



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Edile**

---

*Caratterizzazione sperimentale del comportamento meccanico di pannelli*

*sandwich in calcestruzzo armato e polistirene*

*Experimental characterization of the mechanical behaviour of reinforced concrete and*

*polystyrene sandwich panels*

***Relatore:***

Prof. Ing. Michele Serpilli

***Tesi di Laurea di:***

Elisa Cartechini

---

**Anno accademico 2018/2019**





---

# INDICE

ELENCO DELL FIGURE.....	v
ELENCO DELLE TABELLE.....	ix
INTRODUZIONE .....	1
<b>CAPITOLO 1 – PRESENTAZIONE DEL TESTO.....</b>	<b>2</b>
1.1 – EVOLUZIONE DEI SISTEMI A PARETI PORTANTI.....	3
1.2 – OBIETTIVI DELLA TESI.....	7
1.3 – ORGANIZZAZIONE DEL TESTO.....	8
<b>CAPITOLO 2 – IL SISTEMA COSTRUTTIVO A PANNELLI SANDWICH.....</b>	<b>9</b>
2.1 – TECNOLOGIA DEI PANNELLI SANDWICH.....	10
2.2 – COMPOSIZIONE DEI SISTEMI SANDWICH.....	11
2.2.1 – ISOLAMENTO.....	12
2.3 – VANTAGGI CONNESSI ALL’UTILIZZO DEI PANNELLI SANDWICH STRUTTURALI.....	13
<b>CAPITOLO 3 – INQUADRAMENTO NORMATIVO E PECULIARITA’ STRUTTURALI.....</b>	<b>15</b>
3.1 – INQUADRAMENTO DEI PANNELLI SANDWICH NELL’AMBITO NORMATIVO.....	16
3.2 – IL SISTEMA COSTRUTTIVO IN ESAME: IDENTIFICAZIONE DELLE SUE PECULIARITA’.....	18
<b>CAPITOLO 4 – METODOLOGIA DI PROVA.....</b>	<b>22</b>
4.1 – STUDI CONDOTTI.....	23
4.2 – SPECIFICHE DEI PROVINI TESTATI.....	24
4.3 – TIPOLOGIE DI PROVE ESEGUITE.....	26
4.4 – STRUMENTAZIONE DI PROVA.....	26
<b>CAPITOLO 5 – SPERIMENTAZIONE.....</b>	<b>28</b>
5.1 – GENERALITA’.....	29
5.2 – PROVE DI COMPRESSIONE DIAGONALE.....	29
5.2.1 – Normativa e formule di riferimento.....	29

---

5.2.2 – Caratteristiche degli elementi provati.....	31
5.2.3 – Strumentazione per l’esecuzione della prova.....	31
5.2.4 – Modalità di esecuzione della prova.....	32
5.3 – PROVE DI COMPRESSIONE CENTRATA (PANNELLI 1100 x 1100 mm) .....	33
5.3.1 – Normativa e formule di riferimento.....	33
5.3.2 – Caratteristiche degli elementi provati.....	32
5.3.3 – Strumentazione per l’esecuzione della prova.....	34
5.3.4 – Modalità di esecuzione della prova.....	36
5.4 – PROVE DI COMPRESSIONE ECCENTRICA (PANNELLI 1100 x 1100 mm) .....	37
5.4.1 – Normativa e formule di riferimento.....	37
5.4.2 – Caratteristiche degli elementi provati.....	38
5.4.3 – Strumentazione per l’esecuzione della prova.....	39
5.4.4 – Modalità di esecuzione della prova.....	40
5.5 – PROVE DI PRECOMPRESSIONE E TAGLIO (PANNELLI 1100 x 1100 mm) .....	42
5.5.1 – Normativa e formule di riferimento.....	42
5.5.2 – Caratteristiche degli elementi provati.....	43
5.5.3 – Strumentazione per l’esecuzione della prova.....	45
5.5.4 – Modalità di esecuzione della prova.....	46
5.6 – PROVE DI COMPRESSIONE CENTRATA (PANNELLI 1100 x 3000 mm) .....	47
5.6.1 – Normativa e formule di riferimento.....	47
5.6.2 – Caratteristiche degli elementi provati.....	48
5.6.3 – Strumentazione per l’esecuzione della prova.....	49
5.6.4 – Modalità di esecuzione della prova.....	50
5.7 – PROVE DI COMPRESSIONE ECCENTRICA (PANNELLI 1100 x 3000 mm) .....	52
5.7.1 – Normativa e formule di riferimento.....	52
5.7.2 – Caratteristiche degli elementi provati.....	53
5.7.3 – Strumentazione per l’esecuzione della prova.....	53
5.7.4 – Modalità di esecuzione della prova.....	55
<b>CAPITOLO 6 – RISULTATI OTTENUTI.....</b>	<b>57</b>
6.1 – GENERALITA’ .....	58
6.2 – ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI PER LE PROVE DI COMPRESSIONE DIAGONALE.....	58
- Modalità di rottura.....	62

---

---

6.3 – ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI PER LE PROVE DI COMPRESSIONE CENTRATA (PANNELLI 1100 x 1100 mm) .....	64
- Modalità di rottura.....	68
- Comportamento fuori dal piano.....	70
6.4 – ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI PER LE PROVE DI COMPRESSIONE ECCENTRICA (PANNELLI 1100 x 1100 mm) .....	71
- Modalità di rottura.....	74
- Comportamento fuori dal piano.....	76
6.5 – ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI PER LE PROVE DI PRECOMPRESSIONE E TAGLIO (PANNELLI 1100 x 1100 mm) .....	78
- Modalità di rottura.....	81
6.6 – ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI PER LE PROVE DI COMPRESSIONE CENTRATA (PANNELLI 1100 x 3000 mm) .....	83
- Modalità di rottura.....	86
- Comportamento fuori dal piano.....	88
6.7 – ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI PER LE PROVE DI COMPRESSIONE ECCENTRICA (PANNELLI 1100 x 3000 mm) .....	90
- Modalità di rottura.....	93
- Comportamento fuori dal piano.....	95
6.8 – CONFRONTO DEI RISULTATI OTTENUTI.....	97
6.8.1 – Comparazione dei provini TCS.....	97
- Confronto tra provini tozzi e provini snelli: prova di compressione centrata.....	97
- Confronto tra provini tozzi e provini snelli: prova di compressione eccentrica.....	100
6.8.2 – Comparazione dei provini TCS – Schnell Home.....	103
- Confronto pannelli TCS-Schnell Home: prova di compressione diagonale su provini quadrati.....	103
- Confronto pannelli TCS-Schnell Home: prova di compressione centrata su provini quadrati.....	105
- Confronto pannelli TCS-Schnell Home: prova di compressione centrata su provini rettangolari.....	106
- Confronto pannelli TCS-Schnell Home: prova di compressione eccentrica su provini rettangolari.....	107
<b>CAPITOLO 7 – CONCLUSIONI.....</b>	<b>109</b>

---

7.1 – CONCLUSIONI.....109

**BIBLIOGRAFIA.....114**

**ELENCO DELLE FIGURE**

---

Figura 1.1 – Sistema ICFs costituito da un blocco cassero in materiale isolante che rimane inglobato nel getto di calcestruzzo.....	5
Figura 1.2 – Pannello doppio TCS Schell costituito da due lastre in EPS, avente funzione di cassero a perdere per il successivo getto, fonte <a href="http://www.tcsgroup.cloud">http://www.tcsgroup.cloud</a> .....	5
Figura 1.3 – Stratigrafia dei pannelli sandwich di forma quadrata testati in laboratorio prodotti dalla ditta TCS.....	6
Figura 2.1 – Esempio di edilizia scolastica realizzata con pannelli sandwich strutturali, Acquasanta Terme (AP), fonte <a href="http://www.tcsgroup.cloud">http://www.tcsgroup.cloud</a> .....	10
Figura 2.2 – Particolare del pannello sandwich oggetto di studio in cui si distinguono i due paramenti in calcestruzzo e lo strato isolante in EPS.....	11
Figura 2.3 – Pareti strutturali realizzate con pannelli sandwich, fonte <a href="http://www.tcsgroup.cloud">www.tcsgroup.cloud</a> .....	14
Figura 3.1 – Pannello in EPS con rete elettrosaldato utilizzato per la realizzazione di pannello sandwich prodotto dalla ditta TCS, fonte <a href="http://www.tcsgroup.cloud">http://www.tcsgroup.cloud</a> .....	19
Figura 3.2 – Stratificazione del pannello sandwich.....	19
Figura 3.3 – Fasi di produzione del pannello di supporto in EPS, fonte <a href="http://www.tcsgroup.cloud">http://www.tcsgroup.cloud</a> .....	20
Figura 3.4 – Fasi di cantiere – montaggio del pannello di supporto in EPS rinforzato e successiva fase di getto con calcestruzzo a spruzzo, fonte <a href="http://www.tcsgroup.cloud">http://www.tcsgroup.cloud</a> .....	21
Figura 3.5 – Fasi di cantiere – risultato finale di struttura a pannelli sandwich, fonte <a href="http://www.tcsgroup.cloud">http://www.tcsgroup.cloud</a> .....	21
Figura 4.1 – Scheda tecnica dei pannelli sandwich.....	24
Figura 4.2 – Particolare Pannello 1100mm x 1100 mm per prova a compressione diagonale.....	25
Figura 4.3 e 4.4 – Tipologie di trasduttori di spostamento induttivi LVDT utilizzate.....	27
Figura 4.5 – Martinetti piatti utilizzati nelle prove.....	27
Figura 5.1 – Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro del provino.....	31
Figura 5.2 – Setup di prova.....	32
Figura 5.3 – Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A e lato B del provino.....	35
Figura 5.4 – Setup di prova.....	36
Figura 5.5 – Irregolarità costruttiva del pannello CE4 rilevata tramite eccessiva distanza ultimo martinetto-piastra di appoggio.....	39

---



---

Figura 5.6 – <i>Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A e lato B del provino</i> .....	40
Figura 5.7– <i>Setup di prova - Disposizione della cerniera cilindrica orizzontale al piede del provino</i> .....	41
Figura 5.8 – <i>Irregolarità costruttiva provino PT4 con evidente non planarità</i> .....	44
Figura 5.9 e 5.10 – <i>Particolare della mancata orizzontalità del provino misurate in corrispondenza dello spigolo sinistro e destro</i> .....	44
Figura 5.11 – <i>Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A e lato B del provino</i> .....	46
Figura 5.12 – <i>Setup di prova</i> .....	47
Figura 5.13 – <i>Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A del provino</i> .....	50
Figura 5.14 – <i>Setup di prova</i> .....	51
Figura 5.15 – <i>Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A del provino</i> .....	54
Figura 5.16 – <i>Setup di prova - Disposizione della cerniera cilindrica orizzontale al piede del provino</i> .....	55
Figura 5.17 – <i>Setup di prova</i> .....	56
Figura 6.1 – <i>Diagrammi Forza-Spostamento dei valori misurati sulle due facce di ogni provino</i> .....	59
Figura 6.2 – <i>Diagramma <math>\tau</math>-<math>\gamma</math> dei valori registrati per il lato fronte di ciascun provino</i> .....	60
Figura 6.3 – <i>Diagramma <math>\tau</math>-<math>\gamma</math> dei valori registrati per il lato retro di ciascun provino</i> .....	60
Figura 6.4 - <i>Crisi locale spigolo CD1 retro</i> .....	62
Figura 6.5 - <i>Fessurazione diagonale CD2</i> .....	62
Figura 6.6 - <i>Schiacciamento spigolo inferiore e fessurazione diagonale CD3 fronte</i> .....	63
Figura 6.7 - <i>Schiacciamento spigolo superiore e fessurazione diagonale CD4 retro</i> .....	63
Figura 6.8 – <i>Diagrammi Forza-Spostamento dei valori misurati sulle due facce di ogni provino</i> .....	65
Figura 6.9 – <i>Diagramma <math>\sigma_c</math>-<math>\epsilon</math> dei valori registrati per il lato fronte di ciascun provino</i> .....	66
Figura 6.10 – <i>Diagramma <math>\sigma_c</math>-<math>\epsilon</math> dei valori registrati per il lato retro di ciascun provino</i> .....	66
Figura 6.11 - <i>Schiacciamento cordolo superiore provino CC1</i> .....	68
Figura 6.12 - <i>Schiacciamento cordolo superiore e fessurazioni verticali CC2</i> .....	68
Figura 6.13 - <i>Fessurazione verticale provino CC3</i> .....	69

---

---

Figura 6.14 - <i>Fessurazione verticale provino CC4</i> .....	69
Figura 6.15 – <i>Spostamenti fuori dal piano dei provini misurati per il lato fronte</i> .....	70
Figura 6.16 – <i>Spanciamento misurato per il lato A e B di ciascun provino</i> .....	70
Figura 6.17 – <i>Diagrammi Forza-Spostamento dei valori misurati sulle due facce di ogni provino</i> ....	71
Figura 6.18 – <i>Diagramma <math>\sigma_e</math>-<math>\varepsilon</math> dei valori registrati per il lato retro di ciascun provino</i> .....	72
Figura 6.20 - <i>Schiacciamento e fessurazione verticale retro CE1</i> .....	74
Figura 6.21- <i>Schiacciamento e fessurazione verticale retro CE2</i> .....	74
Figura 6.22 - <i>Fessurazione verticale retro CE3</i> .....	75
Figura 6.23 - <i>Fessurazione verticale retro e schiacciamento CE4</i> .....	75
Figura 6.24 – <i>Spostamenti fuori dal piano dei provini misurati per il lato fronte e retro</i> .....	76
Figura 6.25 – <i>Spanciamento misurato per il lato A e B del provino CE1</i> .....	76
Figura 6.26 – <i>Diagramma Forza orizzontale-spostamento orizzontale in sommità dei provini</i> .....	78
Figura 6.27 – <i>Diagramma <math>\tau</math>-<math>\gamma</math> dei valori registrati per ciascun provino</i> .....	79
Figura 6.28 - <i>Fessurazione diagonale e schiacciamento spigolo fronte PT1</i> .....	81
Figura 6.29 - <i>Fessurazione diagonale e schiacciamento spigolo fronte PT2</i> .....	81
Figura 6.30 - <i>Fessurazione diagonale e schiacciamento spigolo fronte PT3</i> .....	82
Figura 6.31 – <i>Diagrammi Forza-Spostamento dei valori misurati sulle due facce di ogni provino</i> .....	83
Figura 6.32 – <i>Diagramma <math>\sigma_e</math>-<math>\varepsilon</math> dei valori registrati per il lato fronte e retro di ciascun provino</i> .....	84
Figura 6.33 - <i>Schiacciamento cordolo superiore Cc1</i> .....	86
Figura 6.34 - <i>Inflessione fuori dal piano Cc2</i> .....	86
Figura 6.35 - <i>Inflessione fuori dal piano Cc3</i> .....	87
Figura 6.36 - <i>Schiacciamento cordolo inferiore Cc3</i> .....	87
Figura 6.37 - <i>Spostamenti fuori dal piano misurati per il lato fronte</i> .....	88
Figura 6.38 – <i>Spanciamento misurato per il lato A di ciascun provino</i> .....	89

---

---

Figura 6.39 – <i>Diagrammi Forza-Spostamento dei valori misurati sulle due facce di ogni provino</i> ....	90
Figura 6.40 – <i>Diagramma <math>\sigma_e</math>-<math>\varepsilon</math> dei valori registrati per il lato fronte e retro di ciascun provino</i> .....	91
Figura 6.41 - <i>Schiacciamento cordolo inferiore Ce1</i> .....	93
Figura 6.42 - <i>Schiacciamento cordolo superiore Ce2</i> .....	93
Figura 6.43 - <i>Rotazione cordolo superiore Ce3</i> .....	94
Figura 6.44 - <i>Spostamenti fuori dal piano misurati per il lato fronte</i> .....	95
Figura 6.45 - <i>Spanciamento misurato per il lato A di ciascun provino</i> .....	96
Figura 6.46 – <i>Confronto dei valori medi in termini di Carico e Tensione di compressione centrata, ottenuti per le prove di compressione centrata su provini quadrati CC e su provini rettangolari C</i> ....	97
Figura 6.47 – <i>Confronto dei valori medi dei Moduli elastici, ottenuti per le prove di compressione centrata su provini quadrati CC e su provini rettangolari Cc</i> .....	98
Figura 6.48 – <i>Confronto tra i diagrammi <math>\sigma_c</math>-<math>\varepsilon</math> dei valori medi registrati per le prove a compressione centrata su provini quadrati CC e su provini rettangolari Cc</i> .....	99
Figura 6.49 – <i>Confronto dei valori medi in termini di Carico e Tensione di compressione eccentrica, ottenuti per le prove di compressione centrata su provini quadrati CE e su provini rettangolari Ce</i> .....	100
Figura 6.50 – <i>Confronto dei valori medi dei Moduli elastici, ottenuti per le prove di compressione eccentrica su provini quadrati CE e su provini rettangolari Ce</i> .....	101
Figura 6.51 – <i>Confronto tra i diagrammi <math>\sigma_e</math>-<math>\varepsilon</math> dei valori medi registrati per le prove a compressione centrata su provini quadrati CE e su provini rettangolari Ce</i> .....	102
Figura 6.52 – <i>Confronto dei valori medi in termini di Carico e Tensione tangenziale, ottenuti per le prove di compressione diagonale su provini quadrati Schnell Home e su provini quadrati TCS</i> .....	104
Figura 6.53 – <i>Confronto dei valori medi in termini di Carico e Tensione di compressione, ottenuti per le prove di compressione centrata su provini quadrati Schnell Home e su provini quadrati TCS</i> .....	105
Figura 6.54 – <i>Confronto dei valori medi in termini di Carico e Tensione di compressione, ottenuti per le prove di compressione centrata su provini rettangolari Schnell Home e su provini rettangolari TCS</i> .....	106
Figura 6.55 – <i>Confronto dei valori medi in termini di Carico e Tensione di compressione, ottenuti per le prove di compressione eccentrica su provini rettangolari Schnell Home e su provini rettangolari TCS</i> .....	107

---

---

## ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 6.1 <i>Risultati principali delle prove di compressione diagonale su provini quadrati</i> .....	61
Tabella 6.2 <i>Valori medi ottenuti dalle prove di compressione diagonale su provini quadrati</i> .....	62
Tabella 6.3 <i>Risultati principali delle prove di compressione centrata su provini quadrati</i> .....	67
Tabella 6.4 <i>Valori medi ottenuti dalle prove di compressione centrata su provini quadrati</i> .....	67
Tabella 6.5 <i>Risultati principali delle prove di compressione eccentrica su provini quadrati</i> .....	73
Tabella 6.6 <i>Valori medi ottenuti dalle prove di compressione centrata su provini quadrati</i> .....	73
Tabella 6.7 <i>Risultati principali delle prove di precompressione e taglio su provini quadrati</i> .....	80
Tabella 6.8 <i>Valori medi ottenuti dalle prove di precompressione e taglio su provini quadrati</i> .....	80
Tabella 6.9 <i>Risultati principali delle prove di compressione centrata su provini rettangolari</i> .....	85
Tabella 6.10 <i>Valori medi ottenuti dalle prove di compressione centrata su provini rettangolari</i> .....	85
Tabella 6.11 <i>Risultati principali delle prove di compressione eccentrica su provini rettangolari</i> ...	92
Tabella 6.12 <i>Valori medi ottenuti dalle prove di compressione eccentrica su provini rettangolari</i> ....	92

---

## **INTRODUZIONE**

La crescente evoluzione nella ricerca di nuovi metodi costruttivi all'interno della produzione edilizia, ha messo in luce negli ultimi decenni, un rinnovato interesse verso sistemi costruttivi alternativi. Infatti, l'edilizia attuale si snoda attraverso un bisogno crescente di produttività in tempi brevi ed a basso costo, proprio per sopperire alla necessità di restituire alloggi residenziali su ampia scala e manufatti commerciali o pubblici, di dimensioni più o meno rilevanti, atti a soddisfare le esigenze correnti. In questo contesto, l'utilizzo di tecnologie innovative da affiancare ai tradizionali metodi costruttivi basati sull'utilizzo del cemento armato per la realizzazione di pareti portanti, si pone come oggetto di un rinnovato interesse da parte di tecnici ed imprese.

In particolare, in questo lavoro di tesi è stata indagata la metodologia costruttiva basata sull'impiego di pannelli di tipo sandwich in cemento armato gettato in opera realizzati con la tecnologia del pannello di supporto in polistirene, andandone a valutare le caratteristiche prestazionali e di resistenza. La campagna sperimentale è stata svolta nel Laboratorio Ufficiale Materiali e Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura (DICEA) in collaborazione con la Ditta TCS srl, la quale ha commissionato i test meccanici su tale tipologia costruttiva da essi prodotta.

---

## **CAPITOLO 1**

### PRESENTAZIONE DEL TESTO

---

## **1.1 – EVOLUZIONE DEI SISTEMI A PARETI PORTANTI**

Attualmente l'industria edilizia, mossa dalla sostenibilità prima economica e poi ambientale, si sta riaffacciando all'utilizzo di soluzioni in cemento armato prefabbricate o gettate in opera, le quali offrono numerosi vantaggi in termini sia economici ma anche nell'impiego di risorse umane nella posa in opera. Di fatti, i sistemi costruttivi a setti portanti in conglomerato cementizio armato, hanno trovato larga diffusione nell'edilizia industriale del dopoguerra e nell'edilizia popolare, soprattutto nei paesi dell'Est Europa, per far fronte alle esigenze di sviluppo residenziale. Qui troviamo numerose testimonianze di edificazione intensiva attraverso la realizzazione di alloggi con strutture a pannelli in c.a. prefabbricati o gettati in opera. Tuttavia, la scarsa attenzione rivolta agli aspetti estetici, congiuntamente con le nuove esigenze di isolamento termico, non ha contribuito allo sviluppo di tali tecnologie costruttive, non riuscendo ad imporsi in maniera incisiva nel panorama dell'edilizia di metà secolo. D'altra parte, l'utilizzo di elementi in cemento armato con funzione portante, trova ampio spazio anche nell'edilizia industriale del post dopoguerra negli Stati Uniti, dove la produzione in serie di pannelli prefabbricati in calcestruzzo ha contribuito allo sviluppo industriale, commerciale e residenziale del paese. L'emergere del cemento armato come materiale da costruzione primario nella metà del XX secolo, ha aperto la strada allo sviluppo di nuovi elementi precompressi, il cui processo di prefabbricazione ha consentito un elevato livello di controllo sulla produzione, aumentando così la sua competitività sul mercato, affiancando i classici metodi costruttivi basati sull'utilizzo del cemento armato. Nonostante i numerosi vantaggi, la cantierizzazione di elementi portanti in c.a. è stata relegata ad un mercato di nicchia, destando un rinnovato interesse solo negli ultimi decenni, anche grazie all'attuazione di programmi di realizzazione di edilizia intensiva.

Le prime forme moderne di tali sistemi costruttivi sono comparse alla fine degli anni '60, grazie all'avvento dei moderni materiali espansi, utilizzati per creare elementi modulari allo scopo di agevolare la costruzione in cantiere, da completare attraverso la posa di armature ed il getto in opera in cemento armato. In Italia l'utilizzo di questi sistemi strutturali, seppur ostacolati dalla cultura del "mattoncino" come tradizionale metodo costruttivo e da un quadro normativo mai adeguato al vivace sviluppo delle innovazioni presenti sul mercato, è aumentato costantemente dagli anni '70 in poi, pur occupando una fetta marginale di mercato.

---

In questo scenario si collocano quelle tecnologie che fanno uso di sistemi strutturali caratterizzati da una configurazione tozza, utilizzati nella realizzazione di edifici residenziali di modesta altezza. Le pareti tozza in c.a. sono attualmente oggetto di un rinnovato interesse (Salonikios et al. 1999, Salonikios et al. 2000, Hidalgo et al. 2002, Salonikios 2002) e possono essere sia gettate in opera (Vanderwerf et al. 2005) che prefabbricate (PCI 2004).

Esse sono caratterizzate da un moderato costo di costruzione, da limitati tempi di messa in opera, da una grande flessibilità costruttiva e da una elevata efficienza termo-acustica.

A tal proposito i sistemi costruttivi costituiti per esempio, da casseformi di materiale isolante per realizzare pareti in c.a. stanno occupando uno spazio di mercato interessante. Esistono comunque numerose tipologie di questi sistemi impiegate nella realizzazione di pareti portanti in c.a. che si distinguono a seconda del metodo costruttivo:

- sistemi con casseformi a perdere di materiale isolante e armatura parzialmente predisposta in cui effettuare il getto di calcestruzzo;

- sistemi sandwich in cui il materiale isolante si trova inserito tra due pareti di calcestruzzo (Ricci et al., 2011); questa soluzione può essere realizzata con pannelli prefabbricati oppure gettati in opera applicando il calcestruzzo a spruzzo sui lati di un pannello isolante con armatura predisposta;

- blocchi cassero che sono costituiti da veri e propri blocchi di materiale dotato di buone caratteristiche di isolamento termico, eventualmente migliorate con aggiunta di ulteriori spessori, in cui in opera si predispone l'armatura e si effettua il getto; i blocchi sono sagomati in modo da garantire a tratti la continuità in orizzontale e verticale del getto e delle armature.

Una ulteriore suddivisione può essere fatta in relazione alla tipologia di parete in c.a. che si vuole realizzare; per questo esistono sistemi dove l'elemento modulare prefabbricato consente di ottenere:

- pareti piene

- pareti alleggerite.

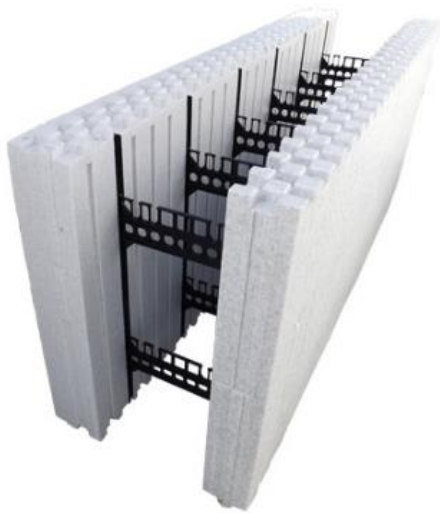
In questo contesto, risultano essere particolarmente promettenti quei sistemi strutturali costituiti da pareti in c.a. gettato in opera, le quali utilizzano un materiale leggero (con caratteristiche isolanti) come cassero o come supporto per il tradizionale calcestruzzo.

Questo è il caso delle *Insulated Concrete Forms (ICFs)*, sistema costruttivo che può essere utilizzato per realizzare pareti in cemento armato mediante casseri isolanti, solitamente



---

in polistirolo (EPS), che rimangono inglobati nel getto di calcestruzzo, con funzione di isolamento termico permanente. In questo caso quindi il polistirene è utilizzato come “cassero a perdere”, il cui lo spessore delle lastre isolanti varia in funzione delle esigenze di coibentazione. Tali elementi vanno a collocarsi come elementi portanti della struttura, andando così a rivalutare il ruolo di tamponatura associato alla parete. In *Figura 1.1 e 1.2* vengono riportati alcuni esempi dei sopra citati sistemi costruttivi basati su casseri a perdere.



*Figura 1.1 – Sistema ICFs costituito da un blocco cassero in materiale isolante che rimane inglobato nel getto di calcestruzzo*



*Figura 1.2 – Pannello doppio TCS Schell costituito da due lastre in EPS, avente funzione di cassero a perdere per il successivo getto*

Negli ultimi anni, è cresciuto l’interesse per i pannelli portanti di tipo sandwich, precompressi o gettati in opera, che utilizzano un materiale leggero come supporto (per esempio il polistirene). Questi sistemi consentono di ottenere elevati livelli di efficienza strutturale, garantita dalla capacità portante assoluta dal calcestruzzo, oltre ad ottime prestazioni termo-acustiche, garantite dal materiale isolante.

La tecnologia di tipo sandwich di cui ci occupiamo in questa tesi, come mostrato in *Figura 1.3*, si compone di due cortine di calcestruzzo, dell’ordine di alcuni centimetri di spessore, al cui interno è inserito uno spessore di materiale isolante (spesso EPS), collegati da connettori

---

a taglio. Le cortine di calcestruzzo, posso anche essere armate con rete metallica, posta all'interno dello spessore.



Figura 1.3 – Stratigrafia dei pannelli sandwich di forma quadrata testati in laboratorio prodotti dalla ditta TCS

In questo contesto possiamo distinguere i pannelli sandwich prefabbricati PCSP (*Precast Concrete Sandwich Panels*) da quelli gettati in opera. Essi si differenziano per le modalità realizzative, in quanto i primi risultano interamente prodotti ed assemblati in stabilimento, mentre la seconda tipologia viene completata in opera. Questi ultimi, conosciuti come RCSP (*Reinforced Concrete Sandwich Panels*) o anche ISWP (*Insulated Sandwich Wall Panels*), sono costituiti da una lastra di materiale isolante, opportunamente sagomata, alla quale vengono accoppiate due reti elettrosaldate tramite dei connettori metallici. Il pannello murario viene completato in opera con il calcestruzzo spruzzato. Tali sistemi strutturali sono tipicamente indicati come *shotconcrete walls* (Vanderwerf et al. 2005).

---

Nel corso degli ultimi decenni il rinnovato interesse verso l'utilizzo di pannelli sandwich ad uso strutturale, ha prodotto studi sperimentali rivolti a tale tecnologia, seppur in assenza di una specifica normativa di riferimento. Ad esempio, è possibile citare alcuni test eseguiti, come le prove per la valutazione della capacità portante dei pannelli sandwich sottoposti a carichi statici (Holmberg and Pelm, 1989) oppure per la valutazione della capacità flessionale (Bush and Stine, 1994).

## **1.2 - OBIETTIVI DELLA TESI**

Alla luce di quanto premesso, il lavoro svolto in questa tesi si è soffermato sullo studio della tecnologia strutturale basata sull'utilizzo dei pannelli di tipo sandwich in c.a. gettato in opera, nei quali il materiale leggero è utilizzato come elemento di supporto. In particolare, la convenzione stipulata tra L'Università Politecnica delle Marche, e per essa il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura (DICEA) e la Ditta TCS srl, ha previsto la caratterizzazione del comportamento meccanico di pannelli sandwich in calcestruzzo armato e polistirene di produzione della Ditta TCS srl. È stata condotta una campagna sperimentale presso il Laboratorio Prove Materiali e Strutture della Sezione Strutture del Dipartimento DICEA, dove è stato testato il comportamento dei singoli pannelli soggetti ad azioni statiche di compressione e taglio. Tali prove hanno permesso di ottenere un interessante range di risultati che descrivono il comportamento strutturale dei pannelli di tipo sandwich gettati in opera, andando a studiare il comportamento nel piano e fuori dal piano degli stessi, associati alle deformazioni ottenute. Sono state condotte quattro tipologie di prove su provini di dimensioni differenti, caratterizzati da una maggiore o minore snellezza, nello specifico: prove a compressione diagonale, prove a compressione centrata ed eccentrica, prove a precompressione e taglio.

L'obiettivo di questa tesi è quello di contribuire in letteratura alla caratterizzazione meccanica di questa tecnologia costruttiva innovativa, operando attraverso la somministrazione di carichi statici. Le indagini sperimentali condotte in laboratorio, vogliono ampliare la conoscenza rispetto all'efficacia strutturale di tali elementi considerati portanti, andando ad aggiungersi ai lavori già presenti in letteratura e confrontandosi con essi. In questo modo sarà possibile

---

giungere ad una più chiara caratterizzazione globale del comportamento strutturale dei pannelli sandwich, auspicandone un sempre crescente utilizzo nella realizzazione di edifici di modesta altezza.

### **1.3 - ORGANIZZAZIONE DEL TESTO**

A partire dai successivi capitoli, questo elaborato di tesi risulta essere così strutturato:

- nel Capitolo 2 viene descritta la tecnologia di tipo sandwich oggetto di studio, in particolare quella costituita da un elemento di tipo sandwich in c.a. gettato in opera realizzati con la tecnologia del pannello di supporto in polistirene; si forniscono quindi informazioni di tipo strutturale connesse ai vantaggi prodotti dal suo utilizzo nella costruzione di pareti portanti;
- nel Capitolo 3 si riportano i riferimenti normativi utili ad inquadrare tale sistema costruttivo, procedendo poi ad elencare le peculiarità strutturali che caratterizzano la tipologia di pannello sandwich trattata;
- nel Capitolo 4 vengono descritte le tipologie di prove condotte per la caratterizzazione sperimentale di tali elementi costruttivi; all'interno dei metodi di prova utilizzati si elencano le caratteristiche tecniche dei campioni testati e la strumentazione di supporto;
- nel Capitolo 5 vengono riportate le tipologie di prove eseguite: per ciascuna prova vengono espresse le normative e le formule di riferimento utilizzate per l'elaborazione successiva dei dati più significativi estratti, le specifiche tecniche del provino testato, l'esatta collocazione della strumentazione di prova utilizzata e le modalità di esecuzione della prova;
- nel Capitolo 6 si procede all'elaborazione dei dati ottenuti, attraverso grafici esplicativi dei valori significativi misurati; a tale scopo è utile dare una interpretazione dei risultati emersi dai test, attraverso un confronto dei grafici ottenuti e un riscontro in letteratura di risultati acquisiti per la stessa tipologia di prove;
- nel Capitolo 7 si riportano le conclusioni relative alla sperimentazione condotta, operando anche un confronto dei risultati acquisiti per la stessa tipologia di provini.

---

## **CAPITOLO 2**

### **IL SISTEMA COSTRUTTIVO A PANNELLI SANDWICH**

---

## 2.1 - TECNOLOGIA DEI PANNELLI SANDWICH

I pannelli sandwich, prefabbricati o gettati in opera, vengono impiegati come unità strutturali nella realizzazione di pareti portanti di edifici residenziali, commerciali e pubblici. Il loro utilizzo risale alla seconda metà del XX secolo, soprattutto nei paesi del Nord America, precursori dell'evoluzione di tale tecnologia e in quelli dell'Est Europa. Ad oggi, l'utilizzo di pannelli sandwich per uso strutturale, costituisce una valida alternativa funzionale nella costruzione di edifici, anche a seguito degli eventi sismici dello scorso 2016, ponendosi al primo posto per velocità di posa in opera, economicità e basso dispendio di manodopera, oltre ad offrire ottimi valori di efficienza energetica. Proprio per questo, l'impronta ecosostenibile del mercato attuale, favorisce un rinnovato interesse nell'utilizzo di pannelli sandwich con funzione strutturale.



*Figura 2.1 – Esempio di edilizia scolastica realizzata con pannelli sandwich strutturali, Acquisanta Terme (AP)*

---

## 2.2 - COMPOSIZIONE DEI SISTEMI SANDWICH

I pannelli sandwich oggetto di interesse, sono composti da due paramenti esterni in calcestruzzo spruzzato in opera, rinforzato con rete metallica, in cui al centro è inserito uno strato isolante, con funzione di supporto (*Figura 2.2*).



*Figura 2.2 – Particolare del pannello sandwich oggetto di studio in cui si distinguono i due paramenti in calcestruzzo e lo strato isolante in EPS*

Ad esso vengono accoppiati dei rinforzi longitudinali, collegati tra loro tramite dei connettori metallici. I due paramenti esterni in calcestruzzo vengono considerati strutturali o non strutturali secondo la seguente distinzione:

---

-paramenti esterni in calcestruzzo strutturali, quando entrambi forniscono al pannello una resistenza al carico significativa; lo spessore minimo della cortina varia a seconda della lavorazione del calcestruzzo, precompresso o gettato in opera;

-paramenti esterni in calcestruzzo non strutturali, detti anche pannelli di rivestimento, quando vengono utilizzati solo per scopi estetici o di tamponatura, senza offrire alcun contributo significativo alla resistenza ai carichi applicati.

Il modello a cui si rifà questo lavoro di tesi, è proprio quello costituito dalle due cortine in calcestruzzo strutturali, aventi funzione portante. Il rinforzo longitudinale delle componenti cementizie, dipende dallo spessore stesso del pannello, dalla resistenza al carico prevista, dalle condizioni di manutenzione. Esso può essere costituito da barre longitudinali pretese o da rete elettrosaldata, disposta nello spessore.

Per quanto riguarda invece i rinforzi trasversali, sono costituiti da barre in acciaio o altri materiali plastici, con passo variabile a seconda delle dimensioni del pannello.

### **2.2.1 - ISOLAMENTO**

Lo spessore ed il tipo di isolamento da interporre tra le due facce di calcestruzzo precompresso, dipendono dalle esigenze di resistenza termica che si vogliono ottenere dalla struttura, dalla geometria del pannello, dalla posizione del sito di installazione. In generale, vengono utilizzati isolanti di tipo cellulare (rigidi), poiché le loro proprietà fisiche risultano essere le più compatibili con il calcestruzzo. L'isolamento cellulare utilizzato per la produzione di pannelli sandwich, è costituito per lo più da materiale termoplastico o termoindurente, le cui proprietà termiche e meccaniche differiscono a seconda di come avviene il loro processo produttivo. Le tipologie di materiali termoplastici utilizzati sono:

-EPS (polistirene espanso);

-XPS (polistirene espanso estruso).

Mentre per i materiali termoindurenti, troviamo:



---

-poliuretano espanso;

-PIR (poli isocianurato).

Tali tipi di isolamento precedentemente menzionati, sono trattati dagli standard ASTM e riconosciuti a livello nazionale negli Stati Uniti per la produzione di materiali.

Recentemente, sono stati introdotti materiali isolanti ecosostenibili, a sostegno di una edilizia GREEN: si tratta di un isolamento in lana minerale, in particolare lana di roccia o lana di vetro, da interporre tra i due paramenti in calcestruzzo armato che costituiscono il pannello sandwich.

## **2.3 – VANTAGGI CONNESSI ALL’UTILIZZO DI PANNELLI SANDWICH**

### **STRUTTURALI**

Ad oggi, l’approccio per la scelta delle tipologie strutturali nell’edilizia, non può prescindere dall’esigenza di realizzare opere “sostenibili”.

Vi sono pertanto, aspetti pratici e tecnici da non trascurare nella scelta delle tipologie costruttive da utilizzare, ponendo per esempio l’attenzione su l’uso di materiali biocompatibili e/o riciclabili, il risparmio di energia nella produzione dei materiali utilizzati, nella gestione e funzionamento dell’opera finita, nella riciclabilità dei componenti dell’opera stessa. Per questo la scelta di utilizzare un sistema strutturale costituito dai pannelli sandwich in calcestruzzo armato, si pone come una possibile alternativa all’interno di un rinnovato mercato edilizio.

Di fatti, sia per i metodi di produzione che di posa in opera, questa tecnologia costruttiva basata sull’utilizzo del pannello in polistirene come supporto, offre numerosi vantaggi significativi:

-diminuzione delle fasi di lavorazione in cantiere, data dalla posa in opera dell’elemento alleggerito e dal successivo getto in calcestruzzo;

-controllo sui materiali utilizzati nella costruzione;

- 
- posa in opera rapida e semplice garantita dalla leggerezza degli elementi;
  - risparmio economico garantito dalla velocità di realizzazione con un conseguente minor costo di noleggio delle attrezzature e della manodopera;
  - processo di costruzione semplificato e sequenziale: meno operazioni sul posto, meno rifiuti prodotti, meno movimentazione di materiali;
  - sicurezza in cantiere, grazie agli elementi facilmente movibili a mano da un solo operatore ed in totale sicurezza;
  - ottime proprietà di resistenza meccanica, ottime proprietà termiche ed acustiche;
  - libertà di progettazione e flessibilità di costruzione;
  - materiali da costruzione durevoli e riciclabili al fine vita dell'edificio.

Pertanto, la realizzazione di pareti portanti in c.a. gettato in opera, in cui il polistirene è utilizzato come materiale di supporto, coniuga i vantaggi dati dalle strutture gettate in opera, caratterizzate da un comportamento monolitico e da una stabilità maggiore, uniti a quelli dei sistemi prefabbricati. In questo caso infatti, il pannello di supporto modulare, viene interamente realizzato in stabilimento, garantendo così elevata precisione e ridotti costi di messa in opera.



*Figura 2.3 – Pareti strutturali realizzate con pannelli sandwich*

---

## **CAPITOLO 3**

### INQUADRAMENTO NORMATIVO E PECULIARITA' STRUTTURALI

---

## 3.1 - INQUADRAMENTO DEI PANNELLI SANDWICH

### NELL'AMBITO NORMATIVO

Tra le diverse soluzioni per ottenere un involucro edilizio efficace, sia in termini di isolamento termico, sia nello svolgimento di adeguate prestazioni strutturali, connesse ad una rapidità di esecuzione, i sistemi costruttivi citati in questo testo, sia prefabbricati che gettati in opera, stanno occupando uno spazio di mercato interessante. Per questi motivi, il rinnovato interesse verso tali metodologie costruttive, pone la necessità di un riferimento normativo idoneo, applicabile a tali scelte.

La prima normativa a livello europeo riguardante il calcolo e l'esecuzione delle strutture a grandi pannelli, venne emanata dal C.E.B. (Comité Européen du Béton), dal C.I.B. (Conseil International du Bâtiment) e dal U.E.A.t.c. (the European Union of Agrément) nel 1966 e venne recepita anche in Italia fin dal 1969. Di fatti, per quanto riguarda i sistemi strutturali oggetto di studio (sistemi strutturali a pareti portanti in c.a. gettato in opera realizzati secondo la tecnologia del pannello di supporto in polistirene), è possibile trovare riscontro nelle seguenti normative:

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

Tali riferimenti, posso essere utilizzati nella progettazione delle strutture oggetto di studio nei confronti delle azioni statiche.

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

Attualmente, le pareti realizzate con sistemi sandwich, in cui il materiale isolante si trova inserito tra due pareti di calcestruzzo prefabbricate (Ricci et al.,2011) oppure realizzate con un elemento di supporto, costituito da materiale isolante in cui in opera si predispone l'armatura e si effettua il getto di calcestruzzo, hanno delle particolari caratteristiche che non

---

consentono di applicare integralmente le regole di progettazione valide per le usali tipologie costruttive in c.a. (strutture a telai, a pareti, con nuclei). L'unico sistema che si può assimilare ad un sistema costruttivo classico è quello in cui si adottano casseformi di materiale isolante per la realizzazione di pareti in c.a. (Pecce, Bibbo, Ceroni, *“Modellazione di pannelli in c.a. per il sistema a pareti debolmente armate”*). Pertanto, le pareti realizzate con quest'ultimo sistema vengono identificate tecnicamente come “pareti estese debolmente armate” e risultano essere sufficientemente contemplate nella vigente normativa tecnica NTC2018, DM 17 Gennaio 2018. Al contrario, non vengono citate le pareti a sezione alleggerita, ad esempio quelle di tipo “sandwich” o quelle a griglia (grid type).

Non risultano altresì applicabili per tale tecnologia costruttiva, le *“Linee Guida per sistemi costruttivi a pannelli portanti basati sull'impiego di blocchi cassero e calcestruzzo debolmente armato gettato in opera”*, pubblicate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici nel 2011, in cui è riportata esplicitamente la seguente limitazione: *“I criteri di progetto contenuti nelle presenti linee guida non sono applicabili ai sistemi costruttivi basati sui pannelli sandwich di calcestruzzo armato con interposto materiale isolante”*.

A livello internazionale, l'attenzione è rivolta alle prescrizioni fornite dal quadro normativo americano. Infatti, la recente ACI 318-14 del 2014, fa proprio riferimento a strutture a pareti sandwich prefabbricate e non gettate in opera. Tale normativa, aggiornamento della ACI 318 del 2008, cita in maniera esplicita il manuale “PCI Design Handbook-Precast and Prestressed Concrete” del 2004, a cura del Precast/Prestressed Concrete Institute, come manuale per la progettazione di strutture prefabbricate a pannelli sandwich. Grazie al principio definito “Emulation”, trattato nel paragrafo 3.1.2.1 del manuale, il suo utilizzo nell'aiuto alla progettazione, può essere esteso anche alle strutture a pareti sandwich in c.a. gettato in opera.

Alla luce dell'attuale quadro normativo esposto, riferito ai sistemi per pareti portanti, vengono esplicitate le normative di riferimento utilizzate per la caratterizzazione meccanica dei pannelli sandwich oggetto di indagine. Le normative utilizzate per le prove statiche eseguite sui pannelli sandwich sono:

---

-ASTM E519/E519 M-15 (*Standard Test Method for Diagonal Tension in Masonry Assemblages*), per le prove di compressione diagonale;

-UNI EN 1052-1 (*Metodi di prova per muratura - Determinazione della resistenza a compressione*), per le prove di compressione.

Attualmente, non sono presenti normative di riferimento che regolino le prove di precompressione e taglio.

### **3.2 - IL SISTEMA COSTRUTTIVO IN ESAME: IDENTIFICAZIONE DELLE SUE PECULIARITA'**

Il sistema costruttivo in esame si basa sulla produzione e l'impiego di pannelli modulari in polistirene, prefabbricati ed armati in cantiere, che fungono da supporto per il successivo getto di calcestruzzo strutturale.

Con riferimento agli specifici prodotti sviluppati dalla ditta TCS srl, questi pannelli modulari hanno una larghezza di circa 1100 mm ed un'altezza variabile, pari a quella di interpiano. Essi sono costituiti da una singola lastra di polistirene espanso (EPS) additivato con grafite, opportunamente sagomata e di spessore variabile a seconda delle esigenze strutturali e di isolamento termico.

Sulle due facce esterne dello strato di polistirene, vengono accoppiate due reti elettrosaldate realizzate con fili di acciaio zincato, come si può osservare in *Figura 3.1*, aventi diametro di 5 mm e collegate tra loro tramite dei connettori metallici (forchette  $\phi 8/15$  nella zona inferiore e superiore). Questi ultimi, in fase di produzione, sono inseriti all'interno dello strato in polistirene ed adeguatamente saldati alle reti.



Figura 3.1 – Pannello in EPS con rete elettrosaldata utilizzato per la realizzazione di pannello sandwich prodotto dalla ditta TCS

La stratificazione del pannello sandwich viene riportata in *Figura 3.1*.

Il pannello murario viene completato in opera con un betoncino strutturale fibrato.

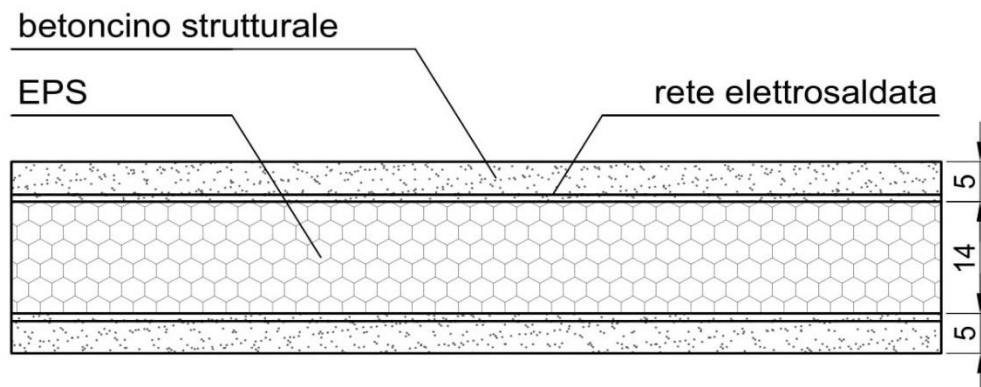


Figura 3.2 – Stratificazione del pannello sandwich

Di seguito si riportano i dati tecnici dei materiali utilizzati nella realizzazione del pannello sandwich:

-lastra EPS 120 (Polistirene Espanso Sintetizzato) a migliorata resistenza termica, avente densità pari a  $22 \text{ kg/m}^3$  e uno spessore di 140 mm (valori riferiti ad una parete standard);

---

-rete elettrosaldada ad aderenza migliorata, di diametro  $\phi 5$  e disposta secondo una maglia di 75 mm x 100 mm;

-betoncino strutturale fibrato di spessore 50 mm per lato, con resistenza a compressione pari a 30 N/mm<sup>2</sup>.

In *Figura 3.3* vengono illustrate le fasi di produzione in stabilimento del pannello di supporto in EPS dotato di rete elettrosaldada, secondo tale ordine di realizzazione:

-il blocco in EPS viene tagliato con l'apposita macchina a controllo numerico, realizzando più strati contemporaneamente;

-ogni lastra viene dotata di due fogli di rete elettrosaldada, resi solidali mediante saldatura automatica delle stesse con più connettori metallici;

-i pannelli sono pronti per il trasporto in cantiere ed il montaggio.



*Figura 3.3 – Fasi di produzione del pannello di supporto in EPS*

Il ridotto peso del pannello EPS ne permette una facile mobilitazione in cantiere e semplifica le operazioni di posa in opera. Una volta completata la fase di getto con il betoncino strutturale fibrato, si ottiene un elemento dotato di grande solidità, con una elevata resistenza agli urti, una notevole resistenza a compressione associata ad un'ottima prestazione termica. In *Figura 3.4 e 3.5* vengono mostrate alcune fasi della cantierizzazione. Tali pannelli, permettono la realizzazione di costruzione fino a tre livelli, compatibilmente alle verifiche strutturali ed alle norme tecniche di riferimento.





*Figura 3.4 – Fasi di cantiere – montaggio del pannello di supporto in EPS rinforzato e successiva fase di getto con calcestruzzo a spruzzo*



*Figura 3.5 – Fasi di cantiere – risultato finale di struttura a pannelli sandwich*

---

## **CAPITOLO 4**

### METODOLOGIA DI PROVA

---

## 4.1 – STUDI CONDOTTI

La campagna di sperimentazione oggetto di questa tesi, ha previsto la caratterizzazione meccanica dei pannelli di tipo sandwich in c.a. gettato in opera, che utilizzano il materiale isolante come supporto (da qui in avanti identificati solamente come *pannelli sandwich*) con l'obiettivo di verificarne l'efficacia strutturale nella composizione di sistemi a pareti portanti. In particolare, sono state condotte numerose prove per la valutazione del comportamento dei singoli pannelli in risposta ad azioni statiche di compressione e taglio. Risulta altresì interessante verificare se il comportamento atteso delle pareti sandwich, dedotto dalla Scienza e dalla Tecnica delle Costruzioni e dalle normative vigenti, corrisponda con il comportamento effettivamente riscontrato in questa e nelle precedenti sperimentazioni.

## 4.2 – SPECIFICHE DEI PROVINI TESTATI

Le prove effettuate in laboratorio per la caratterizzazione meccanica dei pannelli sandwich oggetto di studio, sono state eseguite su due tipologie di provini: uno di forma quadrata avente dimensioni  $w=1100$  mm,  $h=1100$  mm, uno di forma rettangolare avente dimensioni  $w=1100$  mm,  $h=3000$  mm. Essi presentano le medesime caratteristiche costruttive di seguito elencate:

- Pannello Sandwich 1100 mm x 1100 mm: costituito da una lastra in polistirene espanso (EPS) di spessore pari a 140 mm, pareti esterne realizzate in betoncino strutturale fibrato dello spessore di 50 mm, armate con rete elettrosaldata  $\phi 5$  75/100 e con l'aggiunta di forchette  $\phi 8/15$  nella zona inferiore e superiore; lo spessore totale è pari a 240 mm;
- Pannello Sandwich 1100 mm x 3000 mm: costituito da una lastra in polistirene espanso (EPS) di spessore pari a 140 mm, pareti esterne realizzate in betoncino strutturale fibrato dello spessore di 50 mm, armate con rete elettrosaldata  $\phi 5$  75/100 e con l'aggiunta di forchette  $\phi 8/15$  nella zona inferiore e superiore; lo spessore totale è pari a 240 mm.

In Figura 4.1 e 4.2, si riportano le schede tecniche dei pannelli sopra descritti.

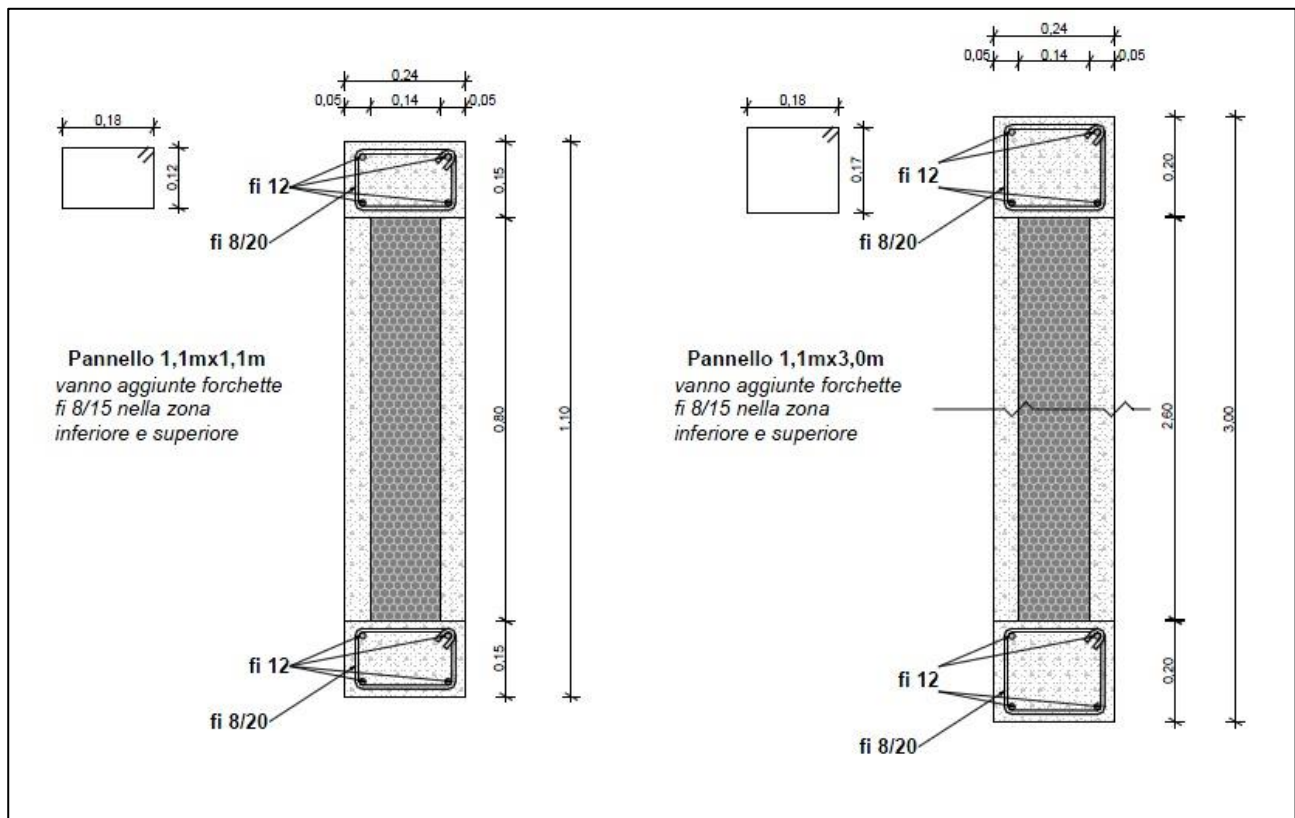


Figura 4.1 – Scheda tecnica dei pannelli sandwich

Per tutti i provini destinati alle prove di compressione e taglio, sono stati realizzati due cordoli in cemento armato di sezione 240 x 240 mm, armati con 2+2  $\phi 12$  longitudinali e staffaggio  $\phi 8/20$  (Figura 4.1 e 4.2). Questo al fine di facilitare sia le operazioni di trasporto, sia per garantire una corretta applicazione e distribuzione del carico durante l'esecuzione dei test.

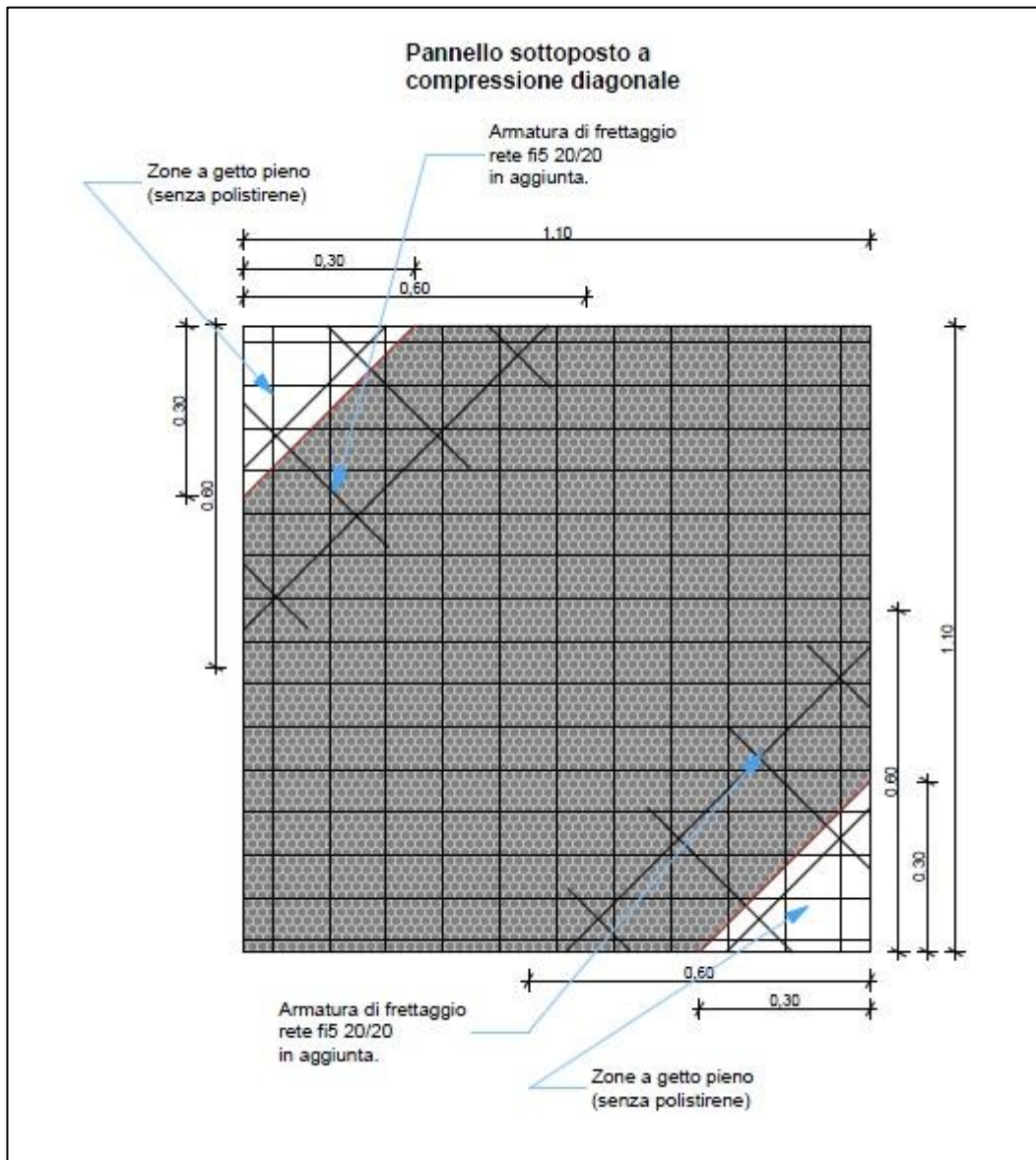


Figura 4.2 – Particolare Pannello 1100mm x 1100 mm per prova a compressione diagonale

Per garantire la corretta esecuzione dei test, ai pannelli sottoposti a prova di compressione diagonale è stata aggiunta una armatura di frettaggio con rete metallica  $\phi 5$  20/20, in corrispondenza degli spigoli del provino sottoposti a compressione, utile a confinare la zona di getto pieno in calcestruzzo.

---

### 4.3 – TIPOLOGIE DI PROVE ESEGUITE

L'obiettivo della sperimentazione condotta su tale tipologia costruttiva di pannello sandwich con funzione strutturale, è stato quello di ottenere un esauriente numero di risultati ottenuti dalle prove statiche di compressione e taglio. Secondo le normative UNI EN ed ASTM, per ogni test devono essere usati minimo tre provini aventi larghezza  $w$  pari ad almeno 1200 mm (4 ft) ed altezza  $h$  rappresentativa del campione da testare. Tuttavia, in accordo con le eccezioni della normativa di riferimento, i campioni testati sono stati realizzati con larghezza ridotta pari a  $w = 1100$  mm, poiché le apparecchiature di prova non erano in grado di contenere provini di dimensioni maggiori. Sono state eseguite le seguenti prove:

- 4 prove a compressione diagonale su pannelli  $h=1100$  mm,  $w=1100$  mm;
- 4 prove a compressione centrata su pannelli  $h=1100$  mm,  $w=1100$  mm;
- 4 prove a compressione eccentrica su pannelli  $h=1100$  mm,  $w=1100$  mm;
- 4 prove a compressione e taglio su pannelli  $h=1100$  mm,  $w=1100$  mm;
- 3 prove a compressione centrata su pannelli  $h=3000$  mm,  $w=1100$  mm;
- 3 prove a compressione eccentrica su pannelli  $h=3000$  mm,  $w=1100$  mm.

### 4.4 STRUMENTAZIONE DI PROVA

La caratterizzazione meccanica dei pannelli sandwich effettuata nel Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture, della Sezione Strutture del Dipartimento DICEA, ha previsto l'esecuzione delle prove statiche sopra citate, al fine di ottenere per ogni provino testato, un range di deformazioni e spostamenti successivamente rielaborati.

A tale scopo, la strumentazione di prova ha previsto l'utilizzo di:

-martinetti idraulici, posti in adiacenza ai provini per la somministrazione del carico; i quali sviluppano ciascuno una forza pari a 500 kN;

-trasduttori di spostamento induttivi (LVDT), funzionanti in un intervallo di  $\pm 50$  mm, applicati in una configurazione estensimetrica per la misurazione di spostamenti nel piano e fuori dal piano e dello spanciamiento del provino quando necessario (*Figura 4.3*).

---

I martinetti idraulici sono gestiti per mezzo di una centralina idraulica dotata di un trasduttore di pressione per misurare il carico applicato: si esercita una pressione al fluido all'interno dei martinetti che fa sì che i pistoni si alzino per applicare il carico al provino.

L'elaborazione dei dati provenienti dagli strumenti utili per l'esecuzione della prova, è stata eseguita mediante un acquirente digitale in grado di rilevare un massimo di n.8 trasduttori.



*Figura 4.3 e 4.4 – Tipologie di trasduttori di spostamento induttivi LVDT utilizzate*



*Figura 4.5 – Martinetti piatti utilizzati nelle prove*

---

## **CAPITOLO 5**

### SPERIMENTAZIONE



---

## 5.1 – GENERALITA'

La sperimentazione sui pannelli sandwich di produzione della ditta TCS srl, è stata condotta fra il Marzo e l'Aprile 2019, nel laboratorio del dipartimento DICEA.

Nei successivi paragrafi verranno descritte le tipologie di prove eseguite: per ogni prova verrà indicata la normativa utilizzata e le formule predittive di riferimento, verranno indicate le caratteristiche degli elementi testati, gli strumenti utilizzati e le modalità di esecuzione della prova. L'elaborazione e l'interpretazione dei risultati ottenuti da ciascuna prova, saranno poi presentati nel Capitolo 6 di questo elaborato.

## 5.2 – PROVE DI COMPRESSIONE DIAGONALE

Questa tipologia di prova, consente di determinare la massima tensione tangenziale della muratura, la deformazione ed il modulo di elasticità tangenziale e secante, applicando una forza di compressione complanare al pannello stesso, lungo la diagonale, fino a rottura lungo l'asse del carico. La prova di compressione diagonale può essere realizzata in situ, previo isolamento della porzione di interesse rispetto alla restante muratura mediante tagli con sega a disco, o in laboratorio, su campioni prelevati in situ o ricostruiti all'interno del laboratorio stesso. Nel caso oggetto di studio, la sperimentazione ha previsto l'utilizzo di provini confezionati in sede dalla ditta TCS srl, secondo gli standard previsti e trasportati poi in laboratorio.

### 5.2.1 – Normativa e formule di riferimento

La preparazione del campione e lo svolgimento della prova possono essere effettuati in accordo con la norma americana ASTM E519/E519-M15 (Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages).

In base alle indicazioni delle norme sopra citate, sono state calcolate la massima tensione tangenziale  $\tau$  e la deformazione  $\gamma$ .

La  $\tau_{max}$  [MPa] è espressa dalla seguente formula:

---

$$\tau_{max} = \frac{0,707 P}{A_n}$$

dove:

$$A_n [\text{mm}^2] = \frac{(w+h)}{2} tn \quad \text{area netta della sezione orizzontale del pannello;}$$

w = larghezza del campione;

h = altezza del campione;

t = spessore totale della sezione orizzontale considerata del campione;

n = percentuale di area lorda dell'unità solida espressa come decimale;

P = carico massimo esterno.

Pertanto, l'area netta  $A_n$  della sezione orizzontale del pannello è pari a 110000 mm<sup>2</sup> per tutte le tipologie di provini.

La deformazione  $\gamma$  [mm/mm] è stata calcolata nel modo seguente:

$$\gamma = \varepsilon_c + |\varepsilon_t|$$

dove:

$\varepsilon_c$  = deformazione di compressione (letta sulla direzione verticale);

$\varepsilon_t$  = deformazione di trazione (letta sulla direzione orizzontale).

Dai valori di tensione tangenziale e deformazioni così ottenuti, si ricavano rispettivamente il modulo di elasticità tangenziale secante  $G_{sec}$  [MPa] ed il modulo di elasticità tangenziale tangente  $G_{tg}$  [MPa], che per definizione vengono espressi nel seguente modo:

$$G_{sec} = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}}$$

$$G_{tg} = \frac{\tau_{max/3}}{\gamma_{max}}$$

Nello specifico, il modulo secante rappresenta la pendenza della retta secante passante per l'origine e per un punto della curva. Mentre, il modulo tangente rappresenta la pendenza della

---

tangente alla curva ad uno specifico livello di sforzo, rispettivamente  $\tau/3$  pari ad  $1/3$  della resistenza meccanica a compressione.

### 5.2.2 – Caratteristiche degli elementi provati

Le prove sono state eseguite su 4 pannelli quadrati di tipo sandwich di lato 1100 mm, armati con rete  $\phi 5$  e aventi spessore complessivo pari a 240 mm (si veda *Figura 4.2* del precedente capitolo).

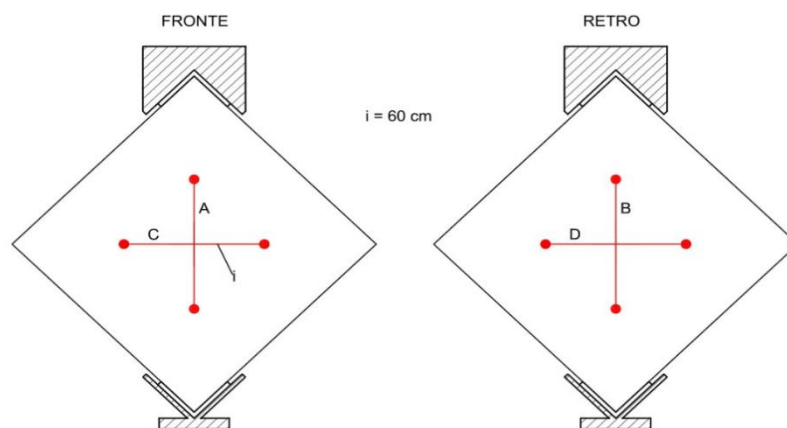
Ogni provino è stato individuato mediante un codice di prova, come di seguito riportato:

- CD 1: provino 1 con armatura di frettaggio  $\phi 5$  20/20, spessore totale 240 mm;
- CD 2: provino 2 con armatura di frettaggio  $\phi 5$  20/20, spessore totale 240 mm;
- CD 3: provino 3 con armatura di frettaggio  $\phi 5$  20/20, spessore totale 240 mm;
- CD 4: provino 4 con armatura di frettaggio  $\phi 5$  20/20, spessore totale 240 mm.

### 5.2.3 – Strumentazione per l'esecuzione della prova

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

- n.4 martinetti idraulici collocati al di sotto della pressa utilizzata per alloggiare il provino: consentono l'applicazione del carico in regime controllato;
- n.4 trasduttori di spostamento LVDT: consentono il rilievo delle deformazioni e sono stati disposti uno in posizione verticale (A-B) ed uno in posizione orizzontale (C-D), per ogni faccia del provino. In *Figura 5.1* si riporta l'esatta collocazione della strumentazione di prova.



*Figura 5.1 – Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro del provino*

---

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

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

#### **5.2.4 – Modalità di esecuzione della prova**

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

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



*Figura 5.2 – Setup di prova*

---

### 5.3 - PROVE DI COMPRESSIONE CENTRATA (PANNELLI 1100 mm x 1100 mm)

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

#### 5.3.1– Normativa e formule di riferimento

A causa della mancanza di una norma specifica che controlli l'esecuzione di prove a compressione su tecnologie costruttive come quelle dei pannelli sandwich, vi è la possibilità di rifarsi alla normativa UNI EN 1052-1 (Metodi di prova per muratura-Determinazione della resistenza a compressione).

La tensione di compressione  $\sigma_c$  [MPa] è stata calcolata con formula seguente:

$$\sigma_c = \frac{N}{A_n}$$

dove:

N = sforzo di compressione applicato;

$A_n$  = area netta della sezione orizzontale del pannello;

Mentre la deformazione  $\varepsilon$  [mm/mm] viene così espressa:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

in cui:

$\Delta l$  = variazione di lunghezza registrata;

$l_0$  = lunghezza iniziale.

Anche qui si calcolano il modulo elastico secante  $E_{sec}$  [MPa] ed il modulo elastico tangente  $E_{tg}$  [MPa] tramite le relazioni:

---

$$E_{\text{sec}} = \frac{\sigma_c \text{ max}}{\varepsilon_{\text{max}}}$$

$$E_{\text{tg}} = \frac{\sigma_c \text{ max}/3}{\varepsilon_{\text{max}}}$$

### 5.3.2 – Caratteristiche degli elementi provati

Le prove sono state eseguite su 4 pannelli quadrati di tipo sandwich di lato 1100 mm, armati con rete  $\phi 5$  e aventi spessore complessivo pari a 240 mm. Alle estremità superiore ed inferiore dei provini, sono stati realizzati due cordoli in c.a. di sezione pari a 240x115 mm, armati con 2+2 $\phi 12$  longitudinale e staffe  $\phi 8/20$  (Figura 4.1 del precedente capitolo).

Ad ogni provino è stato associato un codice identificativo della prova eseguita:

- CC 1: provino 1
- CC 2: provino 2
- CC 3: provino 3
- CC 4: provino 4

### 5.3.3 – Strumentazione per l'esecuzione della prova

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

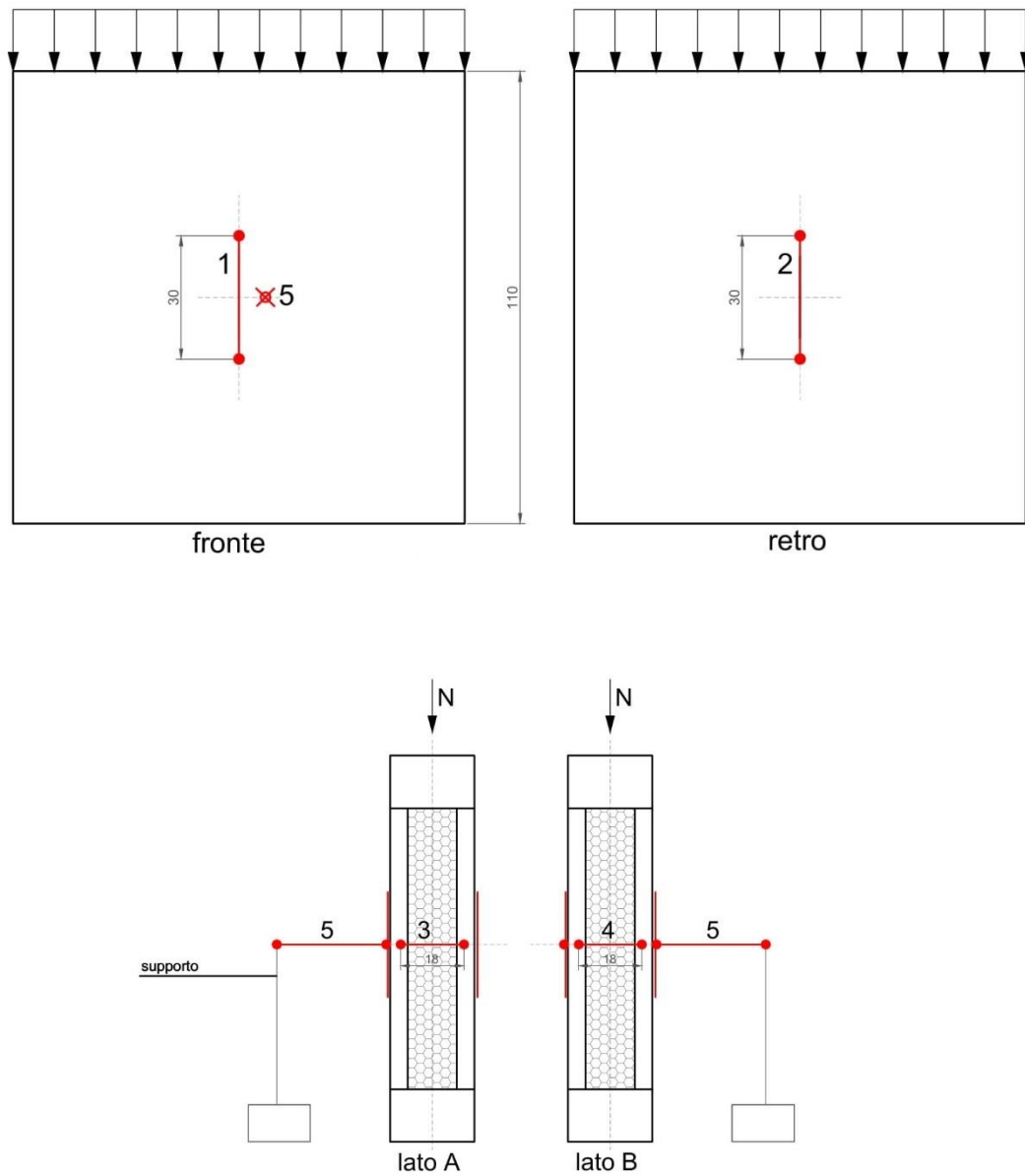
-n.4 martinetti idraulici collocati al di sopra del provino: consentono l'applicazione del carico in regime controllato;

-n.5 trasduttori di spostamento LVDT per il rilevamento delle deformazioni e installati nel modo seguente:

- due trasduttori in posizione verticale, uno per ciascuna faccia del provino testato;
- due trasduttori posizionati sullo spessore del provino, lato A e lato B, per la lettura dello spaziamento;

- un trasduttore per la lettura delle deformazioni fuori da piano posizionato a ridosso del lato fronte del provino, tramite l'ausilio di una base di supporto.

In *Figura 5.3* si riporta l'esatta collocazione della strumentazione di prova.

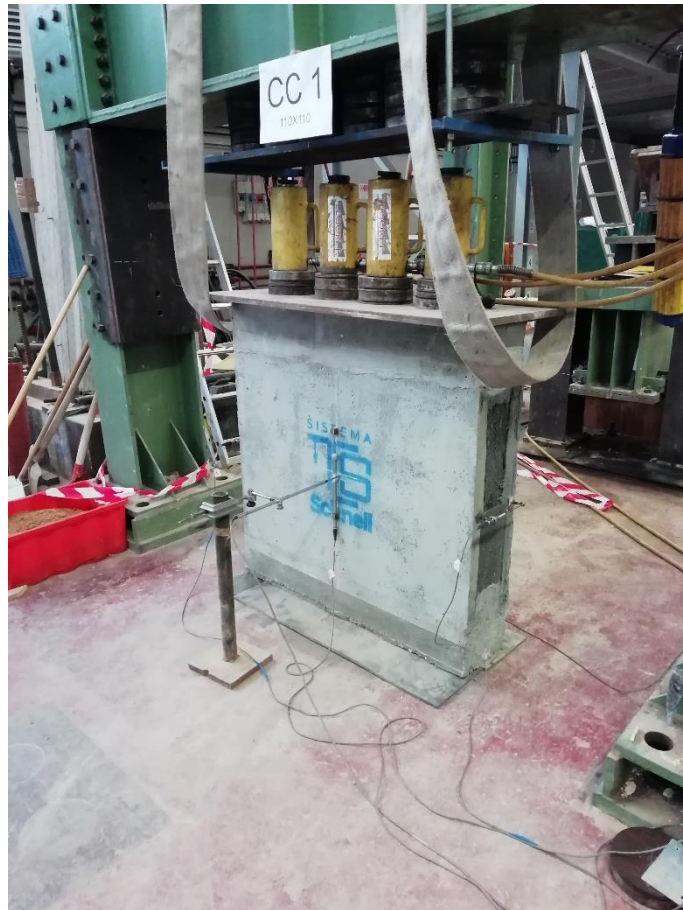


*Figura 5.3 – Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A e lato B del provino*

---

### 5.3.4 – Modalità di esecuzione della prova

Come si può vedere nella Figura 4.4.3 questa prova è stata eseguita ponendo il campione al di sotto di un telaio in acciaio dotato di una traversa rigida, la quale è stata utilizzata come strumento di contrasto durante l'attivazione dei martinetti e quindi l'applicazione del carico. Tra i martinetti e la base superiore del campione, è stata posta una piastra rigida in modo da distribuire gli sforzi uniformemente lungo il lato del provino. Le prove sono state condotte con sforzo assiale crescente, sino al manifestarsi dei fenomeni di rottura dovuta al carico di compressione.



*Figura 5.4 – Setup di prova*



---

## 5.4- PROVE DI COMPRESSIONE ECCENTRICA (PANNELLI 1100 mm x 1100 mm)

Con riferimento al caso della muratura, contemplata in normativa, in questa prova si andranno a valutare i parametri più significativi registrati dopo l'applicazione di un carico eccentrico. Di fatti l'applicazione del carico decentrato rispetto all'asse del provino, genera uno sforzo di presso-flessione il quale ha incidenza sui parametri ottenuti. In particolare, si andranno a valutare la tensione di compressione massima eccentrica, lo spostamento verticale ed il modulo di elasticità.

### 5.4.1– Normativa e formule di riferimento

Come per la prova di compressione semplice, la normativa a cui è possibile fare riferimento per l'esecuzione della prova eccentrica è la UNI EN 1052-1. Considerando il contributo del Momento generato dalla eccentricità del carico, i parametri indagati risultano così calcolati:

La tensione di compressione eccentrica  $\sigma_e$  [MPa] viene espressa con la seguente formula:

$$\sigma_e = \frac{N}{A_n} + \frac{M}{W}$$

dove:

$A_n$  = area netta della sezione orizzontale del pannello;

$N$  = sforzo di compressione applicato;

$M$  = momento flettente dato dall'eccentricità;

$W$  = modulo di resistenza.

La deformazione  $\varepsilon$  [mm/mm] è stata così valutata:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

---

in cui:

$\Delta l$  = variazione di lunghezza registrata;

$l_0$  = lunghezza iniziale.

Per la prova di compressione eccentrica, il modulo elastico secante  $E_{sec}$  [MPa] ed il modulo elastico tangente  $E_{tg}$  [MPa] sono dati da:

$$E_{sec} = \frac{\sigma_{e\ max}}{\varepsilon_{max}}$$

$$E_{tg} = \frac{\sigma_{e\ max}/3}{\varepsilon_{max}}$$

#### 5.4.2 – Caratteristiche degli elementi provati

Le prove sono state eseguite su 4 pannelli quadrati di tipo sandwich di lato 1100 mm, armati con rete  $\phi 5$  e aventi spessore complessivo pari a 240 mm. Alle estremità superiore ed inferiore dei provini, sono stati realizzati due cordoli in c.a. di sezione pari a 240x115 mm, armati con 2+2 $\phi 12$  longitudinale e staffe  $\phi 8/20$  (*Figura 4.1* del Cap.4)

Ad ogni provino è stato associato un codice identificativo della prova eseguita:

- CE 1: provino 1
- CE 2: provino 2
- CE 3: provino 3
- CE 4: provino 4

Al campione CE4 è da attribuire ad una mancata orizzontalità della base di appoggio superiore, legata ad irregolarità costruttive, come riportato in *Figura 5.5*.



*Figura 5.5 – Irregolarità costruttiva del pannello CE4 rilevata tramite eccessiva distanza ultimo martinetto-piastra di appoggio*

### **5.4.3 – Strumentazione per l'esecuzione della prova**

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

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

In *Figura 5.6* si riporta l'esatta collocazione della strumentazione di prova.

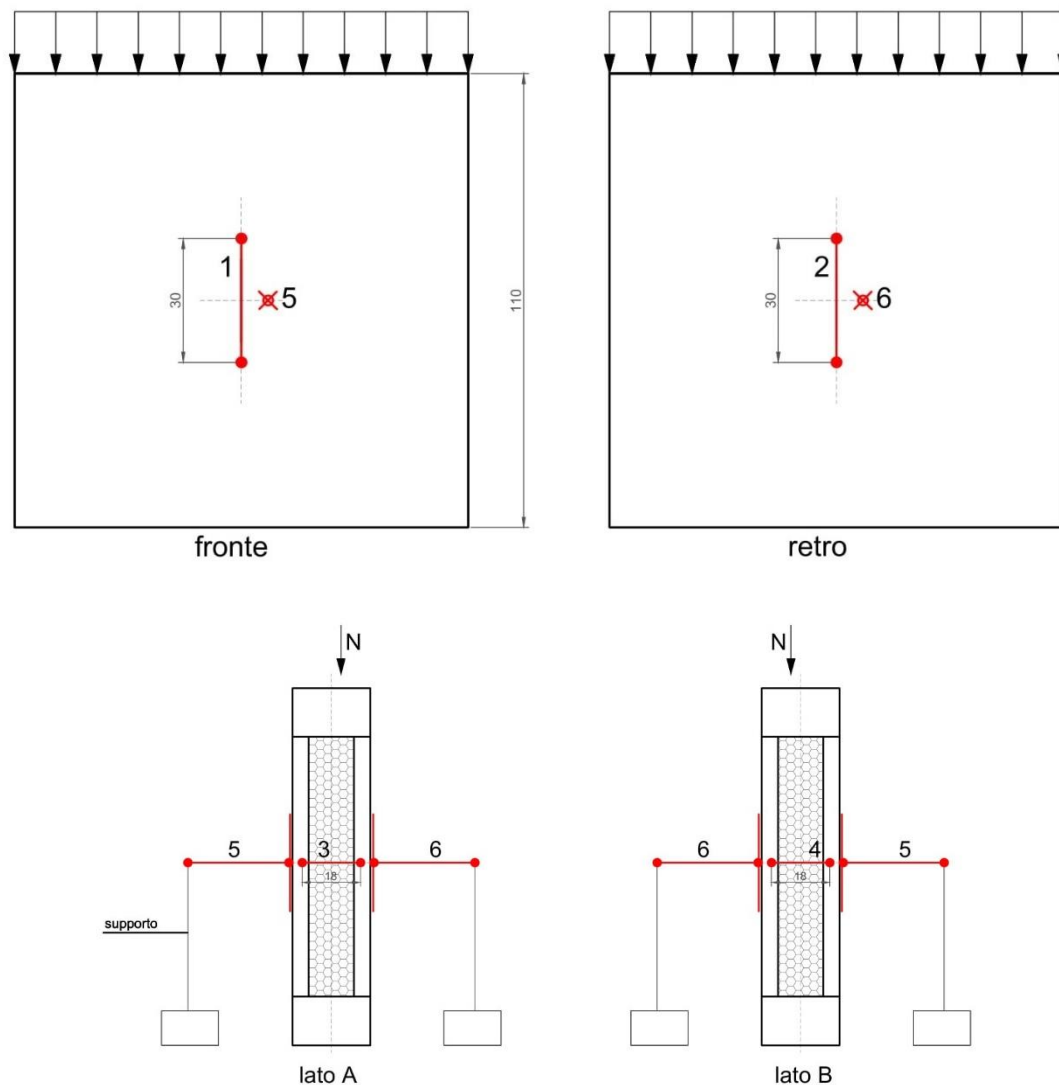


Figura 5.6 – Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A e lato B del provino

#### 5.4.4 – Modalità di esecuzione della prova

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

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

---

la rotazione del provino sottoposto a compressione eccentrica (*Figura 5.7*). La prova è stata condotta disponendo il carico con un'eccentricità pari ad  $e= 30$  mm, dal centro del provino.

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



*Figura 5.7– Setup di prova - Disposizione della cerniera cilindrica orizzontale al piede del provino*

---

## 5.5 - PROVE DI PRECOMPRESSIONE E TAGLIO (PANNELLI 1100 mm x 1100 mm)

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

### 5.5.1– Normativa e formule di riferimento

Per la prova di precompressione e taglio non esistono normative di riferimento a livello europeo. È presente solo una raccomandazione RILEM (RILEM TC 76-LUM, 1991) a livello prenormativo, che riporta sinteticamente le due procedure di prova più comunemente eseguite e accettate universalmente, nelle quali i campioni di muratura vengono testati come mensole con una estremità libera di ruotare oppure come travi a doppio incastro.

In base ai parametri acquisiti durante i test, si calcolano la massima tensione tangenziale  $\tau$  [MPa] e la deformazione  $\gamma$  [mm/mm]:

$$\tau_{max} = \frac{F_h}{A_b}$$

dove:

$F_h$  = forza di taglio;

$A_b$  = area netta della sezione di base del provino, pari a 110000 mm<sup>2</sup>.

La deformazione  $\gamma$  [mm/mm] viene invece espressa nel seguente modo:

$$\gamma = \frac{\delta}{h}$$

con:

$\delta$  = spostamento in sommità;

---

h = altezza del provino, pari a 1100 mm.

Come per la prova di precompressione e taglio viene calcolato il modulo di elasticità tangenziale tangente  $G_{tg}$  [MPa]:

$$G_{tg} = \frac{\tau_{max/3}}{\gamma_{max}}$$

### 5.5.2 – Caratteristiche degli elementi provati

Le prove sono state eseguite su 4 pannelli quadrati di tipo sandwich di lato 1100 mm, armati con rete  $\phi 5$  e aventi spessore complessivo pari a 240 mm. Alle estremità superiore ed inferiore dei provini, sono stati realizzati due cordoli in c.a. di sezione pari a 240x115 mm, armati con 2+2 $\phi 12$  longitudinale e staffe  $\phi 8/20$  (si veda *Figura 4.1* del Cap.5).

Ad ogni provino è stato associato un codice identificativo della prova eseguita:

- PT 1: provino 1
- PT 2: provino 2
- PT 3: provino 3
- PT 4: provino 4

Non è stato possibile eseguire la prova per il pannello PT4, in quanto la presenza di spiccate irregolarità costruttive del provino, avrebbero potuto danneggiare la strumentazione di prova, oltre che restituire dei dati sensibili a tale alterazione. La *Figura 5.8* mostra i difetti geometrici riscontrati nel provino, in special modo una non planarità della base di appoggio utilizzata per alloggiare la piastra su cui agiscono i martinetti (*Figura 5.9 e 5.10*).



*Figura 5.8 – Irregolarità costruttiva provino PT4 con evidente non planarità*



*Figura 5.9 e 5.10 – Particolare della mancata orizzontalità del provino misurate in corrispondenza dello spigolo sinistro e destro*



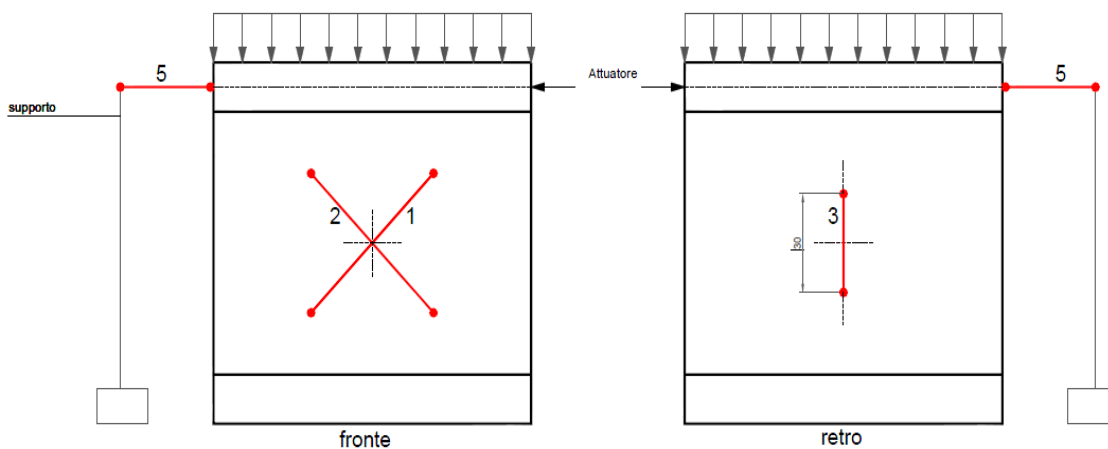
---

### 5.5.3 – Strumentazione per l'esecuzione della prova

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

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

In *Figura 5.11* si riporta l'esatta collocazione della strumentazione di prova.



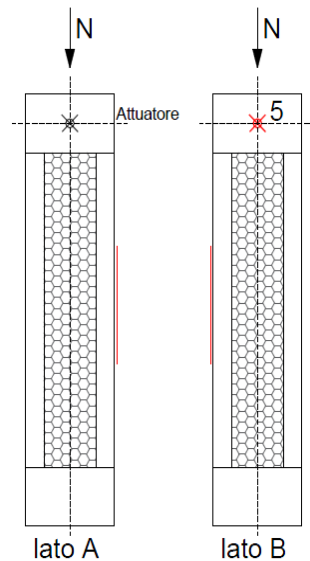


Figura 5.11 – Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A e lato B del provino

#### 5.5.4 – Modalità di esecuzione della prova

Sono state eseguite le prove per i campioni PT1, PT2, PT3. Per ogni test, si è proceduto ad alloggiare il provino al di sotto del telaio di prova, utile ai fini dell'applicazione del precarico assiale, sottoposto al pannello tramite martinetti idraulici collocati in sommità. In particolare, il precarico verticale è stato applicato al campione per mezzo di quattro martinetti idraulici tali da espletare la capacità di carico richiesta, accoppiati con il cordolo superiore del provino attraverso una piastra rigida di collegamento. Una volta posizionato il provino sotto l'apparato di prova, esso è stato caricato sino a raggiungere il livello di compressione assiale stabilita, pari a circa 400 kN. Successivamente è stato disposto il sistema di spinta orizzontale in corrispondenza del lato A del provino (Figura 5.12), opportunamente contrastato alla base del campione, al fine di permettere solo lo spostamento in sommità. Durante lo svolgimento delle prove, il carico verticale è stato mantenuto costante, mentre si è provveduto ad incrementare in maniera crescente il valore della spinta orizzontale fino al manifestarsi della condizione di collasso del provino.



*Figura 5.12 – Setup di prova*

## **5.6 - PROVE DI COMPRESSIONE CENTRATA (PANNELLI 1100 mm x 3000 mm)**

La risposta delle pareti sandwich nei confronti di azioni verticali di compressione, è stata valutata anche per provini snelli di altezza pari a 3000 mm. Pertanto, la prova di compressione centrata eseguita su tale tipologia di provini, vuole porsi come confronto rispetto ai parametri registrati per i provini tozzi trattati nei paragrafi precedenti. A tale scopo, verranno valutati lo sforzo massimo di compressione, le deformazioni ottenute ed il modulo di elasticità massimo.

### **5.6.1– Normativa e formule di riferimento**

Come già espresso per i test di compressione centrata dei provini tozzi, è necessario fare riferimento alla norma UNI EN 1052-1 (Metodi di prova per muratura-Determinazione della resistenza a compressione), ai fini dell'esecuzione della prova. Pertanto, è stata calcolata la tensione di compressione  $\sigma_c$  [MPa]:

---

$$\sigma_c = \frac{N}{A_n}$$

dove:

N = sforzo di compressione applicato;

$A_n$  = area netta della sezione orizzontale del pannello;

Mentre la deformazione  $\varepsilon$  [mm/mm] viene così espressa:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

in cui:

$\Delta l$  = variazione di lunghezza registrata;

$l_0$  = lunghezza iniziale.

Si calcolano infine il modulo elastico secante  $E_{sec}$  [MPa] ed il modulo elastico tangente  $E_{tg}$  [MPa] tramite le relazioni:

$$E_{sec} = \frac{\sigma_c \max}{\varepsilon_{max}}$$

$$E_{tg} = \frac{\sigma_c \max/3}{\varepsilon_{max}}$$

### 5.6.2 – Caratteristiche degli elementi provati

Sono state eseguite n.3 prove su pannelli rettangolari di tipo sandwich di dimensioni  $h=3000$  mm,  $w=1100$  mm, armati con rete  $\phi 5$  e aventi spessore complessivo pari a 240 mm. Alle estremità superiore ed inferiore dei provini, sono stati realizzati due cordoli in c.a. di sezione pari a  $240 \times 115$  mm, armati con  $2+2\phi 12$  longitudinale e staffe  $\phi 8/20$  (si veda *Figura 4.1* del Cap.5).

---

Ad ogni provino è stato associato un codice identificativo della prova eseguita:

- Cc 1: provino 1
- Cc 2: provino 2
- Cc 3: provino 3

### **5.6.3 – Strumentazione per l'esecuzione della prova**

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

-n.4 martinetti idraulici collocati al di sopra del provino per l'applicazione del carico in regime controllato;

-n.6 trasduttori di spostamento LVDT per il rilevamento delle deformazioni così collocati:

- due trasduttori in posizione verticale (codice A e B), uno per ciascuna faccia del provino testato, per l'acquisizione delle deformazioni verticali;
- un trasduttore posizionato sullo spessore del provino (codice C), lato A, per la lettura dello spanciamiento;
- tre trasduttori di spostamento (codice 1 – 2 – 3) per la lettura delle deformazioni fuori da piano, posizionati orizzontalmente ad  $1/4$ ,  $1/2$  e  $3/4$  dell'altezza del provino.

In *Figura 5.13* si riporta l'esatta collocazione della strumentazione di prova.

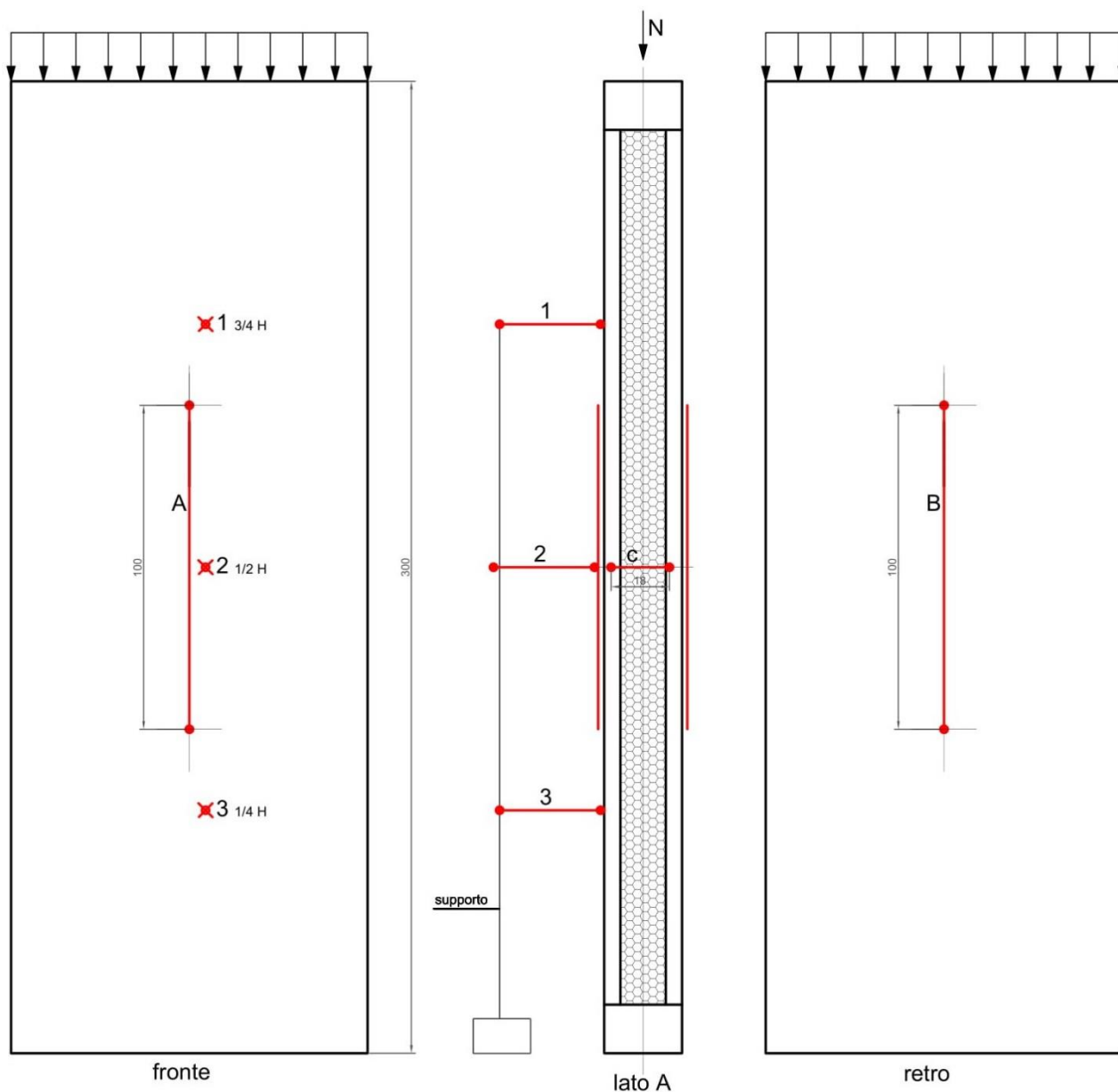


Figura 5.13 – Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A del provino

#### 5.6.4 – Modalità di esecuzione della prova

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

---

con sforzo assiale crescente, sino al manifestarsi dei fenomeni di rottura dovuta al carico di compressione.



*Figura 5.14 – Setup di prova*

---

## 5.7 - PROVE DI COMPRESSIONE ECCENTRICA (PANNELLI 1100 mm x 3000 mm)

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

### 5.7.1– Normativa e formule di riferimento

Anche per tale tipologia di provini snelli, è possibile fare riferimento alla norma UNI EN 1052-1 utilizzata in precedenza. Considerando il contributo del Momento generato dalla eccentricità del carico, i parametri oggetto di indagine risultano così calcolati:

La tensione di compressione eccentrica  $\sigma_e$  [MPa] viene espressa con la seguente formula:

$$\sigma_e = \frac{N}{A_n} + \frac{M}{W}$$

dove:

$A_n$  = area netta della sezione orizzontale del pannello;

$N$  = sforzo di compressione applicato;

$M$  = momento flettente dato dall'eccentricità;

$W$  = modulo di resistenza.

Mentre la deformazione  $\varepsilon$  [mm/mm] è stata così valutata:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

in cui:

$\Delta l$  = variazione di lunghezza registrata;



---

$l_0$  = lunghezza iniziale.

Sono stati in seguito calcolati il modulo elastico secante  $E_{sec}$  [MPa] ed il modulo elastico tangente  $E_{tg}$  [MPa] come:

$$E_{sec} = \frac{\sigma_{e\ max}}{\varepsilon_{max}}$$

$$E_{tg} = \frac{\sigma_{e\ max}/3}{\varepsilon_{max}}$$

### 5.7.2 – Caratteristiche degli elementi provati

Sono state eseguite n.3 prove su pannelli rettangolari di tipo sandwich di dimensioni  $h=3000$  mm,  $w=1100$  mm, armati con rete  $\phi 5$  e aventi spessore complessivo pari a 240 mm. Alle estremità superiore ed inferiore dei provini, sono stati realizzati due cordoli in c.a. di sezione pari a  $240 \times 115$  mm, armati con  $2+2\phi 12$  longitudinale e staffe  $\phi 8/20$  (*Figura 4.1* del Cap.5).

Ad ogni provino è stato associato un codice identificativo della prova eseguita:

- Ce 1: provino 1
- Ce 2: provino 2
- Ce 3: provino 3

### 5.7.3 – Strumentazione per l'esecuzione della prova

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

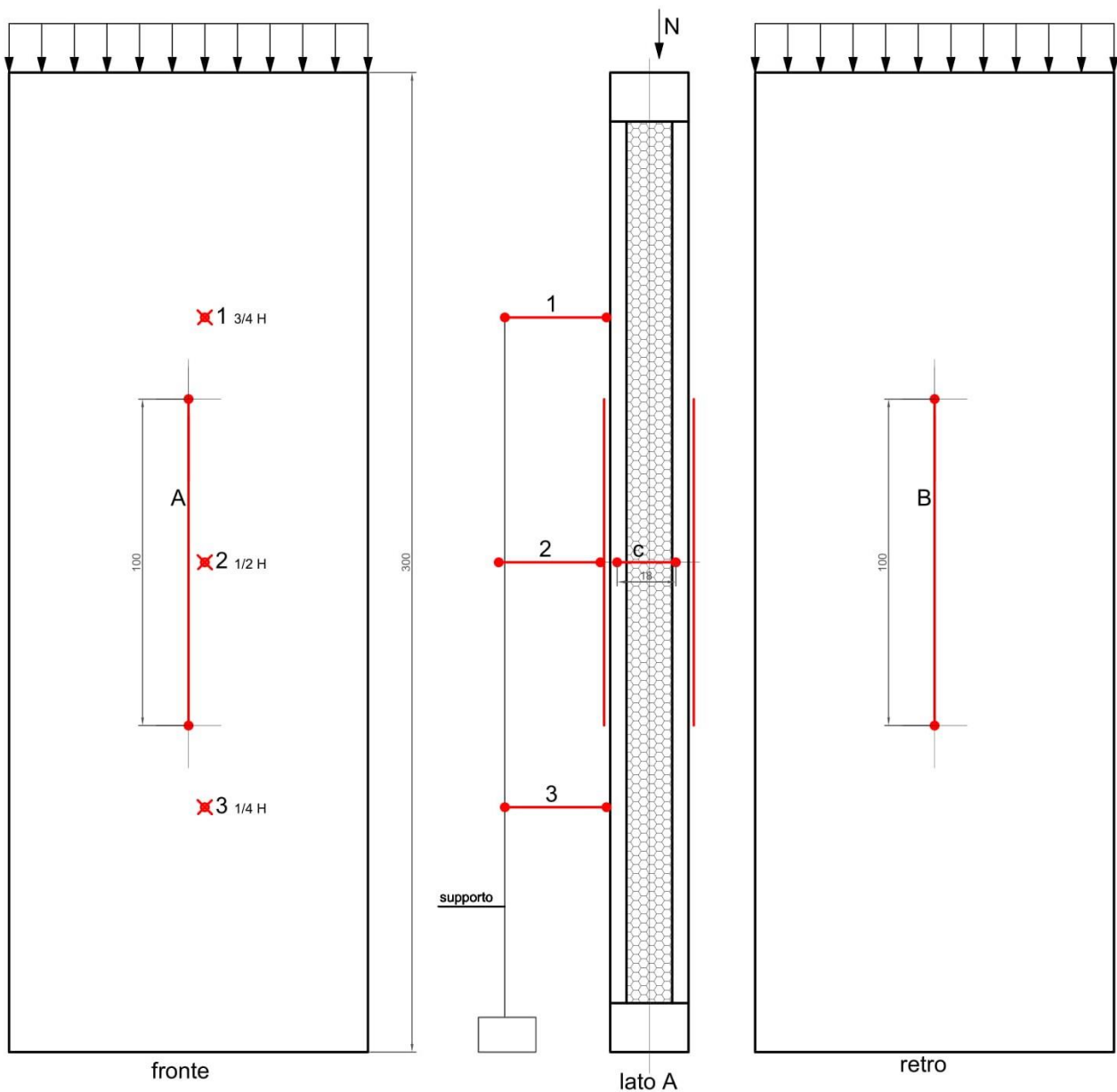
-n.4 martinetti idraulici collocati al di sopra del provino per l'applicazione del carico in regime controllato;

-n.6 trasduttori di spostamento LVDT per il rilievo delle deformazioni così collocati:

- due trasduttori in posizione verticale (codice A e B), uno per ciascuna faccia del provino testato, per l'acquisizione delle deformazioni verticali;

- un trasduttore posizionato sullo spessore del provino (codice C), lato A, per la lettura dello spanciamento;
- tre trasduttori di spostamento (codice 1 – 2 – 3) per la lettura delle deformazioni fuori da piano, posizionati orizzontalmente ad  $1/4$ ,  $1/2$  e  $3/4$  dell'altezza del provino.

In *Figura 5.14* si riporta l'esatta collocazione della strumentazione di prova.



*Figura 5.15 – Disposizione dei trasduttori sulle facce fronte e retro, lato A del provino*

---

#### 5.7.4 – Modalità di esecuzione della prova

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

Il carico è stato applicato mediante una piastra rigida posta sulla sommità del provino, in modo da distribuire uniformemente gli sforzi. Al piede del pannello è stata invece posta una traversa rigida collegata ad un sistema a cerniera cilindrica orizzontale, al fine di permettere la rotazione del provino sottoposto a compressione eccentrica (*Figura 5.15*).



*Figura 5.16 – Setup di prova - Disposizione della cerniera cilindrica orizzontale al piede del provino*

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



*Figura 5.17 – Setup di prova*

---

## **CAPITOLO 6**

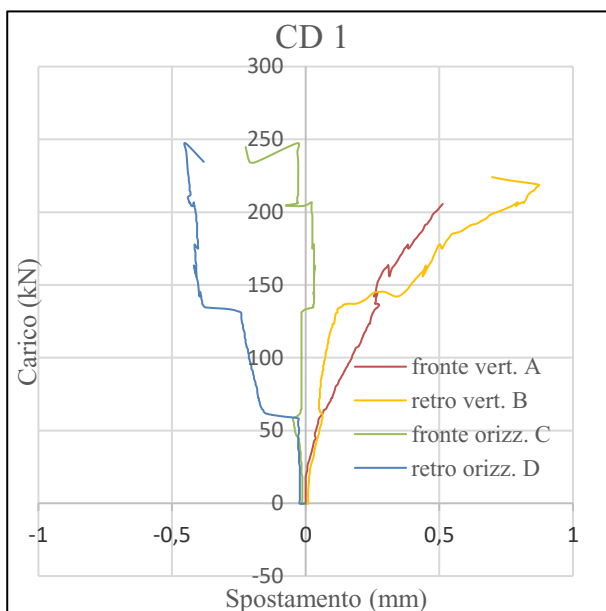
### **RISULTATI OTTENUTI**

## 6.1 – GENERALITA'

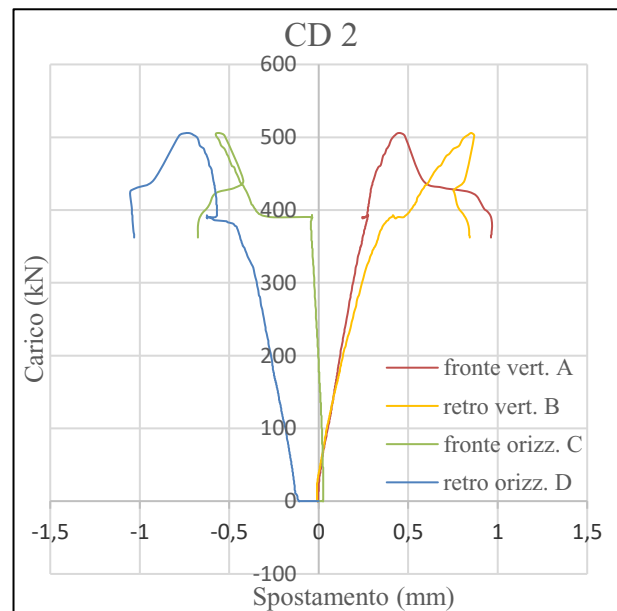
Nei successivi paragrafi verranno presentati i risultati ottenuti per ciascuna tipologia di prova effettuata su provini di tipo sandwich. Si procederà quindi con l'elaborazione di grafici e tabelle derivanti dai test condotti ed all'analisi dei risultati ottenuti. Nell'ultima sessione si procederà al confronto dei risultati ottenuti tra le prove di compressione effettuate all'interno di questa campagna sperimentale, ma anche attraverso il paragone con risultati ottenuti da altre prove sperimentali. In questo modo sarà possibile giungere ad una caratterizzazione meccanica esaustiva per la tipologia di pannello sandwich oggetto di studio.

## 6.2– ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI PER LE PROVE DI COMPRESSIONE DIAGONALE

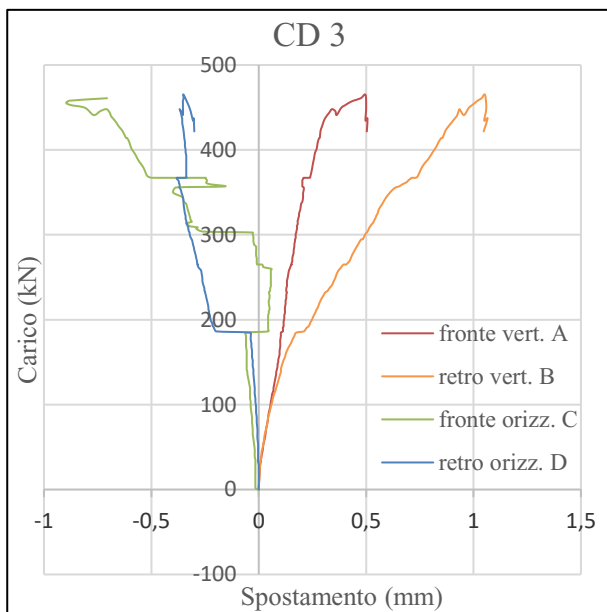
Le prove di compressione diagonale su pannelli sandwich di dimensioni 1100 x 1100 mm, hanno prodotto dei valori di *Forza-Spostamento* elaborati nei successivi grafici. I diagrammi così ottenuti, fanno riferimento ai valori registrati dai trasduttori verticali A-B e da quelli orizzontali C-D, posizionati su ciascun provino.



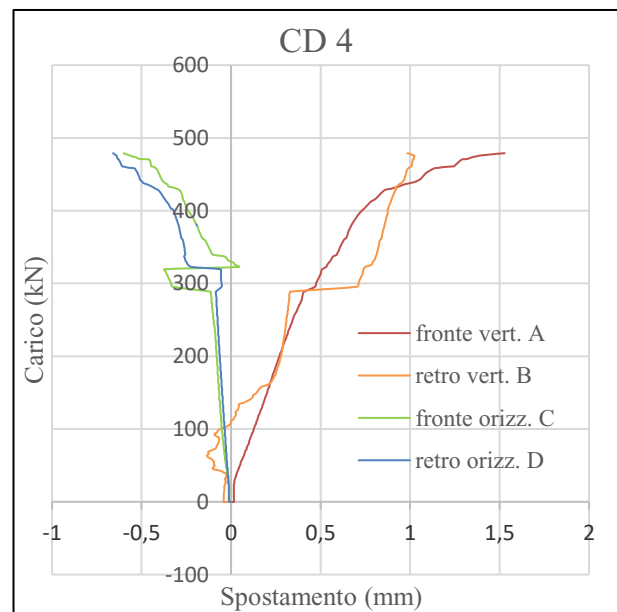
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 6.1 – Diagrammi Forza-Spostamento dei valori misurati sulle due facce di ogni provino

Come si evince dai grafici riportati in *Figura 6.1*, in direzione del carico verticale di compressione, la corrispondente diagonale risulta compressa e restituisce valori di accorciamento in direzione verticale (valori positivi nel grafico), misurati per il lato fronte e retro di ciascun provino. I trasduttori posizionati in direzione orizzontale hanno registrato invece valori di allungamento, corrispondenti allo sforzo di trazione (valori negativi nel grafico) a cui è soggetta la diagonale perpendicolare al carico applicato.

Per valori di carico fino a circa 400 kN (trascorrendo i risultati del provino CD1) il comportamento risulta essere di tipo elastico lineare, mentre per valori di carico superiore si manifesta un comportamento non elastico.

Di seguito si riportano i grafici *Tensione-Deformazione* ricavati dal calcolo dei rispettivi valori ottenuti dalle formule di riferimento di cui al *Cap.5, Paragrafo 5.2.1*, relativi ad ogni faccia dei pannelli testati.

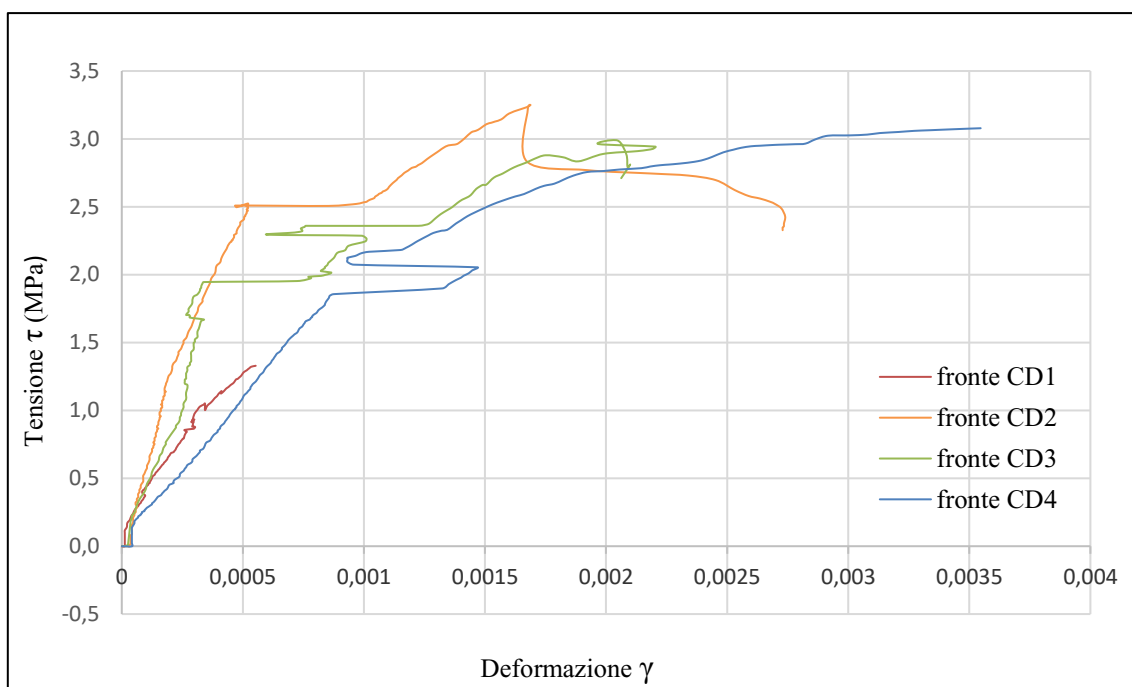


Figura 6.2 – Diagramma  $\tau$ - $\gamma$  dei valori registrati per il lato fronte di ciascun provino

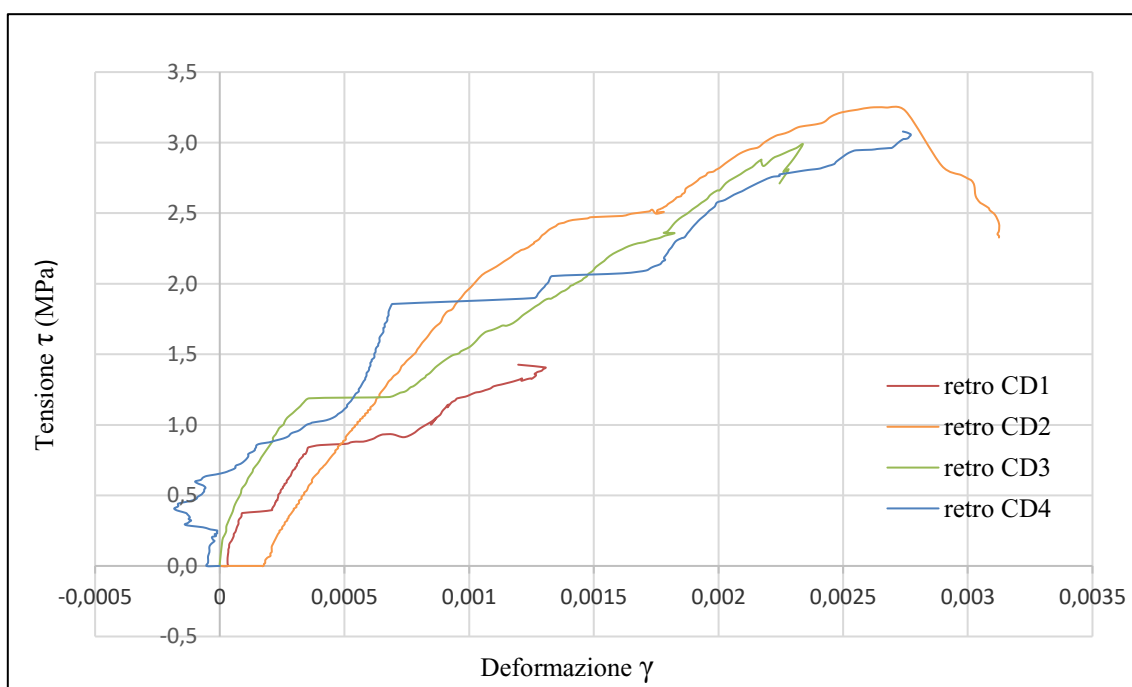


Figura 6.3 – Diagramma  $\tau$ - $\gamma$  dei valori registrati per il lato retro di ciascun provino

L'andamento dei grafici mostra un comportamento di tipo pressoché fragile dei provini sottoposti a compressione diagonale, ad eccezione del provino CD1 che non ha prodotto risultati attendibili, a causa del distacco degli strumenti avvenuta per rottura dei cordoli.



Per i restanti provini si osserva un comportamento elastico-lineare fino al raggiungimento delle prime fessurazioni, con lo sviluppo di una deformazione residua minima.

Nella *Tabella 6.1* vengono espressi i dati principali misurati sui quattro provini, in termini di carico massimo raggiunto, tensione tangenziale massima, deformazione angolare massima e modalità di rottura, oltre al calcolo del modulo di elasticità secante e tangente.

*Tabella 6.1 Risultati principali delle prove di compressione diagonale su provini quadrati*

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

Il provino CD2 ha raggiunto un carico massimo di circa 505 kN, mentre gli altri provini giungono a rottura per valori di carico verticale inferiori. È stata calcolata una tensione tangenziale massima pari a 3,25 MPa. Per i provini CD2 e CD4 si sono ottenuti valori di deformazione pari allo 0,3 %.

È stato possibile inoltre ricavare i valori di rigidezza dati dai moduli elastici  $G_{\text{sec}}$  e  $G_{\text{tg}}$ , i cui valori medi vengono riportati nella tabella seguente.

Tabella 6.2 Valori medi ottenuti dalle prove di compressione diagonale su provini quadrati

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

Il valore medio del carico massimo registrato per tutti i provini è di circa 446 kN, mentre la media delle tensioni tangenziali ottenute dai calcoli risulta essere pari a 2,87 MPa.

#### - Modalità di rottura

Le immagini successive, rappresentano le principali modalità di crisi registrate per ciascun provino testato.



Figura 6.4 - Crisi locale spigolo CD1 retro



Figura 6.5 - Fessurazione diagonale CD2



Figura 6.6 - Schiacciamento spigolo inferiore e fessurazione diagonale CD3 fronte



Figura 6.7 - Schiacciamento spigolo superiore e fessurazione diagonale CD4 retro

Durante lo svolgimento della prova, i provini testati hanno manifestato l'innescò di due meccanismi di rottura differenti. All'aumentare del carico di verticale, la corrispondente diagonale risulta compressa (biella compressa), mentre in direzione perpendicolare ad essa, il provino tende a dilatarsi. La comparsa di fessure verticali lungo la diagonale è dovuta proprio agli sforzi di trazione in direzione orizzontale che ne provocano l'apertura. Dalle immagini che seguono, è possibile osservare come la rottura dei pannelli per fessurazione verticale, sia avvenuta lungo la linea della biella compressa a causa degli sforzi di trazione che si generano lungo la linea ortogonale ad essa. Il provino CD2 è giunto a rottura solo per fessurazione verticale, come mostrato in *Figura 6.5*.

La seconda modalità di crisi registrata, si è avuta per schiacciamento degli spigoli inferiore o superiore, a causa del carico di compressione esercitato durante la prova. Tale meccanismo di rottura è bene visibile per i provini CD1, CD3 e CD4: una volta manifestata la comparsa delle fessure lungo la diagonale principale, il carico crescente ha prodotto fenomeni di schiacciamento a danno degli spigoli in calcestruzzo.

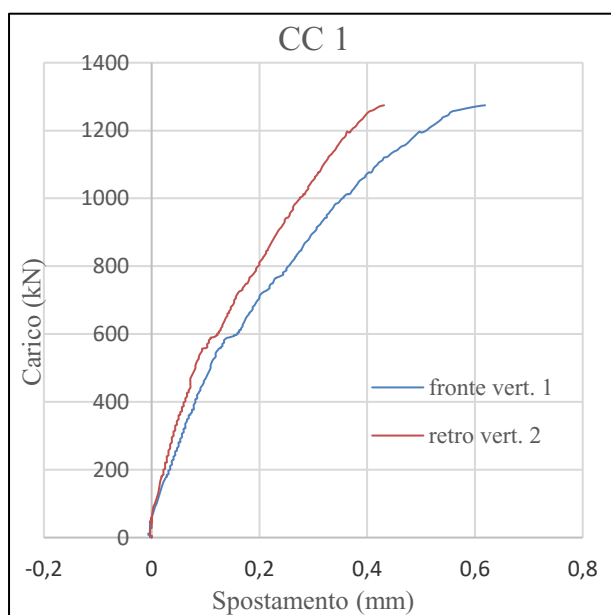
Come mostrato in *Tabella 6.1*, le modalità di rottura avutesi per la prova di compressione diagonale sono essenzialmente due:

- 
- fessurazione verticale lungo la diagonale principale dovuta agli sforzi di trazione in direzione orizzontale;
  - schiacciamento dello spigolo inferiore o superiore.

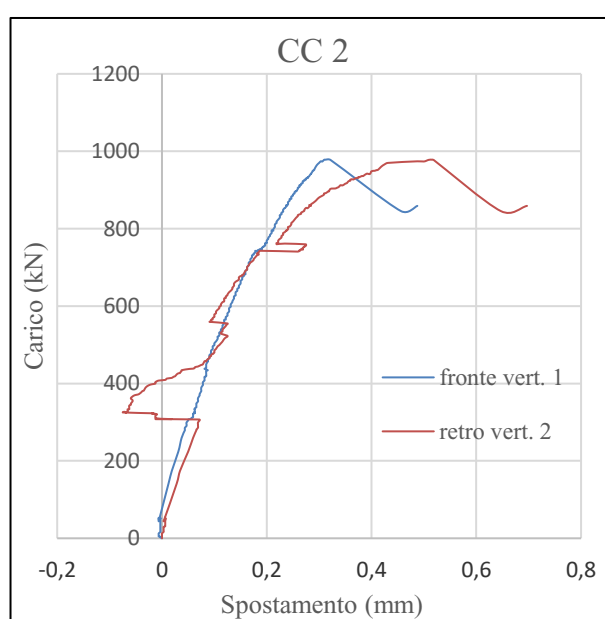
### 6.3 – ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI PER LE PROVE DI COMPRESSIONE CENTRATA (PANNELLI 1100 x 1100 mm)

Di seguito vengono riportati i diagrammi relativi ai valori di Forza-Spostamento ottenuti per la prova di compressione centrata a cui è stato sottoposto ciascun provino quadrato.

I grafici ottenuti si riferiscono ai valori registrati dagli strumenti di misura posizionati lungo gli assi verticali delle facce fronte e retro del provino, per la lettura degli spostamenti verticali.



(a)



(b)

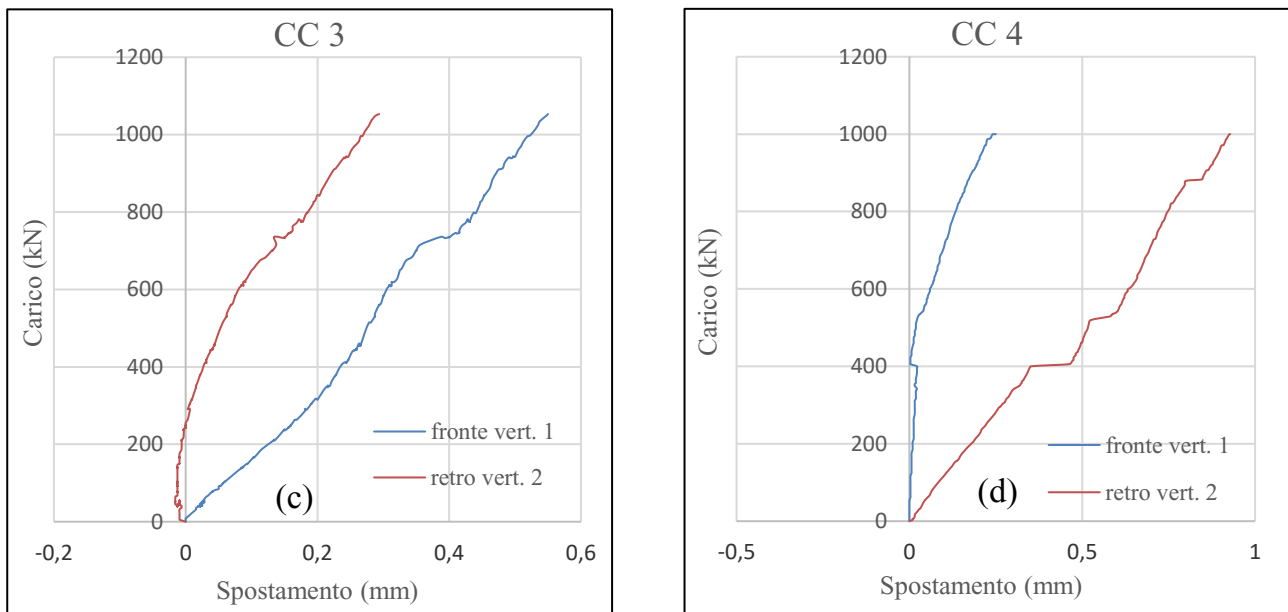


Figura 6.8 – Diagrammi Forza-Spostamento dei valori misurati sulle due facce di ogni provino

Con riferimento alle misurazioni effettuate, si nota che tutti i provini giungono a rottura per valori simili di carico massimo, superiori a  $F=1000$  kN. L'andamento del diagramma  $\sigma$ -  $\epsilon$  può essere assimilato ad un comportamento di tipo lineare. Di fatti, in linea con i risultati previsti per la prova di compressione, i provini tozzi sono soggetti a tensioni di compressione su entrambe le facce (valori positivi nel grafico).

Sono state in seguito calcolate la tensione di compressione  $\sigma_c$  e la deformazione  $\epsilon$ , per ogni faccia del provino soggetto a sforzo di compressione, confrontate nei grafici in *Figura 6.9 e 6.10*.

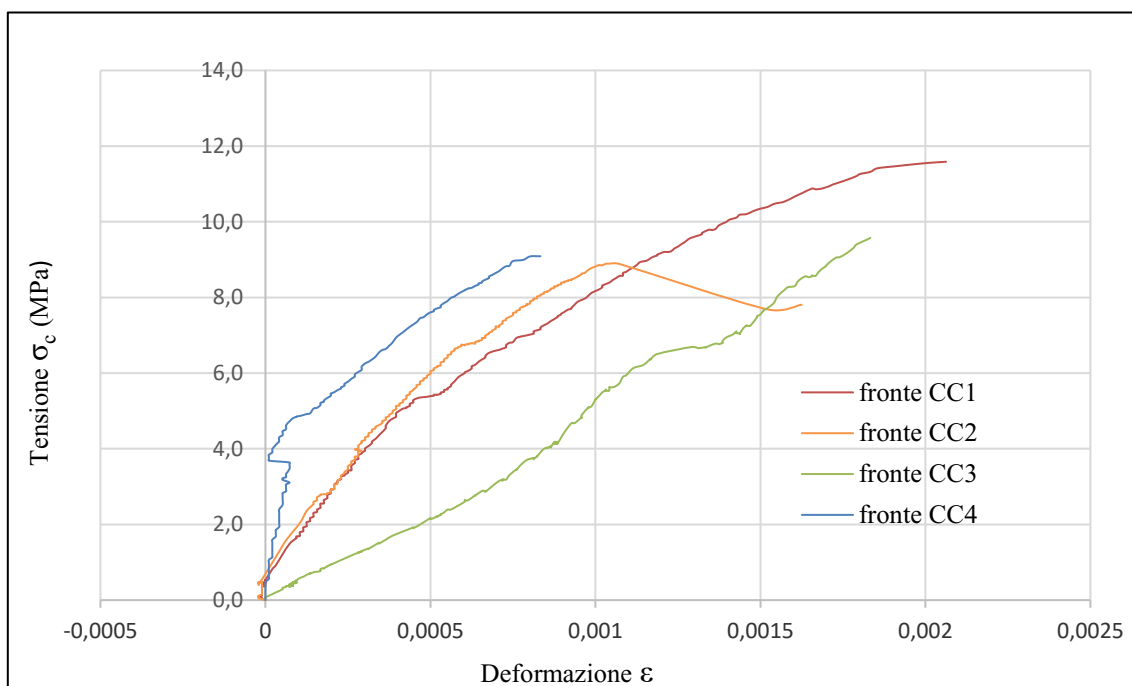


Figura 6.9 – Diagramma  $\sigma_c$ - $\epsilon$  dei valori registrati per il lato fronte di ciascun provino

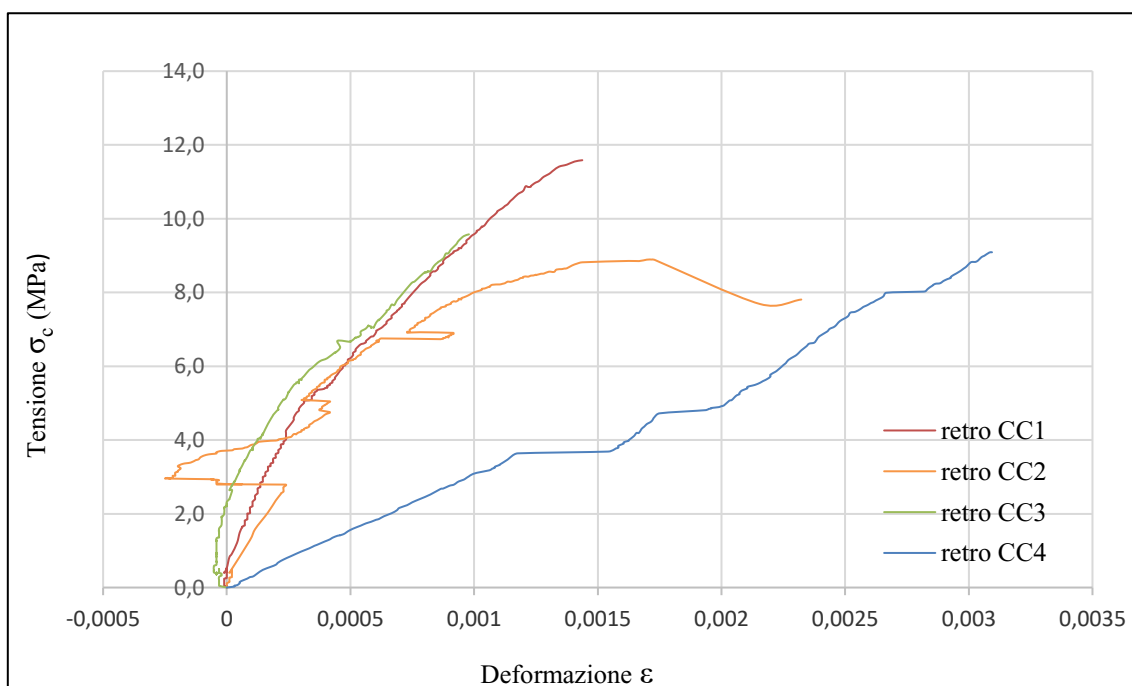


Figura 6.10 – Diagramma  $\sigma_c$ - $\epsilon$  dei valori registrati per il lato retro di ciascun provino

L'andamento delle linee nei diagrammi  $\sigma_c$ - $\epsilon$  è assimilabile ad una retta nella parte iniziale. Non si osserva uno spiccato sviluppo della fase plastica successiva al raggiungimento del carico di rottura, bensì le deformazioni crescono piuttosto linearmente all'aumentare del carico di compressione. Una volta raggiunta la rottura della cortina in calcestruzzo, il pannello

risulta danneggiato e non esibisce capacità deformative oltre la tensione di rottura. Lo spiccato comportamento di tipo fragile è ben evidente nell'andamento delle linee *Tensione-Deformazione* per i provini CC1, CC3 e CC4.

In *Tabella 6.3*, sono riportati, per ogni parete sandwich testata, i valori massimi raggiunti per ogni parametro calcolato, in termini di forza di compressione, tensione di compressione, deformazione, modulo elastico secante e tangente.

*Tabella 6.3 Risultati principali delle prove di compressione centrata su provini quadrati*

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

*Tabella 6.4 Valori medi ottenuti dalle prove di compressione centrata su provini quadrati*

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

Il carico di rottura massimo raggiunto è stato registrato per il pannello CC1, con un valore di forza verticale pari a  $F_{max} = 1274$  kN. La tensione di compressione massima corrispondente a tale valore di carico, risulta essere pari a 11,59 kN, mentre il valore medio delle tensioni calcolato risulta essere prossimo ai 10 kN. È stata valutata la capacità deformativa dei provini,

---

i quali hanno mostrato un comportamento di tipo fragile ed hanno raggiunto valori di deformazione residua pari allo 0,2 %. Sono stati calcolati il modulo elastico secante e tangente, i cui valori medi risultano essere precisamente di 5641 MPa per  $E_{sec}$  e di 11408 MPa per  $E_{tg}$ .

Dai risultati ottenuti è stato possibile ricavare i moduli elastici, rispettivamente tangente e secante, i cui valori medi sono espressi in *Tabella 6.4*.

### **-Modalità di rottura**

Nelle figure successive è possibile osservare le principali modalità di rottura per ogni provino, caratterizzate da fratture verticali e da schiacciamenti a livello dei cordoli.



*Figura 6.11 - Schiacciamento cordolo superiore provino CC1*



*Figura 6.12 - Schiacciamento cordolo superiore e fessurazioni verticali CC2*





Figura 6.13 - Fessurazione verticale provino CC3



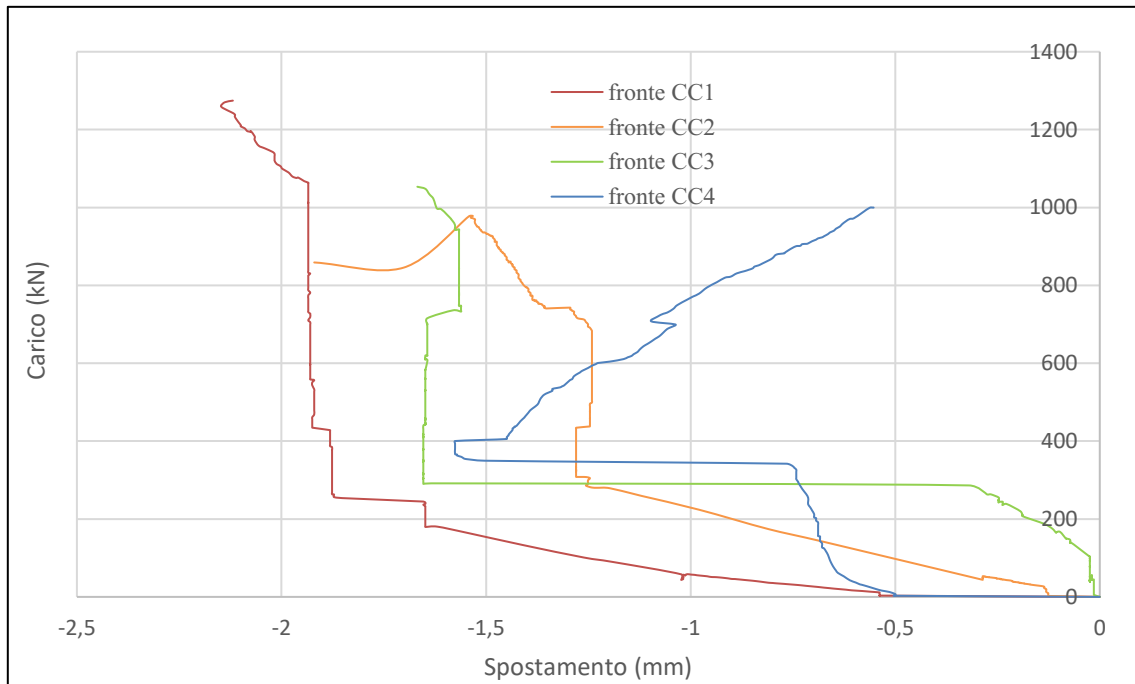
Figura 6.14 - Fessurazione verticale provino CC4

Le immagini mostrano come tutti i provini testati abbiano manifestato l'innesco di linee di frattura verticali in direzione del carico applicato. In *Figura 6.11 e 6.12* per i provini CC1 e CC2, tale quadro fessurativo risulta più marcato rispetto agli altri provini. La formazione di fessure verticali evidenzia una rottura per trazione del pannello, provocata dalle tensioni di trazione sviluppatesi in linea orizzontale. Solo per il provino CC1 è possibile notare la presenza di una fessura orizzontale, dovuta agli sforzi di compressione presenti.

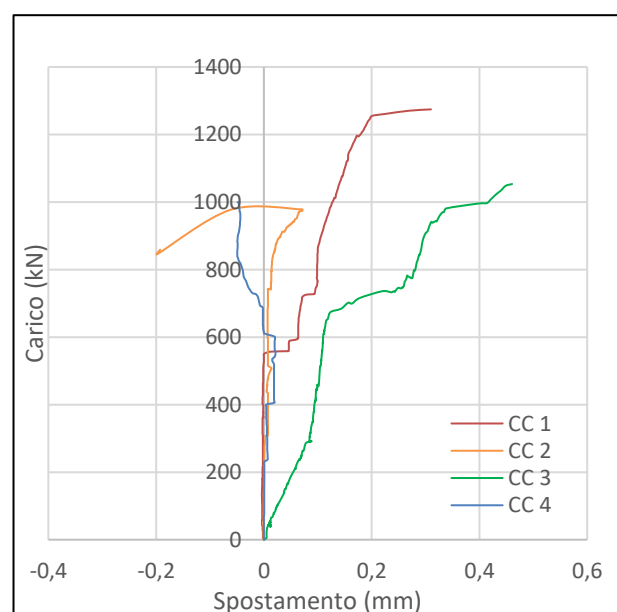
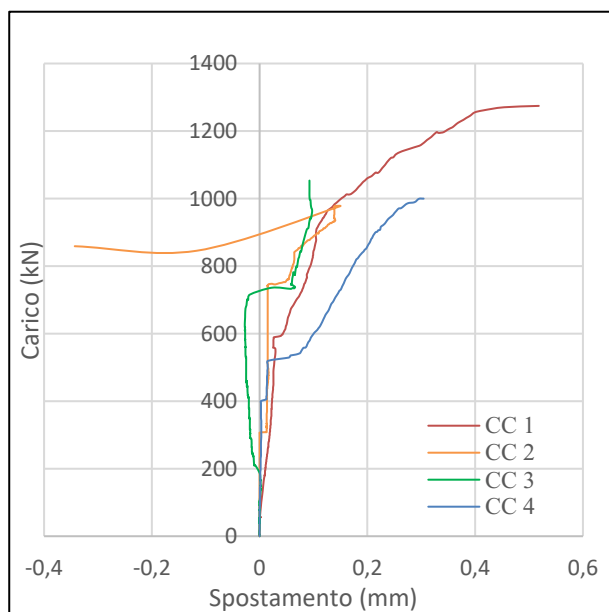
Inoltre, lo sforzo di compressione ha provocato la rottura per schiacciamento del cordolo superiore dei pannelli, come ben visibile per il provino CC1. Il cordolo rigido, posto alle estremità dei pannelli in modo fittizio, al fine di facilitare la movimentazione in laboratorio, si pone come elemento debole durante lo svolgimento di tale tipologia di prove. Di fatti, si ha la rottura in corrispondenza del cordolo rigido in cemento armato posto in sommità, dovuta allo schiacciamento per compressione.

## -Comportamento fuori dal piano

Non si registrano fenomeni di instabilità fuori dal piano apprezzabili come evidenziato dai grafici seguenti, relativi agli spostamenti fuori dal piano ed agli spancamenti del lato A e B del provino; questi ultimi hanno registrato valori non significativi dell'ordine del millimetro. Il grafico in *Figura 6.15* mostra come lo spostamento fuori dal piano massimo sia stato acquisito per il provino CC1, per un valore di poco superiore ai 2 mm.



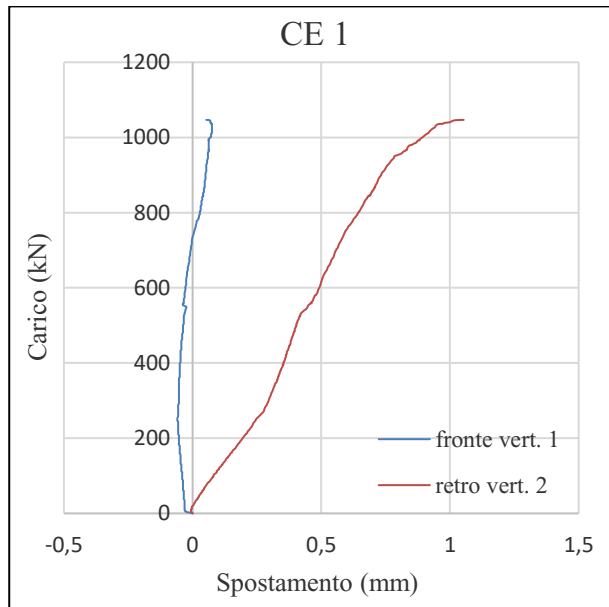
*Figura 6.15 – Spostamenti fuori dal piano dei provini misurati per il lato fronte*



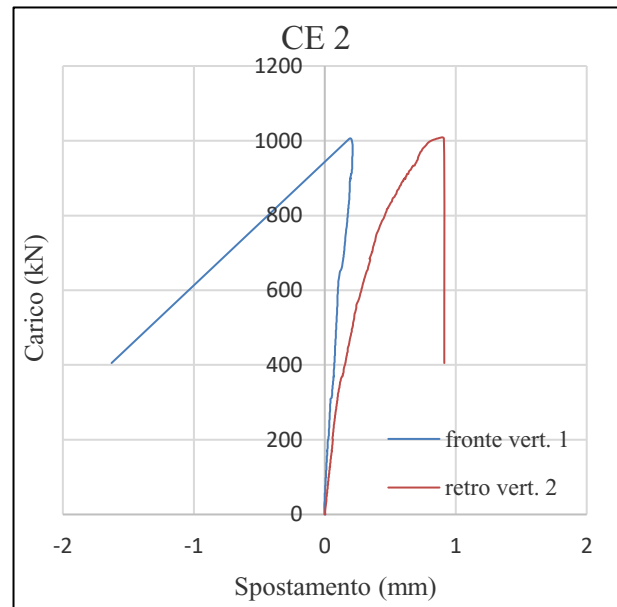
*Figura 6.16 – Spancimento misurato per il lato A e B di ciascun provino*

## 6.4 – ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI PER LE PROVE DI COMPRESSIONE ECCENTRICA (PANNELLI 1100 x 1100 mm)

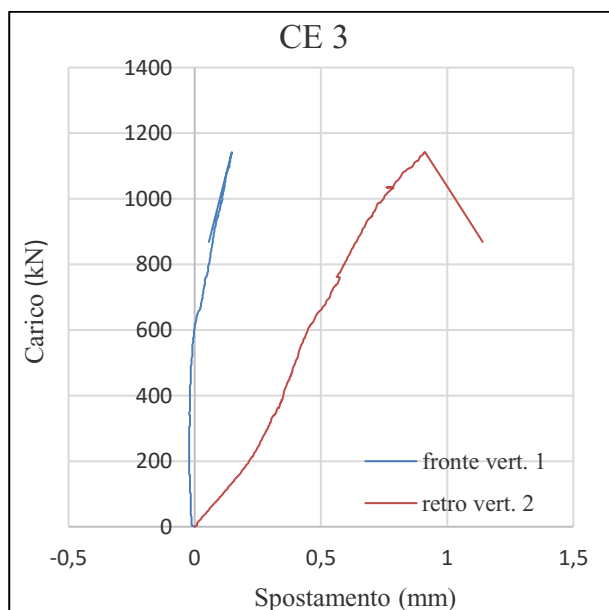
La prova di compressione eccentrica su provini quadrati è stata condotta imponendo una eccentricità al carico verticale, pari ad  $e = 30$  mm. Tale valore di eccentricità, ha prodotto i seguenti diagrammi di *Forza-Spostamento*, per ciascun provino testato.



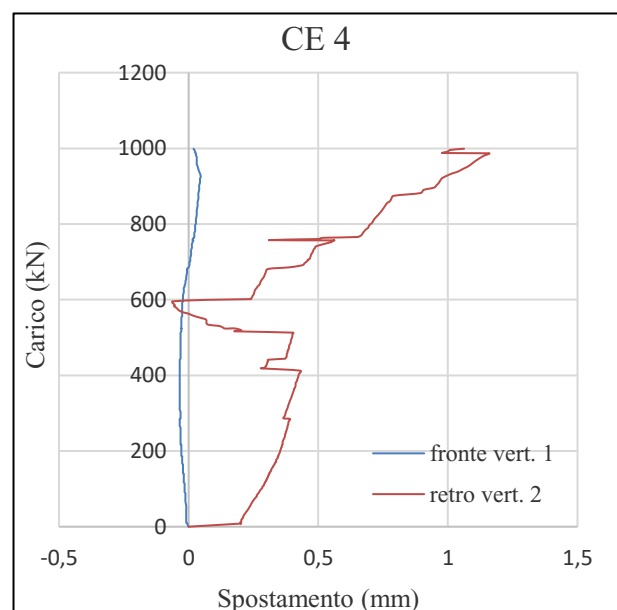
(a)



(b)



(c)

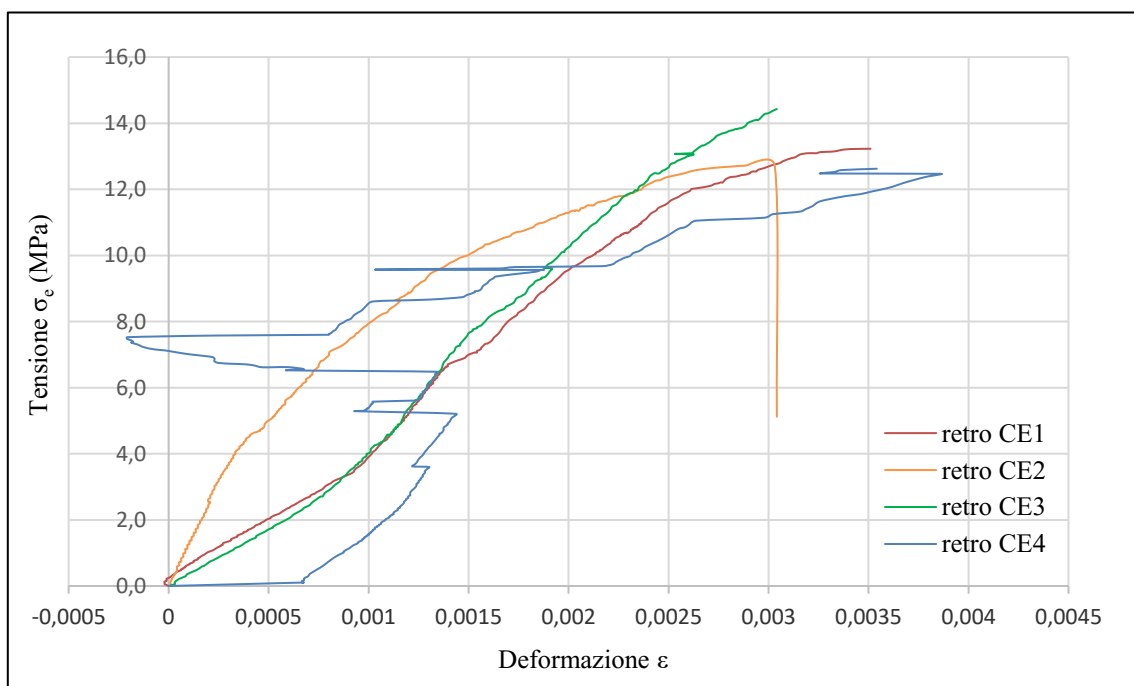


(d)

Figura 6.17 – Diagrammi Forza-Spostamento dei valori misurati sulle due facce di ogni provino

Il momento flettente generato dalla eccentricità imposta, dovrebbe produrre un andamento divergente delle curve *Forza-Spostamento*, dovuto agli sforzi di compressione e trazione presenti su ciascuna faccia del provino. Analizzando i grafici in *Figura 6.17*, è possibile notare come il lato retro dei provini risulti essere interessato da compressione delle fibre in calcestruzzo (valori positivi), mentre il lato fronte esibisca un comportamento a trazione solo di poco accennato e con valori prossimi allo zero. Questo è dovuto alla scelta della eccentricità, che essendo minima, non produce gli effetti di trazione apprezzabili. Pertanto, gli spostamenti maggiori vengono registrati per il lato retro del provino, soggetto a compressione, mentre per il lato fronte la curva degli spostamenti è protesa verso valori nulli, all'aumentare del carico. I diagrammi evidenziano come la rottura avvenga a ridosso di valori di carico eccentrico superiore ai 1000 kN, oltre il quale vi è la totale perdita di resistenza da parte dei provini.

Il grafico in *Figura 6.18* mostra come le deformazioni maggiori si siano registrate per il lato retro del provino, interessato da pressoflessione generata dalla eccentricità. Tali deformazioni risultano tuttavia trascurabili ed inferiori al millimetro.



*Figura 6.18 – Diagramma  $\sigma_\epsilon$ - $\epsilon$  dei valori registrati per il lato retro di ciascun provino*

Con riferimento alle misurazioni ottenute per il provino CE4, è possibile notare che l'andamento della curva  $\sigma_e - \varepsilon$ , è caratterizzato da intervalli in cui si passa da allungamento ad accorciamento. Ciò è sicuramente da attribuire ad una mancata orizzontalità dei pannelli legata ad irregolarità costruttive, come riportato nella *Figura 5.5* del precedente capitolo.

Per i restanti provini, l'andamento delle curve risulta essere di tipo per lo più lineare, per cui una volta raggiunta la tensione di rottura, non si hanno deformazioni residue.

Nella *Tabella 6.5 e 6.6* vengono restituiti i dati principali misurati sui quattro provini, in termini di carico massimo raggiunto, tensione di compressione eccentrica massima, deformazione verticale massima e modalità di rottura, oltre ai moduli elastici ed ai valori medi.

*Tabella 6.5 Risultati principali delle prove di compressione eccentrica su provini quadrati*

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

*Tabella 6.6 Valori medi ottenuti dalle prove di compressione centrata su provini quadrati*

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

---

Il provino CE3 ha raggiunto la rottura con un carico massimo pari a 1142 kN. Tutti provini producono valori di resistenza prossimi ai 1000 kN, di poco inferiori a quelli per compressione centrata. Sono stati calcolati i valori di tensione eccentrica massima, il cui risultato medio si assesta sui 13,25 MPa. La deformazione massima media calcolata confrontando tutti i provini, si ferma allo 0,3 %. Anche per la prova eccentrica vengono valutati il modulo di elasticità tangente e secante, i quali raggiungono valori elevati, utili per la valutazione della rigidezza.

### **-Modalità di rottura**

Nelle immagini seguenti vengono mostrate le rotture più significative verificatesi per i pannelli oggetto di prova.



*Figura 6.20 - Schiacciamento e fessurazione verticale retro CE1*



*Figura 6.21 - Schiacciamento e fessurazione verticale retro CE2*



Figura 6.22 - Fessurazione verticale retro  
CE3



Figura 6.23 - Fessurazione verticale retro e  
schiacciamento CE4

Come mostrato nelle immagini, il lato retro dei provini risulta essere quello più danneggiato, poiché soggetto a sforzi di compressione generati dal momento flettente, in linea con i risultati ottenuti dai grafici. Di fatti lo schiacciamento del lato retro è avvenuto in direzione della imposta eccentricità (si veda *Figura 5.6* del *Capitolo 5*).

Le linee di rottura in direzione verticale, identificano la presenza di sforzi di trazione in direzione orizzontale e perpendicolari alla fessurazione verticale, le quali hanno prodotto l'apertura della stessa. Inoltre, la rottura a pressoflessione provoca lo schiacciamento della faccia del provino interessata da compressione, come è possibile osservare per il provino CE1 e CE2, in cui si ha l'espulsione della cortina esterna in calcestruzzo.

## -Comportamento fuori dal piano

Gli strumenti di misura posti sul lato fronte e retro dei provini hanno registrato valori di instabilità fuori dal piano significativa dell'ordine del centimetro per ogni lato del pannello. Il provino CE2 ha mostrato valori residui di spostamento una volta raggiunto il carico di rottura, probabilmente dovuti all'espulsione della cortina di calcestruzzo soggetta a schiacciamento (*Figura 6.24*).

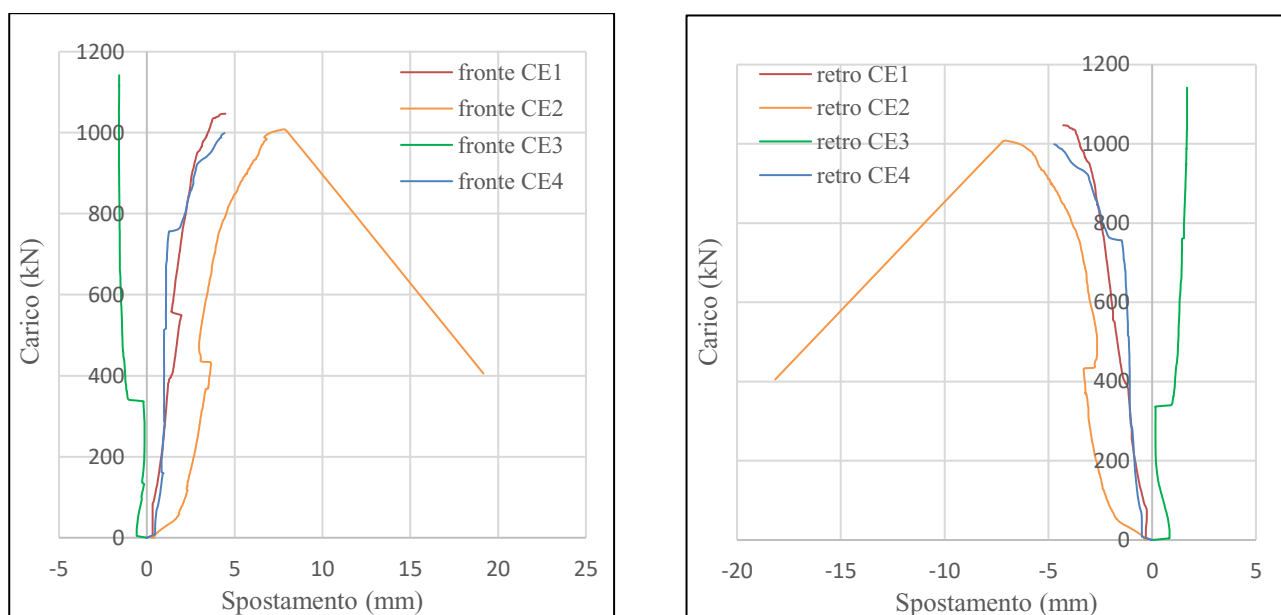


Figura 6.24 – Spostamenti fuori dal piano dei provini misurati per il lato fronte e retro

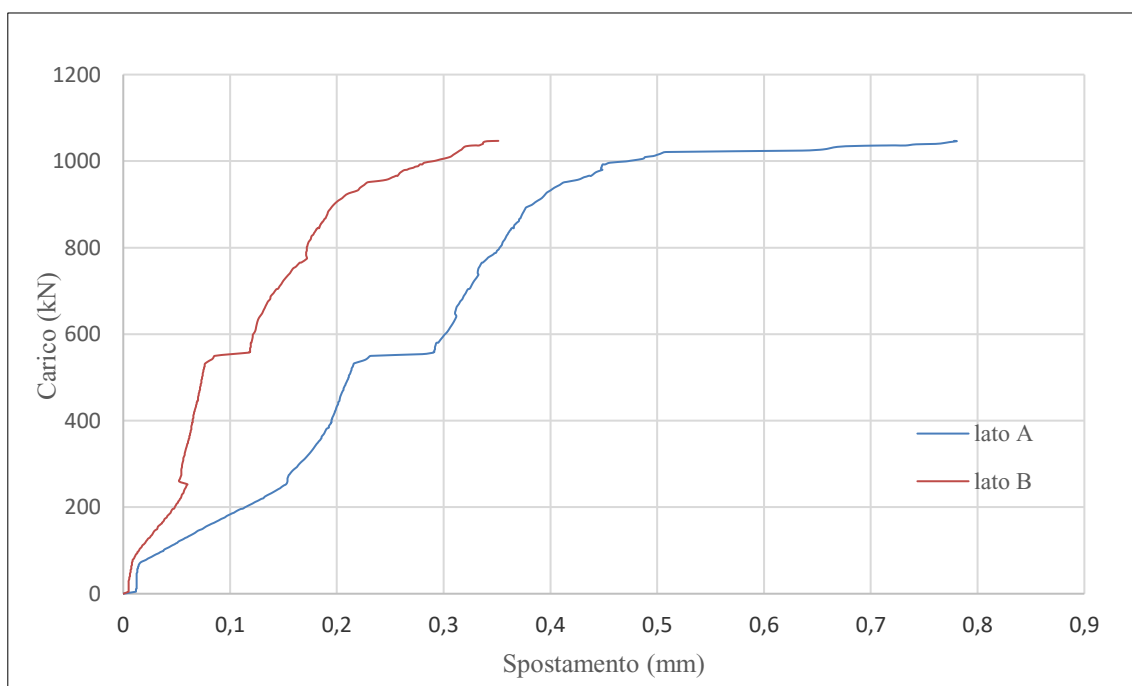


Figura 6.25 – Spanciamento misurato per il lato A e B del provino CE1



---

Le misurazioni effettuate hanno prodotto risultati non rilevanti per lo spanciamiento registrato su ciascun lato dei provini. In *Figura 6.25* viene riportato l'andamento più significativo di tale parametro acquisito, con valori di spostamento che non raggiungono il millimetro. Questo suggerisce una perfetta aderenza tra le facce di calcestruzzo e lo strato isolante interno, armato con rete elettrosaldata. L'assenza di valori significativi mostra come non si sia innescato nessun fenomeno di apertura tra i due paramenti ed il blocco in EPS, i quali hanno ben resistito allo sforzo di pressoflessione.

---

## 6.5 – ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI PER LE PROVE DI PRECOMPRESSIONE E TAGLIO (PANNELLI 1100 x 1100 mm)

Durante la prova sono stati misurati, istante per istante ed al variare della forza orizzontale applicata, i valori di spostamento orizzontale rilevato in sommità, rispetto alla parte inferiore del provino mantenuta fissa e non libera di muoversi in direzione del carico orizzontale. Tali spostamenti misurati possono essere definiti con il termine “*scorrimenti*”.

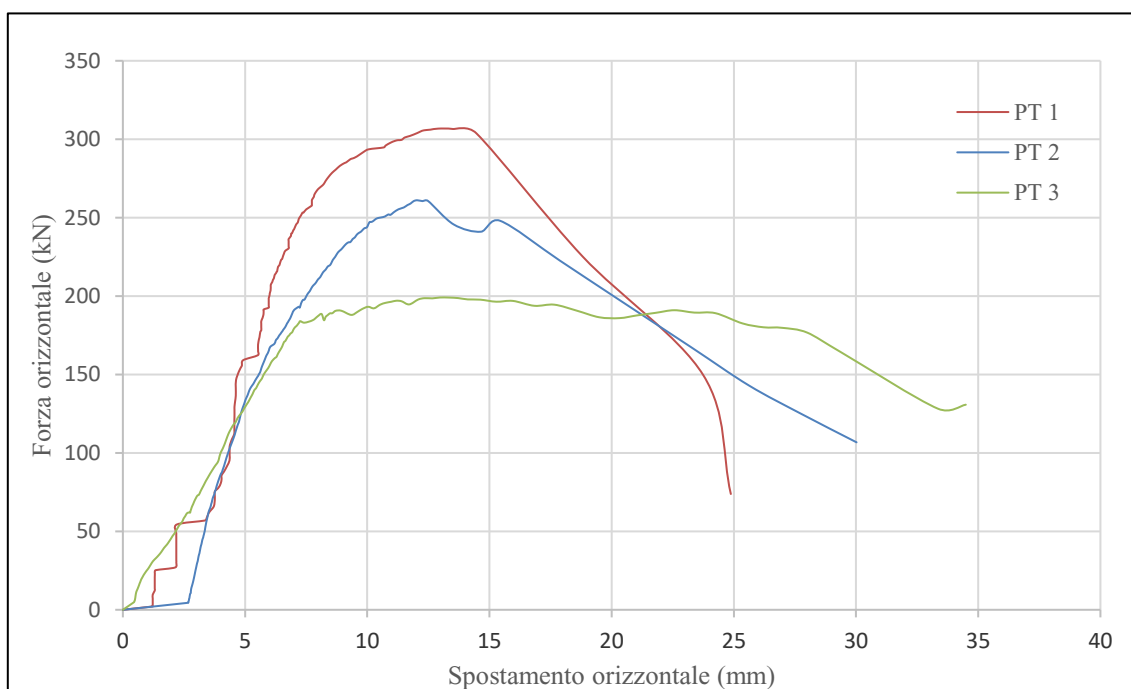


Figura 6.26 – Diagramma Forza orizzontale-spostamento orizzontale in sommità dei provini

In *Figura 6.26* si possono osservare le curve ottenute a seguito dell'applicazione della forza orizzontale al pannello, libero di scorrere solamente in sommità. Il comportamento mostrato dai diagrammi vede nel primo tratto, all'aumentare del carico, valori di spostamento crescere linearmente con esso. Una volta raggiunta la forza orizzontale massima, l'andamento delle curve è evidenza un pianerottolo plastico e si raggiungono valori elevati di spostamento, come ben evidenziato per il provino PT3. Ciò è certamente dovuto alla presenza del carico di precompressione imposto, pari a circa 400 kN e mantenuto costante per tutta la prova, il quale contribuisce allo sviluppo di un più marcato comportamento post-elastico dei provini.

---

A tale scopo vengono riportati i diagrammi *Sforzo-Deformazione* ottenuti dai dati registrati in fase di prova.

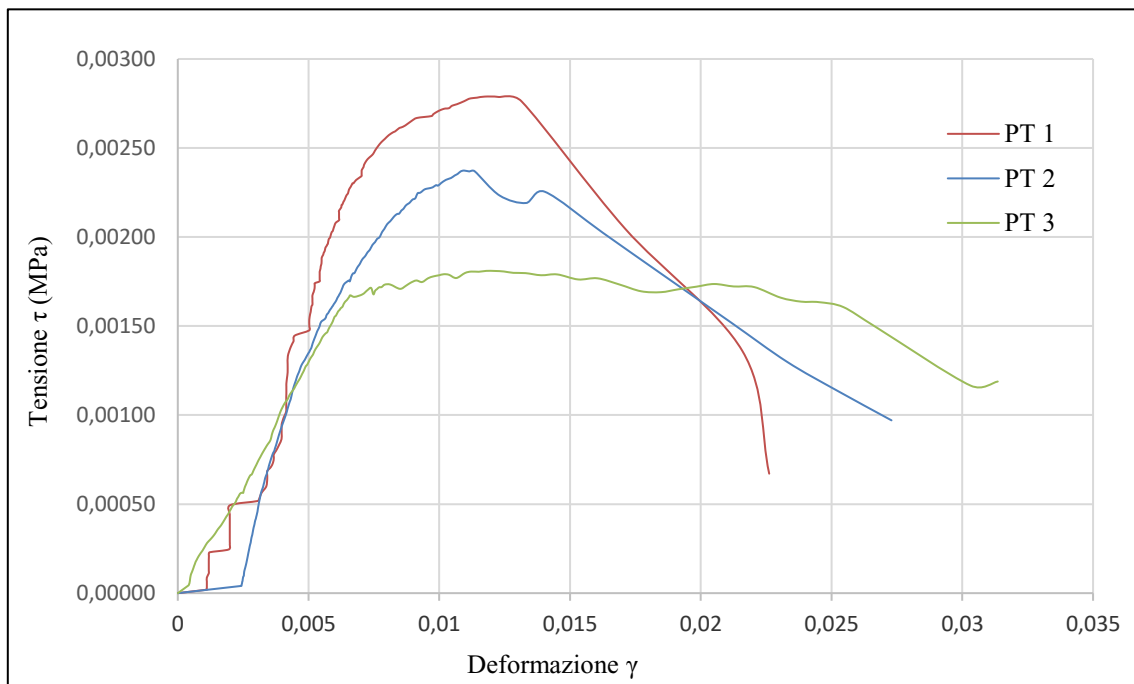


Figura 6.27 – Diagramma  $\tau$ - $\gamma$  dei valori registrati per ciascun provino

In Figura 6.27 è possibile notare come i provini sottoposti allo sforzo di precompressione e taglio, restituiscano delle curve  $\tau$ - $\gamma$  assimilabili ad un andamento bilineare. Nella prima fase osserviamo un andamento lineare del grafico, in cui le deformazioni aumentano al crescere del carico orizzontale; il secondo tratto, conseguente al raggiungimento del carico massimo, esibisce un andamento pressoché costante, con lo sviluppo di una discreta fase plastica. Il comportamento manifestato dai provini può essere ritenuto di tipo duttile, come mostrato dall'andamento delle curve, in quanto la capacità deformativa residua esibita da ciascun provino, aumenta una volta raggiunto il carico di rottura. Per il provino PT3 si può osservare l'andamento bilineare della curva descritto in precedenza. La formazione di un pianerottolo plastico, è da imputarsi al contributo del carico di compressione imposto ad inizio prova e mantenuto costante, il quale aiuta lo sviluppo della fase post-elastica.

Di seguito vengono tabulati i valori più significativi dei parametri ottenuti ed il calcolo del modulo elastico tangenziale.

Tabella 6.7 Risultati principali delle prove di precompressione e taglio su provini quadrati

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

Tabella 6.8 Valori medi ottenuti dalle prove di precompressione e taglio su provini quadrati

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

Osservando il confronto tra i provini testati riportato In *Tabella 6.7*, notiamo come il valore di forza orizzontale massima raggiunto è pari a 307 kN per il pannello PT1. Lo spostamento massimo in sommità acquisito durante la prova, è di 34 mm, per il provino PT3. In media, tutti i pannelli hanno ottenuto uno spostamento pari a circa 30 mm, per un valore medio di forza orizzontale di 256 kN (*Tabella 6.8*).

Per il provino PT4 la prova non è stata eseguita a causa di spiccate irregolarità costruttive osservate durante la fase di set-up.

---

Come mostrato dei diagrammi precedenti relativi alle curve  $\tau$ - $\gamma$ , la deformazione residua maggiore viene esibita nella prova PT3 in cui si raggiunge il valore massimo di deformazione angolare pari a circa il 3%.

Il calcolo del modulo elastico tangenziale  $G_{tg}$  ha restituito valori minimi, dovuti alle basse tensioni tangenziali ottenuti rapportate alle deformazioni angolari.

### **-Modalità di rottura**

Nelle immagini successive è possibile osservare il quadro fessurativo esibito dai provini testati a precompressione e taglio.



*Figura 6.28 - Fessurazione diagonale e schiacciamento spigolo fronte PT1*



*Figura 6.29 - Fessurazione diagonale e schiacciamento spigolo fronte PT2*



*Figura 6.30 - Fessurazione diagonale e schiacciamento spigolo fronte PT3*

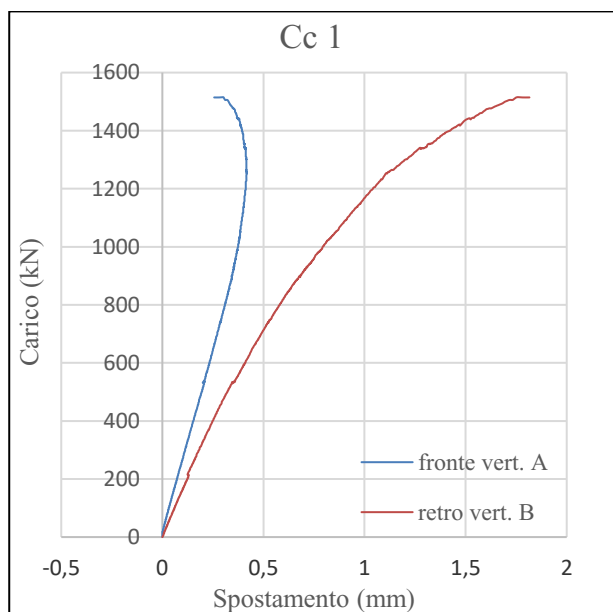
Dalle immagini emergono modalità di rottura simili per tutti i provini testati: in particolare si è avuta una rottura a taglio per fessurazione diagonale, accompagnata da uno schiacciamento dello spigolo inferiore del pannello. In Figura 6.28 e 6.30 è possibile osservare l'andamento delle fessure lungo la diagonale: questo suggerisce la formazione di una biella compressa e di una biella tesa per le due diagonali. La rottura avviene sempre in direzione perpendicolare alla diagonale compressa, lungo la biella tesa, poiché gli sforzi di trazione tendono ad innescare l'apertura delle lesioni proprio lungo la diagonale.

La seconda modalità di rottura esibita dai provini, consiste nella rottura per schiacciamento dello spigolo inferiore sinistro del pannello, in corrispondenza dello strumento di contrasto utilizzato per impedire lo spostamento al piede durante l'applicazione dello sforzo di taglio.

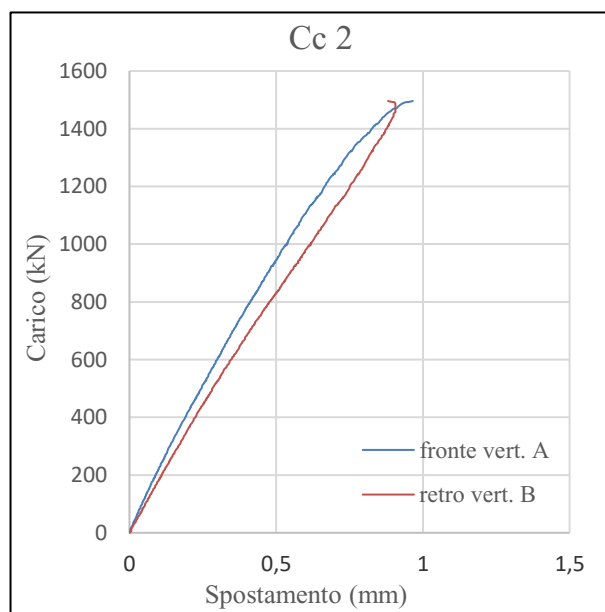
Come si evince dalle immagini, a seguito dello schiacciamento del cordolo, si è avuta l'espulsione della cortina esterna in calcestruzzo per sforzi di compressione.

## 6.6 – ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI PER LE PROVE DI COMPRESSIONE CENTRATA (PANNELLI 1100 x 3000 mm)

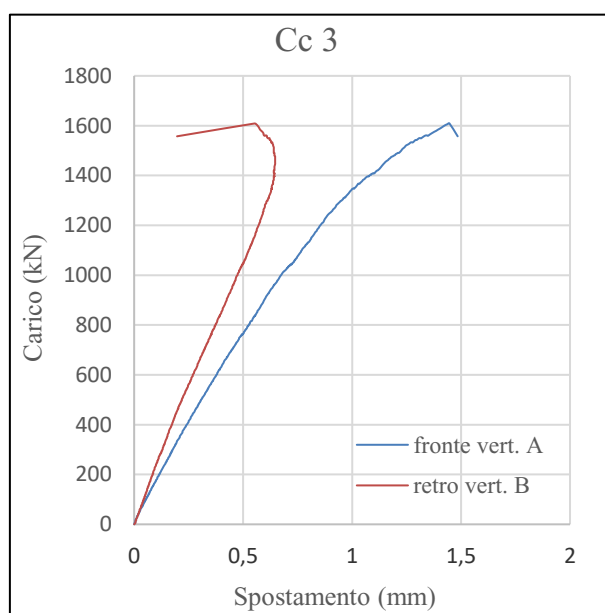
Per i provini snelli di tipo sandwich di altezza pari a 3000 mm, la prova di compressione centrata ha prodotto i seguenti risultati in termini di *Forza-Spostamento*, riportati nei successivi diagrammi.



(a)



(b)

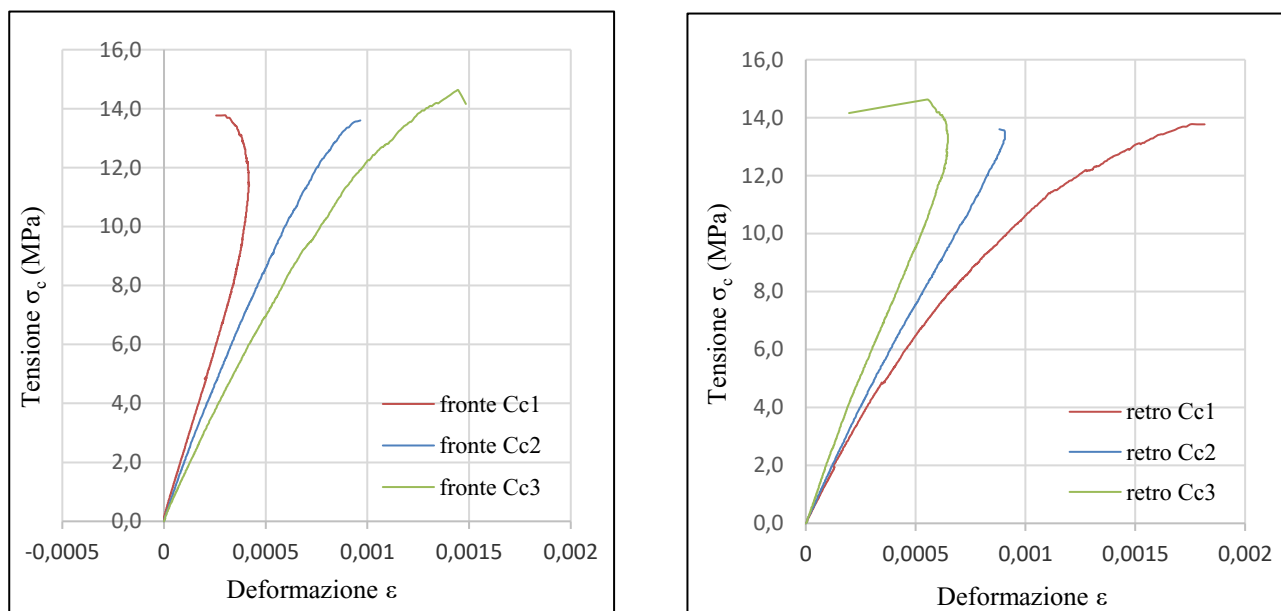


(c)

Figura 6.31 – Diagrammi Forza-Spostamento dei valori misurati sulle due facce di ogni provino

L'andamento delle curve mostrate nei diagrammi in *Figura 6.31*, indica il manifestarsi di un comportamento elastico-lineare dei provini, con spostamenti crescenti all'aumentare del carico. Il provino Ce2 mostra come tutte e due le facce del pannello siano soggette a compressione (valori positivi nel diagramma). Mentre per i restanti provini la curva protesa verso valori negativi di spostamento, indica una maggiore tendenza al manifestarsi di un comportamento a trazione.

In *Figura 6.32* vengono riportati i diagrammi  $\sigma_c$ - $\epsilon$  ottenuti per il lato fronte e retro di ciascun provino.



*Figura 6.32 – Diagramma  $\sigma_c$ - $\epsilon$  dei valori registrati per il lato fronte e retro di ciascun provino*

La deformazione longitudinale  $\epsilon$  aumenta linearmente con il crescere dello sforzo di compressione applicato. Dai diagrammi, si può notare come i pannelli non esibiscano lo sviluppo di deformazioni residue: questo è assimilabile ad un comportamento di tipo fragile.

Come mostrato dalle curve, una volta raggiunto il carico massimo di rottura, esse si interrompono bruscamente, senza che si manifestino deformazioni residue.

Nella *Tabella 6.9 e 6.10*, vengono espressi i dati principali misurati sui quattro provini, in termini di carico massimo raggiunto, tensione di compressione massima, deformazione



longitudinale massima e modalità di rottura, oltre al calcolo del modulo di elasticità secante e tangente

Tabella 6.9 Risultati principali delle prove di compressione centrata su provini rettangolari

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

Tabella 6.10 Valori medi ottenuti dalle prove di compressione centrata su provini rettangolari

Valori medi prova Cc				
Carico Max [kN]	$\sigma_c \text{ max}$ [MPa]	$\epsilon \text{ max}$ [-]	$E \text{ sec}$ [MPa]	$E \text{ tg}$ [MPa]
1540	14,00	0,001	10816	16914

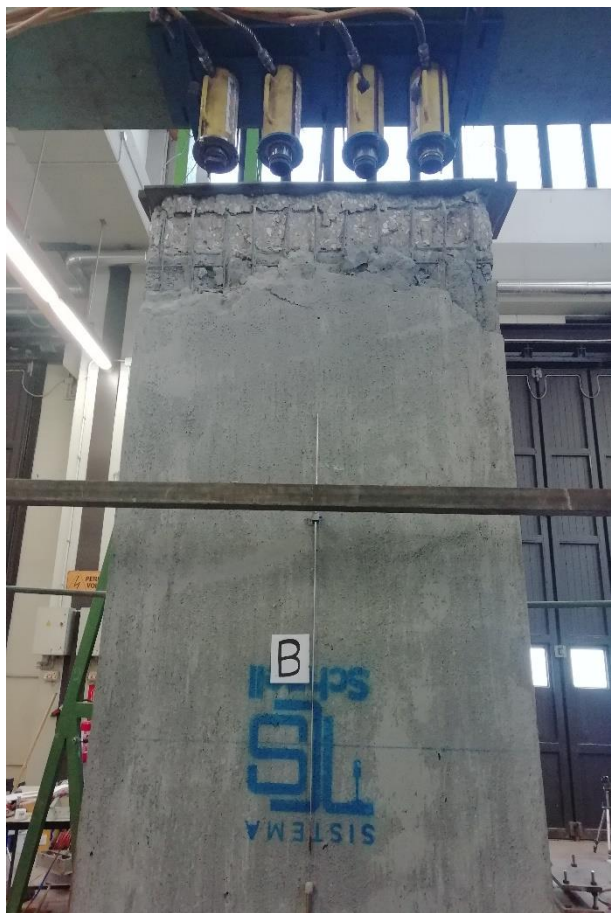
Il carico massimo raggiunto è stato registrato per il provino Cc3 ed è pari a 1609 kN. In termini di tensione di compressione, per tutte le prove è stato calcolato un valore medio di 14 MPa, come riportato in *Tabella 6.10*. In linea con il grafico precedente, la deformazione verticale massima è stata registrata per il provino Cc1 ed è pari allo 0,2 %. Come si evince dalla tabella, il comportamento di tipo fragile manifestato dai provini, non ha prodotto deformazioni apprezzabili.

Sono stati inoltre calcolati il modulo elastico secante, il cui valore medio si attesta intorno ai 10800 MPa, ed il modulo elastico tangente medio, pari a 16914 MPa.

---

## -Modalità di rottura

Di seguito alcune immagini delle rotture significative dei provini rettangolari testati.



*Figura 6.33 - Schiacciamento cordolo superiore Cc1*



*Figura 6.34 - Inflessione fuori dal piano Cc2*



*Figura 6.35 - Inflessione fuori dal piano Ce3*



*Figura 6.36 - Schiacciamento cordolo inferiore Ce3*

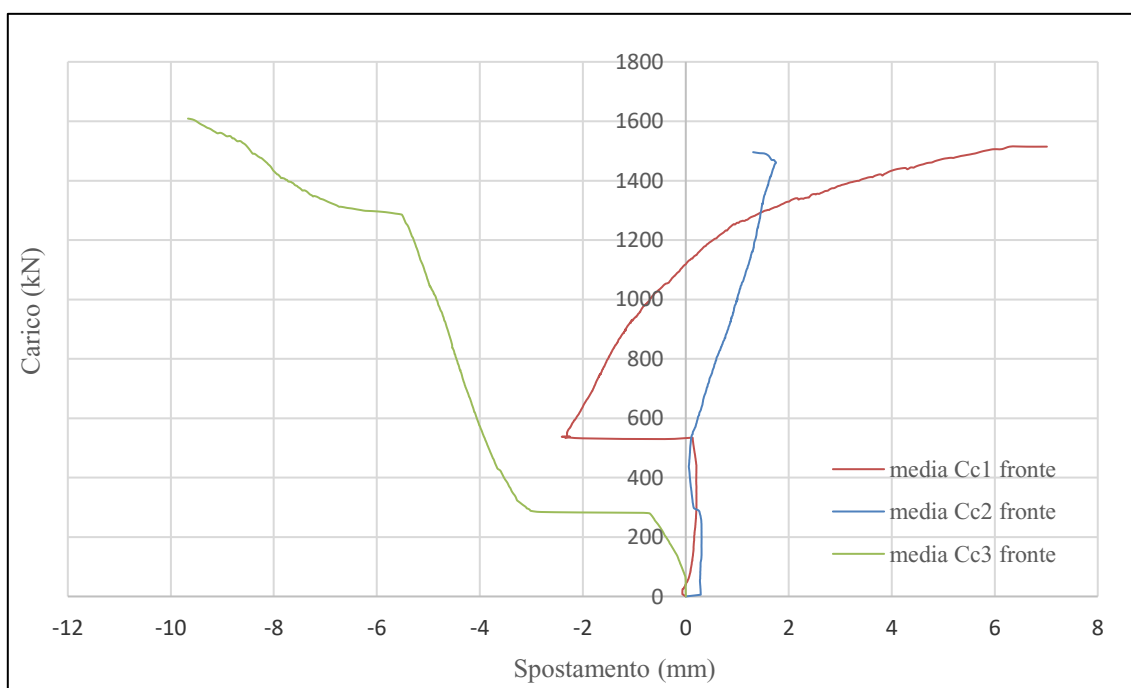
Per il provino Cc1 l'interruzione della prova è avvenuta a causa dello schiacciamento del cordolo superiore in calcestruzzo, il quale essendo molto rigido ha raggiunto per primo la rottura, non permettendo così al provino di manifestare un comportamento a flessione.

Le immagini precedenti mostrano invece la comparsa di fratture orizzontali prossime alla mezzeria, per i pannelli Cc2 e Cc3. La rottura è avvenuta per compressione del pannello che ha provocato l'innescò di lesioni orizzontali che si estendono per tutta la larghezza dei provini.

Lo sforzo verticale centrato applicato ai campioni, ha prodotto una instabilità fuori dal piano accompagnata dalla frattura dei pannelli in mezzeria e l'inflessione degli stessi, come ben evidenziato in *Figura 6.35*.

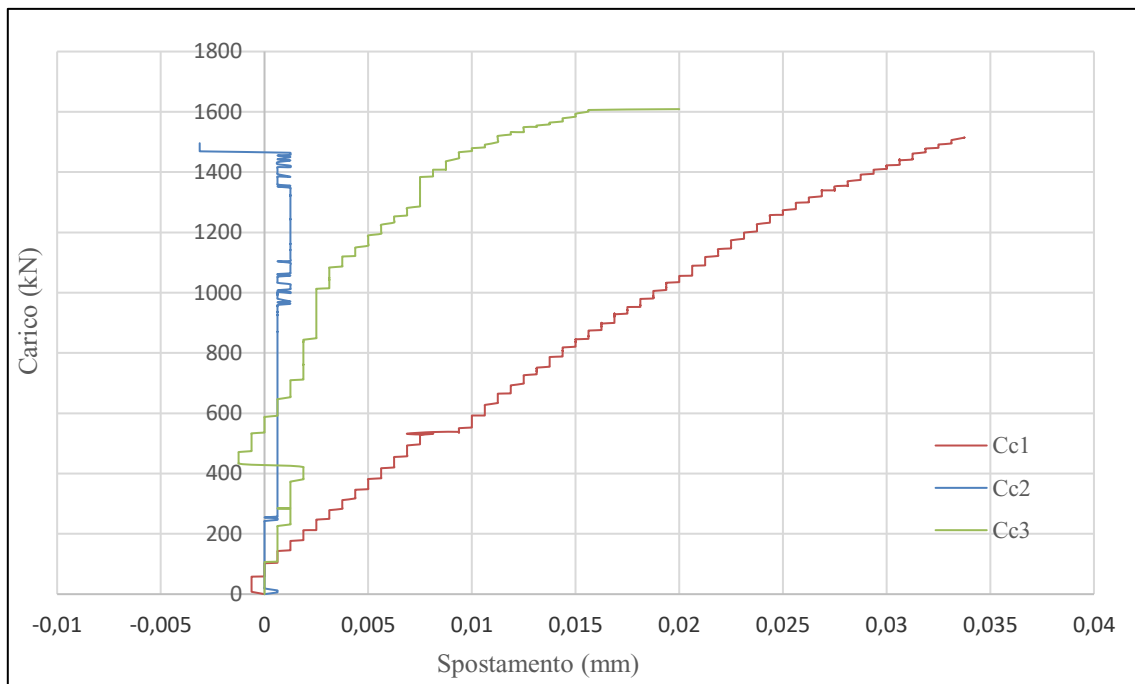
È stata riscontrata la presenza di una ulteriore crisi a rottura, data dallo schiacciamento del cordolo inferiore, per i provini Cc2 e Cc3. Lo schiacciamento del lato compresso del pannello ha provocato l'espulsione della cortina in calcestruzzo in prossimità del cordolo al piede, accompagnata da un evidente svergolamento dell'armatura di sostegno (si veda *Figura 6.36*).

### -Comportamento fuori dal piano



*Figura 6.37 - Spostamenti fuori dal piano misurati per il lato fronte*

L'instabilità fuori dal piano, viene restituita dai valori misurati dai trasduttori posizionati per tutta l'altezza del pannello, a ridosso del lato fronte, i quali mostrano valori di spostamento quasi dell'ordine del centimetro (*Figura 6.37*). L'instabilità a pressoflessione registrata durante la prova di compressione centrata, è molto evidente dalle curve ottenute per il provino Cc1 e Cc3.

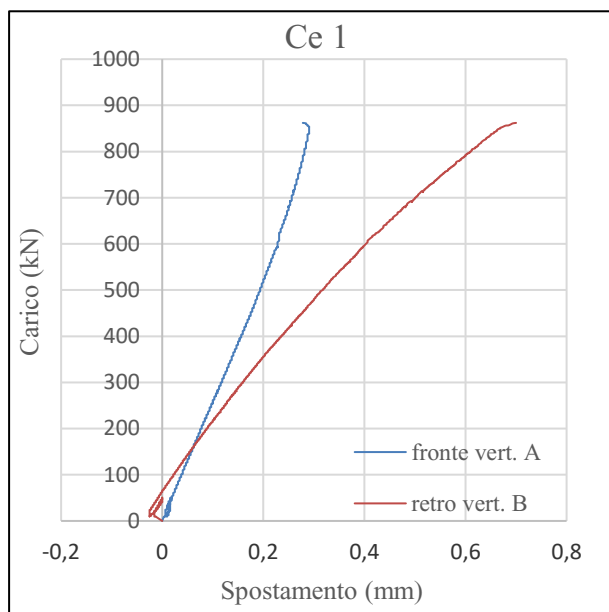


*Figura 6.38 – Spanciamento misurato per il lato A di ciascun provino*

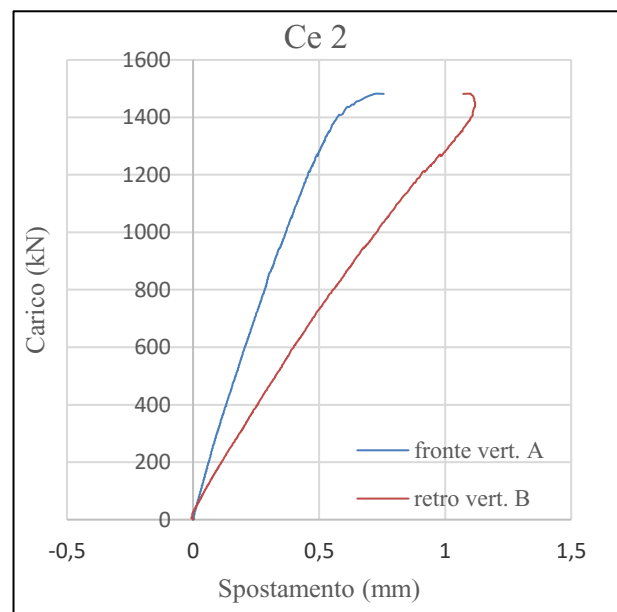
Non si sono registrati valori significativi di spanciamento, misurati per il lato A di ogni pannello. Nonostante l'applicazione del carico di compressione, tutti i provini hanno mostrato una perfetta aderenza tra le due cortine di calcestruzzo e lo strato isolante posto nel mezzo. Per il provino Cc1 è possibile osservare valori di spostamento maggiori rispetto agli altri provini, ma comunque prossimi allo zero.

## 6.7 – ANALISI DEI RISULTATI OTTENUTI PER LE PROVE DI COMPRESSIONE ECCENTRICA (PANNELLI 1100 x 3000 mm)

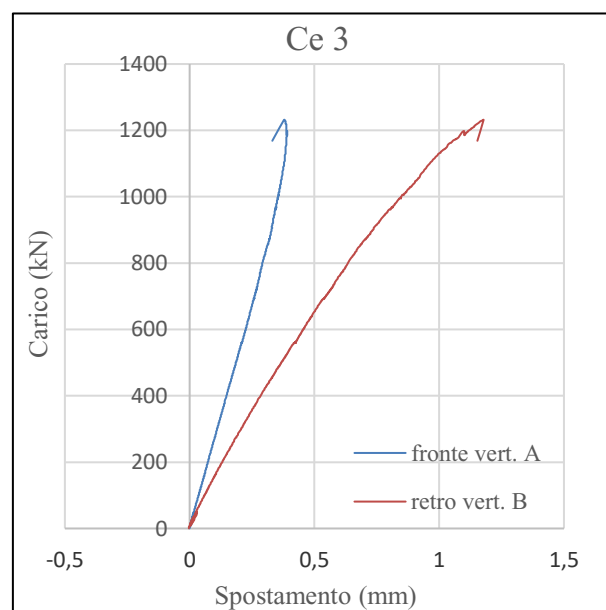
La prova di compressione eccentrica su provini rettangolari, è stata condotta in modo analogo ai test su provini quadrati, imponendo una eccentricità al carico verticale, pari ad  $e = 30$  mm. Tale valore di eccentricità, ha prodotto i seguenti diagrammi di *Forza-Spostamento*, per ciascun provino testato.



(a)



(b)

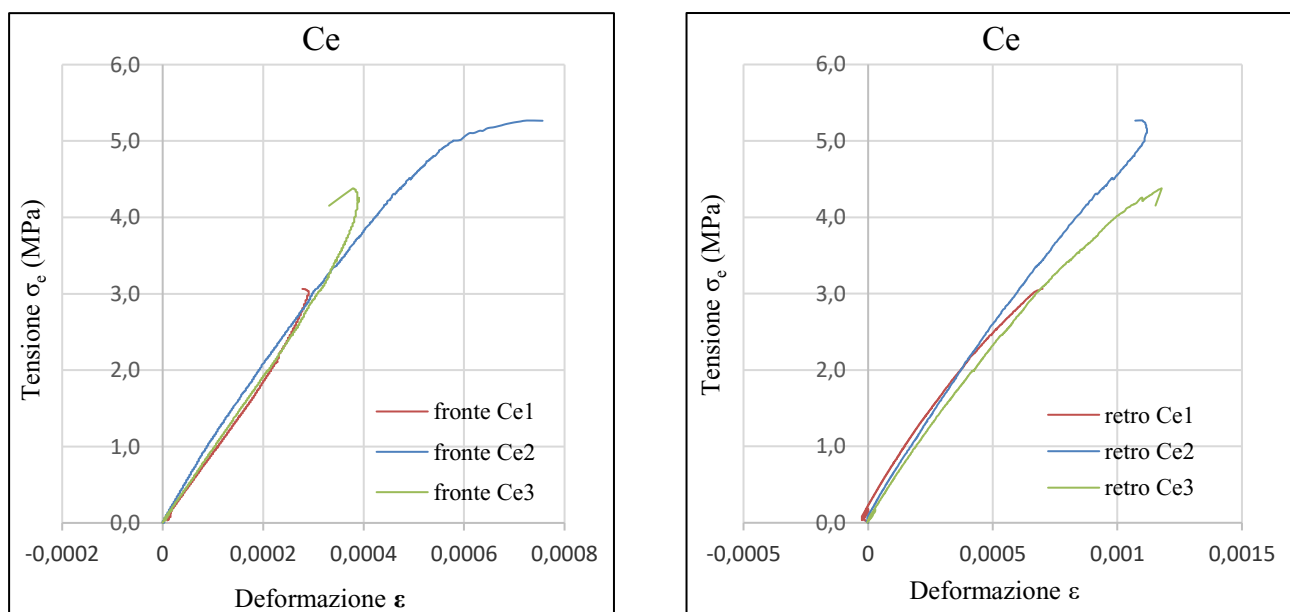


(b)

Figura 6.39 – Diagrammi Forza-Spostamento dei valori misurati sulle due facce di ogni provino

È possibile osservare che i provini sottoposti a carico eccentrico non hanno manifestato il comportamento a pressoflessione atteso. Le curve in *Figura 6.39* mostrano un andamento lineare con il crescere del carico. Si può osservare come sia il lato retro che il lato fronte del provino, siano interessati da compressione (valori positivi nel diagramma). Per tale tipologia di prova si sarebbe atteso un comportamento a pressoflessione, caratterizzato da una faccia del pannello soggetta a compressione e dall'altra soggetta a trazione: questo dovuto al momento flettente generato dalla imposta eccentricità. Tuttavia, la mancata comparsa di un momento flettente rilevante, è da imputare al valore minimo di eccentricità scelto per condurre la prova, pari a 30 mm, il quale non ha prodotto i valori attesi.

In *Figura 6.40* vengono riportati i diagrammi Tensione-Deformazione ottenuti dal calcolo della deformazione verticale  $\varepsilon$  in relazione alla tensione di compressione eccentrica  $\sigma_e$ .



*Figura 6.40 – Diagramma  $\sigma_e$ - $\varepsilon$  dei valori registrati per il lato fronte e retro di ciascun provino*

Per il provino Ce1, si può notare come il pannello non abbia sviluppato completamente le proprie capacità deformative. Questo è da attribuirsi alla rottura del cordolo inferiore durante la somministrazione del carico, tale per cui ha condizionato il proseguo della prova.

Dai grafici sopra riportati, è possibile constatare un comportamento di tipo fragile dei pannelli, caratterizzato dal brusco arresto delle curve in corrispondenza del raggiungimento del carico massimo di rottura. Il lato retro restituisce valori di deformazione longitudinale maggiori rispetto al lato fronte, seppur non rilevanti, poiché si trova in direzione dell'eccentricità.

I risultati della prova vengono riportati in *Tabella 6.11 e 6.12*, in termini di carico massimo raggiunto, tensione di compressione eccentrica massima, deformazione massima registrata, modulo elastico tangenziale e secante e modalità di rottura dei provini.

*Tabella 6.11 Risultati principali delle prove di compressione eccentrica su provini rettangolari*

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

*Tabella 6.12 Valori medi ottenuti dalle prove di compressione eccentrica su provini rettangolari*

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



---

Il carico massimo è stato registrato per il provino Ce2 ed è pari a 1482 kN, con una tensione di compressione eccentrica massima di 5,27 MPa. Il comportamento di tipo fragile del provino ha prodotto deformazioni minime pari a circa lo 0,1%.

Sono stati calcolati anche per tale prova il modulo elastico tangente, il cui valore medio per tutti i provini è pari a 5752 MPa, mentre il modulo elastico secante risulta di 4267 MPa.

### **-Modalità di rottura**

Nelle immagini successive vengono riportate le principali modalità di rottura osservate per ogni provino.



*Figura 6.41 - Schiacciamento cordolo inferiore  
Ce1*



*Figura 6.42 - Schiacciamento cordolo superiore  
Ce2*



*Figura 6.43 - Rotazione cordolo superiore Ce3*

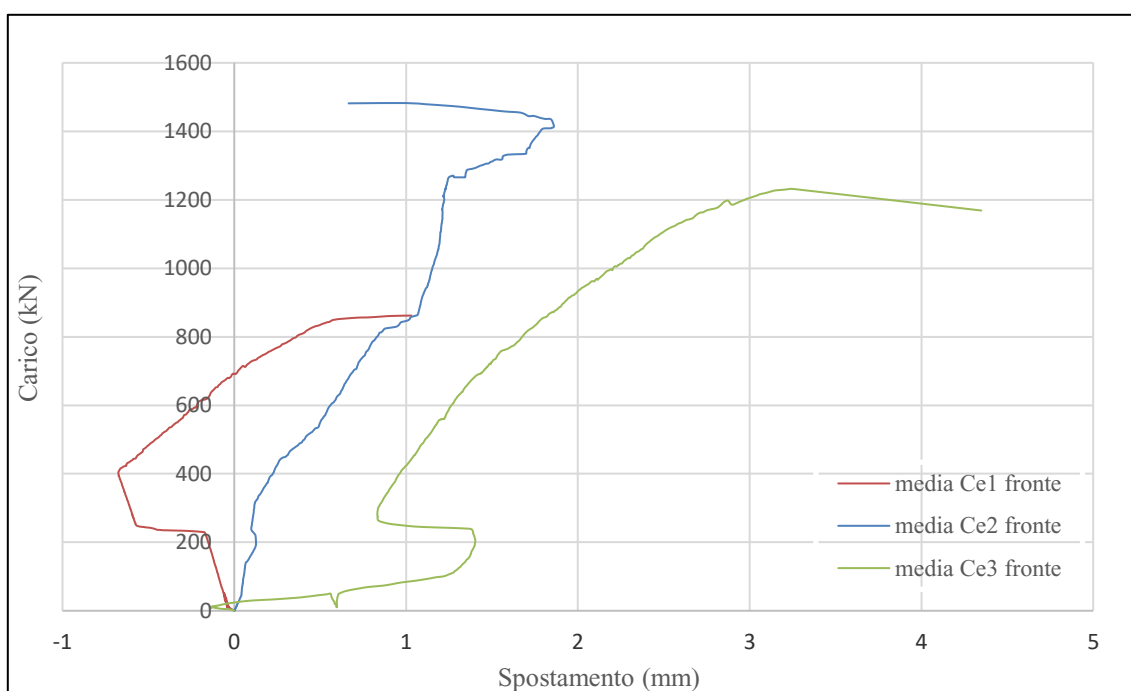
La prova non ha prodotto il fenomeno di pressoflessione atteso, proprio perché la crisi è avvenuta per schiacciamento dei cordoli che ha impedito l'espletarsi dell'azione del momento flettente. Si può osservare come globalmente, tutti i pannelli testati arrivino a rottura per schiacciamento del cordolo in calcestruzzo, in particolare il cordolo inferiore per il provino Ce1 e quello superiore per il provino Ce2. Tale fenomeno ha prodotto l'espulsione del paramento in calcestruzzo in prossimità dei cordoli.

Il provino Ce3 ha manifestato una modalità di rottura data dalla rotazione del cordolo superiore, il quale essendo molto rigido tende a ruotare a causa del carico verticale eccentrico (*Figura 6.43*).

---

## -Comportamento fuori dal piano

I valori di spostamento fuori dal piano registrati e riportati in *Figura 6.44*, sono da attribuirsi alla perdita di verticalità dovuta alla rottura del cordolo.



*Figura 6.44 - Spostamenti fuori dal piano misurati per il lato fronte*

I trasduttori posizionati in direzione perpendicolare al lato fronte del provino, hanno restituito valori di spostamento significativi per il provino Ce3, di circa 5 mm. Tuttavia, ciò è da imputare dall'instabilità verticale del pannello il quale una volta avvenuta la rottura del cordolo, è uscito dal suo asse verticale. Pertanto, non è imputabile ad un comportamento di pressoflessione, come atteso per la prova con somministrazione di carico eccentrico.

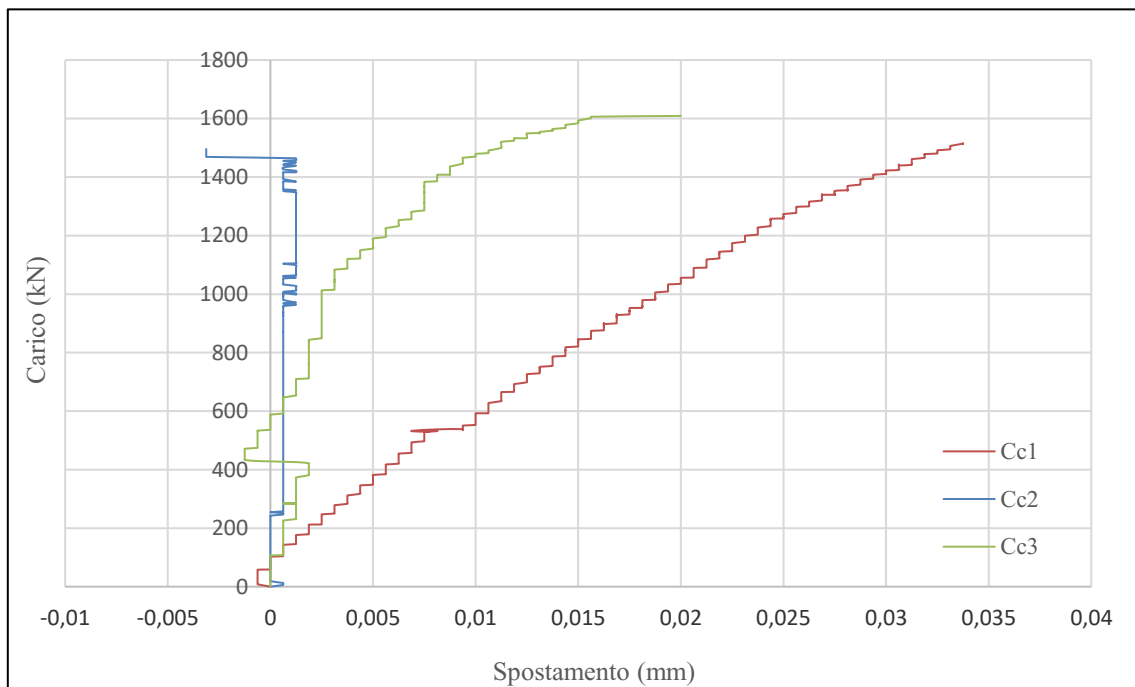


Figura 6.45 - Spanciamento misurato per il lato A di ciascun provino

Non si sono registrati valori significativi di spanciamento per i provini, prossimi allo zero.

---

## 6.8 – CONFRONTO DEI RISULTATI OTTENUTI

### 6.8.1 – Comparazione dei provini TCS

È possibile condurre una comparazione dei risultati ottenuti all'interno di questa campagna sperimentale, in particolare per i provini soggetti a prove di compressione centrata ed eccentrica. Tale confronto risulta interessante a seconda delle diverse dimensioni dei pannelli testati, rispettivamente:

-provini quadrati di lato 1100 x 1100 mm (codice CC - CE);

-provini rettangolari di dimensioni 1100 x 3000 mm (codice Cc - Ce).

Entrambe le tipologie sono state testate con prove di compressione centrata ed eccentrica, le quali hanno restituito valori differenti in termini di carico massimo, tensione massima di compressione e moduli elastici.

#### -Confronto tra provini tozzi e provini snelli: prova di compressione centrata

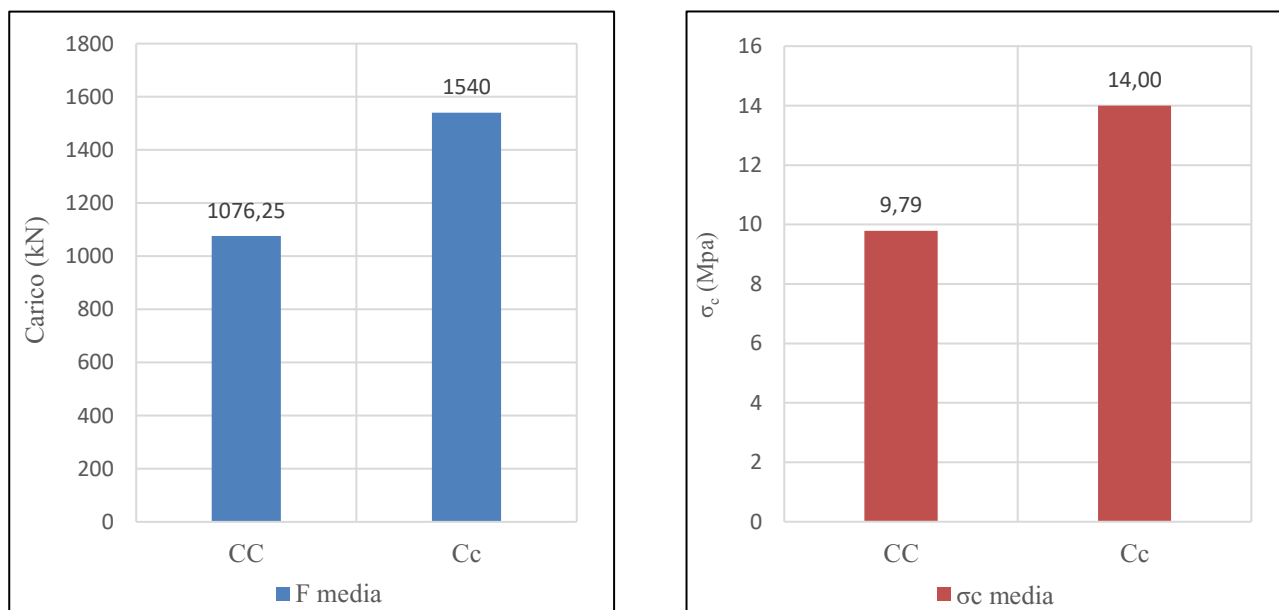


Figura 6.46 – Confronto dei valori medi in termini di Carico e Tensione di compressione centrata, ottenuti per le prove di compressione centrata su provini quadrati CC e su provini rettangolari Cc

In Figura 6.46, osservando il grafico relativo ai valori di carico massimo medio registrati per le due tipologie di provini, si può notare come sia i provini quadrati CC che i provini

rettangolari Cc, raggiungano valori elevati di sforzo di compressione. Inoltre, i pannelli di altezza pari a 3000 mm riescono a sopportare mediamente, un carico di compressione maggiore del 40% rispetto ai pannelli di altezza pari a 1100 mm. Tutti i provini sviluppano in media buone capacità di resistenza, con valori di tensione di compressione  $\sigma_c$  pari a 9,79 MPa per i pannelli tozzi e di 14 MPa per i pannelli snelli.

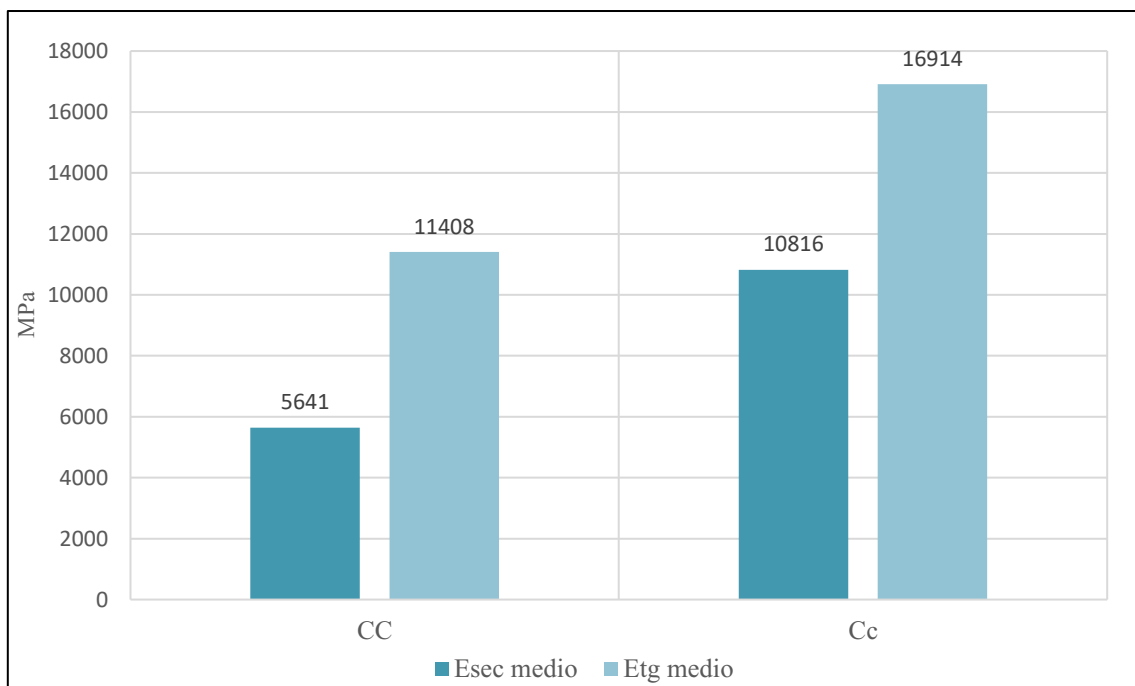


Figura 6.47 – Confronto dei valori medi dei Moduli elastici, ottenuti per le prove di compressione centrata su provini quadrati CC e su provini rettangolari Cc

Il confronto in *Figura 6.47* permette di comparare il valore del modulo elastico tangente e secante ottenuti da ciascuna prova. È possibile notare come il modulo elastico secante  $E_{sec}$  per i provini tozzi risulti in media pari 5641 MPa, mentre il modulo elastico tangente sia pari a 11408 MPa. Per i provini snelli invece, si può osservare come il modulo secante risulti raddoppiato rispetto a quello dei provini CC, mentre il modulo elastico tangente sia di circa 17000 MPa.

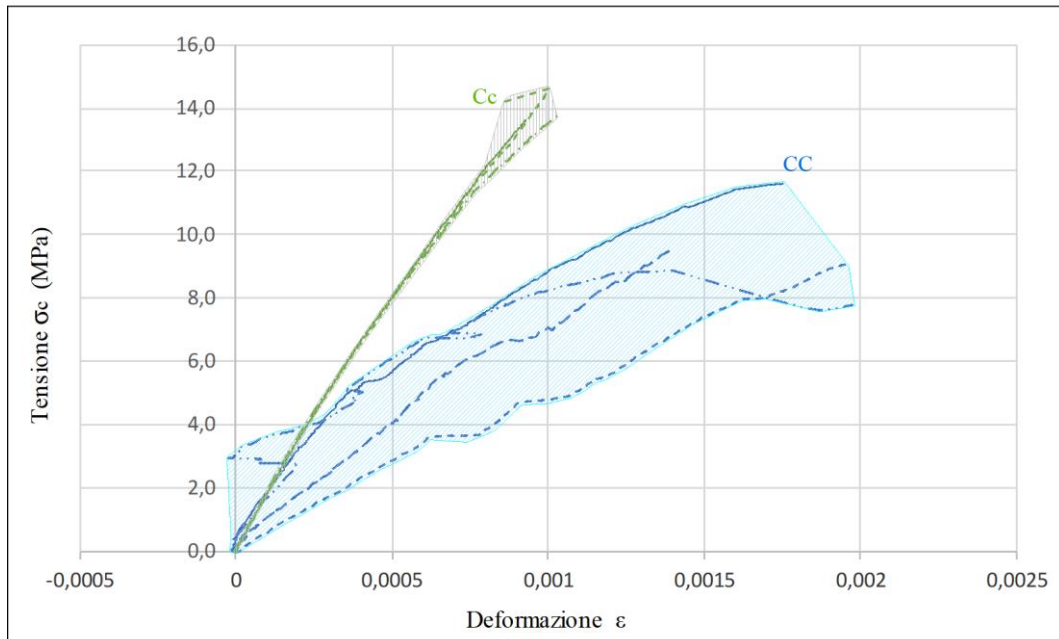


Figura 6.48 – Confronto tra i diagrammi  $\sigma_c$ - $\epsilon$  dei valori medi registrati per le prove a compressione centrata su provini quadrati CC e su provini rettangolari Cc

Analizzando il diagramma in *Figura 6.48* è possibile notare come le deformazioni medie registrate per i provini CC e per i provini Cc, possano essere contenute all'interno di un fuso, il quale ne definisce l'andamento per lo più simile, per ciascuna tipologia di pannello, differente per dimensioni. Dal grafico emerge l'andamento pressoché lineare delle curve *Tensione-Deformazione*: per i provini rettangolari Cc, la curva delle deformazioni cresce più rapidamente all'aumentare delle tensioni, rispetto ai provini quadrati CC, i quali sviluppano una capacità deformativa maggiore. Si denota inoltre un comportamento di tipo fragile molto più marcato per i provini snelli, i quali sopportano un carico maggiore ma con deformazioni più piccole rispetto ai provini quadrati.

## -Confronto tra provini tozzi e provini snelli: prova di compressione eccentrica

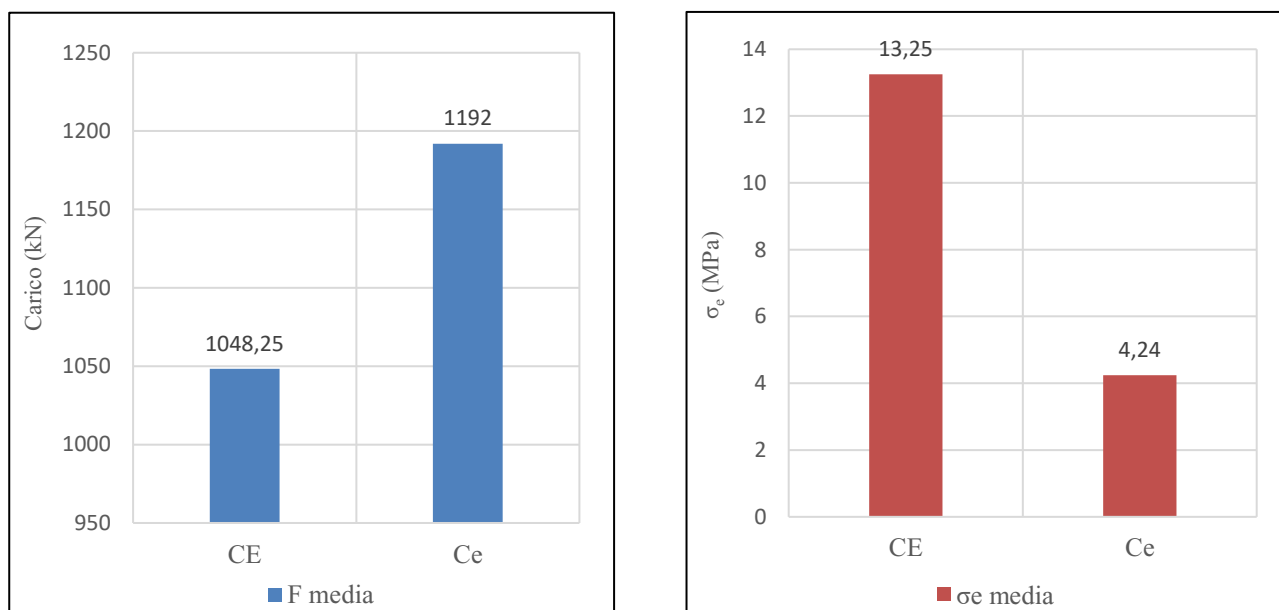
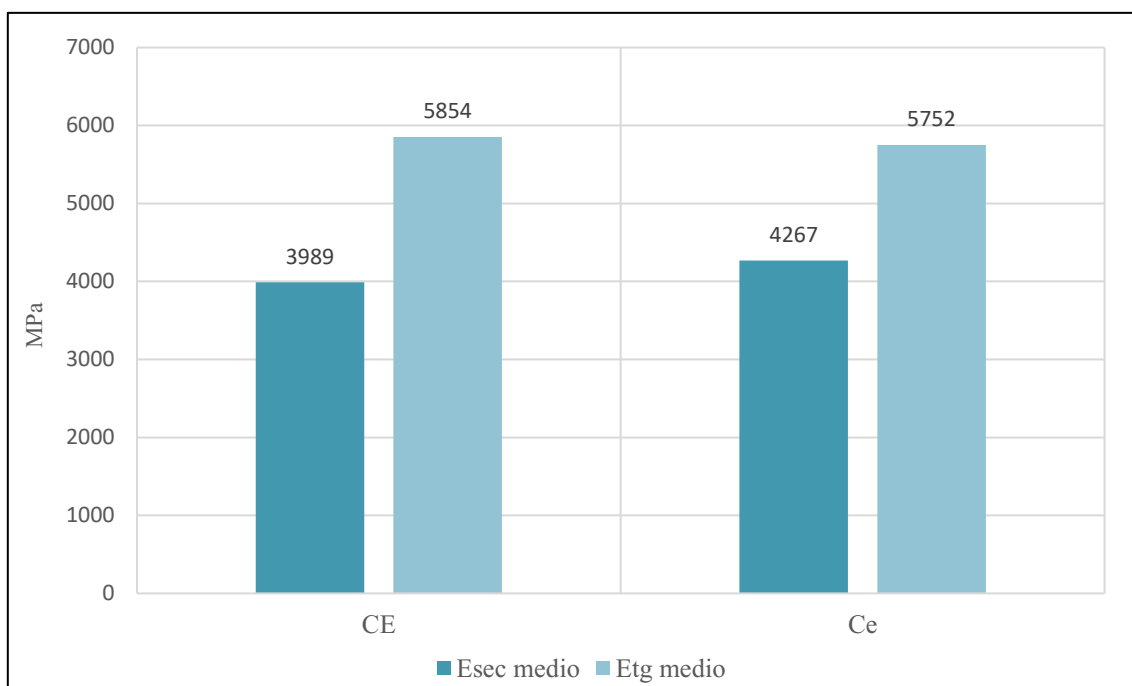


Figura 6.49 – Confronto dei valori medi in termini di Carico e Tensione di compressione eccentrica, ottenuti per le prove di compressione centrata su provini quadrati CE e su provini rettangolari Ce

I provini rettangolari Ce sottoposti a prova di compressione eccentrica, raggiungono in media, un valore di carico massimo pari a circa 1192 kN (Figura 6.49), di poco superiore rispetto ai provini quadrati CE, circa il 10%. Per le tensioni di compressione eccentrica, notiamo come per i pannelli tozzi siano di molto maggiori rispetto ai pannelli snelli: ciò è da attribuire gran parte al mancato sviluppo dello sforzo di pressoflessione durante la prova su provini Ce, condizionata dalla rottura del cordolo in calcestruzzo, il quale non ha permesso lo sviluppo delle tensioni di compressione.





*Figura 6.50 – Confronto dei valori medi dei Moduli elastici, ottenuti per le prove di compressione eccentrica su provini quadrati CE e su provini rettangolari Ce*

In *Figura 6.50* vengono comparati i valori dei moduli elastici ottenuti da ciascuna tipologia di prova. Per i provini CE è stato ottenuto un valore medio massimo di modulo elastico secante  $E_{sec}$  pari quasi a 4000 MPa ed in media, un valore massimo del modulo tangente  $E_{tg}$  di 5854 MPa. I provini snelli hanno prodotto risultati simili, con un valore medio del modulo secante di  $E_{sec}$  pari a 4267 MPa, mentre per il modulo tangente  $E_{tg}$  si è ottenuto un valore massimo medio di 5752 MPa.

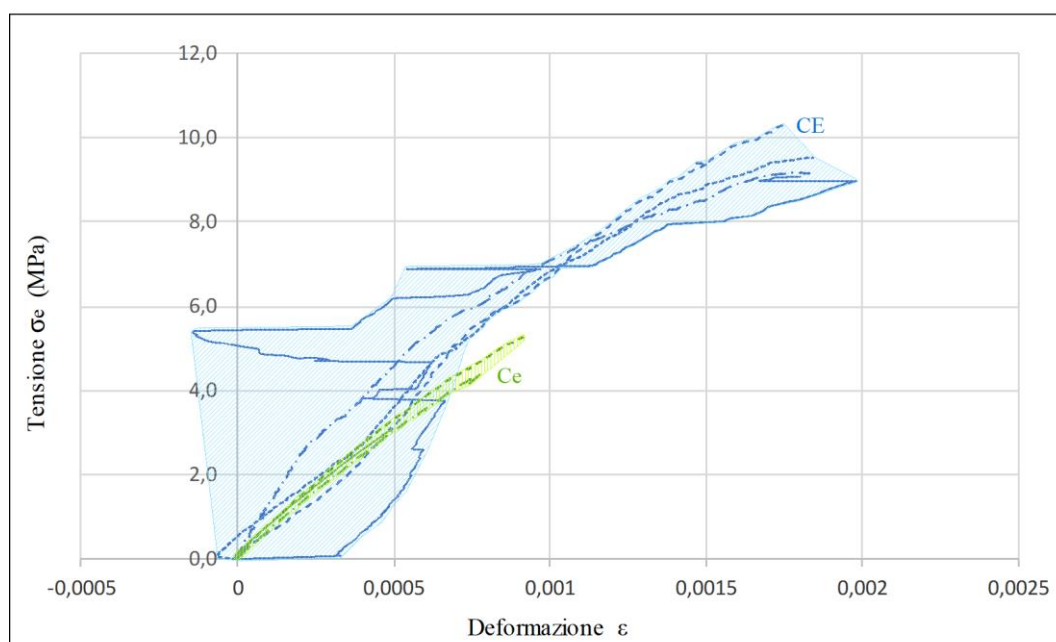


Figura 6.51 – Confronto tra i diagrammi  $\sigma_e$ - $\varepsilon$  dei valori medi registrati per le prove a compressione centrata su provini quadrati CE e su provini rettangolari Ce

Il diagramma in *Figura 6.51* mette a confronto l'andamento medio delle curve *Tensione - Deformazione* ottenute per le prove di compressione eccentrica su pannelli tozzi e snelli.

È stato possibile ottenere gli involucri che inglobano il comportamento deformativo per ciascuna tipologia di provini testati. Notiamo come per le prove Ce, tutti i provini manifestino un comportamento elastico-lineare, raggiungendo bassi valori di deformazione  $\varepsilon$  al crescere dello sforzo di compressione. Questo comportamento di tipo fragile è visibile anche per i provini CE, per cui osservando le curve racchiuse nel fuso, vediamo come l'andamento lineare delle stesse al crescere delle tensioni, porti al raggiungimento di deformazioni maggiori.

---

## 6.8.2 – Comparazione dei provini TCS – Schnell Home

È stato possibile operare un confronto in termini di carico massimo raggiunto e tensioni tangenziali e di compressione, tra i pannelli testati di produzione della ditta TCS con pannelli della stessa tipologia strutturale (quale pannello sandwich in calcestruzzo armato e polistirene) prodotti dalla Schnell Home, di cui sono stati acquisiti i dati sperimentali della campagna di prove.

In particolare, i pannelli Schnell Home testati sono di due tipologie, differenti per spessore dell'anima, diametro dell'armatura e spessore delle pareti esterne; di seguito se ne elencano le caratteristiche:

-Pannello rete  $\phi 3$ : costituito da una lastra in polistirene espanso (EPS), sagomata in modo ondulare e di spessore pari a 100 mm, pareti esterne realizzate in betoncino spruzzato dello spessore medio di 35 mm, armate con rete elettrosaldata  $\phi 3$  e connettori trasversali  $\phi 3$ ; lo spessore totale è pari a 170 mm;

- Pannello rete  $\phi 6$ : costituito da una lastra in polistirene espanso (EPS), sagomata in modo ondulare e di spessore pari a 100 mm, pareti esterne realizzate in betoncino spruzzato dello spessore medio di 50 mm, armate con rete elettrosaldata  $\phi 6$  e connettori trasversali  $\phi 6$ ; lo spessore totale è pari a 200 mm;

Il confronto effettuato è valido per le tipologie di prove a compressione, sia su provini tozzi che su provini snelli.

### **-Confronto pannelli TCS-Schnell Home: prova di compressione diagonale su provini quadrati**

Sono stati acquisiti i dati relativi alla prova di compressione diagonale per provini Schnell Home quadrati di lato 1200 mm, armati con rete  $\phi 3$  (codice CD- $\phi 3$ ), spessore totale 170 mm, e con rete  $\phi 6$  (codice CD-  $\phi 6$ ), spessore totale 200 mm. I pannelli sandwich TCS, sono di dimensione quadrata con lato pari a 1100 mm e armati con rete elettrosaldata  $\phi 5$  (codice CD- $\phi 5$ ), spessore totale 240 mm.

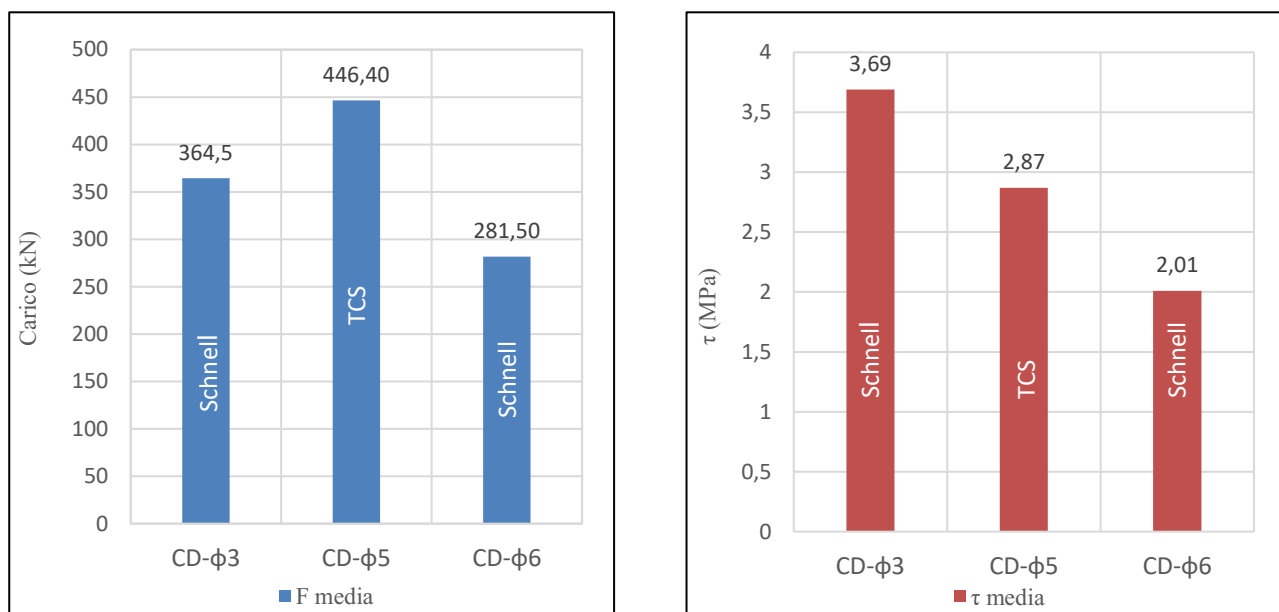


Figura 6.52 – Confronto dei valori medi in termini di Carico e Tensione tangenziale, ottenuti per le prove di compressione diagonale su provini quadrati Schnell Home e su provini quadrati TCS

Come si evince dai grafici in *Figura 6.52*, i pannelli sandwich di produzione della ditta TCS hanno mostrato una resistenza media alla compressione diagonale maggiore rispetto ai provini Schnell Home. I provini CD-φ5 raggiungono una resistenza massima media di circa 450 kN, superiore a quella fatta registrare dai provini con rete φ3, pari ai 365 kN e quella registrata per i provini con rete φ6, inferiore ai 300 kN.

In termini di tensioni tangenziali, i provini Schnell Home della tipologia CD-φ3 hanno sviluppato delle  $\tau$  maggiori rispetto ai provini TCS, seppur con valori confrontabili. Questo è dovuto all'incidenza dell'area netta  $A_n$  usata per il calcolo della tensione tangenziale  $\tau$  (si veda Capitolo 5, Paragrafo 5.2.1). Per i provini Schnell Home di dimensioni 1200 x 1200 mm, il calcolo acquisito dell'area netta  $A_n$  ha restituito i seguenti valori:

- provini CD-φ3, armati con rete φ3, spessore totale 170 mm:  $A_n = 98995 \text{ mm}^2$ ;

-provini CD- φ6, armati con rete φ3, spessore totale 200 mm:  $A_n = 141421 \text{ mm}^2$ .

Dalla prova di compressione diagonale per i provini TCS, l'area netta risulta pari a  $A_n = 110000 \text{ mm}^2$ . Considerato che  $A_n \phi3 < A_n \phi5 < A_n \phi6$ , il calcolo delle tensioni tangenziali è condizionato dalle aree coinvolte, per cui al crescere di  $A_n$  le tensioni diminuiscono. Di fatti

le  $\tau$  maggiori corrispondono ai provini Schnell della tipologia CD- $\phi 3$ , la cui area netta risulta minore rispetto a quella degli altri provini.

### -Confronto pannelli TCS-Schnell Home: prova di compressione centrata su provini quadrati

Sono stati acquisiti i dati relativi alla prova di compressione centrata per provini Schnell Home quadrati di lato 1200 mm, armati con rete  $\phi 3$  (codice C- $\phi 3$ ) e con rete  $\phi 6$  (codice C- $\phi 6$ ). I pannelli sandwich TCS, sono di dimensione quadrata con lato pari a 1100 mm e armati con rete elettrosaldata  $\phi 5$  (codice CC- $\phi 5$ ).

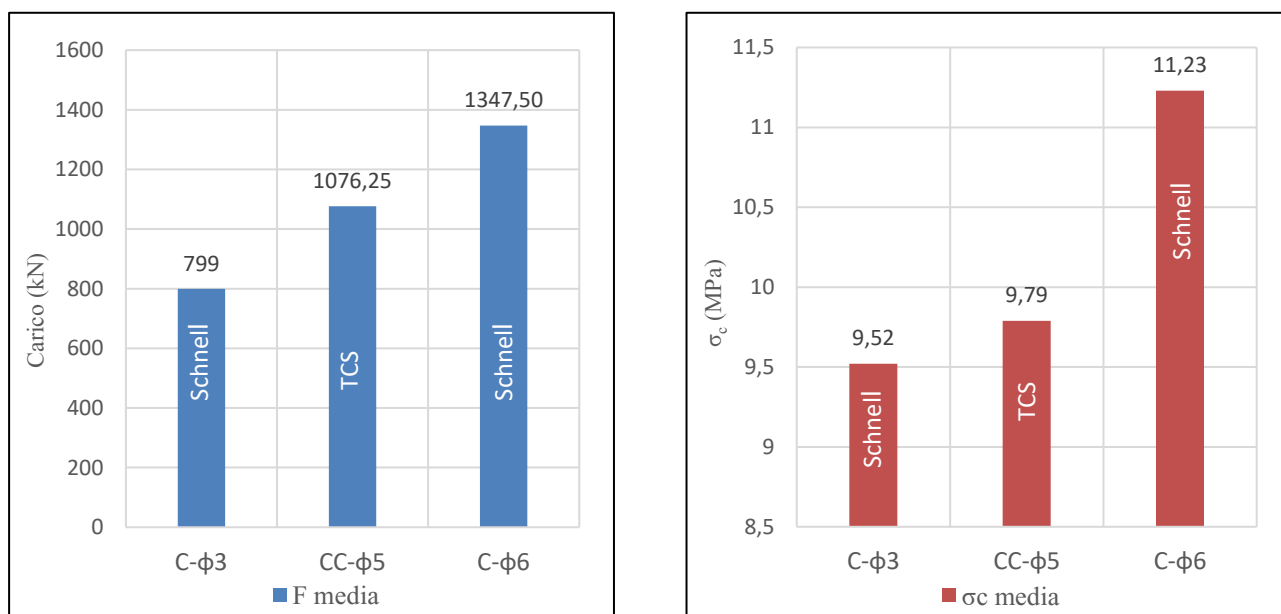


Figura 6.53 – Confronto dei valori medi in termini di Carico e Tensione di compressione, ottenuti per le prove di compressione centrata su provini quadrati Schnell Home e su provini quadrati TCS

Come visibile nei grafici in *Figura 6.53*, i provini quadrati di tipo Schnell armati con rete  $\phi 6$ , hanno raggiunto un valore medio di resistenza a compressione di circa 1347 kN, superiore di quasi il 30% rispetto ai provini CC- $\phi 5$  i quali hanno mostrato valori medi di carico massimo di circa 1076 kN. Questo suggerisce che il diametro dell'armatura inserita nei provini, conferisce una capacità di resistenza al carico maggiore, rispetto ad esempio ai provini C- $\phi 3$

armati con rete  $\phi 3$ , i quali fanno registrare in media, valori di carico massimo pari a circa 800 kN. Anche per le tensioni di compressione calcolate, i provini C $\phi$ -6 fanno registrare valori di poco superiori a quelli dei provini TCS, armati con rete  $\phi 5$ .

### -Confronto pannelli TCS-Schnell Home: prova di compressione centrata su provini rettangolari

Sono stati acquisiti i dati relativi alla prova di compressione centrata per provini Schnell Home rettangolari di dimensioni 1200 x 3000 mm, armati con rete  $\phi 3$  (codice Cc- $\phi 3$ ) e con rete  $\phi 6$  (codice Cc- $\phi 6$ ). I pannelli sandwich TCS, sono di dimensione rettangolare pari a 1100 x 3000 mm e armati con rete elettrosaldata  $\phi 5$  (codice Cc- $\phi 5$ ).

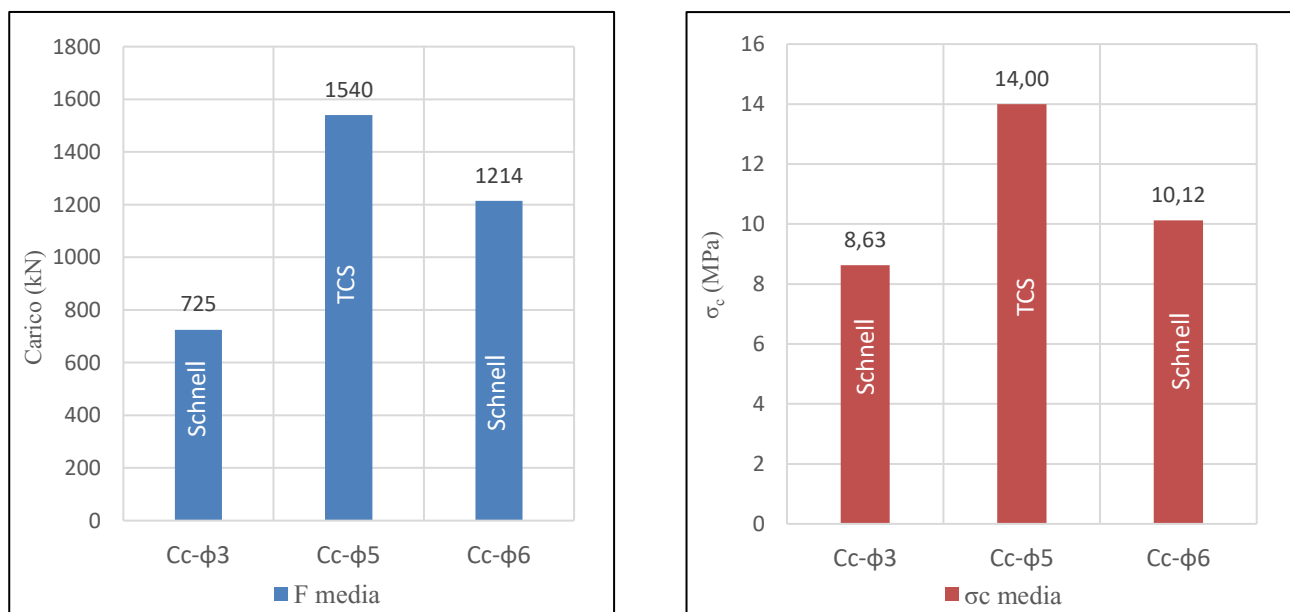


Figura 6.54 – Confronto dei valori medi in termini di Carico e Tensione di compressione, ottenuti per le prove di compressione centrata su provini rettangolari Schnell Home e su provini rettangolari TCS

Le prove di compressione su provini rettangolari hanno prodotto i valori medi massimi in termini di forza di compressione riportati in *Figura 6.54*. I pannelli sandwich della ditta TCS resistono bene allo sforzo di compressione somministrato, raggiungendo un carico massimo

di 1540 kN, più del doppio della resistenza media a compressione manifestata dai provini Schnell armati con rete  $\phi 3$  e circa il 30% in più rispetto ai provini armati con rete  $\phi 6$ .

Anche in termini di tensione di compressione massima raggiunta, i pannelli Cc- $\phi 5$  fanno registrare un valore medio massimo di  $\sigma_c$  di 14 MPa, maggiore rispetto alle tensioni registrate per i pannelli Cc- $\phi 3$  e Cc- $\phi 6$ .

### -Confronto pannelli TCS-Schnell Home: prova di compressione eccentrica su provini rettangolari

Sono stati acquisiti i dati relativi alla prova di compressione eccentrica per provini Schnell Home rettangolari di dimensioni 1200 x 3000 mm, armati con rete  $\phi 3$  (codice Ce- $\phi 3$ ) e con rete  $\phi 6$  (codice Ce- $\phi 6$ ). I pannelli sandwich TCS, sono di dimensione rettangolare pari a 1100 x 3000 mm e armati con rete elettrosaldata  $\phi 5$  (codice Ce- $\phi 5$ ).

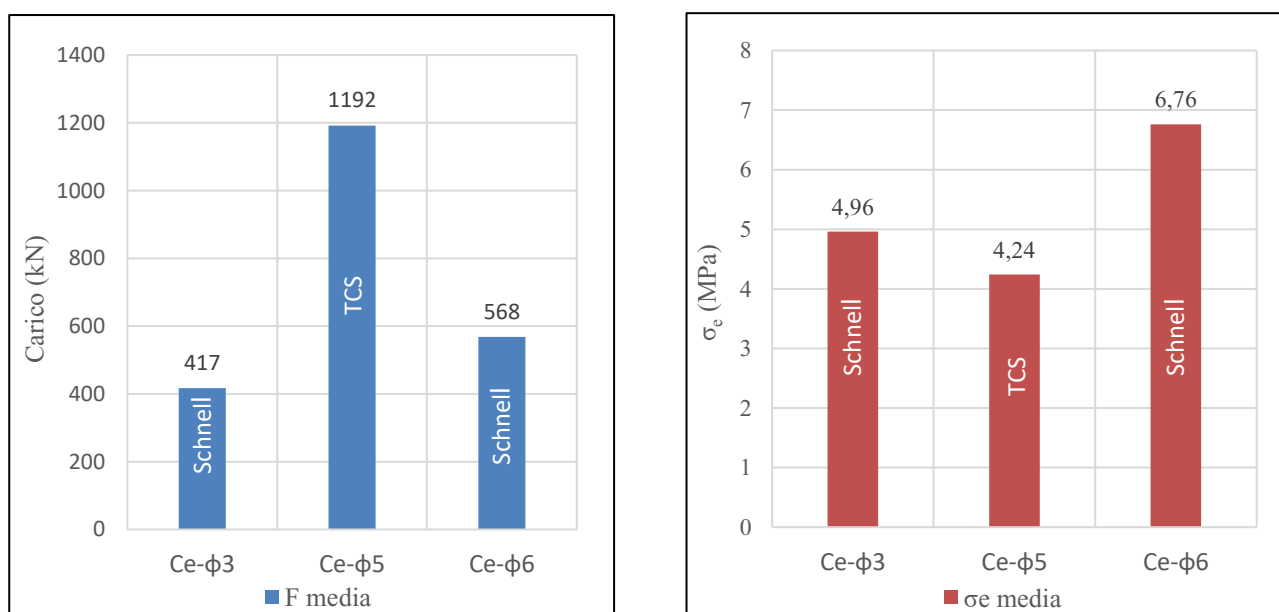


Figura 6.55 – Confronto dei valori medi in termini di Carico e Tensione di compressione, ottenuti per le prove di compressione eccentrica su provini rettangolari Schnell Home e su provini rettangolari TCS

In Figura 6.55 è possibile osservare come i provini sottoposti a compressione eccentrica della tipologia TCS raggiungano alti valori di carico massimo eccentrico, pari in media, a circa

---

1200 kN, il 50% in più rispetto allo sforzo sopportato dai provini Schnell, con rete  $\phi 6$  e di molto maggiore rispetto ai provini armati con rete  $\phi 3$ .

Le tensioni di compressione eccentriche calcolate posso ritenersi simili per quanto riguarda i provini Ce- $\phi 5$  e Ce- $\phi 3$ , mediamente di poco al di sotto dei 5 MPa. La tensione massima media appartiene invece ai restanti provini Schnell, armati con rete  $\phi 6$  e pari a 6,76 MPa.



---

**CAPITOLO 7**

**CONCLUSIONI**

---

## 7.1 – CONCLUSIONI

Nell'ambito di questa tesi di laurea è stata indagata la *metodologia costruttiva basata sull'impiego di pannelli di tipo sandwich in cemento armato gettato in opera realizzati con la tecnologia del pannello di supporto in polistirene*, facendo specifico riferimento al sistema costruttivo a pannelli portanti messo a punto dalla Ditta TCS srl.

In primo luogo, si è cercato di inquadrare tale tecnologia costruttiva all'interno dell'ambito della produzione edilizia, forte di un rinnovato interesse verso l'utilizzo di sistemi sandwich come strutture portanti. Ad oggi infatti, l'utilizzo di pannelli sandwich per uso strutturale, costituisce una valida alternativa funzionale nella costruzione di edifici, anche a seguito degli eventi sismici dello scorso 2016, ponendosi al primo posto per velocità di posa in opera, economicità e basso dispendio di manodopera, oltre ad offrire ottimi valori di efficienza energetica.

Date le specificità dei sistemi strutturali in esame, sono state valutate le principali normative di riferimento nazionali ed internazionali che affrontano, seppur non in maniera esaustiva, la costruzione di pareti portanti attraverso l'utilizzo di sistemi strutturali di tipo prefabbricato o gettato in opera. Tale inquadramento ha permesso di individuare le norme UNI EN ed ASTM, utili come riferimento durante l'esecuzione delle prove. Successivamente si è proceduto ad elencare le peculiarità strutturali inerenti alla tipologia di pannello sandwich in cemento armato gettato in opera realizzato con la tecnologia del pannello di supporto in polistirene.

Il principale obiettivo di questa tesi è stato quello di produrre una caratterizzazione meccanica esaustiva nei confronti delle azioni statiche, dei pannelli di tipo sandwich oggetto di interesse, valutati in termini di resistenza e capacità deformativa.

La campagna sperimentale è stata condotta all'interno del Laboratorio Ufficiale Materiali e Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura (DICEA) appartenente a questa Università ed ha previsto la caratterizzazione meccanica dei pannelli di tipo sandwich, attraverso prove statiche di compressione e taglio. I pannelli sandwich in oggetto, sono composti da due paramenti esterni in calcestruzzo spruzzato in opera, rinforzato con rete metallica, in cui al centro è inserito uno strato isolante, con funzione di supporto. Nello specifico sono state testate due differenti tipologie di provini prodotti dalla Ditta TCS srl:

---

pannelli sandwich quadrati di lato 1100 mm, armati con rete  $\phi 5$  e pannelli sandwich rettangolari, di dimensioni 1100 x 3000 mm, anch'essi armati con rete  $\phi 5$ .

In particolare, sono state condotte quattro tipologie di prove su provini quadrati e rettangolari, nello specifico: prove a compressione diagonale, prove a compressione centrata ed eccentrica, prove a precompressione e taglio. Tutte le prove sono state eseguite in controllo di spostamento, tramite l'applicazione di un carico crescente fino alla rottura del campione, mentre gli spostamenti nel piano e fuori dal piano, sono stati monitorati attraverso dei trasduttori di spostamento induttivi LVDT.

La sperimentazione effettuata ha consentito di valutare l'efficacia dei pannelli sandwich sopra descritti come elementi strutturali portanti ed ha prodotto i risultati di seguito elencati.

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

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

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

---

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

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

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

Dal confronto dei risultati ottenuti da entrambe le tipologie di provini, tozzi e snelli, sono emerse le seguenti valutazioni:

- i provini rettangolari, definiti snelli, sottoposti alla prova di compressione centrata sviluppano una resistenza al carico superiore del 40% rispetto ai provini quadrati; l'andamento delle curve di deformazione, mostra come i provini quadrati sviluppino

---

una capacità defomativa maggiore rispetto ai provini snelli, a discapito di valori di resistenza più bassi;

- la prova di compressione eccentrica eseguita su provini tozzi e su provini snelli, ha mostrato come i valori medi di resistenza alla compressione eccentrica siano simili per entrambi i provini in quanto i provini rettangolari raggiungono un carico massimo solo del 10% superiore rispetto ai provini quadrati; i provini tozzi esibiscono deformazioni di molto maggiori rispetto ai provini snelli.

È stata operata una ulteriore comparazione tra i risultati ottenuti in questa campagna sperimentale su provini TCS ed i risultati acquisiti dalla caratterizzazione sperimentale di pannelli sandwich della stessa tipologia prodotti dalla Schnell Home, armati con rete  $\phi 3$  e  $\phi 6$ . A tale scopo possono essere fatte le considerazioni seguenti:

- il confronto dei risultati appartenenti alla prova di compressione diagonale eseguita su provini quadrati, ha fatto emergere una capacità di resistenza al carico di compressione maggiore per i provini TCS, armati con rete  $\phi 5$ , pari a circa 450 kN: tale risultato mostra come le capacità di resistenza manifestate dai provini TCS si trovi a cavallo tra i valori medi raggiunti dai provini Schnell Home di tipo  $\phi 3$  e  $\phi 6$ ;
- il confronto dei risultati operato per la prova di compressione centrata effettuata su provini quadrati, ha mostrato come i provini Schnell con rete  $\phi 6$  raggiungano valori di carico massimo e di tensione di compressione, superiori rispetto ai provini TCS ma anche a quelli della stessa tipologia armati con rete  $\phi 3$ ;
- il confronto dei risultati ottenuti dalla prova di compressione centrata eseguita su pannelli rettangolari, ha evidenziato ottime capacità di resistenza al carico verticale dei provini TCS armati con rete  $\phi 5$ , in media pari a circa 1540 kN, quasi il doppio rispetto alle capacità di resistenza mostrate dai provini Schnell con rete  $\phi 3$  e maggiore del 30% rispetto ai provini con rete  $\phi 6$ ;
- il confronto dei risultati acquisiti dalla prova di compressione eccentrica eseguita su pannelli rettangolari, ha mostrato una netta superiorità dei provini TCS in termini di sopportazione del carico massimo eccentrico, pari a più del doppio rispetto ai provini Schnell armati con rete  $\phi 3$  e  $\phi 6$ .

---

## BIBLIOGRAFIA

Abbas A., Adil M., Ahmad N., Ahmad I., *Behavior of reinforced concrete sandwiched panels (RCSPs) under blast load*.

Angeli C., *Sistemi costruttivi a pareti portanti in cemento armato – ICF-Insulating Concrete Forms, Tipologie, caratteristiche, applicazioni, esempi di progetti, normative 2018*.

Benayoune A., Aziz A., Samad A., Trikha D.N., Abang Ali A.A., Ashraboov A.A. *Structural behavior of eccentrically loaded precast sandwich panels. Journal of Construction and Building Materials*, 2005.

*Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI 318-14, American Concrete Institute; 2014.

Bush T.D., Stine G.L. *Flexural behavior of composite precast concrete sandwich panels with continuous truss connectors. PCI Journal*, 1994.

Bush T.D., Wu Z. *Flexural analysis of prestressed concrete sandwich panels with truss connectors. PCI Journal*, 1998.

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*”.

CEN, Brussels, 2003 ACI 318-08, “*Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*”.

Ceccoli C., Mazzotti C., Savoia M., Dallavalle G., Perazzini G., Tomassoni F., “*Indagini sperimentali su una tipologia di pannelli in c.a. alleggeriti gettati in opera*”, Atti del XIV Congresso CTE, 2002.

Circolare Min.LL.PP. 11-08-1969 n°6090, “*Norme per il calcolo e la costruzione di strutture a grandi pannelli*”.

CNR 10025/98 – “*Istruzioni per il progetto, l'esecuzione ed il controllo delle strutture prefabbricate in Calcestruzzo*”.

Einea A., Salmon D.C., Fogarasi G.J., Culp T., Tadros M.K. *State-of-the-art of precast sandwich panel system. PCI Journal*, 1991.

Gara F., Ragni L., Roia D., Dezi L., *Experimental tests and numerical modelling of wall sandwich panels*, 2011.

Hidalgo P.A., Ledezma C.A., Jordan R.M., *Seismic Behavior of Squat Reinforced Concrete Shear Walls. Earthquake Spectra*, 2002.

Holmberg A., Palm E., *Behavior of load bearing sandwich type structures Handout 49, State institute for construction research Lund*, 1986.

---

Kabir M.Z., *Structural performance of 3D sandwich panels under shear and flexural loading*. *Scientia Iranica Journal*, 2005.

“Linee Guida per sistemi costruttivi a pannelli portanti basati sull’impiego di blocchi cassero e calcestruzzo debolmente armato gettato in opera”, approvate dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, con parere n.117 del 10.02.2011.

Meloy G., *Architectural Precast Concrete Wall Panels: Their Technological Evolution, Significance, and Preservation*, 2016.

NAHB Research Center, *Insulating concrete forms for residential construction: demonstration homes*, 1997.

N.H Abdul Hamidl, M. F Md Fudzee, *Seismic Performance of Insulated Sandwich Wall Panel (ISWP) Under In-plane Lateral Cyclic Loading*, 2013.

Norme Tecniche per le Costruzioni, *Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018*.

Norme Tecniche C.N.R. 14-12-1983 n° 10025/84. *Istruzioni per il progetto, l’esecuzione e il controllo delle strutture prefabbricate in conglomerato cementizio armato e per le strutture costruite con sistemi industrializzati*.

Pecce M., Bibbò Fabio A., Ceroni F., *Modellazione di pannelli in c.a. per il sistema a pareti debolmente armate*, Università degli Studi del Sannio, Benevento.

Pečur I.B., Milovanović B., Carević I., Alagušić M., *Precast sandwich panel – Innovative way of construction*, 2014.

PCI Committee on Precast Concrete Sandwich Wall Panels, *State of the art of precast/prestresses sandwich wall panels*. *PCI Journal*, 1997.

Precast/Prestressed Concrete Institute. *PCI Design Handbook—Precast and Prestressed Concrete*. Precast/Prestressed Concrete Institute, 2004.

Ricci I., Tesi di Dottorato “*Sistemi strutturali cellulari a pareti portanti in cemento armato gettato in opera realizzate con la tecnologia del pannello di supporto in polistirene*”, 2011.

RILEM TC 76-LUM, *Diagonal tensile strength tests of small wall specimens*, International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, System and Structures (RILEM), 1994.

Salmon D.C., Eiena A., Tadros M.K., Culp T.D., *Full scale testing of precast concrete sandwich panels*. *ACI Journal*, 1997.

Salonikios T.N., Kappos A.J., Tegos, I.A. and Penelis, G.G., *Cyclic load behavior of lowslenderness R/C walls: Design basis and test results*. *ACI Structural Journal*, 1999.

Salonikios T.N., Kappos A.J., Tegos I.A. and Penelis G.G., *Cyclic load behavior of low-slenderness R/C walls: Failure modes, strength and deformation analysis, and design implications*. *ACI Structural Journal*, 2000.

Sciotti A., *Pre-cast concrete walls: techniques and technologies for performance optimization*.

---

*Standard Test Method for Diagonal Tension in Masonry Assemblages*, ASTM E519/E519 M-15, ASTM International, 2015.

UNI EN 1052-1, "Metodi di prova per muratura - Determinazione della resistenza a compressione".

UNI EN 1991 – Eurocodice 2, "Progettazione delle strutture in calcestruzzo", Parte I: "Regole generali e regole per gli edifici".

Vanderwerf P. A., Feige S. J., Chammas P., Lemay L. A. *Insulating Concrete Forms for Residential Design and Construction*, 1997.

Vanderwerf P. A., Panushev I. S., Nicholson M., Kokonowski D. *Concrete Systems for Homes and Low-Rise Construction: A Portland Cement Association's Guide for Homes and Lo-Rise Buildings*, 2005.

Y.H. Mugahed Amran, A.A. Abang Ali, Raizal S.M. Rashid, Farzad Hejazi, Nor Azizi Safiee, *Structural behavior of axially loaded precast foamed concrete sandwich Panels*, 2015.