



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Edile

***Studio del comportamento meccanico di pannelli sandwich
in calcestruzzo armato***

Study of the mechanical behaviour of reinforced concrete sandwich panels

Relatore:

Prof. Ing. Michele Serpilli

Tesi di Laurea di:

Jamee Hasnat

Anno accademico 2021/2022

INDICE

1. INTRODUZIONE	3
2. STORIA	4
3. TECNOLOGIA dei pannelli sandwich in calcestruzzo armato	6
3.1 Montaggio dei pannelli sandwich	7
4. COMPOSIZIONE dei pannelli sandwich in c.a.	9
4.1 Aggiunte metalliche	10
4.2 Tipi di isolamento	12
4.3 EPS (polistirene espanso sintetizzato)	13
4.4 XPS (polistirene espanso estruso)	15
4.5 PUR (poliuretano espanso rigido)	16
4.6 PIR (poliisocianurato)	17
4.7 Lana di roccia	19
4.8 Lana di vetro	21
5. VANTAGGI e svantaggi dei pannelli sandwich strutturali in c.a.	23
6. QUADRO NORMATIVO	24
6.1 La marcatura CE	26
6.2 La contraffazione e le sanzioni del marchio CE	28
7. COMPORTAMENTI MECCANICI dei pannelli sandwich in c.a.	29
7.1 Comportamento dei pannelli sandwich in c.a. sotto carico da esplosione	30
7.2 Prova a compressione diagonale dei pannelli sandwich in c.a.	45
7.3 Prova a compressione centrata dei pannelli sandwich in c.a.	48
7.4 Prova a compressione eccentrica dei pannelli sandwich in c.a.	55
7.5 Prova a precompressione e taglio dei pannelli sandwich in c.a.	63
8. CONCLUSIONI	67
9. BIBLIOGRAFIA	68
10. SITOGRAFIA	69

1. INTRODUZIONE

Nel 1849, il giardiniere francese Joseph Monier sviluppò una tecnologia per creare pentole e vasche di fiori usando un calcestruzzo armato con una rete di fili di ferro. Nel 1867, il francese François Hennebique utilizzò la tecnologia di Monier per costruire una casa in calcestruzzo armato.

L'utilizzo del calcestruzzo armato nell'edilizia su larga scala cominciò a diffondersi alla fine del XIX secolo, grazie soprattutto all'ingegnere svizzero Robert Maillart, che sviluppò una serie di tecniche di calcestruzzo armato per costruire ponti, archi e viadotti.

Nel corso del XX secolo, l'utilizzo del calcestruzzo armato divenne sempre più comune in edilizia, grazie alla sua resistenza, durata e versatilità, fino a diventare uno dei materiali più utilizzati nel mondo dell'edilizia per la costruzione di strutture residenziali, commerciali e industriali.



Figura 1 ponte del Salginatobel, 1929, Robert Maillart

Negli ultimi anni, il crescente bisogno di migliorare la costruzione sotto l'aspetto dell'impatto energetico e di sostenibilità ha portato a concepire sempre nuove

tipologie di tecniche di costruzione usando sia nuovi tipi di materiali sia usando “vecchi” materiali ma con un approccio differente.

Uno di queste nuove tecnologie è l'utilizzo di pannelli sandwich in calcestruzzo armato, ovvero la metodologia costruttiva presa in esame per questo lavoro di tesi.

2. STORIA

I pannelli sandwich in calcestruzzo armato hanno una storia relativamente breve, rispetto ad altri materiali da costruzione come il legno o la pietra.

Sono stati introdotti per la prima volta negli anni '50 nel XX secolo, quando l'industria delle costruzioni stava cercando nuove soluzioni per costruire edifici più efficienti, sicuri e sostenibili.

L'idea di utilizzare il calcestruzzo armato come materiale isolante non è nuova: negli anni '20 nel XX secolo, l'ingegnere tedesco Konrad Wachsmann aveva sviluppato un sistema di pannelli a sandwich in cui lo strato isolante era costituito da trucioli di legno pressati, mentre gli strati esterni erano in calcestruzzo armato. Questi pannelli, noti come "pannelli Wachsmann", furono utilizzati per la costruzione di alcune fabbriche in Germania.

Negli anni '60 e '70, i pannelli sandwich in calcestruzzo armato divennero sempre più popolari, grazie alla loro capacità di offrire un'alta resistenza e isolamento termico, combinata con una maggiore flessibilità di design rispetto alle soluzioni tradizionali. Oggi, i pannelli sandwich in calcestruzzo armato sono utilizzati in tutto il mondo per la costruzione di edifici industriali, commerciali e residenziali.

I sistemi strutturali costituiti da pareti in c.a. gettato in opera, le quali utilizzano un materiale leggero come supporto per il calcestruzzo, risultano essere molto promettenti ed è il caso delle ICFs (Insulated Concrete Forms), sistema costruttivo utilizzato per eseguire pareti in c.a. mediante casseri isolanti (per esempio il



polistirene). Il polistirene rimane assorbito nel getto di calcestruzzo, svolgendo la funzione di isolamento termico permanente; quindi, è utilizzato come “cassero a perdere”. Nella seguente figura viene riportato un esempio del sistema costruttivo basato su casseri a perdere.

Figura 2 esempio pannello sandwich con anima isolante e rivestimento in calcestruzzo,

venduto da EBAWE Anlagentechnik GmbH

Lo studio riguardante i pannelli portanti di tipo sandwich, precompressi o gettati in opera, che utilizzano un materiale leggero interposto come l'EPS, si è sempre più sviluppato negli ultimi anni grazie al loro vantaggio di ottenere elevati livelli di efficienza strutturale e ottime prestazioni termo-acustiche.

I pannelli sandwich prefabbricati PCSP (Precast Concrete Sandwich Panels) da quelli gettati in opera si differenziano per le modalità realizzative, in quanto quelli prefabbricati risultano interamente prodotti ed assemblati in stabilimento, mentre la seconda tipologia viene completata in opera. I pannelli gettati in opera, conosciuti come RCSP (Reinforced Concrete Sandwich Panels), sono costituiti da una lastra di materiale isolante alla quale vengono accoppiate due reti elettrosaldate tramite dei connettori metallici; il pannello murario viene completato in opera poi con il calcestruzzo spruzzato.

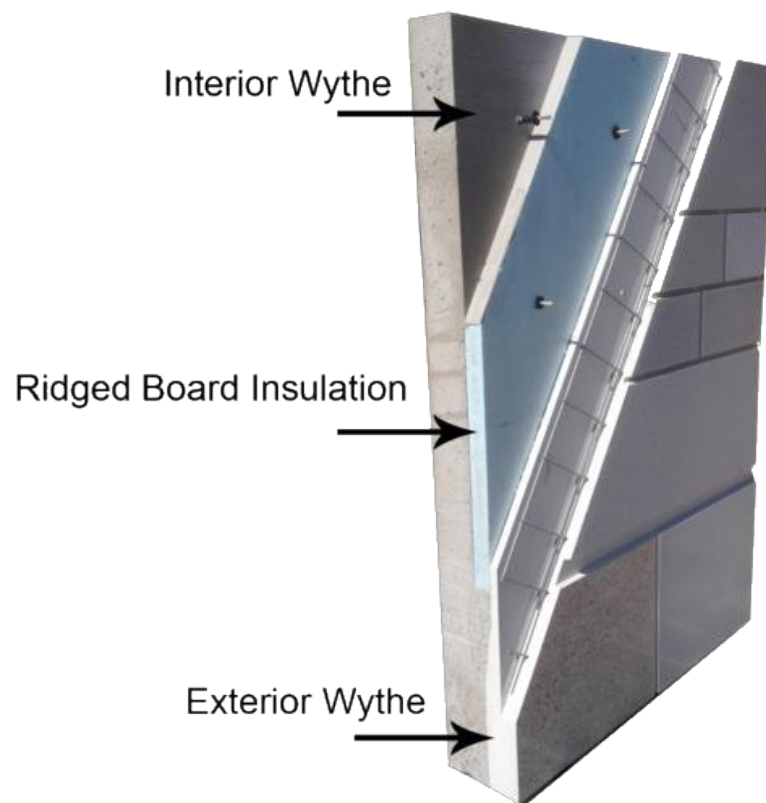


Figura 3 esempio pannello PCSP

3. TECNOLOGIA dei pannelli sandwich in calcestruzzo armato

I pannelli sandwich in c.a., prefabbricati o gettati in opera, vengono adoperati come unità strutturali nella realizzazione di pareti portanti di edifici residenziali, commerciali e pubblici.

L'utilizzo dei pannelli sandwich per uso strutturale crea una valida alternativa funzionale nella costruzione di edifici, ponendosi al primo posto per velocità di

posa in opera, economicità e basso dispendio di manodopera, oltre ad offrire ottimi valori di efficienza energetica.

Per questo motivo, il bisogno di una tecnologia ecosostenibile del mercato attuale, favorisce un rinnovato interesse nell'utilizzo di pannelli sandwich con funzione strutturale.

3.1 Montaggio dei pannelli sandwich

La disponibilità dell'attrezzatura in cantiere deve essere considerata durante il processo di progettazione del pannello.

Le condizioni di cantiere, strade e scavi devono essere considerate per eliminare la torsione dei pannelli durante l'accesso all'area di montaggio.

I diagrammi di manipolazione sono fondamentali per la manipolazione sicura dei pannelli e dovrebbero essere incorporati nei disegni esecutivi del produttore e nei biglietti del negozio dal progettista del calcestruzzo prefabbricato e messi a disposizione del montatore.

Il produttore del pannello deve fornire i dettagli del disegno e deve disporre di tecniche di montaggio pre-pianificate che sono uniche per il progetto. La considerazione di gru o attrezzature di movimentazione è d'obbligo. Il progettista di calcestruzzo prefabbricato dovrebbe fare riferimento al PCI Design Handbook e MNL-127-99.

I passaggi chiave generici per un buon montaggio sono i seguenti:

1. *Preparazione del terreno:* prima di iniziare il montaggio dei pannelli, è importante preparare il terreno su cui verranno installati. Il terreno deve essere livellato e compattato per garantire una base solida e stabile per i pannelli;
2. *Posizionamento dei pannelli:* i pannelli in calcestruzzo sandwich sono solitamente prefabbricati in fabbrica e trasportati sul sito di costruzione. Una volta sul posto, i pannelli vengono posizionati e allineati tra loro. Il posizionamento dei pannelli può essere fatto manualmente o con l'uso di attrezzature meccaniche;
3. *Fissaggio dei pannelli:* i pannelli vengono fissati al terreno o alla struttura esistente utilizzando bulloni, staffe o altre attrezzature di fissaggio. Questo garantisce la stabilità dei pannelli e previene il movimento indesiderato;
4. *Collegamento dei pannelli:* una volta fissati, i pannelli devono essere collegati tra loro. Questo può essere fatto utilizzando apposite staffe di collegamento o attraverso il collegamento tra le barre di armatura interne ai pannelli (bisogna studiare caso per caso);
5. *Sigillatura dei giunti:* i giunti tra i pannelli devono essere sigillati per evitare infiltrazioni di acqua o aria. Questo può essere eseguito con l'uso di apposite guarnizioni o di sigilli specifici per calcestruzzo;
6. *Rifinitura:* infine, i pannelli possono essere rifiniti a piacimento con la verniciatura o altri trattamenti superficiali.

È importante notare che il montaggio dei pannelli in calcestruzzo sandwich deve essere eseguito da professionisti esperti per garantire la sicurezza e la qualità del lavoro.

I rinforzi temporanei sono comuni nella costruzione di pannelli sandwich portanti e il rinforzo deve essere una parte dell'analisi del pannello sandwich.

Le fondamenta dell'edificio, il posizionamento parziale della soletta dell'edificio, le fondamenta temporanee, i pilastri o gli elementi morti vengono utilizzati come fondazioni per gli elementi utilizzati per rinforzare i pannelli prefabbricati in calcestruzzo.

4. COMPOSIZIONE dei pannelli sandwich in c.a.

I pannelli sandwich sono formati da due paramenti esterni in calcestruzzo spruzzato in opera, rinforzato con rete metallica, interposti con uno strato isolante che ha la funzione di supporto.

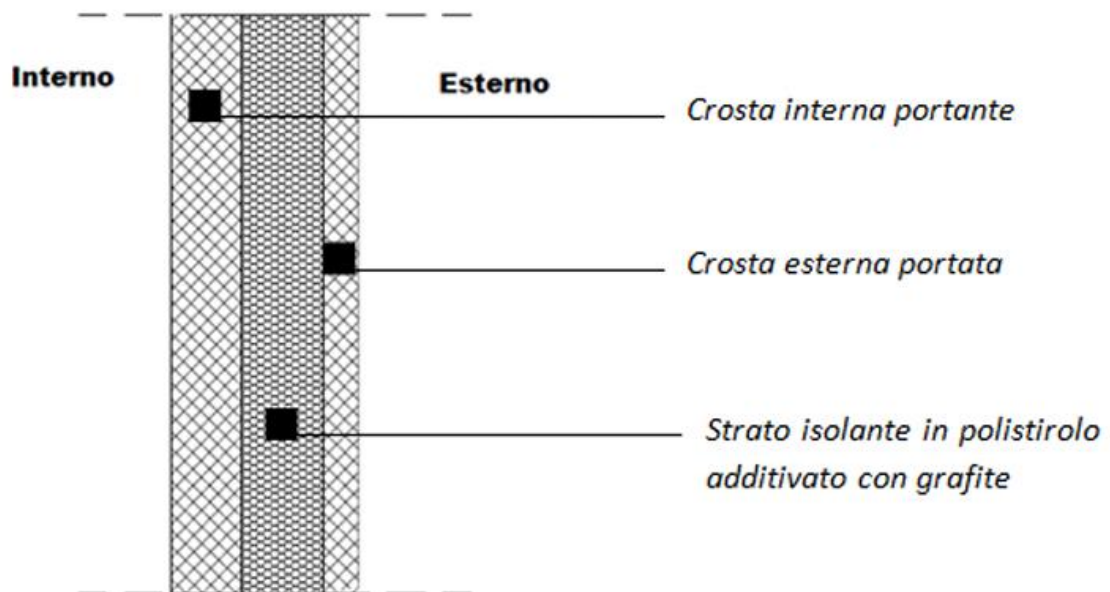


Figura 4 esempio pannello prefabbricato coibentato con polistirolo additivato con grafite

Al pannello possono essere collegati dei rinforzi longitudinali, connessi tra loro con dei connettori metallici. I paramenti esterni in calcestruzzo possono essere considerati strutturali o non strutturali nel seguente modo:

- Paramenti esterni in calcestruzzo strutturali: entrambi i paramenti offrono al pannello una resistenza al carico.
- Paramenti esterni in calcestruzzo non strutturali: i paramenti vengono utilizzati per scopi estetici o di tamponatura, senza presentare alcun contributo alla resistenza ai carichi applicati.

4.1 Aggiunte metalliche

I pannelli sandwich in c.a. possono essere formati anche da paramenti metallici, che costituiscono le facce esterne dei pannelli sandwich, possono essere costituite da: acciaio zincato, preverniciato, alluminio naturale o preverniciato, acciaio inox e rame.

Il paramento metallico costituisce la superficie esterna del pannello a contatto con l'ambiente.

La scelta dell'elemento ricade sul progettista/installatore, in funzione dell'impiego al quale sarà destinato (copertura, parete, controsoffitto, tramezzatura, ecc.) e del luogo in cui verrà installato (interno, esterno, zona montana, area industriale, ambiente agricolo, ecc.).

La scelta avviene in base alle caratteristiche tecniche valutate dall'installatore oppure in funzione della resistenza alla corrosione e quindi delle aspettative di durabilità del prodotto.

La raccomandazione del produttore ai progettisti è di scegliere la tipologia di paramento tenendo conto dei fattori ambientali (esposizione all'azione del vento,

irraggiamento solare, ambienti industriali, vicinanza al mare, ambienti agricoli/allevamenti, ecc.).

Inoltre, la scelta dei paramenti metallici deve sempre avvenire alla massima considerazione di fattori quali le dilatazioni/allungamenti tipici del metallo scelto, che possono comportare deformazioni permanenti nel manufatto finito dopo la sua installazione.

La lamiera dei paramenti metallici può essere grecata, dogata, micro-nervata o liscia; quale impiegare dipenderà dalla scelta dell'utenza in funzione dell'applicazione prevista per il prodotto. I produttori sconsigliano l'uso del paramento liscio poiché presenta un alto rischio di porre in evidenza ondulazioni del metallo dovute ai processi di laminazione, oppure alla colata di schiuma che avviene per fasi alternate successive.

Tipicamente si utilizza un calcestruzzo di classe C25/30 (resistenza cubica a compressione caratteristica, R_{ck} , pari a 30 Mpa e resistenza cilindrica a compressione caratteristica, f_{ck} , pari a 25 Mpa), in accordo con l'Eurocodice 2, con uno slump S5 e inerti di diametro massimo pari a 3 mm.

La quantità di armatura fornita dalle reti elettrosaldate ($\emptyset 2.5/5$ cm x 5 cm), assieme allo spessore dei due strati di calcestruzzo che costituiscono la parte finale in c.a. (4 cm + 4 cm), portano ad una percentuale di armatura pari a 0.00245%.

Le pareti gettate in opera sono pareti sandwich formate da due paretine dello spessore di 4 cm ciascuna armata con le reti elettrosaldate (ed eventualmente con barre integrative) connesse tra loro con il polistirene e i connettori metallici.

4.2 Tipi di isolamento

Le dimensioni ed il tipo di isolamento da interporre tra i due paramenti esterni in calcestruzzo dipendono dalle necessità di resistenza termica che si vuole far avere alla struttura e dalla posizione del sito di installazione.

La scelta del tipo di isolamento per migliorare le prestazioni energetiche è importante quanto il rinforzo necessario per migliorare le prestazioni strutturali. A seconda della posizione del sito, delle variabili climatiche e delle condizioni operative, la scelta dell'isolamento può influire sulla longevità dell'efficacia prevista del pannello.

Solitamente vengono impiegati isolanti di tipo cellulare, grazie alle loro proprietà fisiche che risultano essere le più compatibili con il calcestruzzo. L'isolamento cellulare utilizzato per la produzione di pannelli sandwich è costituito da materiale termoplastico o termoindurente.

Non tutti i pannelli isolanti sono realizzati con gli stessi materiali di coibentazione; sono diverse le possibilità che il settore propone e le tipologie di materiali termoplastici utilizzati sono:

- EPS (polistirene espanso sinterizzato)
- XPS (polistirene espanso estruso)

Mentre per i materiali termoindurenti abbiamo:

- PUR (poliuretano espanso rigido)
- PIR (poliisocianurato)

Tabella 1 Valori caratteristici dei vari materiali isolanti

Materiali isolanti	Lambda (λ) (W/mK)	Densità (ρ) (kg/m ³)
Lana di roccia	0,040	30
Lana di vetro	0,040	20
Polistirene espanso in lastre (EPS)	0,040	20
Polistirene estruso in lastre (XPS)	0,035	35
Poliuretano (PUR)	0,030	30
Schiuma Poliisocianurato (PIR)	0,022	34

4.3 EPS (polistirene espanso sintetizzato)

L'EPS è costituito per il 98% da aria, la restante parte da carbonio ed idrogeno, al termine del processo di formazione si ottiene un prodotto rigido e di peso ridotto sotto forma essenzialmente di lastra.

EPS, come materiale isolante per l'edilizia

Per valutare il potere isolante di un materiale, si devono considerare alcune grandezze fisiche come:

- la Conducibilità Termica (λ): l'attitudine di un materiale a trasmettere il calore. Più è basso il valore di λ , tanto più il potere isolante del materiale è forte;
- la Resistenza alla diffusione del Vapore (μ): misura il comportamento di un materiale al passaggio dell'umidità; indica se il materiale è igroscopico o meno quindi se assorbe vapore acqueo e può crearsi condensa al suo interno. Alti valori di μ determinano un'alta resistenza alla diffusione del vapore;

- la Densità: misura la capacità di un materiale di accumulare calore. È una grandezza molto importante al fine di valutare il comportamento estivo del materiale isolante. Una buona capacità di accumulo del calore, in estate si traduce in un buon livello di ritardo nel passaggio del calore dall'esterno all'interno. Ad alti valori di densità sono associati bassi valori di conducibilità.

L'EPS come materiale isolante ha:

- ottimi valori di conducibilità termica (quasi tutti inferiori allo 0.050 W/mK);
- elevata resistenza alla diffusione del vapore; L'EPS è resistente all'umidità e all'acqua: è permeabile al vapore acqueo, quindi traspirante, ma è impermeabile all'acqua. La permeabilità al vapore acqueo fa sì che all'interno di edifici e ambienti isolati con EPS non si formino muffe;
- le lastre che hanno densità fra i 30 e 50 Kg / m³ presentano valori ottimali di conducibilità termica. Densità inferiori o superiori determinano un aumento di λ e quindi una diminuzione della capacità isolante.

EPS, aspetti normativi e agevolazioni fiscali

Oltre alle grandezze fisiche e alle altre proprietà che caratterizzano il materiale, l'acquirente, il progettista o il posatore, che decidono di utilizzare lastre di EPS per l'isolamento, devono sapere che la qualità dei manufatti in EPS per impiego in edilizia come isolante termico è garantita dal rispetto di quanto previsto dalla norma di prodotto UNI EN 13163, che prevede l'obbligo della Marcatura CE.

In merito al Superbonus 110% va sottolineato che il Decreto Requisiti Tecnici pone delle limitazioni nella scelta dei materiali indirizzando gli operatori all'uso di prodotti più ecosostenibili.

Il Decreto Rilancio, inoltre, indica anche che i materiali isolanti utilizzati devono rispettare i Criteri Ambientali Minimi - CAM (di cui al DM 11 ottobre 2017).



Figura 5 pannello termoisolante in EPS, RÖFIX EPS-F 036

4.4 XPS (polistirene espanso estruso)

Il polistirene espanso estruso in edilizia è utilizzato in particolare come materiale isolante applicato all'involucro delle costruzioni. Le lastre possono essere utilizzate sia da sole che accoppiate con altri materiali.

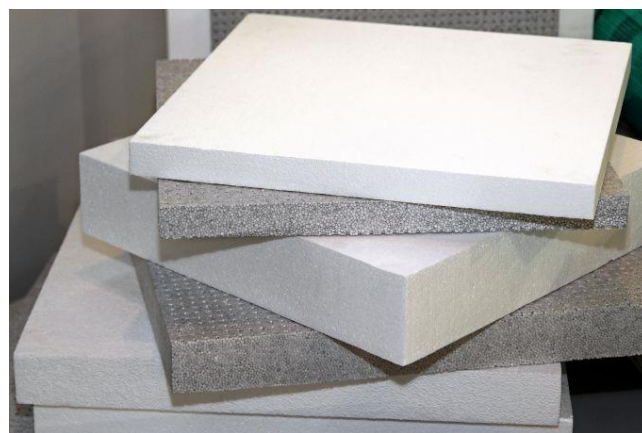


Figura 6 esempio polistirene espanso estruso

Applicazioni principali dei pannelli in XPS

L'XPS è particolarmente adatto all'isolamento termico di strutture, anche particolarmente sollecitate, in cui è richiesta un'elevata resistenza meccanica. Inoltre, la sua impermeabilità all'acqua assicura un'ottima tenuta in presenza di umidità o infiltrazioni d'acqua.

Nell'isolamento termico di solai, pareti, coperture piane e inclinate, si dimostra assolutamente affidabile e duraturo. Trova particolare applicazione nel tetto rovescio, sistema che prevede la posa dell'isolante sopra il manto impermeabile. Inoltre, può essere facilmente tagliato e sagomato in funzione delle varie esigenze applicative.

4.5 PUR (poliuretano espanso rigido)

Il poliuretano è un polimero estremamente versatile che permette di ottenere una vasta gamma di prodotti con proprietà isolanti e impieghi molto diversi. Molti oggetti, indispensabili al nostro quotidiano benessere, sono realizzati utilizzando i numerosi componenti della famiglia dei poliuretani.

Il poliuretano espanso rigido è un polimero reticolato termoindurente che viene prodotto dalla reazione di due componenti principali (polioli e poliisocianati), in presenza di un agente espandente (generalmente idrocarburi, CO₂ o altre miscele) e di altri additivi.

L'eccellente prestazione per quanto riguarda la conducibilità termica permette di ottenere elevati livelli di isolamento termico con spessori significativamente ridotti rispetto a quelli necessari utilizzando altri materiali isolanti. Scegliendo il poliuretano si può quindi risparmiare energia impiegando volumi e pesi ridotti e

senza rinunciare, soprattutto nel caso di ristrutturazioni, a preziosi spazi abitativi.



Figura 7 esempio poliuretano espanso a spruzzo

4.6 PIR (poliisocianurato)

Il poliisocianurato è una forma di plastica nota anche come polyiso o PIR, che è chimicamente correlata alla plastica in poliuretano (PUR). Viene utilizzato per molte delle stesse applicazioni del poliuretano, ma principalmente viene applicato come forma di pannello isolante in schiuma nella costruzione di edifici. Può anche essere ottenuto per l'uso come schiuma liquida o spruzzata che viene soffiata nelle pareti o nei vespai per riempire le cavità d'aria come isolante termico. Essendo uno dei materiali isolanti più recenti sul mercato a partire dal 2011, è diventato il materiale isolante preferito nel 60% di tutte le costruzioni commerciali negli Stati Uniti e in Canada a causa di diverse caratteristiche che il materiale possiede che lo rendono superiore ad altri tipi di isolamento.



Figura 8 esempio isolante termico in poliisocianurato

Queste proprietà strutturali e resistenti al calore conferiscono al poliisocianurato un valore R minimo per l'isolamento compreso tra 5.6 e 8 per pollice, con un foglio standard di 2 pollici di spessore. Il valore R è un metodo standard del settore per misurare la resistenza al flusso di calore e il valore R del poliisocianurato è generalmente equivalente a quello della schiuma di poliuretano, ma di gran lunga superiore ad altre forme di isolamento. L'isolamento in polistirene ha un valore R di circa 4.3 con un foglio di spessore equivalente di 3.1 pollici, fibra di vetro che batte un valore R di 3.3 con uno spessore di 4 pollici e compensato con un valore R di 1.25 con uno spessore di 10.9 pollici.

La plastica poliuretana e la schiuma isolante sono state prodotte dagli anni '1930, quando furono utilizzate per la prima volta dalle industrie militari e aerospaziali. È diventato commercialmente popolare negli anni '1970 e il poliisocianurato è arrivato sul mercato negli Stati Uniti e in Europa alla fine degli anni '1970. Entrambi i tipi di pannelli isolanti in schiuma utilizzano rivestimenti a barriera termica di fogli o laminati plastici o altri materiali come gesso o perlite per

aumentare la loro capacità di ritardare la perdita di calore e prevenire la propagazione degli incendi. La differenza chiave tra i due materiali è che il poliisocianurato supera il test del fuoco del Factory Mutual Calorimeter (FM 4450) senza tali barriere termiche, mentre il poliuretano no.

Una potenziale caratteristica negativa dell'uso del poliisocianurato è che, con l'invecchiamento, subisce un processo noto come deriva termica. Ciò significa che, entro i primi due anni di utilizzo, parte del gas HCFC contenuto nella struttura cellulare fuoriesce nello spazio e viene sostituito dalla normale atmosfera, riducendo di circa il 20% le proprietà isolanti della schiuma. I gas HCFC sono anche potenziali gas dannosi per l'ozono, sebbene abbiano un effetto molto più debole sullo strato di ozono rispetto alla famiglia di gas dei clorofluorocarburi che sono stati banditi dall'uso in tutto il mondo.

4.7 Lana di roccia

La lana di roccia è un materiale isolante costituito da fibre di silicato amorfo ricavato da rocce vulcaniche di tipo basaltico. In altre parole, si tratta di una fibra minerale ricavata da processi di fusione e risolidificazione di rocce basaltiche.

Il processo di lavorazione di questo materiale avviene in modo particolarmente accurato:

- Le rocce vengono frantumate e unite a calcare e minerali. Il calcare è utile per abbassare la temperatura di fusione della roccia, mentre i minerali servono a calibrare la quantità del materiale finale;
- Il materiale ottenuto viene inserito all'interno del cubilotto, ovvero l'apposito "forno" per portare il materiale alla temperatura di fusione (1500°);

- Di seguito, il materiale fuso viene segmentato in fibre e spruzzato con olio e resine, da cui si ricava un materiale compatto che viene polimerizzato e indurito.



Figura 9 lana di roccia, azienda Isover

Caratteristiche e prestazioni tecniche della lana di roccia

La densità della lana di roccia è variabile, dipende da realizzazione e realizzazione; il peso specifico della lana di riccio varia dai 30 ai 150 kg/mq, dipendente dalla tipologia di applicazione che si andrà ad applicare.

Questo materiale garantisce ottime prestazioni termiche in quanto il suo calore specifico è elevato; la conducibilità termica della lana di roccia è particolarmente ridotta grazie alla struttura di fibra naturale.

Riesce ad offrire notevoli vantaggi anche per quanto riguarda l'isolamento acustico, garantendo ottime prestazioni in termini di fonoisolamento grazie alla struttura fibrosa a celle.

La sua classe di reazione al fuoco è molto alta (A1) ovvero è incombustibile, è chimicamente inerte e priva di sostanze corrosive o cancerogene e se sottoposta al fuoco non rilascia esalazioni tossiche. Non è soggetta alla formazione di muffe e non è sensibile all'umidità. È flessibile e possiede stabilità dimensionale, con dilatazioni termiche trascurabili.

Come ultima caratteristica è importante sapere che la lana di roccia è un materiale completamente sostenibile, in quanto è biosolubile e il risparmio energetico che si ottiene dal suo impiego è superiore all'energia consumata per la sua produzione.

4.8 Lana di vetro

La lana di vetro è una fibra minerale ricavata dal vetro attraverso un particolare processo produttivo che la rende adatta a molteplici esigenze, in particolare nell'ambito edilizio.



Figura 10 esempio lana di vetro, azienda STS

Caratteristiche della lana di vetro

Le 3 proprietà più rappresentative della lana di vetro sono:

- Isolante
- Antiumidità
- incombustibile

Inoltre, tra le varie tipologie di materiali isolanti presenti in commercio è quello più economico, motivo per cui viene preferito alle volte rispetto ad altre tipologie. D'altro canto, però, non essendo impermeabilizzata, essa va protetta dall'acqua; ecco perché non è adatta per pareti controterra e per tetti a struttura inversa.

La struttura "lanuginosa" da cui prende il nome è formata da "pori" aperti tra le fibre che la compongono. In questo modo si ha una duplice valenza:

- isolante termico: i pori aperti assimilano aria isolando dal calore; la sua conduttività termica è circa 0,032-0,053 W/mK mentre la capacità termica specifica è pari a 840-1030 J/kg K;
- isolante acustico: le fibre che la compongono assorbono i rumori prodotti.

La lana di vetro, essendo costituita per il 95% da materiale inorganico, risulta inattaccabile dalle muffe e da qualsiasi organismo sia vegetale che animale.

Inoltre, la lana di vetro permette il passaggio del vapore acqueo. Questo perché il valore del passaggio di vapore acqueo è pari a quello dell'acqua, cioè $\mu=1$. Per tale motivo l'umidità in eccesso può fuoriuscire agevolmente dalla facciata isolata senza provocare la formazione di condense o muffe all'interno.

La lana di vetro è ignifuga: in caso di incendio è resistente al calore e non è infiammabile. In linea generale, i prodotti in lana di vetro (senza rivestimento) sono in Euroclassi A1 o A2, ossia le classi più alte per la resistenza al fuoco.

5. VANTAGGI e svantaggi dei pannelli sandwich strutturali in c.a.

Per la scelta delle tecnologie costruttive da utilizzare ci sono aspetti pratici e tecnici da non tralasciare come l'uso di materiali biocompatibili o riciclabili, risparmio di energia nella produzione dei materiali utilizzati e gestione e funzionamento dell'opera finita. Per questi motivi, come alternativa ai tradizionali metodi costruttivi, ci sono i pannelli sandwich strutturali in cemento armato. Questa tecnologia costruttiva offre numerosi vantaggi come:

- la leggerezza e la facilità di messa in posa garantendo un montaggio facile e rapido dei pannelli
- velocità di realizzazione con un conseguente minor costo di noleggio delle attrezzature e della manodopera
- processo di costruzione semplificato con meno operazioni in cantiere e meno rifiuti prodotti
- isolamento termico ed acustico molto elevato
- materiali riciclabili al fine vita dell'edificio
- flessibilità costruttiva grazie alle loro dimensioni e forme adattabili

La realizzazione di pareti portanti in cemento armato gettati in opera, in cui il polistirene è il materiale di supporto, unisce i vantaggi dati dalle strutture gettate in opera con quelli dei sistemi prefabbricati.

Tra gli svantaggi del materiale, è importante evidenziare la necessità di un'attenta gestione durante l'installazione e il funzionamento. Manipolazioni imprecise possono causare danni al rivestimento e al prodotto stesso.

6. QUADRO NORMATIVO

Tra le diverse soluzioni per ottenere un sistema edilizio vantaggioso, sia in termini di isolamento termico che nello svolgimento di adeguate prestazioni strutturali, i sistemi costruttivi, sia prefabbricati che gettati in opera, stanno conquistando uno spazio di mercato interessante.

La prima normativa a livello europeo riguardante il calcolo e l'esecuzione delle strutture a pannelli, venne emessa dal C.E.B (Comitè Europèen du Bèton), dal C.I.B (Conseil International du Batiment) e dal U.E.A.t.c. (the European Union of Agrèment) e venne integrata anche in Italia dal 1969.

Le principali norme nazionali e internazionali riferite ai pannelli sandwich in c.a. sono:

- Le norme italiane, tra cui:
 - Norme Tecniche per le Costruzioni accettate con il S.M. 14/01/2008 e pubblicate sul S.O. No. 30 della G.U. No. 29 in data 04/02/2008
 - Istruzioni C.N.R. 14/12/1983 n° 10025/84. Istruzioni per il progetto, l'esecuzione e il controllo delle strutture prefabbricate in conglomerato cementizio armato e per le strutture costruite con sistemi industriali
 - Circolare Min.LL.PP. 11/08/1969 n° 6090, "Norme per il calcolo e la costruzione di strutture a grandi pannelli"
- Le norme europee, tra cui:
 - UNI EN 1991 – Eurocodice 2, "Progettazione delle strutture in calcestruzzo", Parte I: "Regole generali e regole per gli edifici"
 - UNI EN 1998 – Eurocodice 8, "Progettazione delle strutture per la resistenza sismica", Parte I: "Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici"

- C.E.B.-C.I.B.-U.E.A.t.c.-1996, “Recommandations internationales unifiles pour le calcul et l’execution des structures en panneaux assemblés de grand format”
- Le norme statunitensi, tra cui:
 - ACI 318-08, “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary”

In ambito europeo, è bene menzionare anche la UNI EN 1992-1-1 la quale fornisce una base per la progettazione di strutture in calcestruzzo normale, armato e precompresso, realizzate con aggregati normali e leggeri, insieme a regole specifiche per gli edifici.

Le pareti eseguite con sistemi sandwich, realizzate con un elemento di supporto costituito da materiale isolante, hanno delle caratteristiche che non consentono di applicare le regole di progettazione valide per le usuali tipologie costruttive in c.a.

È stato rilevato che le strutture a pareti portanti in c.a. gettato in opera, realizzate secondo la tecnologia del pannello di supporto in polistirene, appartengono ad una tipologia di strutture in c.a. che non viene menzionata né nel D.M. 14/01/2008 né negli Eurocodici.

Le normative tecniche che fanno riferimento ai sistemi strutturali a pareti portanti in c.a. gettato in opera, realizzati secondo la tecnologia del pannello di supporto in polistirene, sono:

- La Circolare n° 6090 del 1969, nella quale viene fatto riferimento al documento C.E.B.-C.I.B.-U.E.A.t.c. sempre nel 1969
- Le istruzioni C.N.R. n° 10025 del 1984

Per quanto riguarda la normativa americana, la recente ACI 318-14 del 2014 (aggiornamento della ACI 318 del 2008), fa riferimento a strutture a pareti sandwich prefabbricate e non gettate in opera. Nelle ACI 318 viene citato come “design aid” per la progettazione delle strutture prefabbricate a pannelli sandwich

il manuale: “PCI Design Handbook-Precast and Prestressed Concrete” del 2004 a cura del Precast/Prestressed Concrete Institute.

Il PCI Design Handbook tratta specificamente della progettazione di strutture a pannelli sandwich prefabbricati, ma il suo utilizzo potrebbe essere esteso anche alle strutture a pareti sandwich in c.a. gettato in opera, grazie al principio definito di “Emulation”.

6.1 La marcatura CE

Il marchio CE, Marchio di Conformità Europea, è rappresentato da un simbolo grafico specifico che garantisce al consumatore la conformità del prodotto a tutte le disposizioni della Comunità Europea che prevedono il suo utilizzo dalla progettazione, alla fabbricazione, all’immissione sul mercato, alla messa in servizio del prodotto fino allo smaltimento.

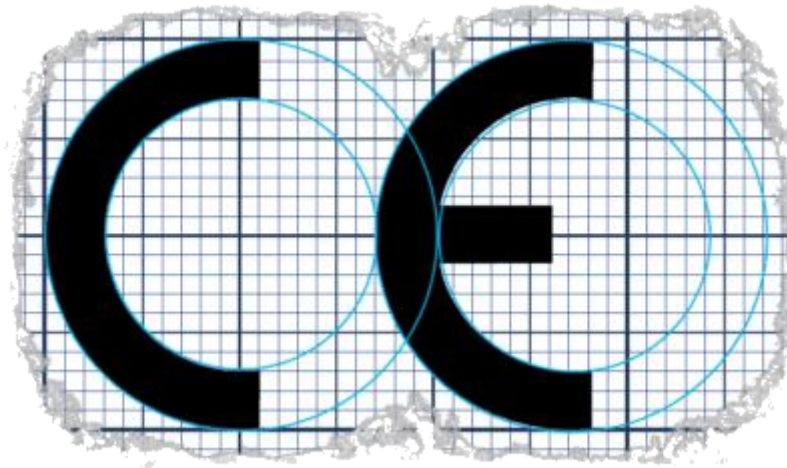


Figura 11 logo originale del marchio CE

Questo simbolo è stato creato nel 1993 e, su tanti prodotti, è obbligatorio per essere commercializzati all'interno dello Spazio Economico Europeo (SEE) che comprende i paesi dell'Unione Europea e i 3 paesi EFTA (Norvegia, Islanda e Lichtenstein).

La marcatura CE dei prodotti da costruzione è una procedura obbligatoria per tutti i prodotti disciplinati dal Regolamento (UE) n. 305/2011.

La marcatura CE deve essere applicata dal costruttore di un prodotto che rientra in tale regolamento, il quale comunica per mezzo della dichiarazione di prestazione (DoP) che il suo prodotto è conforme ai requisiti di sicurezza e salute e rispetta le prestazioni minime previste.

La dichiarazione di prestazione deve avere in allegato la marcatura CE, che è l'unica che attesta che il prodotto da costruzione è conforme alla prestazione dichiarata nella sezione che tratta delle caratteristiche principali. La marcatura CE deve essere riportata in modo visibile, leggibile e soprattutto indelebile direttamente sul prodotto oppure su un'etichetta oppure sull'imballaggio. Dopo la marcatura CE sono riportate per legge:

- Ultime due cifre dell'anno della prima apposizione
- Indirizzo e normativo del prodotto
- Norme del prodotto-tipo
- Numero progressivo della dichiarazione di prestazione
- Classe o livello della prestazione
- Riferimento alla specifica tecnica armonizzata che è stata seguita
- Codice di identificazione dell'organismo notificato, in caso sia necessaria
- Impiego previsto per il prodotto

Il Regolamento (UE) n. 305/2011 impone la marcatura CE obbligatoria su tutti quei prodotti, materiali e kit destinati ad essere stabilmente assorbiti in opere di costruzione o in parti di esse e la cui prestazione incide sulla prestazione delle opere di costruzione stesse.

Il regolamento europeo richiede la presenza di una norma armonizzata di prodotto che deve essere applicata nel dettaglio dal produttore. Per poter marcare CE un prodotto da costruzione è necessario ottenere un ETA (parere tecnico europeo).

In assenza della norma armonizzata o di ETA, sarà necessario eseguire l'iter procedurale di conformità del prodotto da costruzione, percorrendo strade alternative come, ad esempio, le norme tecniche di costruzione.

Alcune categorie di prodotti da costruzione si possono marcare CE con procedure di produzione e verifiche sul prodotto eseguite esclusivamente dal fabbricante, senza necessità di certificati. In genere sono i prodotti di tipo non strutturale.

6.2 La contraffazione e le sanzioni del marchio CE

Come gli altri marchi, anche quello di Conformità Europea è cimentato al rischio di contraffazione. Una delle più conosciute è quella del marchio CE – China Export. Infatti, i disegni grafici di questi marchi si differenziano veramente di poco. Le sanzioni sono molto severe, sia dal punto di vista civile che penale.

I produttori che utilizzano per il proprio prodotto il marchio CE contraffatto imbattono in sanzioni quali:

- Pagamento di una multa da 1000€ a 6000€
- Procedimento penale per eventuali danni subiti
- Rapporto di compravendita nullo

7. COMPORTAMENTI MECCANICI dei pannelli sandwich in c.a.

Fino ad ora sono stati descritti gli aspetti tecnici e le normative riguardante i pannelli sandwich in calcestruzzo armato. Andiamo adesso a valutare i loro comportamenti meccanici facendo riferimento a due studi.

Il primo che si va a trattare è uno studio fatto dal Dipartimento di Ingegneria Civile del UET Peshawar, condotto nel 2019, dalla quale verranno valutati i comportamenti meccanici dei pannelli sandwich sottoposti a carichi da esplosione.

Il secondo è uno studio fatto nel Laboratorio Ufficiale Materiali e Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA) in collaborazione con la Ditta TCS srl condotte fra il Marzo e l'Aprile 2019, dalla quale verranno valutati i risultati ottenuti dalle prove di compressione diagonale, centrata, eccentrica e di taglio. Nella figura seguente si riportano le schede tecniche dei pannelli usati per eseguire le prove.

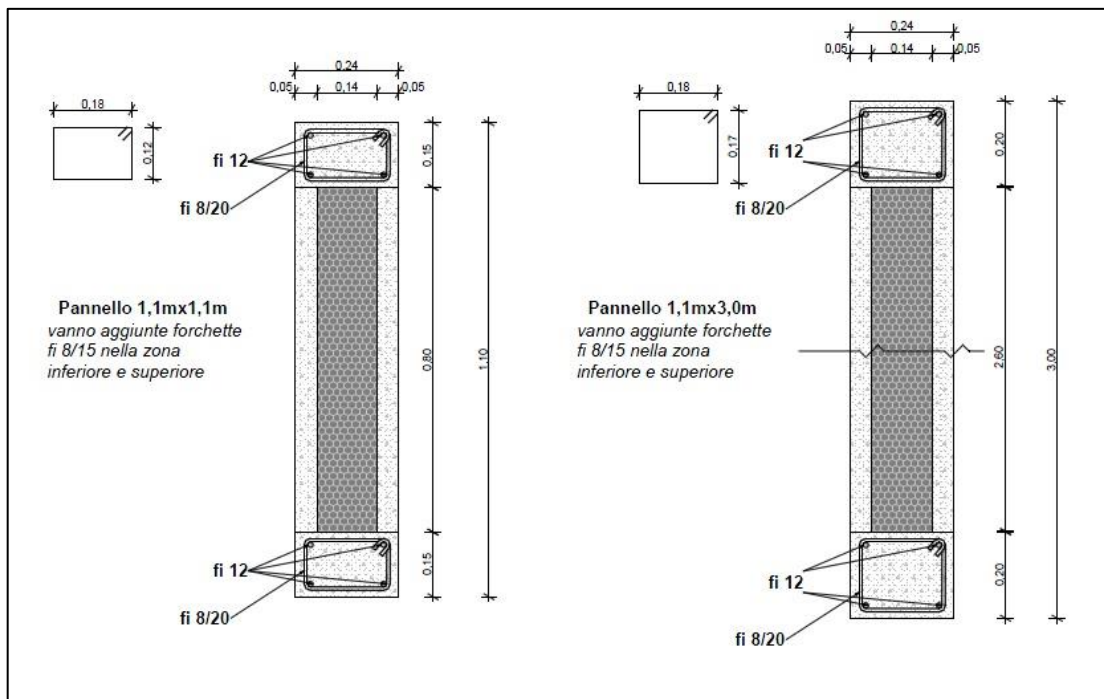


Figura 12 Scheda tecnica dei pannelli sandwich

7.1 Comportamento dei pannelli sandwich in c.a. sotto carico da esplosione

Questo studio è stato fatto nel 2018 dal Dipartimento di Ingegneria Civile del UET Peshawar, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan.

Gli eventi terroristici degli ultimi anni hanno notevolmente accresciuto la consapevolezza di progettisti strutturali sulla minaccia di attacchi terroristici con l'uso di esplosivi; l'uso di pannelli prefabbricati in cemento armato sono sempre più utilizzati per edifici residenziali e commerciali (che sono particolarmente vulnerabili al carico esplosivo).

Il patrimonio edilizio esistente in molti centri urbani del Pakistan è principalmente composto da materiale in cemento armato e muratura per quanto riguarda la parte strutturale delle varie opere; essi sono stati identificati come strutture non capaci a mantenere la loro integrità strutturale sotto l'influenza di forti esplosioni.

Per queste ragioni il dipartimento di Ingegneria Civile ha deciso di mettersi in moto per andare a studiare tutti i vari tipi di comportamenti di questi nuovi pannelli, specialmente per quanto riguarda la resistenza alle esplosioni e la risposta dinamica.

Il lavoro del Dipartimento di Ingegneria Civile presenta un'indagine sperimentale condotta per comprendere il comportamento dei pannelli sandwich in calcestruzzo armato (RCSPs ovvero "reinforced concrete sandwiched panels") sotto carico di esplosione.

Un RCSP è composto da un'anima in schiuma EPS, che è circondata da "pelli" di cemento armato spruzzate su entrambi i lati.

Sono stati condotti test di carico esplosivo mirati su 4 RCSP indipendenti in 17 scenari di casi di esplosione ed il comportamento fisico è stato analizzato attraverso immagini di alta qualità e sono state sviluppate curve di fragilità.

La curva di fragilità interpreta la relazione tra l'intensità del danno con la dimensione della carica e la scala della distanza.

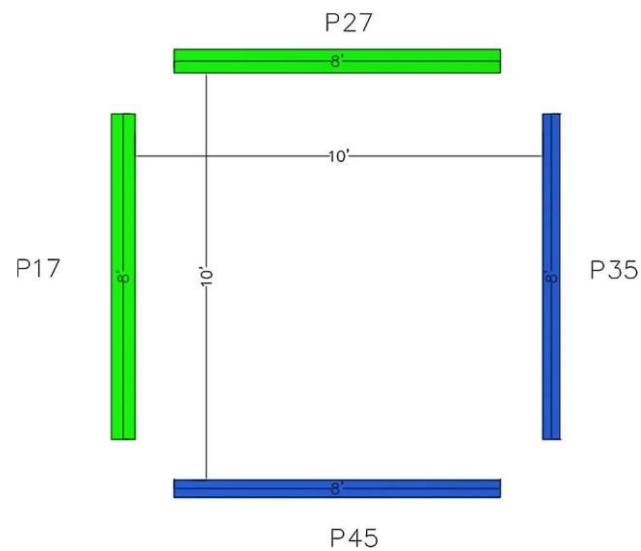


Figura 13 disposizione dei pannelli per la prova di carico da esplosione

Tabella 2 dettagli dimensionali dei pannelli usati per l'esperimento

Panel ID	Plaster layer top & bottom mm (in)	Concrete layer top & bottom mm (in)	Polystyrene layer middle mm (in)	Overall thickness mm (in)
P17	25.4 (1)	50.8 (2)	101.6 (4)	177.8 (7)
P27	25.4 (1)	50.8 (2)	101.6 (4)	177.8 (7)
P35	25.4 (1)	50.8 (2)	50.8 (2)	127 (5)
P45	25.4 (1)	50.8 (2)	50.8 (2)	127 (5)

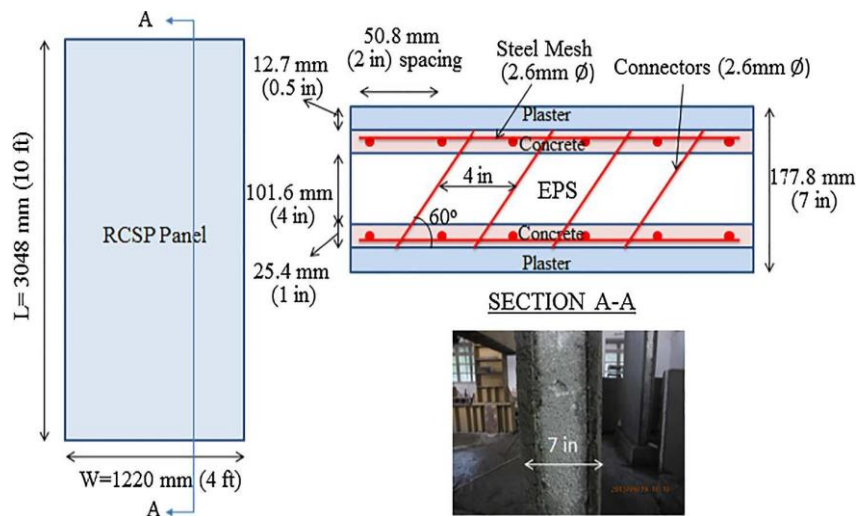


Figura 14 dettagli delle geometrie e dei rinforzi dei pannelli RCSP

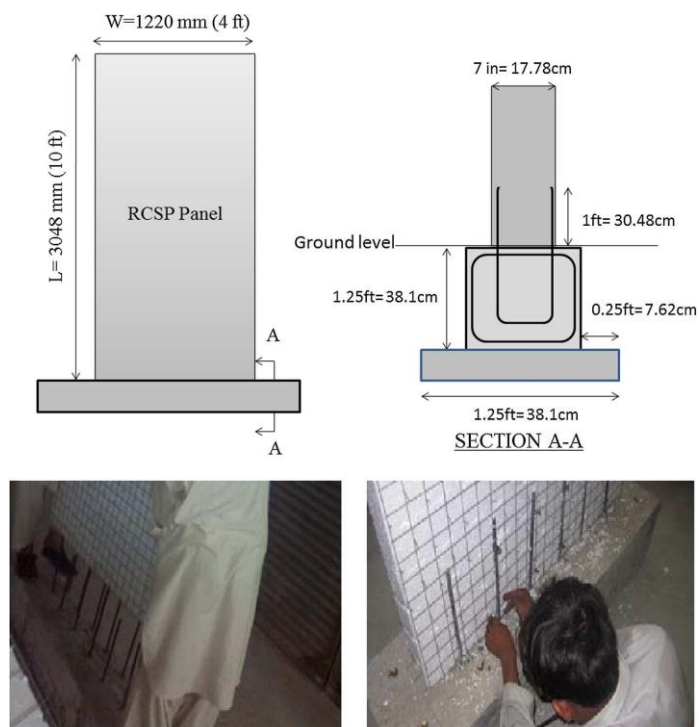


Figura 15 dettagli di progettazione della sezione trasversale del pannello

I tasselli della barra di rinforzo (9,53mm) a forma di U sono stati utilizzati per la connessione tra parete e piedistallo. Sono stati utilizzati fili di rilegatura per garantire la connettività dei tasselli con la maglia del pannello.

Descrizione dei provini RCSP

I dettagli geometrici e di armatura del pannello RCSP sono illustrati nella Fig. 14, che è stato considerato per le prove di carico da esplosione sul campo. Inoltre, sono state prese in considerazione anche pareti simili con un nucleo di schiuma di spessore ridotto, come indicato nella Tab.1 e raffigurato nella Fig.13. Si tratta di una parete lunga di altezza pari a 3048 mm e larghezza pari a 1220 mm, composta da EPS di altezza simile e spessore pari a 101,6 mm, e da un rivestimento in calcestruzzo armato (preparato con una miscela di calcestruzzo 1:2:1) di spessore pari a 25,4 mm su entrambe le facce e rinforzate appunto da armature verticali e orizzontali con diametro di 2,60mm e fornite con interasse di 50,8mm.

Per collegare gli strati di calcestruzzo armato a facce opposte e migliorare l'integrità dell'RCSP, sono stati utilizzati connettori passanti con diametro di 2,60mm, disposti diagonalmente a una distanza da centro a centro di 101,6mm. Si ricorda che i pannelli RCSP qui considerate per i test, sono pannelli prefabbricati prodotti localmente in Pakistan.

Tutte le pareti sono state testate solo a sbalzo, per capire l'efficienza degli RCSP come pareti di protezione frontale.

Per fissare la base al terreno, le pareti sono state fissate a un basamento in cemento armato profondo 38,10cm per mezzo di tasselli in barre di rinforzo da 9,53mm a forma di U disposti a una distanza di 12 pollici da centro a centro (Fig.15). questi tasselli hanno una duplice funzione: in primo luogo, sostenere il pannello sandwich durante la pallinatura di un pannello stretto in modo che non possa inclinarsi lateralmente e, in secondo luogo, assicurare una buona connessione tra la

fondazione e il pannello sandwich. Questi tasselli possono essere forniti prima del getto di calcestruzzo nella base, o dopo l'indurimento, praticando dei fori nel calcestruzzo della base e fissando le barre con resina epossidica o cemento.

È stato preparato un conglomerato cementizio con un rapporto di miscela di 1:2:1 (cemento: sabbia: aggregati, in peso), che viene applicato sulla faccia del nucleo in schiuma attraverso la “pistola di alimentazione” del calcestruzzo proiettato. Lo spessore del calcestruzzo proiettato applicato su entrambi i lati del pannello è stato mantenuto a circa 50,4mm.

Le pareti in RCSP sono state stagionate per 7 giorni; quindi, sono state applicate con un strato di intonaco dello spessore di 12,70mm preparato con un rapporto di miscela 1:3 (cemento: sabbia, in peso). Quest'ultimi sono stati ulteriormente stagionati per 14 giorni.

Proprietà meccaniche dei materiali costituenti

Tabella 3 resistenza alla compressione di campioni cilindrici prelevati dalla miscela di calcestruzzo (1:2:1)

S.No	Carico (KN)	Superficie (mm ²)	Resistenza (Mpa)	Resistenza media (Mpa)
1	33,12	2026,82	16,34	15,00
2	24,21	2026,82	11,94	
3	33,91	2026,82	16,34	

Tabella 4 resistenza alla compressione dei campioni di cubetti prelevati dall'impasto di gesso (1:3)

S.No	Carico (KN)	Superficie (mm ²)	Resistenza (Mpa)	Resistenza media (Mpa)
1	15,09	2580,64	5,85	6,98
2	21,95	2580,64	8,50	
3	17,05	2580,64	6,61	

Tabella 5 resistenza alla trazione del ferro zincato (acciaio)

S.No	Diametro nominale (mm)	Resistenza allo snervamento (MPa)	Resistenza ultima (MPa)	Allungamento in percentuale	Diametro effettivo (mm)
1	2,00	184,00	272,00	12,50	2,794
2	2,00	200,00	232,00	15,60	2,794
3	2,00	192,00	264,00	15,60	2,794
media=		192,00	264,00		

Tabella 6 proprietà del polistirene espanso (EPS)

S.No	Descrizione	psi	Mpa
1	Modulo di elasticità	1027,00	0,35772
2	Modulo di taglio	513,50	0,17886
3	Resistenza alla trazione	45,80	0,01595
4	Compressione	21,14	0,00736
5	Resistenza alla flessione	39,36	0,01371
6	Resistenza al Taglio	47,28	0,01647

I materiali costitutivi utilizzati nella costruzione dei provini RCSP sono stati testati anche singolarmente per misurarne le proprietà meccaniche. Il calcestruzzo (1:2:1) e l'intonaco (1:3) utilizzati per la preparazione dei campioni sono stati testati singolarmente per misurarne le proprietà meccaniche.

Gli RCSP sono stati testati secondo la norma ASTM-C39/C39M-2003 (ASTM-C39/C39M) per misurare la resistenza alla compressione. Tre campioni per ogni calcestruzzo e intonaco sono stati preparati e testati con la macchina UTM. La Tab.2 e la Tab.3 elencano la resistenza alla compressione misurata per ciascun campione.

I provini RCSP sono stati testati dall'UTM secondo la norma ASTM 370-03 (ASTM 370-03) per misurare lo snervamento e la resistenza ultima delle barre

d'acciaio, nonché l'allungamento per confermarne la duttilità. La Tab.4 elenca le resistenze misurate dei campioni di barre d'acciaio, che hanno portato a un carico di snervamento medio di 192 MPa (27,830 ksi) e a un carico di rottura medio di 264,48 MPa (37,107 ksi). L'RCSP composto da un'anima di polistirene espanso, che ha una densità di 1,35 pcf, tutte le altre proprietà meccaniche (moduli elastici, resistenza alla trazione e alla compressione, alla flessione e al taglio) sono elencate nella Tab.5.

Prove di carico da esplosione: materiali esplosivi e protocolli di prova

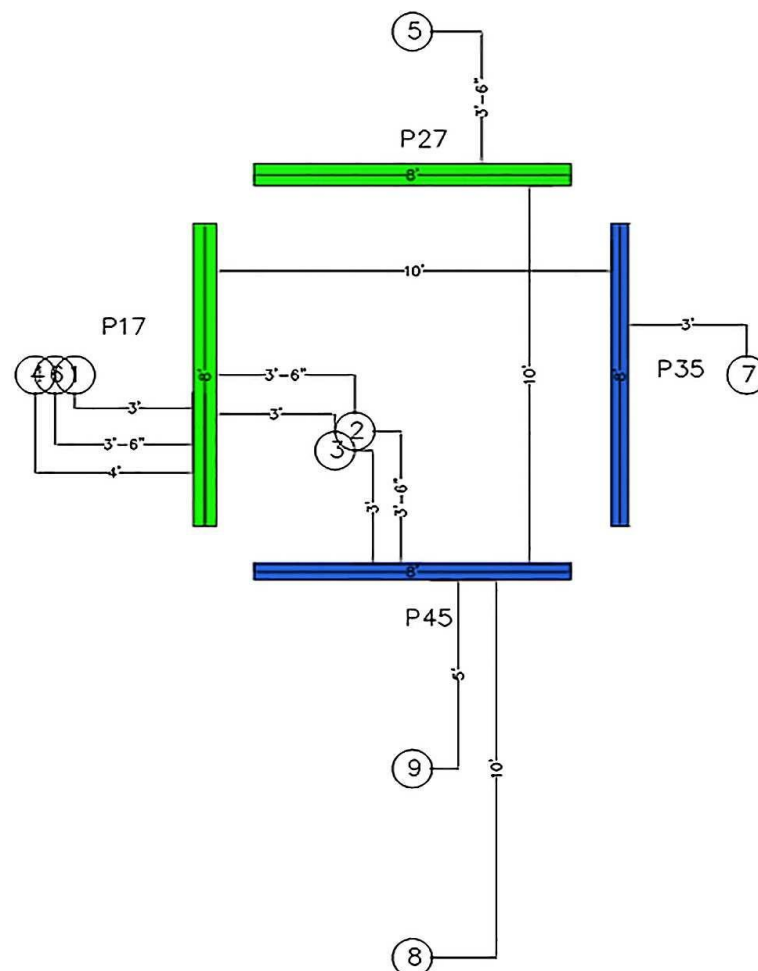


Figura 16 protocolli di prova del carico progressivo di esplosione, posizione e distanza da pareti

Tabella 7 dettagli dei test di carico progressivo dell'esplosione

Esplosione No.	Quantità (Kg)	Distanza (m)	Posizione
1°	0,5	0,91 da pannello a parete spessa	all'esterno dell'involucro
2°	1,0	1,1 da pannello a parete spessa e sottile	all'interno dell'involucro
3°	1,5	0,91 da pannello a parete spessa e sottile	all'interno dell'involucro
4°	2,0	1,2 da pannello a parete spessa	all'esterno dell'involucro
5°	2,5	0,91 da pannello a parete spessa	all'esterno dell'involucro
6°	3,0	0,91 da pannello a parete spessa	all'esterno dell'involucro
7°	3,5	0,91 da pannello a parete sottile	all'esterno dell'involucro
8°	4,0	3 da pannello a parete sottile	all'esterno dell'involucro
9°	5,0	1,5 da pannello sottile	all'esterno dell'involucro
10°	2,0	a contatto con il pannello a parete sottile	all'esterno dell'involucro

Per le prove di carico di esplosione delle pareti, nel presente studio è stato utilizzato il materiale detonante WA Box, prodotto dalla WA Nobel PVT Ltd.. Si tratta di una dinamite a base di nitroglicerina disponibile in confezioni da 25 kg, sicura sia nella manipolazione che nel trasporto. Questo esplosivo ha eccellenti proprietà di deflagrazione: la densità di WA Box è di 1,40-1,45 g/cc, il volume del gas di 860 l/kg, la velocità in forma non confinata è di +5000 m/sec (TNT: = 7500 m/sec: equivalente TNT = 1,1). La spoletta di sicurezza, che è l'accessorio per l'esplosione, è costituita da un nucleo centrale di energia nera appositamente formulata, con contorno di iuta e cotone, impermeabilizzato con bitume, cera e PVC. È progettato per propagare la fiamma ai detonatori semplici entro un tempo limite (il tempo di combustione è di 100-120 sec/m).

Per innescare il materiale detonante sono stati utilizzati detonatori semplici, collegati a un'estremità della miccia di sicurezza, che è stata inserita nel materiale detonante per l'accensione e il lancio dell'esplosione. Le esplosioni sono state eseguite considerando pesi diversi di esplosivo e variando la distanza e la posizione (la Tab.6 elenca le serie di esplosioni, mentre la Fig.16 illustra la posizione e le distanze di ciascuna serie di esplosioni). I campioni sono stati ispezionati dopo ogni prova di esplosione.

Comportamento osservato degli RCSP nelle prove di carico da esplosione

Tabella 8 scale di danno da carico da esplosione per la derivazione delle curve di fragilità

Percentuale di danni	Scala dei danni
0	nessun danno
0-20	danno trascurabile
20-40	danno lieve
40-60	danno moderato
60-80	danno maggiore
80-100	crollo

Tabella 9 dati di valutazione della scala di danneggiamento delle pareti RCSP

Esplosione	Quantità (kg)	TNT	Distanza (ft)	P17 scala dei danni	P27 scala dei danni	P35 scala dei danni	P45 scala dei danni
1°	0,5	0,55	3 ft da P17 esterno	nessun danno	nessun danno	nessun danno	nessun danno
2°	1,0	1,10	3,5 ft P17 e P45 interno	danno trascurabile	danno trascurabile	danno trascurabile	danno trascurabile
3°	1,5	1,65	3 ft da P17 a P45 interno	danno lieve	danno lieve	danno lieve	danno lieve
4°	2,0	2,20	4 ft da P17 esterno	danno moderato	danno lieve	danno moderato	danno moderato
5°	2,5	2,75	3,5 ft da P27 esterno	danno maggiore	danno moderato	danno maggiore	danno moderato
6°	3,0	3,30	3,5 da P17 esterno	danno maggiore	danno moderato	danno maggiore	danno maggiore
7°	3,5	3,85	3 ft da P35 esterno	collasso	danno maggiore	collasso	danno maggiore
8°	4,0	4,40	10 ft da P45 esterno	-	danno maggiore	-	danno maggiore
9°	5,0	5,50	5 ft da P45 esterno	-	collasso	-	collasso

Tabella 10 diametro massimo della scabbia e della scagliatura durante le prove di esplosione

Esplosione	Quantità (kg)	Distanza (ft)	Diametro max della crosta (ft)		Diametro max della scagliatura (ft)	
			Diametro	Pannello	Diametro	Pannello
1°	0,5	3 ft da P17 esterno	0,0	P45	0,00	P17
2°	1,0	3,5 ft P17 e P45 interno	1,0		0,42	
3°	1,5	3 ft da P17 a P45 interno	2,5		1,25	
4°	2,0	4 ft da P17 esterno	5,0		3,50	
5°	2,5	3,5 ft da P27 esterno	5,5		3,00	
6°	3,0	3,5 ft da P17 esterno	6,0		4,00	
7°	3,5	3 ft da P35 esterno	6,5		5,50	
8°	4,0	10 ft da P45 esterno	7,0		6,00	P45
9°	5,0	5 ft da P45 esterno	8,0		7,50	

La prima esplosione di 0,50 kg vicino alla parete P17, a una distanza di 9843 mm dalla parete P17, non ha provocato alcuna fessurazione/danno apprezzabile nelle pareti, ma ha creato un piccolo foro nel terreno nel punto di origine dell'esplosione (Fig. 7).

La seconda esplosione di 1,0 kg eseguita all'interno della parete, a una distanza di 3,5 piedi (11483 mm) da P17 e P45, ha provocato lievi danni in entrambe le pareti P17 e P45. È stata osservata una leggera scrostatura del calcestruzzo, in particolare

sui bordi vicino alla base. Ciò è dovuto alla pressione riflessa dall'intero pannello e ha richiesto il passaggio attraverso di esso, che lo fa muovere verso la zona di bassa pressione.

Poiché gli angoli sono l'unico passaggio più vicino, l'accumulo di pressione in questi punti porta al distacco del calcestruzzo dai bordi in corrispondenza dell'angolo. Questi danni fisici nel pannello dopo la seconda esplosione portano all'esposizione del tassello e rendono più debole la connessione alla fondazione. Sulla base dell'osservazione, questo cedimento viene classificato come una leggera scrostatura dell'intonaco e del calcestruzzo in corrispondenza della connessione tra fondazione e pannello.

Anche la terza esplosione di 1,50 kg è stata effettuata all'interno dell'involucro, ma relativamente più vicino alle pareti, a una distanza di 3 piedi (9843 mm) da entrambe le pareti P17 e P45. Questa prova di esplosione ha provocato un forte distacco del calcestruzzo da entrambe le pareti P17 e P45.

Il distacco del calcestruzzo è stato osservato soprattutto sui bordi delle pareti e alla base. I danni erano distribuiti sulla parete fino a 1/4 dell'altezza della parete. Sui muri P27 e P35 è stata osservata anche una leggera o moderata scrostatura dell'intonaco. Inoltre, nella stessa porzione di parete si è osservata una leggera scrostatura del calcestruzzo, che ha portato all'esposizione del 30% dei tasselli di fondazione alla base dei muri. Sulla faccia esterna di tutti i pannelli si osserva anche una scrostatura a vista del calcestruzzo insieme all'intonaco. Sulla base dell'ispezione visiva, il cedimento può essere classificato come una scrostatura da lieve a grave dell'intonaco e una leggera scrostatura del calcestruzzo a 1/4 di pannello dalla base. I danni osservati alla base sono dovuti alla condizione di estremità fissa alla base. Da quanto sopra si può dedurre che l'intonaco, i bordi liberi e i supporti sono i punti più critici per subire danni sotto il carico dell'esplosione. La seconda e la terza esplosione, che sono state effettuate all'interno dell'involucro, hanno avuto l'importante caratteristica di far riecheggiare le onde d'urto all'interno dell'involucro a causa del fenomeno della riflessione,

quando le onde d'urto vengono riflesse dalle pareti, fino a quando le onde d'urto non vengono completamente dissipate all'interno dell'involucro e dei pannelli.

Per questo motivo, queste scosse causeranno danni più gravi ai pannelli rispetto alle scosse effettuate all'esterno dell'involucro.

La quarta esplosione di 2,0 kg è stata effettuata all'esterno del recinto a una distanza di 4 piedi (13123 mm) dalla parete P17. Dopo questa esplosione, sono state osservate lievi scrostature dell'intonaco e piccole crepe in corrispondenza del giunto tra la parete di base e quella P17 sulla faccia esterna. Tuttavia, l'esplosione ha provocato un forte distacco dell'intonaco e una lieve scrostatura del calcestruzzo anche sulla faccia interna del muro P17. I danni causati da questa quarta esplosione sono stati classificati come grave distacco dell'intonaco e lieve scrostatura del calcestruzzo all'interno dell'assemblaggio dei pannelli nella porzione inferiore di $\frac{1}{4}$ del pannello che porta all'esposizione del 100% dei tasselli del pannello P45 e del 50% di tutti gli altri pannelli.

La quinta esplosione di 2,50 kg è stata effettuata a una distanza di 3,50 piedi (11483 mm) dalla parete P27, all'esterno del recinto. Poiché questa è stata la prima esplosione significativa subita dal campione di parete P27, ha causato alcuni gravi distacchi di intonaco e calcestruzzo dalla parete P27. Si può concludere che l'intonaco del pannello era più debole del calcestruzzo di base, che era stato effettivamente preparato con una fessurazione. Tutti i campioni di parete sono rimasti in piedi anche dopo cinque esplosioni consecutive. Vale la pena ricordare che in tutte le esplosioni precedenti, oltre allo sfaldamento dell'intonaco e alla scrostatura del calcestruzzo, si sono verificati anche lo schiacciamento dovuto alle sollecitazioni di flessione e la fessurazione del pannello. Infatti, il distacco dell'intonaco e il distacco del calcestruzzo sono dovuti alle sollecitazioni di flessione, che portano alla frantumazione della malta e del calcestruzzo.

La sesta esplosione di 3 kg è stata effettuata di fronte al muro P17 a una distanza di 3,50 piedi (11483 mm). La caduta completa dell'intonaco e la frantumazione

sono state osservate nella parte inferiore del muro P17. Tuttavia, l'intonaco è rimasto in contatto nella parte superiore del muro. Le barre dei tasselli di fondazione sono state completamente esposte.

La settima esplosione di 3,5 kg è stata effettuata all'esterno del recinto, vicino al Muro P35, a una distanza di 3 piedi (9843 mm). Questa carica d'esplosione era più pesante di tutte le precedenti e inoltre era più vicina al muro P35. Ha causato il crollo completo del muro, danneggiando la base del muro e facendolo poi cadere. La caduta del muro P35 ha colpito anche il muro P17, che è caduto a sua volta. È stato osservato che il crollo si è verificato a causa dell'estrazione dei tasselli dal pannello alla base, già indebolito dalle esplosioni precedenti. L'intonaco della parete nella parte superiore, al di sopra del quarto di altezza del muro, era ancora intatto.

L'ottava esplosione di 4 kg è stata effettuata di fronte a P45 a una distanza di 10 piedi (32.808 mm). Con questa esplosione, l'intonaco della parte inferiore si è completamente staccato dalla parete P45 e la connessione tra il pannello e la fondazione si è quasi completamente separata. Tuttavia, una piccola porzione è rimasta intatta, per cui sia il pannello P45 che P27 erano ancora in piedi. Il danno minore è dovuto alla maggiore distanza dell'esplosione da entrambe le pareti.

La nona esplosione di 5 kg, la più pesante rispetto a tutte le precedenti, è stata effettuata all'esterno del recinto a una distanza di 5 piedi (16404,20 mm) dalla parete P45. Tutti i campioni di parete sono crollati sotto gli urti di questa esplosione. Tutti e quattro i muri sono crollati formando un meccanismo alla base a causa dello sfilamento dei tasselli. Non sono stati osservati danni ai ferri di armatura della rete applicata sulle facce delle pareti, a parte la disintegrazione del calcestruzzo che ha esposto la rete.

Conclusioni dell'esperimento

L'RCSP ha una maggiore capacità di assorbire e dissipare l'energia d'urto generata da un'esplosione, oltre ad essere stabile contro la dispersione, rispetto ad altri sistemi costruttivi.

L'esplosione che si verifica all'interno delle pareti (nelle prove) ha la possibilità di causare danni maggiori rispetto ad un'esplosione che si verifica all'esterno. Poiché le onde d'urto viaggiano avanti ed indietro nella struttura, a causa del fenomeno della riflessione, le pareti ed il terreno dissipano l'intera energia d'urto.

Dopo una serie di esplosioni consecutive, all'interno e all'esterno sono state osservate scrostatura di intonaco e scrostatura di calcestruzzo, che porta alla fuoriuscita dei tasselli e all'indebolimento del loro collegamento con la parete, seguito dal distacco dei tasselli dal conseguente crollo delle pareti.

Dallo studio sperimentale e dall'analisi dei danni si può concludere che il carico da esplosione, oltre alla scrostatura dell'intonaco e alla scagliatura del calcestruzzo, provoca la frantumazione a flessione e la fessurazione a compressione al pannello.

La rete d'acciaio di 2,60mm nel pannello RCSP si è leggermente spostata dall'interno della schiuma EPS ed è stata esposta. Non si osservano altri effetti degni di nota sulla forma dell'EPS e sulla maglia d'acciaio.

7.2 Prova a compressione diagonale dei pannelli sandwich in c.a.

Questa tipologia di prova consente di determinare la massima tensione tangenziale della muratura, la deformazione e il modulo di elasticità tangenziale e secante, applicando una forza di compressione complanare al pannello stesso, lungo la diagonale, fino alla rottura lungo l'asse del carico.

Strumentazione per l'esecuzione della prova

L'esecuzione della prova in esame ha previsto l'utilizzo di:

- n.4 martinetti idraulici collocati al di sotto della pressa utilizzata per alloggiare il provino, consentendo l'applicazione del carico in regime controllato;
- n.4 trasduttori di spostamento LVDT che consentono il rilievo delle deformazioni e sono stati disposti uno in posizione verticale (A-B) ed uno in posizione orizzontale (C-D), per ogni faccia del provino.

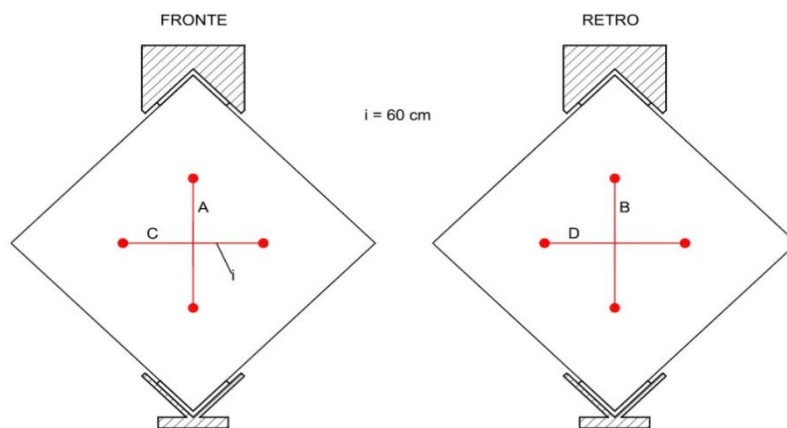


Figura 17 Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro del provino

Ogni coppia di trasduttori è stata posizionata in corrispondenza delle diagonali del provino di forma quadrata, con un interasse pari ad $i = 600$ mm, in modo tale da non intralciare la possibile formazione del cuneo di rottura in corrispondenza degli angoli del pannello soggetti a sforzo di compressione.

È necessario precisare che la prova CD1 è stata soggetta al distacco degli strumenti di misura dalla faccia del provino, essendo stati posizionati inizialmente in prossimità degli spigoli compressi. Pertanto, anche i risultati ottenuti vanno in buona parte trascurati.

Modalità di esecuzione della prova

I provini sono stati orientati in modo da ottenere un'applicazione del carico secondo un'inclinazione di 45° rispetto ai lati. Per evitare qualsiasi concentrazione di tensioni ed al fine di garantire la corretta applicazione dello sforzo di compressione, vengono posizionati due profili metallici a forma di L ai vertici della diagonale caricata di ogni pannello. Si procede quindi a collocare il provino sulle basi di appoggio a contatto con i piatti della pressa, utilizzata per applicare il carico. Si procede quindi con l'installazione dei sensori di spostamento su entrambe le facce del campione e con l'applicazione del carico, realizzando diversi cicli fino alla rottura del campione.

In particolare, i test meccanici sono stati eseguiti in controllo di spostamento, applicando un precarico generalmente pari a pochi kN, valore in corrispondenza del quale sono stati azzerati gli strumenti (tale fase consente ad un adeguato assemblamento degli strumenti per la misurazione delle deformazioni impiegati nella prova), e procedendo quindi a caricare il provino fino a rottura.

Risultati ottenuti

Tabella 11 Risultati principali delle prove di compressione diagonale sui provini

Codice pannello	Carico Max [kN]	τ_{\max} [MPa]	γ_{\max} [-]	G_{sec} [MPa]	G_{tg} [MPa]	Modalità di rottura
CD 1	336,14	2,16	0,001	2509	2708	crisi locale degli spigoli
CD 2	505,47	3,25	0,003	1108	2878	fessurazione diagonale
CD 3	465	2,99	0,002	1331	4045	fessurazione diagonale + crisi locale spigolo
CD 4	479	3,08	0,003	979	2341	fessurazione diagonale + crisi locale spigolo

Tabella 12 Valori medi ottenuti dalle prove di compressione diagonale sui provini

Valori medi prova CD				
Carico Max [kN]	τ_{\max} [MPa]	γ_{\max} [-]	G_{sec} [MPa]	G_{tg} [MPa]
446,4	2,87	0,002	1482	2993

Considerazioni finali sulle prove a compressione diagonale

La prova di compressione diagonale eseguita su provini quadrati ha restituito buoni valori di resistenza a compressione con modalità di rottura a trazione manifestate con fessurazione diagonale, coerenti con i risultati previsti per tale prova; i diagrammi τ - γ hanno mostrato un comportamento fragile dei provini, con deformazioni massime dello 0,3%.

7.3 Prova a compressione centrata dei pannelli sandwich in c.a.

La prova viene eseguita per determinare la resistenza a compressione di una muratura. In questo caso, tale prova viene presa come riferimento ai fini dell'esecuzione dei test sui pannelli sandwich oggetto di studio. A tale scopo, si andranno a valutare i parametri più significativi registrati, ossia lo sforzo di compressione massimo, ottenuto per ciascun provino (pannelli 1100 mm x 1100 mm), lo spostamento verticale ed il modulo di elasticità.

Strumentazione per l'esecuzione della prova

L'esecuzione della prova in esame ha previsto l'utilizzo di:

- n.4 martinetti idraulici collocati al di sopra del provino che consentono l'applicazione del carico in regime di controllo;
- n.5 trasduttori di spostamento LVDT per il rilievo delle deformazioni e installazioni nel modo seguente:
 - due trasduttori in posizione verticale, uno per ciascuna faccia del provino testato;
 - due trasduttori posizionati sullo spessore del provino, lato A e lato B, per la lettura dello spanciamiento;
 - un trasduttore per la lettura delle deformazioni fuori dal piano posizionato a ridosso del lato fronte del provino, tramite l'ausilio di una base di supporto.

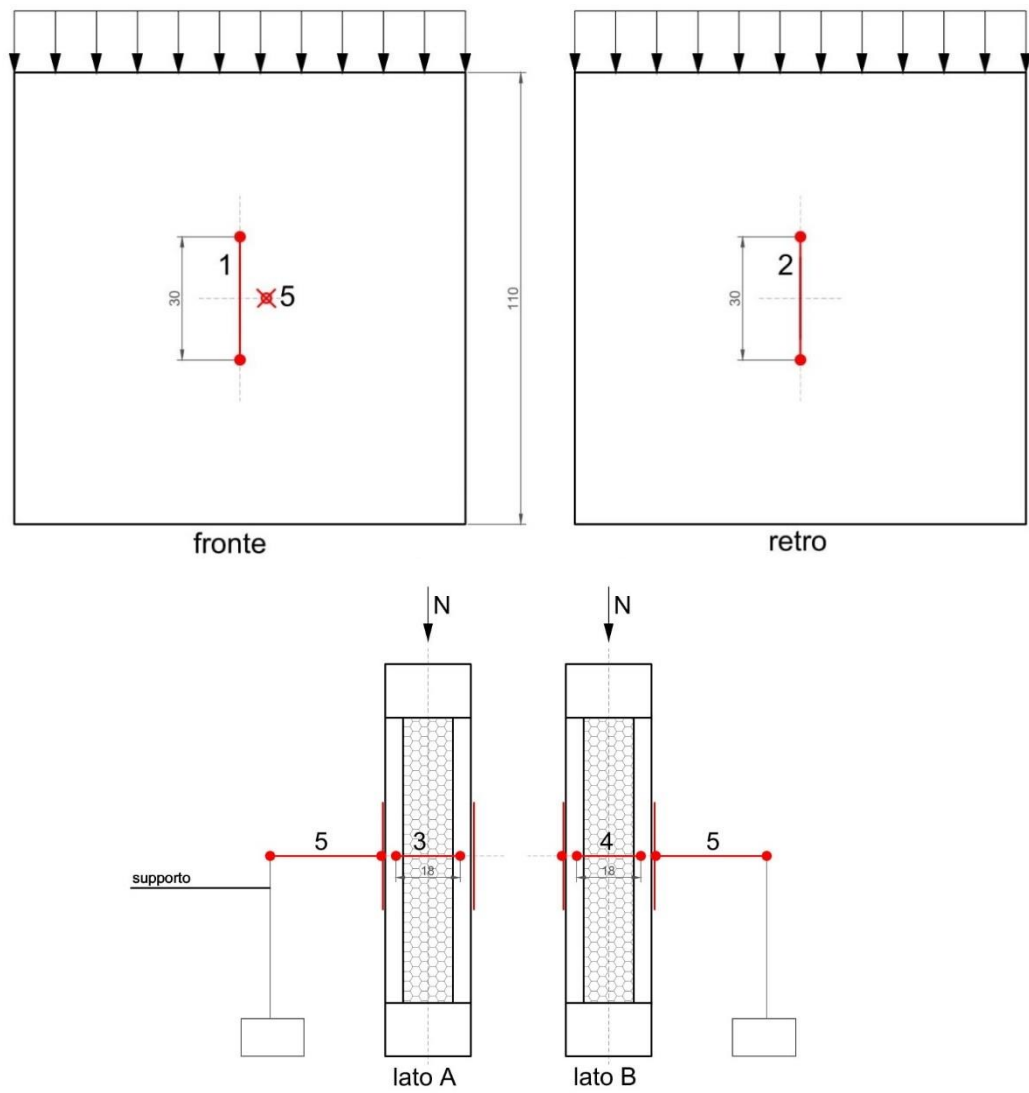


Figura 18 Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A e lato B del provino

Modalità di esecuzione della prova

Questa prova è stata eseguita ponendo il campione al di sotto di un telaio in acciaio dotato di una traversa rigida, la quale è stata utilizzata come strumento di contrasto durante l'attivazione dei martinetti e quindi l'applicazione del carico.

Tra i martinetti e la base superiore del campione, è stata posta una piastra rigida in modo da distribuire gli sforzi uniformemente lungo il lato del provino. Le prove sono state condotte con sforzo assiale crescente, sino al manifestarsi dei fenomeni di rottura dovuta al carico di compressione.



Figura 19 Setup della prova

Sono state eseguite prove di compressione centrata anche su provini snelli di altezza pari a 3000 mm, per essere confrontati poi con i risultati dei provini tozzi (pannelli 1100 mm x 1100 mm). A tale scopo sono stati valutati lo sforzo massimo di compressione, le deformazioni ottenute ed il modulo di elasticità massimo.

Strumentazione per l'esecuzione della prova

L'esecuzione della prova in esame ha previsto l'utilizzo di:

- n.4 martinetti idraulici collocati al di sopra del provino per l'applicazione del carico in regime controllato;
- n.6 trasduttori di spostamento LVDT per il rilevamento delle deformazioni così collocati:
 - due trasduttori in posizione verticale (codice A e B), uno per ciascuna faccia del provino testato, per l'acquisizione delle deformazioni verticali;
 - un trasduttore posizionato sullo spessore del provino (codice C), lato A, per la lettura dello spanciamiento;
 - tre trasduttori di spostamento (codice 1 – 2 – 3) per la lettura delle deformazioni fuori da piano, posizionati orizzontalmente ad 1/4, 1/2 e 3/4 dell'altezza del provino.

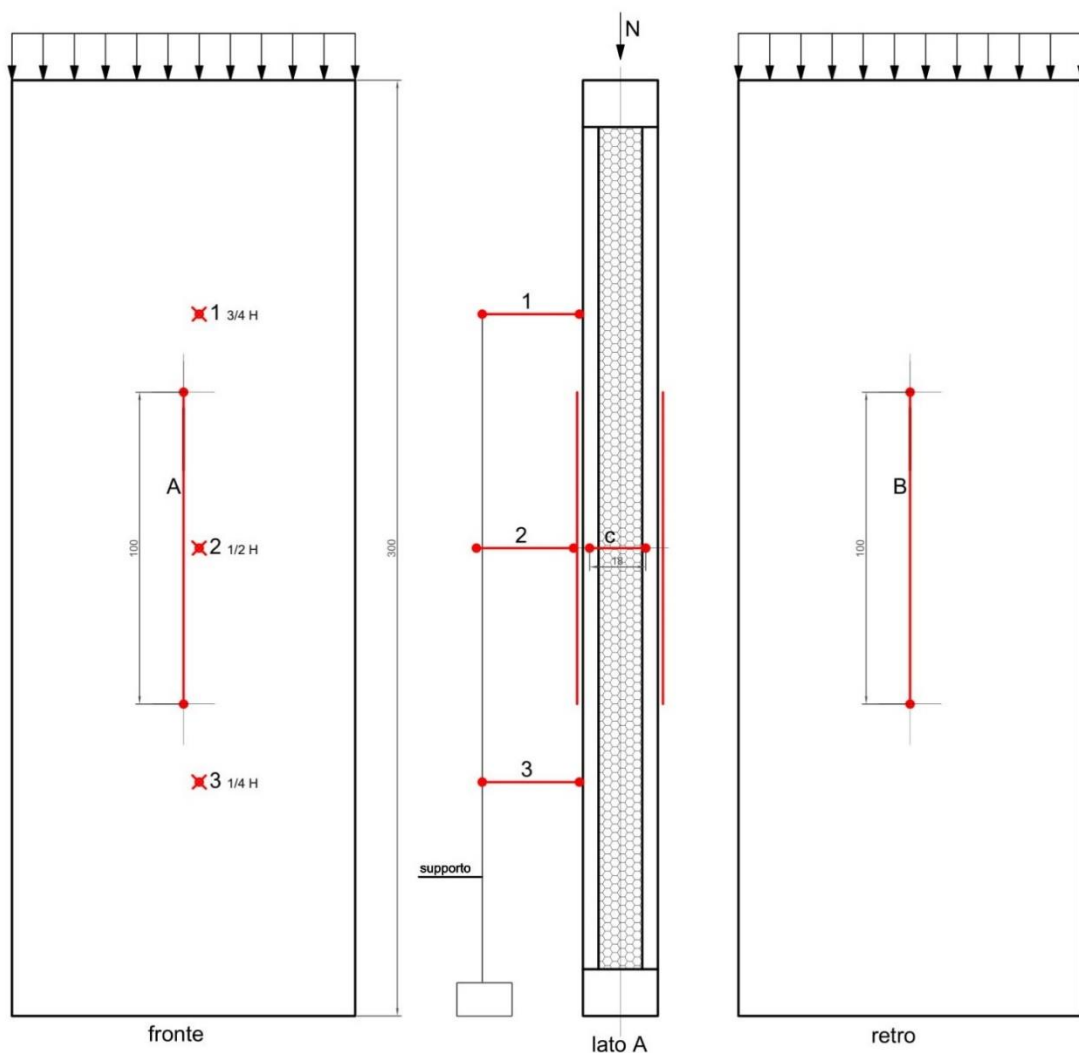


Figura 20 Disposizione dei trasduttori sulle facce e retro, lato A del provino

Modalità di esecuzione della prova

Il provino snello viene collocato al di sotto di un telaio in acciaio dotato di una traversa rigida, opportunamente regolata secondo l'altezza del campione, la quale è stata utilizzata come strumento di contrasto durante l'attivazione dei martinetti e quindi l'applicazione del carico. Tra i martinetti e la base superiore del campione, è stata posta una piastra rigida in modo da distribuire gli sforzi uniformemente lungo il lato del provino. Le prove sono state condotte con sforzo assiale crescente, sino al manifestarsi dei fenomeni di rottura dovuta al carico di compressione.

Risultati ottenuti

Tabella 13 Risultati principali delle prove di compressione centrata su provini tozzi

Codice pannello	Carico Max [kN]	σ_c max [MPa]	ϵ max [-]	E_{sec} [MPa]	E_{tg} [MPa]	Modalità di rottura
CC 1	1274	11,59	0,002	6621	15199	schacciamento cordolo sup. + fessuraz. verticale
CC 2	978	8,89	0,002	4505	16348	schacciamento cordolo sup. + fessuraz. verticale
CC 3	1053	9,58	0,001	6809	8297	fessurazione verticale di compressione
CC 4	1000	9,09	0,002	4629	5789	fessurazione verticale di compressione

Tabella 14 Valori medi ottenuti dalle prove di compressione centrata sui provini tozzi

Valori medi prova CC				
Carico Max [kN]	σ_c max [MPa]	ϵ max [-]	E_{sec} [MPa]	E_{tg} [MPa]
1076,25	9,79	0,002	5641	11408

Tabella 15 Risultati principali delle prove di compressione centrata sui provini snelli

Codice pannello	Carico Max [kN]	σ_c max [MPa]	ϵ max [-]	E_{sec} [MPa]	E_{tg} [MPa]	Modalità di rottura
Cc 1	1515	13,77	0,002	7587	14107	schicciamento cordolo superiore
Cc 2	1495	13,60	0,001	15006	16106	inflessione fuori dal piano
Cc 3	1609	14,63	0,001	9854	20530	inflessione f.d.p. + schicciamento cordolo inf.

Tabella 16 Valori medi ottenuti dalle prove di compressione centrata sui provini snelli

Valori medi prova Cc				
Carico Max [kN]	σ_c max [MPa]	ϵ max [-]	E_{sec} [MPa]	E_{tg} [MPa]
1540	14,00	0,001	10816	16914

Considerazioni finali sulle prove a compressione centrata

La prova di compressione centrata su provini quadrati (tozzi), ha prodotto un valore medio di carico massimo sopportato dai pannelli di poco superiore ai 1000 kN; i provini hanno manifestato una rottura di tipo fragile, con formazione di fessure verticali e schiacciamento del cordolo: tale comportamento è ben evidente nei diagrammi *Tensione-Deformazione* che evidenziano l'andamento lineare crescente delle curve, fino al raggiungimento del carico massimo; non sono stati registrati fenomeni di instabilità fuori dal piano apprezzabili.

La prova di compressione centrata su provini rettangolari (snelli), ha fatto registrare un valore medio di carico massimo di circa 1540 kN, esibendo un andamento elastico-lineare delle curve σ - ϵ , assimilabile ad un comportamento di tipo fragile dei provini, senza sviluppo di deformazioni residue; la rottura dei pannelli è avvenuta per compressione con l'innescò di lesioni orizzontali in mezzeria; lo sforzo verticale centrato applicato ai campioni, ha prodotto una instabilità fuori dal piano registrata dell'ordine del centimetro; non sono stati ravvisati valori significativi di spanciamiento.

7.4 Prova a compressione eccentrica dei pannelli sandwich in c.a.

In questa prova si andranno a valutare i parametri più significativi registrati dopo l'applicazione di un carico eccentrico. Di fatti l'applicazione del carico decentrato rispetto all'asse del provino (pannelli 1100 mm x 1100 mm), genera uno sforzo di presso-flessione il quale ha incidenza sui parametri ottenuti. In particolare, si andranno a valutare la tensione di compressione massima eccentrica, lo spostamento verticale ed il modulo di elasticità.

Strumentazione per l'esecuzione della prova

La prova di compressione eccentrica ha previsto l'utilizzo di:

- n.4 martinetti idraulici collocati al di sopra del provino che consentono l'applicazione del carico in regime controllato;
- n.6 trasduttori di spostamento LVDT per il rilievo delle deformazioni e installati nel modo seguente:
 - due trasduttori in posizione verticale, ognuno per ciascuna faccia del provino testato;
 - due trasduttori posizionati sullo spessore del provino, lato A e lato B, per la lettura dello spanciamiento;
 - due trasduttori per la lettura delle deformazioni fuori dal piano, uno posizionato a ridosso del lato fronte del provino, tramite l'ausilio di una base di supporto, l'altro a ridosso del lato retro.

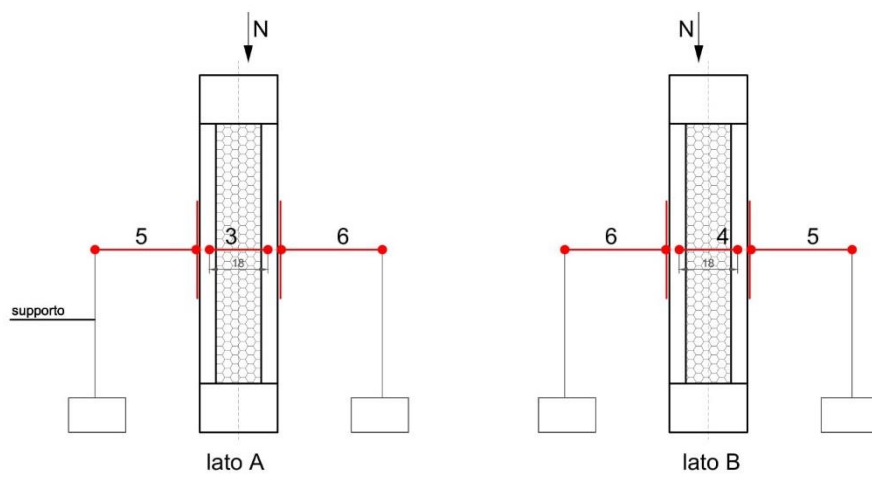
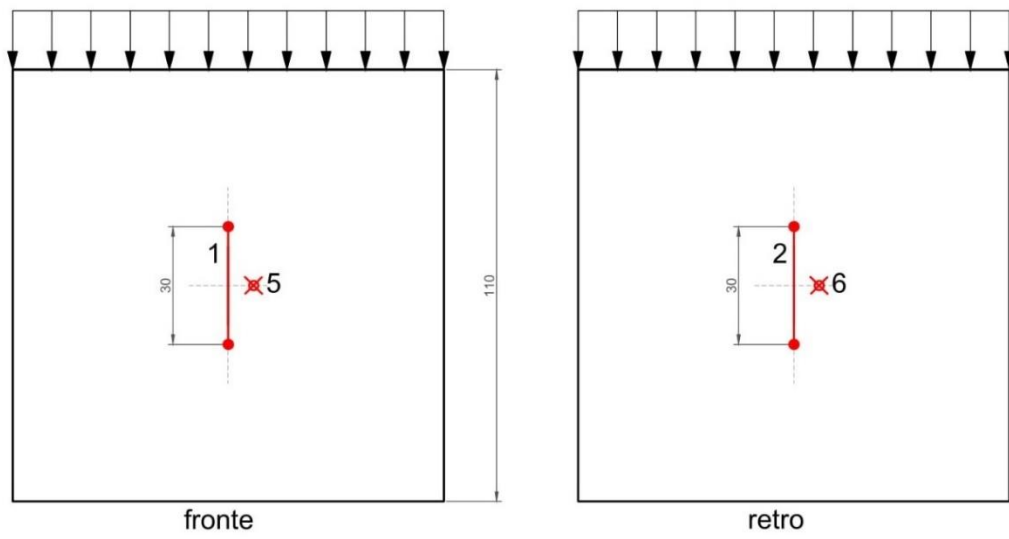


Figura 21 Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A e lato B del provino

Modalità di esecuzione della prova

Questa prova è stata eseguita ponendo il campione al di sotto di un telaio in acciaio dotato di una trasversa rigida, la quale è stata utilizzata come strumento di contrasto durante l'attivazione dei martinetti e quindi l'applicazione del carico.

Il carico è stato applicato mediante una piastra rigida posta sulla sommità del provino, in modo da distribuire uniformemente gli sforzi. Al piede del pannello è stata invece posta una trasversa rigida collegata ad un sistema a cerniera cilindrica orizzontale, al fine di permettere la rotazione del provino sottoposto a compressione eccentrica.

La prova è stata condotta disponendo il carico con un'eccentricità pari a $e=30\text{mm}$, dal centro del provino.

Tali valori di eccentricità sono stati individuati con riferimento a quanto indicato dalle CNR 10025/84 *“Istruzioni per il progetto, l'esecuzione e il controllo delle strutture prefabbricate in conglomerato cementizio armato e per le strutture costruite con sistemi industrializzati”* relativamente ai pannelli gettati in opera in conglomerato cementizio debolmente armato.



Figura 22 Disposizione della cerniera cilindrica orizzontale al piede del provino

Come per le prove a compressione centrata, anche le prove a compressione eccentrica sono state eseguite su provini snelli (pannelli 1100 mm x 3000 mm).

Analogamente ai provini tozzi, la prova di compressione eccentrica viene svolta applicando ai campioni di altezza pari a 3000 mm, un carico verticale decentrato di una certa eccentricità e rispetto all'asse del pannello. In linea con i test svolti per i pannelli quadrati, si vanno ad indagare la tensione di compressione massima eccentrica raggiunta e le deformazioni conseguenti all'applicazione del carico.

Strumentazione per l'esecuzione della prova

L'esecuzione della prova di compressione eccentrica si avvale dell'utilizzo di:

- n.4 martinetti idraulici collocati al di sopra del provino per l'applicazione del carico in regime controllato;
- n.6 trasduttori di spostamento LVDT per il rilevamento delle deformazioni così collocati:
 - due trasduttori in posizione verticale (codice A e B), uno per ciascuna faccia del provino testato, per l'acquisizione delle deformazioni verticali;
 - un trasduttore posizionato sullo spessore del provino (codice C), lato A, per la lettura dello spanciamiento;
 - tre trasduttori di spostamento (codice 1 – 2 – 3) per la lettura delle deformazioni fuori da piano, posizionati orizzontalmente ad 1/4, 1/2 e 3/4 dell'altezza del provino.

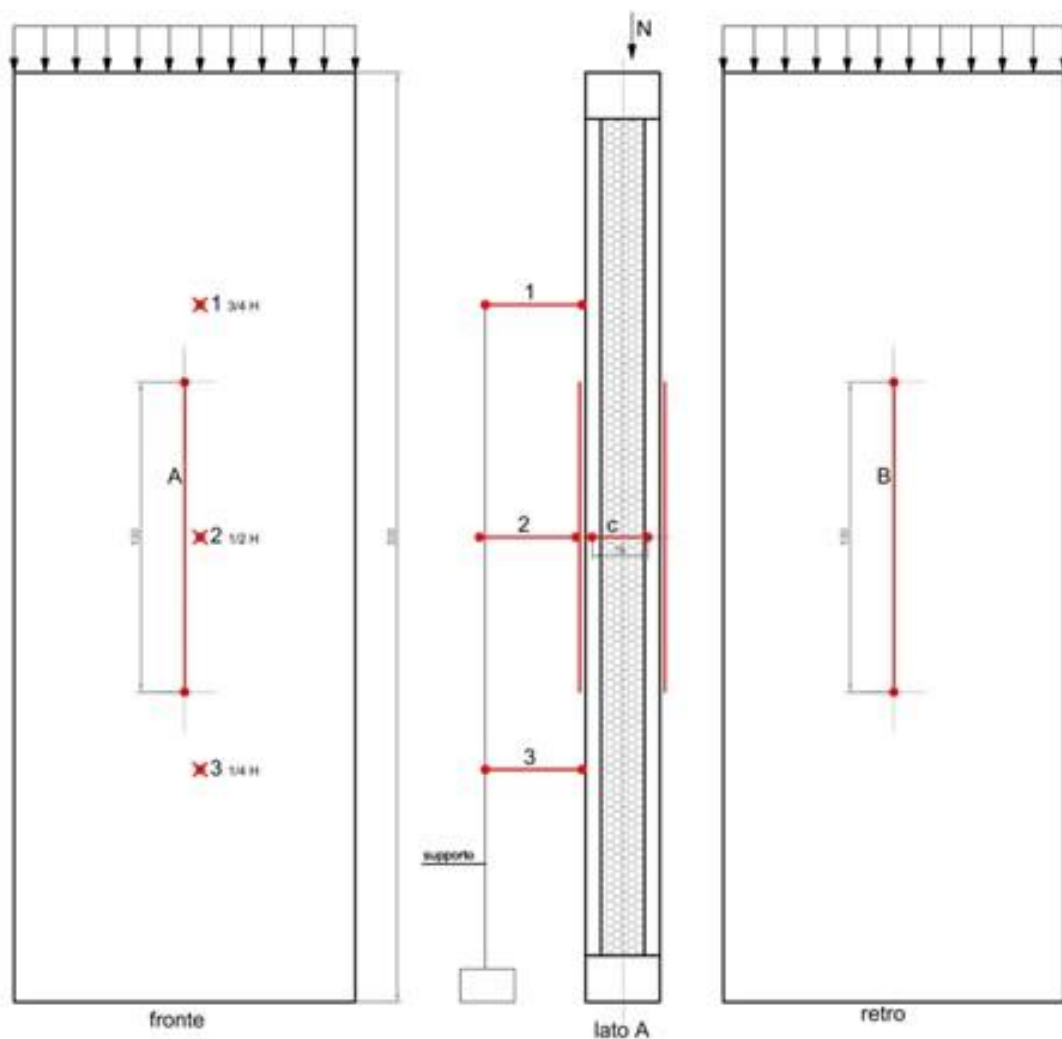


Figura 23 Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A del provino

Modalità di esecuzione della prova

Analogamente alla prova di compressione semplice, si è proceduto a posizionare il campione al di sotto di un telaio in acciaio dotato di una traversa rigida, opportunamente regolata in altezza, la quale viene utilizzata come strumento di contrasto durante l'attivazione dei martinetti e quindi l'applicazione del carico.

Il carico è stato applicato mediante una piastra rigida posta sulla sommità del provino, in modo da distribuire uniformemente gli sforzi.

Al piede del pannello è stata invece posta una traversa rigida collegata ad un sistema a cerniera cilindrica orizzontale, al fine di permettere la rotazione del provino sottoposto a compressione eccentrica.

Come per il carico eccentrico applicato ai pannelli testati di lato 1100 mm, la prova a compressione eccentrica sui provini snelli è stata condotta disponendo il carico con un'eccentricità pari a $e=30$ mm, dal centro del provino.

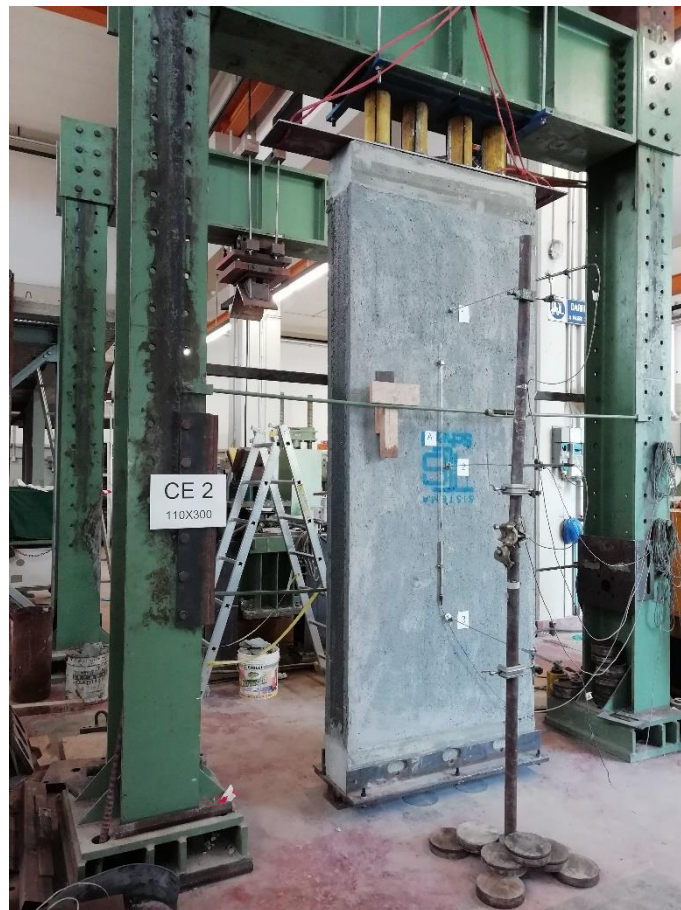


Figura 24 Setup di prova

Risultati ottenuti

Tabella 17 Risultati principali delle prove di compressione eccentrica sui provini tozzi

Codice pannello	Carico Max [kN]	σ_e max [MPa]	ϵ max [-]	E_{sec} [MPa]	E_{tg} [MPa]	Modalità di rottura
CE 1	1046	13,23	0,003	3768	4061	schacciamento cordolo inf. + fessuraz. verticale
CE 2	1006	12,71	0,003	4180	11896	schacciamento lato retro e formazione di fessure
CE 3	1142	14,43	0,003	4744	4228	schacciamento cordolo sup. + fessuraz. verticale
CE 4	999	12,62	0,004	3266	3232	schacciamento lato retro e formazione di fessure

Tabella 18 Valori medi ottenuti dalle prove di compressione eccentrica sui provini tozzi

Valori medi prova CE				
Carico Max [kN]	σ_e max [MPa]	ϵ max [-]	E_{sec} [MPa]	E_{tg} [MPa]
1048,25	13,25	0,003	3989	5854

Tabella 19 Risultati principali delle prove di compressione eccentrica sui provini snelli

Codice pannello	Carico Max [kN]	σ_e max [MPa]	ϵ max [-]	E_{sec} [MPa]	E_{tg} [MPa]	Modalità di rottura
Ce 1	862	3,06	0,001	4376	6832	schacciamento cordolo inferiore
Ce 2	1482	5,27	0,001	4709	5424	schacciamento cordolo superiore
Ce 3	1232	4,38	0,001	3716	4998	schacciamento cordolo superiore

Tabella 20 Valori medi ottenuti dalle prove di compressione eccentrica sui provini snelli

Valori medi prova Ce				
Carico Max [kN]	σ_e max [MPa]	ϵ max [-]	E_{sec} [MPa]	E_{tg} [MPa]
1192	4,24	0,001	4267	5752

Considerazioni finali sulle prove a compressione eccentrica

La prova di compressione eccentrica eseguita su provini quadrati (tozzi), restituisce un valore medio di sforzo massimo pari a 1047 kN; la scelta della minima eccentricità, non ha sviluppato effetti di trazione apprezzabili per il lato fronte, mentre gli spostamenti maggiori si sono registrati per il lato retro dei provini, soggetto a compressione, con modalità di rottura per fessurazione verticale e schiacciamento del cordolo; le deformazioni sviluppate risultano trascurabili ed inferiori al millimetro; i provini hanno registrato valori di instabilità fuori dal piano significativa dell'ordine del centimetro per ogni lato del pannello, mentre non sono stati registrati valori di spanciamento apprezzabili.

La prova di compressione eccentrica su provini rettangolari, ha fornito un valore medio di resistenza pari a 1192 kN; i provini sottoposti a carico eccentrico non hanno manifestato il comportamento a pressoflessione atteso, sia per la minima eccentricità imposta sia per la rottura preventiva del cordolo rigido sommitale durante l'esecuzione della prova; in generale tutti i provini hanno manifestato un andamento delle curve σ - ϵ di tipo lineare, il quale suggerisce un comportamento di tipo fragile; la rottura dei provini è avvenuta per schiacciamento del cordolo rigido; sono stati registrati valori di spostamento fuori dal piano di circa 5 mm, non imputabili tuttavia ad una instabilità fuori dal piano, bensì allo scostamento del provino dalla propria sede; non sono stati registrati valori di spanciamento apprezzabili.

7.5 Prova a precompressione e taglio dei pannelli sandwich in c.a.

La prova consiste nell'applicazione di una forza orizzontale al provino di tipo sandwich, la quale produrrà uno spostamento sommitale δ . I test sono svolti applicando una forza di compressione costante per tutta la durata dell'applicazione crescente dello sforzo orizzontale. Si ricavano quindi la tensione tangenziale massima dovuta allo sforzo di taglio e conseguente deformazione, calcolabile attraverso lo spostamento sommitale del provino.

Strumentazione per l'esecuzione della prova

La prova di precompressione e taglio ha previsto l'utilizzo di:

- n.4 martinetti idraulici collocati al di sopra del provino: consentono l'applicazione del carico in regime controllato;
- un sistema di spinta orizzontale, in corrispondenza del lato A del provino, costituito da un martinetto idraulico agganciato in posizione orizzontale in adiacenza alla superficie, per l'applicazione dello sforzo di taglio;
- n.4 trasduttori di spostamento LVDT per il rilevamento delle deformazioni e installati nel modo seguente:
 - due trasduttori lungo le diagonali del provino, posizionati sul lato fronte, al fine di valutare l'allungamento e l'accorciamento durante l'esposizione al carico;
 - un trasduttore posizionato lungo l'asse verticale del provino, sul lato retro, per il monitoraggio delle deformazioni verticali;
 - un trasduttore lungo la direzione di applicazione del carico orizzontale per il monitoraggio degli spostamenti nel piano δ , posizionato sul lato B del provino.

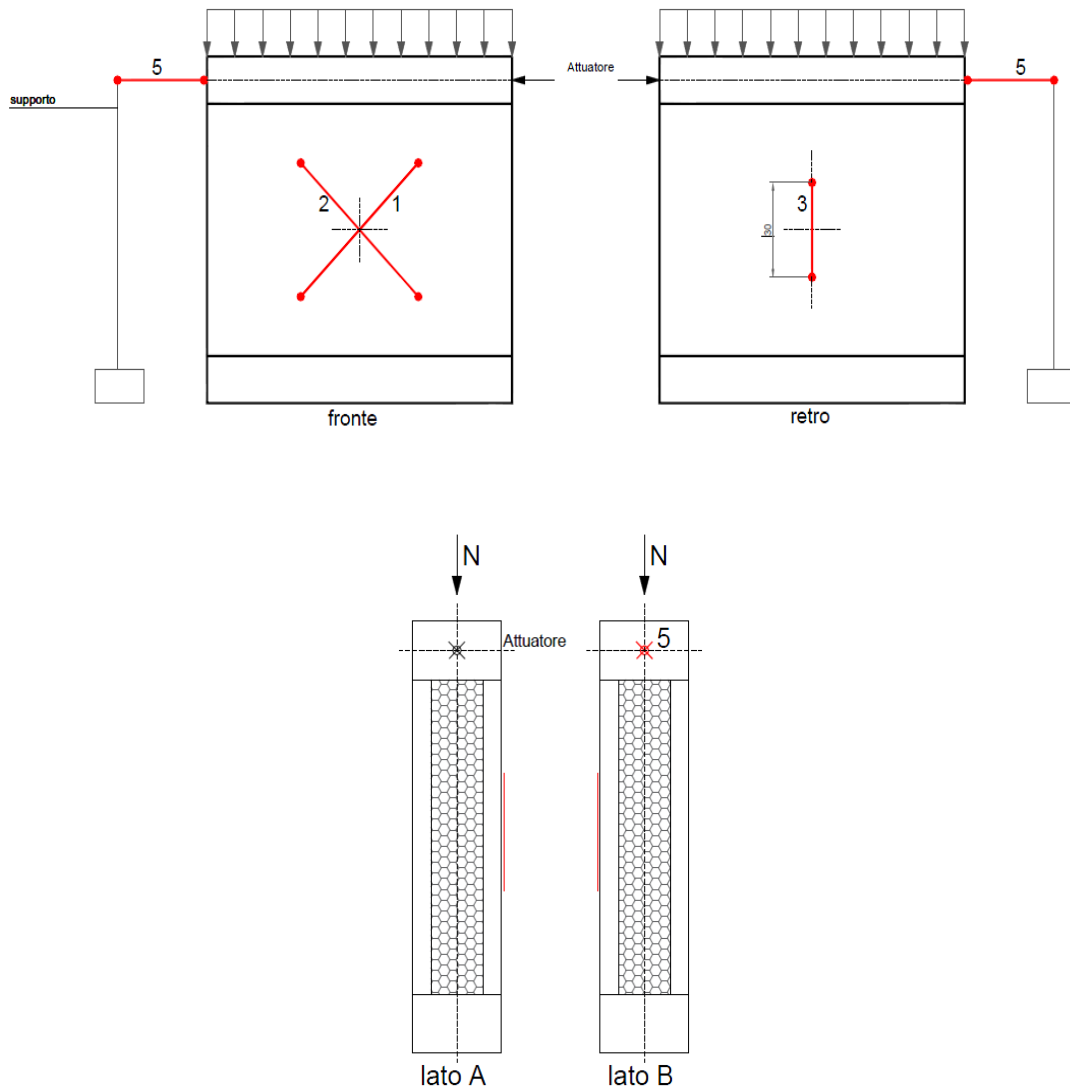


Figura 25 Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A e lato B del provino

Modalità di esecuzione della prova

Per ogni test, si è proceduto ad alloggiare il provino al di sotto del telaio di prova, utile ai fini dell'applicazione del precarico assiale, sottoposto al pannello tramite martinetti idraulici collocati in sommità.

In particolare, il precarico verticale è stato applicato al campione per mezzo di quattro martinetti idraulici tali da espletare la capacità di carico richiesta, accoppiati con il cordolo superiore del provino attraverso una piastra rigida di collegamento. Una volta posizionato il provino sotto l'apparato di prova, esso è stato caricato sino a raggiungere il livello di compressione assiale stabilita, pari a circa 400 kN. Successivamente è stato disposto il sistema di spinta orizzontale in corrispondenza del lato A del provino, opportunamente contrastato alla base del campione, al fine di permettere solo lo spostamento in sommità.

Durante lo svolgimento delle prove, il carico verticale è stato mantenuto costante, mentre si è provveduto ad incrementare in maniera crescente il valore della spinta orizzontale fino al manifestarsi della condizione di collasso del provino.



Figura 26 Setup di prova

Risultati ottenuti

Tabella 21 Risultati principali delle prove di precompressione e taglio sui provini tozzi

Codice pannello	$F_{h \max}$ [kN]	δ_{\max} [mm]	τ_{\max} [MPa]	γ_{\max} [-]	G_{tg} [MPa]	Modalità di rottura
PT 1	307	25	0,00278	0,023	0,2331	fessurazione diagonale + schiacciamento spigolo inf.
PT 2	261	30	0,00237	0,027	0,2163	fessurazione diagonale + schiacciamento spigolo inf.
PT 3	200	34	0,00181	0,031	0,2342	fessurazione diagonale + schiacciamento spigolo inf.
PT 4	-	-	-	-	-	-

Tabella 22 Valori medi ottenuti dalle prove di precompressione e taglio sui provini tozzi

Valori medi prova PT				
$F_{h \max}$ [kN]	δ_{\max} [mm]	τ_{\max} [MPa]	γ_{\max} [-]	G_{tg} [MPa]
256	30	0,0023	0,027	0,2279

Considerazioni finali sulle prove a precompressione e taglio

La prova di precompressione e taglio eseguita su provini quadrati, ha previsto l'applicazione di un carico di compressione mantenuto costante, pari a circa 400 kN, a cui ha fatto seguito l'applicazione di una forza orizzontale, la quale ha prodotto uno spostamento medio massimo in sommità di circa 30 mm; la deformazione residua maggiore viene esibita nella prova PT3 in cui si raggiunge il valore massimo di deformazione angolare pari a circa il 3%, mentre la rottura a taglio avviene per fessurazione diagonale accompagnata dallo schiacciamento dello spigolo inferiore dei provini.

8. CONCLUSIONI

In questa tesi di laurea sono state indagate le caratteristiche e i comportamenti meccanici dei pannelli sandwich in calcestruzzo armato, inquadrando aspetti normativi e tecnici.

Si è cercato di inquadrare la tecnologia di questi pannelli all'interno dell'ambito della produzione edilizia, dato un rinnovato interesse verso l'utilizzo dei sistemi sandwich come strutture portanti.

Questa tecnologia offre numerosi vantaggi come una facile e rapida installazione, diminuendo le fasi di lavoro in cantiere, la sicurezza in cantiere e la flessibilità costruttiva grazie alle dimensioni dei pannelli e delle loro forme adattabili.

Per quanto riguarda l'aspetto tecnico ed energetico, i pannelli sandwich in calcestruzzo armato sono sicuramente un'alternativa decisamente migliore rispetto ad un sistema strutturale solamente in calcestruzzo armato.

Date le condizioni climatiche della terra, e quindi la necessità di dover utilizzare in maniera più conscia e protettiva i materiali edilizi (e non), si può concludere affermando che i pannelli sandwich in calcestruzzo armato sono una delle tecnologie innovative maggiormente proficue nell'ambito edilizio, portando molti miglioramenti sotto l'aspetto dei consumi, rispetto alle tecnologie tradizionali di costruzione.

9. BIBLIOGRAFIA

- PCI Industry Handbook Committee. 2010. *PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete*. 7th ed. Chicago, IL: PCI.
- Manuale di montaggio, Pannelli coibentati in poliuretano per copertura, Marcegaglia
- Mehran A. Yousafzai, Amir Hamza Khan, Jehangeer Alam et al. Numerical Study on the Behavior of Reinforced Concrete Sandwich Panels (RCSPs) under Blast Load, 02 September 2022, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1916870/v1>]
- Abbas A., Adil M., Ahmad N., Ahmad I., Behavior of reinforced concrete sandwiched panels (RCSPs) under blast load.
- Tesi a cura di Elisa Cartechini, Caratterizzazione sperimentale del comportamento meccanico dei pannelli sandwich in calcestruzzo armato e polistirene, Università Politecnica delle Marche

10. SITOGRAFIA

- <https://www.studioingdellaporta.it/storia-cemento-armato/#:~:text=Nel%201861%20il%20giardiniere%20francese,schellero%20di%20barre%20in%20ferro>
- <https://mitp-arch.mitpress.mit.edu/pub/5nuy76j6/release/1>
- <https://www.ingenio-web.it/articoli/arte-ed-evoluzione-della-progettazione-un-saggio-premonitore-di-elio-giangreco-e-konrad-wachsmann/>
- <https://www.archiexpo.it/prod/ebawe-anlagentechnik-gmbh/product-69816-1579005.html>
- <https://www.pcigulfsouth.org/blog/2019/5/3/an-introduction-to-precastprestressed-concrete-insulated-wall-panels>
- https://www.edilportale.com/news/2021/01/focus/eps-polistirene-espanso-sinterizzato-cos-e-e-come-si-usa_80603_67.html
- <https://www.aipe.biz/>
- <https://www.infobuild.it/approfondimenti/polistirolo-espanso-estruso/>
- <https://www.poliureasud.it/poliuretano-espanso-a-spruzzo-caratteristiche-e-utilizzi/>
- <https://www.stiferite.com/poliuretano.html>
- <https://spiegato.com/che-cose-il-poliisocianurato>

- <https://academy.dakota.eu/lana-di-roccia-caratteristiche-e-vantaggi-per-isolamento-termico>
- <https://www.isover.it/lazienda/isolamento-e-impermabilizzazione/i-materiali-isolanti-e-impermeabilizzanti/lana-di-roccia>
- <https://www.gruppomade.com/a-cosa-serve-lana-di-vetro/>
- <https://www.stsisolamenti.com/lana-vetro/>
- <https://www.ingdemurtas.it/tabelle/tabella-trasmittanza-termica-di-materiali-isolanti/>
- <https://www.unilininsulation.com/it-it/tutto-sull-isolamento/perch%C3%A9-pir>