



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**  
**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea Magistrale 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 c.a. sandwich panels  
subjected to eccentric compression**

Relatore:

Prof. **Serpilli Michele**

Correlatore:

Prof.ssa **Stazi Francesca**

Tesi di Laurea di:

**Keci Klaudio**

Anno Accademico 2022 /2023



*“Il successo è la somma di piccoli sforzi, ripetuti giorno dopo giorno.”*

*Robert Collier*

## **INDICE**

<b>Indice delle figure .....</b>	<b>3</b>
<b>Indice delle tabelle .....</b>	<b>3</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>6</b>
<b>1 Introduzione .....</b>	<b>7</b>
1.1 Evoluzione ed applicazione dei sistemi a pareti portanti .....	8
1.2 Obiettivo della tesi .....	13
<b>2 Sistema costruttivo dei pannelli sandwich .....</b>	<b>14</b>
2.1 Tecnologia dei pannelli sandwich .....	15
2.2 Composizione dei pannelli sandwich .....	15
2.2.1 Paramenti esterni.....	16
2.2.2 Isolamento .....	17
2.2.3 Connettori.....	17
2.3 Vantaggi legati all'utilizzo dei pannelli sandwich strutturali .....	19
2.4 Stato dell'arte – Ricerche e studi condotti .....	20
<b>3 Inquadramento normativo dei pannelli sandwich .....</b>	<b>24</b>
3.1 Inquadramento normativo dei pannelli sandwich .....	25
3.2 Tecnologia costruttiva .....	27
3.3 Fasi di cantierizzazione .....	28
<b>4 Materiali e metodi prova .....</b>	<b>33</b>
4.1 Descrizione dei provini .....	34
4.2 Prove di compressione eccentrica .....	34
4.2.1 Normativa .....	34
4.2.2 Specifiche degli elementi testati .....	36
4.2.3 Strumentazione e modalità di esecuzione della prova .....	41
<b>5 Risultati della sperimentazione .....</b>	<b>47</b>
5.1 Curve forza-spostamento .....	48
5.2 Modalità di rottura .....	56
<b>6 Discussione dei risultati.....</b>	<b>65</b>

<b>6.1 Discussione dei risultati della presente ricerca .....</b>	<b>66</b>
<b>6.2 Confronto dell'attuale ricerca con la letteratura .....</b>	<b>70</b>
<b>Conclusioni.....</b>	<b>79</b>
<b>Ringraziamenti .....</b>	<b>82</b>
<b>Bibliografia/Sitografia.....</b>	<b>83</b>

## Indice delle figure

<b>Figura 1</b> - Sistema ICF con blocco cassero a perdere in materiale isolante .....	10
<b>Figura 2</b> – Stratigrafia dei pannelli sandwich testati in laboratorio prodotti dalla ditta Due Emme	10
<b>Figura 3</b> – Carcere della contea El Paso, Colorado .....	11
<b>Figura 4</b> – Centro sportivo, Olathe, Kansas .....	12
<b>Figura 5</b> – Piscina realizzata con casseri di polistirolo .....	12
<b>Figura 6</b> - Capannone realizzato con pannelli sandwich .....	15
<b>Figura 7</b> - Schematizzazione dei pannelli sandwich oggetto di studio .....	16
<b>Figura 8</b> - Connettori a traliccio .....	18
<b>Figura 9</b> - Connettori saldati (a), Connettori piegati (b) .....	18
<b>Figura 10</b> - Esempio di un'abitazione realizzata con pannelli sandwich .....	20
<b>Figura 11</b> - Configurazione del telaio per la prova di compressione .....	22
<b>Figura 12</b> - Configurazione e strumentazione di prova .....	23
<b>Figura 13</b> - Pannelli Emmedue .....	26
<b>Figura 14</b> - Profilo ondulato del polistirene .....	27
<b>Figura 15</b> - Composizione del pannello sandwich .....	28
<b>Figura 16</b> - Ancoraggio alla fondazione .....	28
<b>Figura 17</b> - Disposizione dei puntelli diagonali per la posa in opera dei pannelli .....	29
<b>Figura 18</b> - Installazione degli impianti .....	30
<b>Figura 19</b> - Getto di completamento dello spritz beton .....	31
<b>Figura 20</b> - Strato di finitura .....	32
<b>Figura 21</b> - I primi tre provini testati .....	37
<b>Figura 22</b> - Composizione pannelli sandwich (a), spruzzatura di calcestruzzo sulle superfici esterne fino alla rete metallica (b), spruzzatura fino allo spessore finale (c) .....	38
<b>Figura 23</b> - Planimetria e sezione della disposizione delle reti metalliche e connettori .....	39
<b>Figura 24</b> - Rappresentazione della disposizione dell'armatura, dei connettori, e del profilo ondulato della lastra di polistirene .....	39
<b>Figura 25</b> - Armatura dei cordoli .....	40
<b>Figura 26</b> - Particolare attacco cordoli con tondino e piastra saldati .....	40
<b>Figura 27</b> - Profilati metallici HEA impiegati in corrispondenza del cordolo inferiore .....	41
<b>Figura 28</b> - Martinetti che applicano il carico sui dischi, che sono appoggiati sulla piastra (a), collegamento del pannello con la piastra d'acciaio saldata (b) .....	42
<b>Figura 29</b> - Collocazione dei trasduttori sulle facce fronte e retro .....	43

<b>Figura 30</b> - Prove di compressione eccentrica primi tre provini: configurazione e strumentazione di prova.....	44
<b>Figura 31</b> - Setup della prova frontale (a), setup della prova retro(b) .....	45
<b>Figura 32</b> - Profilati metallici in corrispondenza del cordolo inferiore .....	45
<b>Figura 33</b> - Setup della prova con i profilati metallici .....	46
<b>Figura 34</b> - Confronto diagrammi Forza-Spostamento verticale E1-E2-E3 .....	48
<b>Figura 35</b> - Confronto diagrammi Forza-Spostamento orizzontale 'O2 - h/2' E1-E2-E3 .....	49
<b>Figura 36</b> - Curve Altezza-Spostamento E1-E2-E3.....	50
<b>Figura 37</b> - Confronto diagrammi Forza-Spostamento verticale F1-F2-F3.....	51
<b>Figura 38</b> - Confronto diagrammi Forza-Spostamento orizzontale 'O2 - h/2' F1-F2-F3 .....	52
<b>Figura 39</b> - Curve Altezza-Spostamento F1-F2-F3 .....	53
<b>Figura 40</b> - Confronto diagrammi Forza-Spostamento verticale A1-A2 .....	54
<b>Figura 41</b> - Confronto diagrammi Forza-Spostamento orizzontale 'O2 - h/2' A1-A2 .....	55
<b>Figura 42</b> - Curve Altezza-Spostamento A1-A2.....	56
<b>Figura 43</b> – Rottura per schiacciamento del cordolo inferiore del provino A1 .....	57
<b>Figura 44</b> - Rottura per schiacciamento del cordolo inferiore F1 .....	58
<b>Figura 45</b> - Rottura per schiacciamento del cordolo inferiore E1 .....	59
<b>Figura 46</b> - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore A2 .....	60
<b>Figura 47</b> - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore F2.....	61
<b>Figura 48</b> - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore E2.....	61
<b>Figura 49</b> - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore E3.....	62
<b>Figura 50</b> - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore F3.....	63
<b>Figura 51</b> - Vista laterale delle lesioni per pressoflessione A3 (a), retro provino A3 (b), vista frontale della rottura per pressoflessione del provino A3 con le principali lesioni evidenziate .....	64
<b>Figura 52</b> - Curva rapporto di snellezza-carico medio di rottura.....	67
<b>Figura 53</b> - Confronto dei valori medi del carico di rottura della serie E e serie F .....	68
<b>Figura 54</b> - Confronto dei valori medi del carico di rottura della serie E e serie A.....	68
<b>Figura 55</b> - Confronto del modulo elastico medio tra le serie .....	69
<b>Figura 56</b> - Curva altezza-spostamento A1 (a), F3 (b), E2 (c) .....	70
<b>Figura 57</b> - Pannelli da confrontare con quelli forniti dalla ditta Emmedue .....	71
<b>Figura 58</b> - Curva rapporto di snellezza-carico medio di rottura.....	72
<b>Figura 59</b> - Confronto carico medio di rottura.....	72
<b>Figura 60</b> - Confronto carico medio di rottura.....	73
<b>Figura 61</b> - Pannelli sandwich in c.a. testati nell'articolo [6].....	74

<b>Figura 62</b> - Confronto carico medio di rottura.....	75
<b>Figura 63</b> - Confronto carico medio di rottura.....	75
<b>Figura 64</b> - Dimensioni dei pannelli da confrontare .....	76
<b>Figura 65</b> - Confronto carico medio di rottura con carico massimo .....	77
<b>Figura 66</b> - Confronto carico medio di rottura con carico massimo .....	78

## **Indice delle tabelle**

<b>Tabella 1</b> - Tabella riassuntiva delle specifiche di pannelli testati.....	36
<b>Tabella 2</b> - Tensione di compressione e deformazione dei pannelli della serie E .....	48
<b>Tabella 3</b> - Carico Massimo di rottura e modulo elastico dei pannelli della serie E.....	48
<b>Tabella 4</b> - Tensione di compressione e deformazione dei pannelli della serie F.....	51
<b>Tabella 5</b> - Carico Massimo di rottura e modulo elastico dei pannelli della serie F.....	51
<b>Tabella 6</b> - Tensione di compressione e deformazione dei pannelli della serie A.....	54
<b>Tabella 7</b> - Carico Massimo di rottura e modulo elastico dei pannelli della serie A .....	54
<b>Tabella 8</b> - Tabella illustrativa dei risultati messi a confronto .....	66
<b>Tabella 9</b> - Influenza del rapporto di snellezza sul carico di rottura .....	67
<b>Tabella 10</b> - Tabella illustrativa dei dati utili per il confronto .....	72
<b>Tabella 11</b> - Tabella illustrativa dei dati utili per il confronto .....	74
<b>Tabella 12</b> - Tabella illustrativa dei dati utili per il confronto .....	77



## **Abstract**

I pannelli sandwich solitamente sono realizzati unendo due pelli esterne, sottili e rigide ad un'anima, o core, più spessa e leggera. In particolare, i pannelli sandwich in c.a. sono costituiti da due cortine esterne in cemento armato, che possono essere gettate in opera o prefabbricate e da un nucleo interno di isolante termico. I paramenti esterni sono collegati tramite connettori, i quali garantiscono il comportamento semi-composito o composito dei pannelli.

In questo lavoro di tesi è stato approfondito il sistema costruttivo dei pannelli sandwich in cemento armato gettato in opera mediante spruzzatura realizzati con la tecnologia del pannello di supporto in polistirene. Sono stati presentati e discussi i risultati ottenuti da una campagna sperimentale condotta per comprendere il comportamento meccanico di tali pannelli quando sottoposti a compressione eccentrica. Sono state testate fino a raggiungere la rottura diverse configurazioni di pannelli, le quali differiscono per il diverso spessore del pannello isolante.

La sperimentazione è stata svolta nel Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture del dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura (DICEA) in collaborazione con la Ditta Emmedue srl, la quale ha commissionato i test meccanici da eseguire su tale tipologia costruttiva da essa prodotta.

# **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 ai primi anni del Novecento, quando a causa dell'industrializzazione ci fu un brusco cambiamento di essi.

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.

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.

Il sistema costruttivo a setti portanti in conglomerato cementizio ha trovato largo impiego in Europa dopo la Seconda guerra mondiale per la ricostruzione degli edifici danneggiati grazie ai vantaggi offerti sia in termini economici, e di impiego di minore manodopera per la posa in opera.

Nel dopoguerra per far fronte alla crescente esigenza di sviluppo residenziale, sono stati utilizzati pannelli portanti prefabbricati in calcestruzzo armato, che venivano prodotti serialmente, riducendo le operazioni in cantiere. A causa dell'inadeguatezza dei sistemi tradizionali attorno agli anni '20 apparvero nuovi sistemi costruttivi, gli Industrialized Building Systems (IBS), nei quali i componenti venivano prefabbricati in sito o in fabbrica e poi assemblati. Tutto questo garantiva tempi più brevi di costruzione, oltre ai vantaggi legati alla resistenza, integrità, durabilità, comfort termico interno, e meno risorse umane per la posa in opera.

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, ci fu una grande diffusione di questa tipologia costruttiva.

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 come scuole o edifici in linea, per edifici insomma caratterizzati da forme ripetibili.

Inoltre, queste pareti potevano essere lasciate a vista, senza bisogno di alcun trattamento, coibentazione, finiture, costituendo di fatto un altro motivo per il quale questo sistema rispetto a quelli più tradizionali risulta essere più economico e veloce.

Seppur in un passato recente la cantierizzazione degli elementi portanti in c.a. era destinata ad una piccola fetta di mercato, negli ultimi decenni per via della produzione edilizia intensiva questa interessa tutto il mondo.

La comparsa dei moderni materiali espansi, impiegati per la formazione di elementi modulari, favorì un'agevolazione dal punto di vista del cantiere andando a ridurre i tempi di costruzione, e garantì il primo passo verso la modernizzazione di tali sistemi costruttivi.

Negli ultimi anni la normativa vigente per il campo delle costruzioni, soprattutto per quanto riguarda la protezione antisismica e il risparmio energetico, ha favorito un cospicuo sviluppo e aumento dell'utilizzo di queste tecnologie costruttive.

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.

I sistemi costruttivi a pareti piene dal punto di vista normativo sono ben inquadrati, mentre per quanto riguarda le pareti alleggerite, la normativa non ne ha ancora definito le peculiarità costruttive, visto che l'interesse verso questo tipo di pareti è aumentato negli ultimi anni, motivo per cui le ricerche condotte su questo tipo di tecnologia sono iniziate negli ultimi tempi.

Per quanto riguarda i sistemi con casseformi a perdere di materiale isolante, particolare interesse è stato rivolto ai cosiddetti Insulated Concrete Forms (ICFS), dove il materiale impiegato solitamente per questi casseri a perdere è il polistirolo (EPS). Questo sistema costruttivo unisce le proprietà del cemento armato con quelle dei casseri isolanti. Questi casseri contengono la miscela cementizia fino a completa maturazione, che avviene in condizioni ottimali di umidità e temperatura. Quindi le pareti realizzate con questo sistema sono costituite da:

- pannello in polistirolo esterno;
- pannello in c.a.;
- pannello in polistirolo interno;
- connettori interni, o distanziali, che hanno la funzione di collegare i due pannelli di polistirolo e di garantire il corretto posizionamento dell'armatura orizzontale.



*Figura 1- Sistema ICF con blocco cassero a perdere in materiale isolante*

Normalmente per garantire una buona capacità di accumulo termico della parete lo strato di pannello isolante esterno è più spesso di quello interno. Per i pannelli preassemblati i connettori possono essere preinglobati, mentre per i pannelli che vengono assemblati in cantiere i connettori possono essere inseriti in fase di montaggio. Questo tipo di sistemi forniscono ottime prestazioni dal punto di vista sismico, garantiscono comfort termoigrometrico, e acustico.

Il sistema costruttivo di tipo sandwich che verrà esaminato in questa tesi conosciuto come RCSP (Reinforced Concrete Sandwich Panels) o ISWP (Insulated Sandwich Wall Panels) è costituito da due cortine esterne in cemento armato dallo spessore di qualche centimetro, armate con rete elettrosaldata, gettate in opera mediante lo spruzzo di calcestruzzo, e nucleo interno 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 2 – 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. Con gli anni questo sistema è stato utilizzato per diverse applicazioni, nel settore dell'edilizia per la costruzione degli edifici i primi ad essere adottati furono i Structural Insulated Panels (SIP), pannelli sandwich costituiti da due lastre in scaglie di legno esterne e un nucleo in EPS (polistirene espanso). Questa tecnologia fu poi impiegata anche per la realizzazione di automobili e per le varie operazioni dei processi nell'industria di costruzione navale.

Inizialmente i SIP non venivano utilizzati per i sistemi strutturali portanti, ma venivano prodotti come pannelli di rivestimento.

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 osservata in gran parte delle strutture: edifici residenziali, scuole, uffici, ambienti a bassa temperatura, atmosfere controllate, magazzini, edifici industriali, strutture giudiziarie e ospedali.

Di seguito sono riportate due strutture in cui è evidente l'impiego del sistema costruttivo dei pannelli sandwich:



*Figura 3 – Carcere della contea El Paso, Colorado*



*Figura 4 – Centro sportivo, Olathe, Kansas*

Sempre più frequente è l'utilizzo di sistemi ICF per la realizzazione di piscine, in quanto oltre ad una riduzione dei tempi di realizzazione consentono di mantenere alla giusta temperatura l'acqua interna grazie allo strato esterno ed interno di isolante. Dal punto di vista operativo l'uso dei casseri ICF facilita le operazioni poiché consente l'inserimento degli accessori, quali bocchette, e altre apparecchiature che servono per il ricircolo dell'acqua. Le operazioni di finitura esterna della parte controterra consistono nell'applicazione di uno strato impermeabilizzante e la protezione dello stesso prima del rinterro.



*Figura 5 – Piscina realizzata con casseri di polistirolo*

## 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 il comportamento meccanico dei pannelli sandwich in c.a, nel piano e fuori piano, quando sottoposti a carico statico eccentrico, andando a valutare anche 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 spessore dell'isolante.

L'obiettivo di questo elaborato di tesi è ampliare la conoscenza del comportamento meccanico di questo sistema andandosi a confrontare anche con gli studi e ricerche presenti in letteratura.

Particolarmente interessante è la valutazione dell'influenza dei diversi parametri dei pannelli 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:

- nella prima parte si è cercato di dare una visione globale dei sistemi a pareti portanti;
- nella seconda parte è stata 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, le ricerche condotte su di esso, 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 necessarie all'elaborazione dei dati ottenuti, le specifiche dei campioni testati, la strumentazione di supporto e la modalità di esecuzione della prova;
- nel quinto capitolo sono stati elaborati i risultati ottenuti dalla sperimentazione, mediante curve forze-spostamento, e sono state osservate le modalità di rottura dei vari provini;
- nell'ultima sezione sono stati discussi i risultati, confrontandoli tra di loro e con la letteratura ed osservando quale dei parametri influisca di più 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 la rivalutazione dell'impiego dei pannelli sandwich.

I pannelli sandwich, prefabbricati o gettati in opera, sono adatti ad essere impiegati per pareti interne, esterne, per pareti portanti per edifici ad uso residenziale, commerciale ed industriale. L'utilizzo di questo sistema costruttivo trovò largo impiego soprattutto nei paesi dell'Est Europa, dove c'era la necessità di dare alloggi a persone che si trovavano in difficoltà, a causa del danneggiamento delle proprie abitazioni a seguito della guerra.

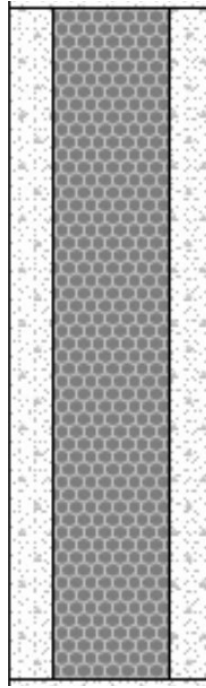
I principali vantaggi legati questa tecnologia sono: efficienza energetica, facile e rapida posa in opera, basso costo e una non elevata richiesta di manodopera per la realizzazione.



*Figura 6 - Capannone realizzato con pannelli sandwich*

## 2.2 Composizione dei pannelli sandwich

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



*Figura 7 - 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, copriferro, ancoraggio dei connettori, sverniciatura 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 tutti e due strutturali. Nei pannelli non compositi, uno dei paramenti è strutturale e l'altro è non strutturale. La differenza tra pannelli compositi, semicompositi e non compositi è legato al completo, parziale, e quasi nullo trasferimento di taglio da parte dei connettori.

Solitamente il paramento esterno è costituito da uno strato sottile di calcestruzzo di spessore 50-75 mm, il quale verrà poi sottoposto a diversi trattamenti. Questo strato serve inoltre a proteggere lo strato isolante interno.

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. I paramenti esterni vengono rinforzati tramite rete elettrosaldata inserita nello spessore.

## 2.2.2 Isolamento

Lo spessore e il tipo di isolamento dipendono dalle proprietà termiche del materiale isolante utilizzato, dalla temperatura di progetto della struttura e dalla resistenza termica desiderata. L'isolante deve 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 R.

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, cosa che rende impossibile l'assorbimento d'acqua e gli conferisce un'alta resistenza alla compressione.

L'EPS è quello più economico tra i due. La sua struttura è a cellule chiuse e i principali vantaggi che lo caratterizzano sono: bassa conducibilità termica, elevata resistenza alla compressione e leggerezza.

Può essere utilizzato sia come materiale da costruzione che come elemento di design.

Negli ultimi anni per perseguire l'obiettivo della direttiva Case Green, ovvero quello di ridurre la CO<sub>2</sub> del 50% la scelta del materiale isolante sta assumendo un fattore molto importante. La continua e sempre più rinnovata ricerca della sostenibilità sta facendo in modo che i costruttori tengano conto della possibilità dell'utilizzo di materiali isolanti realizzati con scarti della filiera agroforestale o alimentare, in modo da ridurre la quantità di energia consumata, ad esempio come per il caso di prodotti riciclati, i quali non possono essere definiti sostenibili se durante il processo di riciclo viene consumata una quantità considerevole di energia.

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

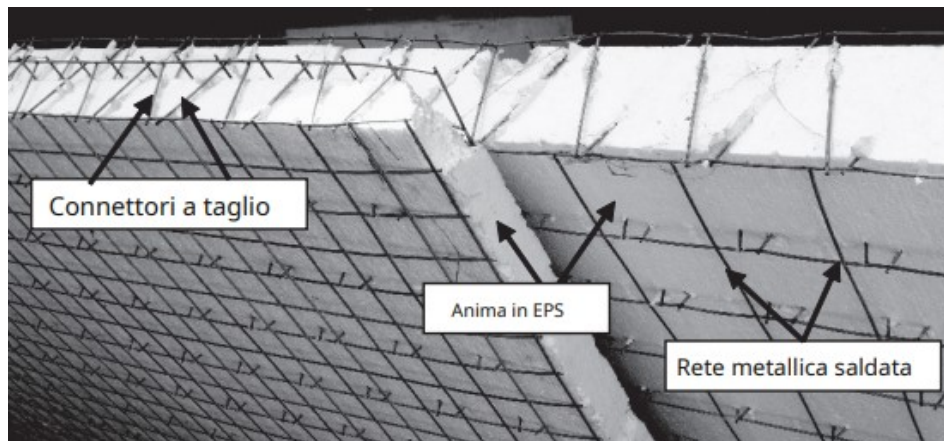
## 2.2.3 Connettori

I connettori servono per unire le due pelli dei pannelli sandwich in cemento armato, contribuendo a garantire un comportamento composito di essi.

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

La disposizione di essi assume un ruolo fondamentale nello studio del comportamento strutturale dei pannelli perché, se i connettori vengono messi in modo perpendicolare alle reti esterne, essi non trasferiscono forze di taglio, mentre se messi a traliccio contribuiscono molto più efficacemente al carico di taglio.

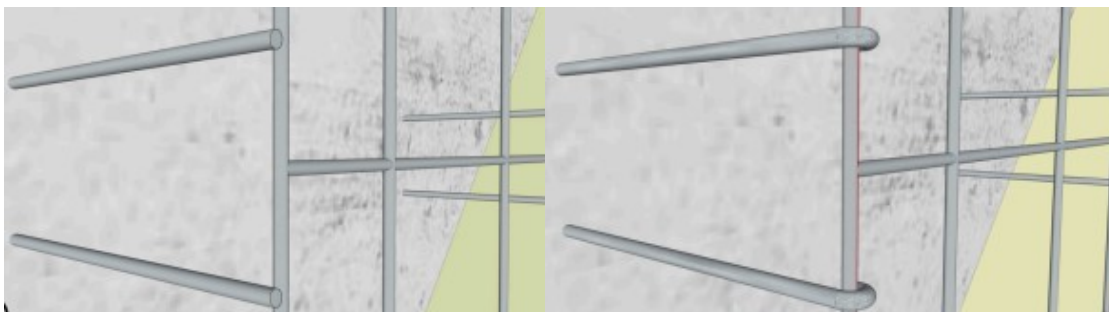
Uno dei sistemi di connettori più utilizzati è quello a traliccio, dove i connettori sono inclinati a  $45^\circ$  e sono collegati alle reti metalliche delle cortine esterne mediante saldatura.



*Figura 8 - Connettori a traliccio*

Recentemente da diversi studi e test sperimentali condotti, 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 vista la grossa quantità di energia richiesta per l'assemblaggio, un basso livello di automazione con la possibilità di essere realizzato da manodopera non qualificata, il che vorrebbe dire una grande diffusione anche nei paesi in via di sviluppo.



(a)

(b)

*Figura 9 - Connettori saldati (a), Connettori piegati (b)*

I connettori svolgono un ruolo primario nel trasferimento del taglio da una cortina all'altra, ed in base a ciò è possibile distinguere il comportamento dei pannelli in base 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 flessionali 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.

## **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 10 - Esempio di un'abitazione realizzata con pannelli sandwich*

## **2.4 Stato dell'arte – Ricerche e studi condotti**

Il comportamento meccanico dei pannelli sandwich in c.a. è complesso da analizzare, perché è necessario tenere conto della non linearità dei materiali, dell'effettivo trasferimento di taglio dei connettori e delle varie interazioni fra i componenti. Riguardo il comportamento eccentrico di tali strutture non ci sono moltissime informazioni per via dell'elevato costo del collaudo in scala reale.

Per approfondire questa tematica si fa riferimento alle varie indagini sperimentali condotte nel tempo. Nell' articolo [1] si parla dello studio sperimentale condotto da J. Daniel Ronald Josephy et al., dove è stato valutato il comportamento dei pannelli sandwich in calcestruzzo alleggerito sotto compressione assiale. Sono state testate quattro diverse configurazioni di pannelli, a compressione assiale, con diversi spessori del pannello e dimensioni della rete saldata utilizzate come rinforzo in blocchi di calcestruzzo di 3 m di altezza. Lo scopo di questa ricerca era valutare l'apporto dei cordoli sul pannello e dalle indagini condotte si è visto che la presenza di essi aumentava l'azione composita dei pannelli. Inoltre, si è visto che la posizione della sezione in cui avveniva la rottura è dipendente dal rapporto di snellezza del pannello. Diversi studi sulla capacità di resistenza assiale dei pannelli sandwich compositi rinforzati prefabbricati sono stati effettuati da A. Benayoune et al. Come possiamo osservare dall' articolo [2], ai fini di una valutazione del comportamento assiale di questo sistema strutturale sono state registrate e analizzate la risposta al carico-deformazione, la variazione delle deformazioni attraverso lo strato isolante, le deformazioni nei connettori a taglio, l'aspetto e la propagazione delle crepe sotto carico crescente. Dalla sperimentazione si è visto che la rottura tipica di tutti quei provini testati assialmente avveniva per schiacciamento su una o entrambi le estremità del pannello. In alcuni dei pannelli sono state notate delle crepe orizzontali, le quali sono attribuibili a delle instabilità dei pannelli. Un risultato molto importante è quello riguardante la resistenza dei pannelli, che con l'aumentare del rapporto di snellezza diminuiva. Si è osservato una perdita di resistenza pari al 21% per un aumento del rapporto di snellezza ( $H/t$ ) da 10 a 20.

Benayoune ha condotto delle indagini sperimentali per studiare il comportamento a resistenza ultima di pannelli sandwich prefabbricati in calcestruzzo (PCSP) con connettori a taglio in acciaio, quando sottoposti a carico eccentrico.

Come si può notare nell' articolo [3], dai risultati ottenuti dalla sperimentazione anche in questo caso la principale modalità di rottura avviene per schiacciamento, le prime fessurazioni si sono viste per carichi corrispondenti a circa il 38% dei carichi di rottura. Come per i provini sottoposti a carico assiale anche per quelli sottoposti a carico eccentrico la capacità portante dei pannelli diminuisce in modo non lineare con l'aumento del rapporto di snellezza. Si è notata una diminuzione della resistenza del 38% passando da un rapporto di snellezza ( $H/t$ ) di 10 a 20. Per queste configurazioni di pannelli testati i connettori a taglio erano disposti a traliccio e dai risultati si è riscontrato un loro livello di deformazione ben al di sotto della deformazione di snervamento. Inoltre, grazie all'utilizzo di questa tipologia di connettori è stata garantita un'azione composita del pannello da inizio prova a cedimento.

Lo studio dell'influenza del rapporto di snellezza sulle prestazioni strutturali del pannello composito in calcestruzzo espanso leggero è stato ampiamente affrontato nel documento [4], dove sono stati effettuati sei test in scala reale di pannelli con stessa altezza, ma spessore variabile, sotto carico di compressione eccentrico. In questa pubblicazione sono stati analizzati i profili carico-deformazione, le curve carico-flessione l'influenza del rapporto di snellezza, la deformazione, i modelli di fessurazione, le modalità classiche di rottura sotto carichi di compressione incrementali e la resistenza al carico di compressione. Il comportamento strutturale dei pannelli sandwich prefabbricati in calcestruzzo (PCSP) dipende dalla resistenza e dalla rigidità del connettore meccanico a taglio, che fornisce rigidità e taglio, garantendo un comportamento composito del pannello. Utilizzando connettori a taglio continuo a forma di traliccio questo comportamento è quasi assicurato. Ciò che influenza inoltre il raggiungimento di questa prestazione è l'interazione tra gli strati di calcestruzzo e lo strato centrale d'isolante.

Per lo svolgimento dei vari test è stato impiegato un telaio principale in acciaio in linea con lo standard ASTM-E72, il quale è stato fissato ad un pavimento in cemento armato mediante viti rigide. Inoltre, ogni campione analizzato è stato installato verticalmente con l'estremità superiore bloccata e quella inferiore fissata. Per garantire la perfetta verticalità è stato impiegato un righello di livellamento. Per evitare il movimento laterale o l'oscillazione dei campioni durante la prova sono stati adottati degli strumenti di supporto laterale. Per sottoporre i provini a compressione è stato impiegato un martinetto idraulico in corrispondenza del bordo superiore con una capacità di 2000 kN. Per distribuire uniformemente il carico è stata adottata una trave saldata ad I. La configurazione del telaio impiegata,



come è possibile osservare dalla Fig. 11, è simile a quella che è stata utilizzata per la sperimentazione analizzata in questo elaborato di tesi.

Attraverso le curve di carico-flessione ottenute elaborando i dati dell'indagine sperimentale si è notato che i pannelli con spessore maggiore hanno un comportamento meno plastico di quelli più sottili. Per questi ultimi è stato osservato un cedimento per instabilità mentre quelli più spessi la modalità di rottura più frequente è quella di schiacciamento in corrispondenza del bordo superiore o inferiore. Per quanto riguarda le curve carico-deformazione si è registrato un comportamento lineare delle cortine del calcestruzzo fino a quando è avvenuta la prima crepa. Dopodiché le deformazioni sono aumentate sempre di più fino a quando il comportamento dei pannelli è diventato non lineare.

La capacità portante ultima dei pannelli testati è diminuita di circa il 111% quando il rapporto di snellezza ( $h/t$ ) è aumentato da 13,33 a 28,57. Tuttavia, la diminuzione dei rapporti di snellezza da 28,57 a 13,33 ha aumentato dell'89% i valori di carico massimo portante dei pannelli con diverso spessore.



*Figura 11 - Configurazione del telaio per la prova di compressione*

Per lo studio del comportamento meccanico di pannelli sandwich in c.a. sottoposti a compressione eccentrica importante è l'articolo [5], nel quale è stata condotta un'indagine sperimentale su questo tipo di sistema costruttivo completato in situ con connettori non a taglio. In questa sperimentazione sono stati testati pannelli con diverso spessore della cortina interna di calcestruzzo. Inoltre, sono stati sottoposti a prova due tipi di pannelli, uno con lo strato di polistirene ondulato e uno non ondulato con metà dei connettori impiegati per il primo pannello. La configurazione adottata Fig.12 prevede un telaio principale sul quale poi i pannelli verranno posizionati. L'estremità inferiore di essi è fissata, mentre l'estremità superiore è vincolata, per evitare dei movimenti laterali.



*Figura 12 - Configurazione e strumentazione di prova*

Dai risultati ottenuti si evince che il carico ultimo a compressione eccentrica dei pannelli diminuisce con l'aumentare del rapporto di snellezza ( $h/t$ ). I due strati di calcestruzzo fin dall'inizio della prova si comportano diversamente, uno strato si accorcia mentre l'altro si allunga. Dalla campagna sperimentale e le simulazioni numeriche si è notato un parziale comportamento composito del pannello, dovuto anche alla presenza di travi di irrigidimento in cemento armato alle estremità, nonostante per lo strato interno di esso sono stati impiegati connettori non a taglio.

### **3 Inquadramento normativo dei pannelli sandwich**

### **3.1 Inquadramento normativo dei pannelli sandwich**

Il sistema costruttivo oggetto di studio in questo elaborato di tesi sta occupando un ruolo molto importante nel mercato edilizio, grazie alle ottime prestazioni che è in grado di fornire, sia in termini di isolamento termico, che a livello strutturale, e soprattutto per i vantaggi connessi al suo utilizzo.

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 riportato.

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.

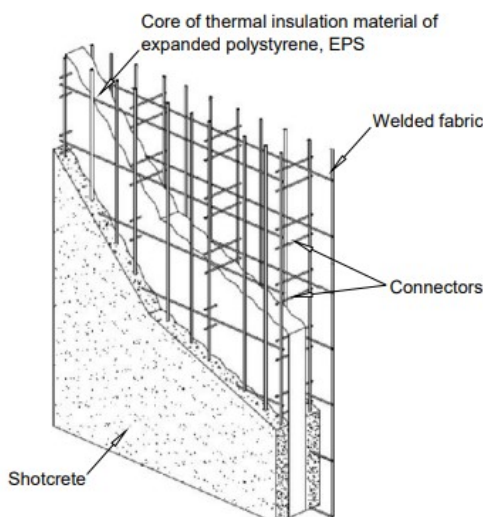
I provini testati in questo elaborato di tesi forniti dalla ditta Emmedue fanno riferimento alla certificazione ETA europea, necessaria ai fini della marcatura CE del pannello. Inizialmente tramite

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.



**Figura 13 - Pannelli Emmedue**

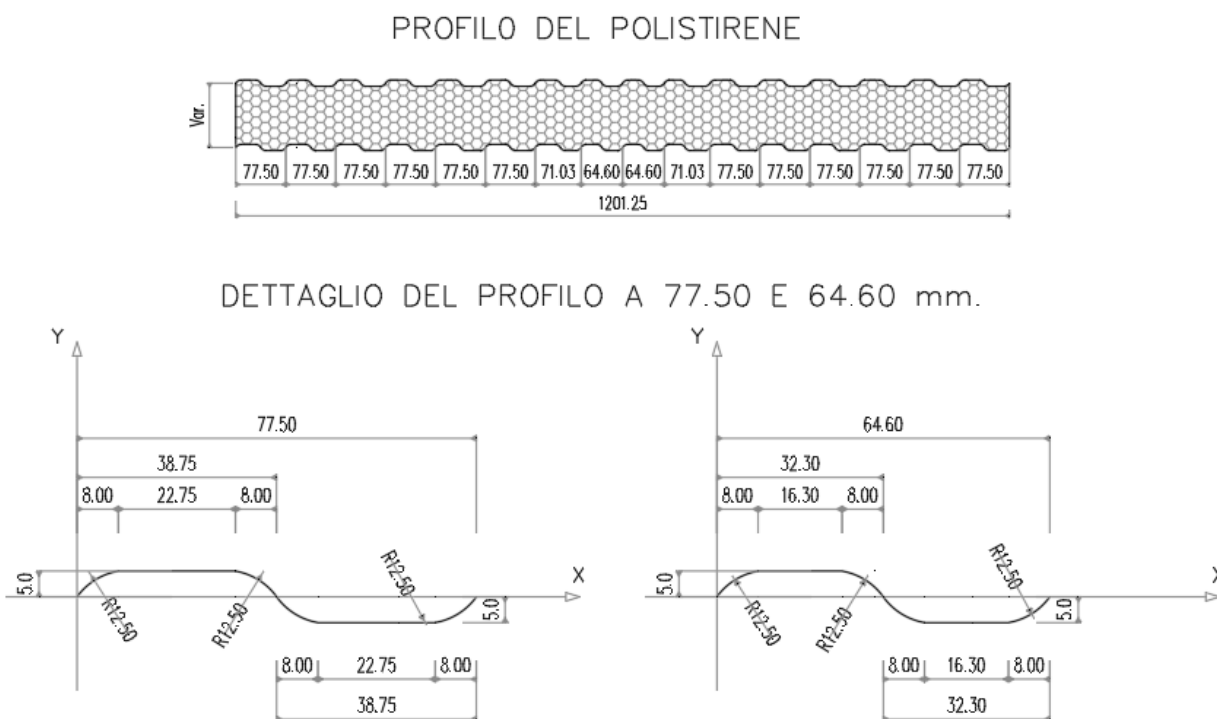
Le linee guida (EAD) contengono tutte le caratteristiche principali dei pannelli, resistenza alla compressione, resistenza al taglio, ai carichi concentrati, resistenza al fuoco, all'azione sismica e alla corrosione. Vengono anche descritte le caratteristiche principali degli elementi costituenti i pannelli,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

In america la certificazione è quella del DRJ, che è un ente accreditato in US a rilasciare certificazioni dei sistemi costruttivi (una sorta di ICC che però ha più valenza). Nel TER di DRJ sono riportate in tabella tutti i valori ammissibili con cui progettare le diverse pareti, ad esempio, variando altezza e spessore del pannello. I valori indicati sono dovuti all'analisi di prove effettuate presso un laboratorio Intertek e poi rielaborate direttamente dallo staff tecnico dell'ente. Per la determinazione della resistenza al fuoco si può fare riferimento alle linee guida presentate nell' ASTM E1 19-20.

### 3.2 Tecnologia costruttiva

La tecnologia costruttiva oggetto di studio, si fonda sull'utilizzo di pannelli modulari di polistirene, prefabbricati e armati in cantiere, come elemento di supporto per i successivi getti di betoncino strutturale.

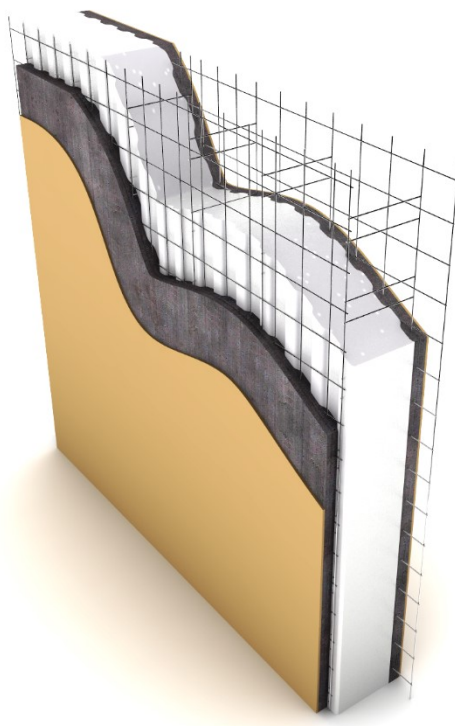
I campioni forniti dalla ditta Emmedue sono costituiti da pannelli modulari di EPS, aventi una larghezza e altezza fissa, rispettivamente di 120 cm e 300cm. La lastra di polistirene adottata presenta un andamento ondulato come si può osservare dalla seguente figura:



*Figura 14 - Profilo ondulato del polistirene*

Sui fronti esterni del pannello sono state installate due reti elettrosaldate in acciaio zincato, aventi diametro 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 perni metallici vengono introdotti all'interno della lastra di polistirene in fase di produzione. Successivamente per la realizzazione delle cortine esterne aventi uno spessore medio di 3,5 cm viene spruzzato il betoncino strutturale come si può vedere dalla Figura 15. Lo spritz beton deve essere applicato mediante apposite intonacatrici EMMEDUE o pompe a flusso continuo. La lavorabilità della miscela fresca e la pressione con cui questa viene spruzzata, sono importanti per ottenere la necessaria compattezza. La miscela di cemento e sabbia a maturazione avvenuta dovrà avere una

resistenza caratteristica di almeno 25 MPa.



*Figura 15 - Composizione del pannello sandwich*

### **3.3 Fasi di cantierizzazione**

In cantiere per la corretta posa in opera dei pannelli c'è da garantire un adeguato ancoraggio di essi alla fondazione attraverso la predisposizione di ferri di ripresa (indicativamente ferri  $\varnothing$  6-8 mm ogni 30-40 cm per una lunghezza fuori trave di almeno 40 cm).



*Figura 16 - Ancoraggio alla fondazione*

Un' altra fase importante è quella dello stoccaggio in cantiere dei pannelli, per il quale deve essere predisposta un'area apposita. È bene non adagiare i pannelli a diretto contatto con il terreno per evitare problemi di aderenza dell'intonaco. 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 filo di ferro cotto.

Per garantire la continuità tra gli elementi, i pannelli Emmedue sono dotati, da entrambi i lati, di una rete di sormonta che permette di unire ciascun pannello alla rete del pannello adiacente. Il serraggio tra un pannello e quello adiacente può essere effettuato, oltre che mediante legature manuali, anche con l'utilizzo di macchine pneumatiche.

Durante il montaggio dei pannelli è fondamentale controllare la planarità delle pareti e la verticalità degli spigoli mediante l'utilizzo di un livello o del comune filo a piombo. Per garantire la planarità si può far ricorso a profili scatolari in alluminio e puntelli diagonali regolabili da ancorare saldamente a terra. In particolare, per normali interpiani, è sufficiente un solo scatolare da posizionare in prossimità della sommità dei pannelli e puntelli inclinati in ragione di 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 alle operazioni di completamento con spritz beton. Solo dopo l'applicazione della prima mano di spritz beton nella parte libera si procederà alla rimozione dei puntelli e all'applicazione di spritz beton nel lato precedentemente occupato dai puntelli.



*Figura 17 - Disposizione dei puntelli diagonali per la posa in opera dei pannelli*

Tutti gli angoli esterni ed interni della costruzione, sia verticali che orizzontali vengono rinforzati con delle reti angolari per garantire la continuità strutturale. Lungo il perimetro delle aperture di porte e



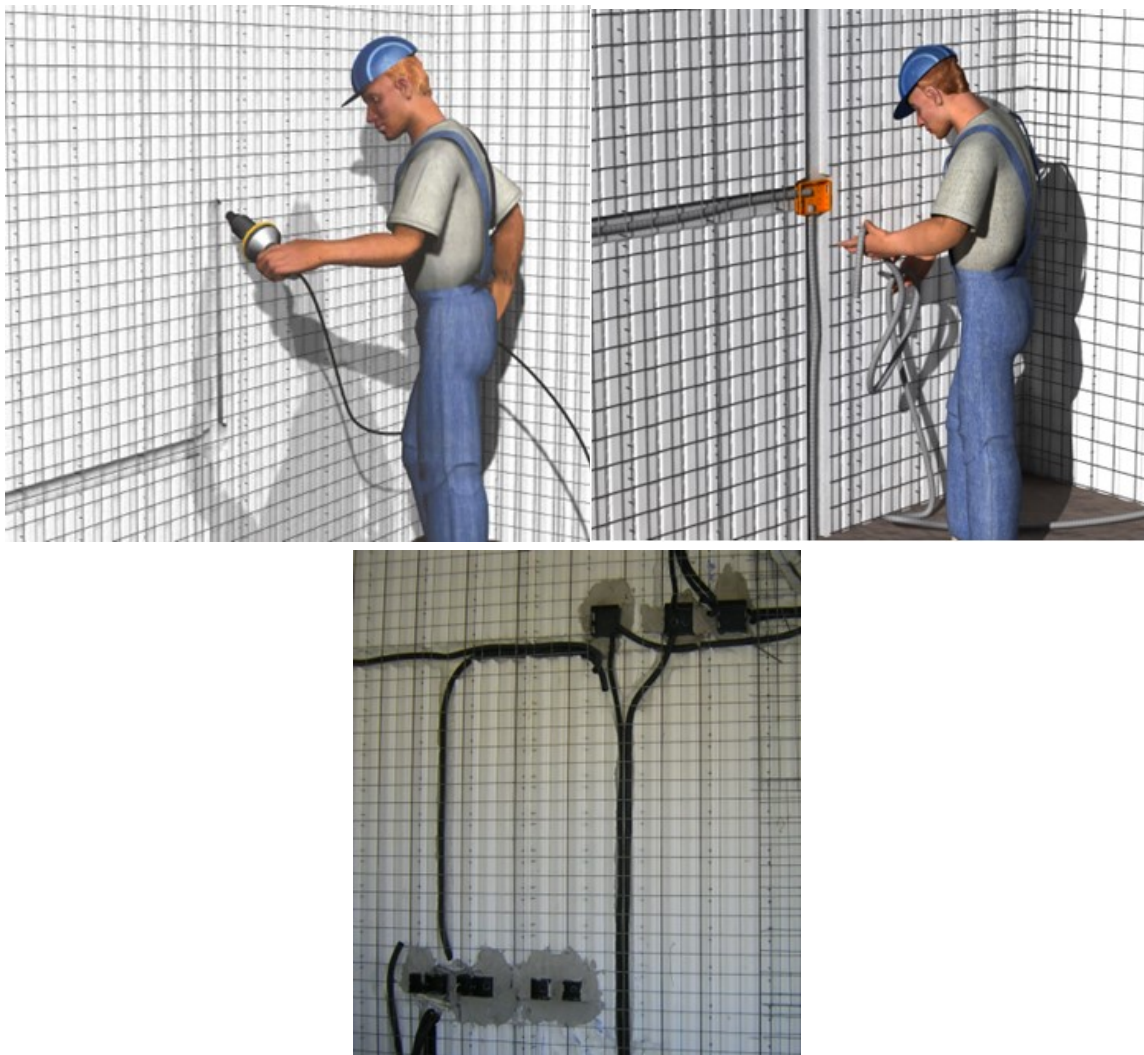
finestre verranno disposte reti di rinforzo ad U o, in alternativa, doppie reti angolari a chiusura del pannello.

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

Dopo aver realizzato il montaggio dei pannelli e prima del completamento con lo spritz beton è di notevole importanza l'aspetto che riguarda 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 l'isolante Nel caso in cui non fosse possibile l'inserimento degli impianti all'interno della parete, si realizzeranno dei cassonetti.

Se i tagli effettuati in corrispondenza delle reti siano maggiori rispetto agli standard, prima del getto dello spritz beton è necessario ripristinare i tagli con reti di rinforzo.



**Figura 18 -** *Installazione degli impianti*

Una volta installati gli impianti su ciascun lato dei pannelli verticali viene spruzzato tramite intonacatrice uno strato di spritz beton applicato 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 completare lo spessore totale.

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.

In figura 19 e 20 vengono mostrate le fasi del getto dello spritz beton e dell'applicazione dello strato di finitura.



*Figura 19 - Getto di completamento dello spritz beton*



*Figura 20 - Strato di finitura*

## **4 Materiali e metodi prova**

## **4.1 Descrizione dei provini**

L'indagine sperimentale svolta in questo lavoro di tesi ha previsto la caratterizzazione meccanica di pannelli sandwich in c.a. gettato in opera quando sottoposti a compressione eccentrica.

I pannelli sono stati realizzati mediante la tecnica di spruzzatura del calcestruzzo utilizzando come materiale di supporto l'isolante termico. 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. Molto interessante è valutare quali parametri influenzano di più il carico ultimo di rottura, osservare le varie modalità di rottura e la loro posizione. La configurazione di prova adottata per testare i provini a compressione eccentrica è stata sempre la stessa tranne nel caso dei primi tre in cui nell'estremità inferiore non sono state adottati dei profili in acciaio in corrispondenza del cordolo. I pannelli soggetti a prova sono stati nove, divisi in tre gruppi, i quali differivano tra loro per il diverso spessore del pannello.

Le cortine di calcestruzzo al loro interno sono costituite da reti elettrosaldate connesse tra loro mediante connettori posizionati perpendicolarmente alle reti esterne, non garantendo così un comportamento completamente composito del pannello, ma semicomposito.

Dalla sperimentazione effettuata nel Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture del dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura (DICEA) in collaborazione con la ditta Emmedue srl, è particolarmente utile verificare se il comportamento dei pannelli riscontrato corrisponda o sia simile al comportamento dedotto dalle normative vigenti, e dalle precedenti sperimentazioni e studi.

## **4.2 Prove di compressione eccentrica**

Per le prove di compressione eccentrica si andranno a valutare i parametri più significativi registrati durante l'applicazione del carico eccentrico. Il carico, quindi, non viene applicato in corrispondenza dell'asse del pannello ma con una certa eccentricità che fa sì che il pannello lavori a presso-flessione. I provini analizzati sono alti 3000 mm e per ogni provino si valuta la tensione di compressione eccentrica in corrispondenza della perdita della linearità dei pannelli, quella massima, e le conseguenti deformazioni.

### **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  $\sigma_c$  [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  $\varepsilon$  [mm/mm] sono calcolate come illustrato di seguito:

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

dove:

$\Delta l$  = 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;

$\varepsilon_{max}$  = deformazione massima elastica

## 4.2.2 Specifiche degli elementi testati

TIPOLOGIA PANNELLI	SPESSORE PARETE FINITA [cm]	PANNELLO ISOLANTE EPS		CONNETTORI $\Phi$ 3 mm		GEOMETRIA PARETE		PROVE	
		CODICE	SPESSORE [cm]	TIPO	NUMERO [n°/cm]	LARGHEZZA [cm]	ALTEZZA [cm]	TIPO	NUMERO PROVINI
A	21	PSM140	14	DOPPI	2/14-15	120	300	ECCENTRICA	3
E	19	PSM120	12	DOPPI	2/14-15	120	300	ECCENTRICA	3
F	25	PSM180	18	DOPPI	2/14-15	120	300	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, aventi tutti la stessa forma, che variavano tra di loro per il diverso spessore dello strato di isolante.

I provini erano caratterizzati da una forma rettangolare di dimensioni  $w=120$  cm e  $h=300$  cm. In corrispondenza dell'estremità inferiore e superiore erano presenti dei cordoli alti 10 cm estesi per tutta la lunghezza del pannello, gettati nello stesso momento del getto effettuato per la realizzazione del pannello, in modo da non creare problemi di discontinuità dovuti alle riprese di getto.

Per l'identificazione dei tre gruppi di pannelli sono state utilizzate tre lettere: A, E, F. Poi visto che ogni gruppo è composto da tre pannelli, ad ognuno di essi è stata data una numerazione che va da uno a tre.

I primi tre provini testati A1, E1, F1 sono sprovvisti dei profilati metallici HEA nella zona inferiore, i quali sono stati impiegati per tutti gli altri campioni.



*Figura 21 - I primi tre provini testati*

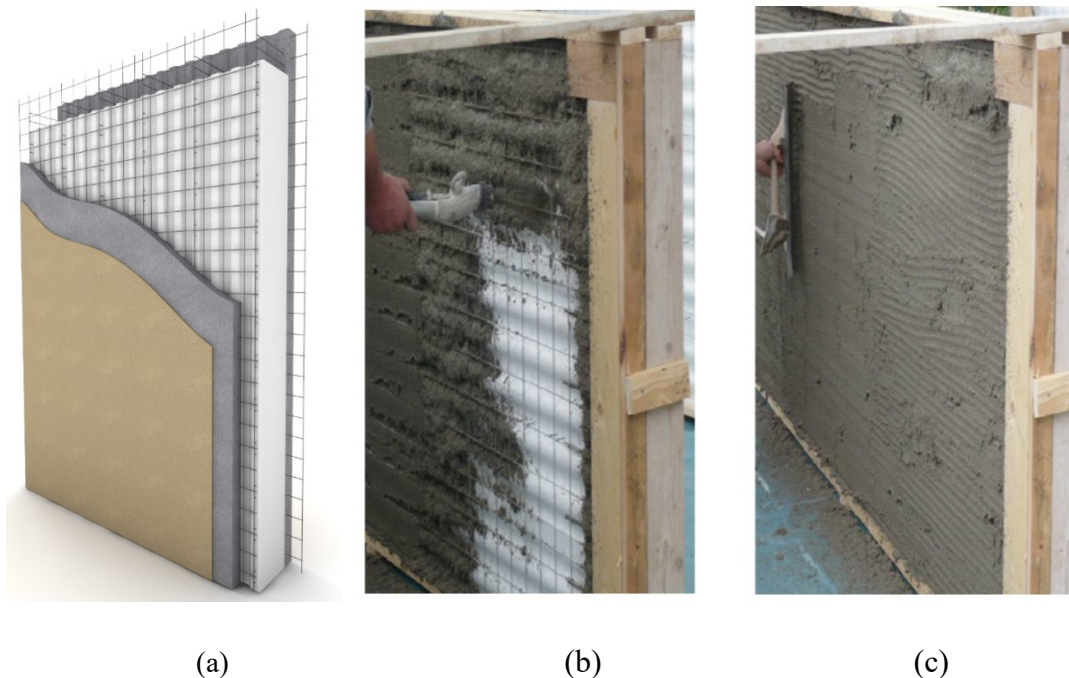
Di seguito sono elencate le caratteristiche costruttive comuni dei tre gruppi di pannelli:

- Pannello sandwich di tipo A 120 cm x 300 cm: costituito da un foglio di polistirene di spessore 14 cm avente un profilo ondulato di densità di circa 15-25 kg/m<sup>3</sup>, 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 posizionati ogni 140/150 mm (circa 70 per mq);
- Pannello sandwich di tipo E 120 cm x 300 cm: costituito da un foglio di polistirene di spessore 12 cm avente un profilo ondulato di densità di circa 15-25 kg/m<sup>3</sup>, 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



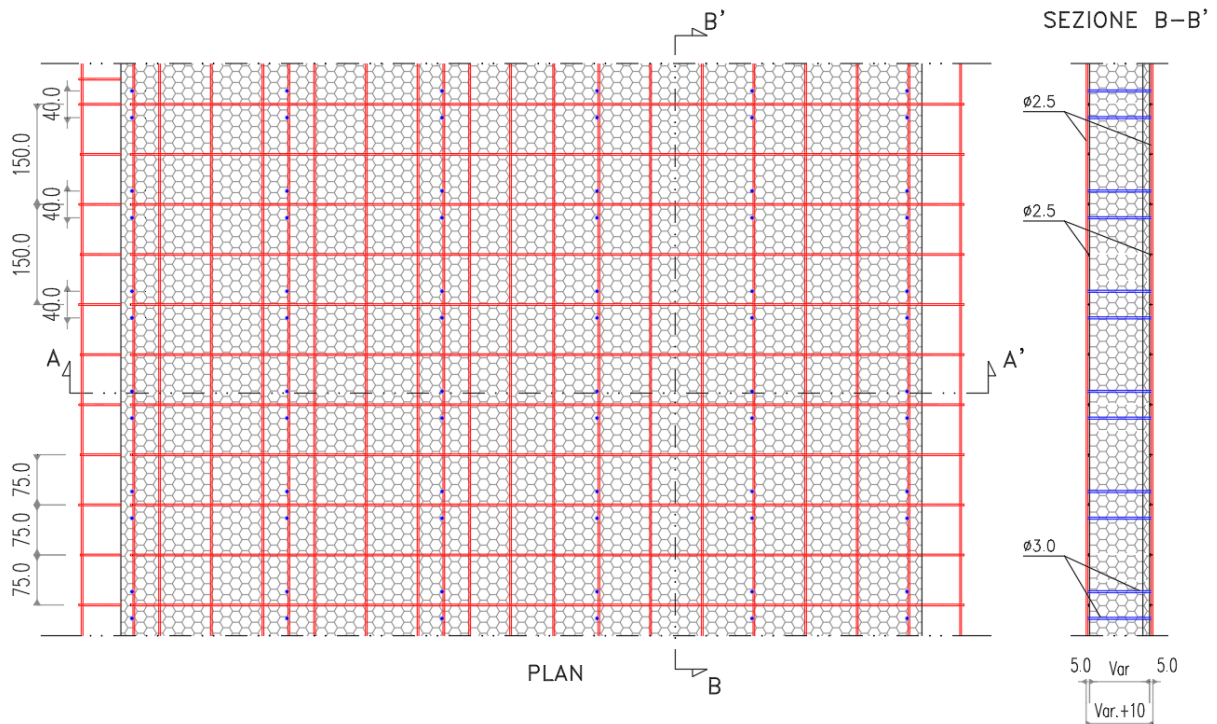
esterne del foglio, prima fino alla rete metallica e poi fino allo spessore finale dello strato di calcestruzzo, utilizzando strumenti manuali o pompe. Precisamente è stato impiegato l'RR 32 della società Bortolo, composto da sabbie classificate, fibre anti-ritiro ed additivi per migliorare la lavorazione 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 posizionati ogni 140/150 mm (circa 70 per mq);

- Pannello sandwich di tipo E 120 cm x 300 cm: costituito da un foglio di polistirene di spessore 18 cm avente un profilo ondulato di densità di circa 15-25 kg/m<sup>3</sup>, 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 posizionati ogni 140/150 mm (circa 70 per mq).

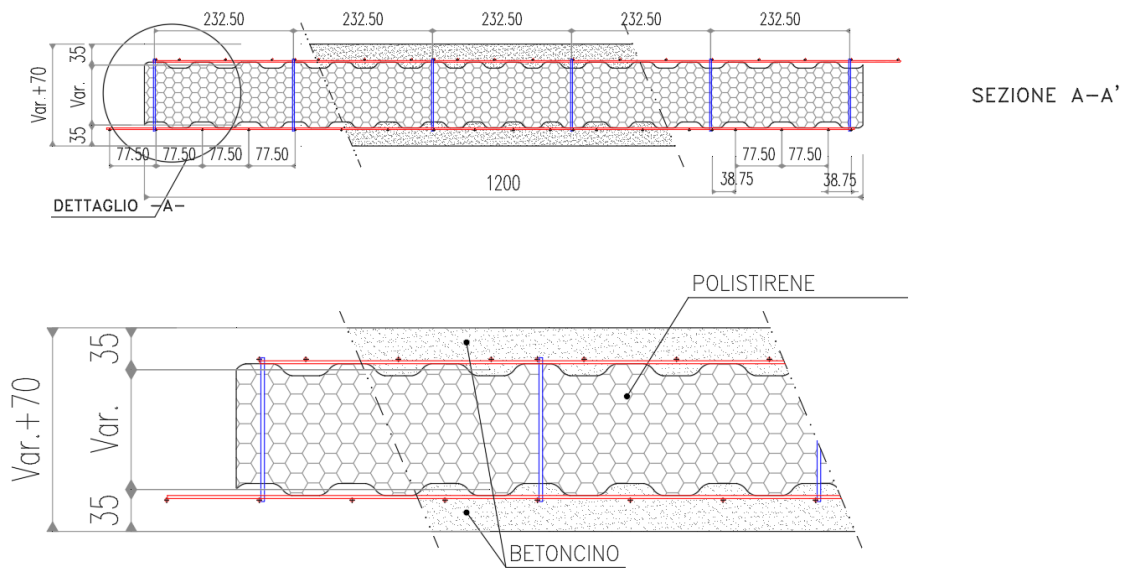


**Figura 22** - Composizione pannelli sandwich (a), spruzzatura di calcestruzzo sulle superfici esterne fino alla rete metallica (b), spruzzatura fino allo spessore finale (c)

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



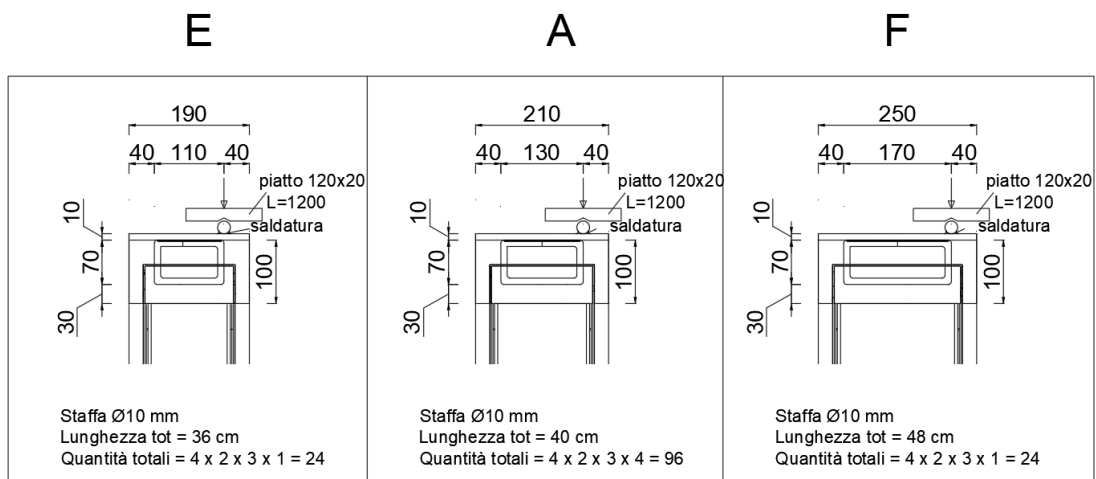
**Figura 23** - Planimetria e sezione della disposizione delle reti metalliche e connettori



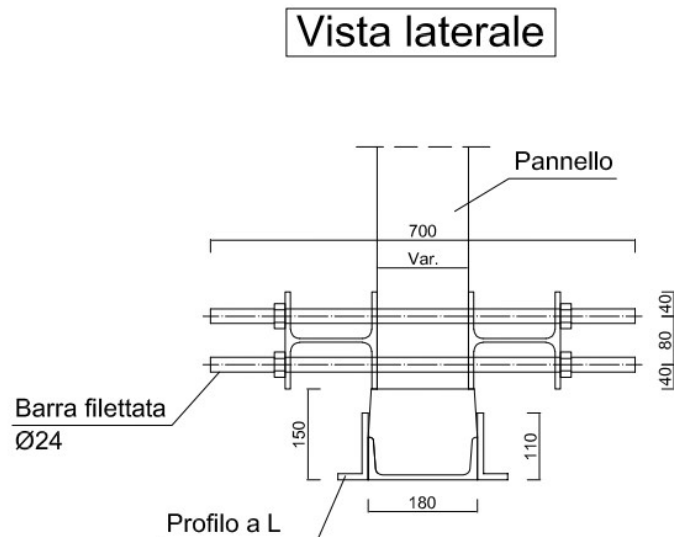
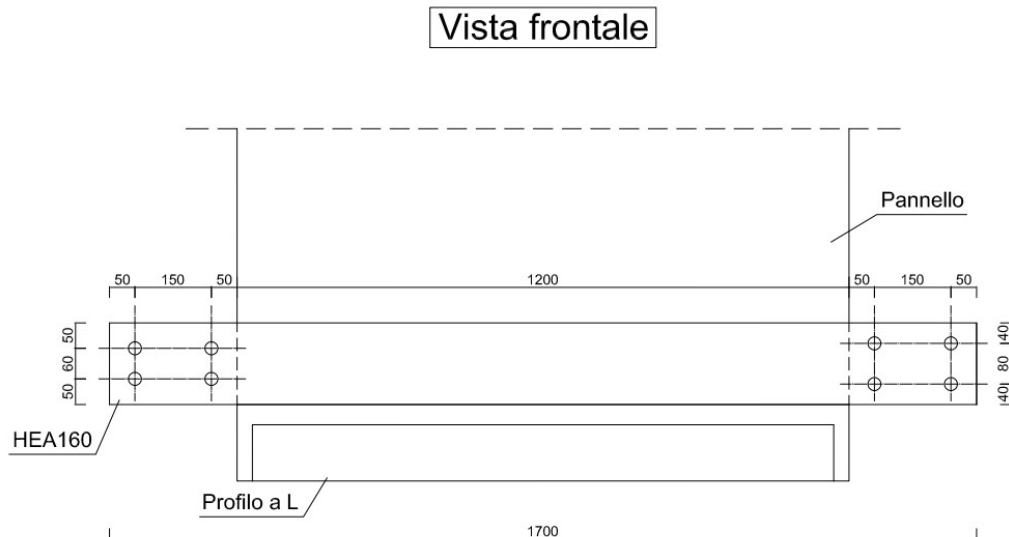
**Figura 24** - Rappresentazione della disposizione dell'armatura, dei connettori, e del profilo ondulato della lastra di polistirene



**Figura 25 - Armatura dei cordoli**



**Figura 26 - Particolare attacco cordoli con tondino e piastra saldati**



*Figura 27 - 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, che sono fissati ad un telaio. I martinetti idraulici gestiti tramite una centralina idraulica dotata di trasduttore di pressione per misurare il carico applicato, si esercita una pressione al fluido all'interno dei martinetti che causa l'innalzamento dei pistoni per l'applicazione del carico al provino. Tra i pannelli e i martinetti sono stati interposti dei dischi metallici e una piastra in acciaio per distribuire uniformemente il carico come possiamo vedere nella Figura 28 (a);
- sono stati utilizzati dei 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  $\pm 50\text{mm}$ , 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 27, 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
- piastra alla base saldata, utile per il fissaggio del pannello;
- catena posizionata in prossimità dei profili metallici dei cordoli, 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 A1, E1, F1.

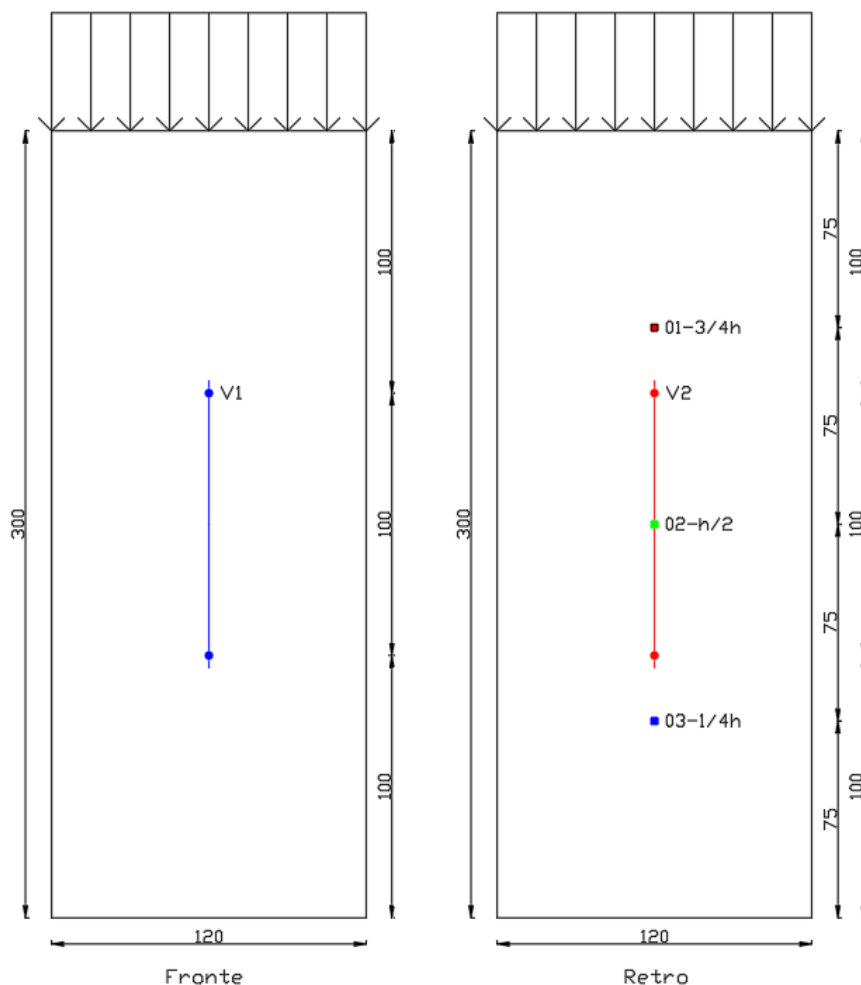
Di seguito sono riportate tutte le immagini necessarie per una chiara comprensione della strumentazione utilizzata nelle prove.



(a)

(b)

**Figura 28** - Martinetti che applicano il carico sui dischi, che sono appoggiati sulla piastra (a), collegamento del pannello con la piastra d'acciaio saldata (b)

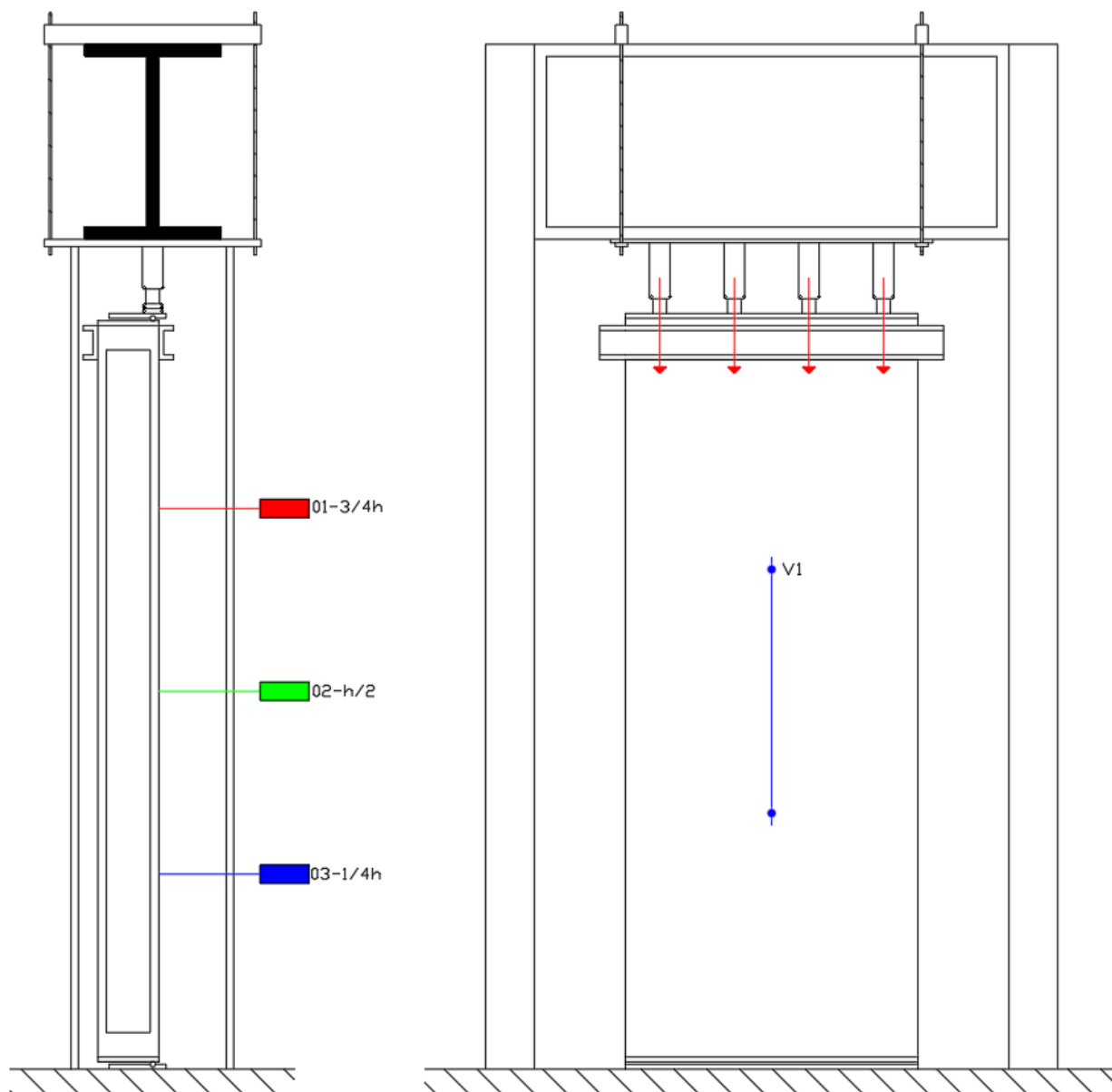


**Figura 29** - Collocazione dei trasduttori sulle facce fronte e retro

Per lo svolgimento della prova è stato adottato un telaio in acciaio caratterizzato da una traversa rigida, che funge da strumento di contrasto durante l'applicazione del carico.

I pannelli forniti dalla ditta Emmedue srl sono stati disposti verticalmente, poggiati su una piastra in acciaio saldata al solaio come possiamo vedere dalla figura 28 (b), al fine di permettere la rotazione del provino sottoposto a compressione eccentrica, e vincolati in sommità per evitare spostamenti laterali durante l'applicazione del carico. La prova è stata condotta applicando il carico a 4 cm dall'esterno della cortina in c.a.

I test a compressione eccentrica condotti per i primi tre provini presentano una configurazione strumentale come quella illustrata in Figura 30:



**Figura 30** - Prove di compressione eccentrica primi tre provini: configurazione e strumentazione di prova

Per la verticalizzazione dei pannelli è stata usata una livella, andando a tentativi fino a quando non fosse in bolla, mentre per la movimentazione di essi sono state utilizzate delle fasce fatte girare attorno ai profili metallici in corrispondenza dei cordoli e agganciate al carro ponte grazie al quale è stato possibile portare i provini vicino alla postazione.

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



(a)

(b)

*Figura 31 - Setup della prova frontale (a), setup della prova retro(b)*

Per i restanti sei provini sono stati utilizzati dei profilati metallici aventi la funzione di confinare il cordolo inferiore come si può vedere dalle seguenti immagini.



*Figura 32 - Profilati metallici in corrispondenza del cordolo inferiore*





*Figura 33 - Setup della prova con i profilati metallici*

## **5 Risultati della sperimentazione**

## 5.1 Curve forza-spostamento

La prova di compressione eccentrica effettuata sui provini di dimensione (1200 x 3000 mm), è stata condotta applicando il carico a 4 cm dall'esterno della cortina in c.a.

Grazie ai trasduttori impiegati nella prova si è riuscito ad ottenere i valori degli spostamenti relativi ai vari carichi impressi dai martinetti ai campioni.

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* nel piano e fuori piano e le curve *Altezza-Spostamento*.

Spessore pannello serie E [mm]	M [kN*mm]	An [mmq]	e [mm]	J sezione reagenti [mm^4]	W [mm^3]	$\sigma_c$ [MPa]	$\epsilon[-]$
190	27553,9	228000	55	685900000	28960000	3,15	0,00088
190	30919,35	228000	55	685900000	28960000	3,53	0,00108
190	37725,05	228000	55	685900000	28960000	4,31	0,00161

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

CODICE PANNELLO	P [kN]	E [MPa]
E1	500,98	3578,10
E2	562,17	3271,59
E3	685,91	2677,66
VALORE MEDIO	583,02	3175,78

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

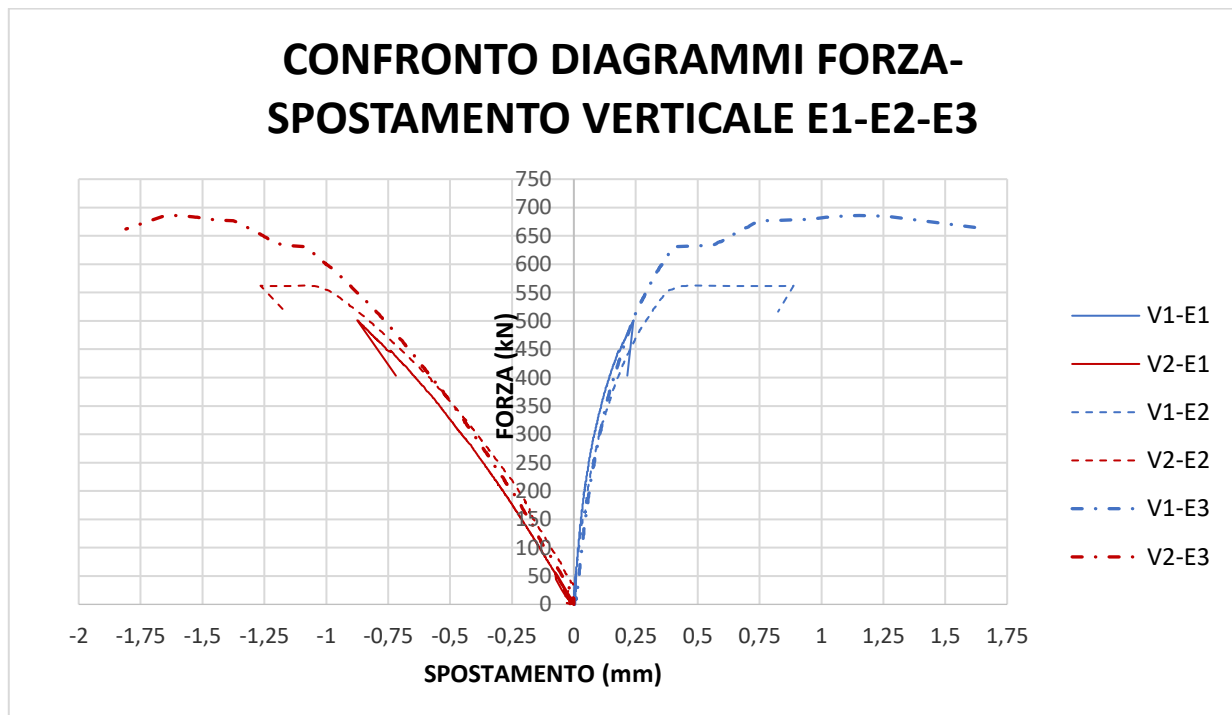
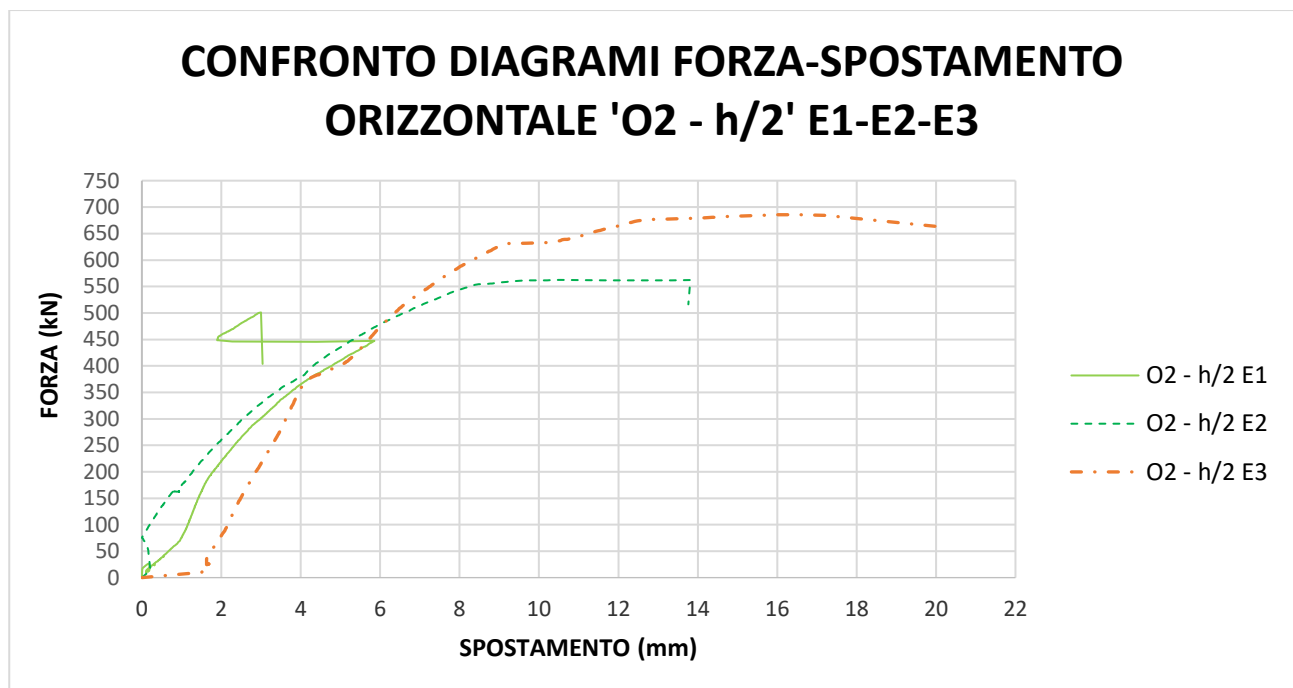


Figura 34 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento verticale E1-E2-E3

Le curve in Figura 33 mostrano un andamento lineare con il crescere del carico. Si può osservare che la parte frontale dei pannelli è soggetta a trazione (in blu), mentre la parte retrostante è soggetta a compressione (in rosso), la quale presenta sempre uno spostamento maggiore. Tutti e tre i provini sono caratterizzati da un comportamento fragile da come si può osservare dal grafico, 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. Il pannello E3 si è rotto in corrispondenza di un carico massimo (685,91 kN) più elevato rispetto agli altri due.



*Figura 35 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento orizzontale 'O2 - h/2' E1-E2-E3*

Per quanto riguarda il comportamento fuori dal piano dei pannelli si è fatto riferimento al trasduttore centrale posto nella parte retrostante del pannello. Dal grafico si può vedere come tutti e tre i provini presentano un primo tratto iniziale pressoché lineare, fino a quando poi subentrano le non linearità attribuibili a delle microfrazioni negli strati di calcestruzzo. Di seguito verranno mostrate le curve *Altezza-Spostamento*:

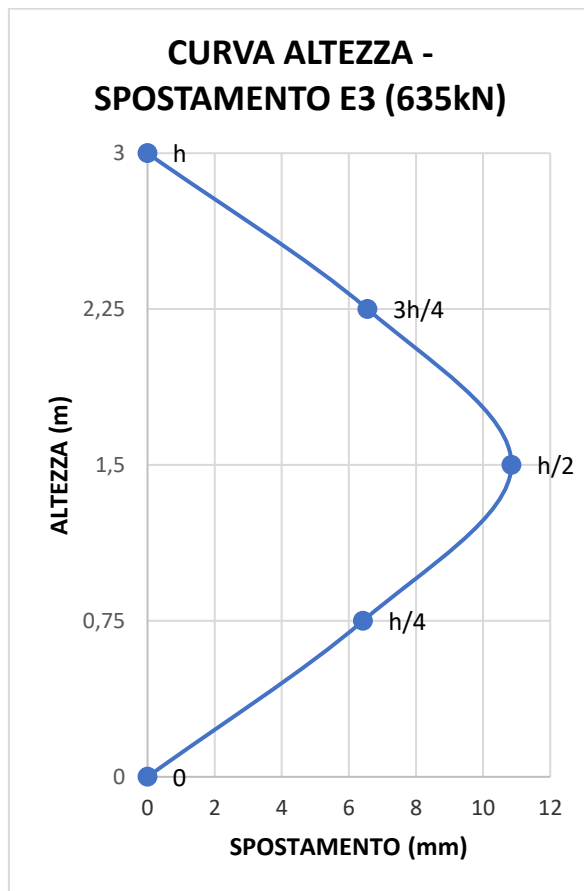
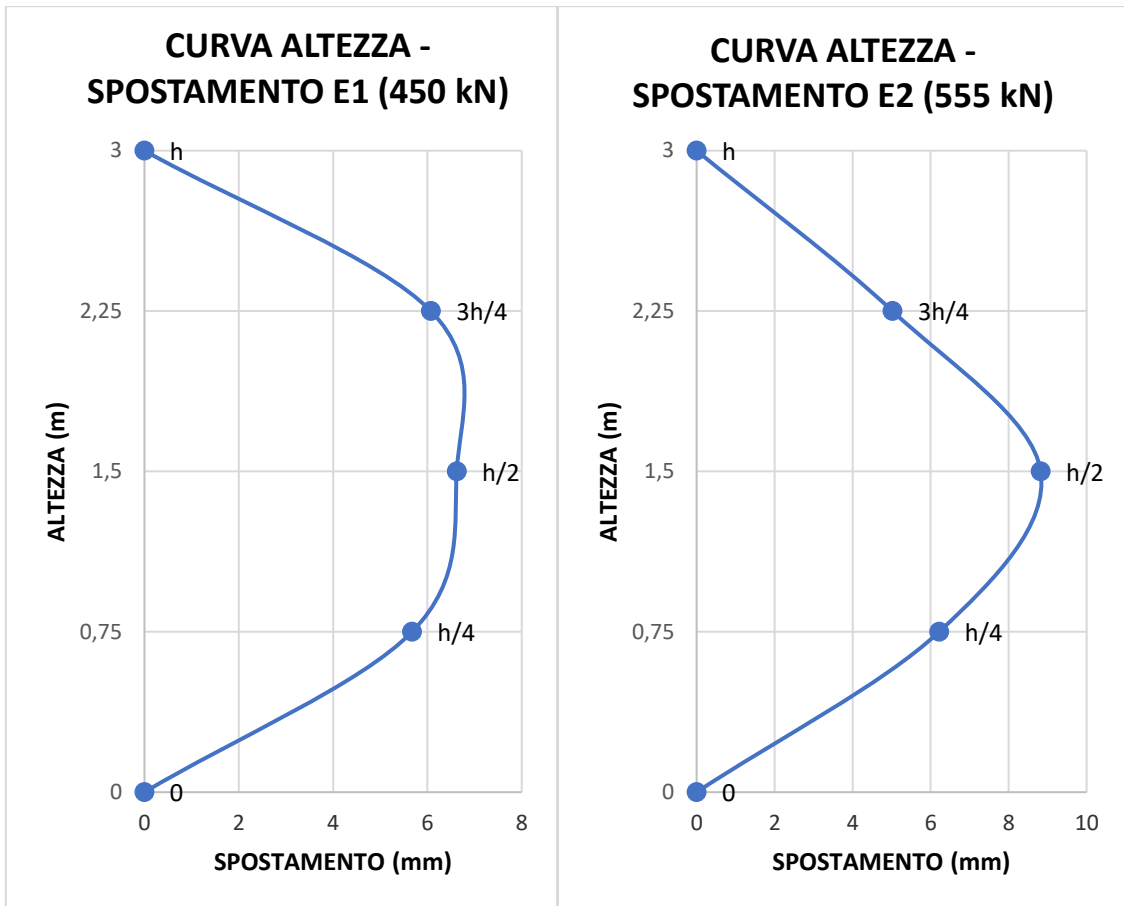


Figura 36 - Curve Altezza-Spostamento E1-E2-E3

Le curve che si possono osservare nella Figura 35 rappresentano gli spostamenti lungo l'altezza della parete del provino in funzione dei carichi massimi elastici, oltre i quali il comportamento dei provini diventa non lineare. I campioni presentano una maggiore flessione a metà dell'altezza.

Spessore pannello serie F [mm]	M [kN*mm]	An [mmq]	e [mm]	J sezione reagenti [mm^4]	W [mm^3]	$\sigma_c$ [MPa]	$\epsilon$ [-]
250	44891,05	300000	85	1562500000	59680000	2,51	0,00086
250	61238,25	300000	85	1562500000	59680000	3,43	0,0012
250	53408,05	300000	85	1562500000	59680000	2,99	0,00109

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

CODICE PANNELLO	P [kN]	E [MPa]
F1	528,13	2921,66
F2	720,45	2856,34
F3	628,33	2742,51
VALORE MEDIO	625,64	2840,17

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

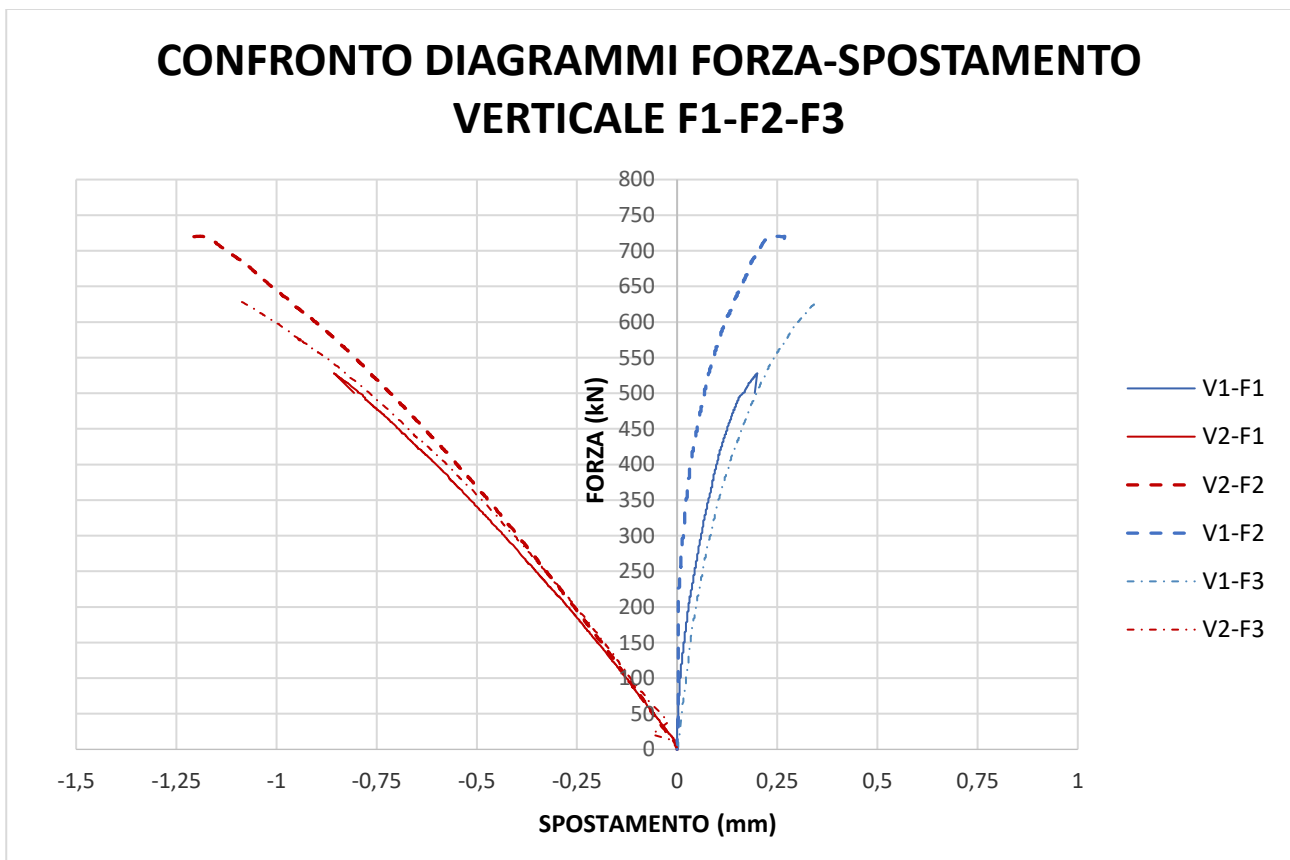
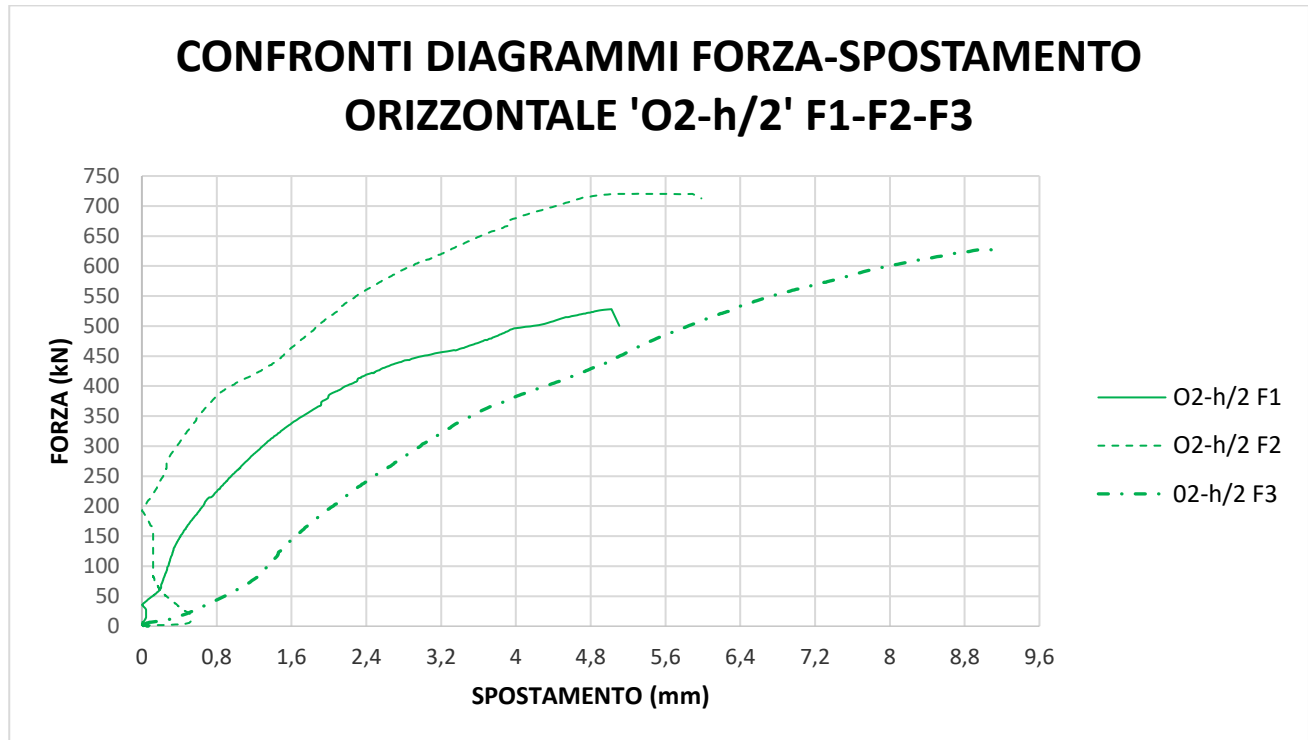


Figura 37 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento verticale F1-F2-F3

Le curve in Figura 36 mostrano un andamento lineare con il crescere del carico. Si può osservare che la parte frontale dei pannelli è soggetta a trazione (in blu), mentre la parte retrostante è soggetta a compressione (in rosso), la quale presenta sempre uno spostamento maggiore. Il pannello F2 si è rotto in corrispondenza di un carico massimo (720,45 kN) più elevato rispetto agli altri due.



*Figura 38 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento orizzontale 'O2 - h/2' F1-F2-F3*

Per quanto riguarda il comportamento fuori dal piano dei pannelli si è fatto riferimento al trasduttore centrale posto nella parte retrostante del pannello. Dal grafico si può vedere come tutti i provini, ad eccezione del provino F2 presentano un primo tratto iniziale pressoché lineare, fino a quando poi subentrano le non linearità attribuibili a delle microfrazioni negli strati di calcestruzzo.

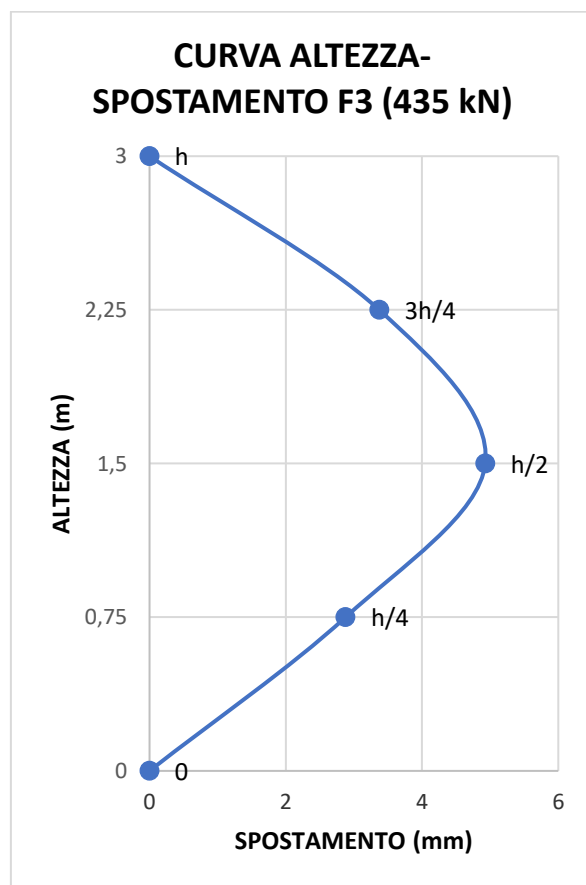
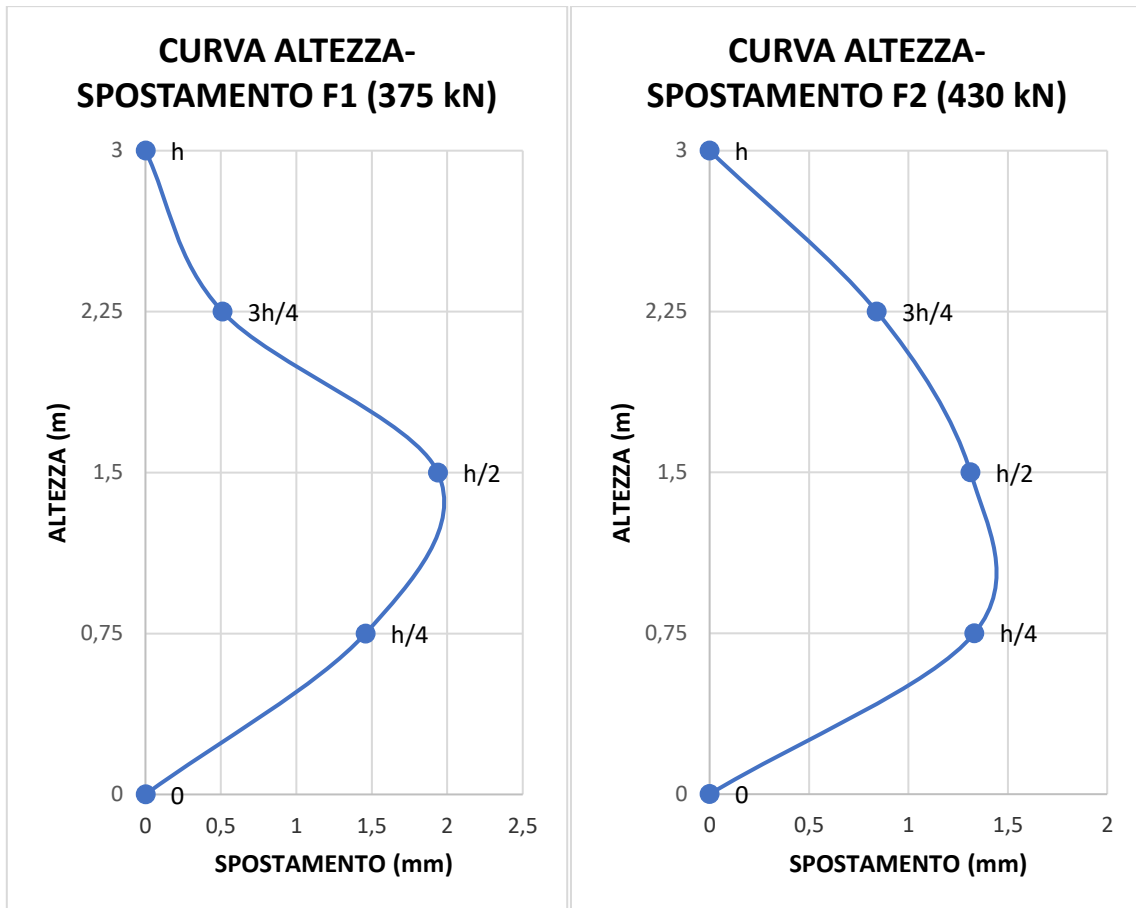


Figura 39 - Curve Altezza-Spostamento F1-F2-F3



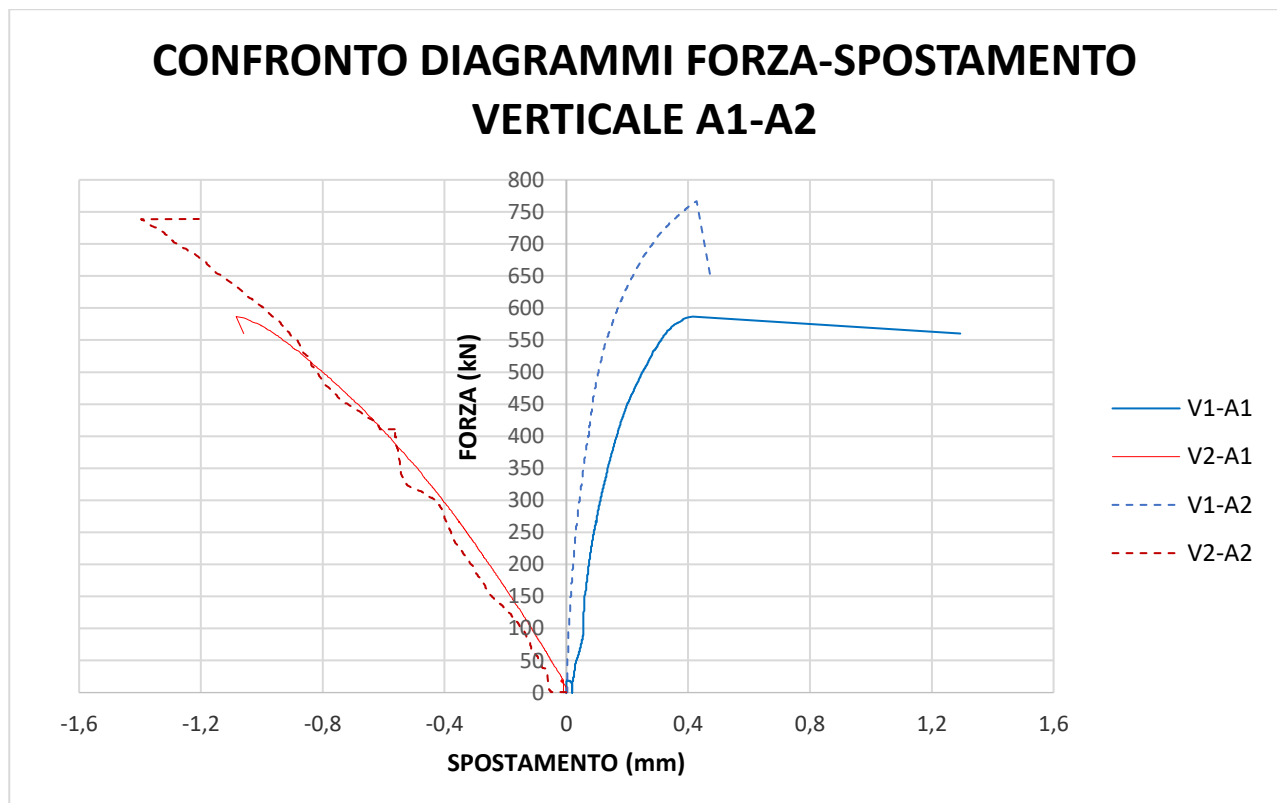
Le curve che si possono osservare nella Figura 38 rappresentano gli spostamenti lungo l'altezza della parete del provino in funzione dei carichi massimi elastici, oltre i quali il comportamento dei provini diventa non lineare. I campioni presentano diversi andamenti. Solamente F3 presenta un grafico simile a quelli visti in precedenza per la serie E con la massima flessione a metà altezza.

Spessore pannello serie A [mm]	M [kN*mm]	An [mmq]	e [mm]	J sezione reagenti [mm^4]	W [mm^3]	$\sigma$ [MPa]	$\epsilon$ [-]
210	38130,95	252000	65	926100000	41782857	3,24	0,00108
210	49840,05	252000	65	926100000	41782857	4,24	0,0014
210	130200	252000	65	926100000	41782857	5,58	0,00123

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

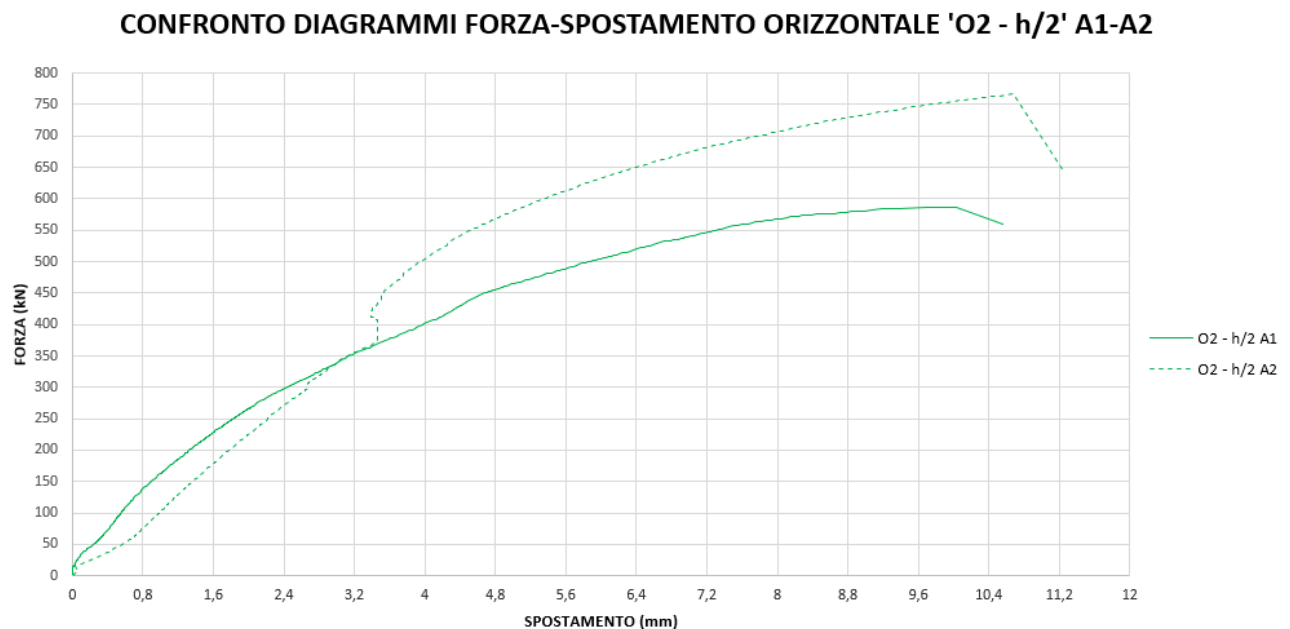
CODICE PANNELLO	P [kN]	E [MPa]
A1	586,63	3000,46
A2	766,77	3025,41
A3	620	4533,68
VALORE MEDIO	657,80	3519,85

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



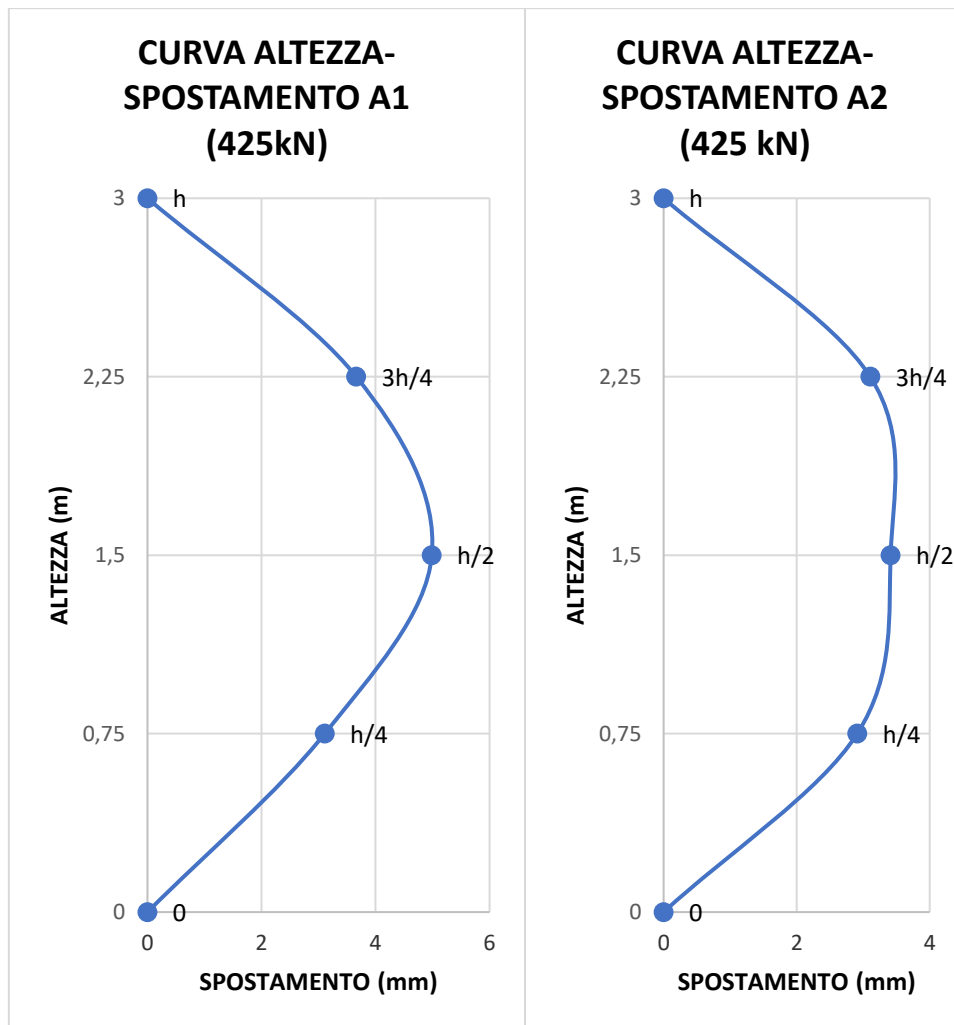
**Figura 40 - Confronto diagrammi Forza-Spostamento verticale A1-A2**

Le curve in Figura 39 mostrano un andamento lineare con il crescere del carico. Si può osservare che la parte frontale dei pannelli è soggetta a trazione (in blu), mentre la parte retrostante è soggetta a compressione (in rosso), la quale presenta sempre uno spostamento maggiore. I due provini sono caratterizzati da un comportamento fragile da come si può osservare dal grafico, 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. Il pannello A2 si è rotto in corrispondenza di un carico massimo (766,77 kN) più elevato rispetto agli altri due. Non è stato possibile ottenere il grafico relativo al pannello A3 per via di un problema elettronico riscontrato a fine prova. Per questo provino si è riuscito solamente a registrare il relativo carico massimo di rottura.



**Figura 41** - Confronto diagrammi Forza-Spostamento orizzontale 'O2 - h/2' A1-A2

Per quanto riguarda il comportamento fuori dal piano dei pannelli si è fatto riferimento al trasduttore centrale posto nella parte retrostante del pannello. Dal grafico si può vedere come i due provini, presentano un primo tratto iniziale pressoché lineare, fino a quando poi subentrano le non linearità attribuibili a delle microfrazture negli strati di calcestruzzo.



*Figura 42 - Curve Altezza-Spostamento A1-A2*

Le curve che si possono osservare in Figura 41 rappresentano gli spostamenti lungo l'altezza della parete del provino in funzione dei carichi massimi elastici, oltre i quali il comportamento dei provini diventa non lineare. I campioni presentano due andamenti simili è un uguale carico massimo elastico. Il pannello A1 rispetto a quello A2 è caratterizzato da una maggiore flessione in mezzeria.

## 5.2 Modalità di rottura

La sperimentazione svolta non ha portato alla rottura dei pannelli per pressoflessione in corrispondenza della mezzeria, tranne per il provino A3 in cui le crepe riportate sono riconducibili a questo tipo di meccanismo. Per i primi tre campioni A1, E1, F1 la rottura è avvenuta per piccola rotazione seguita da schiacciamento del cordolo inferiore del calcestruzzo, dovuto anche al fatto che non erano stati confinati mediante i profilati metallici HEA. Tale fenomeno ha condotto all'espulsione del calcestruzzo in prossimità dei cordoli. Lo stesso meccanismo si è verificato per i restanti provini, solamente che la zona interessata dalla rottura è stata quella in corrispondenza del cordolo superiore,

causata anche probabilmente dalla maggiore rigidità del cordolo inferiore. Di seguito sono riportate le immagini relativi alla rottura dei campioni.



*Figura 43 – Rottura per schiacciamento del cordolo inferiore del provino A1*



*Figura 44 - Rottura per schiacciamento del cordolo inferiore F1*



*Figura 45 - Rottura per schiacciamento del cordolo inferiore EI*



*Figura 46 - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore A2*



*Figura 47 - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore F2*



*Figura 48 - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore E2*





*Figura 49 - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore E3*



*Figura 50 - Rottura per schiacciamento del cordolo superiore F3*



(a)

(b)



(c)

*Figura 51 - Vista laterale delle lesioni per pressoflessione A3 (a), retro provino A3 (b), vista frontale della rottura per pressoflessione del provino A3 con le principali lesioni evidenziate*

## **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.

Risulta molto interessante fare un confronto dei risultati ottenuti da questa ricerca.

Al fine di una corretta comparazione è necessario rimarcare il fatto che le tre serie dei pannelli differiscono tra loro soltanto per lo spessore dello strato di polistirene, conseguentemente variando lo spessore totale dei campioni.

La serie E, quella più snella, è caratterizzata da uno spessore del pannello isolante pari a dodici centimetri, la serie A, quella intermedia, è caratterizzata da uno spessore del pannello isolante pari a dodici centimetri, e infine la serie F che è quella più tozza è costituita da uno spessore di ben 25 cm.

I campioni hanno tutti le stesse reti elettrosaldate zincate di diametro pari a 2,5 mm e 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 posizionati ogni 140/150 mm (circa 70 per mq). Quindi tutti i provini hanno la stessa percentuale di armatura, stessa percentuale di connettori e stesso spessore delle cortine esterne che è pari a 3,5 cm medio per lato.

L'altra grande differenza è stata quella riguardante il setup della prova, ovvero che i primi 3 provini A1, E1 e F1 erano sprovvisti dei profilati metallici HEA in corrispondenza del cordolo inferiore. Ciò ha portato ad una rottura con carichi massimi registrati inferiori rispetto agli altri.

Quindi il paragone tra le varie serie di pannelli viene fatto sul diverso spessore, diverso rapporto di snellezza e 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 [m]	Rapporto di snellezza (h/t)	Carico medio di rottura [kN]	E medio [MPa]
E	3	0,19	15,79	583,02	3175,78
A	3	0,21	14,29	657,8	3519,85
F	3	0,25	12,00	625,64	2840,17

*Tabella 8 - Tabella illustrativa dei risultati messi a confronto*

Il carico medio di rottura della serie A è venuto più elevato di quella della serie F, inaspettatamente perché il pannello A2, quello più resistente, si è rotto a 766,77 MPa.

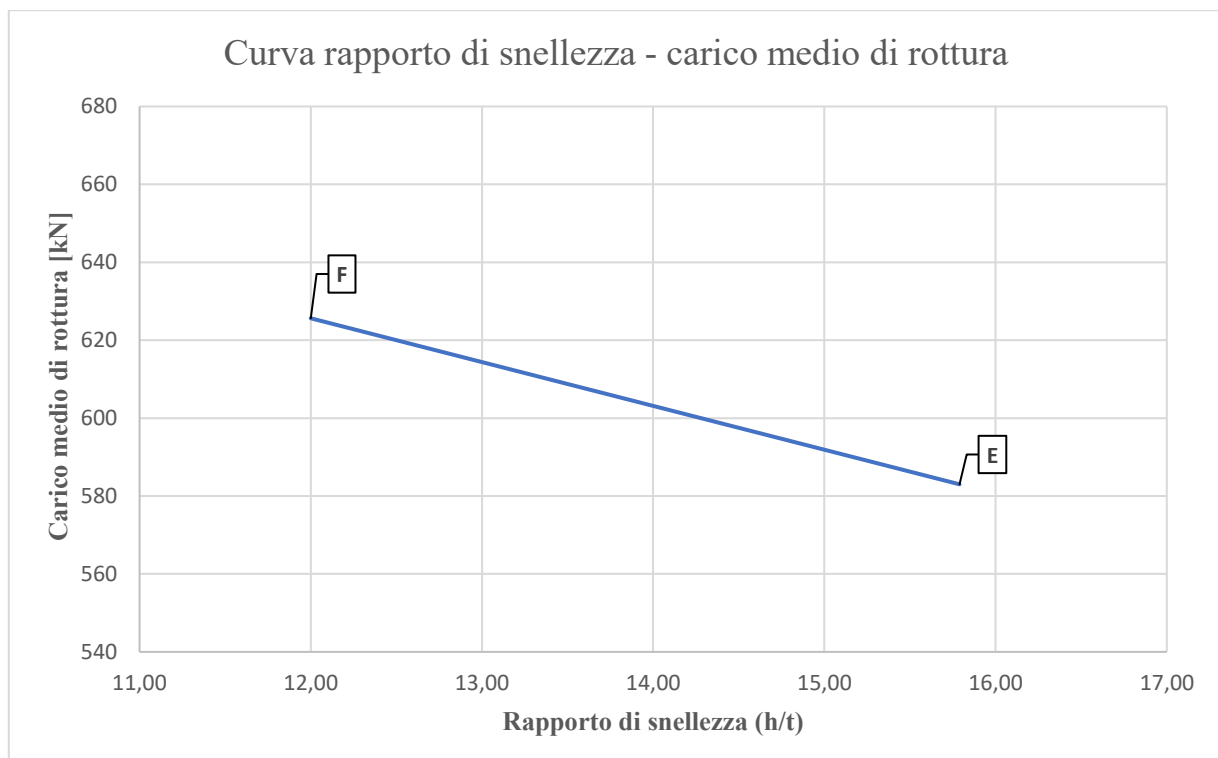
<b>Diminuzione di capacità portante passando da h/t 14,29 a 15,79</b>	<b>Diminuzione di capacità portante passando da h/t 12,00 a 15,79</b>
11,37%	6,81%

*Tabella 9 - Influenza del rapporto di snellezza sul carico di rottura*

Come ci si poteva aspettare, dai risultati ottenuti dalla sperimentazione, si evince che i pannelli tozzi presentano un carico medio di rottura maggiore rispetto a quelli snelli.

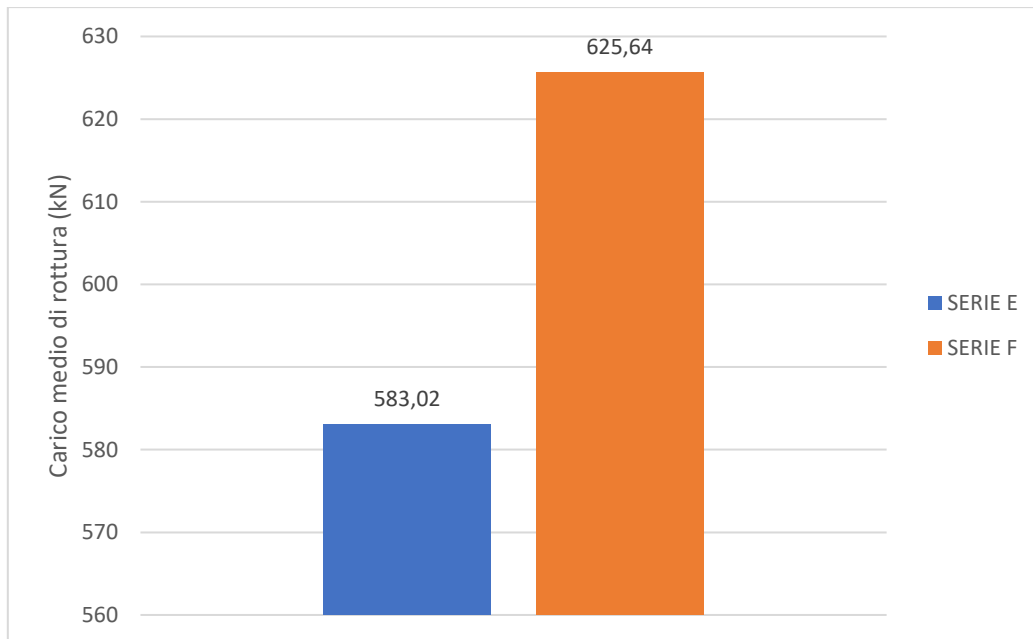
Passando dalla serie F, quella più tozza caratterizzata da un rapporto di snellezza pari a 12, alla serie E, ovvero quella più snella caratterizzata da un rapporto di snellezza pari a 15,79, si può osservare una diminuzione della capacità portante pari al 6,81%.

Passando dalla serie A, quella con sezione intermedia caratterizzata da un rapporto di snellezza pari a 14,29, alla serie E, ovvero quella più snella caratterizzata da un rapporto di snellezza pari a 15,79, si può vedere come il carico medio di rottura diminuisce del 11,37%.

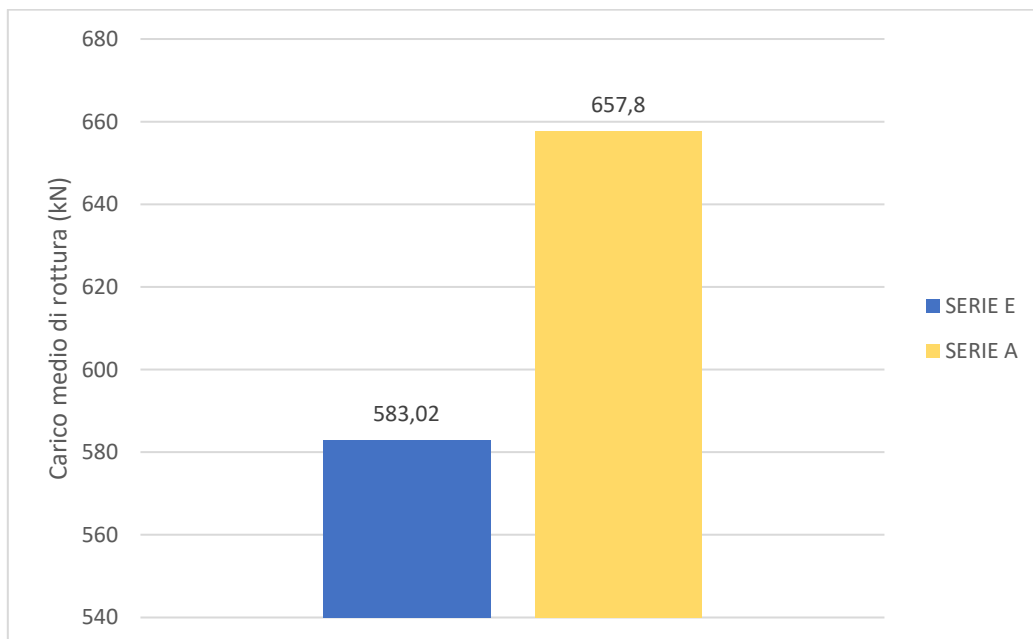


*Figura 52 - Curva rapporto di snellezza-carico medio di rottura*

I carichi ultimi diminuiscono all'aumentare dei rapporti di snellezza del pannello, definiti come  $h/t$  dove  $h$  è l'altezza totale e  $t$  è lo spessore complessivo del pannello, come si può osservare dalla Figura 52.



**Figura 53** - Confronto dei valori medi del carico di rottura della serie E e serie F



**Figura 54** - Confronto dei valori medi del carico di rottura della serie E e serie A

Nelle figure 53 e 54 sono stati comparati i carichi medi di rottura della serie E, con la serie F ed A, dalle quali si possono facilmente osservare le considerazioni fatte in precedenza, in base alle quali se il pannello è snello sarà caratterizzato da un carico ultimo di rottura inferiore rispetto ad un pannello tozzo, in cui la sezione reagente è maggiore.

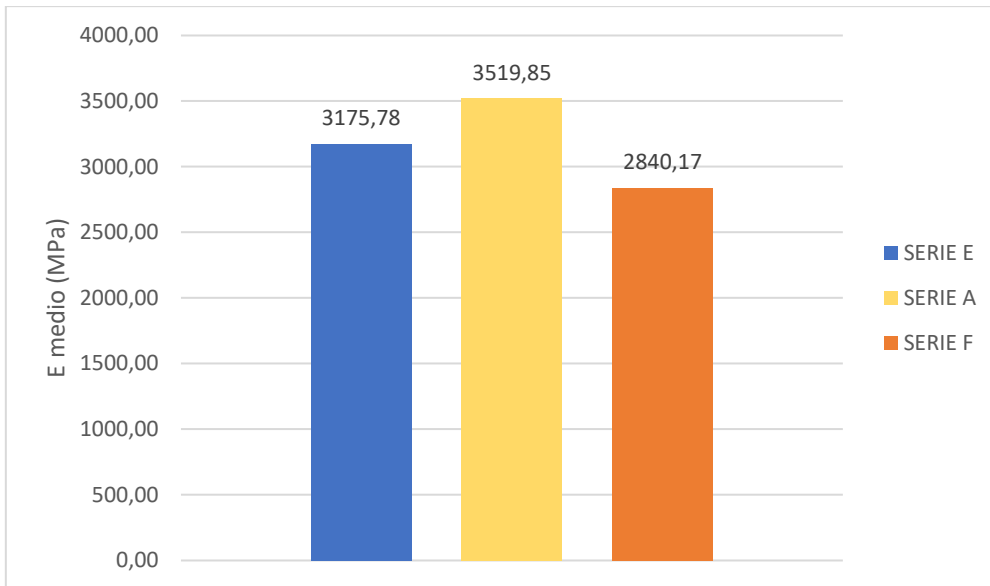
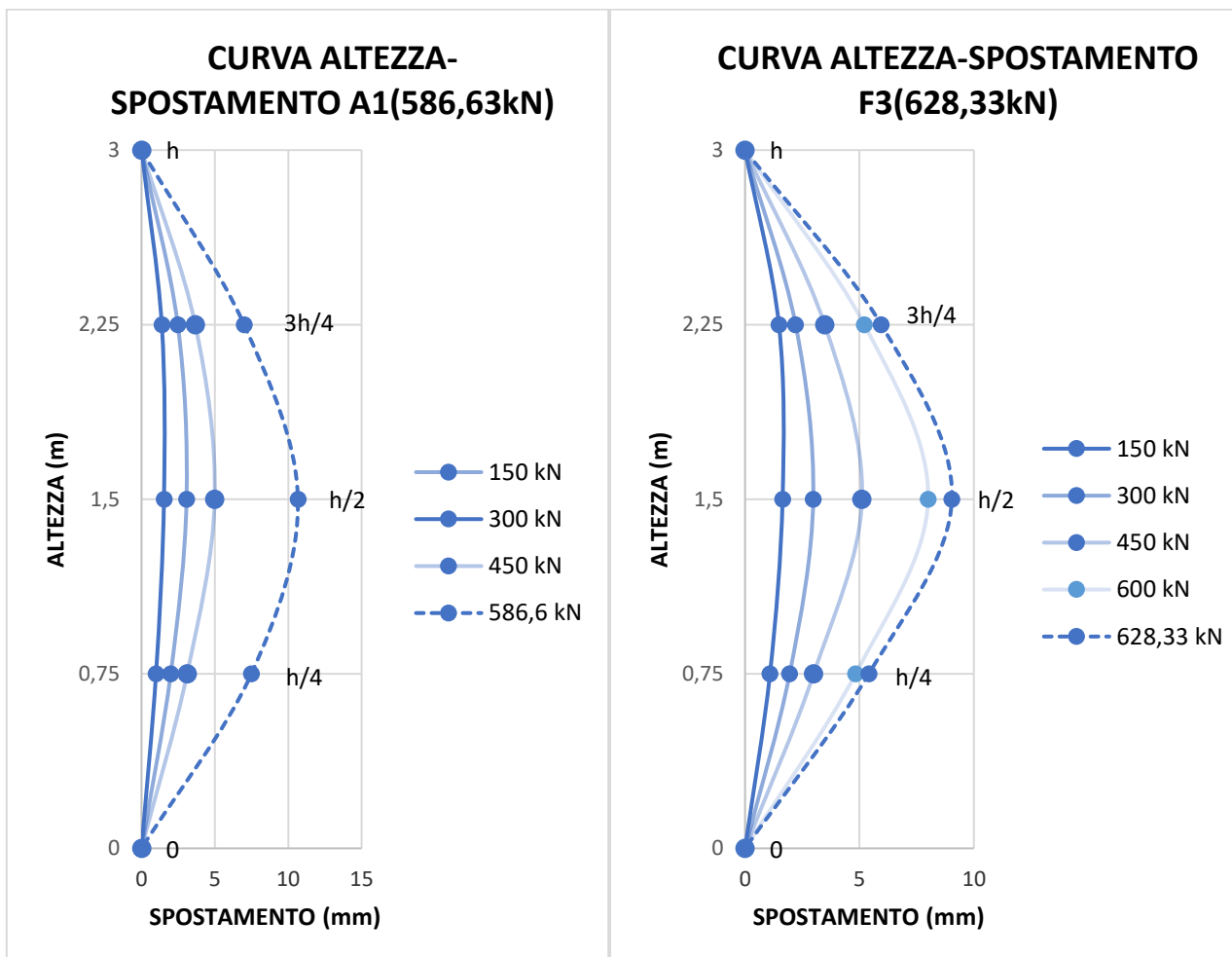


Figura 55 - Confronto del modulo elastico medio tra le serie

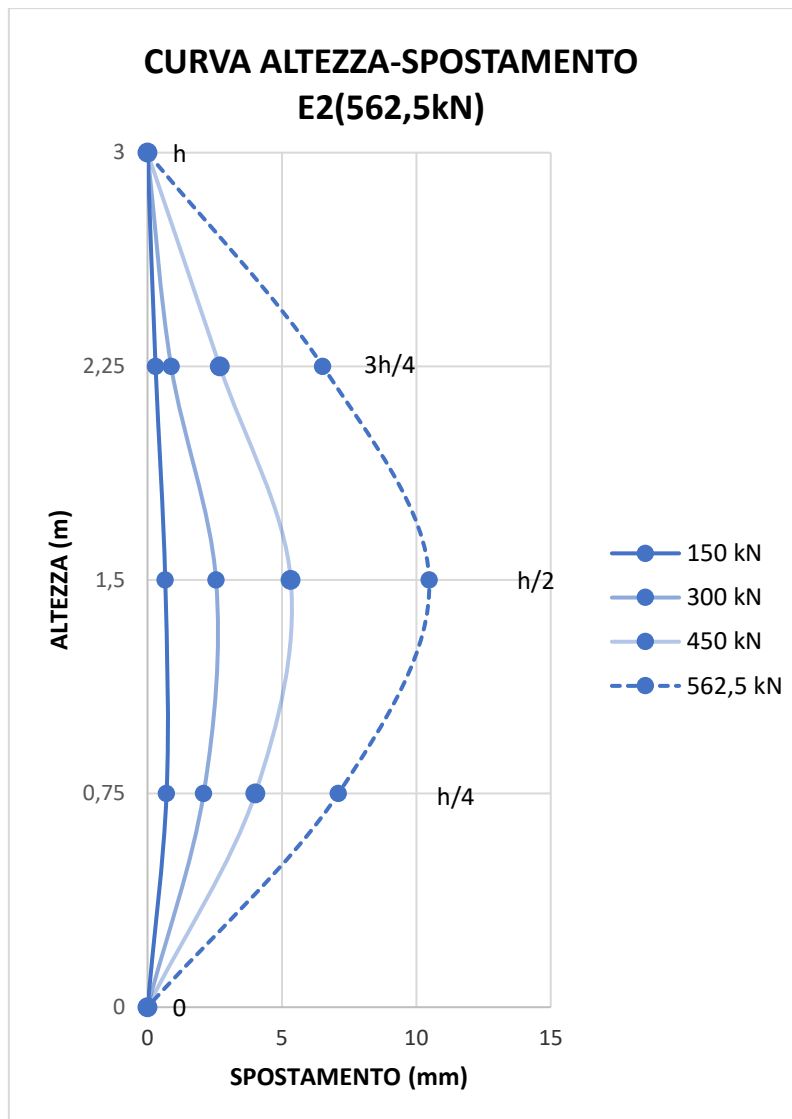
Dalla figura 55, trascurato il valore della serie A, si può osservare che il valore del modulo elastico dei provini snelli risulta in media pari a 3175,78 MPa mentre quello per i provini tozzi 2840,17 MPa.



(a)

(b)





(c)

*Figura 56 - Curva altezza-spostamento A1 (a), F3 (b), E2 (c)*

Le curve mostrate in figura 56 rappresentano la flessione laterale dei provini a diversi stadi di carico. Si può osservare lo spanciamento dei pannelli fino ai valori di carico prossimi al carico limite. La flessione laterale per le diverse tipologie dei campioni all'aumentare del carico aumenta significativamente.

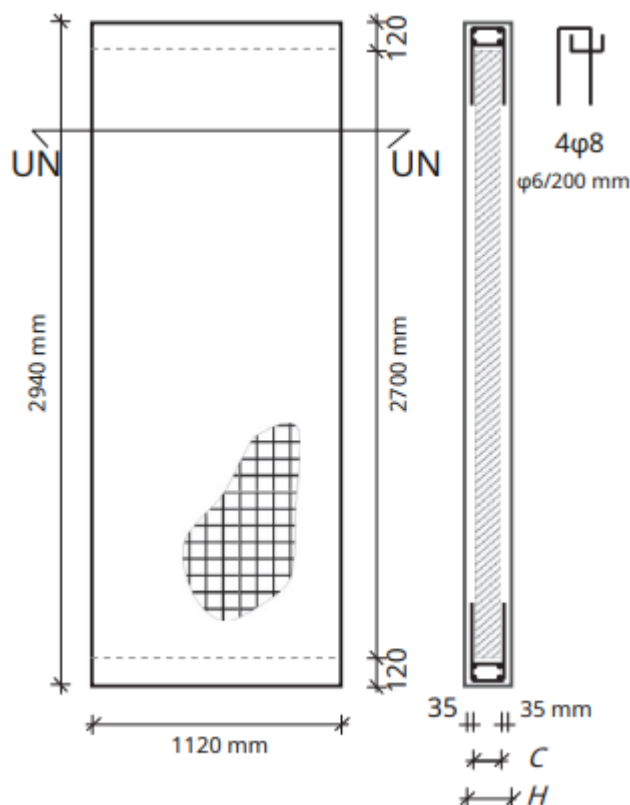
## 6.2 Confronto dell'attuale ricerca con la letteratura

Molto utile per verificare la validità dei risultati ottenuti dalla presente sperimentazione in termini di carico ultimo raggiunto è fare dei confronti con gli articoli presenti in letteratura.

L'articolo [5] preso come primo riferimento per il confronto analizza il carico ultimo di rottura ottenuto per pannelli testati eccentricamente di dimensioni 112 x 294 cm.

In particolare, i risultati della sperimentazione oggetto di studio in questo elaborato di ricerca verranno confrontati con i risultati ottenuti dalle prove effettuate nell'articolo per due tipologie di pannelli la cui differenza sta nel diverso spessore dello strato isolante interno.

I pannelli sandwich considerati nella ricerca che verrà confrontata sono costituiti da un foglio di polistirene rinforzato da due maglie metalliche da 80 mm - 75 mm assemblate mediante connettori in acciaio. Il foglio di polistirene ha un profilo ondulato e densità di circa 15–25 kg/m<sup>3</sup>. Le reti elettrosaldate zincate ed i connettori saldati ortogonalmente alle reti, sono realizzati con U3 fili di acciaio ad alto rendimento. I pannelli di parete (WP) 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, pari a 3,5 cm per lato. I connettori sono di diametro pari a 3 cm. Hanno lo stesso passo dei connettori presenti nei pannelli forniti dalla ditta Emmedue srl. Le differenze con tali provini sono: diametro delle reti elettrosaldate di 3 mm, anziché 2,5, e diversa armatura e spessore dei cordoli.



**Figura 57** - Pannelli da confrontare con quelli forniti dalla ditta Emmedue

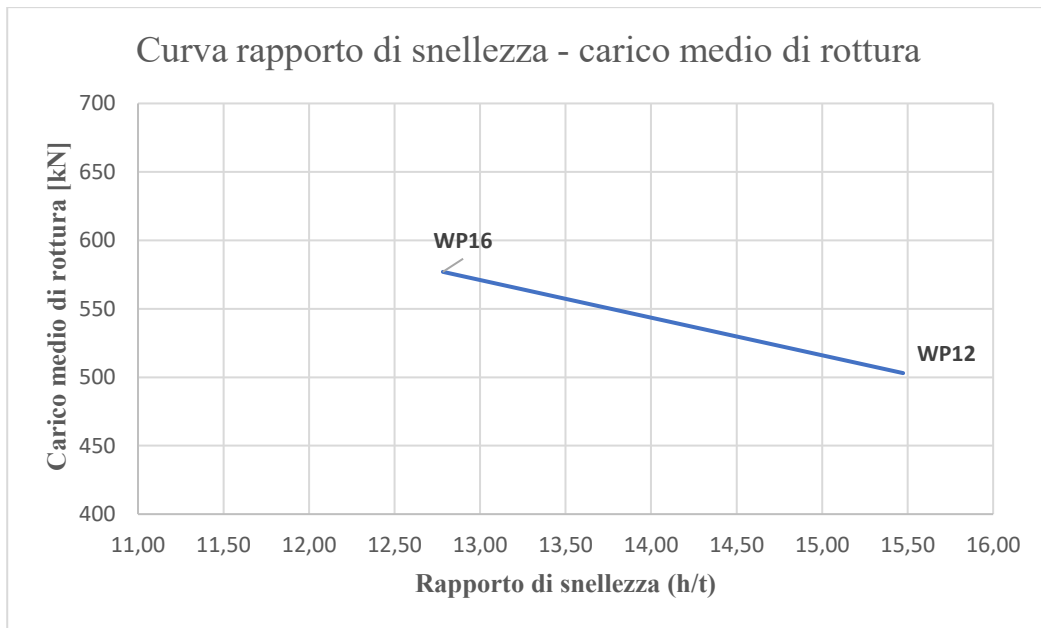
La configurazione di prova è la stessa.

Le tipologie dei pannelli utili al confronto sono WP12 e WP16 che hanno lo spessore dello strato isolante ondulato rispettivamente di 12 e 16 cm.

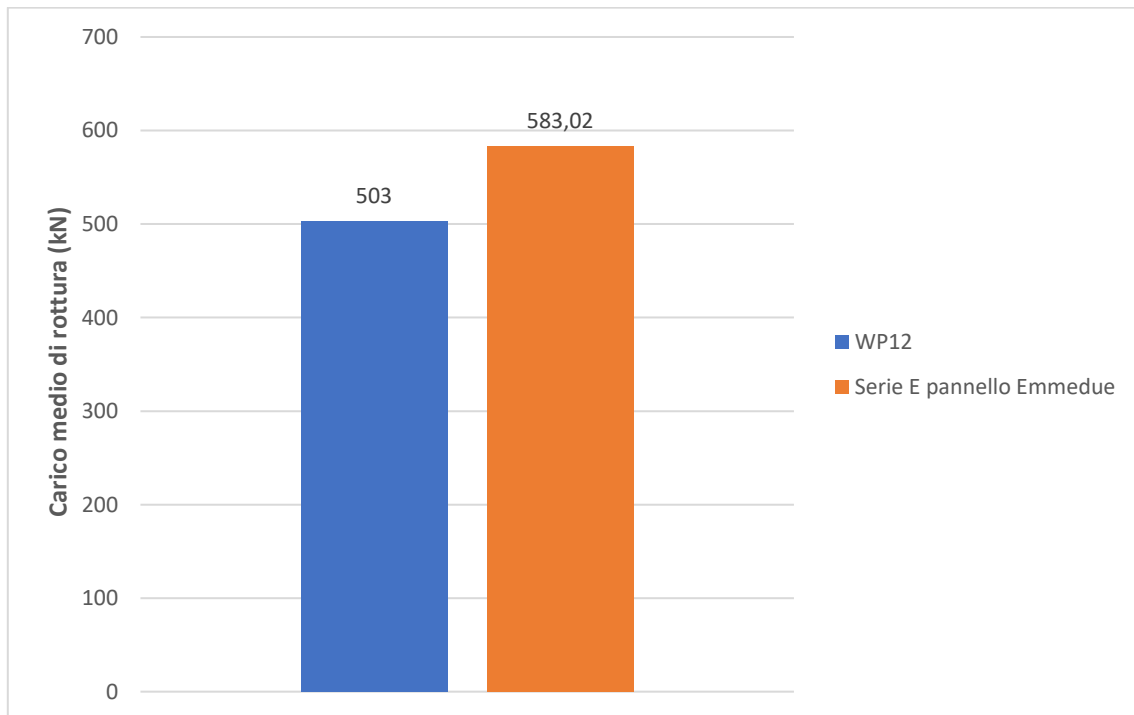
I dati analizzati per il confronto sono illustrati nella seguente tabella:

Serie Pannello	Altezza pannello h [m]	Spessore pannello t [m]	Rapporto di snellezza (h/t)	Carico medio di rottura [kN]
WP12	2,94	0,19	15,47	503
WP 16	2,94	0,23	12,78	577

*Tabella 10 - Tabella illustrativa dei dati utili per il confronto*



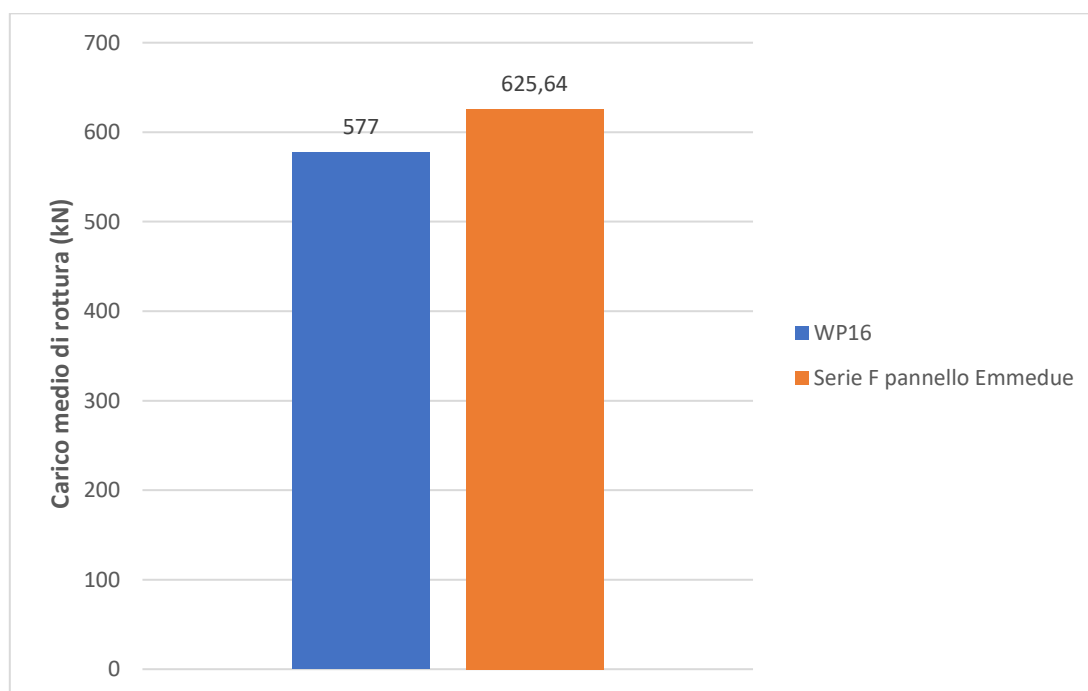
*Figura 58 - Curva rapporto di snellezza-carico medio di rottura*



*Figura 59 - Confronto carico medio di rottura*

Dal confronto effettuato tra la tipologia WP12 e la serie E dei pannelli forniti da Emmedue srl si evince che il carico medio di rottura è maggiore nei provini oggetto di studio in questa sperimentazione.

Le due tipologie dei provini hanno quasi le stesse caratteristiche, rapporto di snellezza, materiali e una leggera differenza nella percentuale di armatura, e da come si può notare nella figura 59 la serie E dei pannelli Emmedue srl presenta un carico medio di rottura pari a 583,02 kN, maggiore rispetto alla tipologia WP12 del 13,7%.



*Figura 60 - Confronto carico medio di rottura*

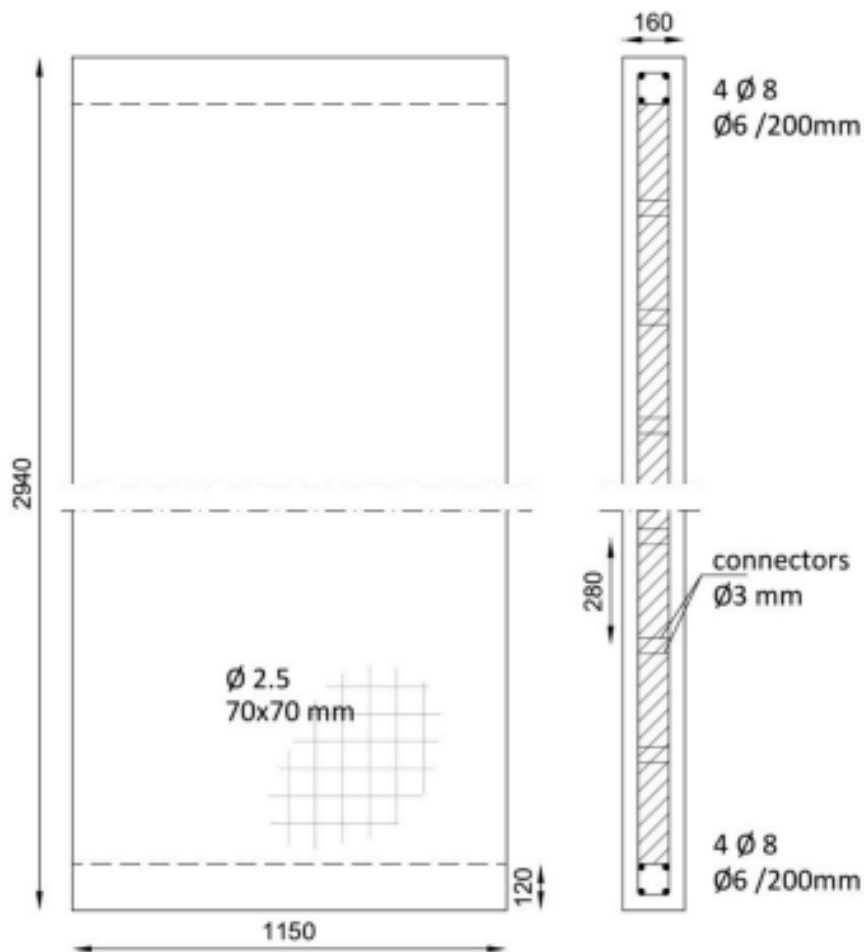
Dal confronto effettuato tra la tipologia WP16 e la serie F dei pannelli forniti da Emmedue srl si evince che il carico medio di rottura è maggiore nei provini oggetto di studio in questa sperimentazione.

Le due serie messe a confronto sono differenziate dal fatto che lo spessore del pannello della serie WP16 è di 23 cm mentre quello della serie F è di 25 cm, ma presentano un carico medio di rottura simile. Come si può notare nella figura 60 la serie F dei pannelli Emmedue srl presenta un carico medio di rottura pari a 583,02 kN, maggiore rispetto alla tipologia WP16 del 6,8%.

Complessivamente, quindi, i provini della ditta Emmedue srl sono più prestanti rispetto a quelli testati nell'articolo preso in considerazione.

I risultati ottenuti dalla sperimentazione trattata in questo elaborato di tesi sono stati confrontati con quelli presenti nell'articolo [6], ottenuti tramite una campagna di prove effettuate per due tipologie di

pannelli E-1 ed E-2 la cui differenza sta nell'utilizzo di connettori saldati per la prima e connettori piegati per la seconda.



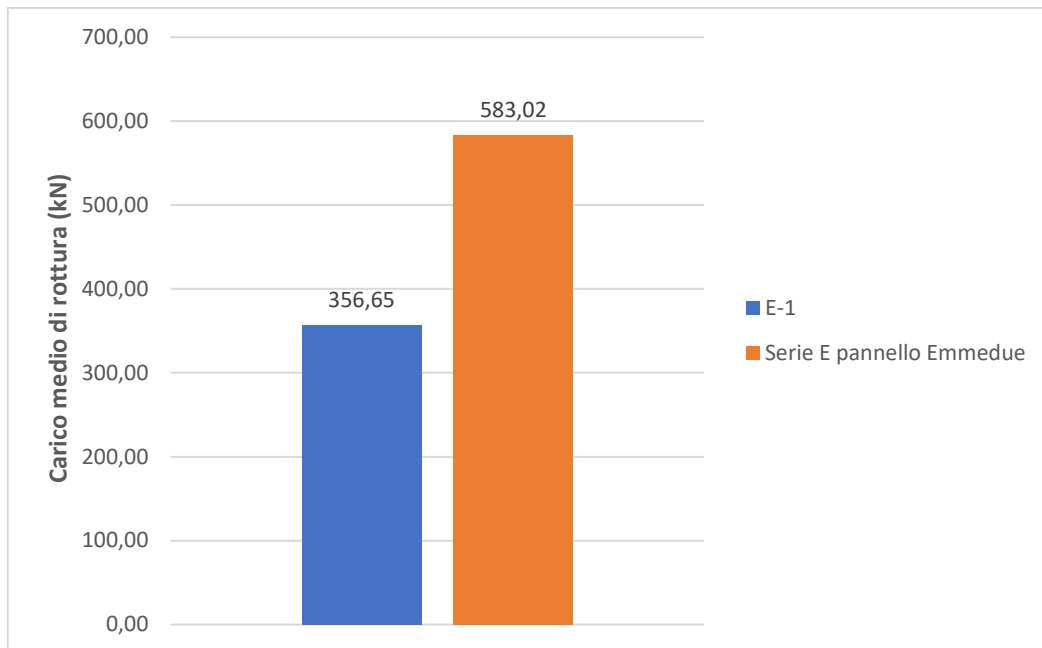
**Figura 61** - Pannelli sandwich in c.a. testati nell'articolo [6]

Le differenze con i pannelli della ditta Emmedue srl stanno nel diverso passo dei connettori, e nell'armatura dei cordoli, nel diverso spessore medio delle cortine esterne che per i campioni presenti nell'articolo [6] è pari a 4 cm e nel diverso spessore dello strato isolante che è pari a 8 cm.

Serie Pannello	Altezza pannello h [m]	Spessore pannello t [m]	Rapporto di snellezza (h/t)	Carico medio di rottura [kN]
E-1	2,94	0,16	18,38	356,65
E-2	2,94	0,16	18,38	447,48

**Tabella 11** - Tabella illustrativa dei dati utili per il confronto

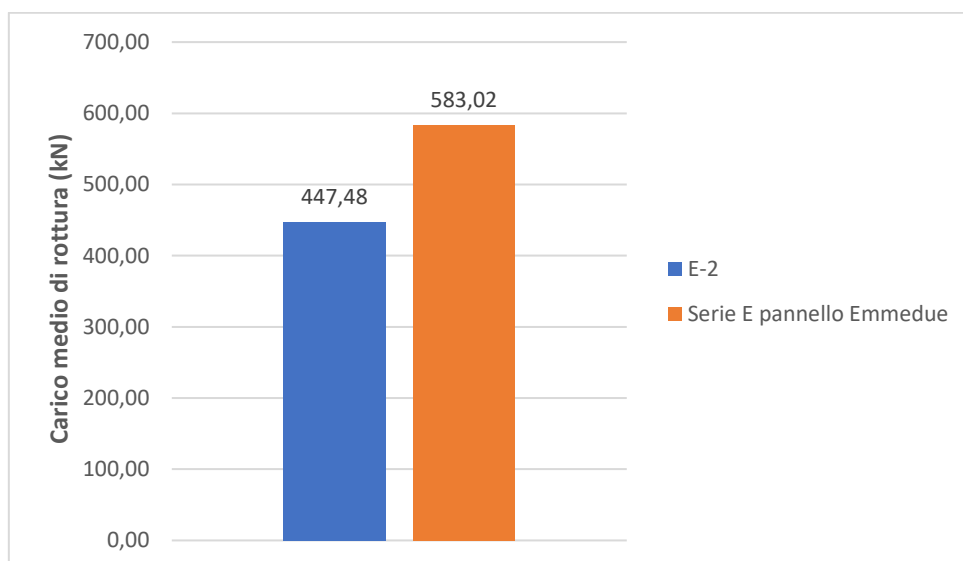
Per il confronto con le tipologie E-1, E-2 la serie E dei pannelli Emmedue srl è quella più adeguata perché ha lo spessore simile, pari a 19 cm.



*Figura 62 - Confronto carico medio di rottura*

Dal confronto effettuato tra la tipologia E-1 e la serie E dei pannelli forniti da Emmedue srl si evince che il carico medio di rottura è maggiore nei provini oggetto di studio in questa sperimentazione.

La serie E-1 presenta un rapporto di snellezza pari a 18,38 mentre la serie E 15,79 e come ci si poteva aspettare passando da un rapporto (h/t) maggiore ad uno minore la capacità ultima dei pannelli aumenta. Come si può notare nella figura 62 la serie E dei pannelli Emmedue srl presenta un carico medio di rottura pari a 583,02 kN, maggiore rispetto alla tipologia E-1 del 37%.

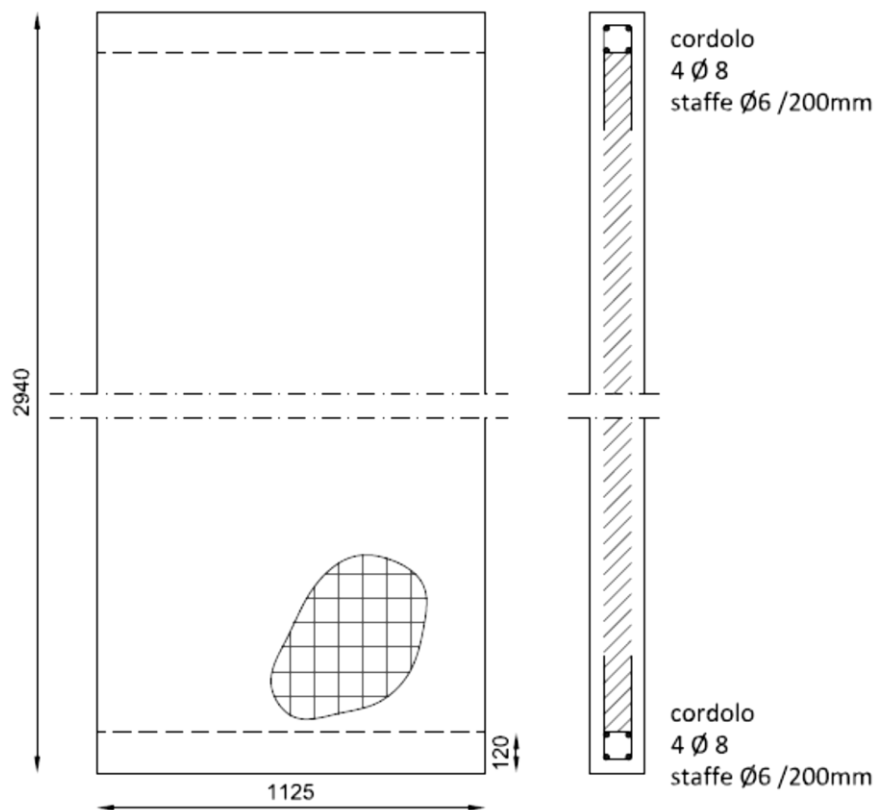


*Figura 63 - Confronto carico medio di rottura*

Il confronto con la tipologia E-2 caratterizzata dai connettori saldati, ha mostrato che i pannelli Emmedue srl presentano un carico medio di rottura maggiore del 23% rispetto ai campioni della serie soggetta a paragone. Complessivamente, quindi, i provini della ditta Emmedue srl sono più prestanti rispetto a quelli testati nell'articolo preso in considerazione.

I risultati ottenuti dalla sperimentazione trattata in questo elaborato di tesi sono stati confrontati con quelli presenti nell'articolo [7], ottenuti tramite una campagna di prove effettuate per quattro tipologie di pannelli 1-E, 2-E, 3-E, 4-E la cui differenza sta nell'utilizzo di connettori piegati per le prime due e connettori saldati per le altre due. I campioni 1-E e 3-E presentano come isolante termico il PLA anziché l'EPS.

I pannelli sandwich da confrontare sono costituiti da uno strato isolante con spessore pari a 8 cm e rinforzati su ogni lato con una rete elettrosaldata avente una maglia di 70x70 mm unite da connettori metallici aventi diametro pari a 3mm. La rete elettrosaldata ha un diametro di 2,5mm. I pannelli sono completati rivestendo ogni lato con uno strato di calcestruzzo spruzzato e liscio per uno spessore di 4 cm per lato. Presentano dimensioni pari a 113 x 294 cm. I cordoli rispetto ai pannelli testati in questa campagna sperimentale presentano una diversa armatura e sono stati gettati in un momento differente rispetto al getto del pannello tramite spruzzatura.

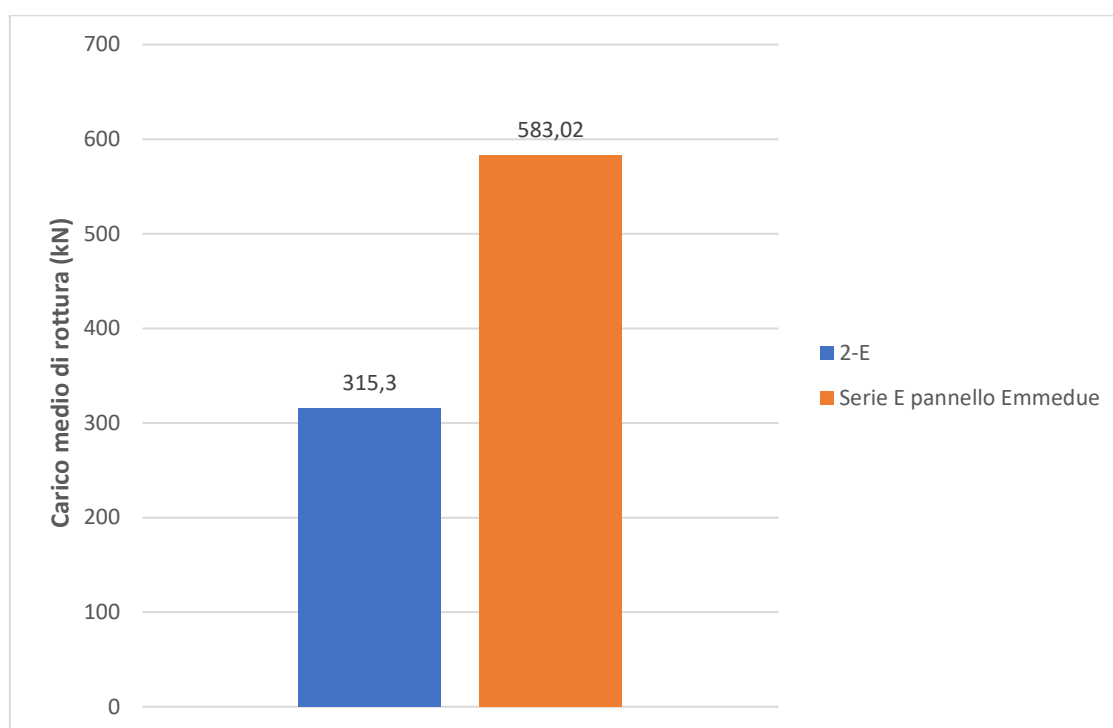


**Figura 64** - Dimensioni dei pannelli da confrontare

Serie Pannello	Altezza pannello h [m]	Spessore pannello t [m]	Rapporto di snellezza (h/t)	Carico massimo di rottura [kN]
1-E (PLA)	2,94	0,16	18,38	356,65
2-E (EPS)	2,94	0,16	18,38	315,3
3-E (PLA)	2,94	0,16	18,38	476,77
4-E (EPS)	2,94	0,16	18,38	419,53

*Tabella 12 - Tabella illustrativa dei dati utili per il confronto*

Per il confronto con le tipologie 2-E, 4-E la serie E dei pannelli Emmedue è quella più adeguata perché ha lo spessore simile, pari a 19 cm.

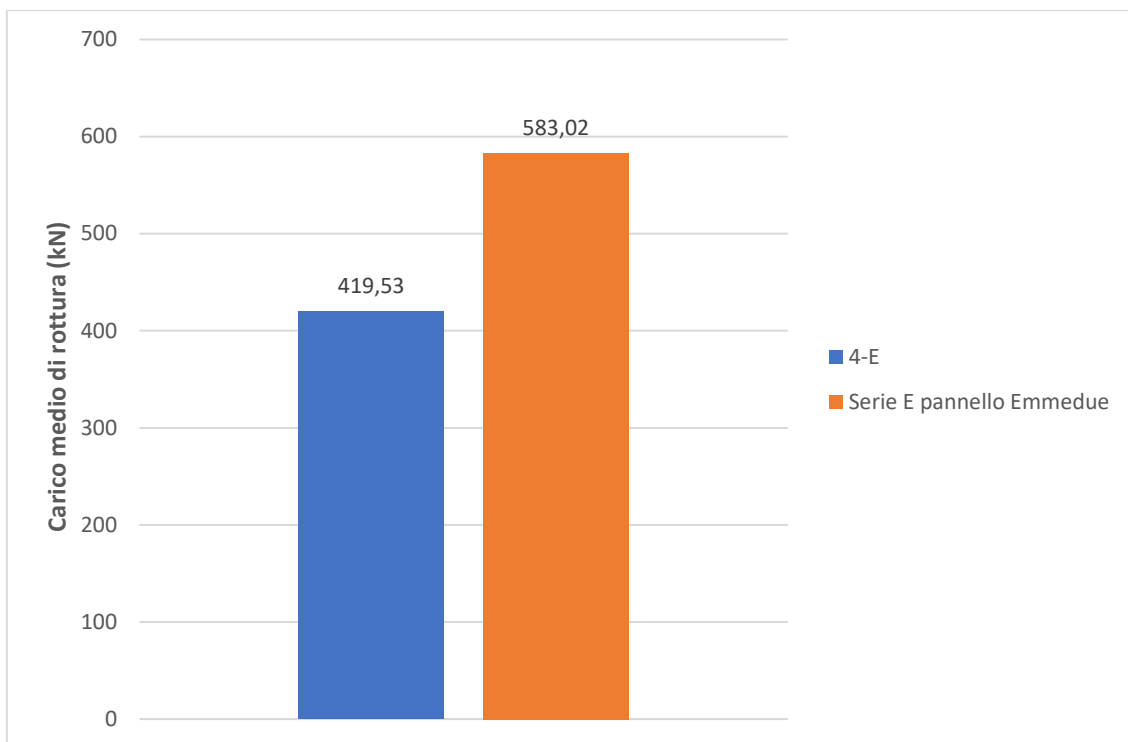


*Figura 65 - Confronto carico medio di rottura con carico massimo*

Dal confronto effettuato tra la tipologia 2-E e la serie E dei pannelli forniti dalla ditta Emmedue Srl. si evince che il carico medio di rottura della serie E è maggiore del carico massimo di rottura della tipologia 2-E.

La serie 2-E presenta un rapporto di snellezza pari a 18,38 mentre la serie E 15,79 e come ci si poteva aspettare passando da un rapporto (h/t) maggiore ad uno minore la capacità ultima dei pannelli aumenta. Come si può notare nella figura 65 la serie E dei pannelli Emmedue srl presenta un carico medio di rottura pari a 583,02 kN, maggiore rispetto al carico massimo tipologia 2-E del 46%.





**Figura 66** - Confronto carico medio di rottura con carico massimo

Dal confronto effettuato tra la tipologia 4-E e la serie E dei pannelli forniti dalla Ditta Emmedue srl si evince che il carico medio di rottura della serie E è maggiore del carico massimo di rottura della tipologia 2-E.

La serie 4-E presenta un rapporto di snellezza pari a 18,38 mentre la serie E 15,79 e come ci si poteva aspettare passando da un rapporto (h/t) maggiore ad uno minore la capacità ultima dei pannelli aumenta. Come si può notare nella figura 66 la serie E dei pannelli Emmedue srl presenta un carico medio di rottura pari a 583,02 kN, maggiore rispetto al carico massimo tipologia 2-E del 28%.

## 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.

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

I pannelli sandwich, prefabbricati o gettati in opera, sono adatti ad essere impiegati per pareti interne, esterne, 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, come 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 manodopera.

L'obiettivo di questa ricerca è ampliare la conoscenza del comportamento meccanico di questo sistema andando a confrontare anche con gli studi e ricerche presenti in letteratura, 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 3,5cm 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 polistirene, avente la funzione di supporto. I campioni sono stati raggruppati in tre tipologie ciascuna formate da tre pannelli denominate E, A e F, rispettivamente di spessore totale pari a 19 cm, 21 cm, e 25 cm. Tutti i provini hanno le stesse dimensioni 1,2 x 3 m, stessa percentuale di armatura e stessa percentuale di connettori. L'unica differenza tra le tre serie è il diverso spessore dello strato isolante, quindi diverso spessore complessivo della struttura, da cui consegue un diverso rapporto di snellezza.

Per la serie E, ovvero quella più snella caratterizzata da un rapporto di snellezza pari a 15,79, si è registrato un carico medio di rottura di 583,02 kN ed un modulo elastico medio di 3175,78 MPa.

Per la serie A, ovvero quella intermedia caratterizzata da un rapporto di snellezza pari a 14,29, si è registrato un carico medio di rottura di 657,8 kN ed un modulo elastico medio di 3519,85 MPa.

Il carico medio di rottura della serie A è quello più alto, nonostante sia la serie di sezione intermedia perché il campione A2 è stato il pannello a resistere di più. Si è con un carico massimo di rottura pari 766,77 kN. Il fatto che questo provino abbia fatto registrare il carico limite di rottura più elevato è qualcosa che non può essere controllato perché dipende anche molto dalla manifattura e dalla sua progettazione.

Per la serie F, ovvero quella più tozza caratterizzata da un rapporto di snellezza pari a 12,00, si è registrato un carico medio di rottura di 625,64 kN ed un modulo elastico medio di 2840,17 MPa.

Dal confronto tra le tipologie, come ci si aspettava, passando da un provino più snello ad uno più tozzo, quindi da un rapporto di snellezza maggiore ad uno minore, il carico massimo di rottura aumenta. La diminuzione di capacità portante, passando dalla serie F, più tozza, alla serie E, quella più snella, è pari al 6,81%. Invece passando dalla serie A, quella con sezione intermedia, alla serie E, si può vedere come il carico medio di rottura diminuisce del 11,37%.

Per quanto riguarda le modalità di rottura, a differenza di quello che ci si aspettava, per tutti i pannelli è avvenuta la rottura per schiacciamento in corrispondenza del cordolo inferiore (per i provini A1, E1, F1) e di quello superiore per il resto dei campioni tranne per l'A3.

Per il pannello A3 la rottura è avvenuta per pressoflessione, con le lesioni principali in corrispondenza della mezzeria del pannello.

Le curve Forza – Spostamento hanno manifestato un comportamento inizialmente lineare, fin quando non subentrano le non linearità attribuibili a delle microfratture negli strati di calcestruzzo. Tutti i campioni sono caratterizzati da un comportamento fragile da come si può osservare dai grafici, 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.

La campagna sperimentale è stata caratterizzata da un'uguale configurazione di prova per tutti i campioni, tranne che per A1, E1, F1 in cui non erano presenti i profilati metallici HEA, utili per il confinamento del cordolo inferiore.

Dal confronto tra i risultati della sperimentazione eseguita in questo elaborato di progetto con i risultati di altre campagne fatte negli articoli presi come riferimento presenti nella letteratura, si evince che i pannelli forniti dalla Ditta Emmedue srl sono più prestanti in termini di carico medio di rottura.

Si è visto che i campioni testati in questa ricerca, messi a confronto con pannelli presenti nella letteratura, aventi differente tipologia di connettori, saldati o piegati, diverse percentuali di armatura

e connettori, sono più resistenti mostrando una sopportazione del carico massimo eccentrico maggiore.

La seguente ricerca sta continuando perché nel Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture del dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura (DICEA) si stanno testando altri nove pannelli sandwich con lo stesso tipo di connettori, rete elettrosaldata, tipo e spessore dello strato isolante. La differenza con i campioni già testati sta nella diversa percentuale di connettori, percentuale di armatura della rete elettrosaldata, nell'altezza che in questo caso è pari a quattro metri e quindi anche nel diverso rapporto di snellezza.

## **Ringraziamenti**

Innanzitutto, ringrazio la mia famiglia, che dopo tanti sacrifici e con il continuo supporto mi ha permesso di arrivare fin qui.

Ringrazio il mio relatore Serpelli Michele, per la grande disponibilità gentilezza e cortesia nell'avermi seguito passo dopo passo nella stesura della tesi.

Ringrazio la mia correlatrice Stazi Francesca, per la grande disponibilità in merito ai chiarimenti durante la stesura dell'elaborato.

Ringrazio tutti i miei nuovi compagni di viaggio in questo percorso universitario, per il bellissimo legame che si è venuto a creare, lo stimolo e la volontà di aiutarsi in qualsiasi difficoltà.

Ringrazio tutti i miei amici, che con il loro affetto mi hanno sempre sostenuto in tanti momenti ed è anche merito loro il raggiungimento di questo primo traguardo della mia vita.

Ringrazio di cuore tutti coloro che in ogni occasione mi sono stati vicini, vi porterò sempre con me.

## **Bibliografia/Sitografia**

- [1] J. Daniel Ronald Joseph, J. Prabakar, P. Alagusundaramoorthy, Experimental study on the behavior of lightweight concrete sandwich panels under axial compression, *Journal of Structural Engineering*, 2018.
- [2] A. Benayoune, A.A.A. Samad, A.A. Abang Ali, D.N. Trikha, Response of pre-cast reinforced composite sandwich panels to axial loading, *Construction and Building Materials*, 2006.
- [3] A. Benayoune, A. Aziz A. Samad, D.N. Trikha, A. Abdullah Abang Ali, A.A. Ashrabortov, Structural behaviour of eccentrically loaded precast sandwich panels, *Construction and Building Materials*, 2005.
- [4] Y.H. Mugahed Amran, Rayed Alyousef, Hisham Alabduljabbar, Fahed Alrshoudi, Raizal S.M. Rashid, Influence of slenderness ratio on the structural performance of lightweight foam concrete composite panel, *Case Studies in Construction Materials*, 2018.
- [5] Fabrizio Gara, Laura Ragni, Davide Roia, Luigino Dezi, Experimental tests and numerical modelling of wall sandwich panels, *Engineering Structures*, 2012.
- [6] 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.
- [7] Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura – DICEA, Dipartimento di Ingegneria Industriale e delle Scienze Matematiche – DIISM, Ottimizzazione e sviluppo di un sistema costruttivo basato su pannelli sandwich in polistirene e c.a. Verifica analitica e sperimentale dei pannelli con e senza sistemi alternativi di connessione e di isolamento al fine di migliorarne la sostenibilità ambientale, 2015.
- [8] P. Poluraju, G. Appa Rao, Behaviour of 3d-panels for structural applications under general loading: a State-of-the-art, 2014.
- [9] Douglas George Tomlinson, Behaviour of partially composite precast concrete sandwich panels under flexural and axial loads, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, September 2015.
- [10] M. Serpilli, F. Clementi, S. Lenci, An experimental and numerical study on the in-plane axial and shear behavior of sprayed in-situ concrete sandwich panels, *Engineering Structures*, 2021.
- [11] Christian greifenhagen, seismic behavior of lightly reinforced concrete squat shear walls, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2006.

- [12] M. Serpilli, Verifica sperimentale del comportamento meccanico di pannelli sandwich in calcestruzzo armato e polistirene, Report tecnico.
- [13] S.Samsuddin, N. Mohamad, Structural behaviour of precast lightweight foamed concrete sandwich panel under axial load: an overview, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia.
- [14] Benayoune A, Abdul Samad AA, Trikha DN, Abang Ali AA, Ellinna SHM. Flexural behaviour of pre-cast concrete sandwich composite panel – experimental and theoretical investigations. J Constr Build Mater 2008.
- [15] Giacchetti R, Menditto G, Indagini sperimentali su pannelli sandwiches realizzati con la tecnica dello spritzbeton. Atti V Convegno CTE, Firenze; 1984.
- [16] PCI Committee on Precast Concrete Sandwich Wall Panels. State of the Art of Precast/Prestressed Concrete Sandwich Wall Panels. PCI J. 2011
- [17] 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
- [18] Smakosz Ł, Tejchman J, Evaluation of strength, deformability and failure mode of composite structural insulated panels. Mater Des 2014.
- [19] 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.
- [20] Jolien Vervloet, Petra Van Itterbeeck, Svetlana Verbruggen, Michael El Kadi, Matthias De Munck, Jan Wastiels and Tine Tysmans, Buckling Behaviour of Structural Insulating Sandwich Walls with Textile Reinforced Cement Faces, 2018.
- [21] Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-14, American Concrete Institute; 2014.
- [22] Pečur I.B., Milovanović B., Carević I., Alagušić M., Precast sandwich panel – Innovative way of construction, 2014.
- [23] Salmon D.C., Eiena A., Tadros M.K., Culp T.D., Full scale testing of precast concrete sandwich panels. ACI Journal, 1997.
- [24] C.E.B.-C.I.B.-U.E.A.t.c.- 1966, “Recommandations internationales unifies pour le calcul et l'execution des structures en panneaux assemblés de grand format”.
- [25] CEN, Brussels, 2003ACI 318-08, “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary”.

- [26] Mohammed A. Mousa, Nasim Uddin, Global buckling of composite structural insulated wall panels, Materials and Design, 2011.
- [27] Circolare Min.LL.PP. 11-08-1969 n°6090, “Norme per il calcolo e la costruzione di strutture a grandi pannelli”.
- [28] CNR 10025/98 – “Istruzioni per il progetto, l'esecuzione ed il controllo delle strutture prefabbricate in Calcestruzzo”.
- [29] UNI EN 1052-1,” Metodi di prova per muratura - Determinazione della resistenza a compressione”
- [30] UNI EN 1991 – Eurocodice 2, “Progettazione delle strutture in calcestruzzo”, Parte I: “Regole generali e regole per gli edifici”.
- [31] European Technical Assessment, ETA 20/0976 of 01/06/2021.
- [32] European Assessment Document – EAD 340002-00-0204.
- [33] <https://www.ingenio-web.it/articoli/pannelli-sandwich-in-calcestruzzo-tradizione-innovazione-e-sperimentazione/>
- [34] <https://www.edil-coperture.com/realizzazioni/pannelli-sandwich-cosa-sono-caratteristiche-pro-e-contro-180>
- [35] <https://www.ingenio-web.it/articoli/bioedilizia-la-nuova-direttiva-case-green-e-perche-preferire-gli-isolanti-naturali/>
- [36] <https://info.mannigroup.com/it/i-pannelli-sandwich>
- [37] [file:///C:/Users/HP/Downloads/A-292-7-Sistemi\\_Costruttivi\\_Pareti\\_Portanti.pdf](file:///C:/Users/HP/Downloads/A-292-7-Sistemi_Costruttivi_Pareti_Portanti.pdf)
- [38] <https://www.ingegneriasismicaitaliana.com/it/45/news/700/le-tecnologie-a-pareti-portanti-in-conglomerato-cementizio-debolmente-armato-gettato-in-opera/>