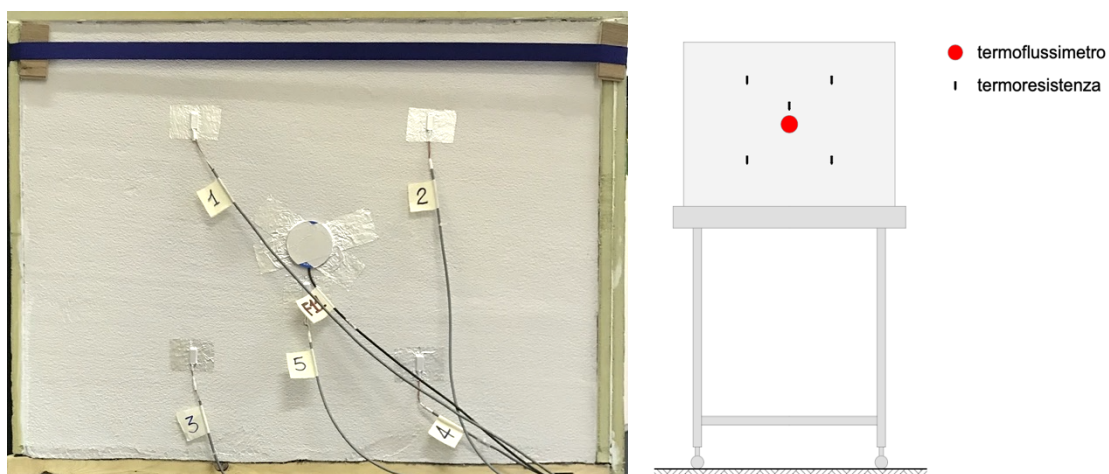


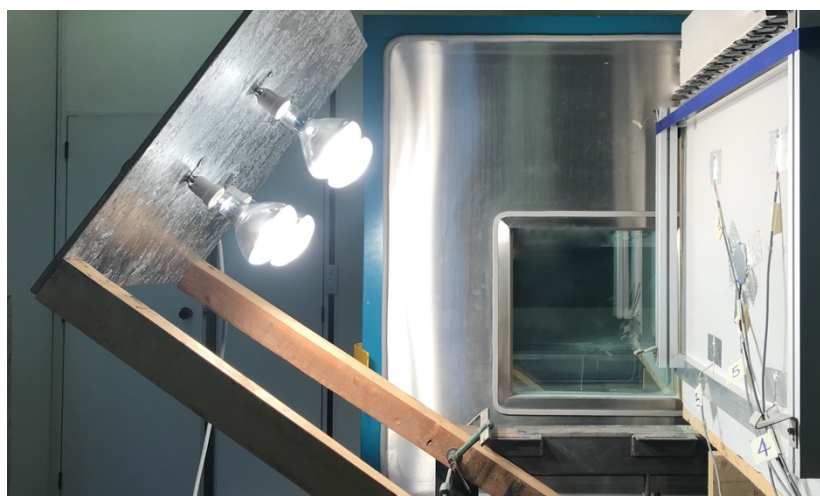
Fig.57 – Posizionamento dei sensori campione B2

Il campione B2 è stato esaminato in due condizioni, senza lampade solari simulando una giornata non soleggiata e successivamente monitorato per esaminare il suo comportamento quando è soggetto all'effetto di irraggiamento, ricreato tramite l'apposizione di lampade solari.

Per aver una condizione verosimile alla realtà, il fascio di luce è stato direzionato sulla parete di un'inclinazione di circa 45° (pari alla latitudine di Ancona, dove si trova il laboratorio dell'Università Politecnica delle Marche nel quale si sta svolgendo la prova).

In questo modo, l'ombreggiamento garantito dalla lamiera è maggiore rispetto ad aver posizionato le lampade perpendicolarmente alla superficie.

Le lampade, poste ad una distanza di 60 cm dalla parete, forniscono sulla superficie della parete una radiazione solare di circa 1000 Watt/mq.



Campione B3

Come illustrato nel capitolo 3.2.1, il campione B3 è ottenuto a partire dalla parete B2, a cui è stata aggiunta alternativamente due lamiere striate. Pertanto i sensori sulla superficie del campione saranno posti allo stesso modo come precedentemente illustrato e anche in questo caso il fascio di luce prodotto dalle lampade sarà inclinato a circa 45° e, al fine di avere sulla parete una radiazione media di 1000 W/mq le lampade saranno poste a 60 cm dalla lamiera. Inoltre è stata aggiunta una termoresistenza direttamente sulla lamiera.

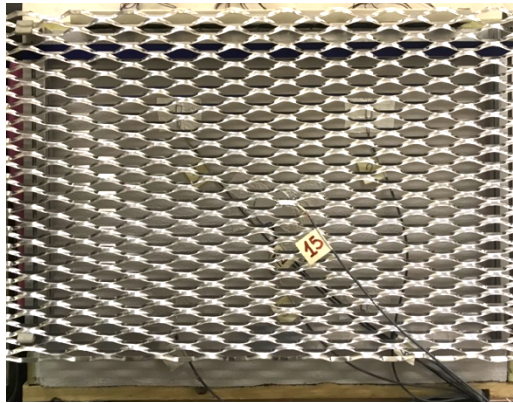


Fig.59 – Posizionamento dei sensori campione B3

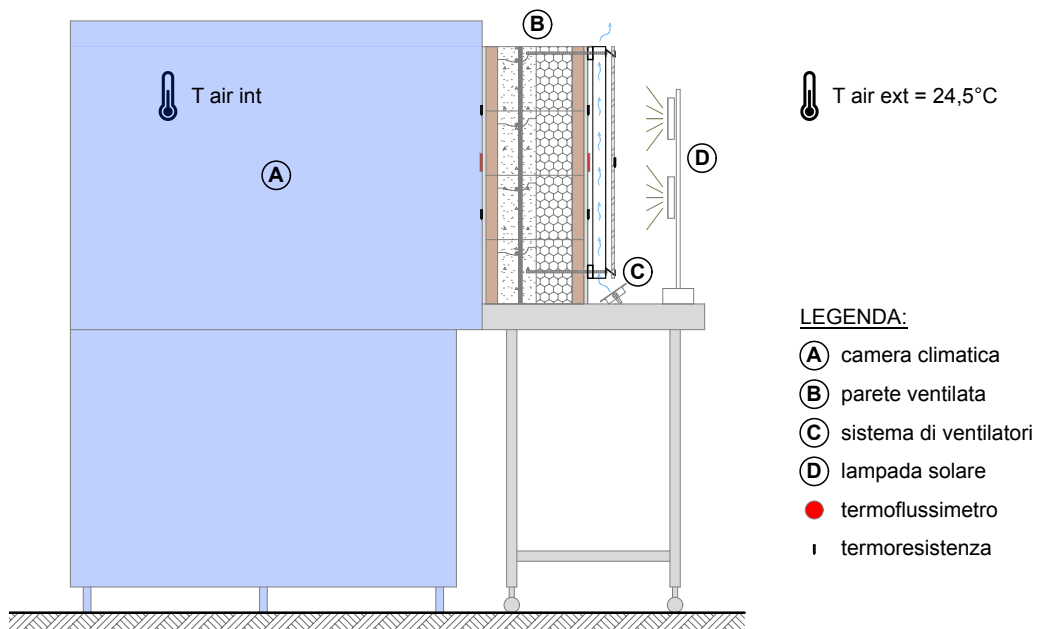


Fig.60 – Set-up campione B3

3.3.5 Set-up e svolgimento della prova in regime dinamico

L'obiettivo principale posto a monte di questa analisi è capire se, assegnato un impulso nel lato interno dell'involucro, influisce sul comportamento esterno della parete.

L'oscillazione imposta per 72 ore all'interno della camera climatica è costituita da una serie di impulsi secondo un andamento sinusoidale, di periodo temporale di 24 ore.

In particolare per lo studio della dinamicità della parete, viene imposto un impulso non riconducibile a nessuna condizione ambientale ma uno fittizio, come è stato applicato nella ricerca sperimentale "Dynamic thermal properties of building components"[27], dove fissando un impulso interno a temperature elevate, si è studiato nel lato esterno il cambiamento delle proprietà dei materiali. Ma questo non è il nostro caso, dato che la temperatura massima raggiunta è di $T_{\text{ari int}}=35^{\circ}\text{C}$.

Come mostrato nella Fig.61, le condizioni assegnate durante l'analisi del comportamento dinamico sono le seguenti:

- nel lato ambiente di laboratorio, considerato lato esterno dell'involucro, si ha una temperatura dell'aria $T_{\text{air ext}}$ di $24,5^{\circ}\text{C}$ misurata attraverso sonde di temperatura;
- nel lato camera climatica, ambiente interno della parete, sono stati assegnati una serie di impulsi di tipo sinusoidali che oscillano da una T_{max} di 35°C a una T_{min} di 14°C .

Tali condizioni saranno le medesime per tutte le pareti esaminate.

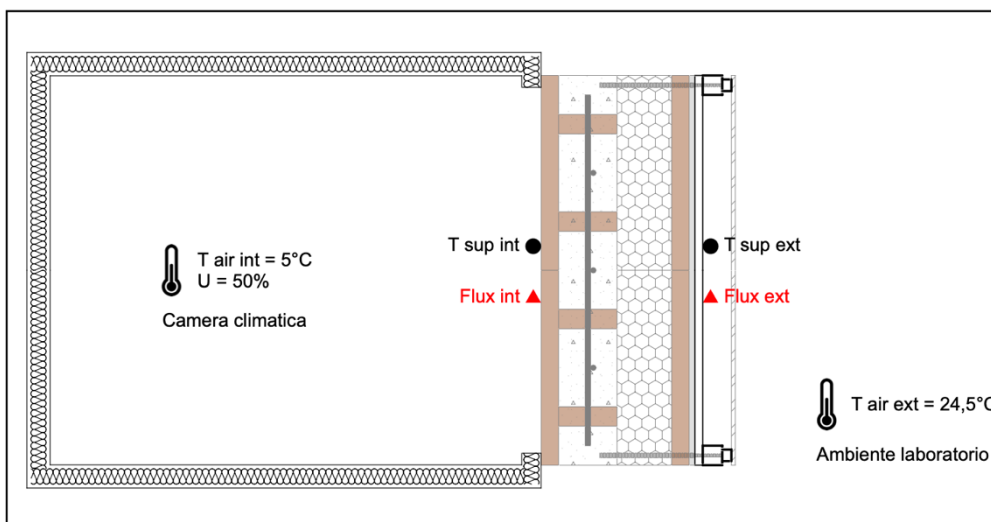


Fig.61 – Set-up regime dinamico campione B3

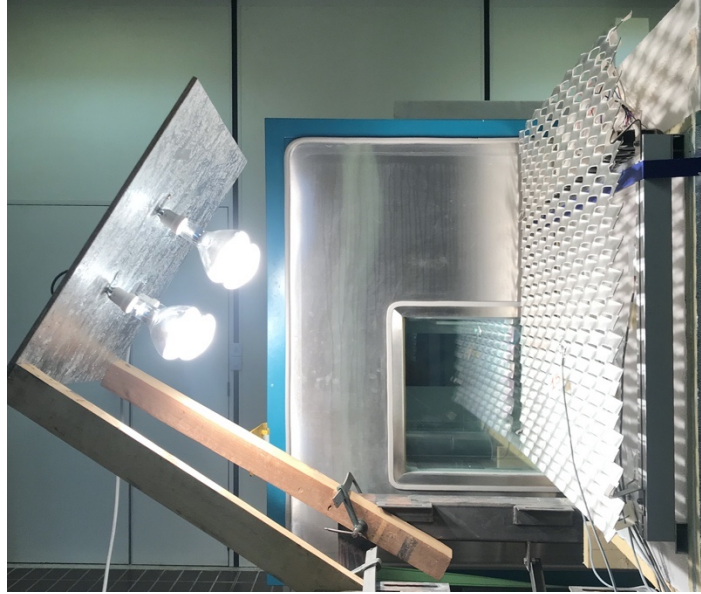


Fig.62 – Set-up campione B3 con irraggiamento delle lampade

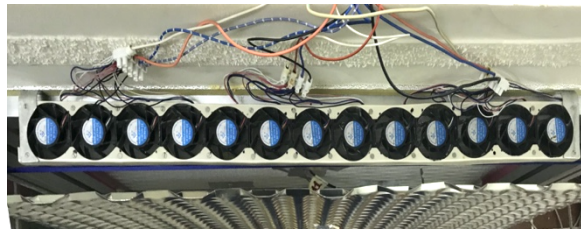


Fig.63 – Posizionamento dei ventilatori in sommità all'intercapedine campione B3

4. RISULTATI

4.1 Risultati strutturali

In questo capitolo vengono esaminate le modalità di rottura dei pannelli analizzati e si riportano i risultati numerici ottenuti nelle prove di compressione e di taglio con precompressione.

Successivamente verrà fatto un confronto nel *Cap.5 Discussione*:

- tra i due campioni esaminati sottoposti al test di taglio con precompressione;
- con altri risultati derivanti dalla letteratura e con la normativa.

4.1.1 Prova di compressione campione A1

La forza verticale massima assegnata al campione A1 è di 1850 kN, essendo arrivati al limite di portata dei martinetti idraulici, per ragioni tecniche, la prova non si è potuta concludere.

Comunque da questa prova si è riusciti ad individuare il modulo elastico del campione.

Si riportano di seguito i due diagrammi ottenuti, curva Forza-Spostamento (*Fig.64*) e curva Sforzo-Deformazione (*Fig.65*).

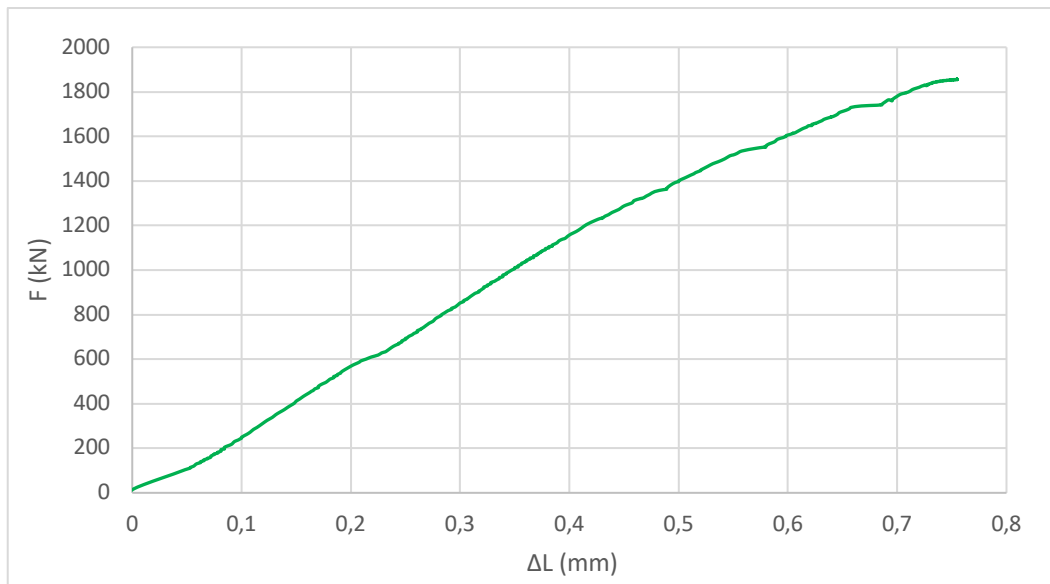


Fig.64 – Diagramma Forza-Spostamento campione A1

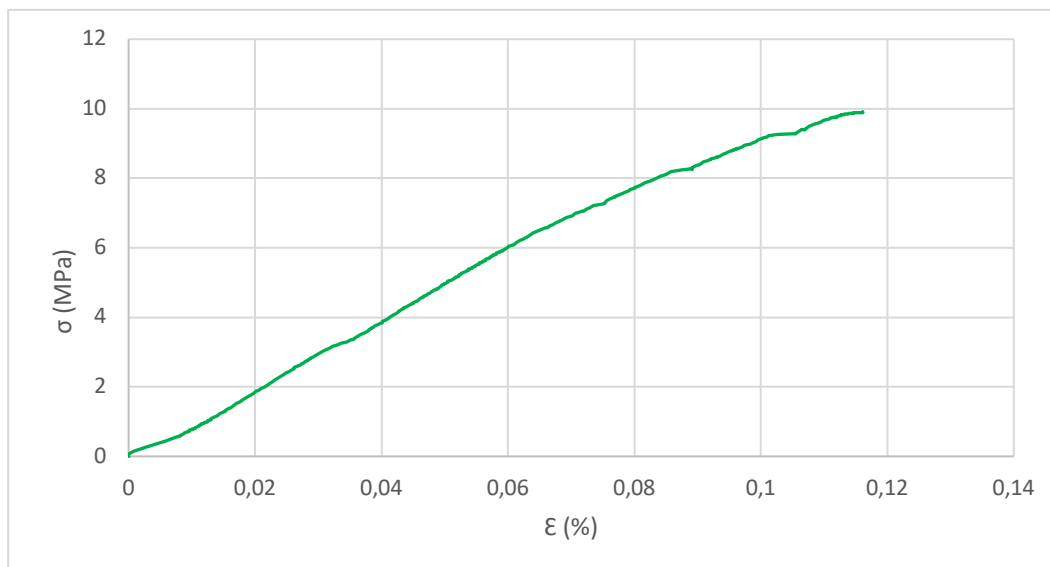


Fig.65 – Diagramma Sforzo-Deformazione campione A1

Dalla curva si denota che il comportamento della parete è pressochè lineare. Non avendo potuto concludere la prova, non è stato possibile determinare la resistenza ovvero la tensione di rottura. L'unica informazione che si può trarre dal grafico è la rigidità del campione: il modulo di Young E viene ricavato attraverso la pendenza della retta di influenza, la quale consente di approssimare la curva sforzo-deformazione.

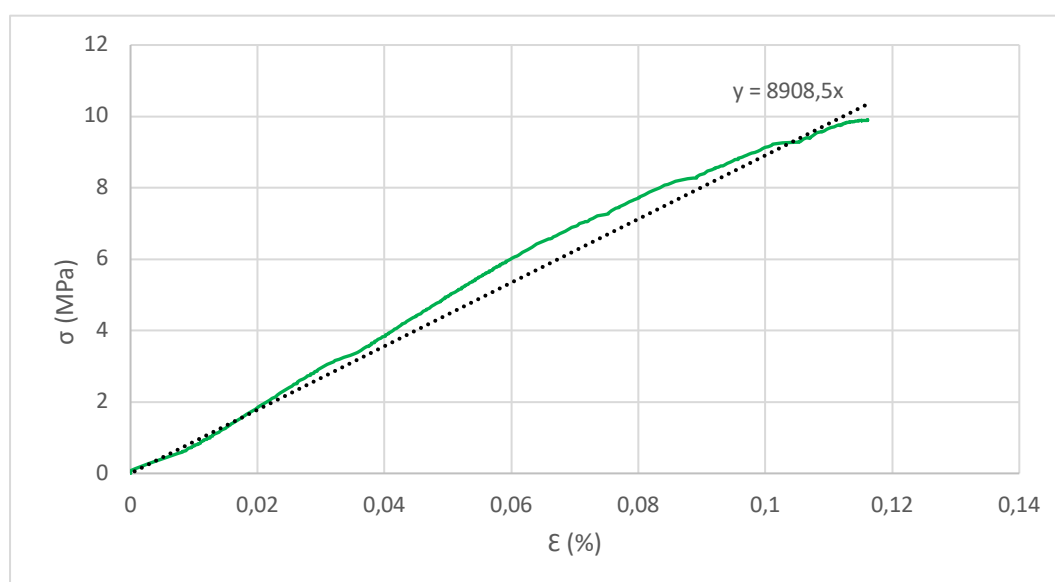


Fig.66 – Diagramma Sforzo-Deformazione con linea di influenza campione A1

Il Modulo di Young E della parete, ovvero la sua rigidità, risulta pari a 8908,50 MPa.

4.1.2 Prova di taglio con precompressione campione A1

Al campione è stato assegnato un carico di precompressione massimo 500 kN. La prova si ritiene conclusa dopo la plasticizzazione del provino.

Si riportano di seguito i diagrammi ottenuti dall'elaborazione dei dati registrati, curva Forza-Spostamento (*Fig.67*), curva Tensione tangenziale-Scorrimento angolare (*Fig.68*) e curva Forza-Spostamenti diagonali (*Fig.69*).

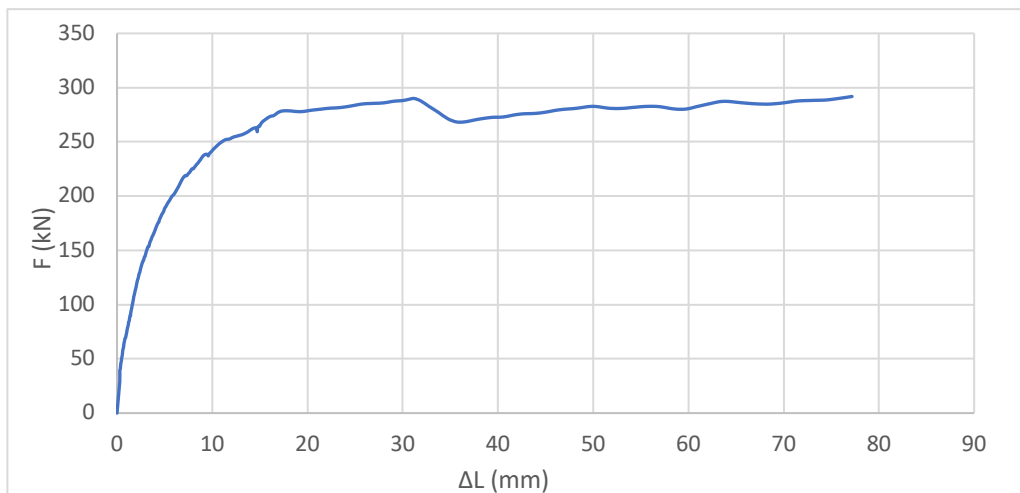


Fig.67 – Diagramma Forza-Spostamento campione A1

Dal grafico si evidenzia un tratto elastico-lineare tra 0 e 3 mm di forza e spostamento, un secondo tratto da 3 a 10 mm in cui il comportamento è non lineare ma rimane comunque in campo elastico, nel tratto successivo da 10 a 75 mm si entra in campo plastico fino ad arrivare alla rottura del campione. La forza massima F_{\max} raggiunta risulta pari a 290 kN.

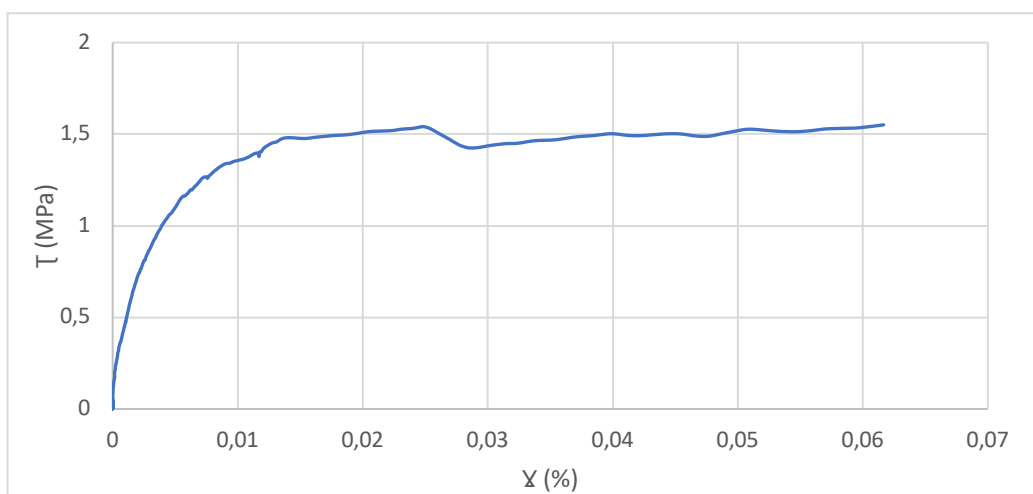


Fig.68 – Diagramma Tensione tangenziale-Scorrimento angolare campione A1

Nel diagramma si registra un comportamento pressochè lineare nel primo tratto tra 0% e 0,3% di deformazione e scorrimento angolare dove si ha la deformazione istantanea del campione, nel secondo tratto da 0,3% fino ad 1 si ha un comportamento non lineare-elastico, successivamente da 1% fino al 6% si attiva la fase plastica fino alla deformazione ultima del 6%.

La tensione tangenziale massima τ_{max} a cui resiste a taglio la parete è pari a 1,55 MPa.

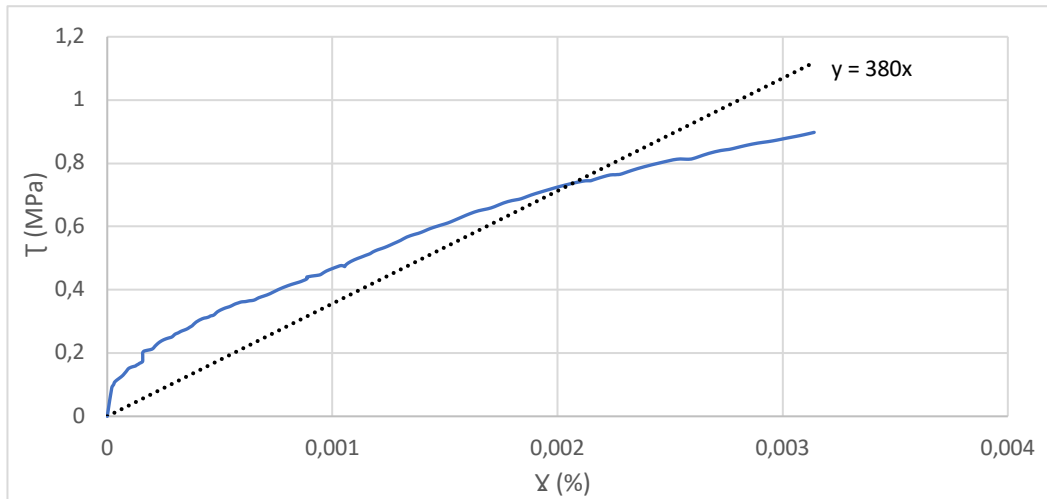


Fig.69 – Diagramma Tensione tangenziale-Scorrimento angolare e linea di influenza

Approssimando il primo tratto lineare da 0% al 0,3% di deformazione, attraverso la linea di influenza (Fig.69) è stato determinato un modulo di elasticità tangenziale G pari a 380 kN.

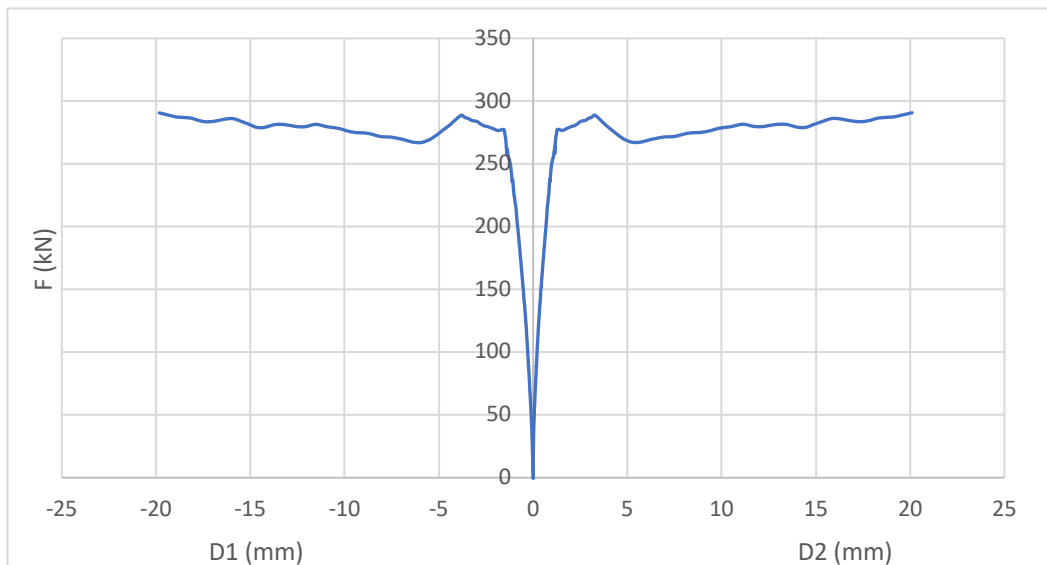


Fig.70 – Diagramma Forza-Spostamento diagonale campione A1

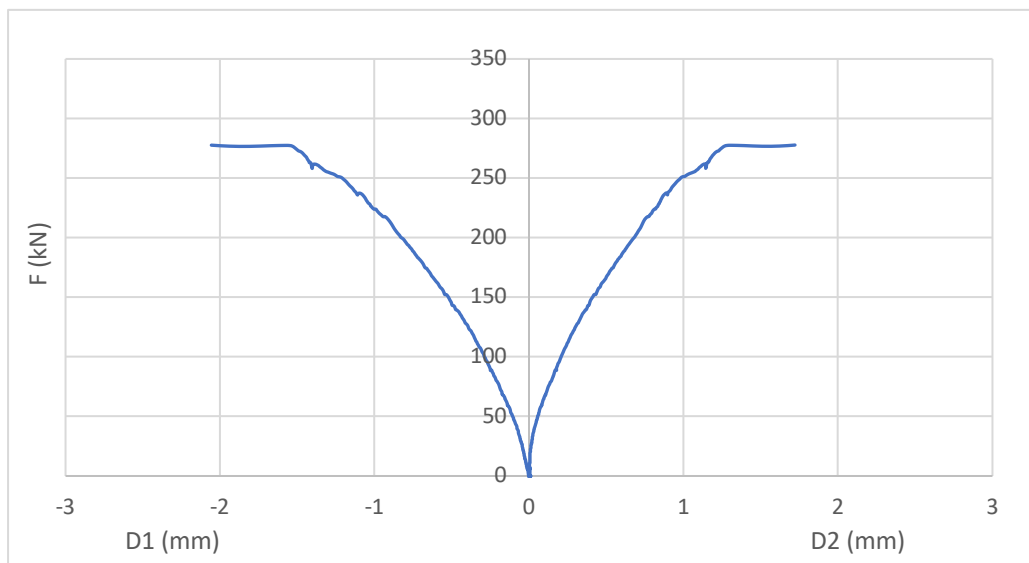


Fig.71 – Ingrandimento diagramma Forza-Spostamento diagonale campione A1

Mettendo in evidenza il primo tratto, considerando un range di valori tra -2 mm e 2 mm, anche dal diagramma relativo agli spostamenti diagonali si denota un primo tratto elastico-lineare che si registra fino un valore di spostamento pari a 1 mm, da 1 mm in poi si attiva la fase plastica.

In particolare, uno dei due trasduttori viene compresso e l'altro viene teso, quindi significa che si vengono a creare un puntone della diagonale compressa e un tirante nella diagonale tesa, come è possibile anche visualizzare dai meccanismi di rottura.

Nella tabella sottostante vengono riportati i valori risultanti delle caratteristiche del campione A1 nella prova di taglio con precompressione.

F_{\max} Forza massima	τ_{\max} Resistenza a taglio	G Modulo di elasticità tangenziale
290 kN	1,55 MPa	380 MPa

Tab.14 – Risultati prova di taglio con precompressione campione A1

4.1.3 Prova di taglio con precompressione campione A2

Al campione è stato assegnato un carico di precompressione massimo 500 kN. La prova si ritiene conclusa dopo la plasticizzazione del provino.

Si riportano di seguito i diagrammi ottenuti dall'elaborazione dei dati registrati, curva Forza-Spostamento (*Fig. 72*), curva Tensione Tangenziale-Scorrimento angolare (*Fig. 73*) e curva Forza-Spostamenti diagonali (*Fig. 74*).

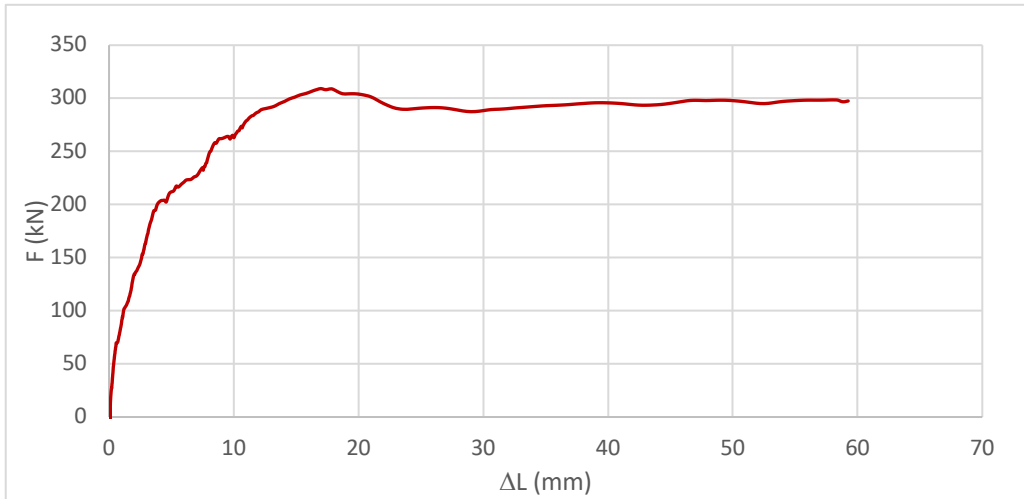


Fig. 72 – Diagramma Forza-Spostamento campione A2

Dal grafico si evidenzia un tratto elastico-lineare tra 0 e 3 mm di forza e spostamento, un secondo tratto da 3 a 10 mm in cui il comportamento è non lineare ma rimane comunque in campo elastico, nel tratto successivo da 10 a 60 mm si entra in campo plastico fino ad arrivare alla rottura del campione. La forza massima F_{\max} raggiunta risulta pari a 300 kN.

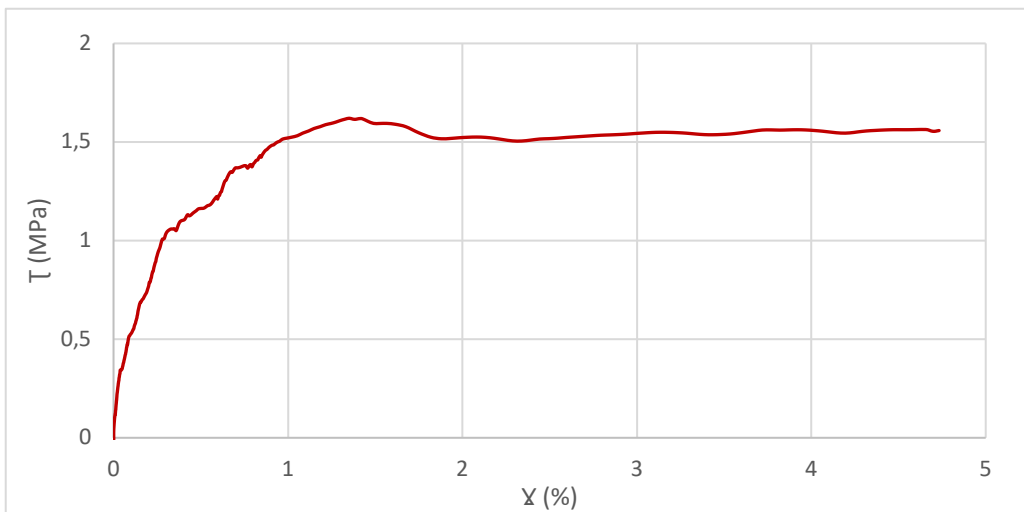


Fig. 73 – Diagramma Tensione tangenziale-Scorrimento angolare campione A2

Nel diagramma si registra un comportamento pressochè lineare nel primo tratto tra 0% e 0,25% di deformazione e scorrimento angolare dove si ha la deformazione istantanea del campione, nel secondo tratto da 0,25% fino ad 1 si ha un comportamento non lineare-elastico, successivamente da 1% fino al 4,75% si attiva la fase plastica fino alla deformazione ultima del 4,75%.

La tensione tangenziale massima τ_{max} a cui resiste a taglio la parete è pari a 1,60 MPa.

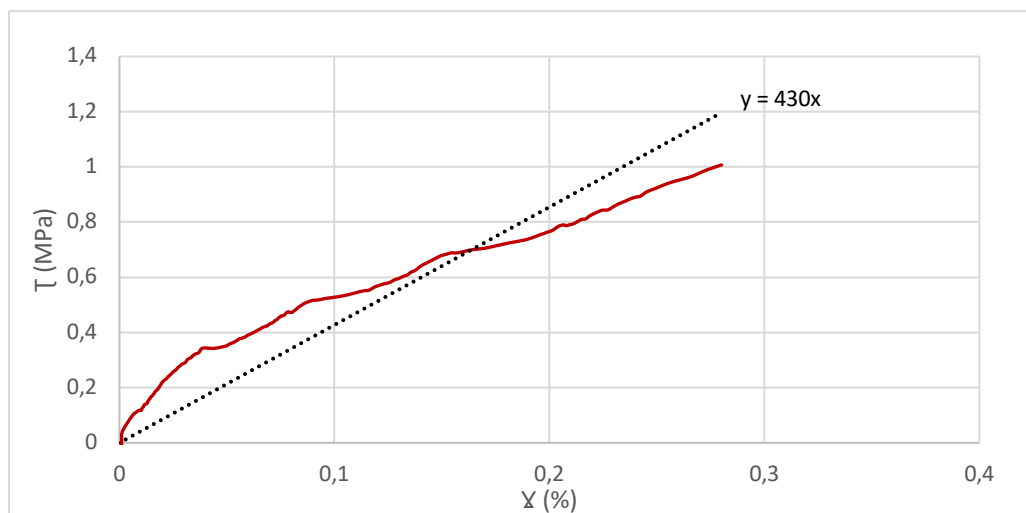


Fig. 74 – Diagramma Tensione tangenziale-Scorrimento angolare e linea di influenza

Approssimando il primo tratto lineare da 0% al 0,3% di deformazione, attraverso la linea di influenza (Fig. 74) è stato determinato un modulo di elasticità tangenziale G pari a 430 kN.

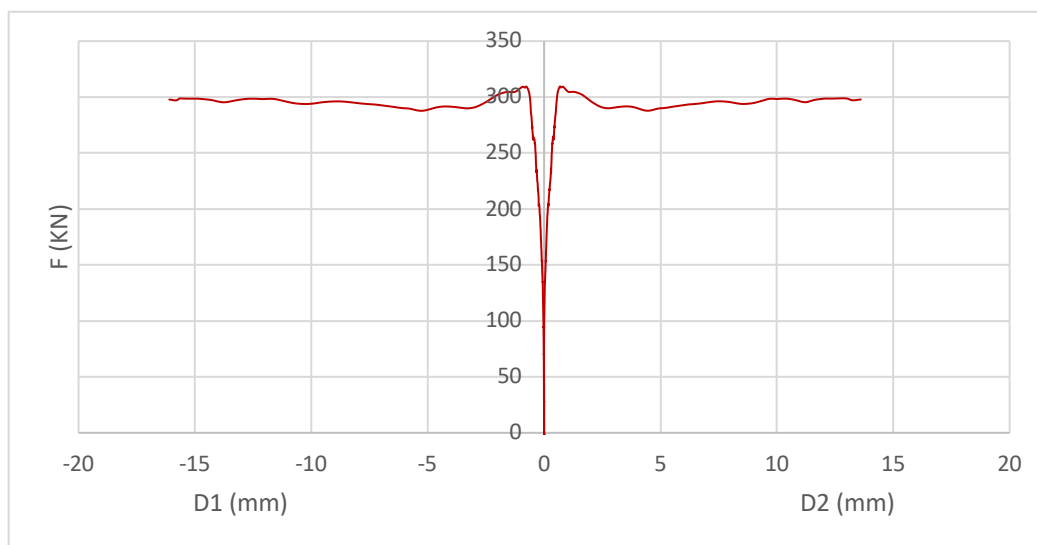


Fig. 75 – Diagramma Forza-Spostamento diagonale campione A2

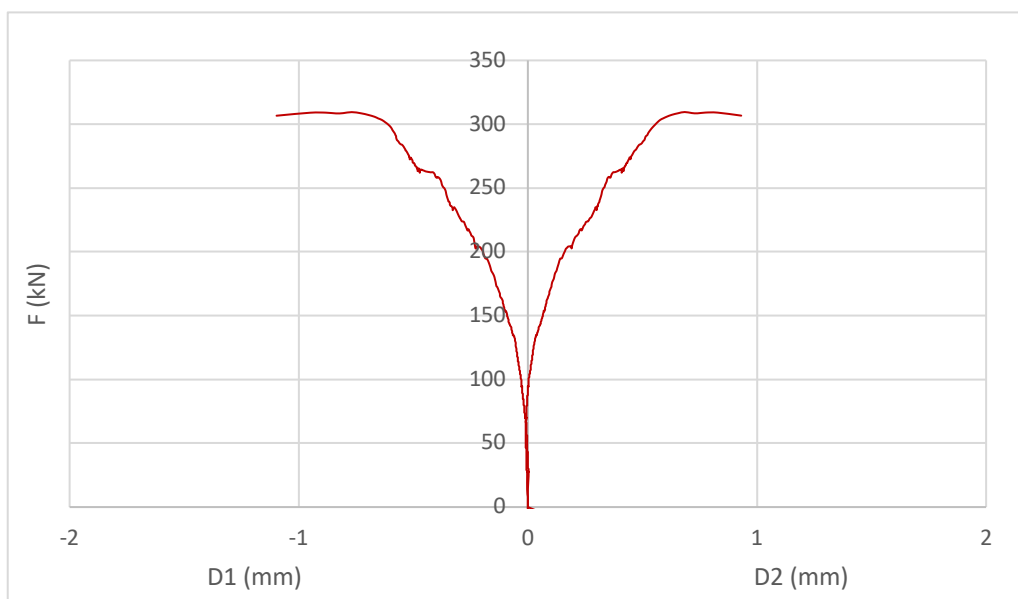


Fig.76 – Ingrandimento diagramma Forza-Spostamento diagonale campione A2

Mettendo in evidenza il primo tratto, considerando un range di valori tra -1 mm e 1 mm, anche dal diagramma relativo agli spostamenti diagonali si denota un primo tratto elastico-elastico che si registra fino un valore di spostamento pari a 0,5 mm, da 0,5 mm in poi si attiva la fase plastica.

In particolare, uno dei due trasduttori viene compresso e l'altro viene teso, quindi significa che si vengono a creare un puntone della diagonale compressa e un tirante nella diagonale tesa, come è possibile anche visualizzare dai meccanismi di rottura.

Nella tabella sottostante vengono riportati i valori risultanti delle caratteristiche del campione A1 nella prova di taglio con precompressione.

F_{max} Forza massima	τ_{max} Resistenza a taglio	G Modulo di elasticità tangenziale
300 kN	1,60 MPa	430 MPa

Tab.15 – Risultati prova di taglio con precompressione campione A2

Tutti i risultati relativi a tutte le prove effettuate sono stati inseriti all'interno delle tabelle riassuntive riportate di seguito.

	E (MPa)
A1	8908,50

Tab.16 – Risultati delle prove di compressione campione A1

	F _{max} (kN)	T _{max} (MPa)	G (MPa)
A1	290	1,55	380
A2	300	1,60	430
Valore medio	295	1,58	405

Tab.17 – Risultati delle prove di taglio con precompressione campioni A1 e A2

4.1.4 Criteri di rottura

In questo paragrafo si analizza il comportamento dei provini A1 e A2 sottoposti alla prova di taglio con carico di precompressione

Nella prova di compressione del campione A1, avendo raggiunto la portata limite dei martinetti, non si è riusciti a terminare la prova, pertanto da un'ispezione visiva non sono individuabili deformazioni o rotture locali sul campione.

Criteri di rottura prova di taglio con precompressione

Al termine della prova di taglio con precompressione nel campione A1 e A2, sono state individuate le seguenti tipologie di rotture:

- a) fessure diagonali a taglio (a 45°);
- b) schiacciamento ed espulsione del calcestruzzo nello spigolo in basso a destra;
- c) slittamento dei blocchi.

Sono evidenti delle fessure allineate lungo il puntone compresso, quindi significa che nell'altra diagonale si sono aperte a trazione. Esso rappresenta anche un tipico meccanismo di rottura a taglio della muratura tradizionale.

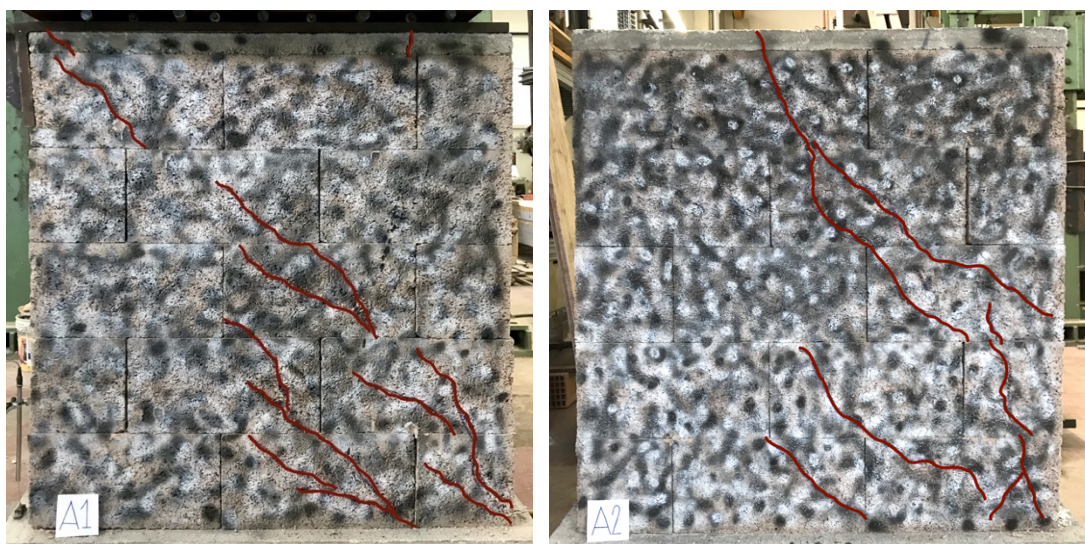


Fig.77 – Meccanismo di rottura a)

Nello spigolo nella parte inferiore delle pareti si è verificata una rottura per schiacciamento del calcestruzzo in corrispondenza dell'estremo inferiore della biella diagonale compressa, con relativa espulsione di calcestruzzo (Fig.78).

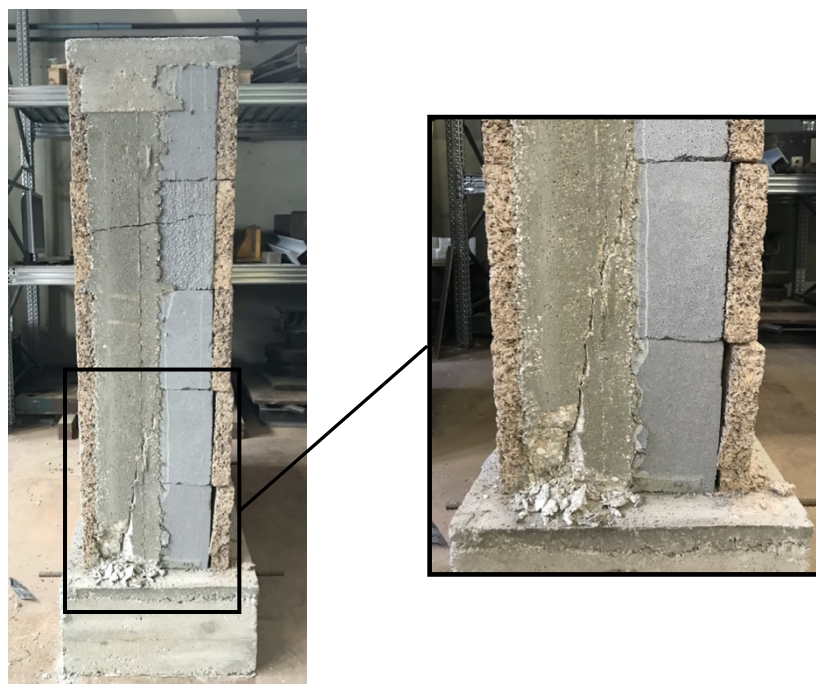


Fig. 78 – Meccanismo di rottura b)

Un'altra tipologia di rottura è stata individuata dallo slittamento dei blocchi (*Fig. 79*), dovuta alla mancanza di aderenza tra i blocchi in quando la malta è assente, e a un disassamento del carico laterale, in quanto essendo eccentrico rispetto ai vari assi dei blocchi può provocare delle rotazioni localizzate e quindi delle fuoriuscite dal piano. Tale meccanismo si differenzia dalla muratura tradizionale in laterizio.

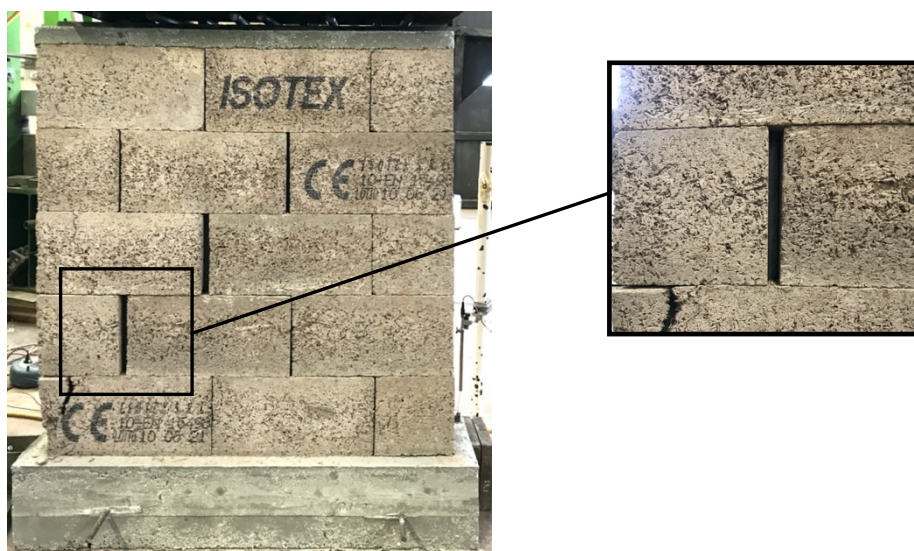


Fig. 79 – Meccanismo di rottura c)

Inoltre si sono riscontrate delle rotture localizzate (*Fig.80*), dovute al carico applicato lateralmente al provino in corrispondenza della piastra di spinta che provoca un'indentatura della parte del blocco in legno cemento; questa non può essere considerata tra i meccanismi di rottura.

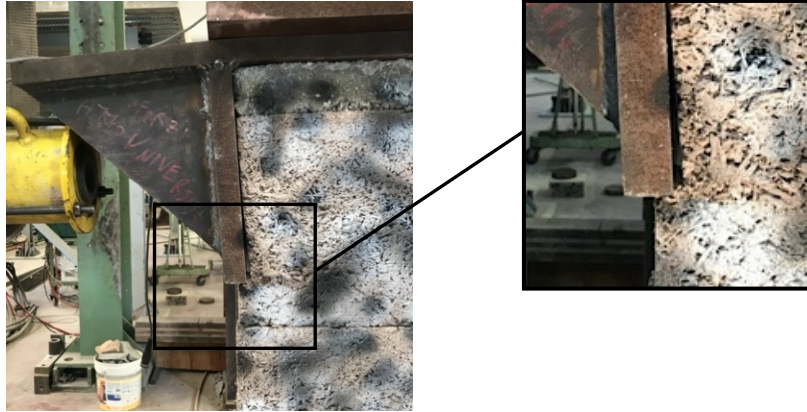


Fig.80 – Rottura in corrispondenza della piastra

4.2 Risultati termici

4.2.1 Comportamento in regime stazionario

Sperimentazione senza lampade solari

Campione B1

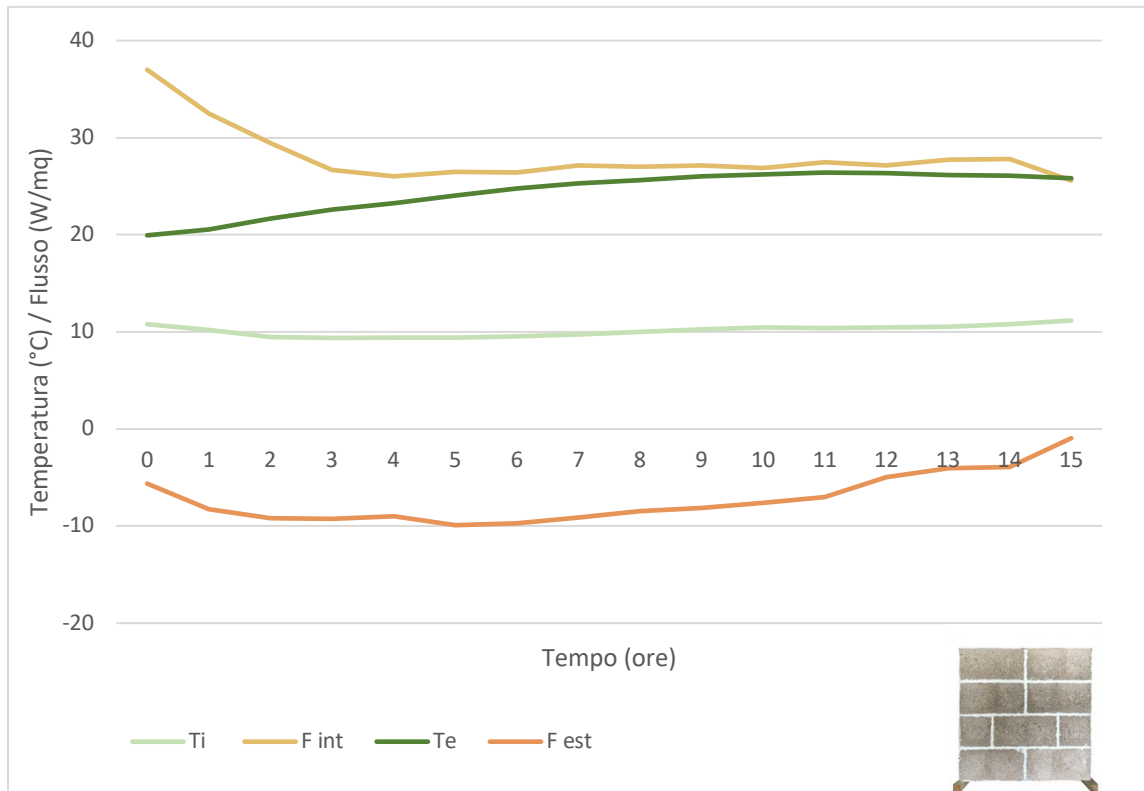


Fig.81 – Andamento temperature superficiali e flusso di calore in regime stazionario campione B1

Da una temperatura media dell'ambiente di laboratorio a 24,5°C, fissando le condizioni stazionarie all'interno della camera climatica di 5°C di temperatura interna e di 50% di umidità, come è visibile dal grafico si riscontra una differenza di temperatura superficiale del campione, tra l'ambiente esterno e quello interno, di circa 15°C.

Mentre il flusso uscente dalla camera climatica è mediamente di 26 W/mq, quello entrante è pari a -1 W/mq.

Campione B2

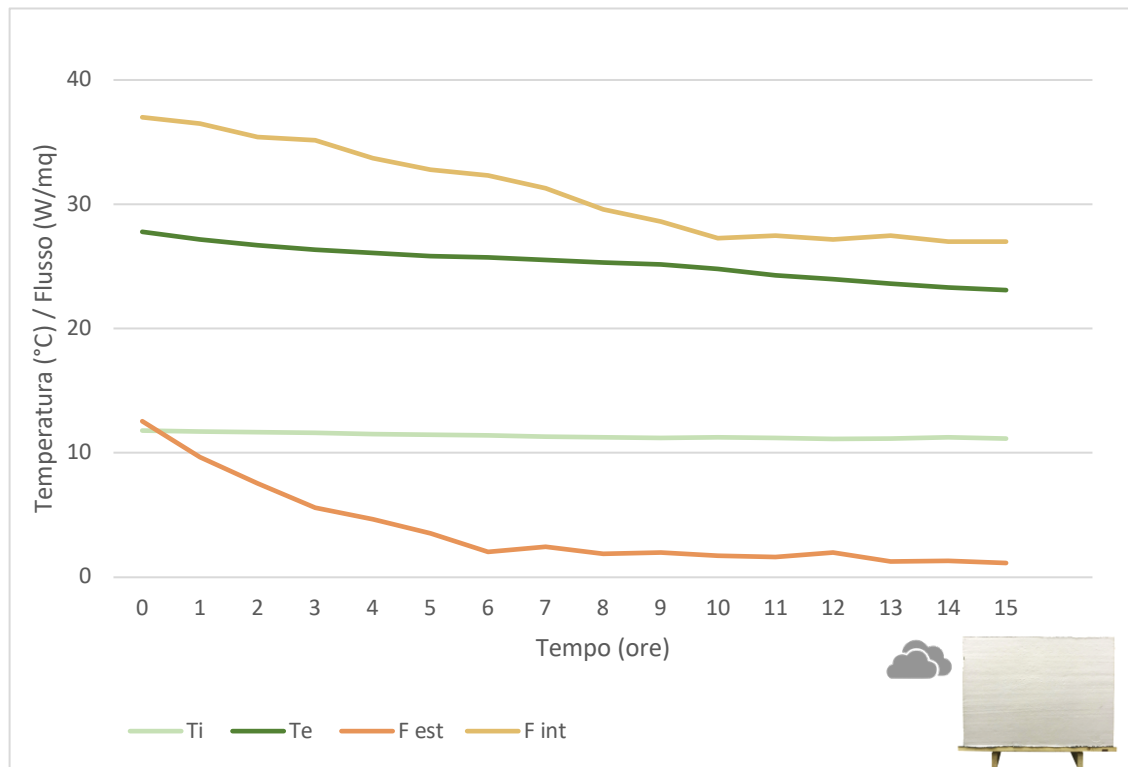


Fig.82 – Andamento temperature superficiali e flusso di calore in regime stazionario campione B2

Questo grafico mostra il comportamento in regime stazionario del campione B2 in una giornata nuvolosa, successivamente verrà confrontata con lo stesso campione ma in condizioni soleggiate.

Nell'ambiente esterno la temperatura media dell'aria è di 24,5°C, mentre nel lato considerato interno sono impostati 5°C di temperatura e 50% di umidità.

Dall'andamento delle temperature superficiali interne rimane costantemente ad un valore di 11°C, mentre le temperature superficiali esterne, dopo essersi stabilizzate raggiungono i 23°C. Pertanto risulta una differenza di temperatura di 12°C.

Il flusso esterno che attraversa la parete è di 1,30 W/mq, mentre quello uscente verso l'ambiente esterno è pari a 27 W/mq.

Sperimentazione con lampade solari

Campione B2

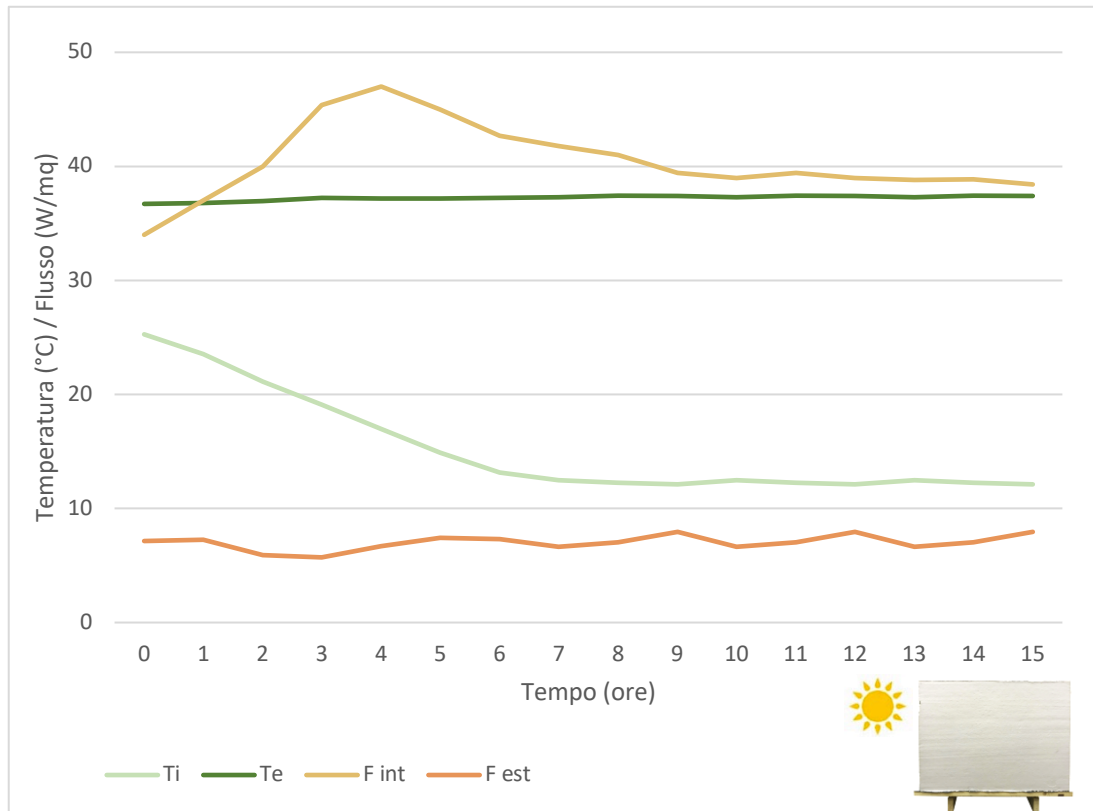


Fig.83 – Andamento temperature superficiali e flusso di calore in regime stazionario campione B2 con l'effetto di irraggiamento

Le condizioni stazionarie imposte nel lato interno della parete sono le medesime riportate precedentemente. In questo caso nell'ambiente esterno sono state poste con un'inclinazione di 45° delle lampade che simulano la radiazione solare, pertanto la temperatura superficiale esterna della parete esaminata raggiunge i 37,5 °C.

La temperatura interna superficiale, condizionata dai 5°C impostati all'interno della camera climatica, dopo essersi stabilizzata nelle prime ore di monitoraggio, rimane costante ad un valore di 12°C.

La parete è sottoposta quindi ha una differenza di temperatura di 25,5°C.

Il flusso uscente dall'ambiente esterno è di 38,4 W/mq, mentre quello entrante è mediamente di 8 W/mq.

Campione B3 Prater

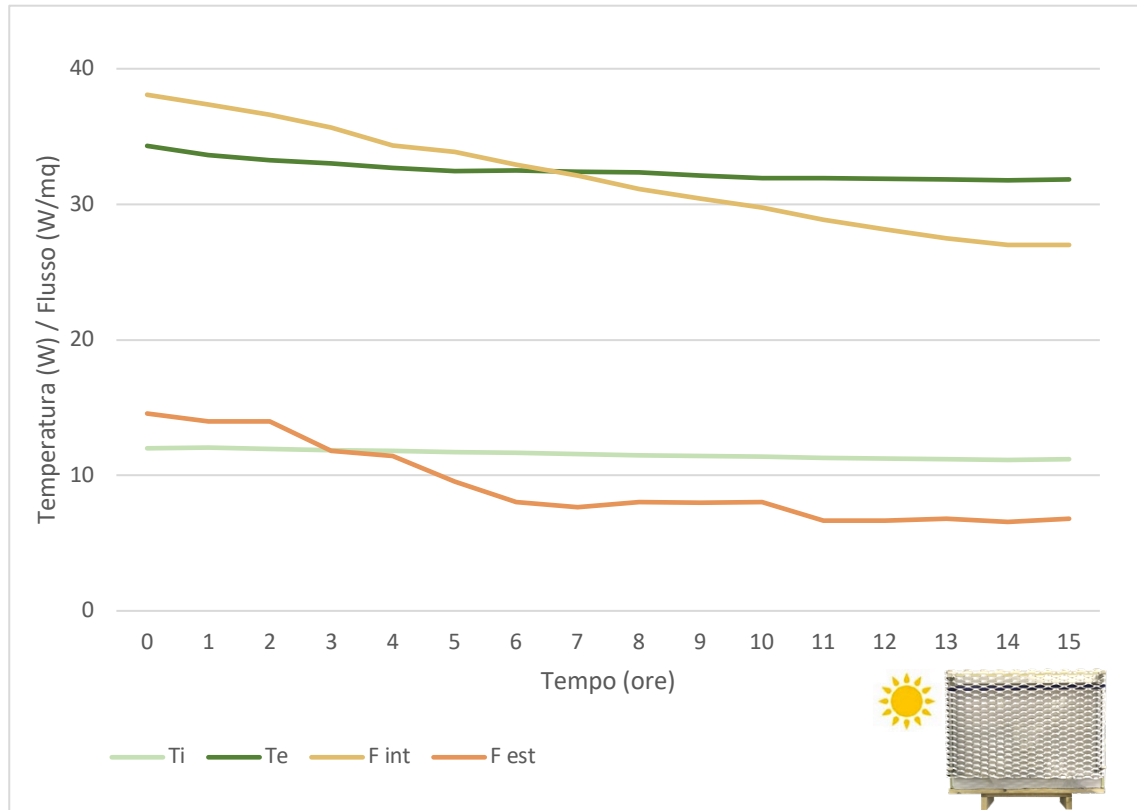


Fig.84 – Andamento temperature superficiali e flusso di calore in regime stazionario campione B3 Prater con l'effetto di irraggiamento

In questo caso, alla parete è stata aggiunta una schermatura solare garantita da una lamiera striata in alluminio avente una percentuale di foratura del 76%.

Per simulare la ventilazione in condizioni reali, nell'intercapedine d'aria creatasi tra la lamiera e la superficie esterna, sono stati posti dei ventilatori sulla sommità dell'intercapedine.

Le condizioni stazionarie fissate nell'ambiente interno sono le stesse imposte per i campioni precedenti ($T=5^{\circ}\text{C}$, $U=50\%$).

La temperatura superficiale interna come ci si aspetta rimane costante ed ha un valore di 11°C mentre quella esterna sale a 31°C , quindi la differenza di temperatura è di 20°C .

Il flusso esterno che attraversa la parete è di $6,80\text{ W/mq}$, mentre interno che tende ad uscire è di 27 W/mq .

Campione B3 Maracana

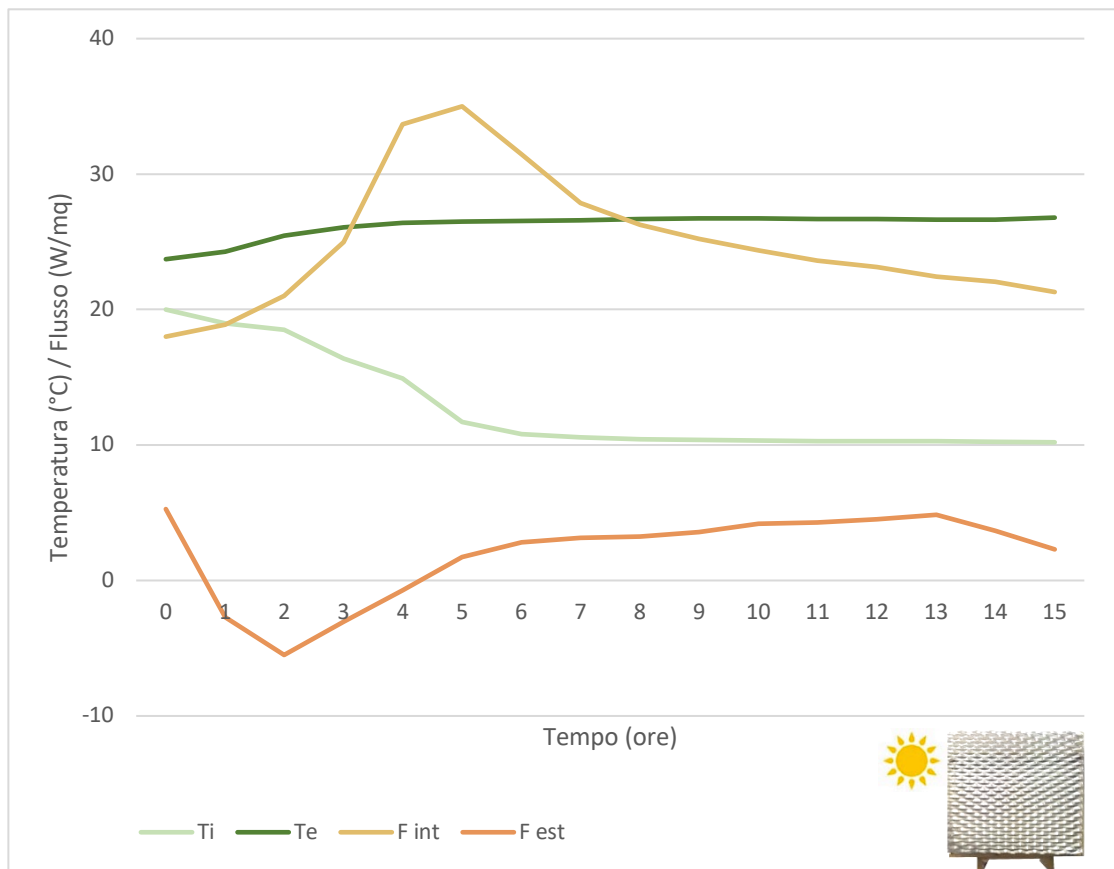


Fig.85 – Andamento temperature superficiali e flusso di calore in regime stazionario campione B3 Maracana con l'effetto di irraggiamento

L'ombreggiamento del campione B3 Maracana è garantito da una lamiera striata in alluminio avente un'open-area minore del campione precedente, ossia del 55%.

La schermatura solare della lamiera, garantisce alla parete di raggiungere una temperatura superficiale esterna minore ovvero pari a 26°C.

Inoltre va ad influire anche sulla temperatura interna della superficie, abbassandola a 10°C. La parete risulta essere sottoposta ad una differenza di temperatura di 16°C.

Il flusso interno che attraversa la parete è di 22 W/mq, quello esterno entrante di 2,5 W/mq.

4.2.2 Comportamento in regime dinamico

Campione B1

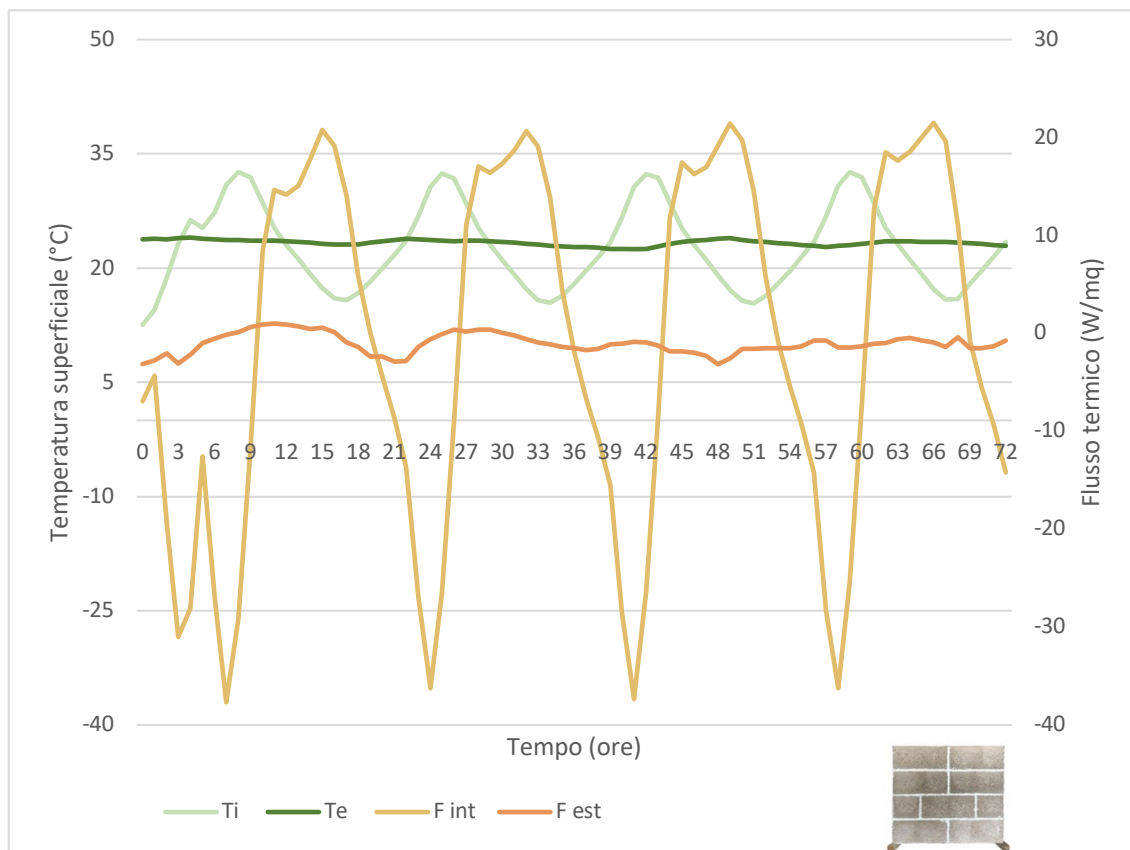


Fig.86 – Andamento temperature superficiali e flusso di calore in regime dinamico campione B1

All'interno della camera climatica (considerata come ambiente interno), è stata imposta una serie di impulsi di tipo sinusoidale che oscilla da una temperatura massima di 35°C e una temperatura minima di 15°C.

La temperatura superficiale esterna rimane pressochè costante a 23°C, mentre quella interna ovviamente oscilla secondo gli impulsi assegnati alla camera climatica, variando da un valore massimo di 32°C ad un minimo di 16°C.

Dunque la differenza di temperatura nelle due superfici della parete risulta essere di 24°C. Il flusso esterno, condizionato dagli impulsi provenienti dalla camera climatica, ha delle piccole oscillazioni.

Mentre come si può vedere dal grafico, il flusso interno essendo fortemente influenzato dall'onda sinusoidale, ha dei picchi che oscillano da 20 W/mq a -36 W/mq.

Campione B2

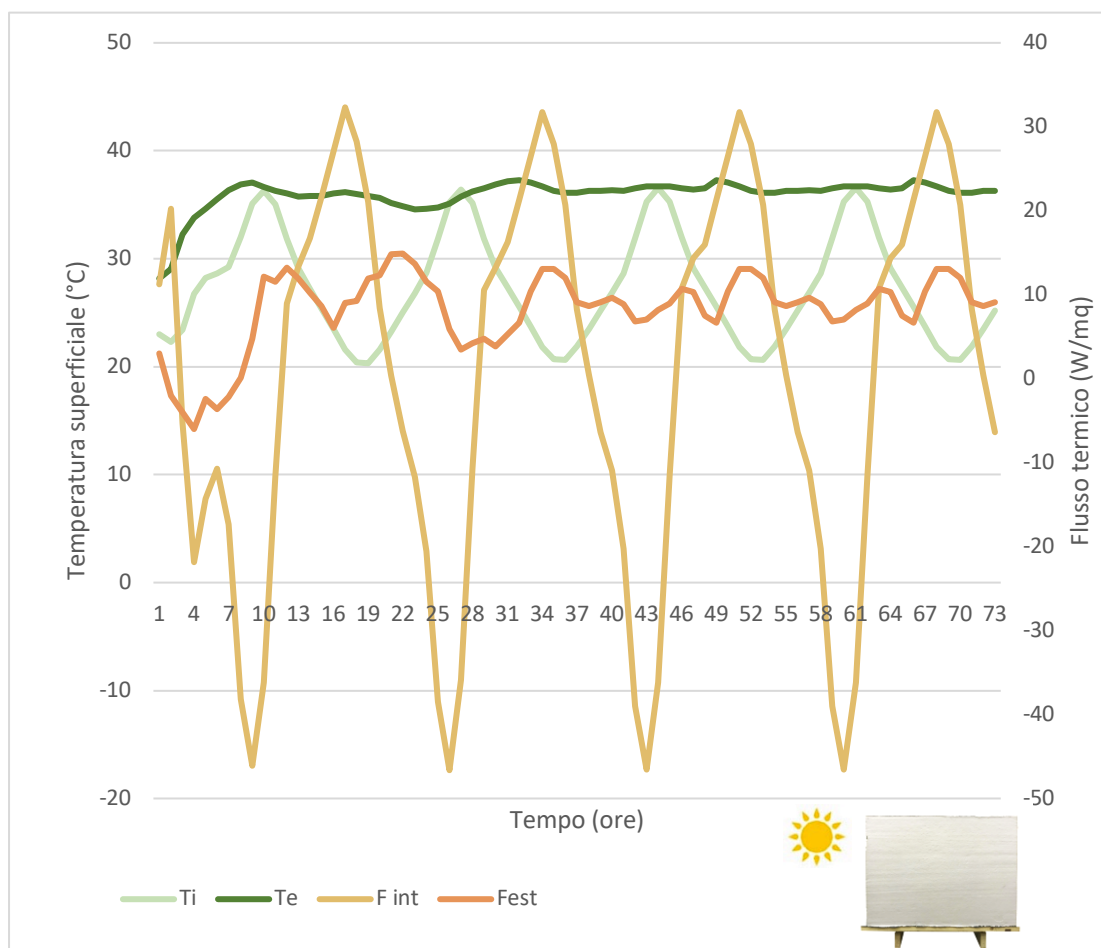


Fig.87 – Andamento temperature superficiali e flusso di calore in regime dinamico campione B2 con l'effetto di irraggiamento

L'impulso dinamico imposto nel lato interno della parete, porta ad avere una temperatura media superficiale esterna di 36°C, mentre la temperatura superficiale interna oscilla in modo armonico con valori che vanno da 36°C a 20°C.

Il flusso interno in questo caso presenta delle grandi variazioni dovuto all'impulso sinusoidale assegnato all'interno dell'ambiente interno, i picchi sono in corrispondenza di 32 W/mq e -46 W/mq.

Campione B3 Prater

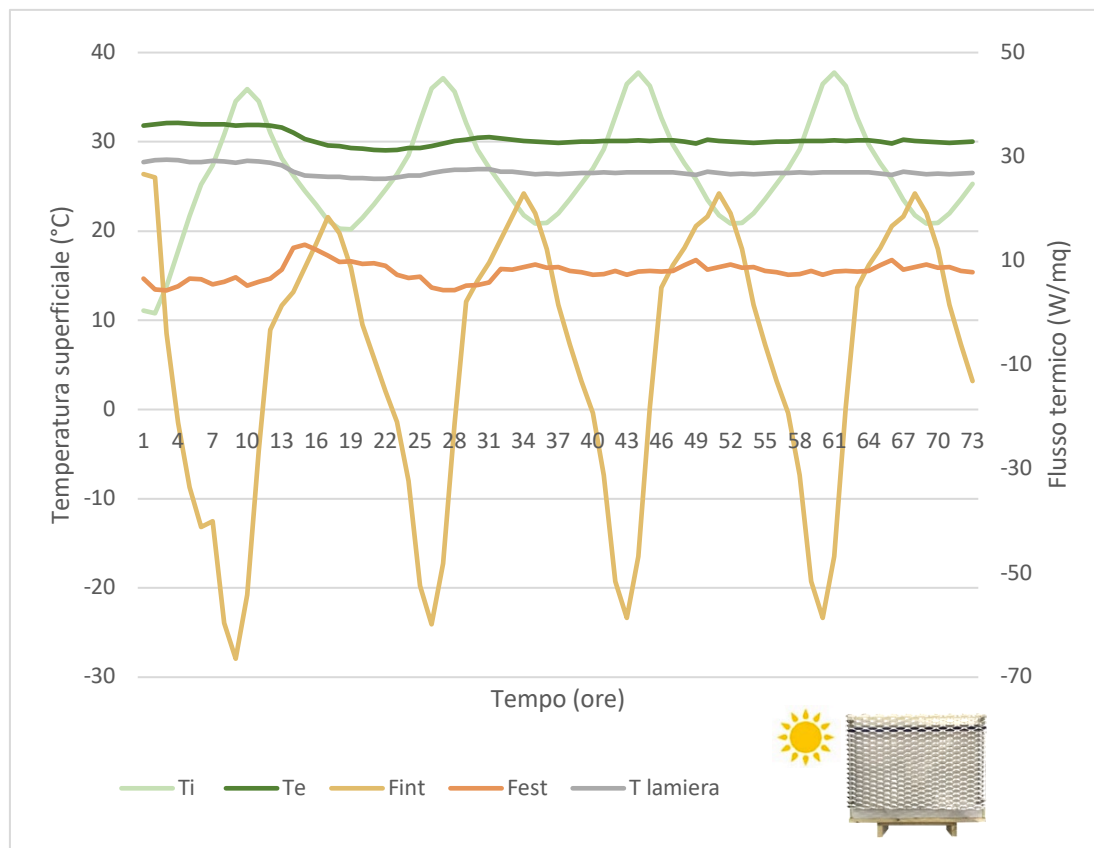


Fig.88 – Andamento temperature superficiali e flusso in regime dinamico campione B Prater con l'effetto di irraggiamento

Si misura una temperatura sulla lamiera di 27°C, mentre quella sulla superficie della parete esterna è registrata di 30°C. Dunque con l'impiego della lamiera Prater, avente una percentuale di foratura del 76%, si ha una modesta schermatura, infatti sulla parete di hanno 3 gradi aggiuntivi rispetto alla lamiera.

La temperatura sulla parete nel lato interno oscilla tra 34°C a 24°C.

Il flusso termico esterno si presenta con un andamento più lineare rispetto al campione B2, in quanto l'inserimento della schermatura stabilizza i valori misurati. Mediamente è stato registrato un valore pari a 7 W/mq.

Il flusso nel lato interno che attraversa la parete oscilla da 18 a -60 W/mq.

Campione B3 Maracana

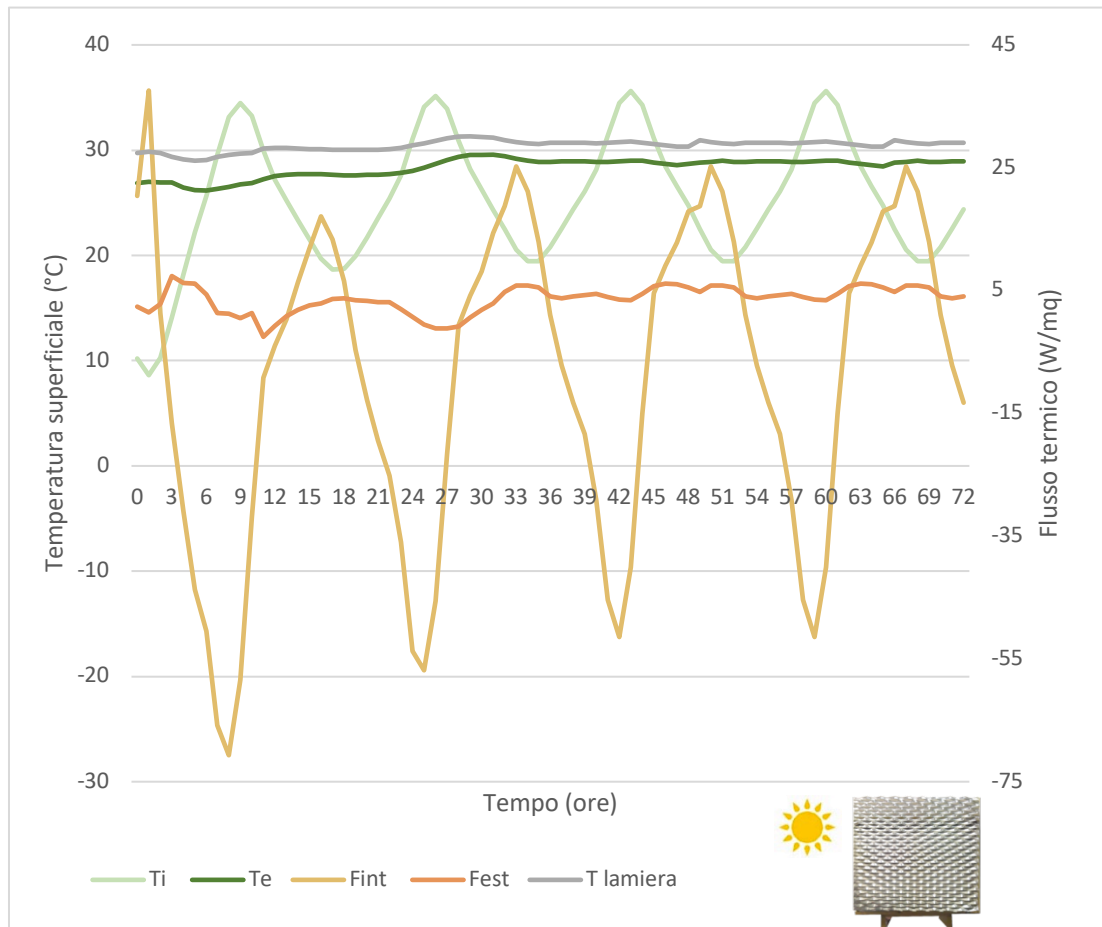


Fig.89 – Andamento temperature superficiali e flusso di calore in regime dinamico campione B3 Maracana con l'effetto di irraggiamento

Nel campione B3 Maracana, nel quale viene utilizzata una lamiera con un'open-area del 55%, si riscontra una temperatura sulla lamiera pari a 29°C, una temperatura costante sulla superficie esterna della parete di 28°C: dunque si viene a creare una maggior schermatura rispetto al campione precedente.

La temperatura superficiale interna misurata oscilla secondo l'andamento sinusoidale imposto, da un valore massimo di 33°C e uno minimo di 20°.

Il flusso medio esterno è stato registrato a 4 W/mq, mentre quello interno varia da 25 W/mq a -51 W/mq. Quello interno oscilla da 25 W/mq a -51 W/mq.

4.2.3 Termografie

Campione B1

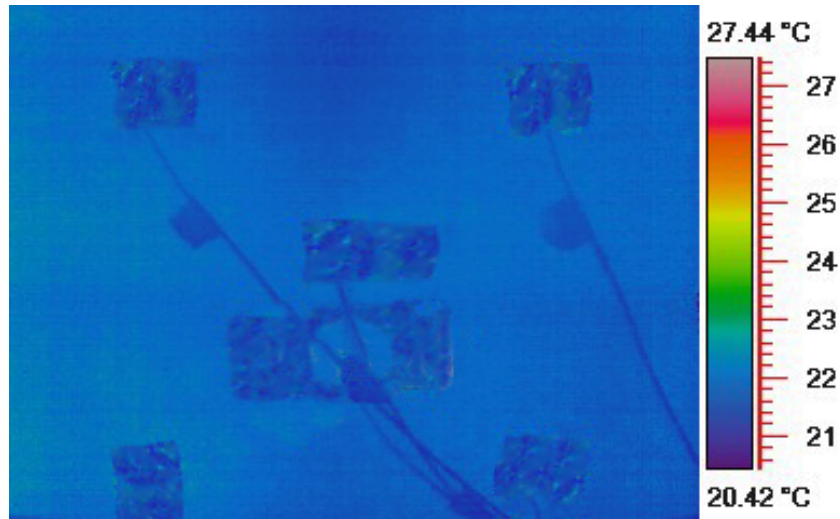


Fig.91 – Termografia campione B1

La termografia acquisita nel lato caldo del campione B1, testimonia che la temperatura superficiale della parete può considerarsi uniforme. In particolare si riscontra una temperatura superficiale minima T_{\min} di 21°C mentre la temperatura massima T_{\max} registrata risulta essere di 22°C.

Dunque la superficie esterna è posta a una temperatura media di 21,5°C.

Campione B2 con radiazione solare

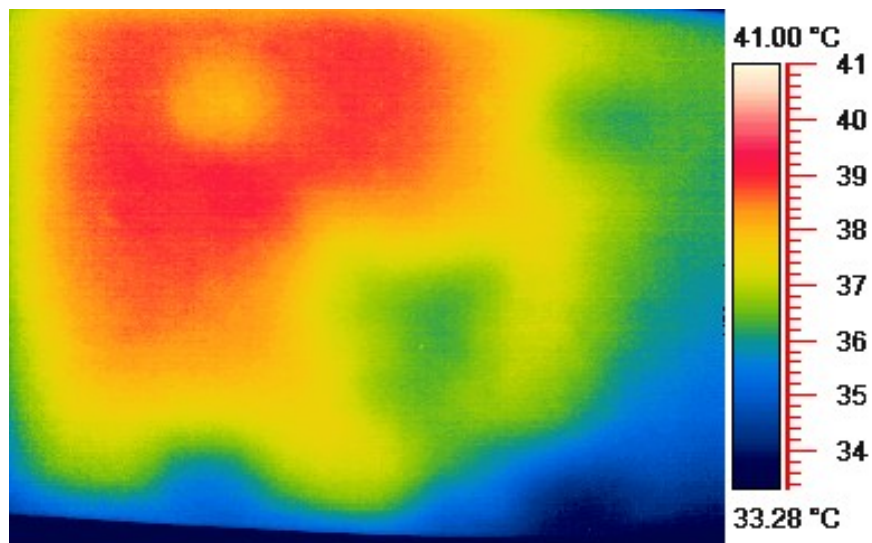


Fig.92 – Termografia campione B2

Nella termografia del campione B2 si riscontra una disuniformità nella zona in alto a sinistra del campione, sintomo di una differente radiazione delle lampade solari sulla parete nonostante esse siano state posizionate simmetricamente. In questa zona la temperatura massima registrata T_{\max} 39°C.

Mentre nella parte inferiore si hanno temperature minori T_{\min} pari a 26,5°C.

Mediamente quindi la superficie esterna della parete si trova a 37°C.

Il passo successivo della sperimentazione sarebbe stato sostituire le quattro lampade, assicurarsi che tutte fornivano la stessa radiazione e ripetere il monitoraggio del campione.

5. DISCUSSIONE

5.1 Comportamento strutturale

Dalla discussione dei risultati strutturali risulta che, confrontando i diagrammi (Fig.93,94,95) della prova di taglio con precompressione del campione A1 e del campione A2 essi risultano compatibili e coerenti, in quanto non si presentano scostamenti significativi.

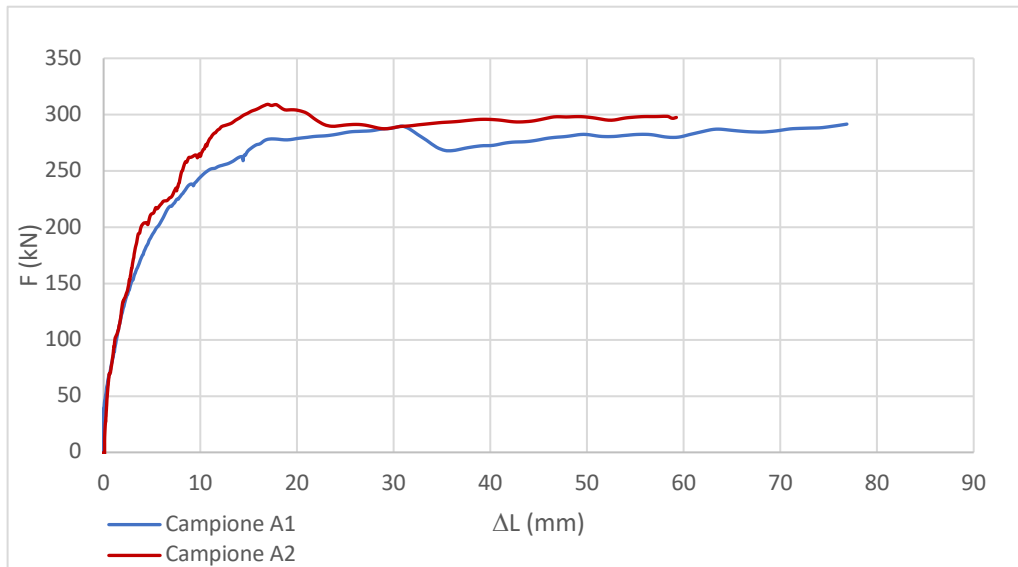


Fig.93 – Confronto diagramma Forza-Spostamento

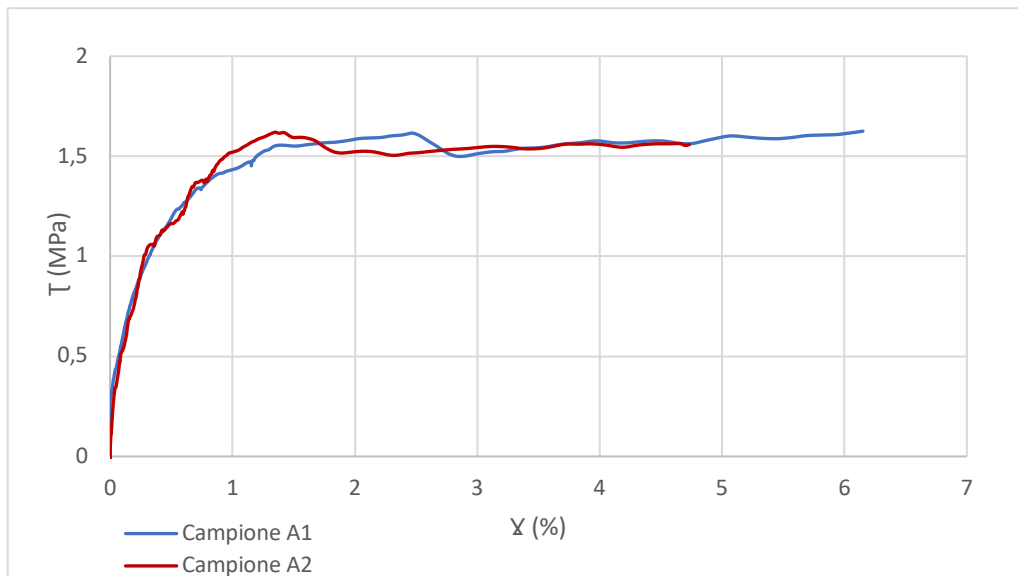


Fig.94 – Confronto diagramma Tensione tangenziale-Scorrimento angolare

La non sovrapposizione si vede nella lunghezza della curva rossa relativa al campione A2, in quanto il trasduttore aveva raggiunto la corsa finale quindi non poteva più registrare, mentre dall'altro lato si stava continuando a registrare, quindi ha avuto uno scarto di deformazione aggiuntiva.

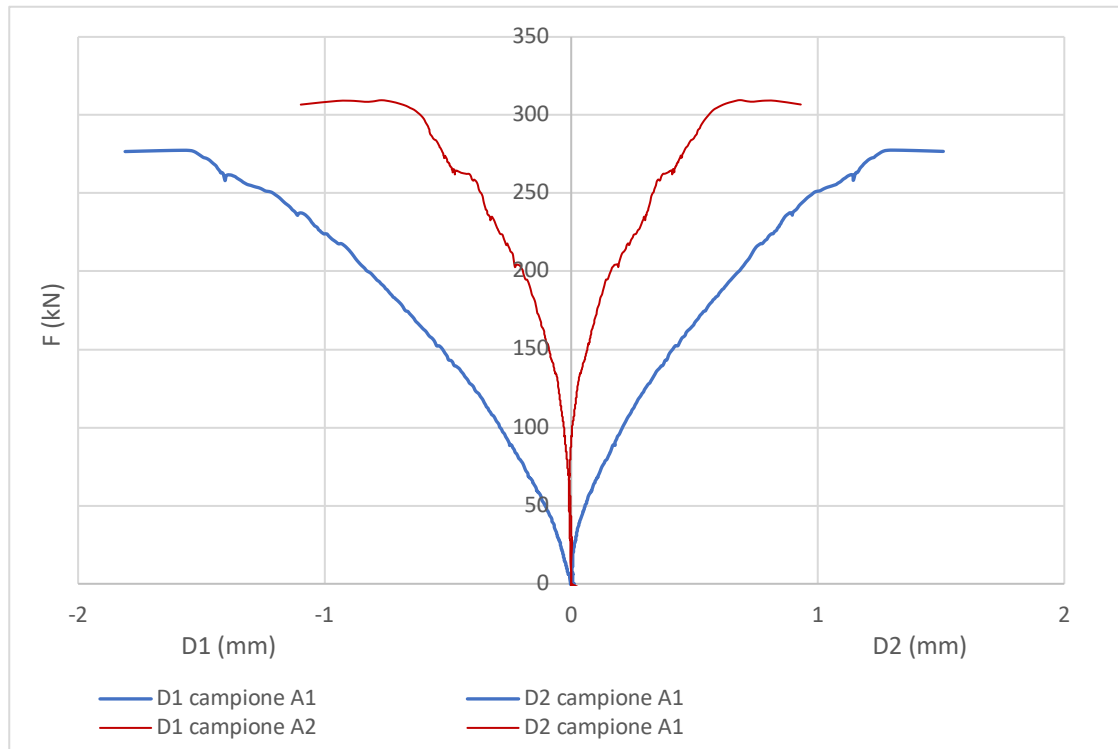


Fig.95 – Confronto ingrandimento diagramma Forza-Spostamento diagonale

Mettendo in evidenza il primo tratto, considerando un range di valori tra -1 mm e 1 mm, anche dal diagramma relativo agli spostamenti diagonali si denota una similitudine nel comportamento dei due provini.

5.1.1 Confronto con la letteratura

Analisi qualitativa dei risultati: modalità di rottura

La rottura per taglio con precompressione di pannelli di muratura tradizionale geometricamente uguali può essere di diverse tipologie.

Si possono riscontrare:

- rottura per fessurazione diagonale prodotta da una tensione principale di trazione, in genere al centro del pannello (*Fig.96*);
- rottura per scorrimento dei giunti (*Fig.96*);
- rottura per scorrimento dei filari (*Fig.96*).

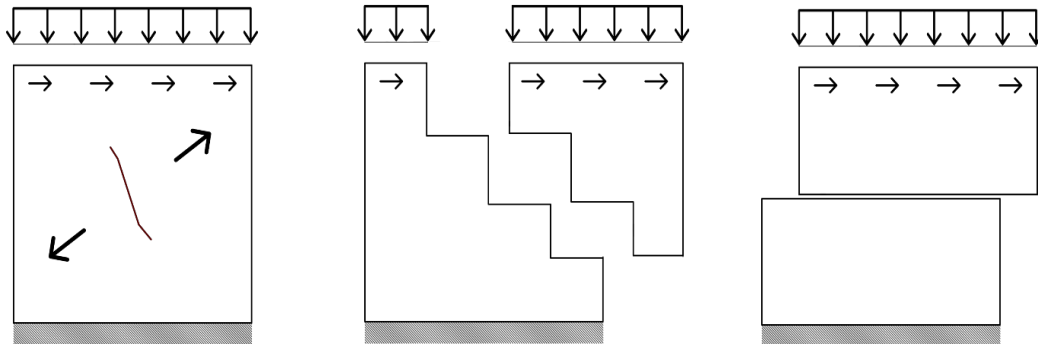


Fig.96 – Confronto meccanismi di rottura con muratura tradizionale

Dall'analisi del quadro fessurativo dei due campioni sottoposti alla prova di taglio con precompressione, è emerso che la modalità di rottura principale per fessurazione diagonale prodotta da una tensione principale di trazione avvenuta dei due campioni, è analoga a quella che si verifica in una parete in muratura tradizionale.

Analisi quantitativa dei risultati

Per valutare l'ottimizzazione del comportamento strutturale della parete realizzata con blocchi cassero in legno-cemento, i parametri meccanici derivanti dalle prove sperimentali effettuate, vengono di seguito confrontati con:

- valori della muratura tradizionale secondo l'NTC 2018 [28];
- valori sperimentali di pareti realizzate con altri blocchi della stessa tecnologia di quelli utilizzati nel presente studio [29] [30].

È stato analizzato il valore di rigidezza che proviene da uno studio presente in letteratura [29], come mostrato nella *Fig.97*. Esso si riferisce ad una parete della stessa tecnologia costruttiva analizzata in questo studio.

In particolare il campione ha delle dimensioni pari a 1,00x3,00 m ed è realizzato con blocchi cassero aventi uno spessore di cemento armato di 0,20 m.

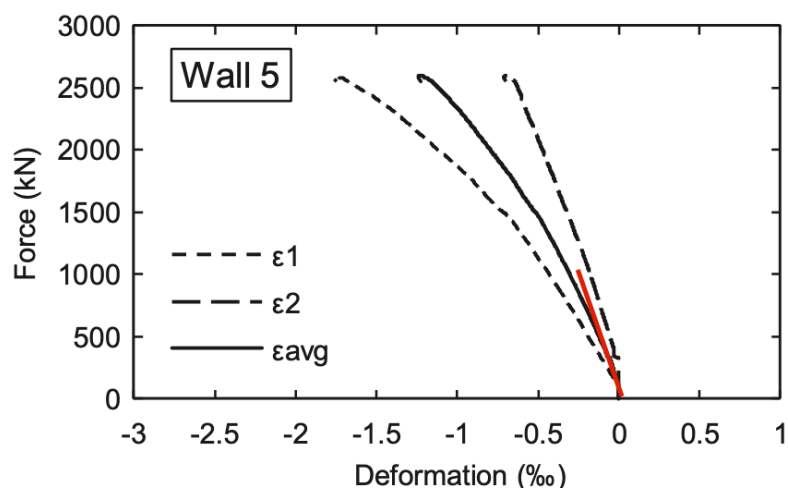


Fig.97 – Curva forza-deformazione [29]

La parete sottoposta alla prova di compressione ha un'area resistente di 0,2 mq.

Al fine di determinare il valore di rigidezza, ovvero il Modulo di Young, nella curva forza-spostamento è stato considerato esclusivamente il tratto iniziale lineare.

Nel primo tratto si nota come il carico applicato sia di 800 kN e la deformazione pari a 0,25 ‰. Pertanto, il Modulo di Young E risulta essere uguale a 8330 MPa.

Nella tabella C8.5.I nell'NTC 2018 [28], dove sono riportati i valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura, risulta che una muratura in mattoni pieni e malta di calce, il valore medio del Modulo di elasticità normale E varia da 1200 – 1800 Mpa.

Di seguito si riporta in un istogramma il confronto tra i valori di rigidezza E.

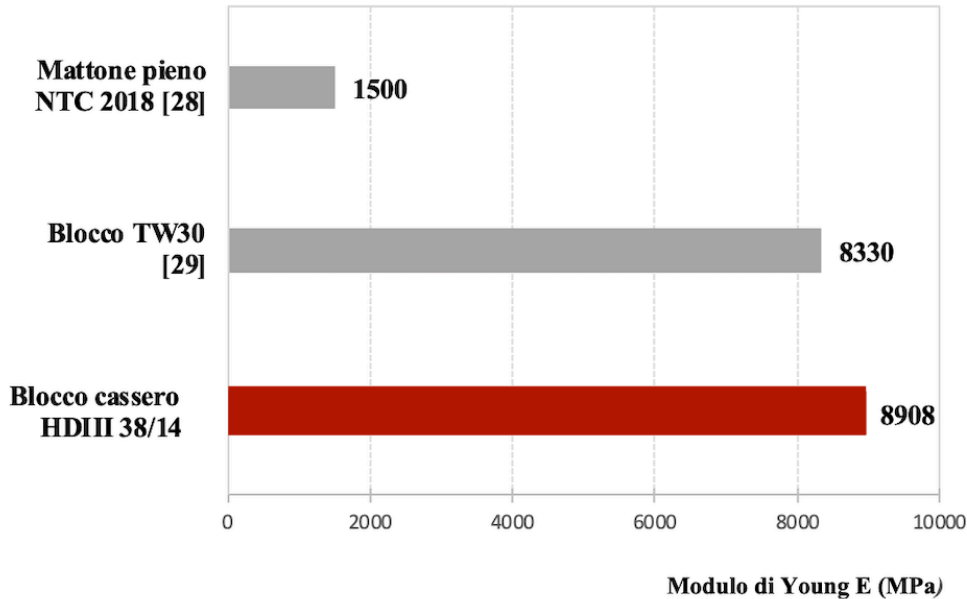


Fig.98 – Istogramma di confronto E

Dal confronto si denota come, la rigidezza risultante dalla presente ricerca sia equiparabile al valore derivante dallo studio sperimentale della stessa tecnologia costruttiva e, di gran lunga maggiore rispetto ad una muratura in laterizio.

Sono stati inoltre analizzati valori della resistenza a taglio con precompressione τ_{\max} e del modulo di elasticità tangenziale G, provenienti da testi presenti in letteratura [30], nei quali vengono analizzati risultati di prove di laboratorio per mostrare che nella rottura per trazione diagonale, i valori dei parametri meccanici proposti dall'Eurocodice 6 non sono in accordo con l'effettiva resistenza delle pareti in muratura.

Tenendo conto del presupposto che la parete in muratura sia un pannello elastico, omogeneo e isotropo, viene proposta l'equazione per la stima della resistenza a taglio f_t della muratura sulla base della teoria elementare dell'elasticità.

$$f_t = \sigma_t = \sqrt{\left(\frac{\sigma_o}{2}\right)^2 + (b\tau_{\max})^2} - \frac{\sigma_o}{2}$$

dove:

$\sigma_o = N/A_w$, sollecitazione di compressione media della sezione orizzontale della parete dovuta al carico verticale;

N carico verticale;

A_w area della sezione trasversale orizzontale del muro;

$T = H/A_w$, tensione di taglio media nella sezione orizzontale della parete dovuta al carico orizzontale H ;

b fattore di distribuzione delle sollecitazioni di taglio, dipende dalla geometria della parete e del rapporto tra il carico verticale N e il carico orizzontale massimo H_{max} . Nel caso in cui il rapporto sia uguale o maggiore di $h/l=1,5$ si può assumere $b = 1,5$.

Calcolando la resistenza a taglio secondo l'espressione sopra riportata, si ottiene un valore della f_t pari a 1,12 MPa.

$$f_t = \sqrt{\left(\frac{500000}{2}\right)^2 + (1,5 \cdot 1,58)^2} - \frac{500000}{2} = 1,12 \text{ MPa}$$

dove:

$$\sigma_o = 500 \text{ kN}$$

$$b = 1,5$$

$$T_{max} = 1,58$$

Tra i campioni in muratura impiegati nelle prove di taglio con precompressione, per il confronto si è scelto di adottare una parete in muratura (campione B3) di 1010x1420x290 mm, i cui elementi cavi in laterizio hanno dimensioni 189x292x188 mm. La resistenza a taglio del campione risulta pari a 0,20 MPa.

Il valore di riferimento medio della f_t in accordo con la normativa [28], per una parete in muratura in blocchi pieni e malta di calce, è compreso tra $0,13 \pm 0,27$ MPa.

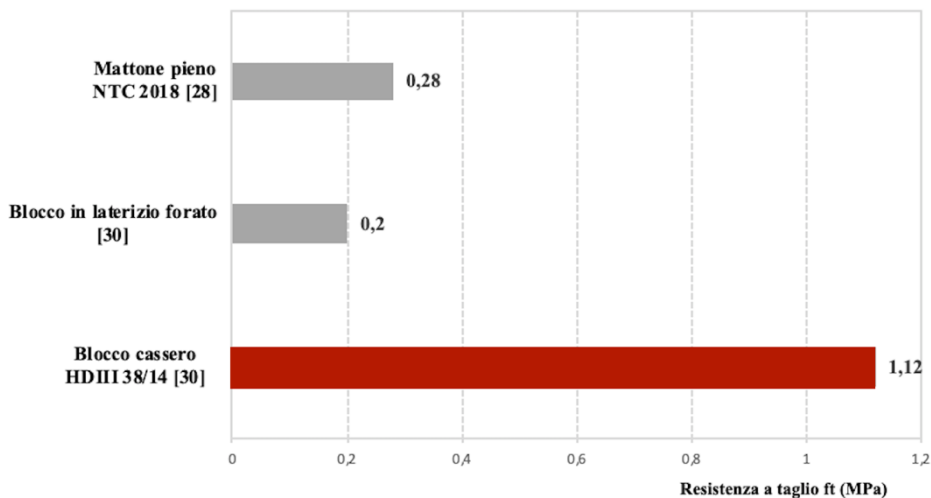


Fig.99 – Istogramma di confronto f_t

Dall'istogramma di confronto si può notare che il valore della resistenza di taglio f_t , calcolato secondo la relazione proposta dallo studio sperimentale [30], risulta superiore sia della resistenza ottenuta per il campione confrontato in laterizio forato che del valore di riferimento indicato in normativa relativo a muratura in laterizio pieno.

La resistenza media a taglio T_{max} verrà confrontata con il valore risultante dallo studio sperimentale sopra citato [30] relativo al campione B3, pari a 0,44 MPa e con il valore medio suggerito dalla normativa [28] relativo a una muratura in mattoni pieni e malta di calce, pari a $0,05 \pm 0,13$ MPa.

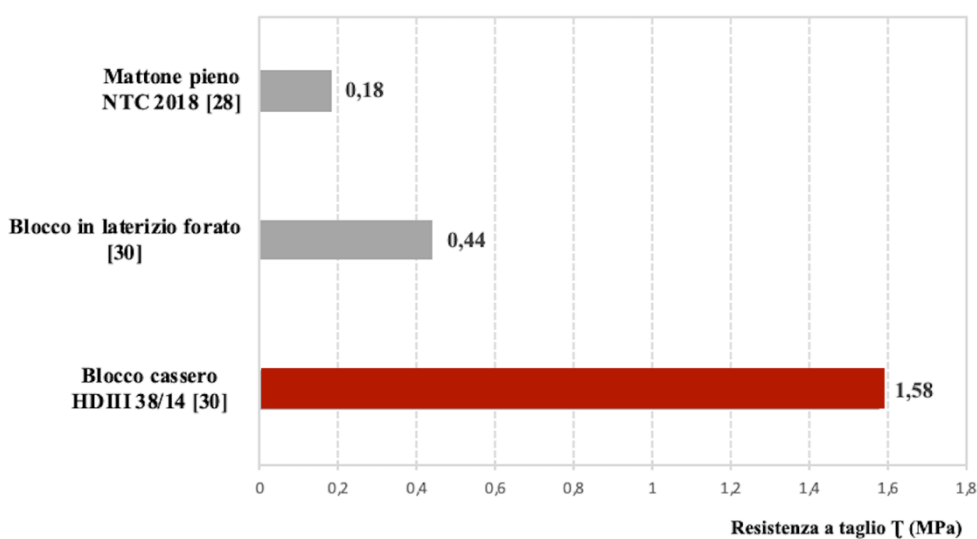


Fig.100 – Iistogramma di confronto T_{max}

Anche per quanto concerne la resistenza a taglio T_{max} , il parametro risulta superiore sia del valore di riferimento fornito dalla normativa, che campione in laterizio forato scelto per il confronto.

Secondo lo studio sperimentale [30], analoga è la non conformità riscontrata nei valori sperimentali del modulo di taglio G , in quanto i valori proposti dall'Eurocodice 6 sono eccessivamente elevati. Al fine di evitare una distribuzione inadeguata del taglio sismico di progetto sulle pareti resistenti nel piano, viene raccomandata di considerare, al posto del valore riportato dall'Eurocodice 6 $G = 0,4E$, i valori ottenuti dalle prove o il valore $G = 0,1E$. Nel caso di studio, calcolando G secondo l'Eurocodice 6 si ottiene un valore di 3563,20 MPa, mentre secondo la stima proposta dallo studio sperimentale di riferimento [30], risulta pari a 890,80 Mpa.

Dai risultati della sperimentazione [30], risulta che per il campione esaminato si ha un valore di 565 MPa.

La normativa, nella tabella C8.5.I, per una muratura in mattoni pieni riporta un valore di riferimento del modulo di elasticità tangenziale G di 400 ± 600 MPa.

Nel sottostante grafico viene mostrato il loro confronto in relazione al valore ottenuto dalla prova di taglio con precompressione svolta in laboratorio.

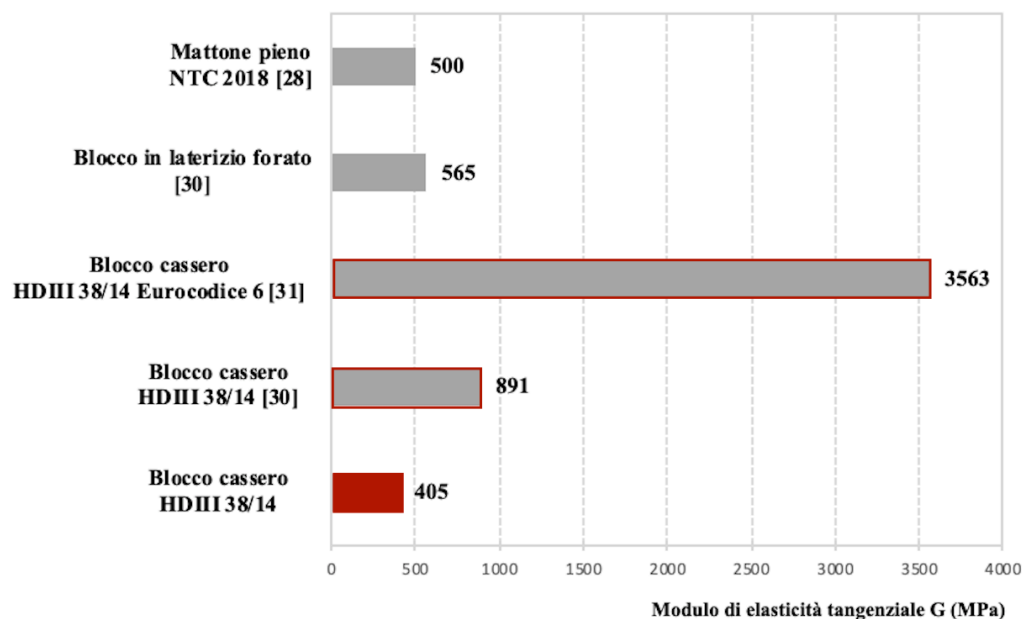


Fig.101 – Istogramma di confronto G

Dalla sperimentazione è stato ottenuto un modulo di elasticità tangenziale G pari a 405 Mpa. Mettendo in relazione il parametro calcolato secondo l'Eurocodice 6 e quello attraverso la relazione proposta nello studio sperimentale di riferimento [30], come dimostrato risulta un valore eccessivamente elevato quello ottenuto secondo l'Eurocodice 6, anche rispetto al valore sperimentale ottenuto dalla prova in laboratorio.

Mentre confrontando il modulo di elasticità tangenziale sperimentale, questo risulta minore sia dal valore fornito dall'NTC 2018 che di quello risultante dallo studio sperimentale [30].

Dunque questa tipologia costruttiva è strutturalmente migliore rispetto ad una muratura tradizionale, in quanto avendo un comportamento intermedio una parete in muratura e una in calcestruzzo, si ha un incremento dei parametri meccanici.

5.2 Comportamento termico

Al fine di valutare l'ottimizzazione del comportamento termico, si riportano di seguito il confronto del comportamento dei campioni esaminati, in modo da valutare l'influenza di vari aspetti, come:

- la presenza del cemento armato e dell'intonaco: confronto tra campione B1 e B2 senza radiazione solare;
- una giornata soleggiata come influisce sul comportamento termico della parete: confronto campione B2 e B2 con lampade solari;
- la differenza di percentuale di open-area della lamiera striata: confronto B3 Prater e B3 Maracana;
- il comportamento termico di una parete ventilata: confronto campione B2, B3 Maracana e B3 Prater.

Confronto del comportamento stazionario campione B1-B2

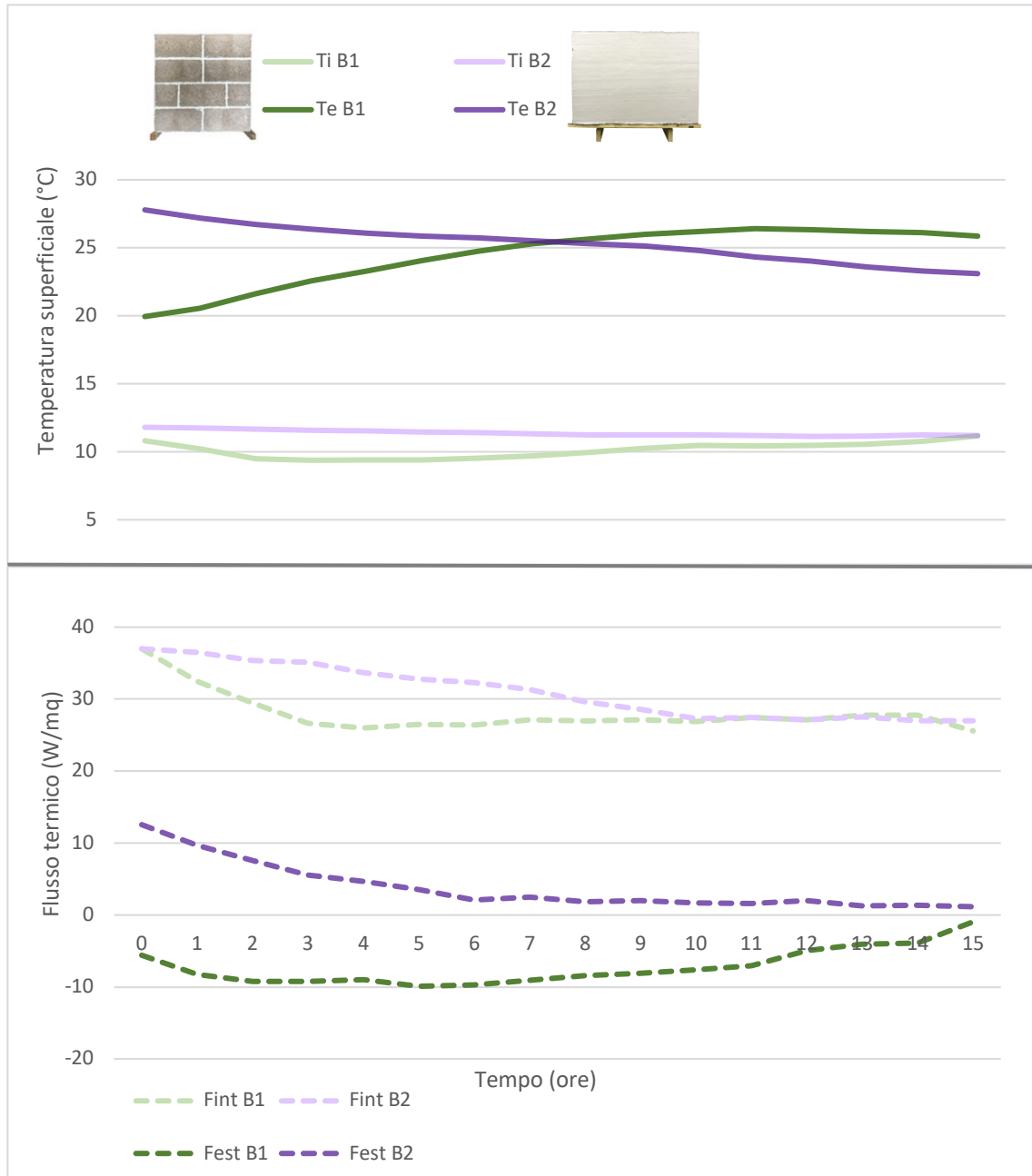


Fig.97 – Confronto comportamento stazionario campione B1-B2

Trascurando il tratto iniziale nel quale i valori si sono stabilizzati, si denota dal grafico che temperatura superficiale interna del campione B1 e del B2 sono pressochè identiche e risultano pari a 11°C.

Mentre grazie sia al calcestruzzo presente all'interno del campione B2 che allo strato di intonaco esterno ed interno, si ha una diminuzione della temperatura superficiale esterna, da 26°C nel caso del campione B1 diminuisce fino a 23°C.

Nel caso del campione B1 si ha una differenza di temperatura superficiale di 15°C, mentre nel campione B2 l'escursione termica è di 12°C.

Per quanto concerne il flusso di calore, nei due campioni quello interno diviene costante a 27 W/mq, invece il flusso esterno nel campione B2 è minore e pari a 1,15 W/mq.

Dalla relazione dei due campioni, si evidenzia dunque un miglioramento del comportamento dovuto allo spessore di cemento armato e di intonaco.

Confronto del comportamento stazionario campione B2-B2 con radiazione solare

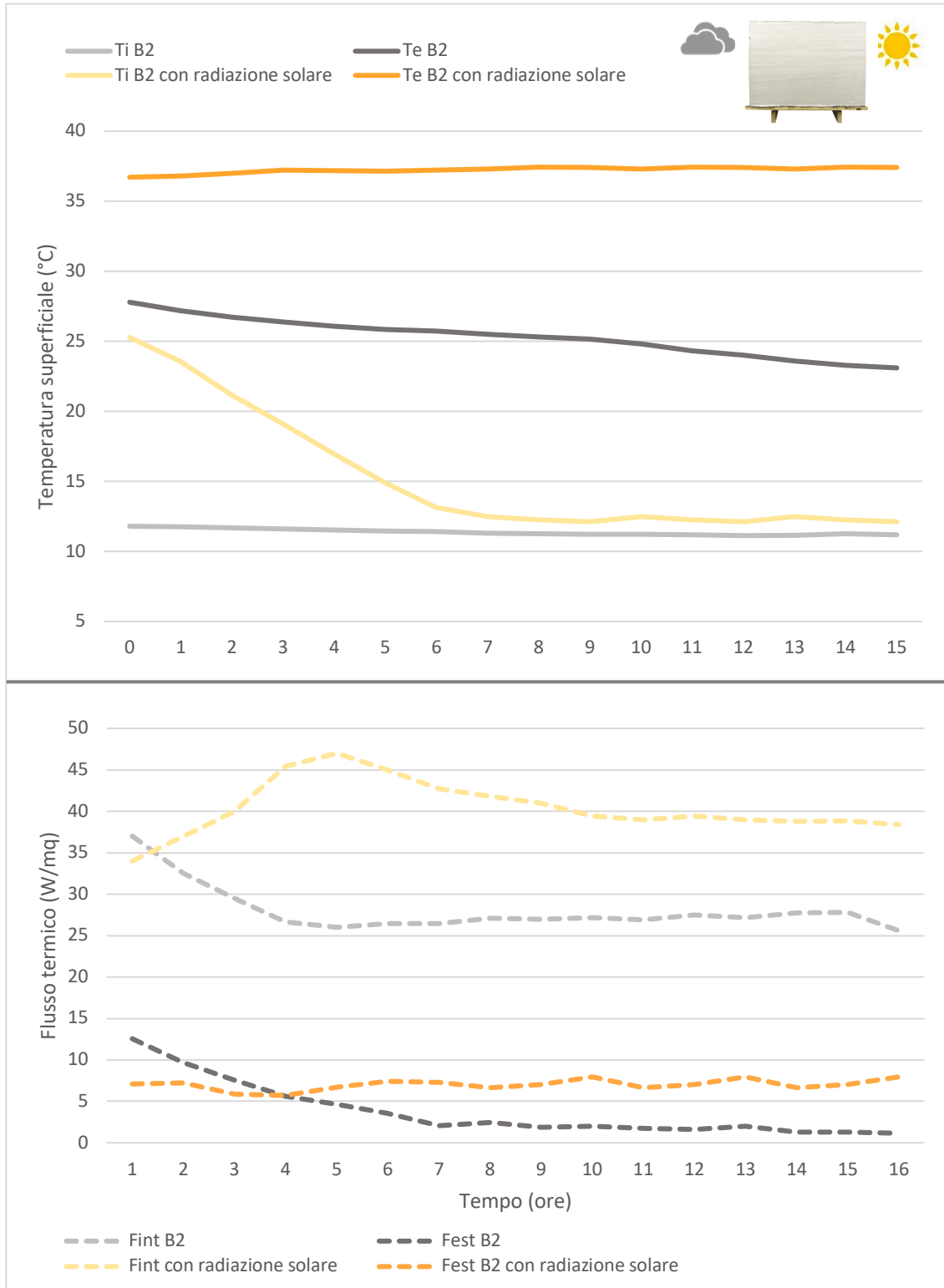


Fig.98 – Confronto comportamento stazionario campione B2

In questo confronto viene analizzata l'influenza della radiazione solare sul comportamento della parete in regime stazionario. Come ci si aspettava, nella sperimentazione termica in cui è stato considerato l'effetto di irraggiamento attraverso le lampade solari, le temperature rilevate sulla superficie della parete sono risultate più elevate.

In particolare la temperatura sulla superficie interna da 11°C sale di un grado, mentre la differenza maggiore si ha nel lato esterno, nel quale da 23°C aumenta fino a toccare i 37°C.

Per quanto riguarda il flusso di calore, anche in questo caso di sono evidenziati degli scostamenti, il calore fornito dalle lampade, fa innalzare il flusso di calore esterno di 7 W/mq. Mentre si ha uno scostamento maggiore relativo al flusso termico uscente, il quale da 26 W/mq aumenta fino a 38 W/mq.

Confronto del comportamento stazionario dei campioni B3 Prater – B3 Maracana

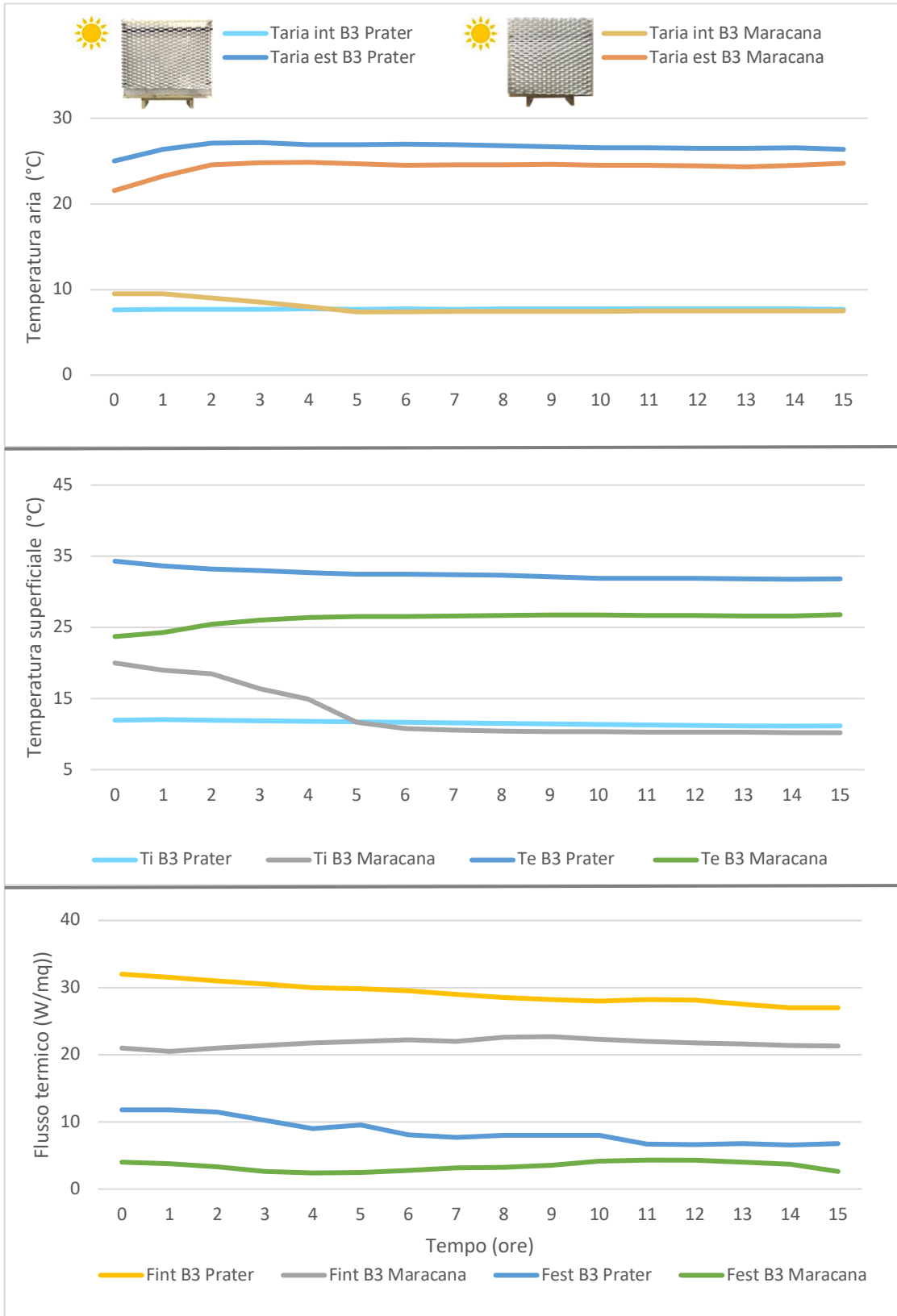


Fig.99 – Confronto comportamento stazionario campioni B3

Nel primo grafico si mettono in relazione i valori di temperatura dell'aria interna, misurata all'interno della camera climatica, e quella dell'aria all'interno del laboratorio di prova.

Ovviamente nell'ambiente interno è stata misurata la stessa temperatura in entrambi i campioni in cui la lamiera differisce per percentuale di foratura. Invece è visibile come il campione B3-Maracana, disponendo di un maggior ombreggiamento sulla propria superficie esterna, immagazzinando una quantità minore di calore, a sua volta produce una minor dispersione termica all'interno dell'ambiente di laboratorio: pertanto rispetto alla prova del campione B2-Prater, la temperatura dell'aria esterna scende di 2°C.

Nel secondo grafico, si riscontra una differenza non significativa tra la temperatura della parete nel lato interno nei due campioni, invece nel lato esterno si mostra evidente il comportamento della parete: da 32°C registrati nel campione B3-Prater, la temperatura diminuisce a 27°C nel campione B3-Maracana.

Analoga è l'andamento del flusso di calore, anche in questo caso con il campione B3-Maracana si ha una diminuzione del flusso che attraversa la parete, sia quello entrante che quello uscente.

Confronto del comportamento stazionario di tutti i campioni con radiazione solare

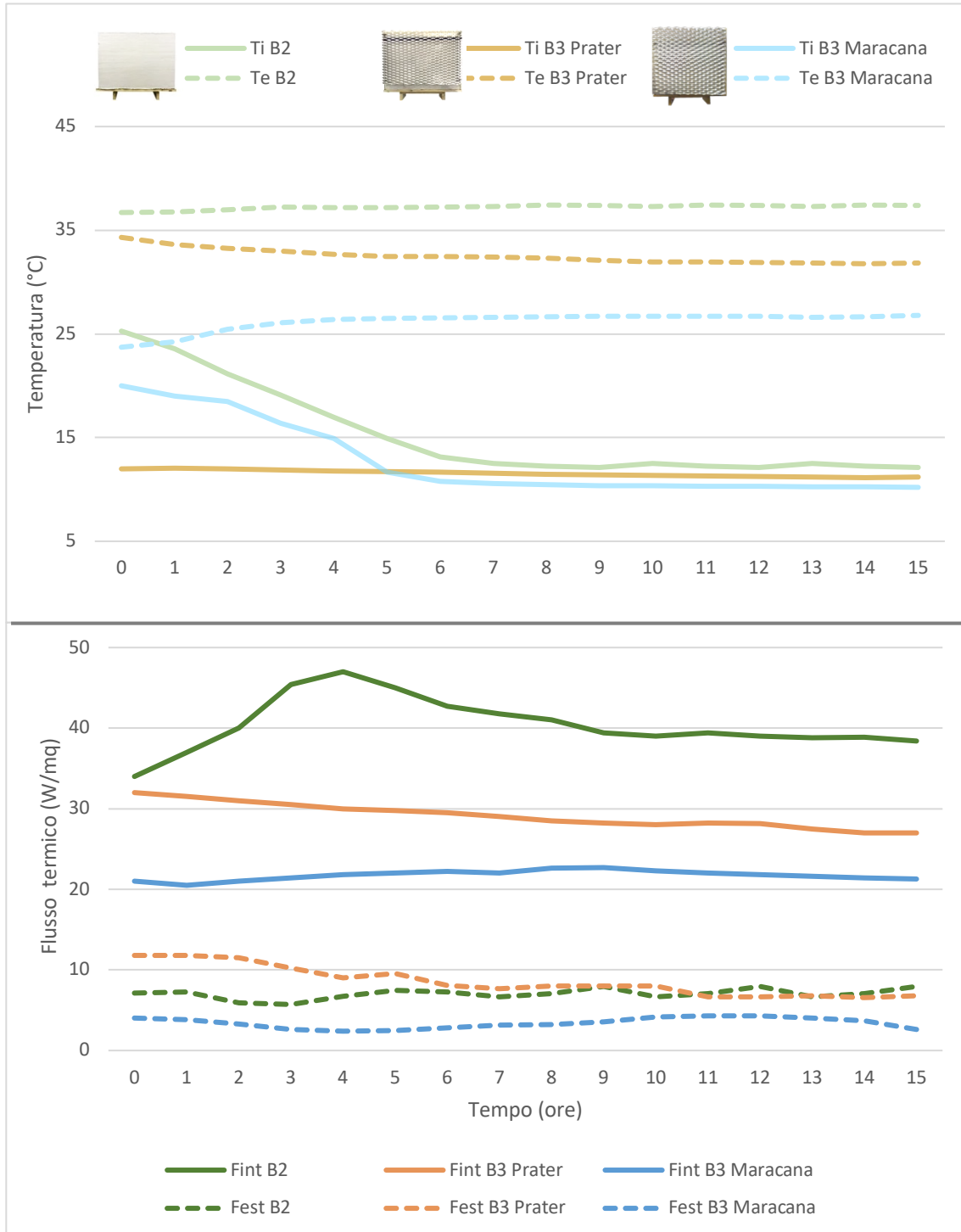


Fig.100 – Confronto comportamento stazionario tutti i campioni

Come è bene visibile tra grafico di confronto delle temperature superficiali, si ha una diminuzione delle stesse grazie all'ombreggiamento fornito dalle lamiere striate e di conseguenza anche un abbassamento della differenza di temperatura tra l'interno e l'esterno. Nelle temperature superficiali interne non sia una grande miglioramento, se non di qualche grado, mentre nel lato esterno le temperature vengono attenuate: i 37°C registrati sul campione B2, diminuiscono a 32°C nel B3-Prater fino a abbassarsi fino a 27° sul campione B3-Maracana.

Analogo è stato il risultato del confronto del flusso termico, se nel flusso esterno si denota un miglioramento tra il campione B2 e il B3-Maracana, la differenza significativa riguarda il flusso interno, il quale da 39 W/mq nel campione B2 diminuisce a 21 W/mq nel B3-Maracana.

Confronto del comportamento dinamico dei campioni con radiazione solare

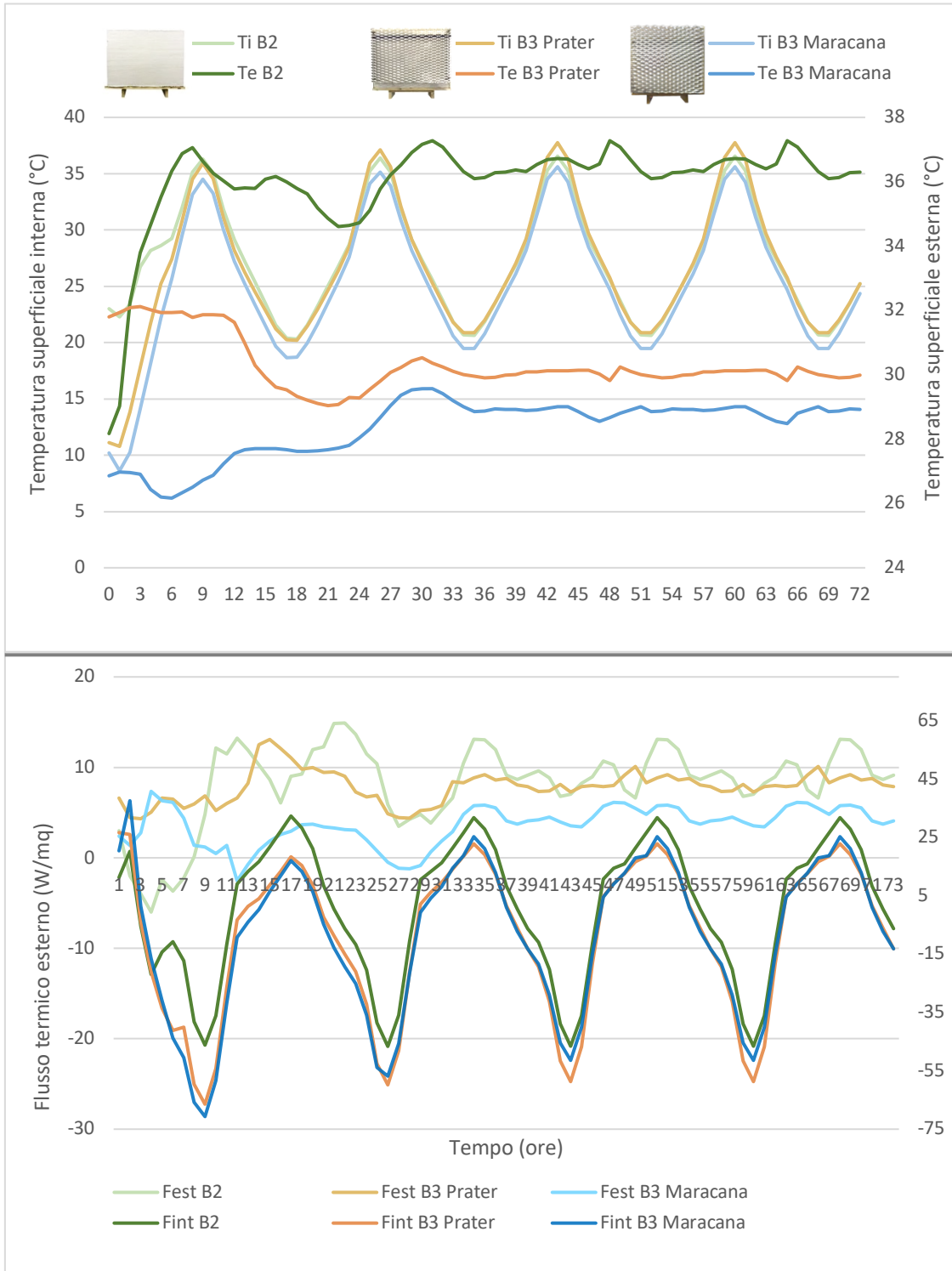


Fig.101 – Confronto comportamento dinamico tutti i campioni

Dalla sovrapposizione dell'andamento delle temperature superficiali esterne con quello delle temperature interne, si denota un'influenza dell'impulso oscillatorio interno imposto nell'ambiente interno.

Tale risultato sta a significare che la dinamicità dell'ambiente interno, comporta una variazione del comportamento esterno della parete riferita ad uno sfasamento dell'onda, infatti come è visibile dai picchi nel grafico, le temperature superficiali esterne seguono l'andamento di quelle interne.

Si denota inoltre, che l'inserimento della schermatura solare, oltre a diminuire i valori di temperature superficiali e flusso, linearizza l'andamento delle temperature superficiali.

In particolare la temperatura superficiale esterna del campione B2 da un valore medio di 37°C, scende 31°C nel campione B3-Prater e diminuisce ulteriormente a 29°C nel campione B3-Maracana.

Le temperature superficiali sul lato interno della parete, nel campione B2 e B3-Prater sono simili, mentre diminuisce di circa 2°C nel provino B3-Maracana.

Per quanto concerne il flusso di calore interno, nei due campioni dotati di lamiera striata (B3-Prater e B3-Maracana) si ha uno stesso andamento, mentre risulta minimamente minore nel campione B2. La differenza significativa si ha nel comportamento nel lato esterno della parete, in quanto grazie alla lamiera Prater il flusso esterno da 10 W/mq passa a 8 W/mq, migliora ulteriormente nel campione B3-Maracana dove scende a un valore medio di 4 W/mq.

6. CONCLUSIONE

L'impiego di blocchi cassero in legno-cemento per il miglioramento prestazionale strutturale e termico degli edifici sta diventando sempre più frequente in edilizia, dati i molteplici vantaggi che ne offre.

Per la caratterizzazione del comportamento strutturale sono state eseguite sulle pareti due tipi di prove: una prova di compressione assiale e una prova di taglio con precompressione, per la determinazione della rigidità e della resistenza a taglio.

Per quanto concerne la prova di compressione del campione, come ci si aspettava, è emerso che presentano un'elevata rigidità pari a 8908 Mpa, di gran lunga superiore della muratura tradizionale in mattoni pieni. Non si è potuto determinare la resistenza di compressione, in quanto per motivi tecnici, non si è riusciti a concludere la prova.

Nella prova di taglio con precompressione si è evidenziato come l'eccentricità del carico laterale applicato e l'assenza dei giunti di malta dei blocchi ne scaturisce uno slittamento degli stessi, essendo semplicemente in appoggio gli uni sugli altri.

Il meccanismo di rottura principale che si è verificato è di fessurazione diagonale, che può essere paragonabile a quello di una parete in muratura tradizionale.

La resistenza di taglio ricavata dalla prova di laboratorio è di 1,58 MPa, maggiore della τ della muratura classica. Anche la resistenza media a taglio f_t aumenta con valori di 1,12 Mpa, mentre si è visto come rispetto ad una muratura tradizionale in mattoni pieni è inferiore, ovvero pari a 405 MPa.

Dunque questa tipologia costruttiva è strutturalmente migliore rispetto ad una muratura tradizionale, in quanto avendo un comportamento intermedio una parete in muratura e una in calcestruzzo, si ha un incremento dei parametri meccanici.

Il comportamento termico di una parete ventilata è stato valutato attraverso l'impiego della camera climatica che simula l'ambiente interno dell'involucro, sono stati assegnati sia degli input costanti nel tempo (in regime stazionario) che armonici (in regime dinamico) al fine di determinarne i relativi parametri e capire se vi è una correlazione tra le condizioni imposte nell'ambiente interno e quello esterno.

Al fine di valutare l'ottimizzazione del comportamento termico, sono stati confrontati i campioni esaminati variando la presenza del cemento armato e dell'intonaco, valutando

l'influenza di una giornata soleggiata, alternando una lamiera striata con differente percentuale di open-area.

I risultati hanno mostrato come, lo strato di cemento armato e di intonaco interno ed esterno hanno migliorato il comportamento termico della parete in cui blocchi cassero all'interno erano cavi, questo si è tradotto in una diminuzione del flusso di calore e della temperatura superficiale esterna.

L'effetto di irraggiamento simulato con le lampade solari, come ci si aspettava, ha comportato un innalzamento significativo sia della temperatura superficiale esterna che del flusso interno.

La differente percentuale di open-area delle due lamiere utilizzate per realizzare la parete ventilata, ha influito sulla risposta termica della parete esaminata. Si è effettivamente riscontrato un miglioramento prestazionale (in termini di temperatura superficiale esterna e flusso di calore), tanto maggiore quanto è minore il grado di foratura, garantendo un maggior ombreggiamento della parete.

Inoltre l'inserimento della schermatura solare, oltre a diminuire i valori di temperature superficiali e flusso, linearizza l'andamento delle temperature superficiali.

Inoltre si è dimostrato che, la dinamicità dell'ambiente interno legata ad un impulso oscillatorio, comporta una variazione del comportamento esterno della parete riferita ad uno sfasamento dell'onda.

BIBLIOGRAFIA

- [1] EOTA. ETAG 009: 2002 – Sistemi di casseforme permanenti a base di blocchi forati o pannelli di materiale isolante e talvolta calcestruzzo.
- [2] CEN. EN 15498:2008 – Prodotti prefabbricati in calcestruzzo - Cassaforma in blocchi di legno truciolare - Proprietà e prestazioni del prodotto.
- [3] Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici. 2011 – Linee guida per i sistemi costruttivi a pannelli portanti basati sull'impiego di blocchi cassero e calcestruzzo debolmente armato gettato in opera.
- [4] CEN. EN 1998-1 Eurocodice 8:2013 – Progettazione di strutture per la resistenza sismica - Parte 1: regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici.
- [5] Roberto Scotta, Davide Trutalli. Art.: 2021 – Elementi strutturali in cemento armato gettati in casseri in cemento-truciolato sottoposti a compressione e flessione fuori piano.
- [6] Ceccoli C., Dallavalle G., Mantovani L., Tullini N. Art.:2000 –Indagini sperimentali effettuate su pareti realizzate con blocchi cassero in legno-cemento.
- [7] Ceccoli C., Diotallevi PP., Tullini N. Art.: 2001 Identificazione strutturale di un fabbricato a pareti portanti realizzate con blocchi cassero in legno-cemento.
- [8] Gasparini G., Trombetti T., Silvestri S., Ceccoli C., Malavolta D. Art.: 2008 – Risultati delle prove pseudostatiche con carico ciclico orizzontale su pannelli in c.a. realizzati con blocchi cassero di legno-cemento.
- [9] Comodini F., Fulco A., Mezzi M. Art.:2014 – Risultati e simulazione analitica di prove di compressione assiale e diagonale su pannelli di cemento armato gettati con sistema a blocchi di legno.
- [10] Comodini F., Fulco A., Mezzi M. Art.:2015 – Analisi sperimentale, analitica e numerica del comportamento sismico di grandi pareti in calcestruzzo rinforzato gettate con blocchi in legno.

- [11] Comodini F., Fulco A., Mezzi M. Art.:2015 – Prove sperimentali di compressione verticale su pannelli in cemento armato realizzati con sistema a blocchi di legno e valutazione teorica del carico critico.
- [12] Minotto M., Verlatto N, Dona` M, Da Porto F. Libro “Muratura in mattoni e blocchi. Dalla muratura storica a quella sostenibile”: 2020 – Cap. “Sperimentazione a taglio-compressione di pareti in blocchi cassero legno-cemento a grandezza naturale.”
- [13] Li M., Khelifa M., Khennane A., El Ganaoui M. Art.:2019 – Risposta strutturale di pannelli compositi di legno legati con cemento come casseforme permanenti.
- [14] Dominguez-Santos D., Mora-Melia D., Pincheira-Orellana G., Ballesteros - Perez P., Retamal-Bravo C. Art.: 2019 – Proprietà meccaniche e prestazioni sismiche dei blocchi compositi legno-calcestruzzo per l’edilizia.
- [15] UNI 10355:1994 – Murature e solai. Valori della resistenza termica e metodo di calcolo.
- [16] UNI EN ISO 6946:2008 – Resistenza termica e trasmittanza termica.
- [17] D.M. dell’11 Ottobre 2017 – Criteri ambientali minimi per l’affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici pubblici.
- [18] EN 12089: 2013 – Isolanti termici per l’edilizia. Determinazione del comportamento a flessione.
- [19] EN 826: 2013 – Isolanti termici per l’edilizia. Determinazione del comportamento a compressione.
- [20] EN 1607: 2013 – Isolanti termici per l’edilizia. Determinazione della resistenza a trazione perpendicolare alle facce.
- [21] UNI EN 1052-1:2001 – Metodi di prova per muratura. Determinazione della resistenza a compressione.

- [22] Miha Tomazevic, Art. 23 settembre 2008 – Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6: shear versus tensile strength of masonry.
- [23] F. Stazi, M. Serpilli, G. Chiappini, M. Pergolini, E. Fratolocchi, S. Lenci, Art. 2020 – “Experimental study of the mechanical behaviour of a new extruded earth block masonry”.
- [24] UNI 10351:2015 – Materiali e prodotti per l’edilizia. Proprietà termoigrometriche. Procedura per la scelta dei valori di progetto.
- [25] UNI EN ISO 13786:2018 – Prestazione termica dei componenti per l’edilizia. Caratteristiche termiche dinamiche. Metodi di calcolo.
- [26] UNI 10349-1:2016 – Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici.
- [27] G. Baldinelli, F. Bianchi, A. Lechowska, J.A. Schnotale, Art. 2018 – Dynamic thermal properties of building components.
- [28] Capitolo 8, Circolare NTC 2018.
- [29] R. Scotta, D. Trutalli, Art. 2021 – Reinforced concrete structural elements cast into wood-chip cement formworks subjected to compression and out-of-plane bending.
- [30] M. Tomazevic, Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, Art. 2009 – Shear resistance of masonry walls and Eurocode 6: shear versus tensile strength of masonry.