



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea in Ingegneria Edile

**Studio sperimentale del comportamento meccanico di pannelli sandwich in
c.a. sottoposti a compressione eccentrica**

**Experimental study of the mechanical behaviour of r.c. sandwich panels
subjected to eccentric compression**

Relatore:

Prof. Serpilli Michele

Tesi di Laurea di:

Asia Gasparretti

Anno Accademico 2022 /2023

INDICE

Indice delle figure	4
Indice delle tabelle	5
1.Introduzione	6
1.1 Evoluzione ed applicazione dei sistemi a pareti portanti.....	7
1.2 Obiettivo della tesi	10
2.Sistema costruttivo dei pannelli sandwich	11
2.1 Tecnologia dei pannelli sandwich.....	12
2.2 Composizione dei pannelli sandwich	12
2.2.1 Paramenti esterni	13
2.2.2 Isolamento	14
2.2.3 Connettori	14
2.3 Vantaggi legati all’utilizzo dei pannelli sandwich strutturali.....	16
3.Inquadramento normativo dei pannelli sandwich	17
3.1 Inquadramento normativo dei pannelli sandwich.....	18
3.2 Tecnologia costruttiva	19
3.3 Fasi di cantierizzazione	21
4.Materiali e metodi prova	24
4.1 Descrizione dei provini.....	25
4.2 Prove di compressione eccentrica	25
4.2.1 Normativa	26
4.2.2 Specifiche degli elementi testati	27
4.2.3 Strumentazione e modalità di esecuzione della prova.....	32
5.Risultati della sperimentazione	37
5.1 Curve forza-spostamento	38
5.2 Modalità di rottura	47
6.Discussione dei risultati	57
6.1 Discussione dei risultati della presente ricerca	58
6.1.1 Discussione dei risultati serie A-B-C	59
6.1.2 Discussione dei risultati serie A-D	62
Conclusioni	65
Bibliografia/Sitografia	67

Indice delle figure

Figura 1 – Stratigrafia dei pannelli sandwich testati in laboratorio prodotti dalla ditta Due Emme ..	8
Figura 2 – Carcere della contea El Paso, Colorado	9
Figura 3 - Capannone realizzato con pannelli sandwich	12
Figura 4 - Schematizzazione dei pannelli sandwich oggetto di studio	13
Figura 5 - Connettori a traliccio	15
Figura 6 - Connettori saldati (a), Connettori piegati (b)	15
Figura 7 - Esempio di un'abitazione realizzata con pannelli sandwich	16
Figura 8 - Profilo ondulato del polistirene	19
Figura 9 - Composizione del pannello sandwich	20
Figura 10 - Ancoraggio alla fondazione	21
Figura 11 - Disposizione dei puntelli diagonali per la posa in opera dei pannelli	22
Figura 12 - Installazione degli impianti	22
Figura 13 - Getto di completamento dello spritz beton	23
Figura 14 - Provini sprovvisi di profilati metallici HEA, pannello D1(a), pannello B1 (b)	28
Figura 15 - Planimetria e sezione della disposizione delle reti metalliche e connettori	29
Figura 16 - Rappresentazione della disposizione dell'armatura, dei connettori, e del profilo ondulato della lastra di polistirene	30
Figura 17 - Armatura dei cordoli	30
Figura 18 - Particolare attacco cordoli con tondino e piastra saldati	31
Figura 19 - Profilati metallici HEA impiegati in corrispondenza del cordolo inferiore	31
Figura 20 - Martinetti che applicano il carico sui dischi, che sono appoggiati sulla piastra (a), collegamento del pannello con la piastra d'acciaio saldata	33
Figura 21 - Collocazione trasduttori sulle facce fronte e retro	33
Figura 22 - Prove di compressione eccentrica primi tre provini: configurazione e strumentazione di prova	34
Figura 23 - Setup della prova frontale (a), setup della prova retro(b), setup della prova in corrispondenza del cordolo superiore (c)	35
Figura 24 - Profilati metallici in corrispondenza del cordolo inferiore	36
Figura 25 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento verticale B1-B2-B3	38
Figura 26 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento orizzontale 'O2 - h/2' B1-B2-B3	39
Figura 27 - Curve Altezza-Spostamento B1-B2-B3	40
Figura 28 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento verticale C1-C2-C3	41
Figura 29 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento orizzontale 'O2 - h/2' C1-C2-C3	42
Figura 30 - Curve Altezza-Spostamento C1-C2-C3	43
Figura 31 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento verticale D1-D2-D3	44
Figura 32 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento orizzontale 'O2 - h/2' D2-D2-D3	45
Figura 33 - Curve Altezza-Spostamento D1-D2-D3	46
Figura 34 - Rottura per schiacciamento del cordolo inferiore del provino B1	48
Figura 35 - Rottura per schiacciamento del cordolo inferiore B2	49
Figura 36 - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore B3	50
Figura 37 - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore C1	51
Figura 38 - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore C2	52
Figura 39 - Rottura per pressoflessione C3	53
Figura 40 - Rottura per pressoflessione D1	54
Figura 41 - Rottura per pressoflessione D2	55
Figura 42 - Rottura per pressoflessione D3	56
Figura 43 - Confronto carico medio di rottura serie A-B-C	60
Figura 44 - Curva numero di connettori – carico medio rottura serie A-B-C	60
Figura 45 - Confronto diagramma Forza-Spostamento delle serie A-B-C	61

Figura 46 - Confronto carico medio di rottura serie A-D	63
Figura 47 - Curva numero di connettori – carico medio rottura serie A-D	63
Figura 48 - Confronto diagramma Forza-Spostamento delle serie A-D	64

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Tabella riassuntiva delle specifiche di pannelli testati.....	27
Tabella 2 - Tensione di compressione e deformazione dei pannelli della serie B	38
Tabella 3 - Carico Massimo di rottura e modulo elastico dei pannelli della serie B	38
Tabella 4 - Tensione di compressione e deformazione dei pannelli della serie C	41
Tabella 5 - Carico Massimo di rottura e modulo elastico dei pannelli della serie C	41
Tabella 6 - Tensione di compressione e deformazione dei pannelli della serie D	44
Tabella 7 - Carico Massimo di rottura e modulo elastico dei pannelli della serie D	44
Tabella 8 - Tabella illustrativa dei risultati messi a confronto serie A-B-C	59
Tabella 9 - Tabella illustrativa dei risultati messi a confronto serie A-D	59
Tabella 10 - Influenza del numero di connettori sul carico di rottura serie A-B-C	59
Tabella 11 - Aumento percentuale del carico medio di rottura serie A-B-C	59
Tabella 12 - Influenza del rapporto di snellezza sul carico di rottura A-D.....	62
Tabella 13 - Aumento percentuale del carico medio di rottura serie A-D.....	62

1.Introduzione

1.1 Evoluzione ed applicazione dei sistemi a pareti portanti

Le tecniche e i materiali impiegati nell'edilizia sono rimasti invariati per molti secoli, fino a quando non ci fu un brusco cambiamento nei metodi di produzione a causa dell'industrializzazione nei primi del Novecento.

Il sistema costruttivo a pareti portanti non è una scoperta recente, basti pensare ai nostri centri storici caratterizzati da aggregati edilizi, chiese, cattedrali che si basano su questo concetto.

Nel dopoguerra, il sistema costruttivo a pareti portanti in conglomerato cementizio ha trovato largo impiego in Europa, per far fronte alla crescente esigenza di sviluppo residenziale e per la ricostruzione degli edifici danneggiati. I più utilizzati erano i pannelli portanti prefabbricati in calcestruzzo armato, grazie ai vantaggi che portavano sia in termini economici, sia per il minor impiego manodopera per la posa in opera, infatti questi venivano prodotti in serie, riducendo le operazioni in cantiere.

Infatti, nella seconda metà del Novecento il cemento armato assume un ruolo centrale come materiale da costruzione, e grazie alla produzione del calcestruzzo a prezzi contenuti. Dopo alcune applicazioni fatte da Le Corbusier e Nervi, si assistette ad un sempre e più largo utilizzo delle pareti in cemento armato gettato in opera per strutture caratterizzate da forme ripetibili. Inoltre, queste pareti potevano essere lasciate a vista, senza bisogno di alcun trattamento, coibentazione o finiture, costituendo di fatto un altro motivo per il quale questo sistema risulta essere più economico e veloce.

Seppur in un passato recente l'utilizzo degli elementi portanti in c.a. era destinato ad una piccola fetta del mercato, negli ultimi decenni, per via della produzione edilizia intensiva, l'interesse verso questa tipologia costruttiva è aumentato in tutto il mondo.

In particolare, la comparsa di moderne tipologie di materiali espansi, impiegati per la formazione di elementi modulari, favorì una semplificazione dal punto di vista cantieristico, andando a ridurre i tempi di costruzione. Questo rappresenta il primo passo verso la modernizzazione di tali sistemi costruttivi.

Lo sviluppo di queste tecnologie costruttive, è stato favorito anche dalle nuove normative per il campo delle costruzioni, soprattutto quelle riguardanti la protezione antisismica e il risparmio energetico.

Il settore delle costruzioni è responsabile del 40% del consumo di energia, elettricità, acqua e materiali. Per conseguire i protocolli internazionali di risparmio energetico l'industria edilizia sta proponendo lo sviluppo di materiali da costruzione ecocompatibili e più sostenibili, con particolare interesse alle soluzioni che impiegano pareti in cemento armato prefabbricate o gettate in opera.

I sistemi utilizzati per la realizzazione delle pareti portanti in c.a. si possono differenziare tra loro per il metodo costruttivo:

- sistemi con casseformi a perdere di materiale isolante e armatura parzialmente predisposta dove verrà effettuato il getto di calcestruzzo;
- sistemi sandwich dove il materiale isolante è interposto tra due paramenti di calcestruzzo, le cortine di calcestruzzo possono essere prefabbricate o gettate in opera spruzzando il calcestruzzo ai lati del materiale isolante dotato di armatura predisposta;
- blocchi cassero caratterizzati da un buon isolamento termico.

Le pareti in c.a. possono essere piene o alleggerite.

Il sistema costruttivo di tipo sandwich, che sarà oggetto di studio di questa tesi, conosciuto come RCSP (Reinforced Concrete Sandwich Panels) o ISWP (Insulated Sandwich Wall Panels) è costituito da: due cortine esterne in cemento armato gettate in opera mediante la tecnica dello spruzzo di calcestruzzo, con spessore variabile di qualche centimetro e armate con rete elettrosaldata, all'interno vi è un nucleo di isolante termico, generalmente EPS. I paramenti esterni sono collegati da connettori a taglio che, se sufficientemente rigidi, garantiscono un comportamento composito della parete.



Figura 1 – Stratigrafia dei pannelli sandwich testati in laboratorio prodotti dalla ditta Due Emme

Prima del 1960, la tecnologia costruttiva dei pannelli sandwich veniva impiegata solo in ambito aerospaziale. Negli anni questo sistema è stato utilizzato sempre più in ambiti diversi, come nel settore delle costruzioni, dove vengono utilizzati come elementi strutturali.

Solitamente i pannelli sandwich trovano largo impiego per le pareti esterne, ma vengono utilizzati anche come pareti divisorie interne, in particolare per stanze in cui la temperatura viene controllata.

Grazie all'economicità e all'efficienza dal punto di vista energetico, questa tecnologia può essere sfruttata in gran parte delle strutture: edifici residenziali, scuole, uffici, ambienti a bassa temperatura, atmosfere controllate, magazzini, edifici industriali, strutture giudiziarie e ospedali.

Di seguito è riportato un esempio di struttura in cui è evidente l'impiego del sistema costruttivo dei pannelli sandwich:



Figura 2 – Carcere della contea El Paso, Colorado

1.2 Obiettivo della tesi

La convenzione stipulata tra L'Università Politecnica delle Marche, e per essa il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura (DICEA) e la Ditta Emmedue srl, ha previsto la caratterizzazione del comportamento meccanico di pannelli sandwich in calcestruzzo armato e polistirene di produzione della Ditta Emmedue srl. Presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture della Sezione Strutture del Dipartimento DICEA sono stati testati i pannelli sandwich gettati in opera con materiale isolante (EPS) come elemento di supporto a compressione eccentrica.

I risultati ottenuti dalle prove permettono di descrivere sia il comportamento meccanico dei pannelli sandwich in c.a, nel piano e fuori piano, quando sottoposti a carico statico eccentrico, che le modalità di rottura dei provini.

Durante la campagna sperimentale sono stati testati nove pannelli suddivisi in tre gruppi, ognuno dei quali differiva tra l'altro per il diverso numero di connettori e diverse altezze.

L'obiettivo di questo elaborato di tesi è ampliare la conoscenza del comportamento meccanico di questo sistema andandosi a confrontare anche con gli studi dei precedenti test, fatti su altri tre gruppi di pannelli, che differivano per lo spessore dell'isolante EPS a parità di dimensioni e numero di connettori.

Particolare interesse è rivolto alla valutazione dell'influenza dei diversi parametri dei pannelli (numero di connettori, altezze, spessore dell'EPS) sulla prova di compressione eccentrica, in modo da fornire uno studio ben dettagliato della tecnologia costruttiva a pannelli sandwich in c.a. per questo tipo di test.

Questo approfondimento mira a valorizzare l'impiego di questo sistema per elementi strutturali portanti di edifici di nuova costruzione.

L'elaborato di tesi è stato così suddiviso:

- nel primo capitolo si è cercato di dare una descrizione generale dei sistemi a pareti portanti;
- nel secondo capitolo è stato studiato in dettaglio il sistema costruttivo dei pannelli sandwich in cemento armato gettato in opera, realizzati con la tecnologia del pannello di supporto in polistirene, fornendo i vantaggi strutturali legati al suo utilizzo;
- nel terzo capitolo è stata inquadrata la tecnologia costruttiva oggetto di studio, riportando i riferimenti normativi;
- nel quarto capitolo è stata descritta la prova di compressione eccentrica, indicando la normativa e le formule di riferimento utilizzate per elaborare i dati ottenuti, le specifiche dei campioni testati, la strumentazione di supporto e la modalità di esecuzione della prova;
- nel quinto capitolo sono stati riportati i risultati ottenuti dalla sperimentazione, mediante curve forze-spostamento, e sono state osservate le modalità di rottura dei vari provini;
- nell'ultimo capitolo sono stati discussi i risultati, confrontandoli tra loro ed osservando il modo in cui i parametri influiscono sulla rottura per questo tipo di prova.

2.Sistema costruttivo dei pannelli sandwich

2.1 Tecnologia dei pannelli sandwich

Negli ultimi anni lo sviluppo dell'edilizia verso sistemi efficienti e a basso consumo energetico ha favorito dell'impiego dei pannelli sandwich.

I pannelli sandwich, prefabbricati o gettati in opera, sono adatti ad essere impiegati sia per pareti interne, esterne, che per pareti portanti di edifici ad uso residenziale, commerciale ed industriale.

I principali vantaggi legati questa tecnologia sono: efficienza energetica, facile e rapida posa in opera, basso costo e una non elevata richiesta di manodopera per la realizzazione.



Figura 3 - Capannone realizzato con pannelli sandwich

2.2 Composizione dei pannelli sandwich

I pannelli sandwich analizzati in questo elaborato sono costituiti da due cortine esterne in calcestruzzo spruzzato in opera, rinforzati con rete elettrosaldata, e all'interno è composto da uno strato di polistirene espanso (EPS). I paramenti esterni sono collegati tra loro tramite dei connettori metallici.

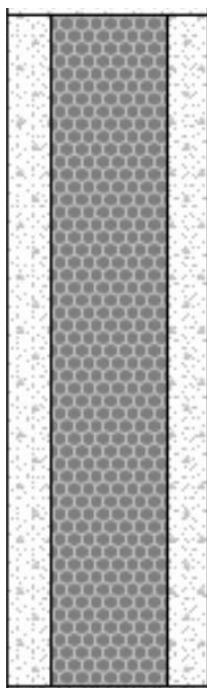


Figura 4 - Schematizzazione dei pannelli sandwich oggetto di studio

2.2.1 Paramenti esterni

Lo spessore dei paramenti esterni è influenzato dalla funzione strutturale associata al pannello, dal copriferro, dall'ancoraggio dei connettori, e da verniciatura e finitura. Può dipendere anche dalla resistenza al fuoco di progetto richiesta.

Le cortine esterne sono considerate strutturali quando conferiscono al pannello una resistenza ai carichi importante. Nei pannelli parzialmente o totalmente compositi i paramenti esterni sono entrambi strutturali, mentre nei pannelli non compositi solo uno dei due paramenti è strutturale. La differenza di questo tipo di comportamento, tipico dei pannelli sandwich, è legata al completo, parziale, o quasi nullo trasferimento delle azioni di taglio da parte dei connettori.

Solitamente il paramento esterno è costituito da uno strato sottile di calcestruzzo, di spessore compreso tra 50 e 75 mm, questo strato serve anche a protezione dello strato interno isolante.

La cortina interna, soprattutto per i pannelli non compositi, solitamente ha uno spessore di 50-150 mm, dovuto al fatto che porta interamente il carico della struttura sovrastante.

Entrambi i paramenti vengono rinforzati tramite rete elettrosaldata.

2.2.2 Isolamento

Lo spessore e il tipo di isolamento dipendono dalle proprietà termiche che il materiale stesso è capace di fornirci, dalla temperatura di progetto della struttura e dalla resistenza termica desiderata. L'isolante deve anche essere caratterizzato da un basso assorbimento di acqua per minimizzare la perdita d'acqua dal calcestruzzo appena posato.

I pannelli sandwich sono tipicamente isolati con uno strato di schiuma rigida a celle chiuse spesso 50 - 100 mm poiché è impermeabile, e fornisce valori elevati di resistenza al fuoco.

I due isolanti più diffusi per questo tipo di pannelli sono: XPS (polistirene espanso estruso), EPS (polistirene espanso)

La struttura dell'XPS a celle chiuse è omogenea e stabile, ciò rende praticamente nullo l'assorbimento d'acqua e gli conferisce un'alta resistenza alla compressione.

L'EPS è il più economico tra i due. La sua struttura è a cellule chiuse, ed è caratterizzato da bassa conducibilità termica, elevata resistenza alla compressione e leggerezza.

Altri tipi di isolamento molto impiegati sono la lana di roccia e di vetro.

Negli ultimi anni per perseguire l'obiettivo della direttiva Case Green, ovvero quello di ridurre la CO₂ del 50%, la scelta del materiale isolante sta diventando un fattore molto importante, ciò comporta che i costruttori tendano sempre più ad utilizzare materiali isolanti realizzati con scarti della filiera agroforestale o alimentare, in modo da ridurre la quantità di energia consumata.

2.2.3 Connettori

I connettori servono per unire le due cortine di cemento armato dei pannelli, contribuendo a garantire il comportamento composito.

Solitamente i connettori vengono, in base al grado di azione composita che conferiscono, classificati in: connettori a taglio rigidi (garantiscono un comportamento composito) e connettori a taglio flessibili (garantiscono un parziale comportamento composito).

La disposizione dei connettori è fondamentale nello studio del comportamento strutturale dei pannelli, poiché svolgono un ruolo primario nel trasferimento del taglio da una cortina all'altra. In particolare: se messi perpendicolarmente alle reti metalliche esterne, non trasferiscono forze di taglio, mentre se messi a traliccio contribuiscono efficacemente al trasferimento del carico di taglio.

In base a ciò è possibile distinguere il comportamento dei pannelli riferendosi al grado di azione composita che riescono a raggiungere in:

- completamente composito, quando i paramenti sono collegati in modo tale che possano resistere ai carichi applicati comportandosi come un'unica sezione. In questo caso i connettori trasferiscono totalmente il taglio agli strati portanti;

- parzialmente composito, quando i connettori trasferiscono in parte il taglio agli strati portanti;
- non composito, quando i connettori non riescono a trasferire taglio agli strati portanti, che si comportano quindi in modo indipendente.

Uno dei sistemi di connettori a traliccio più utilizzati è quello dove i connettori sono inclinati a 45° e sono collegati alle reti metalliche delle cortine esterne mediante saldatura.

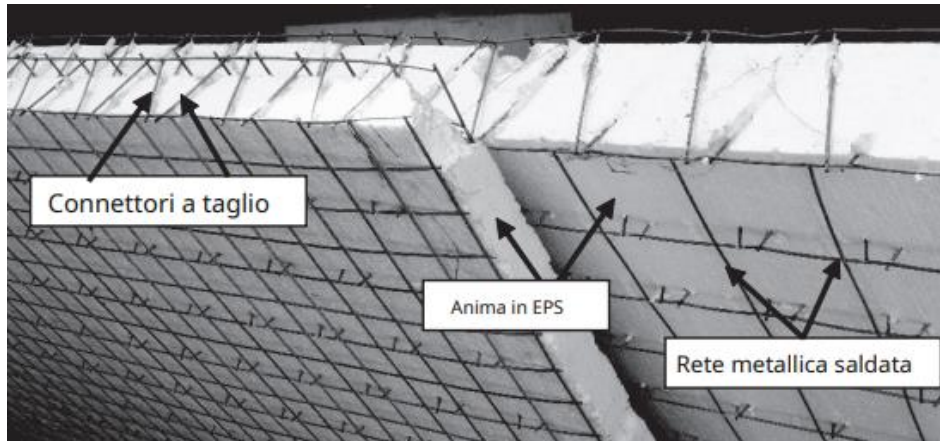
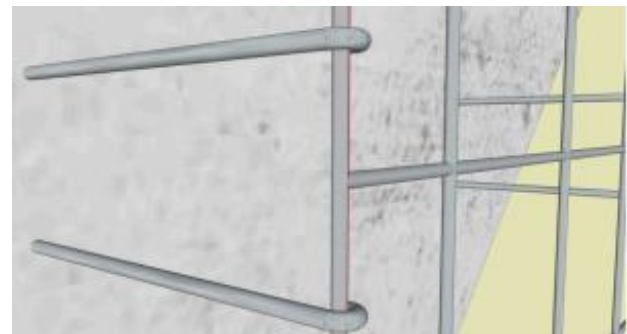


Figura 5 - Connettori a traliccio

Recentemente da diversi studi e test sperimentali si è visto che è possibile sostituire i tipici connettori saldati con quelli piegati senza compromettere le prestazioni strutturali dei pannelli sandwich. Ciò comporta un risparmio sui costi e sul consumo energetico in fase di produzione, rendendo il prodotto più sostenibile. Inoltre permette di essere realizzato da manodopera non qualificata, il che favorisce la diffusione di questa tecnologia anche nei paesi in via di sviluppo.



(a)



(b)

Figura 6 - Connettori saldati (a), Connettori piegati (b)

2.3 Vantaggi legati all'utilizzo dei pannelli sandwich strutturali

Nel mercato edilizio, l'inserimento dei pannelli sandwich ad uso strutturale costituisce una valida alternativa agli altri sistemi costruttivi, vista la costante ricerca di opere che raggiungano gli standard fissati dalle direttive europee per la sostenibilità.

Questa tecnologia costruttiva offre numerosi vantaggi:

- controllo di alta qualità sui materiali;
- riduzione delle fasi di lavoro in cantiere;
- riduzione dei tempi di montaggio dei pannelli;
- leggerezza degli elementi, andando a migliorare il comportamento sismico visto che il sistema di forze sismico è direttamente proporzionale alla massa dell'edificio
- ottima resistenza al fuoco, alle sollecitazioni, all'usura e agli agenti atmosferici (elevata durata nel tempo);
- ottime proprietà acustiche;
- non richiesta manodopera specializzata;
- facile posa in opera dei pannelli, per via della loro leggerezza;
- poca dispersione di calore e risparmio energetico;
- flessibilità di progettazione, a seconda dell'esigenza, possibilità di installare pannelli curvi, inclinati, piani;
- facilità di installazione;
- materiali riciclabili.

In conclusione, i pannelli sandwich consentono una grande versatilità d'uso e ottimizzazione delle fasi costruttive, garantendo prestazioni multiple in fase d'uso e comunque sono caratterizzati da materiali che una volta raggiunto il fine vita della struttura possono essere riutilizzati.



Figura 7 - Esempio di un'abitazione realizzata con pannelli sandwich

3. Inquadramento normativo dei pannelli sandwich

3.1 Inquadramento normativo dei pannelli sandwich

La prima normativa a livello europeo riguardante il calcolo e la realizzazione delle strutture a grandi pannelli è stata emessa nel 1966 dal C.E.B. (Comité Européen du Béton), dal C.I.B. (Conseil International du Bâtiment) e dall'U.E.A.t.c. (European Union of Agrément). Tale legislazione fa riferimento ai sistemi strutturali a pareti portanti in calcestruzzo armato gettato in opera realizzati con la tecnologia del pannello di supporto in polistirene ed in Italia è stata adottata a partire dal 1969.

Altri riferimenti normativi riguardanti tale tecnologia sono la Circolare n°6090 del 1969 e le istruzioni C.N.R. n°10025 del 1984.

Nello scenario europeo la norma UNI EN 1992-1-1 fornisce linee guida generali per la progettazione di strutture in calcestruzzo normale, armato e precompresso, utilizzate con aggregati normali e leggeri, insieme a regole specifiche per gli edifici.

Tuttavia, le pareti realizzate con sistemi sandwich, in cui il materiale isolante è inserito tra due pareti di calcestruzzo prefabbricate o con un elemento di supporto in cui si predispone l'armatura e si getta il calcestruzzo mediante spruzzatura, hanno caratteristiche particolari che richiedono un'applicazione specifica delle regole di progettazione. Queste pareti non sono completamente contemplate nella normativa tecnica vigente NTC2018, DM 17 gennaio 2018. Alcune normative, come le "Linee Guida per sistemi costruttivi a pannelli portanti basati sull'impiego di blocchi cassero e calcestruzzo debolmente armato gettato in opera", pubblicate nel 2011, non sono applicabili a questo tipo di tecnologia costruttiva perché esplicitamente riportate.

In ambito internazionale, la normativa americana ACI 318-14 del 2014 fa riferimento principalmente alle strutture a pareti sandwich prefabbricate, ma può essere esteso anche alle strutture a pareti sandwich in calcestruzzo gettato in opera, adottando il manuale "PCI Design Handbook-Precast and Prestressed Concrete" del 2004 come guida per la progettazione di tali strutture. Dal punto di vista della precompressione e del taglio per le strutture a pareti sandwich in calcestruzzo gettato in opera non esistono delle attuali norme che regolano le prove per lo studio di tale tipo di comportamento.

Solitamente per la caratterizzazione meccanica dei pannelli sandwich esaminati in questo lavoro viene fatto riferimento alla norma UNI EN 1052-1 che tratta i metodi di prova per la muratura al fine della determinazione della resistenza a compressione.

I provini testati in questo elaborato di tesi forniti dalla ditta Emmedue fanno riferimento alla certificazione ETA europea, necessaria ai fini della marcatura CE del pannello. Inizialmente tramite anche il supporto di Eucentre di Pavia, sono state definite le linee guida (EAD) attraverso il quale certificare i sistemi a base di EPS con rete di acciaio, dopodiché prima l'OIB austriaco e poi il Torroja spagnolo hanno certificato il pannello sulla base delle prove realizzate presso Eucentre.OIB e Torroja sono TAB, cioè istituti dell'EOTA che possono rilasciare valutazioni tecniche europee (ETA).

L'ETA è un documento che contiene le prestazioni tecniche del sistema o, meglio, della parete Emmedue, sulla base delle prove effettuate.

Si fa riferimento a tale documento per pareti esterne o interne di edifici costituite da pannelli sandwich con lo strato di polistirene che funge da elemento di supporto, con la predisposizione della rete

elettrosaldata su ambo i lati, connesse tramite connettori. La struttura viene completata in situ mediante l'impiego di acciaio di rinforzo in alcuni punti e dello 'shotcrete', ovvero getto di completamento con lo spritz beton.

Questa tecnologia costruttiva può essere impiegata come parte strutturale di edifici dissipativi in zona sismica. Nell' ETA sono incluse anche le strutture soggette a regolamentazione antincendio.

Le linee guida (EAD) contengono tutte le caratteristiche principali dei pannelli, resistenza alla compressione, resistenza al taglio, ai carichi concentrati, resistenza al fuoco, all'azione sismica e alla corrosione. Vengono anche descritte le caratteristiche principali degli elementi costituenti i pannelli, ovvero rete elettrosaldata, connettori e isolante termico EPS.

3.2 Tecnologia costruttiva

Oggetto di studio di questo elaborato è la tecnologia costruttiva basata sull'utilizzo di pannelli modulari, prefabbricati e armati in cantiere, aventi polistirene come elemento di supporto per i successivi getti di betoncino strutturale.

I campioni forniti dalla ditta Emmedue sono costituiti da pannelli modulari di EPS, aventi una larghezza fissa di 120 cm e spessore di 13,7 cm, e altezza di 300 cm o 374 cm. La lastra di polistirene adottata presenta un andamento ondulato come si può osservare dalla seguente figura:

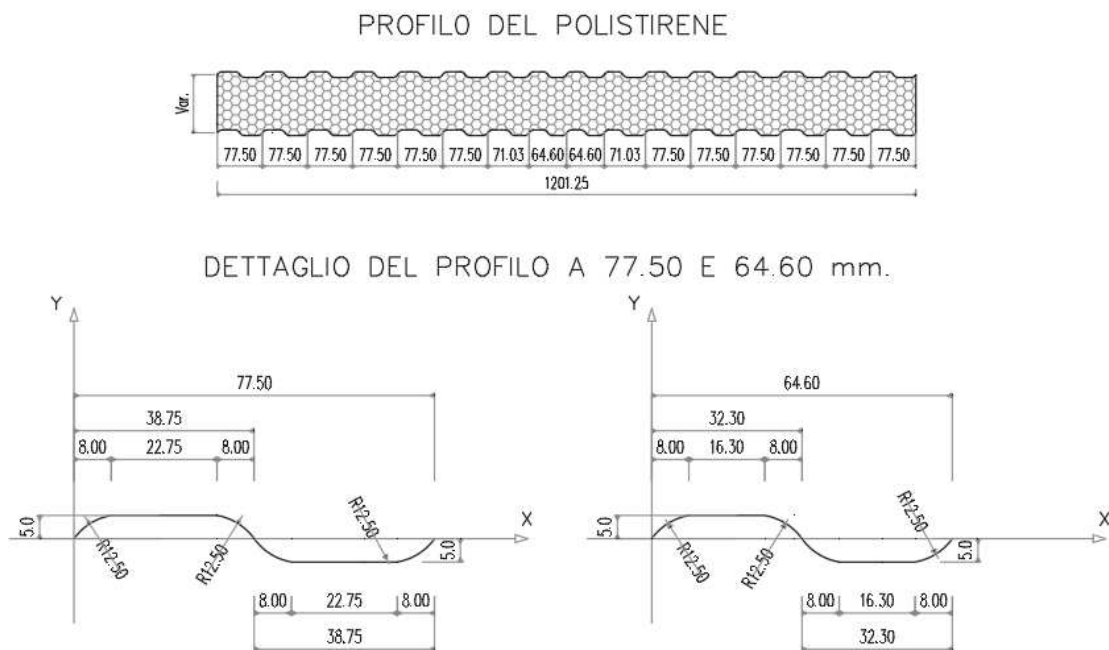


Figura 8 - Profilo ondulato del polistirene

In corrispondenza dei lati esterni del pannello di EPS sono state posizionate due reti elettrosaldate in acciaio zincato, con diametro di 2,5 mm, connesse tramite dei connettori metallici, con diametro pari a 3 mm, posizionati perpendicolarmente alle reti, conferendo al pannello un comportamento semicomposito. Questi connettori vengono introdotti all'interno della lastra di polistirene in fase di produzione. Successivamente per la realizzazione delle cortine esterne, aventi spessore medio di 3,5 cm, viene spruzzato lo spritz beton strutturale. Quest'ultimo deve essere applicato mediante apposite intonacatrici EMMEDUE o pompe a flusso continuo. La lavorabilità della miscela fresca e la pressione con cui viene spruzzata, sono importanti per ottenere la necessaria compattezza; in particolare la miscela di cemento e sabbia a maturazione avvenuta dovrà avere una resistenza caratteristica di almeno 25 MPa.

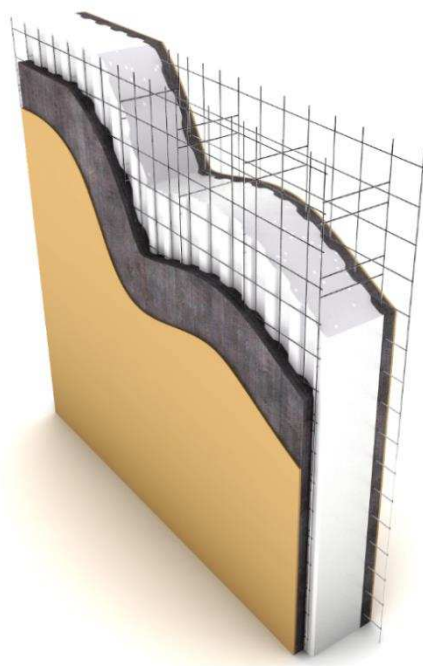


Figura 9 - Composizione del pannello sandwich

3.3 Fasi di cantierizzazione

In cantiere, per la corretta posa in opera dei pannelli, dovrà essere garantito un adeguato ancoraggio alla fondazione attraverso la predisposizione di ferri di ripresa (indicativamente ferri Ø 6-8 mm ogni 30-40 cm per una lunghezza fuori trave di almeno 40 cm).



Figura 10 - Ancoraggio alla fondazione

Altra fase importante è quella dello stoccaggio in cantiere dei pannelli, per il quale bisogna predisporre un'apposita area. È bene non adagiare i pannelli a diretto contatto con il terreno per evitare problemi di aderenza dell'intonaco e, per scongiurare l'alterazione superficiale dello strato di polistirene i pannelli non dovrebbero essere esposti al sole per periodi prolungati.

Il montaggio dei pannelli avviene collegando la rete metallica ai ferri di ripresa delle fondazioni, mediante legature con fil di ferro.

Per garantire continuità tra gli elementi i pannelli Emmedue sono dotati, da entrambi i lati, di una rete di sormonta che permette di unire le reti di due pannelli adiacenti. Il serraggio tra un pannello l'altro può essere effettuato mediante legature manuali o con l'utilizzo di macchine pneumatiche.

È fondamentale, durante il montaggio, assicurarsi di trovarsi sempre in condizioni di planarità delle pareti e la verticalità degli spigoli mediante l'utilizzo di un livello o del filo a piombo.

Per garantire la planarità si può far ricorso a dei profili scatolari in alluminio e puntelli diagonali regolabili da ancorare saldamente a terra. Nello specifico è sufficiente un solo scatolare da posizionare sulla sommità dei pannelli e, per quanto riguarda i puntelli inclinati è sufficiente posizionarne uno ogni 3 m circa. È consigliabile disporre i puntelli diagonali su un unico lato in modo da liberare completamente l'altro e poter procedere più rapidamente; dopo l'applicazione dello spritz beton nella parte libera si procederà poi alla rimozione dei puntelli e all'applicazione di spritz beton sull'altro lato.



Figura 11 - Disposizione dei puntelli diagonali per la posa in opera dei pannelli

Tutti gli angoli esterni ed interni della costruzione, sia verticali che orizzontali verranno rinforzati con delle reti angolari per garantire la continuità strutturale. Lungo il perimetro delle aperture di porte e finestre verranno disposte reti di rinforzo ad U o doppie reti angolari a chiusura del pannello.

Per l'applicazione dei telai, è necessario asportare il polistirene in corrispondenza dei relativi punti di fissaggio, al fine di consentire il corretto inserimento delle "zanche" metalliche all'interno delle reti del pannello

Di particolare importanza è l'installazione degli impianti. Le tracce per il passaggio degli impianti vengono ricavate direttamente nel polistirene usando un getto di aria calda, facendo attenzione a non ridurre eccessivamente lo spessore dell'isolante, nel caso in cui non fosse possibile si provvederà realizzando dei cassonetti. Se i tagli effettuati in corrispondenza delle reti sono maggiori rispetto agli standard, prima del getto dello spritz beton è necessario ripristinare i tagli con reti di rinforzo.



Figura 12 - Installazione degli impianti

Una volta installati gli impianti viene spruzzato, tramite intonacatrice, uno strato di spritz beton per spessori non superiori a cm 2,5 per volta. Trascorso il tempo necessario ai fini della presa del primo strato, si procede con l'applicazione del secondo strato a completamento dello spessore.

L'impiego dell'intonacatrice per l'applicazione dello spritz beton ne aumenta la compattezza e l'omogeneità riducendo il livello di ritiro e migliorandone le prestazioni strutturali, l'impermeabilità e la resistenza all'usura.

Una volta maturato lo spritz beton si procede con l'applicazione di uno strato di finitura.



Figura 13 - Getto di completamento dello spritz beton

4.Materiali e metodi prova

4.1 Descrizione dei provini

L'indagine sperimentale condotta in questo elaborato prevede la caratterizzazione meccanica di pannelli sandwich in c.a. gettato in opera quando vengono sottoposti a compressione eccentrica.

La campagna ha come scopo quello di valutare l'efficacia di questo sistema costruttivo per poter poi essere impiegato per elementi strutturali portanti di edifici di nuova costruzione. L'interesse della ricerca è volto a valutare quali parametri influenzano maggiormente il carico ultimo di rottura e osservare le varie modalità di rottura.

I pannelli sottoposti alla prova sono nove, divisi in tre gruppi: i primo e secondo gruppo differiscono tra loro per il diverso numero di connettori, mentre il terzo gruppo differisce dagli altri per la sua altezza.

Nei pannelli oggetto di studio le cortine di calcestruzzo sono armate con reti elettrosaldate connesse tra loro mediante connettori posizionati perpendicolarmente alle reti esterne garantendo così un comportamento semicomposito.

La configurazione della prova adottata per testare i provini a compressione eccentrica è stata di base sempre la stessa, tranne in alcuni casi dove sono stati fatti degli accorgimenti in base alle specifiche dei pannelli. Nel caso dei provini denominati B1 e D1 all'estremità inferiore non sono stati adottati i profili in acciaio in corrispondenza del cordolo. Per tutti i pannelli dell'ultima serie testata è stata leggermente modificata la configurazione della prova: per prima cosa è stato adattato il telaio di supporto alle dimensioni dei provini, che hanno altezza di 3,74m, andando a posizionare più in alto la trave superiore ed i martinetti idraulici, che poi andranno ad esercitare il carico sul provino; successivamente, prima di raggiungere il carico massimo di rottura, sono stati rimossi i trasduttori, in corrispondenza del valore del carico applicato circa pari a 450kN per D2 e 550kN per D3, per impedire che questi venissero danneggiati a causa della rottura del pannello.

4.2 Prove di compressione eccentrica

Tramite le prove di compressione eccentrica si andranno a valutare i parametri che svolgeranno un ruolo significativo durante l'applicazione del carico eccentrico. Il carico, quindi, non viene applicato in corrispondenza dell'asse del pannello ma con una certa eccentricità, facendo in modo che il pannello lavori a presso-flessione. I provini analizzati sono alti 3 m (serie B e C) e 3,74 m (serie D) e per ogni provino si andrà a valutare il valore della forza di compressione eccentrica in corrispondenza della rottura del pannello, carico massimo di rottura, e le conseguenti deformazioni e modalità di rottura.

Nello specifico, la prova di compressione eccentrica effettuata sui provini è stata condotta applicando il carico a 4 cm dall'esterno della cortina in c.a.

4.2.1 Normativa

Per la valutazione dei parametri oggetti di studio in questa tesi, si fa riferimento alla norma UNI EN 1052-1, nella quale sono indicate le formule per il calcolo di essi.

La tensione di compressione eccentrica σ_c [MPa] viene espressa con la seguente formula:

$$\sigma_c = \frac{N}{A_n} + \frac{M}{W} \quad (1)$$

In cui:

A_n = area netta della sezione orizzontale del pannello;

N = sforzo normale applicato;

M = momento flettente;

W = modulo di resistenza.

Le deformazioni ε [mm/mm] sono calcolate come illustrato di seguito:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

dove:

Δl = variazione di lunghezza;

l_0 = lunghezza iniziale.

Inoltre, sono stati calcolati il modulo secante E_{sec} [MPa] ed il modulo elastico tangente E_{tg} [MPa]:

$$E_{sec} = \frac{\sigma_{e\ max}}{\varepsilon_{max}} \quad (3)$$

$$E_{tg} = \frac{\sigma_{emax}/3}{\varepsilon_{max}} \quad (4)$$

dove:

$\sigma_{e\ max}$ = tensione di compressione eccentrica elastica;

ε_{max} = deformazione massima elastica

4.2.2 Specifiche degli elementi testati

TIPOLOGIA PANNELLI	SPESSORE PARETE FINITA (cm)	PANNELLO ISOLANTE EPS		NUMERO CONNETTORI per mq	GEOMETRIA PARETE		PROVE	
		CODICE	SPESSORE(cm)		LARGHEZZA (cm)	ALTEZZA (cm)	TIPO	NUMERO PROVINI
B	21	PSM140	13,7	44	120	300	ECCENTRICA	3
C	21	PSM140	13,7	33	120	300	ECCENTRICA	3
D	21	PSM140	13,7	66	120	374	ECCENTRICA	3

Tabella 1 - Tabella riassuntiva delle specifiche di pannelli testati

L'indagine sperimentale effettuata nel Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture del dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura (DICEA), per la caratterizzazione meccanica dei pannelli sandwich in c.a., è stata svolta su tre tipologie di provini, che variavano tra di loro per il diverso numero di connettori e diverse altezze.

I provini sono di forma rettangolare aventi le seguenti dimensioni: larghezza pari a 120 cm e altezza di 300 cm per i provini appartenenti ai primi due gruppi, mentre i provini del terzo gruppo hanno stessa larghezza ma altezza pari a 374 cm. In corrispondenza dell'estremità inferiore e superiore sono presenti dei cordoli, alti 10 cm estesi per tutta la lunghezza del pannello, realizzati con lo stesso getto delle cortine esterne, in modo da non creare discontinuità dovute alle riprese di getto.

Per l'identificazione dei tre gruppi di pannelli sono state utilizzate tre lettere: B,C,D. Poi visto che ogni gruppo è composto da tre pannelli, ad ognuno di essi è stato assegnato un numero che va da uno a tre.

I provini B1 e D1 sono sprovvisti dei profilati metallici HEA nella zona inferiore, i quali sono state impiegati per tutti gli altri campioni.

Per tutti i pannelli della serie D è stata modificata la configurazione della prova, andando per prima cosa ad adattare il telaio di supporto alle dimensioni dei provini, che hanno altezza di 3,74 m, poi prima di raggiungere il carico massimo di rottura sono stati rimossi i trasduttori, in corrispondenza del valore del carico applicato circa pari a 450kN per D2 e 550kN per D3.

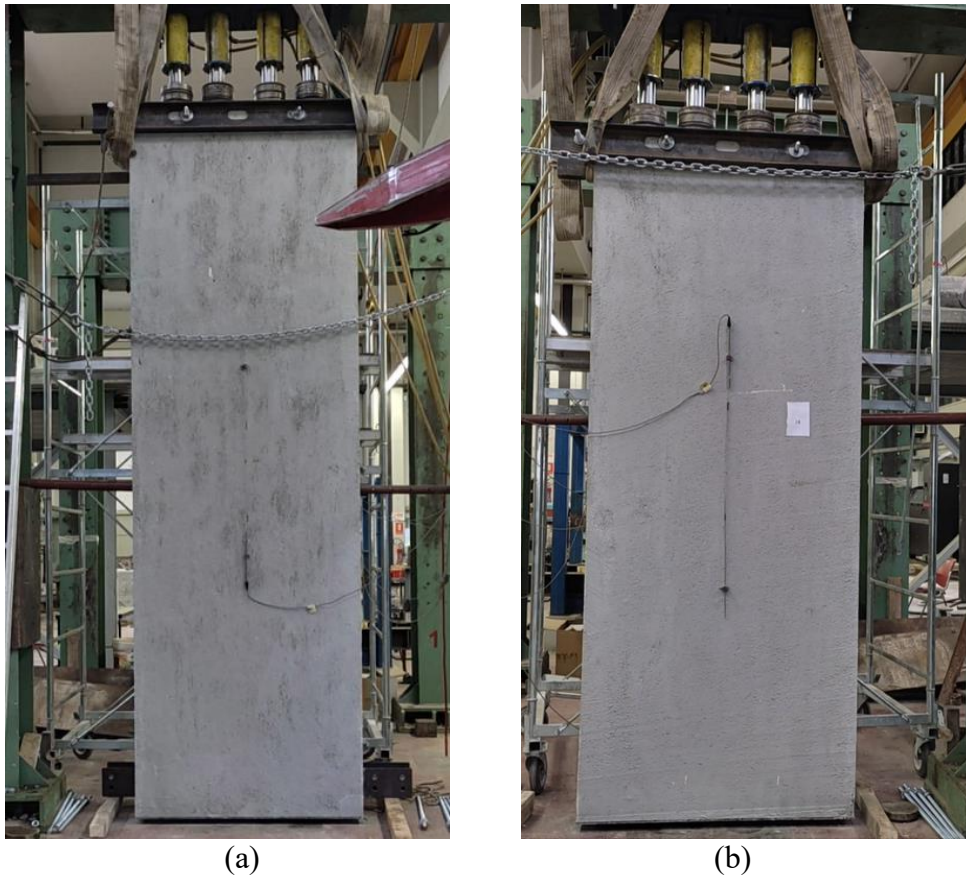


Figura 14 - Provine sprovvisti di profilati metallici HEA, pannello D1(a), pannello B1(b)

Di seguito sono elencate le caratteristiche costruttive comuni dei tre pannelli della stessa serie:

- Pannello sandwich di tipo B 120 cm x 300 cm: costituito da un foglio di polistirene di spessore 13,7 cm avente un profilo ondulato di densità di circa $15-25 \text{ kg/m}^3$, le pareti esterne sono state realizzate in betoncino strutturale spruzzato e liscio per uno spessore di 3,5 cm per lato. Precisamente è stato impiegato l'RR 32 della società Bortolo, composto da sabbie classificate, fibre anti-ritiro ed additivi per migliorare la lavorazione e l'adesione. I pannelli di parete sono stati completati semplicemente spruzzando calcestruzzo sulle superfici esterne del foglio, prima fino alla rete metallica e poi fino allo spessore finale dello strato di calcestruzzo, utilizzando strumenti manuali o pompe. Le reti elettrosaldate zincate hanno un diametro di 2,5 mm e sono costituite da maglie di dimensioni 70/77,5 mm in direzione longitudinale e 70/75 mm in direzione trasversale. Le reti sono connesse tra loro tramite connettori d'acciaio saldati di diametro pari a 3 mm disposti perpendicolarmente alle reti, per un numero totale di connettori pari a 44 per m^2 ;
- Pannello sandwich di tipo C 120 cm x 300 cm: costituito da un foglio di polistirene di spessore 13,7 cm avente un profilo ondulato di densità di circa $15-25 \text{ kg/m}^3$, le pareti esterne sono state realizzate in betoncino strutturale spruzzato e liscio per uno spessore di 3,5 cm per lato. I pannelli di parete sono stati completati semplicemente spruzzando calcestruzzo sulle superfici esterne del foglio, prima fino alla rete metallica e poi fino allo spessore finale dello strato di calcestruzzo, utilizzando strumenti manuali o pompe. Precisamente è stato impiegato l'RR 32

della società Bortolo, composto da sabbie classificate, fibre anti-ritiro ed additivi per migliorare la lavorazione e l'adesione. Le reti elettrosaldate zincate hanno un diametro di 2,5 mm e sono costituite da maglie di dimensioni 70/77,5 mm in direzione longitudinale e 70/75 mm in direzione trasversale. Le reti sono connesse tra loro tramite connettori d'acciaio saldati di diametro pari a 3 mm disposti perpendicolarmente alle reti, per un numero totale di connettori pari a 33 per m²;

- Pannello sandwich di tipo D 120 cm x 374 cm: costituito da un foglio di polistirene di spessore 13,7 cm avente un profilo ondulato di densità di circa 15-25 kg/m³, le pareti esterne sono state realizzate in betoncino strutturale spruzzato e liscio per uno spessore di 3,5 cm per lato. I pannelli di parete sono stati completati semplicemente spruzzando calcestruzzo sulle superfici esterne del foglio, prima fino alla rete metallica e poi fino allo spessore finale dello strato di calcestruzzo, utilizzando strumenti manuali o pompe. Precisamente è stato impiegato l'RR 32 della società Bortolo, composto da sabbie classificate, fibre anti-ritiro ed additivi per migliorare la lavorazione e l'adesione. Le reti elettrosaldate zincate hanno un diametro di 2,5 mm e sono costituite da maglie di dimensioni 70/77,5 mm in direzione longitudinale e 70/75 mm in direzione trasversale. Le reti sono connesse tra loro tramite connettori d'acciaio saldati di diametro pari a 3 mm disposti perpendicolarmente alle reti, per un numero totale di connettori pari a 66 per m².

Dalle figure seguenti si possono osservare le specifiche dei pannelli descritti:

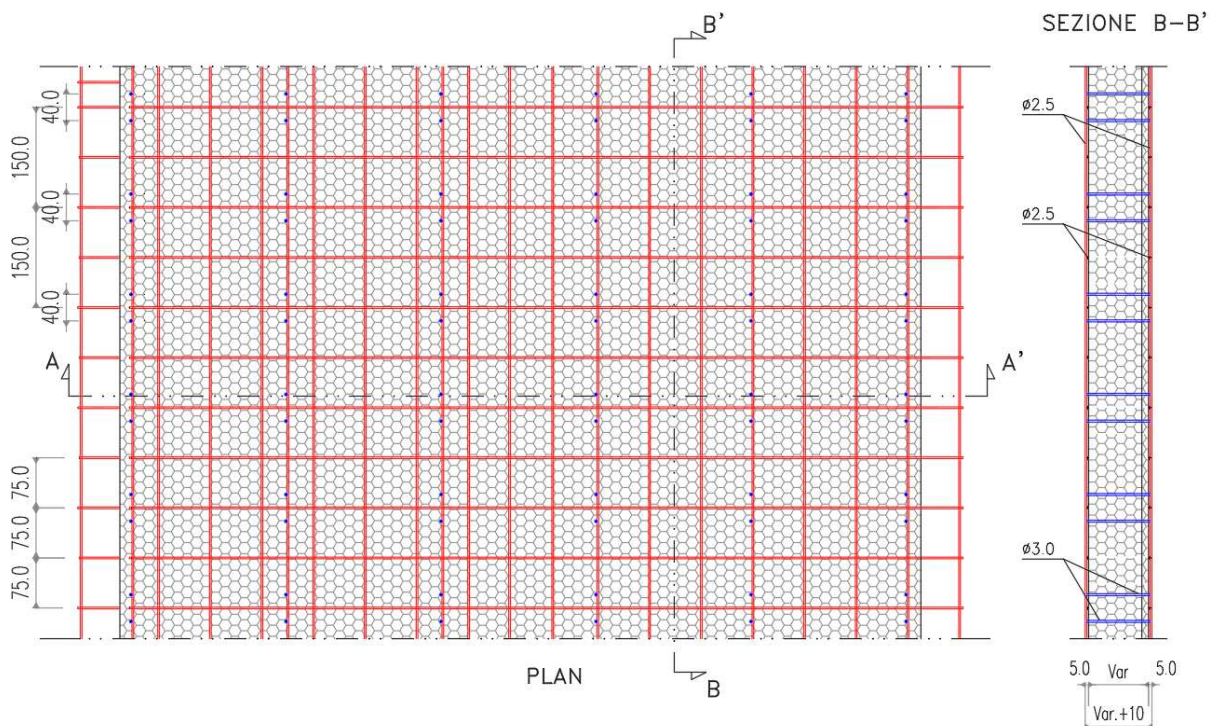


Figura 15 - Planimetria e sezione della disposizione delle reti metalliche e connettori

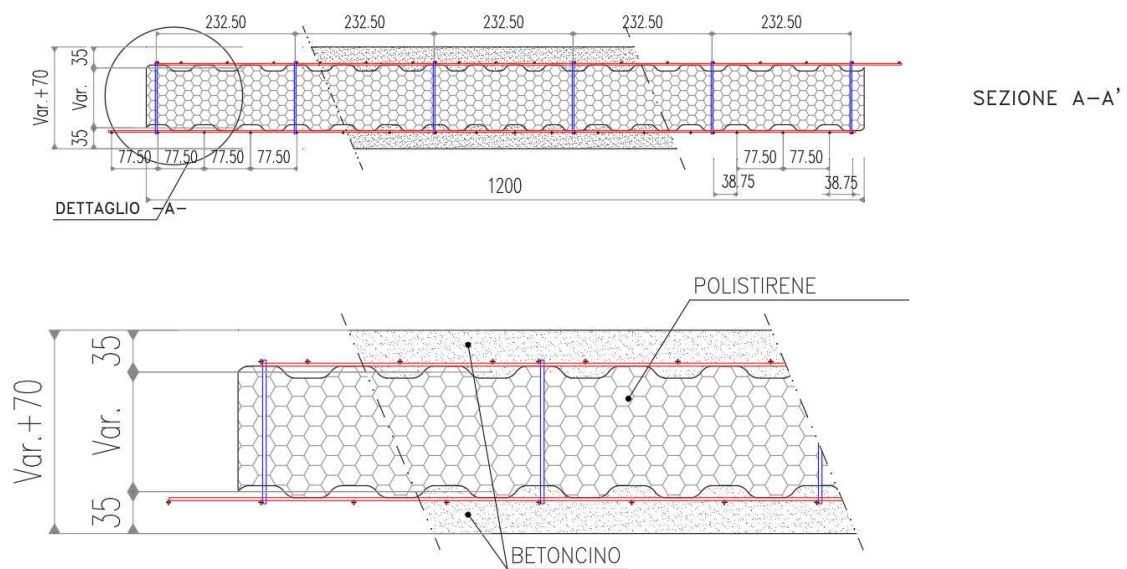


Figura 16 - Rappresentazione della disposizione dell'armatura, dei connettori, e del profilo ondulato della lastra di polistirene

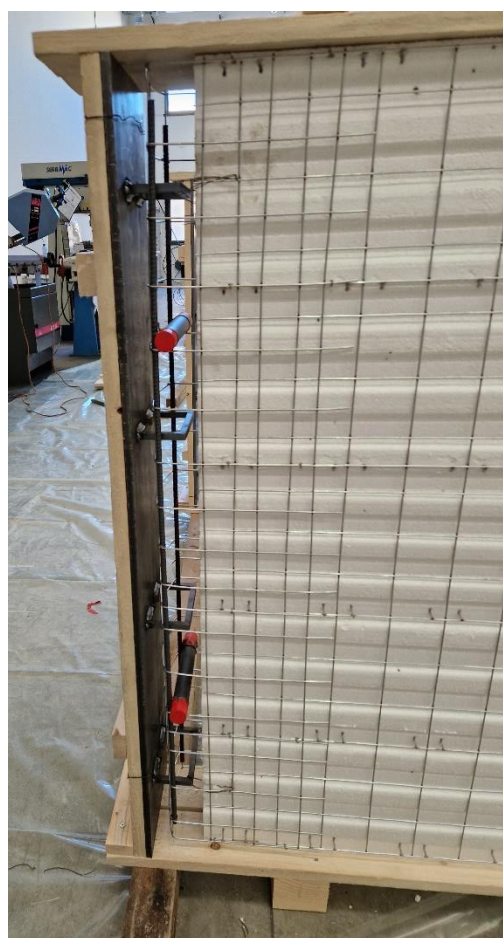


Figura 17 - Armatura dei cordoli

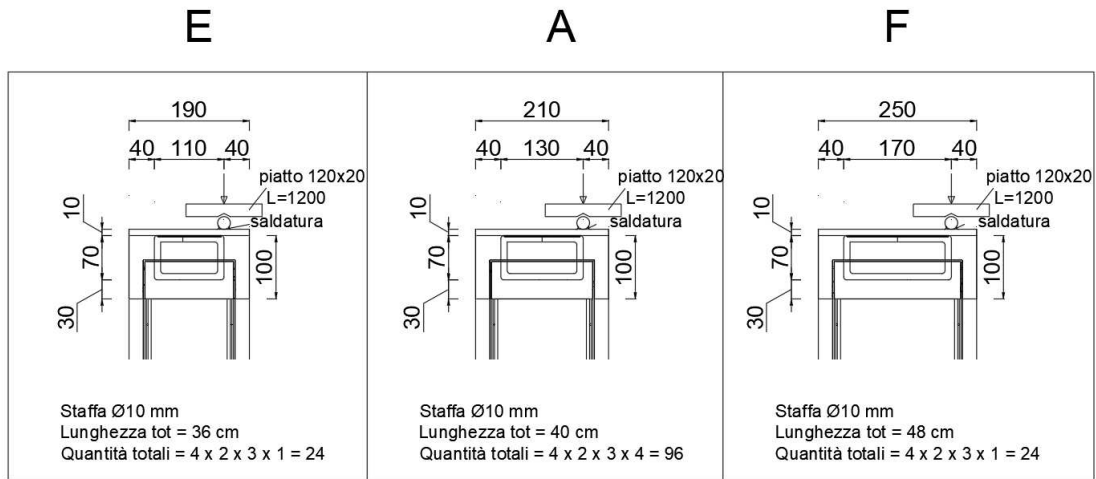


Figura 18 - Particolare attacco cordoli con tondino e piastra saldati

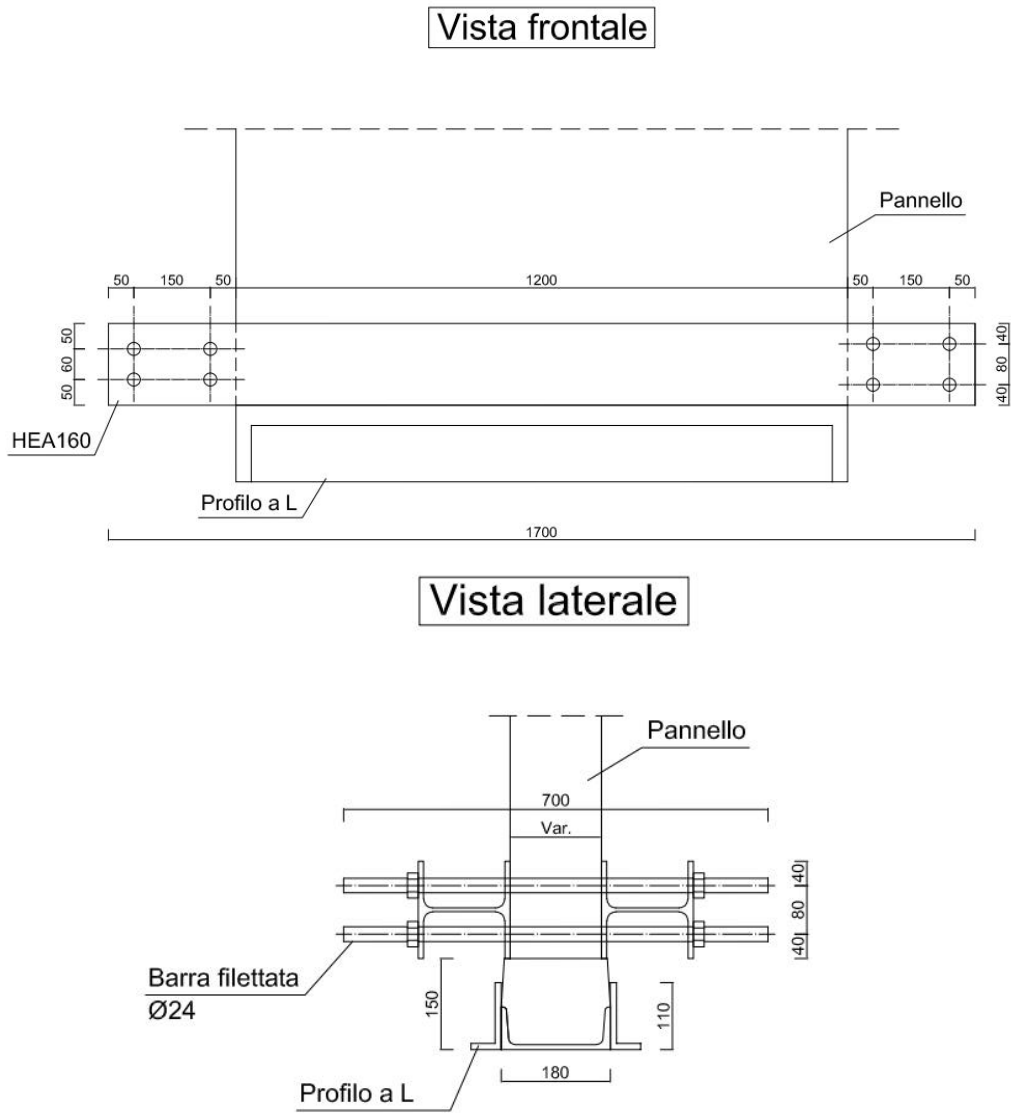


Figura 19 - Profilati metallici HEA impiegati in corrispondenza del cordolo inferiore

4.2.3 Strumentazione e modalità di esecuzione della prova

La strumentazione necessaria per la caratterizzazione meccanica dei pannelli sandwich in c.a. consiste nell' utilizzo di:

- quattro martinetti idraulici da 500 kN ciascuno, fissati al telaio di supporto. I martinetti idraulici vengono gestiti con una centralina idraulica dotata di un trasduttore di pressione per misurare il carico applicato. Il funzionamento dei martinetti idraulici avviene applicando una pressione sul fluido all'interno dei martinetti che causa l'innalzamento dei pistoni per l'applicazione del carico. Tra pannello e martinetti vengono interposti dei dischi metallici e una piastra in acciaio per distribuire uniformemente il carico illustrato nella Figura 20 (a);
- profili metallici per confinare i cordoli in c.a. alle estremità superiore dei pannelli;
- cinque trasduttori di spostamento induttivi (LVDT), operanti in un range di ± 50 mm, impiegati per la misurazione degli spostamenti nel piano e fuori dal piano. Sono stati installati due in posizione verticale, denominati V1 (quello posizionato sulla parte frontale) e V2 (quello posizionato sulla parte retrostante), uno per ciascuna parte del provino, come si può osservare dalla Figura 21, per la misura degli spostamenti nel piano. Tre trasduttori sono stati installati nella parte retrostante, denominati O1 – $3/4h$, O2 – $h/2$ e O3 – $1/4 h$, per la lettura degli spostamenti fuori dal piano, posizionati tramite l'ausilio di basi di supporto, Figura 21;
- piastra alla base saldata, utile per il fissaggio del pannello Figura 20 (b);
- catena posizionata in prossimità dei profili metallici nella parte superiore, per evitare il ribaltamento del pannello durante la prova;
- tubo innocente posizionato nella parte retrostante poco più in alto della metà del pannello, anch'esso impiegato per evitare il ribaltamento del provino durante il test;
- profilati di acciaio HEA che hanno la funzione di confinare il cordolo all'estremità inferiore impiegati per tutti i pannelli ad esclusione di B1 e D1;
- telaio in acciaio che funge da supporto per il corretto posizionamento dei provini durante la prova.

Di seguito sono riportate tutte le immagini necessarie per una chiara comprensione della strumentazione utilizzata nelle prove.



(a)



(b)

Figura 20 - Martinetti che applicano il carico sui dischi, che sono appoggiati sulla piastra (a), collegamento del pannello con la piastra d'acciaio saldata (b)

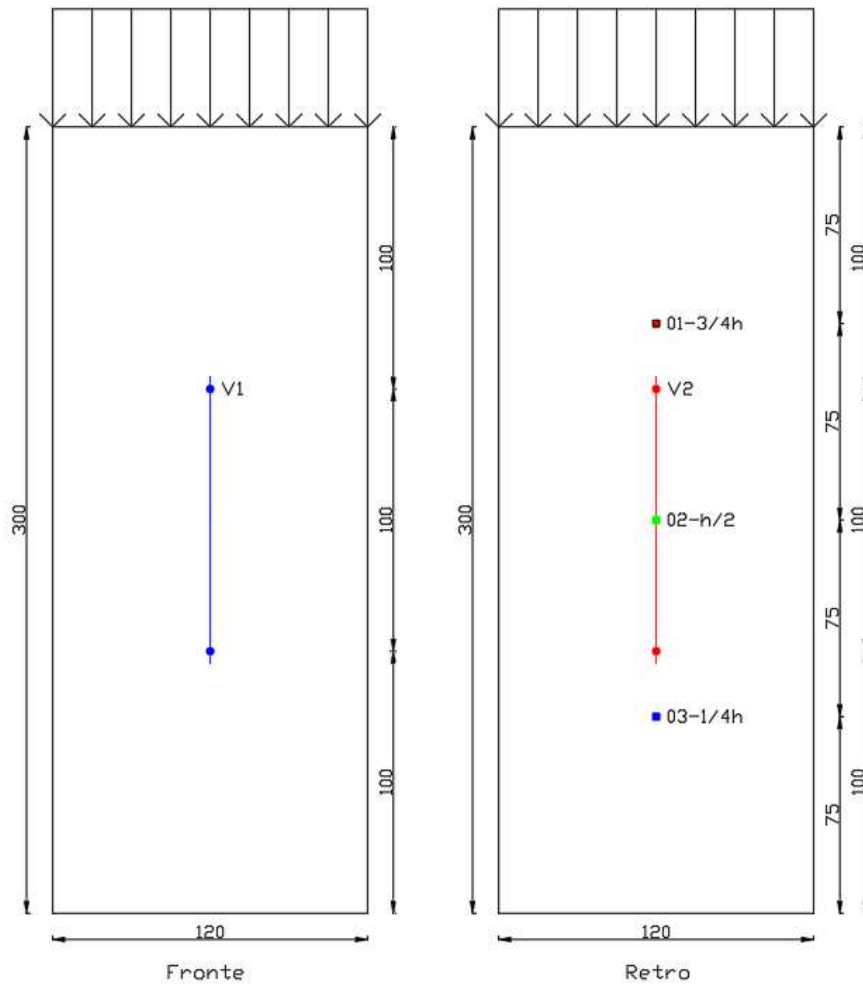


Figura 21 - Collocazione dei trasduttori sulle facce fronte e retro

I pannelli forniti dalla ditta Emmedue srl sono stati disposti verticalmente, con l'aiuto del carroponte, e poggiati sulla piastra in acciaio saldata alla base, al fine di permettere la rotazione del provino. Sono vincolati anche in sommità per evitare spostamenti laterali durante la prova. Tutte le prove sono state condotte applicando il carico a 4 cm dall'esterno della cortina in c.a.

Il setup di prova è simile per tutti i provini, l'unica differenza sta nell'aver adattato il telaio alle dimensioni del pannello, per la serie D 3,74m.

I test a compressione eccentrica condotti per i provini B1 e D1 presentano una configurazione strumentale come quella illustrata:

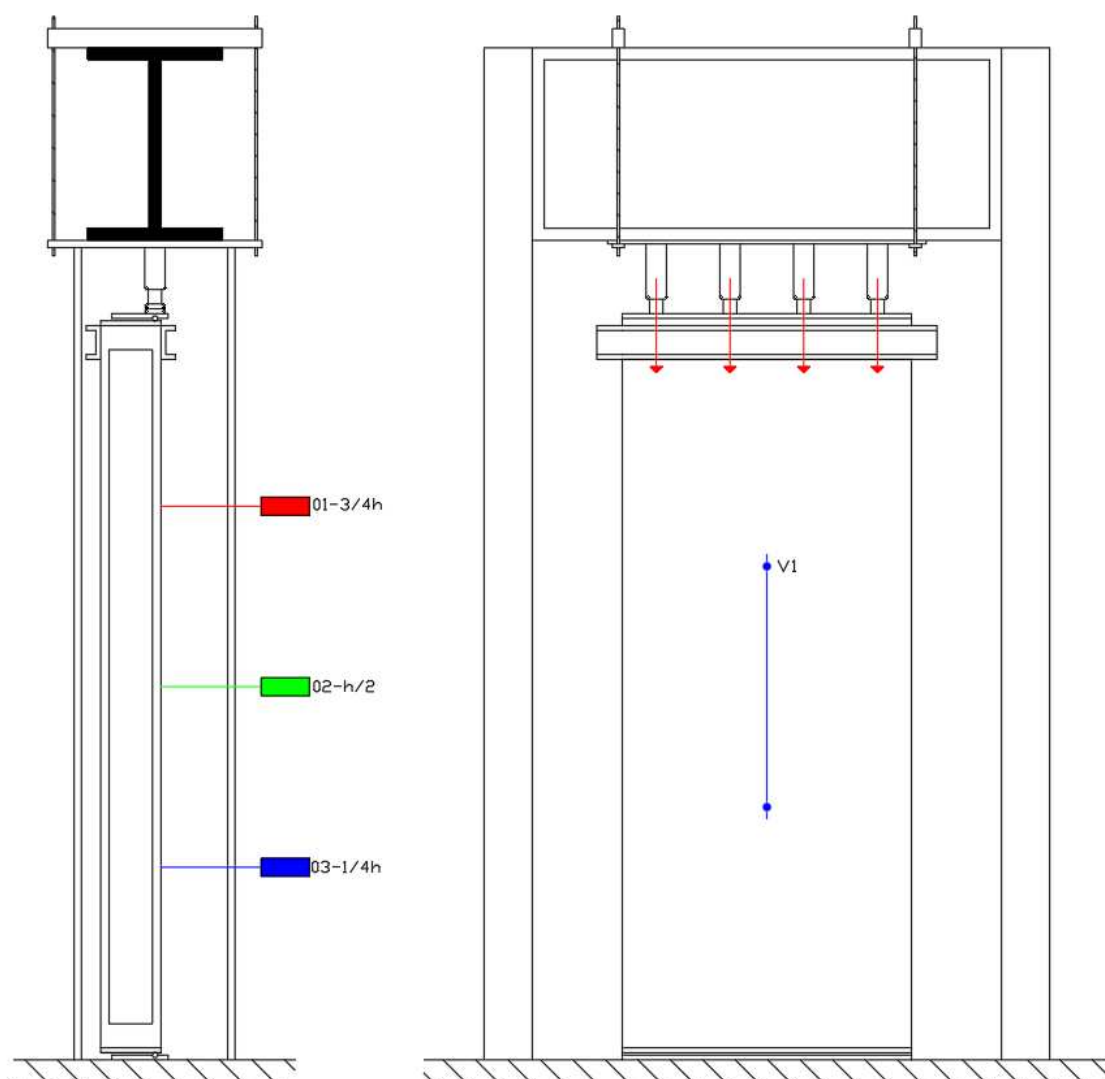


Figura 22 - Prove di compressione eccentrica B1 e D1: configurazione e strumentazione di prova

Per la movimentazione dei pannelli sono state utilizzate delle fasce, fatte girare attorno ai profili metallici posizionati sulla sommità dei pannelli, e agganciate al carro ponte, il quale ci ha permesso di portare i provini il più vicino possibile alla posizione richiesta.

Per verificare la verticalità dei pannelli è stata usata una livella, andando a tentativi fino a quando non fosse in bolla e spostando se necessario i pannelli con un muletto, fino ad ottenere perfetta verticalità.

Di seguito sono riportate delle immagini riguardanti la configurazione di prova.



(a)



(b)



(c)

Figura 23 - Setup della prova frontale (a), setup della prova retro(b), setup della prova in corrispondenza del cordolo superiore (c)

Per i provini B2, B3, D2, D3 e tutta la serie C sono stati utilizzati dei profilati metallici aventi la funzione di confinare il cordolo inferiore come si può vedere dalle seguenti immagini.



Figura 24 - Profilati metallici in corrispondenza del cordolo inferiore

Inoltre, durante lo svolgimento delle prove dei provini C2 e C3, prima di raggiungere il carico massimo di rottura, sono stati rimossi i trasduttori, in corrispondenza del valore del carico applicato circa pari a 450kN per D2 e 550kN per D3, per impedire che questi venissero danneggiati a causa della rottura del pannello. Successivamente la prova è andata avanti continuando ad applicare il carico, sempre tramite i martinetti idraulici, ma alla fine è stato registrato soltanto il valore del carico massimo di rottura e non gli spostamenti, riferiti ai carichi applicati che vanno da 450kN per D2 e 550kN per D3, fino a rottura.

5. Risultati della sperimentazione

5.1 Curve forza-spostamento

La prova di compressione eccentrica effettuata sui provini è stata condotta applicando il carico a 4 cm dall'esterno della cortina in c.a.

Grazie all'utilizzo dei trasduttori, posizionati come descritto precedentemente, è stato possibile ottenere i valori degli spostamenti relativi corrispondenti ai vari carichi applicati.

Di seguito verranno riportate, per le tre serie dei pannelli testati, le tabelle relative al carico massimo e modulo elastico, e i vari diagrammi *Forza-Spostamento* e le curve *Altezza-Spostamento*.

Spessore pannello serie B (mm)	M (kN*mm)	An (mmq)	e (mm)	J sezioni reagenti (mm ⁴)	W (mm ³)	σ_c (Mpa)	ε
210	54855,58	252000	65	926100000	18960000	6,242163	0,001978
210	40398,605	252000	65	926100000	18960000	4,597065	0,001278
210	47933,08	252000	65	926100000	18960000	5,454433	0,001671

Tabella 2 - Tensione di compressione e deformazione dei pannelli della serie B

PANNELLO	P(kN)	E(Mpa)
B1	843,932	3155,7954
B2	621,517	3597,077788
B3	737,432	3264,173246
VALORE MEDIO	734,2936667	3339,015478

Tabella 3 - Carico Massimo di rottura e modulo elastico dei pannelli della serie B

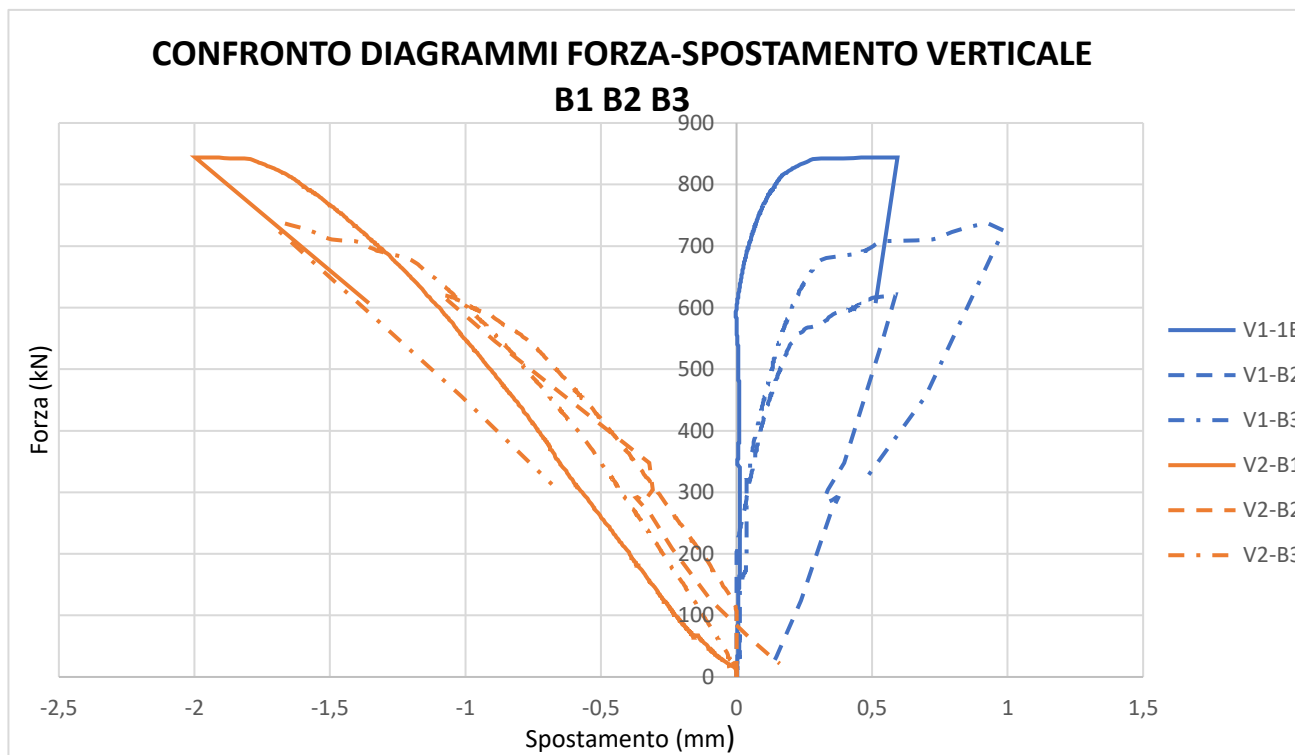


Figura 25 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento verticale B1-B2-B3

Le curve in Figura 25 mostrano un andamento lineare con il crescere del carico. Si nota che la parte frontale dei pannelli è soggetta a trazione (blu), mentre la parte retrostante è soggetta a compressione (rosso), la quale presenta per ogni provino uno spostamento maggiore rispetto alla trazione corrispondente. Inoltre si osserva che, per tutti e tre i provini vi è, in corrispondenza del carico massimo di rottura, un brusco decadimento delle curve, dovuto allo schiacciamento dei cordoli superiori o inferiori; ciò evidenzia un comportamento fragile del pannello. Il pannello B1 si è rotto in corrispondenza di un carico massimo pari a 843,932 kN, il più elevato rispetto agli altri due.

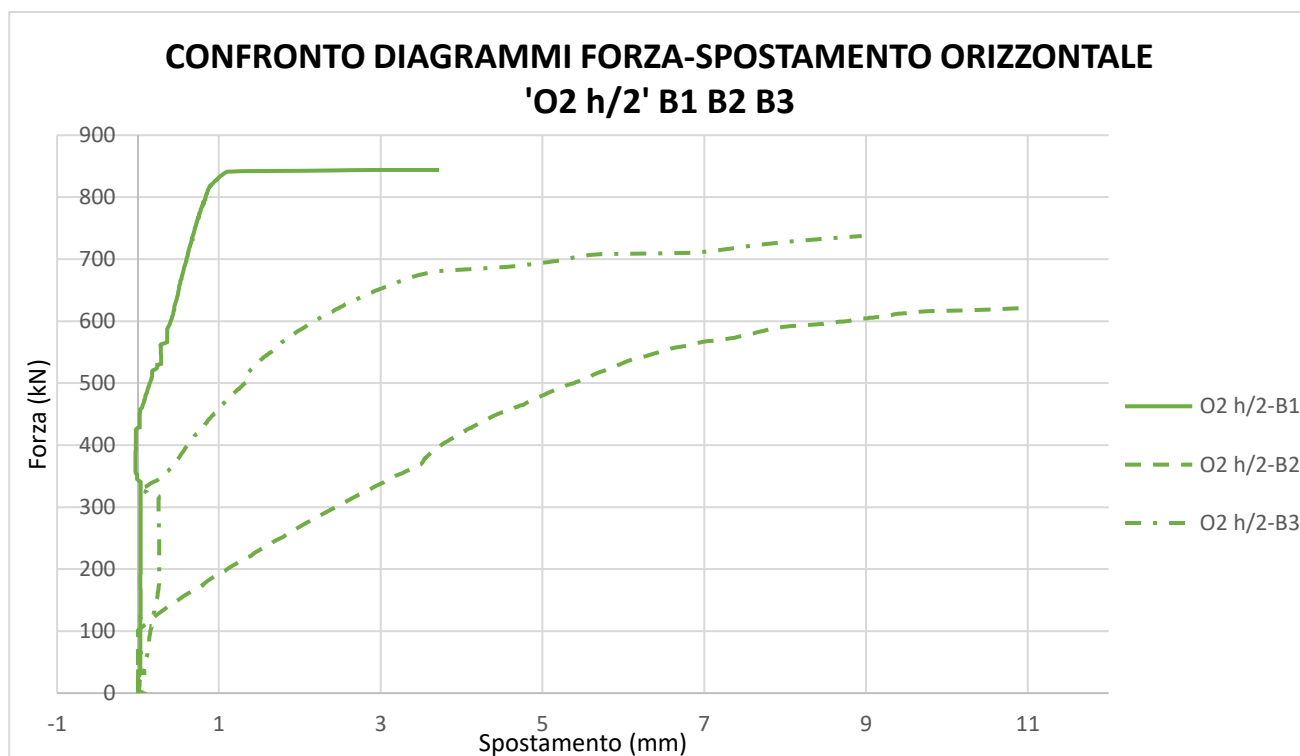


Figura 26 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento orizzontale 'O2 - h/2' B1-B2-B3

Per quanto riguarda il comportamento fuori dal piano dei pannelli si è fatto riferimento al trasduttore posto in corrispondenza di h/2.

Dal grafico si può vedere come tutti e tre i provini presentano tratto iniziale pressoché lineare, con uno spostamento molto piccolo all'aumentare del carico, fino a quando entriamo nel campo della non linearità, attribuibile a delle microfrazioni nel calcestruzzo.

Di seguito verranno mostrate le curve *Altezza-Spostamento*:

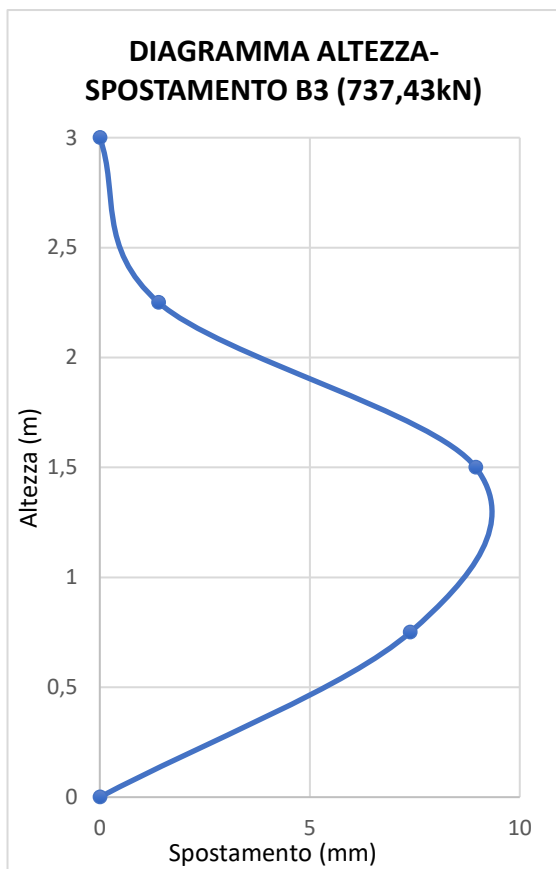
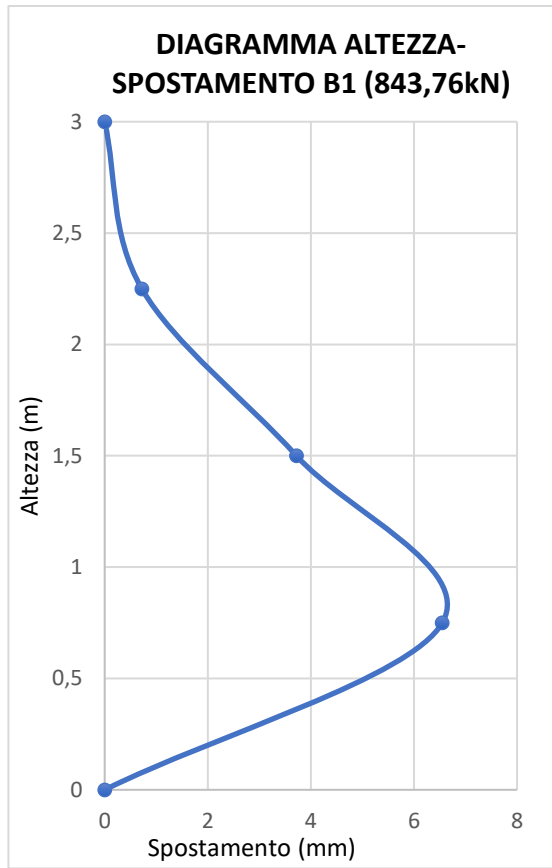
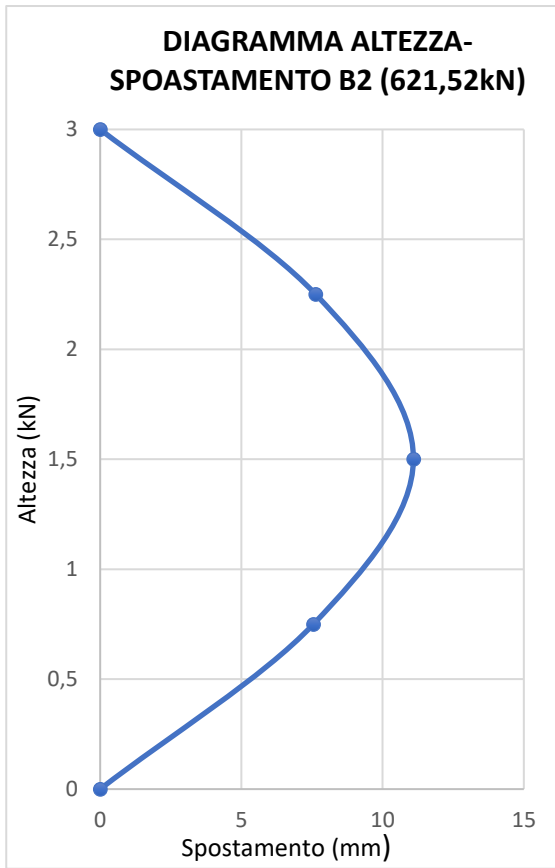


Figura 27 - Curve Altezza-Spostamento B1-B2-B3

Le curve che si possono osservare nella Figura 27 rappresentano gli spostamenti lungo l'altezza della parete del provino in funzione dei carichi massimi, oltre i quali il comportamento dei provini diventa non lineare. I campioni B2 e B3 presentano una maggiore flessione circa a metà dell'altezza; mentre B, quello con carico massimo di rottura maggiore, presenta la massima inflessione al di sotto di h/2 a circa 0,75m.

Spessore pannello serie C (mm)	M (kN*mm)	An (mmq)	e (mm)	J sezioni reagenti (mm^4)	W (mm^3)	σ_c (Mpa)	ϵ
210	43398,225	252000	65	926100000	18960000	4,9384	0,00069
210	42600,48	252000	65	926100000	18960000	4,847623	0,00132
210	40846,65845	252000	65	926100000	18960000	4,648051	0,00192

Tabella 4 - Tensione di compressione e deformazione dei pannelli della serie C

PANNELLO	P(kN)	E(Mpa)
C1	667,665	7157,101744
C2	655,392	3672,441412
C3	628,41013	2420,859695
VALORE MEDIO	650,4890433	4416,800951

Tabella 5 - Carico Massimo di rottura e modulo elastico dei pannelli della serie F

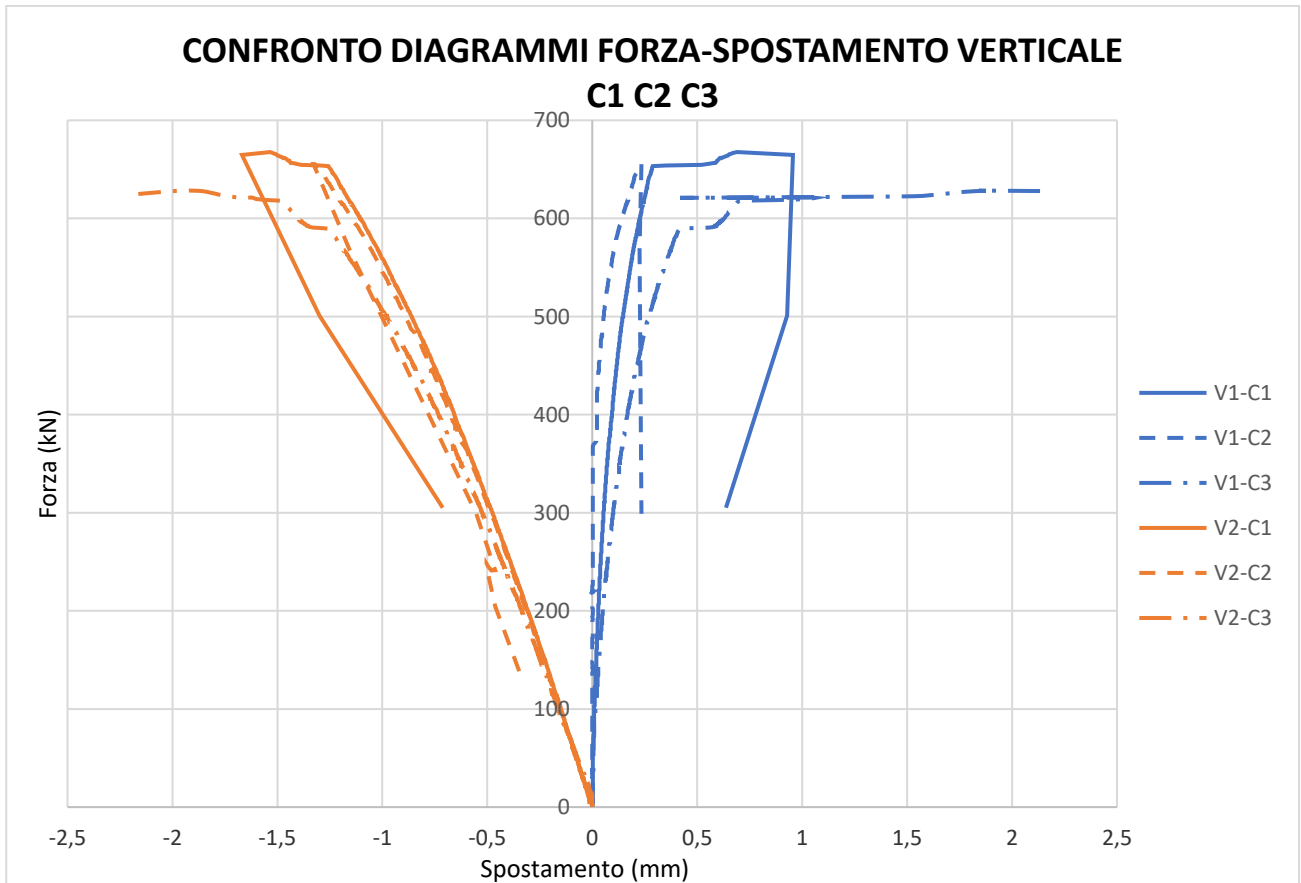


Figura 28 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento verticale C1-C2-C3

Le curve in Figura 28 mostrano un andamento lineare con il crescere del carico. Si nota che la parte frontale dei pannelli è soggetta a trazione (blu), mentre la parte retrostante è soggetta a compressione (rosso), la quale presenta per ogni provino uno spostamento maggiore rispetto alla trazione corrispondente. Inoltre si osserva che, per tutti e tre i provini vi è, in corrispondenza del carico massimo di rottura, un brusco decadimento delle curve, dovuto allo schiacciamento dei cordoli superiori o inferiori; ciò evidenzia un comportamento fragile del pannello. Fatta eccezione per il pannello C3 dove si è verificata una rottura per pressoflessione. Il pannello C1 si è rotto in corrispondenza di un carico massimo pari a 667,665kN, il più elevato rispetto agli altri due.

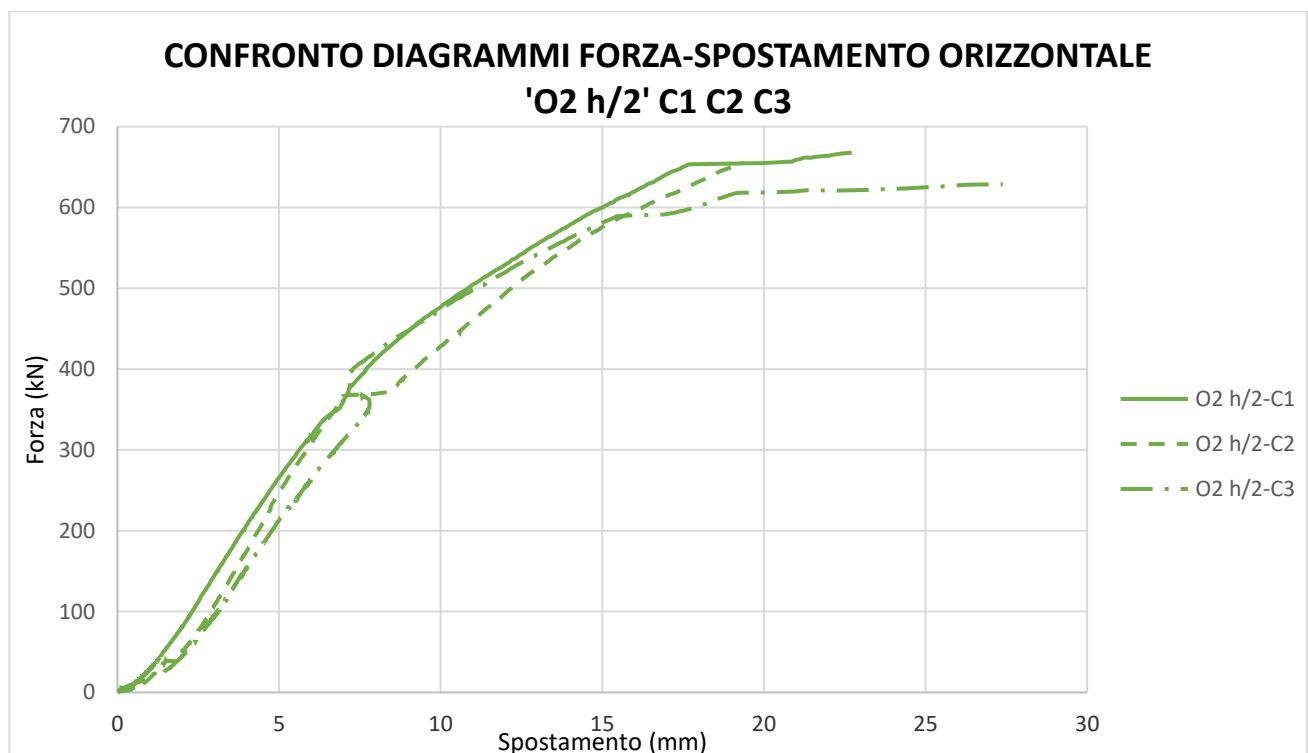


Figura 29 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento orizzontale 'O2 - h/2' C1-C2-C3

Per quanto riguarda il comportamento fuori dal piano dei pannelli si è fatto riferimento al trasduttore centrale posto nella parte retrostante del pannello in corrispondenza di $h/2$.

Dal grafico si può vedere come tutti e tre i provini presentano un primo tratto iniziale pressoché lineare, fino a quando entriamo nel campo della non linearità attribuibili a delle microfessure nel calcestruzzo.

Di seguito verranno mostrate le curve *Altezza-Spostamento*:

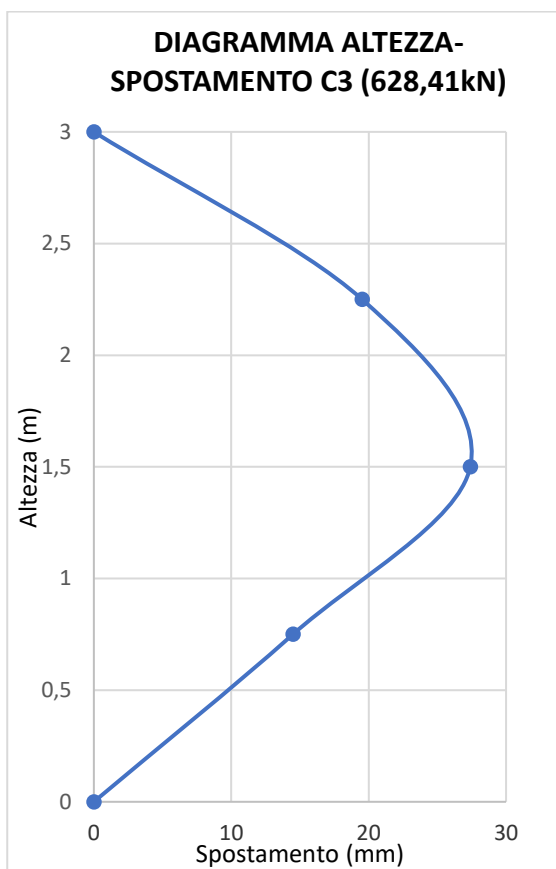
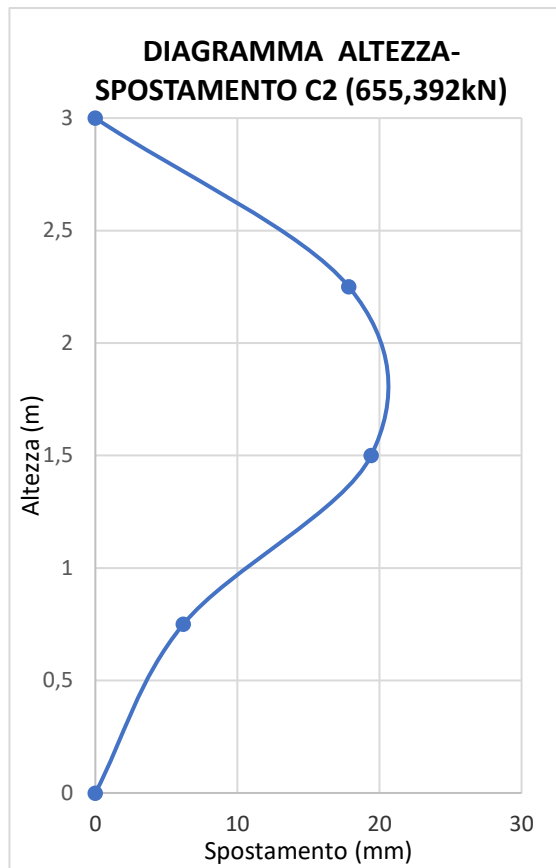
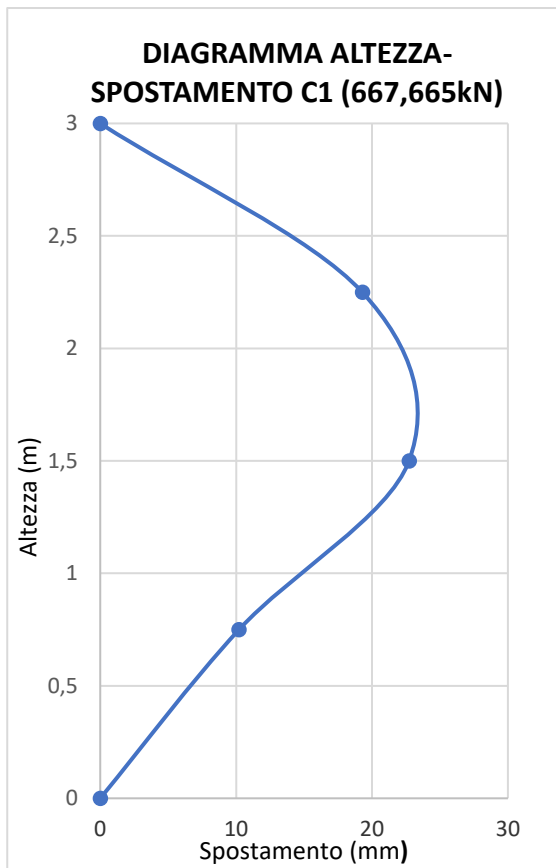


Figura 30 - Curve Altezza-Spostamento C1-C2-C3

Le curve che si possono osservare nella Figura 30 rappresentano gli spostamenti lungo l'altezza della parete del provino in funzione dei carichi massimi, oltre i quali il comportamento dei provini diventa non lineare. Tutti e tre i campioni presentano una maggiore flessione a poco più della metà dell'altezza, a circa 1,75m.

Spessore pannello serie D (mm)	M (kN*mm)	An (mmq)	e (mm)	J sezioni reagenti (mm^4)	W (mm^3)	σ_c (Mpa)	ϵ
210	35372,025	252000	65	926100000	18960000	4,025077	0,00154
210	35945,715	252000	65	926100000	18960000	4,090359	0,00122
210	31875,285	252000	65	926100000	18960000	3,627174	0,00126

Tabella 6 - Tensione di compressione e deformazione dei pannelli della serie D

PANNELLO	P(kN)	E(Mpa)
D1	544,185	2613,686635
D2	553,011	3352,753393
D3	490,389	2878,709534
VALORE MEDIO	529,195	2948,383188

Tabella 7 - Carico Massimo di rottura e modulo elastico dei pannelli della serie D

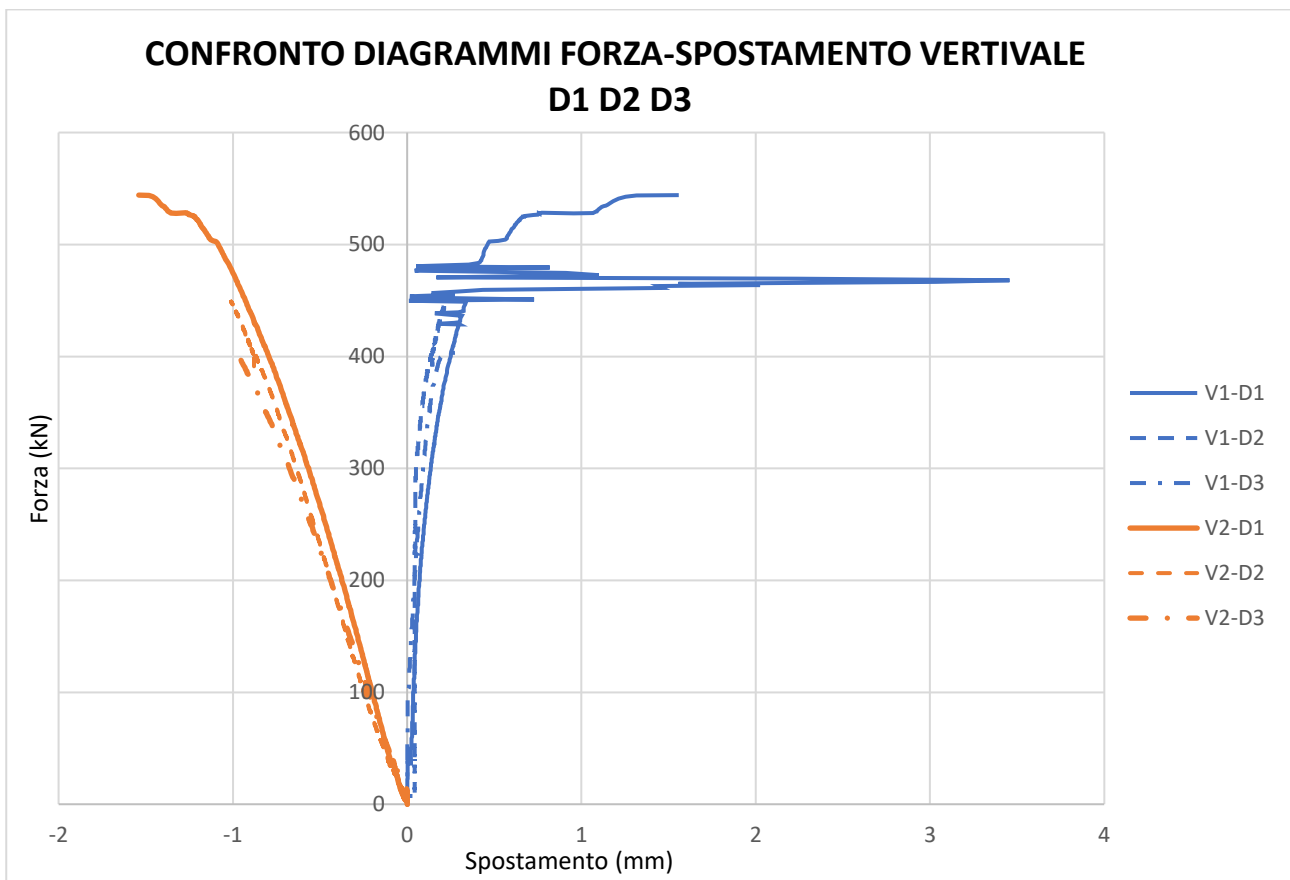


Figura 31 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento verticale D1-D2-D3

Le curve in Figura 31 mostrano un andamento lineare con il crescere del carico. Si nota che la parte frontale dei pannelli è soggetta a trazione (blu), mentre la parte retrostante è soggetta a compressione (rosso), la quale presenta per ogni provino uno spostamento maggiore rispetto alla trazione corrispondente. Inoltre si osserva che, per tutti e tre i provini vi è, in corrispondenza del carico massimo di rottura, un brusco decadimento delle curve, dovuto allo schiacciamento dei cordoli superiori o inferiori; ciò evidenzia un comportamento fragile del pannello. Il pannello D2 si è rotto in corrispondenza di un carico massimo (553,011 kN) più elevato rispetto agli altri due. Si nota che la curva relativa allo spostamento verticale V1 del pannello D1 presenta un comportamento non lineare evidente per valori della forza tra 400kN e 500kN, questo potrebbe essere dovuto al non corretto posizionamento dei trasduttori durante la prova. Inoltre per quanto riguarda i provini D2 e D3 non è riportato il tratto finale della curva perché prima della rottura, a 450kN per D2 e 550kN per D3, i trasduttori sono stati rimossi, di conseguenza al termine della prova è stato rilevato soltanto il valore del carico massimo di rottura ma non gli spostamenti.

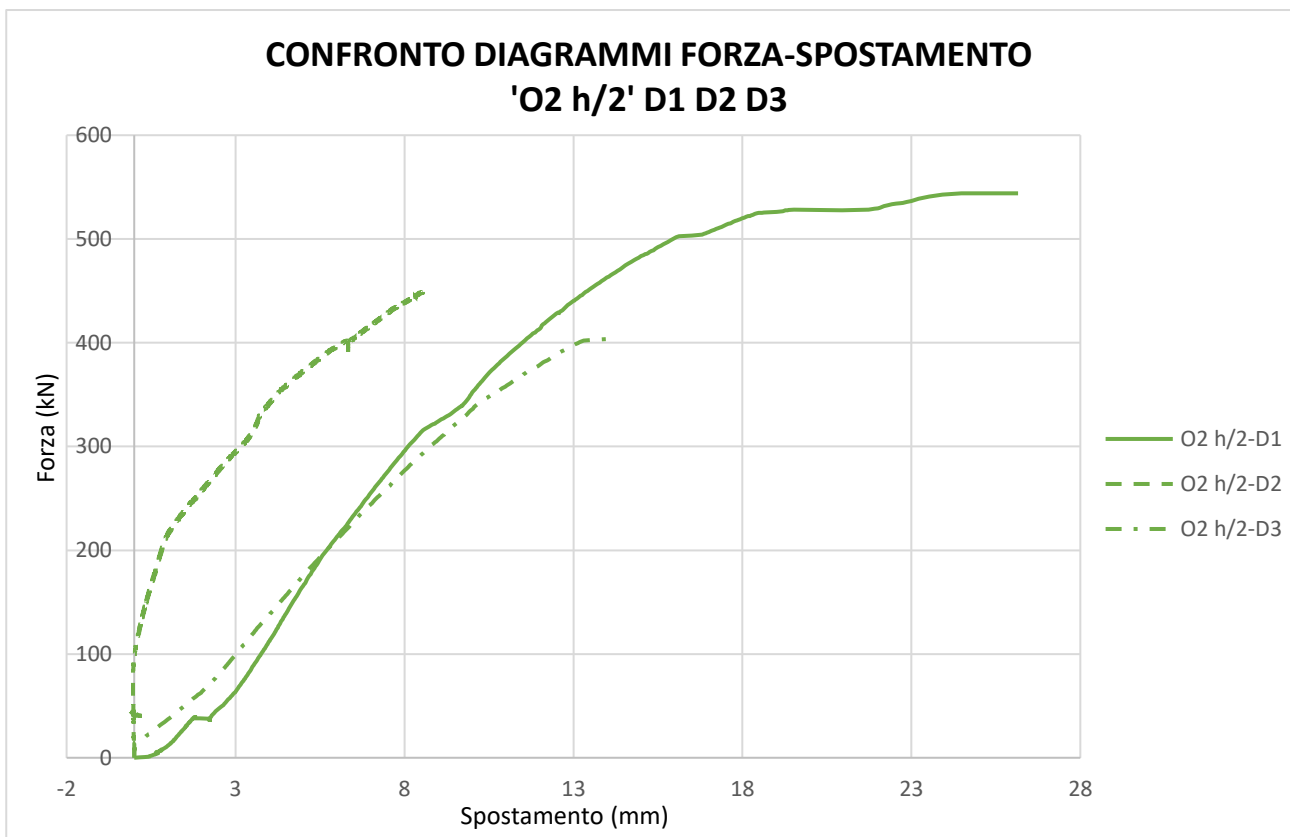


Figura 32 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento orizzontale 'O2 - h/2' D2-D2-D3

Per quanto riguarda il comportamento fuori dal piano dei pannelli si è fatto riferimento al trasduttore centrale posto nella parte retrostante del pannello in corrispondenza di $h/2$.

Dal grafico si può vedere come tutti e tre i provini presentano un primo tratto iniziale pressoché lineare, fino a quando entriamo nel campo della non linearità attribuibili a delle microfessure nel calcestruzzo.

Di seguito verranno mostrate le curve *Altezza-Spostamento*:

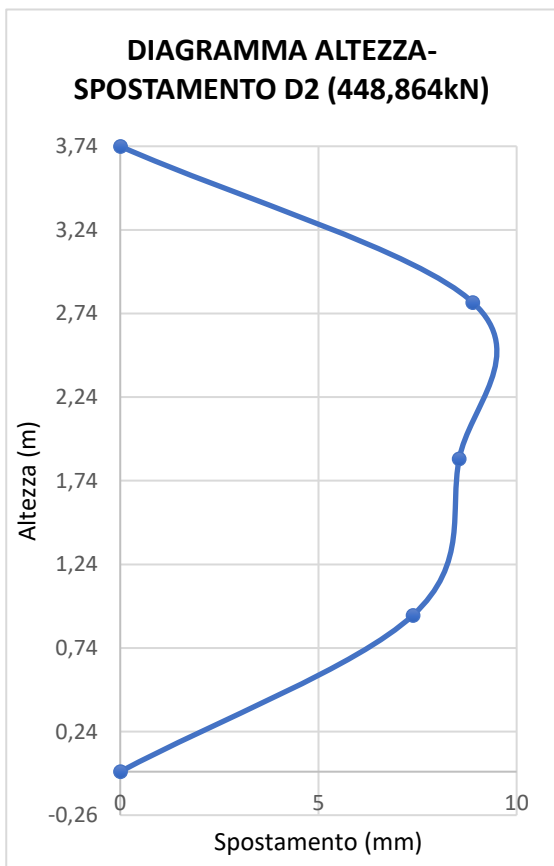
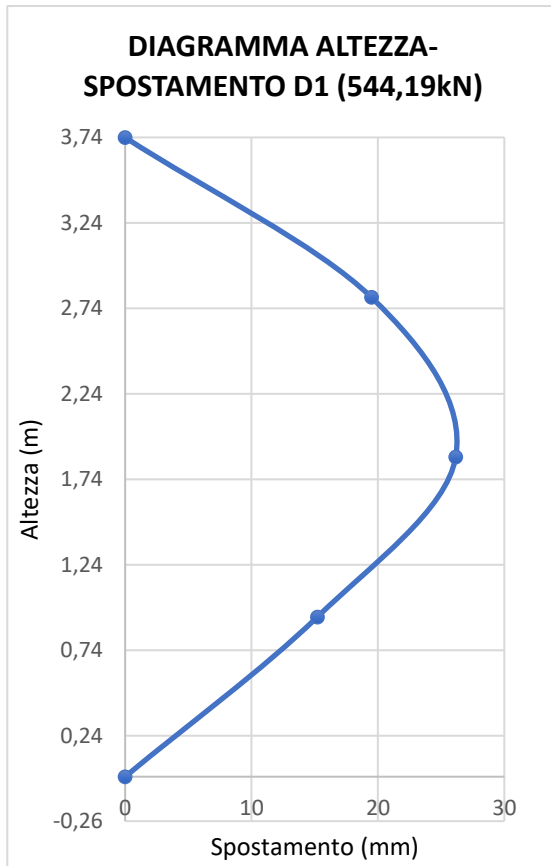
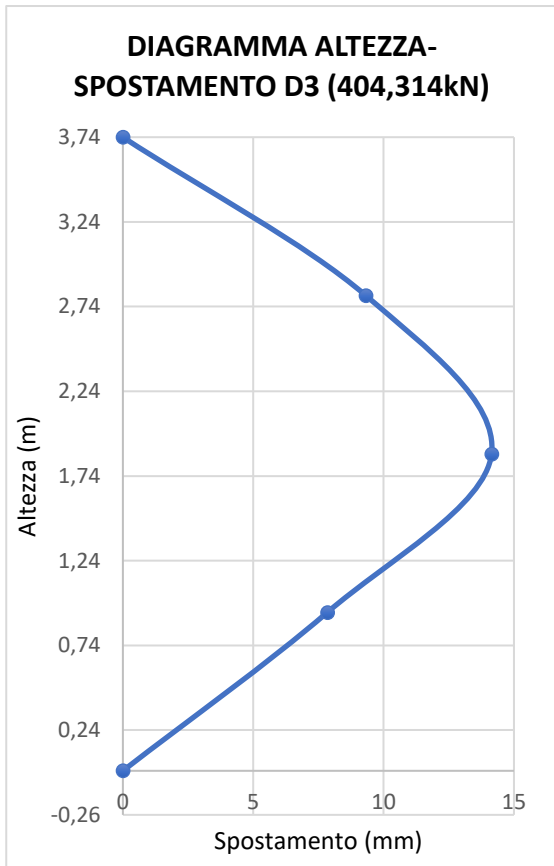


Figura 33 - Curve Altezza-Spostamento D1-D2-D3

Le curve che si possono osservare nella Figura 33 rappresentano gli spostamenti lungo l'altezza della parete del provino in funzione dei carichi massimi, oltre i quali il comportamento dei provini diventa non lineare. I campioni D1,D3 presentano una maggiore flessione a poco più della metà dell'altezza, a circa 1,87m, mentre D2 presenta la massima inflessione a circa 2,74m.

5.2 Modalità di rottura

La sperimentazione ha portato alla rottura dei pannelli per pressoflessione in corrispondenza della mezzeria solo in alcuni casi: tutti i provini della serie D, caratterizzati da altezza maggiore 3,74m, e il pannello C3

Per il campione B1, la rottura è avvenuta per piccola rotazione seguita da schiacciamento del cordolo inferiore del calcestruzzo, che ha portato all'espulsione del calcestruzzo, dovuto anche al fatto che non erano stati confinati con profilati metallici HEA. Anche il campione D1 era sprovvisto profilati metallici in corrispondenza del cordolo inferiore, ma in questo caso la rottura è avvenuta per pressoflessione in mezzeria.

Lo stesso meccanismo si è verificato per i restanti provini, tutti confinati dai profili HEA inferiormente, solamente che principalmente la zona interessata dalla rottura è stata quella in corrispondenza del cordolo superiore, causata anche probabilmente dalla maggiore rigidità del cordolo inferiore. Nei campioni C1, C2, B3 la rottura è avvenuta per schiacciamento del cordolo superiore, mentre solo nel campione B2 la rottura è avvenuta per schiacciamento del cordolo inferiore.

Di seguito sono riportate le immagini relativi alla rottura dei campioni.



Figura 34 - Rottura per schiacciamento del cordolo inferiore del provino B1



Figura 35 - Rottura per schiacciamento del cordolo inferiore B2



Figura 36 - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore B3



Figura 37 - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore C1



Figura 38 - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore C2



Figura 39 - Rottura per pressoflessione C3



Figura 40 - Rottura per pressoflessione D1



Figura 41 - Rottura per pressoflessione D2



Figura 42 - Rottura per pressoflessione D3

6. Discussione dei risultati

6.1 Discussione dei risultati della presente ricerca

La sperimentazione svolta presso il Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture del dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura (DICEA) ha portato al conseguimento di ottimi risultati, in termini di prestazione strutturale.

Di seguito verrà svolto il confronto dei risultati ottenuti da questa ricerca, andando a valutare principalmente il carico massimo.

Al fine di una corretta comparazione si è scelto di confrontare le serie B C con la serie A, i cui provini sono stati testati precedentemente, per la differenza del numero di connettori. Si è invece scelto di comparare la serie D con la serie A per le differenti altezze a parità di numero di connettori.

La serie C è caratterizzata da un numero minore di connettori, 33 per m², la serie B è caratterizzata un numero intermedio di connettori, 44 per m², e infine la serie A caratterizzata dal numero maggiore di connettori, 66 per m².

La serie D è la serie caratterizzata da altezza maggiore 3,47m, rispetto a tutte alle altre che hanno tutte stessa altezza, quindi si è scelto di confrontarla con la serie A con stesso numero di connettori, 66 per m² e altezza pari a 3m.

I campioni hanno tutti le stesse reti elettrosaldate zincate, e sono connesse tra loro tramite connettori d'acciaio saldati disposti perpendicolarmente alle reti. Quindi tutti i provini hanno stesso spessore delle cortine esterne medio e pari a 3,5 cm per lato, ma percentuale di connettori e di armatura diverse, in quanto hanno numero di connettori diversi tra loro e i provini della serie D sono più alti rispetto agli altri.

Altra differenza riguarda il setup della prova, ovvero che i provini B1 e D1 erano sprovvisti dei profilati metallici HEA in corrispondenza del cordolo inferiore. Ciò ha portato ad una rottura con carichi massimi registrati superiori rispetto agli altri. I carichi massimi di rottura dei provini B1 e D1 sono rispettivamente di 843,932kN e 544,185kN, che non verranno considerati nel calcolo del carico medio di rottura delle rispettive serie di provini.

Quindi il confronto tra le varie serie di pannelli viene fatto sul diverso numero di connettori, diverse altezze, diverso rapporto di snellezza e diverso sul carico medio di rottura.

I dati analizzati per la discussione sono illustrati nella seguente tabella:

Serie Pannello	Altezza pannello h [m]	Spessore pannello t [mm]	Carico medio di rottura [kN]	E medio [MPa]	Numero di connettori per mq	Rapporto di snellezza (h/t)
B	3	0,21	734,294	3339,015	44	14,29
C	3	0,21	650,489	4416,801	33	14,29
A	3	0,21	657,80	3519,85	66	14,29

Tabella 8 - Tabella illustrativa dei risultati messi a confronto serie A-B-C

Serie Pannello	Altezza pannello h [m]	Spessore pannello t [mm]	Carico medio di rottura [kN]	E medio [MPa]	Numero di connettori per mq	Rapporto di snellezza (h/t)
D	3,74	0,21	529,195	2948,38319	66	17,81
A	3	0,21	657,80	3519,85	66	14,29

Tabella 9 - Tabella illustrativa dei risultati messi a confronto serie A-D

6.1.1 Discussione dei risultati serie A-B-C

Per quanto riguarda i carichi medi di rottura non è stato considerato il provino B1, in quanto sprovvisto dei profilati metallici HEA in corrispondenza del cordolo inferiore.

Tra le serie A B C, il carico medio di rottura della serie A è risultato il più elevato. Quindi, in generale, all'aumentare del numero di connettori aumenta il carico medio di rottura della serie.

Serie pannelli	Carico medio di rottura [kN]	Numero di connettori per mq
C	650,489	33
B	679,4745	44
A	693,39	66

Tabella 10 - Influenza del numero di connettori sul carico di rottura serie A-B-C

Aumento percentuale di capacità portante da numero connettori 33 a 44 (%)	Aumento percentuale di capacità portante da numero connettori 44 a 66 (%)	Aumento percentuale di capacità portante da numero connettori 33 a 66 (%)
4,455955443	2,047243863	6,59442358

Tabella 11 - Aumento percentuale del carico medio di rottura serie A-B-C

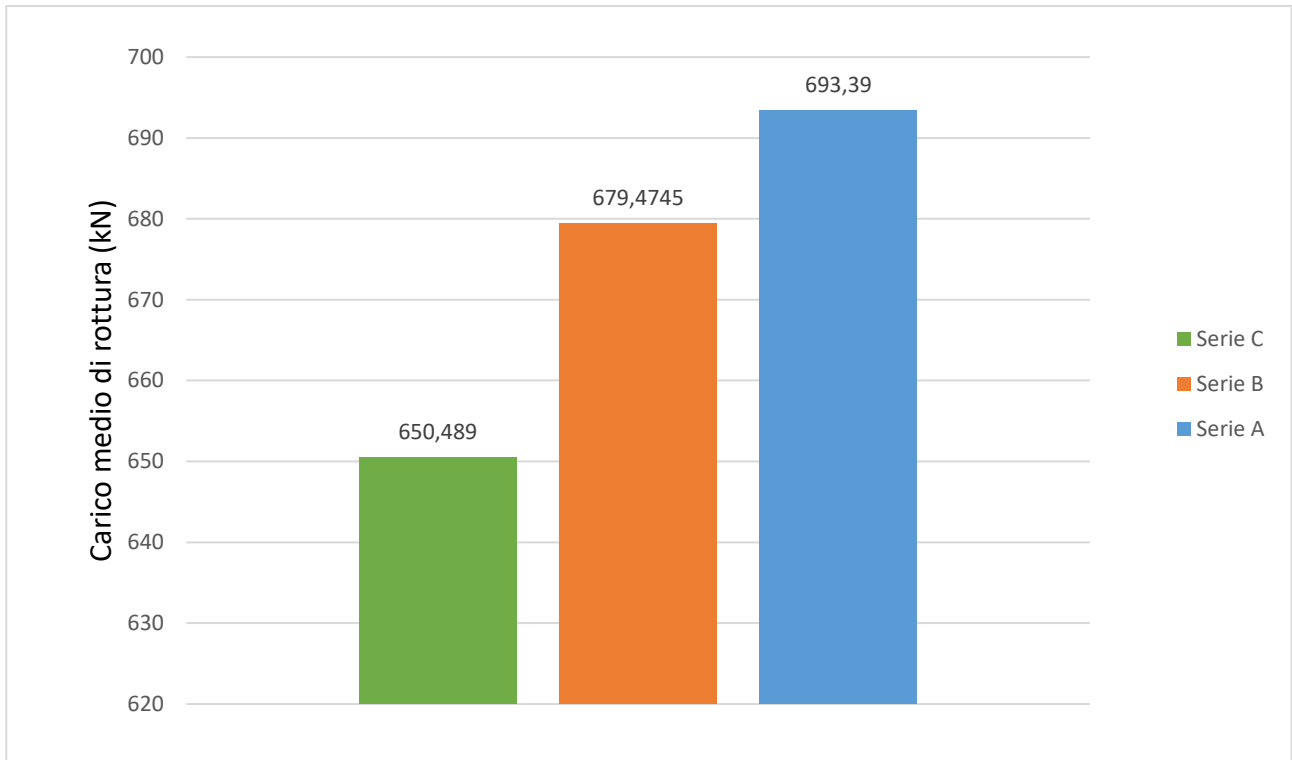


Figura 43 - Confronto carico medio di rottura serie A-B-C

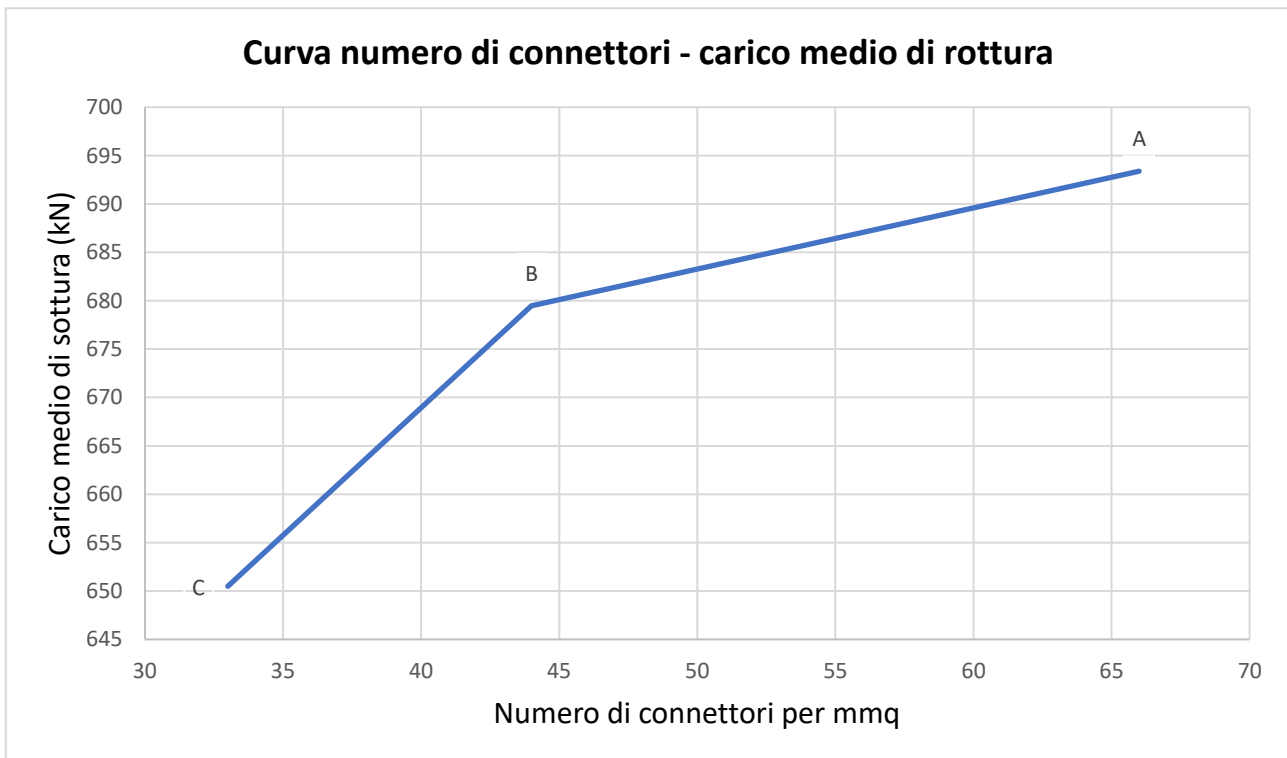


Figura 44 - Curva numero di connettori – carico medio rottura serie A-B-C

Dal confronto dei provini con numero di connettori diversi si osserva che il comportamento composito aumenta all'aumentare dei connettori. Il comportamento composito indica che i paramenti esterni sono collegati in modo tale che possano resistere ai carichi applicati, comportandosi come un'unica sezione, e in questo modo i connettori trasferiscono totalmente il taglio alle cortine di calcestruzzo. Aumentando il numero di connettori per m^2 abbiamo che le cortine di calcestruzzo collaborano meglio tra loro nella ripartizione delle azioni del carico applicato, e quindi riuscendo a portare carichi massimi maggiori, a parità di numero di connettori e spessori, sia dell'isolante che delle cortine di calcestruzzo.

In particolare si nota che i pannelli della serie B (44 connettori) hanno carico medio di rottura maggiore rispetto alle altre serie. Inoltre i provini della serie B e C, rispettivamente 44 e 66 connettori, hanno un andamento della curva Forza-Spostamento molto simile.

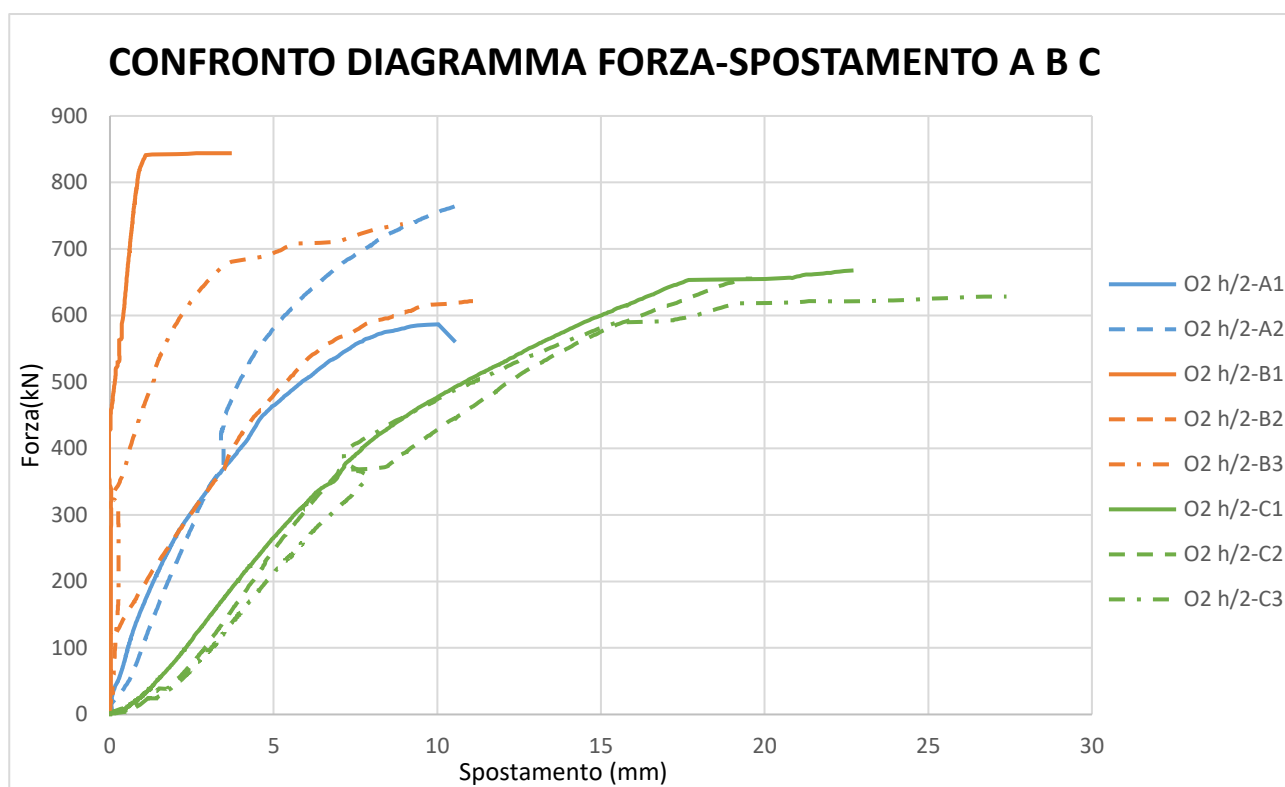


Figura 45 - Confronto diagramma Forza-Spostamento delle serie A-B-C

6.1.1 Discussione dei risultati serie A-D

Per quanto riguarda i carichi medi di rottura non è stato considerato il provino D1, in quanto sprovvisto dei profilati metallici HEA in corrispondenza del cordolo inferiore.

Tra le serie A e D, il carico medio di rottura della serie A è risultato il più elevato. Quindi, in generale, all'aumentare dell'altezza diminuisce il carico medio di rottura della serie.

Per tutti i pannelli della serie D prima di raggiungere il carico massimo di rottura sono stati rimossi i trasduttori, in corrispondenza del valore del carico applicato circa pari a 450kN per D2 e 550kN per D3.

Serie pannelli	Carico medio di rottura	Rapporto snellezza h/t	t (m)
A	693,385	14,28571429	0,21
D	521,7	17,80952381	0,21

Tabella 12 - Influenza del rapporto di snellezza sul carico di rottura A-D

Aumento percentuale di capacità portante da h/t 14,29 a 17,81
24,66666667

Tabella 13 - Aumento percentuale del carico medio di rottura

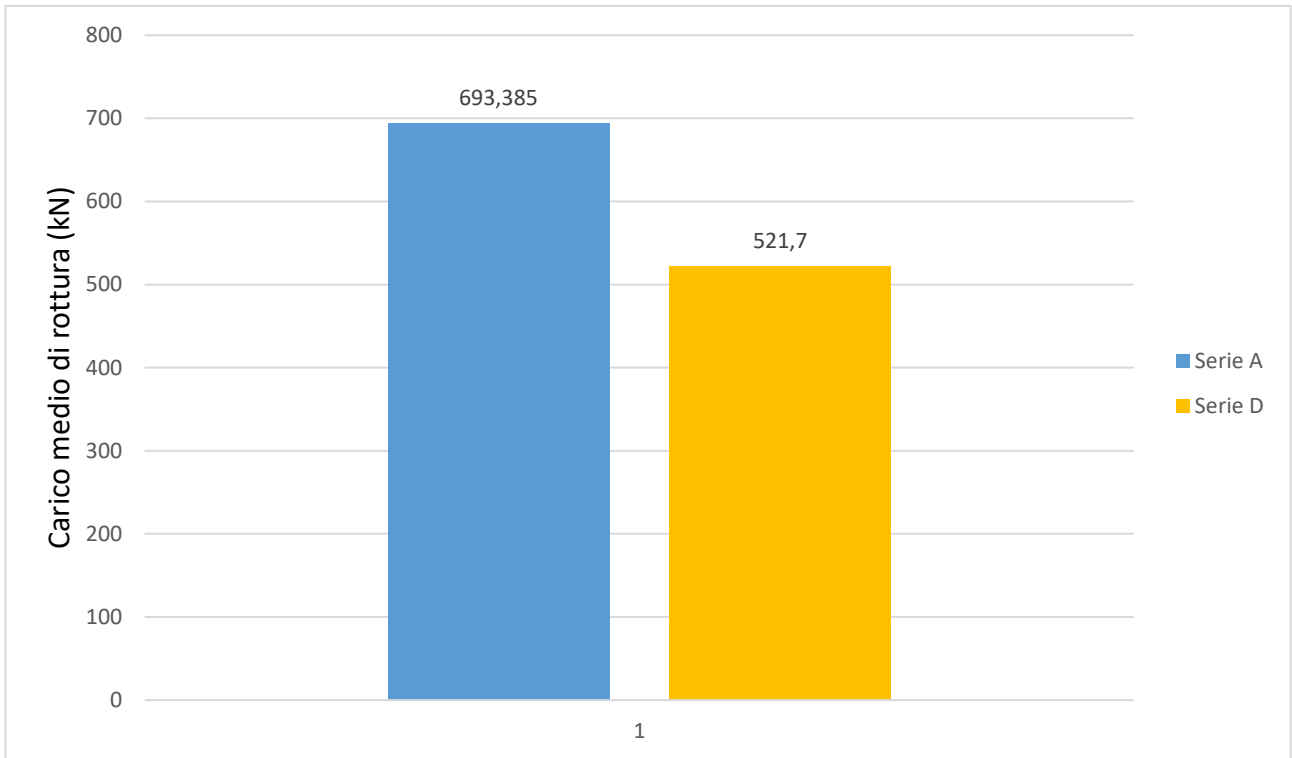


Figura 46 - Confronto carico medio di rottura serie A-D serie A-D

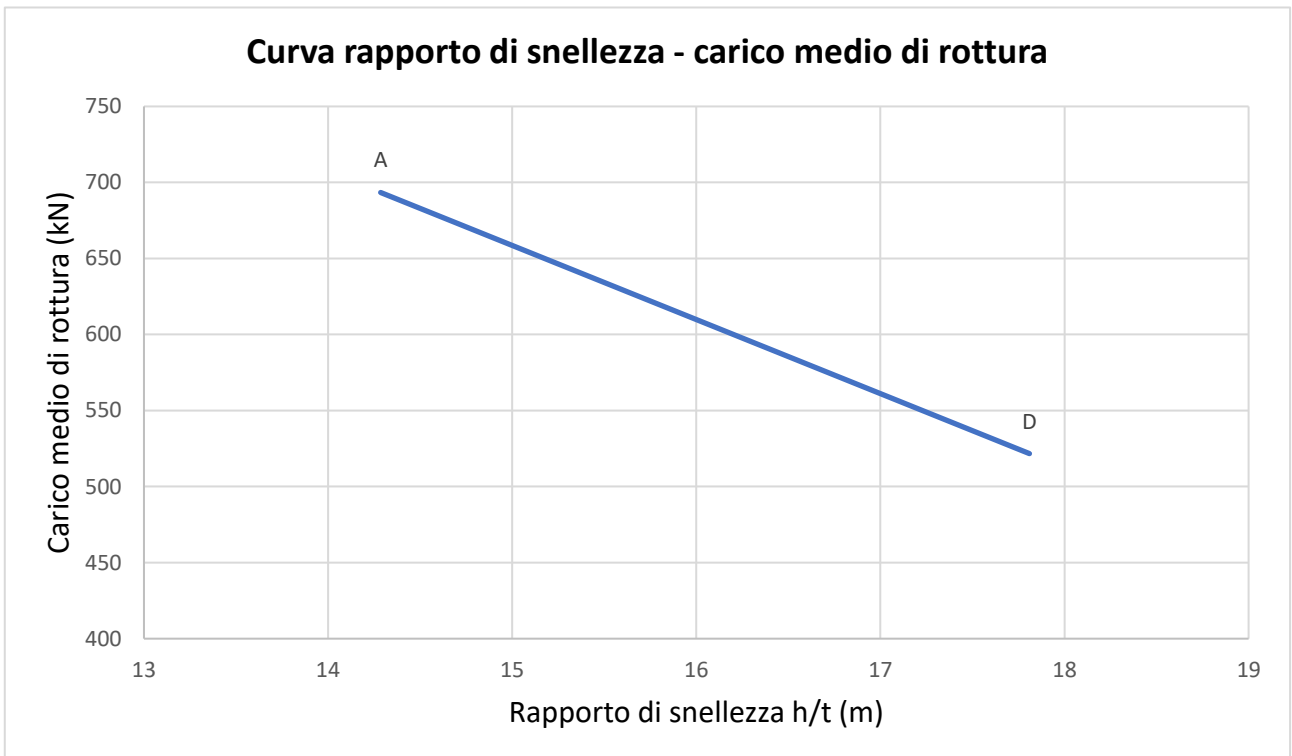


Figura 47 - Curva numero di connettori - carico medio rottura serie A-D

Dal confronto dei provini con altezze diverse si osserva che per altezze maggiori ho rottura dei provini per carichi minori. All' aumentare dell'altezza, e quindi anche del rapporto di snellezza h/t , abbiamo che i provini arrivano a rottura per un carico minore. Quindi per pannelli più snelli abbiamo minor resistenza a parità di numero di connettori e spessori, sia dell' isolante che delle cortine di calcestruzzo.

In particolare si nota che i pannelli della serie D hanno carico medio di rottura minore rispetto alla serie A, con carichi medi di rottura rispettivamente pari a 693,385kN e 521,7kN.

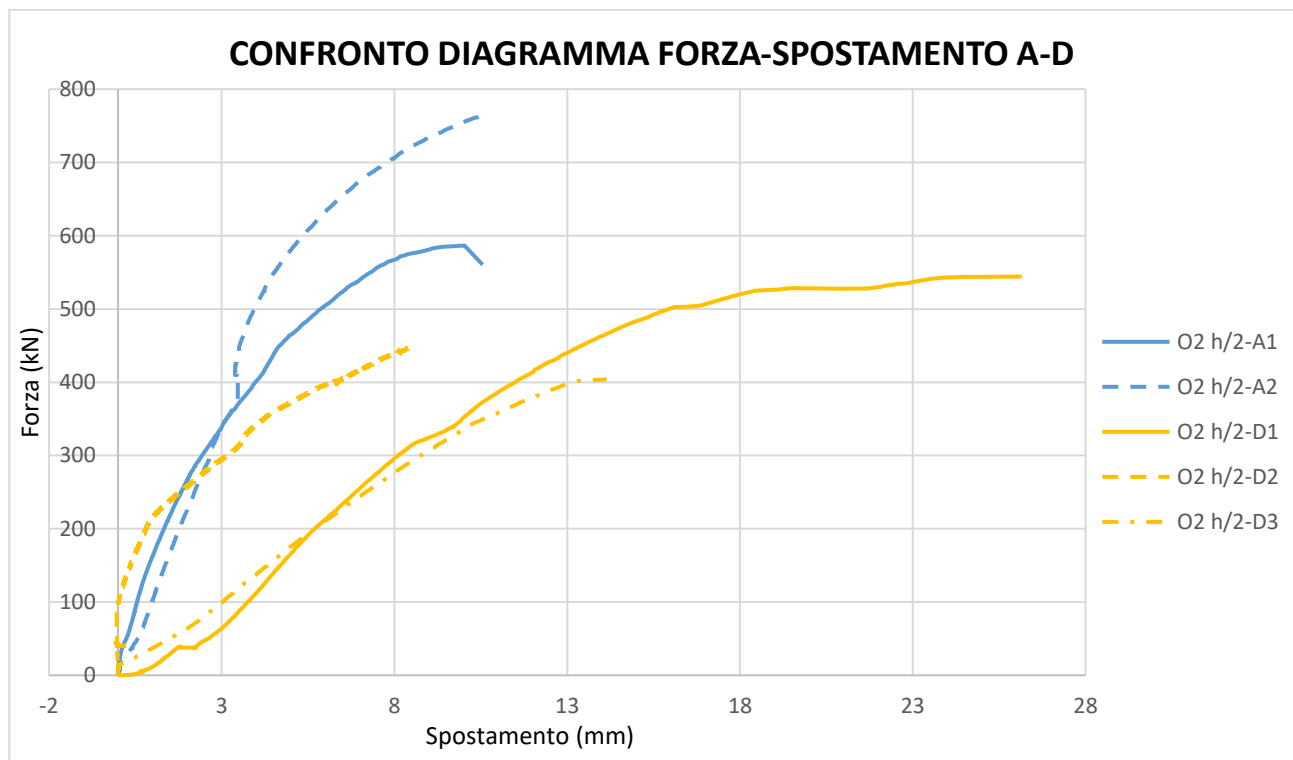


Figura 48 - Confronto diagramma Forza-Spostamento delle serie A-D

Conclusioni

In questo elaborato di tesi è stato trattato lo studio sperimentale del comportamento meccanico di pannelli sandwich in c.a. sottoposti a compressione eccentrica, facendo riferimento al sistema costruttivo a pannelli portanti realizzato dalla Ditta Emmedue srl.

I pannelli sandwich, prefabbricati o gettati in opera, sono adatti ad essere impiegati sia per pareti interne che esterne, e anche per pareti portanti per edifici ad uso residenziale, commerciale ed industriale. L'utilizzo di questo sistema costruttivo ad oggi rappresenta un'ottima soluzione per la costruzione di edifici, grazie anche ai numerosi vantaggi che offre tra cui: riduzione dei tempi di montaggio dei pannelli, facilità di installazione, ottime caratteristiche dal punto di vista dell'efficienza energetica, e soprattutto non è richiesta un'elevata e altamente specializzata manodopera.

L'obiettivo di questa ricerca è ampliare la conoscenza del comportamento meccanico di questo sistema, mirando alla valorizzazione del suo impiego per elementi strutturali portanti di edifici di nuova costruzione.

La sperimentazione condotta presso il Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture del dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura (DICEA) ha portato al conseguimento di ottimi risultati, in termini di prestazione strutturale.

Sono stati testati nove pannelli sandwich, composti da due cortine esterne, di spessore medio pari a 3,5 cm per lato, in calcestruzzo spruzzato in opera, rinforzate con reti elettrosaldate di diametro 2,5 mm connesse tra loro mediante connettori saldati disposti perpendicolarmente alle reti, di diametro pari a 3 mm, ed al centro costituiti da uno strato isolante di EPS. I campioni sono stati raggruppati in tre tipologie ciascuna formate da tre pannelli denominate B, C e D. I primi due differiscono per numero di connettori, rispettivamente 33 e 44, mentre la serie D è caratterizzata da altezza maggiore pari a 3,74m. Tutti i provini hanno la stessa percentuale di armatura e stesso spessore dello strato isolante.

La campagna sperimentale è stata caratterizzata da un'uguale configurazione della prova per tutti i campioni, tranne in alcuni casi specifici: per i provini B1 e D1 non erano presenti i profilati metallici HEA, utili per il confinamento del cordolo inferiore; per tutta la serie D, di altezza 3,74m, è stata adattata la dimensione del telaio di supporto e inoltre per i provini D2 e D3 sono stati rimossi i trasduttori prima di arrivare al carico massimo di rottura, registrando quindi solo il valore del carico massimo di rottura e non gli spostamenti.

Per la serie B, ovvero quella caratterizzata da un numero di connettori pari a 44, si è registrato un carico medio di rottura 679,4745kN ed un modulo elastico medio di 3339,02MPa.

Per la serie C, ovvero quella caratterizzata da un numero di connettori pari a 33, si è registrato un carico medio di rottura di 650,489kN ed un modulo elastico medio di 4416,801MPa.

Per la serie D, ovvero quella caratterizzata da altezza pari a 3,74m, si è registrato un carico medio di rottura di 529,195kN ed un modulo elastico medio di 2948,38MPa.

I provini hanno avuto varie modalità di rottura differenti tra loro: nel pannello B1, sprovvisto di

profilati HEA alla base, si è vista una rottura per schiacciamento del cordolo inferiore, nei pannelli B2 B3 C1 C2, come ci si aspettava, la rottura è avvenuta per schiacciamento del cordolo superiore, mentre il provino C3 è arrivato a rottura per pressoflessione, quindi con le fessure al centro del pannello. In fine, in tutta la serie D, come ci si aspettava in quanto più snelle delle altre, le rotture sono avvenute per pressoflessione.

Le curve Forza - Spostamento hanno manifestato per il primo tratto un comportamento lineare, fin quando entriamo nel campo della non linearità. Come si può osservare dai grafici, tutti i campioni sono caratterizzati da un comportamento fragile, visto che tutte le curve in corrispondenza del carico massimo di rottura subiscono un brusco decadimento del carico, dovuto al cedimento per schiacciamento dei cordoli superiori o inferiori.

Sono state fatte due tipologie di confronti, uno per il numero di connettori l'altro per le altezze. In questa fase si è scelto di prendere come riferimento anche i risultati della sperimentazione relativi alla serie di pannelli A, con 66 connettori e 3,00m di altezza, presi dalle prove fatte precedentemente.

Dal confronto dei provini con numero di connettori diversi si osserva che il comportamento composito aumenta all'aumentare dei connettori, in particolare la serie B è quella con carico medio di rottura maggiore. Le serie B e C, hanno un andamento della curva Forza-Spostamento molto simile. L'aumento della capacità portante del numero di connettori da 33 a 44 è del 4,45%, quella da 44 a 66 connettori è del 2,05%, e quella da 33 a 66 è del 6,59%.

Dal confronto dei provini con altezze diverse si osserva che per altezze maggiori ho rottura dei provini per carichi minori. In particolare si nota che i pannelli della serie D hanno carico medio di rottura minore. L'aumento percentuale della capacità portante da h/t 14,29 a 17,81 è del 24,67%.

Bibliografia/Sitografia

- [1] Tesi laurea magistrale Keci Klaudio “Studio sperimentale del comportamento meccanico di pannelli sandwich in c.a. sottoposti a compressione eccentrica” Università Politecnica delle Marche 2022/2023.
- [2] Lorenzo Graziani, Enrico Quagliarini, Marco D'Orazio, Stefano Lenci e Agnese Scalbi, A More Sustainable Way for Producing RC Sandwich Panels On-Site and in Developing Countries, Sustainability, 22 March 2017.
- [3] P. Poluraju, G. Appa Rao, Behaviour of 3d-panels for structural applications under general loading: a State-of-the-art, 2014.
- [4] M. Serpilli, Verifica sperimentale del comportamento meccanico di pannelli sandwich in calcestruzzo armato e polistirene, Report tecnico.
- [5] S.Samsuddin, N. Mohamad, Structural behaviour of precast lightweight foamed concrete sandwich panel under axial load: an overview, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia.
- [6] PCI Committee on Precast Concrete Sandwich Wall Panels. State of the Art of Precast/Prestressed Concrete Sandwich Wall Panels. PCI J. 2011
- [7] Carbonari, G.; Cavalaro, S.H.P.; Cansario, M.M.; Aguado, A. Flexural behaviour of light-weight sandwich panels composed by concrete and EPS. Constr. Build. Mater. 2012
- [8] Ahmad I, Mohamad N, Tun U, Onn H, Raja P, Pahat B, Structural Behaviour of Precast Lightweight Concrete Sandwich Panel Under Eccentric Load : An Overview. Int. Conf. Civ. Environ. Eng. Sustain. (IconCEES 2011), Johor Bahru, Malaysia: 2012.
- [9] Circolare Min.LL.PP. 11-08-1969 n°6090, “Norme per il calcolo e la costruzione di strutture a grandi pannelli”.
- [10] CNR 10025/98 – “Istruzioni per il progetto, l'esecuzione ed il controllo delle strutture prefabbricate in Calcestruzzo”.
- [11] UNI EN 1052-1,” Metodi di prova per muratura - Determinazione della resistenza a compressione”
- [12] UNI EN 1991 – Eurocodice 2, “Progettazione delle strutture in calcestruzzo”, Parte I: “Regole generali e regole per gli edifici”.

[13] European Technical Assessment, ETA 20/0976 of 01/06/2021.

[14] European Assessment Document – EAD 340002-00-0204.

[15] <https://www.ingenio-web.it/articoli/pannelli-sandwich-in-calcestruzzo-tradizione-innovazione-e-sperimentazione/>

[16] <https://www.edil-coperture.com/realizzazioni/pannelli-sandwich-cosa-sono-caratteristiche-pro-e-contro-180>

[17] <https://www.ingenio-web.it/articoli/bioedilizia-la-nuova-direttiva-case-green-e-perche-preferire-gli-isolanti-naturali/>