

## INDAGINE SPERIMENTALE SUL CONSOLIDAMENTO DEI SOLAI VARESE

**Rinforzo mediante la tecnica  
della soletta mista collaborante:**

- Calcestruzzi leggeri strutturali Leca.
- Microcalcestruzzo CentroStorico.
- Connettore CentroStorico Chimico.



# **INDAGINE SPERIMENTALE SUL CONSOLIDAMENTO DEI SOLAI VARESE**

**Rinforzo mediante la tecnica  
della soletta mista collaborante:**

- Calcestruzzi leggeri strutturali Leca.
- Microcalcestruzzo CentroStorico.
- Connettore CentroStorico Chimico.

*Le indagini sperimentali descritte in questo documento sono frutto dell'attività di ricerca condotta presso il Laboratorio prove materiali dell'Università degli Studi di Bergamo.*

*Gli esiti della sperimentazione hanno contribuito in maniera significativa alla migliore comprensione delle tecniche di rinforzo strutturale da applicare ai solai Varese.*



# INDICE

## INDAGINE SPERIMENTALE

---

	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>I</b>
	<b>INDAGINE SPERIMENTALE</b>	<b>1</b>
1	INTRODUZIONE	3
2	DESCRIZIONE DEI TRAVETTI	4
3	CAMPAGNA SPERIMENTALE PRELIMINARE SUI TRAVETTI	8
4	CAMPAGNA SPERIMENTALE PRELIMINARE SUI SOLAI	23
	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>82</b>
1	INTERVENTI DI RINFORZO ESTRADOSSALE SU SOLAI VARESE CON CARENZE DI NATURA FLESSIONALE.	83
2	INTERVENTI DI RINFORZO ESTRADOSSALE SU SOLAI VARESE CON CARENZE RELATIVE AL TAGLIO.	86
3	EFFICACIA DELLA CONNESSIONE MEDIANTE CONNETTORE CENTROSTORICO CHIMICO PER CREARE UNA SEZIONE COMPOSTA SU SOLAI TIPO VARESE IN ABBINAMENTO AL CALCESTRUZZO LEGGERO STRUTTURALE LECACLS 1400 E MICROCALCESTRUZZO CENTROSTORICO.	90



# INTRODUZIONE

I solai tipo “**Varese**” prendono il nome dagli omonimi travetti prefabbricati che, accoppiati a tavelloni superiori e inferiori (non sempre presenti) e relativa cappa integrativa di collegamento, creano questa tipologia costruttiva.

La nascita dei travetti Varese si colloca negli anni ‘30 con padre ideatore Carlo Gritti (cementista di Varese) il quale, sfruttando l’avvento delle costruzioni in calcestruzzo armato e volendo ovviare ai problemi di costo delle putrelle metalliche, decise di produrre elementi lineari in calcestruzzo.

Iniziò così a produrre e ottimizzare elementi prefabbricati partendo dalla forma a doppio T giungendo alla forma classica che tutti conosciamo, ovvero con nasello superiore con solco a serpentina per l’ingranamento della soletta gettata superiormente.



Tali tipologie di solaio venivano “dimensionati” utilizzando le tabelle dei produttori dell’epoca che ne fornivano altezze e interassi a seconda del fabbisogno di carico specifico del solaio che si stava andando a realizzare.

Con l’avvento delle nuove Norme Tecniche per la progettazione, la conoscenza e lo studio dei sistemi di costruzione sviluppatasi, sono emerse le criticità dei solai tipo Varese, tipologia largamente diffusa sul territorio per la loro praticità.

La snellezza dell’anima dell’elemento, lo scarso quantitativo di armatura longitudinale e le insufficienti “staffature” trasversali, fanno emergere criticità in ambito di verifica sia a **flessione** (positiva e negativa) che nei confronti delle sollecitazioni a **taglio**.

La sperimentazione Laterlite, riportata nella presente monografia tecnica, svoltasi in collaborazione con l’*Università degli studi di Bergamo*, ha l’obiettivo di porsi come guida alla comprensione dell’adeguamento e del miglioramento dei solai tipo Varese.

**PRINCIPALI TIPI DI VESPAI E SOLAI 8. E**  
 MANUALE DELL'ARCHITETTO. A CURA DEL CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE - PUBBLICATO DALL'UFFICIO INFORMAZIONI STATI UNITI

**SOLAIO "VARESE".** Parallela m 4.50 x 10.00  
 È costituito da travi sagomate in conglomerato a doppia armatura superiore. Ogni trave è formata da laterizio, travetto in doppia sezione (solito, pannello a camera d'aria), soletta in cemento di cm 3 che collega e completa tutto il sistema. Il tipo di soletta è in diretto dall'altezza in cm delle travi Varese rispetto per le travi speciali a doppia pendenza è indicata l'altezza al centro ed agli estremi. Le pose in opera delle travi e intonaci variabili a seconda della portata e del sovraccarico d'ambiente e quelle per i solai comuni con soletta in ferro.

**TABELLE DEI CARICHI ED ASSI CORRISPONDENTI SOLAI "VARESE" NORMALI**

SOVRACCARICO (kg/m²)	INTERASSI (cm)	Peso proprio del solaio (travi e soletta) con 3 sovraccarichi			
		19	21	24	27
150	100	159	162	165	169
200	90	142	148	155	162
250	80	146	153	160	171
300	73	143	151	165	177
350	65	153	162	172	181
400	57	159	169	180	191
450	50	165	177	189	201

**TABELLE DEI CARICHI ED ASSI CORRISPONDENTI SOLAI "VARESE" NORMALI**

SOVRACCARICO (kg/m²)	INTERASSI (cm)	MISURA TAVELLE			
		19	21	24	27
400	49	50	51	52	52 con 82 x 25 + 80
400	56	57	58	59	59
350	interasse	64	65	67	67
300	cm	72	73	75	75
250	(solo 1/2 e 1/3 delle travi)	79	80	82	82
200		89	90	92	92
150		98	100	102	102

**TABELLA DATI CARATTERISTICI DEI SOLAI "VARESE" NORMALI CON TAVELLE DA cm 4**

TIPO TRAVE	SOLETTA (cm)	h (cm)	s (cm)	s' (cm)	INTERASSI (cm)	LUCE NETTA MASSIMA (cm)
19	3	21	10	7	10	4.50
21	3	23	12	7	11	5.50
24	3	26	15	7	12	6.50
27	3	29	18	7	13	7.50
34	3	36	25	7	13	9.00

**TABELLA DATI CARATTERISTICI DEI SOLAI "VARESE" A DOPPIA PENDENZA CON TAVELLONI DA cm 7**

TIPO TRAVE	SOLETTA (cm)	h (cm)	s (cm)	s' (cm)	INTERASSI (cm)	LUCE NETTA MASSIMA (cm)
36/27	5	39	20	12	13	10.00
40/32	5	47	26	12	15	12.00

**PARTICOLARI DI EVENTUALI SPEZZIONI AGGIUNTI AGLI ESTREMI DELLE TRAVI IN ALTO ALLA SOLETTA**



**UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI BERGAMO**

*Centro di Servizio di Ateneo Laboratori di Ingegneria*

## **Laboratorio Prove Materiali**

*via Galvani 2, 24044 Dalmine (BG)  
Tel. 035.2052347/383/339 - Fax 035.2052090  
P.IVA 01612800167 C.F.80004350163*

### ***Prove di caratterizzazione della resistenza e delle differenti modalità di rinforzo per solai di tipo Varese***

***Committente: Laterlite S.p.A.***

Nostra offerta prot N. 125740/III/19 del 04-7-2023

**Certificato n. 980**

**Dalmine, 22 novembre 2023**

**Il direttore del laboratorio**

*Prof. Ing. Paolo Riva*

**Il collaboratore**

*Ing. Marco Bosio*

**I Tecnici di Laboratorio**

*Daniele Di Marco*

*Luca Gritti*

**INDICE**

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>DESCRIZIONE DEI TRAVETTI .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>CAMPAGNA SPERIMENTALE PRELIMINARE SUI TRAVETTI .....</b>	<b>8</b>
	3.1 Setup di prova .....	8
	3.2 Strumentazione e procedura di prova .....	9
	3.3 Risultati delle prove sperimentali .....	10
	3.3.1 Prova monotona sul travetto da 2.25m (T1) .....	10
	3.3.2 Prova ciclica sul travetto da 2.25m (T2) .....	14
	3.3.3 Prova monotona sul travetto da 4.25m (T3) .....	16
	3.3.4 Prova ciclica sul travetto da 4.25m (T4) .....	19
	3.3.5 Riepilogo dei risultati .....	22
<b>4</b>	<b>CAMPAGNA SPERIMENTALE PRELIMINARE SUI SOLAI .....</b>	<b>23</b>
	4.1 Setup di prova .....	23
	4.2 Strumentazione e procedura di prova .....	25
	4.3 Presentazione dei risultati e analisi dei dati .....	28
	4.4 Risultati delle prove sperimentali .....	29
	4.4.1 Prove eseguite sui materiali base .....	29
	4.4.2 S1 -Solaio non rinforzato, L=2.00 m (prova in 4 punti) .....	33
	4.4.3 S2 -Solaio rinforzato con LECACLS 1400, L=2.00 m (prova in 4 punti) .....	37
	4.4.4 S3 - Solaio rinforzato con MICROCALCESTRUZZO CENTROSTORICO, L=2.25 m (prova in 4 punti) .....	43
	4.4.5 S4 - Solaio rinforzato con LECACLS 1400, L=4.25 m (prova in 4 punti) .....	48
	4.4.6 S5 -Solaio non rinforzato, L=2.25 m (prova in 3 punti) .....	54
	4.4.7 S6 -Solaio rinforzato con LECACLS 1400, L=2.25 m (prova in 3 punti) .....	60
	4.4.8 S7 - Solaio rinforzato con MICROCALCESTRUZZO CENTROSTORICO, L=2.25 m (prova in 3 punti) .....	65
	4.4.9 S8 - Solaio rinforzato con LECACLS 1400, L=4.00 m (prova in 3 punti) .....	71

## 1 INTRODUZIONE

Nel presente documento vengono mostrati i risultati della campagna di prove eseguite per la caratterizzazione della resistenza di solai di tipo Varese. In particolare, grazie alla disponibilità di travetti originali trovati dal committente in un magazzino, si è deciso di realizzare e successivamente testare a rottura diverse configurazioni di solaio con prove di flessione a 3 o 4 punti.

Oltre alle prove sui travetti singoli, utilizzate per calibrare la campagna sperimentale, si è deciso di realizzare 2 solai da circa 2 m, costituiti da tre travetti, tavole e una cappa di completamento di circa 2.5 cm per mantenere uniti tra loro i travetti. Tali solai vengono considerati come condizione base per simulare la risposta di un solaio esistente. Vista la disponibilità dei travetti, è stato successivamente possibile realizzare altri 4 solai da circa 2 m su cui sono stati realizzati due differenti tipologie di rinforzo, una realizzata con una cappa collaborante da 30 mm realizzata con il prodotto MICROCALCESTRUZZO CENTROSTORICO e fissata con il CONNETTORE CHIMICO CENTROSTORICO, mentre l'altra prevede la realizzazione di una cappa da 50 mm realizzata con LECACLS 1400: CALCESTRUZZO LEGGERO STRUTTURALE anch'essa fissata con il CONNETTORE CHIMICO CENTROSTORICO; con quest'ultima tecnica sono inoltre stati rinforzati anche 2 solai dalla lunghezza di circa 4 m, per quest'ultima soluzione si evidenzia come all'interno della cappa sia posizionata una rete elettrosaldata maglia 200x200 caratterizzata da un diametro  $\phi 5$ .

Di seguito, in Tabella 1, viene riportato l'elenco completo di tutte le prove condotte all'interno della campagna sperimentale.

*Tabella 1 Elenco delle prove condotte nella campagna sperimentale*

Test	Elemento	Rinforzo	Prova	flessione in
T1	Travetto 2.25m	No	Monotona	4 punti
T2	Travetto 2.25m	No	Ciclica	4 punti
T3	Travetto 4.25m	No	Monotona	4 punti
T4	Travetto 4.25m	No	Ciclica	4 punti
S1	Solaio 2.00 m	No	Ciclica	4 punti
S2	Solaio 2.00 m	LECACLS1400	Ciclica	4 punti
S3	Solaio 2.25 m	MICRO CLS CENTROSTORICO	Ciclica	4 punti
S4	Solaio 4.25 m	LECACLS1400	Ciclica	4 punti
S5	Solaio 2.25 m	No	Ciclica	3 punti
S6	Solaio 2.25 m	LECACLS1400	Ciclica	3 punti
S7	Solaio 2.25 m	MICRO CLS CENTROSTORICO	Ciclica	3 punti
S8	Solaio 4.00 m	LECACLS1400	Ciclica	3 punti

## 2 DESCRIZIONE DEI TRAVETTI

Come precedentemente detto, la campagna sperimentale oggetto di questo report è stata possibile grazie al ritrovamento da parte del committente di alcuni travetti ormai in disuso, rinvenuti presso un magazzino edile. Durante il tempo di giacenza in magazzino, i travetti non sono mai stati protetti dagli agenti atmosferici, per questo motivo si trovano in uno stato di conservazione precario. Oltre alla nascita di muschi e materiale biologico in superficie molti di questi travetti presentano già un significativo quadro fessurativo con importanti espulsioni di copriferro in prossimità delle armature, causate della corrosione dei ferri. Questo, unito ad una demolizione accurata dei travetti a seguito delle prove, ci ha consentito di poter ricostruire in modo affidabile le caratteristiche geometriche della sezione. Di seguito vengono riportati i prospetti e le sezioni principali dei travetti testati.

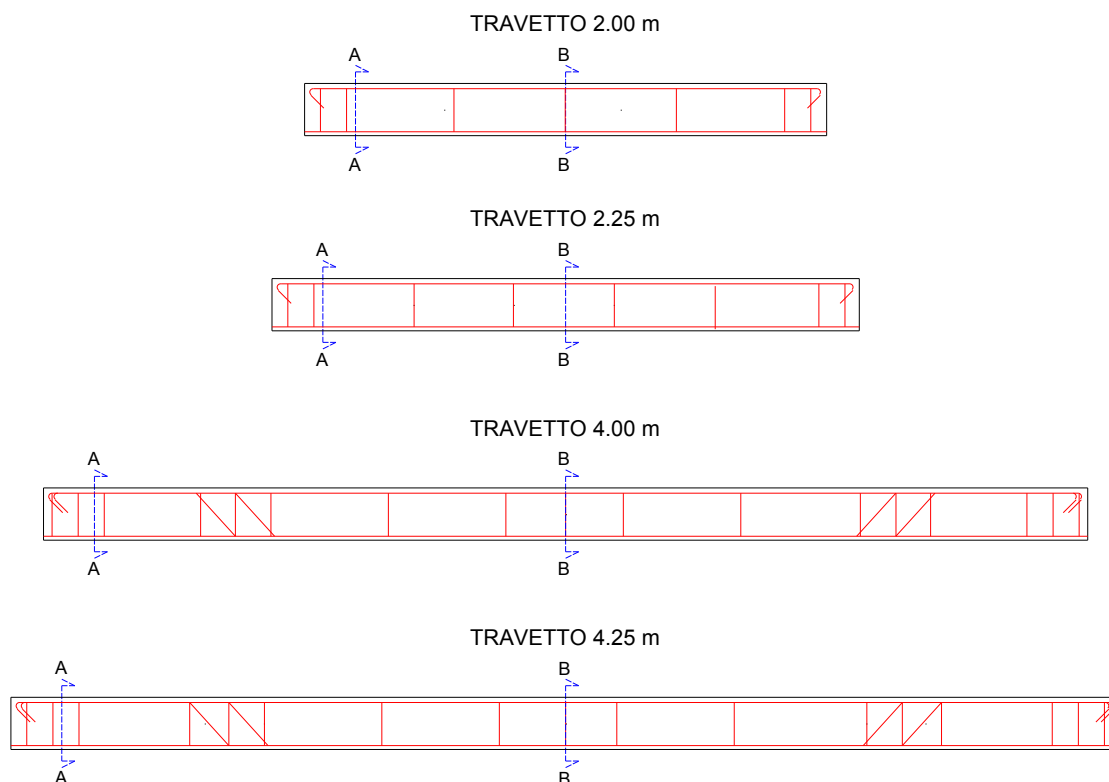


Figura 1 Vista laterale dei travetti testati

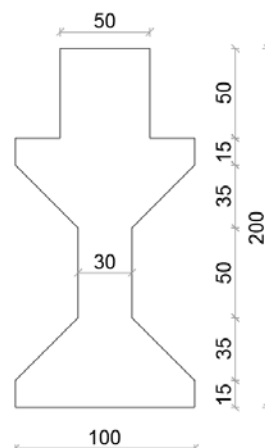


Figura 2 Sezione quotata di tutte e quattro le tipologie di travetto

	Sezione A-A	Sezione B-B
Travetto 2.00 m	<p>1φ8</p> <p>2φ8</p>	<p>1φ8</p> <p>2φ8</p>
Travetto 2.25 m	<p>1φ8</p> <p>2φ8</p>	<p>1φ8</p> <p>2φ8</p>
Travetto 4.00 m	<p>3φ8</p> <p>1φ8 + 1φ10</p>	<p>1φ8</p> <p>2φ8 + 1φ10</p>
Travetto 4.25 m	<p>3φ8</p> <p>2φ10</p>	<p>1φ8</p> <p>2φ10 + 1φ8</p>





*Figura 3 Dettaglio dell'uncino di collegamento tra l'armatura superiore e inferiore*



*Figura 4 Particolare dell'armatura inferiore del travetto da 4.25 m*



*Figura 5 Particolare dell'armatura inferiore del travetto da 4.25 m*



*Figura 6 Particolare dell'armatura inferiore del travetto da 4.25 m*



*Figura 7 Particolare dell'armatura inferiore del travetto da 4.00 m*



*Figura 8 Particolare dell'armatura inferiore del travetto da 4.00 m*





*Figura 9 Particolare dell'armatura inferiore del travetto da 4.00 m*



*Figura 10 Dettaglio dell'armatura all'estremità dei travetti*



*Figura 11 Particolare dell'armatura superiore dei travetti lunghi*



*Figura 12 Particolare dell'armatura superiore dei travetti lunghi*



*Figura 13 Dettaglio dell'armatura inclinata nei travetti lunghi*

### 3 CAMPAGNA SPERIMENTALE PRELIMINARE SUI TRAVETTI

Le prove sui travetti vengono condotte su 4 travetti tipo Varese, due caratterizzati dalla lunghezza di 4.25 m e due caratterizzati dalla lunghezza di 2.25 m. Lo scopo di questi test è valutare le reali prestazioni dei travetti, date le incertezze legate alla geometria dell'armatura resistente (individuata con certezza solo a fine prova) e allo stato di degrado generale dei travetti, viste le pessime condizioni di conservazione degli stessi. Si evidenzia infatti come questi ultimi prima di essere ritirati dal committente fossero "abbandonati" in un magazzino e non protetti in alcun modo dagli agenti atmosferici. Per questo motivo la maggior parte dei travetti si presenta con un'importante quadro fessurativo, con espulsione di copriferro a causa dell'eccessiva corrosione delle barre d'armatura.

#### 3.1 Setup di prova

Tutte le prove effettuate hanno utilizzato lo stesso setup, in particolare viene eseguita una prova di flessione in 4 punti, come si può osservare nello schema riportato in Figura 14, con l'applicazione del carico caratterizzata da una distanza dalla mezzzeria di 0.5 m (1 metro di distanza totale tra i punti di applicazione del carico). L'appoggio viene posizionato a 1.50 m (dal punto di applicazione del carico) nel caso di travetti da 4.25 m e 0.5 m per i travetti più piccoli. L'obiettivo di questo setup di prova è quello di mandare in crisi per flessione i travetti lunghi e a taglio i travetti più corti. L'applicazione del carico viene effettuata mediante un martinetto elettromeccanico caratterizzato da una corsa di 500 mm ed una capacità in forza di 1000 kN. Al di sotto del martinetto viene montata una cella di carico dotata di snodo sferico e una trave di ripartizione del carico rigida. Il carico viene trasmesso al travetto mediante i perni di due forcelle. In questo modo le forcelle sono in grado di assolvere sia il compito di trasmettere il carico attraverso una superficie cilindrica che di vincolare l'eventuale instabilità flessio-torsionale del travetto vincolando gli spostamenti fuori piano dello stesso. I punti di appoggio, posizionati a circa 0.125 m dalle estremità del travetto vengono realizzati da un lato attraverso un semicilindro (vincolo di cerniera) e dal lato opposto attraverso un vincolo di carrello realizzato con un cilindro. Una serie di profili metallici viene impilata al di sotto degli appoggi per recuperare la distanza tra il punto di applicazione del carico ed il pavimento del laboratorio. Nelle figure seguenti è possibile osservare il setup di prova utilizzato.

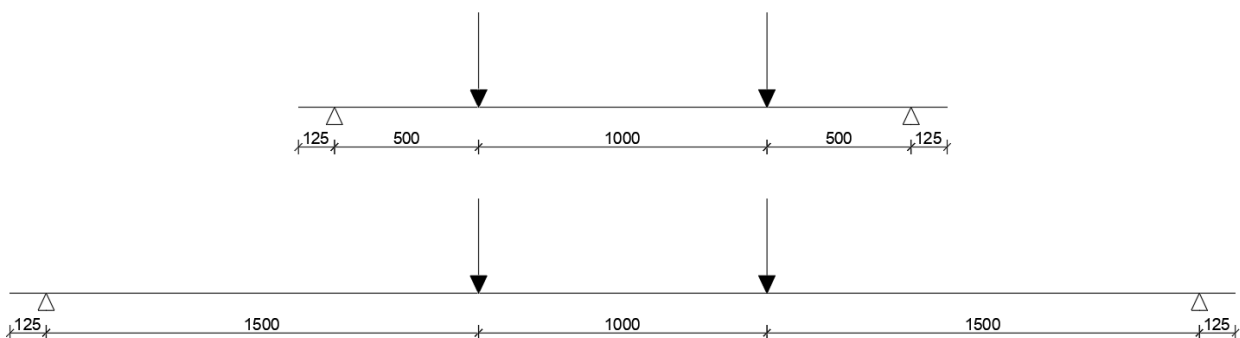
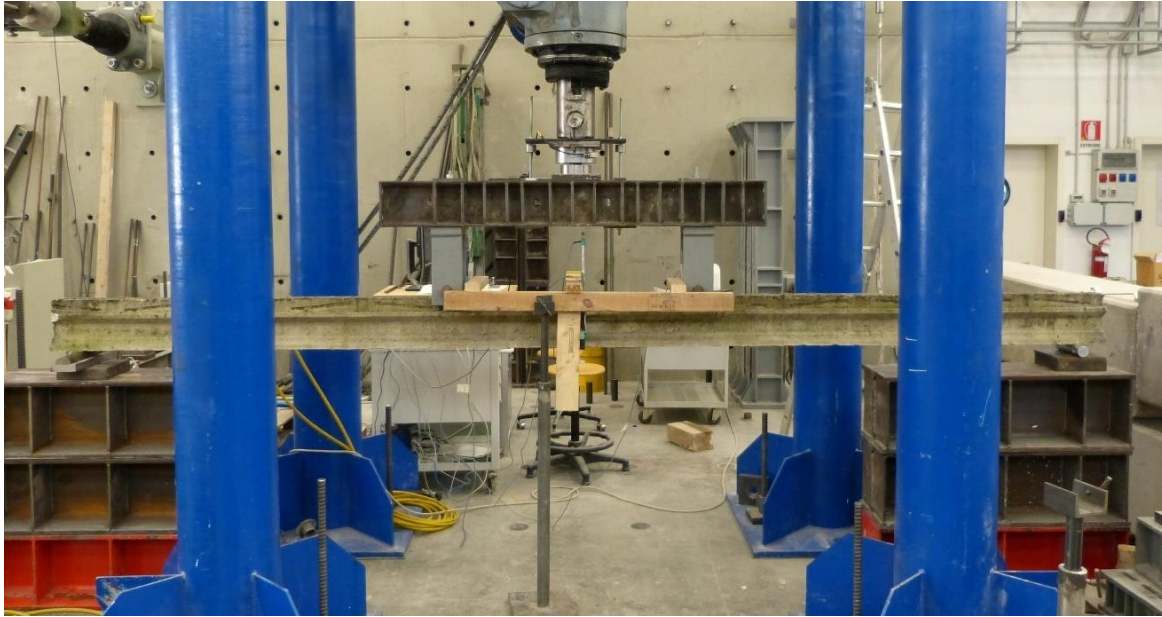


Figura 14 Schema statico di prova per i test a taglio (in alto) e a flessione (in basso)





*Figura 15 Vista generale del setup di prova*



*Figura 16 Vista di dettaglio dei punti di applicazione del carico*



*Figura 17 Vista di dettaglio dei punti d'appoggio cerniera (a sinistra) e carrello (a destra)*

### 3.2 Strumentazione e procedura di prova

Dal punto di vista della strumentazione si è deciso di monitorare il carico, sfruttando la cella di carico utilizzata anche per creare lo nodo sferico e di misurare l'abbassamento in mezzeria e in prossimità del punto di applicazione del carico. Di seguito si può osservare il dettaglio della strumentazione.



Figura 18 Dettaglio della strumentazione utilizzata

Essendo disponibili due coppie di travetti nominalmente uguali si è deciso di procedere con una prima prova monotona imponendo un abbassamento della traversa mobile alla velocità di 0.1 mm/s. Successivamente, il secondo travetto viene sollecitato con una prova ciclica tarata sui risultati della prova monotona, in particolare per il travetto da 4.25 m vengono eseguiti tre cicli a 10, 20 e 40 mm di abbassamento in mezzeria (rispettivamente  $L/400$ ,  $L/200$  e  $L/100$ , con  $L$  luce della trave) per poi portare il travetto a rottura, per questa tipologia di prova la velocità di spostamento è stata incrementata a 0.2 mm/s. Per il travetto da 2.25 m si è invece deciso di procedere con 3 cicli a 2, 4 e 8 mm di spostamento per poi portare il campione a rottura. In questo caso, vista la corsa ridotta, si è deciso di riportare la velocità a 0.1 mm/s. Le prove cicliche vengono pertanto condotte in controllo di spostamento (facendo riferimento al sensore posto in mezzeria) nella fase di carico, mentre la fase di scarico viene interrotta quando il valore letto dalla cella di carico si annulla, ciò non significa che il campione sia completamente scarico in quanto continuano a gravare sul travetto il peso della trave di ripartizione del carico, installata a valle della cella. Tale carico non può essere misurato dalla cella, ma viene sommato analiticamente in fase di elaborazione dati dopo aver pesato la trave (1.6 kN).

### 3.3 Risultati delle prove sperimentali

#### 3.3.1 Prova monotona sul travetto da 2.25 m (T1)

##### *Condizioni del campione prima della prova*

Il campione si presenta fortemente ammalorato sia dal punto di vista del calcestruzzo che dal punto di vista dell'acciaio. Sulla superficie del travetto sono presenti in grande quantità muschio e vegetazione. La parte più danneggiata è rappresentata dall'intradosso del travetto in prossimità della mezzeria dove c'è un'importante espulsione di copriferro con i ferri a vista. In generale, su tutto il travetto si denota un importante quadro fessurativo. In Figura 20 e Figura 20 è possibile osservare le condizioni del travetto prima dell'esecuzione della prova.





*Figura 19 Dettaglio dell'espulsione di copriferro in mezzeria del travetto*



*Figura 20 Condizioni del travetto prima dell'esecuzione della prova*

#### *Risultati delle prove sperimentali*

In Figura 21 è possibile osservare il grafico forza-spostamento del travetto. Si evidenzia una modalità di collasso fragile, infatti il carico di picco a 23.79 kN (5.94 kNm) viene raggiunto per un valore di spostamento di 11.51 mm, senza registrare alcun tipo di deformazione plastica. Raggiunto tale valore si evidenzia una perdita di carico di circa 17 kN, senza nessun incremento successivo. Il comportamento quasi elastico fino a rottura viene evidenziato in Figura 22 dove vengono mostrati i valori di abbassamento non solo del sensore centrale ma anche quelli posti in corrispondenza dei punti di applicazione del carico.

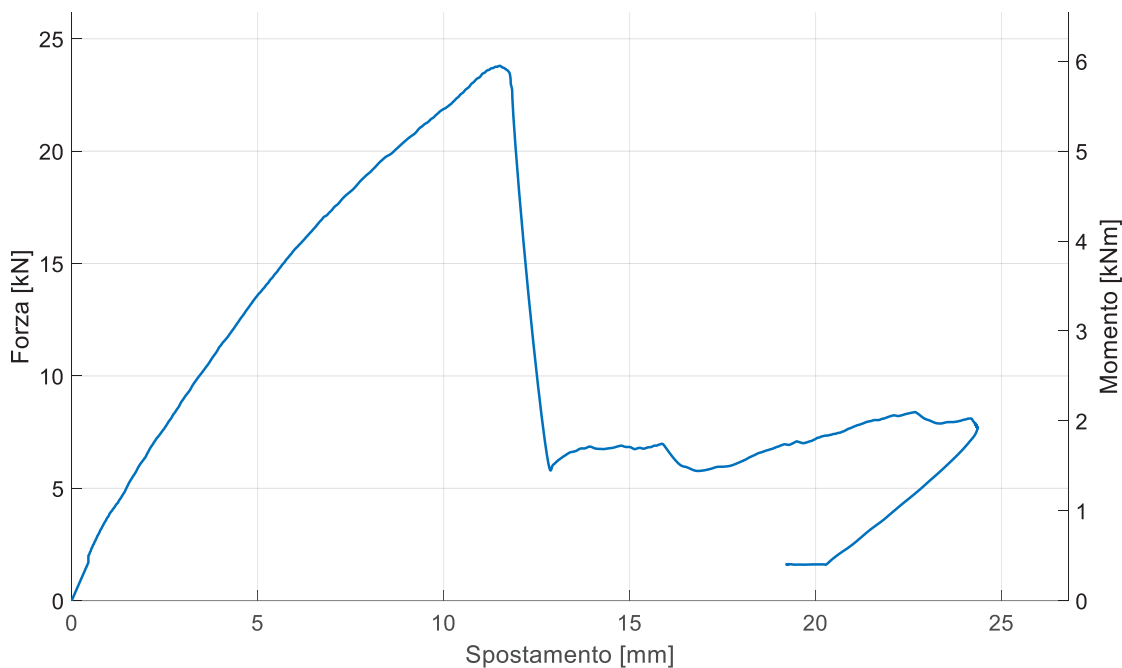


Figura 21 Curva forza spostamento in mezzeria dell'intera prova

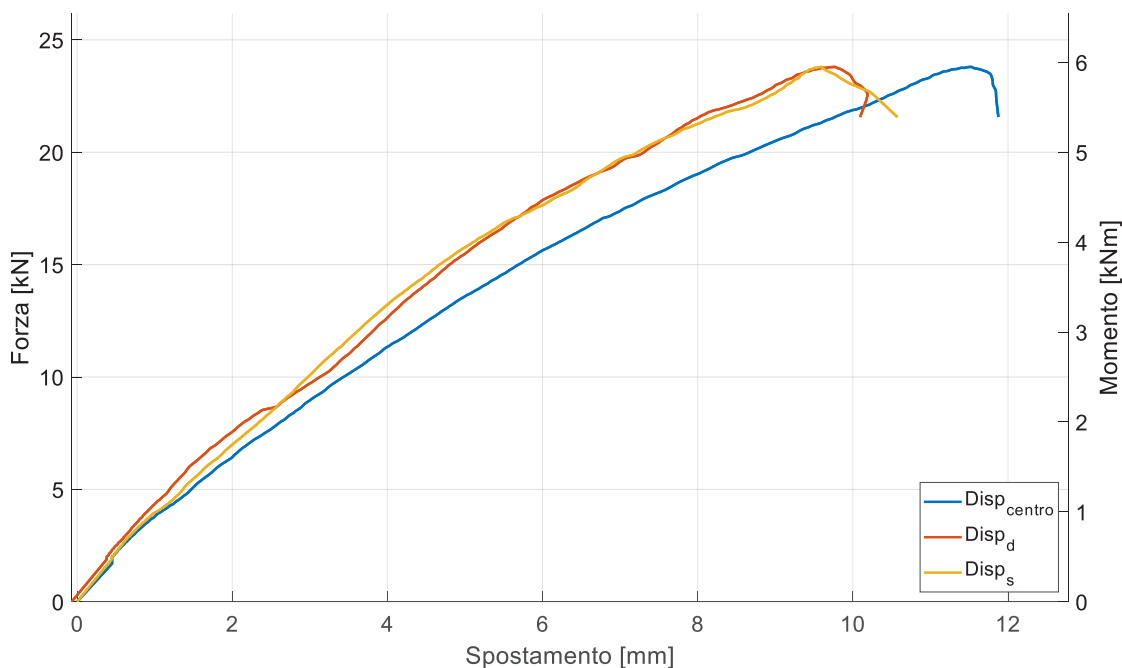


Figura 22 Curva forza spostamento fino al raggiungimento del carico di picco

In Figura 25 vengono mostrate le foto del travetto in seguito alla prova condotta. Si evidenzia un'importante fessura diagonale in prossimità del punto di applicazione del carico, formatasi al momento della perdita di carico. Proseguendo il test fino allo spostamento di circa 25 mm, il carico resistente viene generato esclusivamente dall'effetto spinotto delle barre d'armatura longitudinali.



*Figura 23 Dettaglio della rottura a taglio in prossimità del vincolo di carrello*



*Figura 24 Dettaglio della rottura a fine prova su entrambi i lati del travetto*



*Figura 25 Condizioni del travetto dopo la prova di flessione*



### 3.3.2 Prova ciclica sul travetto da 2.25m (T2)

#### *Condizioni del campione prima della prova*

In questo caso il travetto sembra apparentemente ben conservato ad esclusione di uno dei due appoggi in prossimità del vincolo di cerniera. Tuttavia, la parte ammalorata risulta essere esterna all'area oggetto del test. È invece presente una fessura longitudinale, probabilmente provocata dalla corrosione dell'armatura posizionata all'estradosso. Le condizioni del travetto, con particolare riferimento alla fessura sono osservabili in Figura 26.



Figura 26 Particolare della fessura longitudinale all'estradosso del travetto

#### *Risultati delle prove sperimentali*

In Figura 27 è possibile osservare la curva forza spostamento della prova condotta. In questo caso si evidenzia come al termine della fase di scarico vi sia un residuo crescente che tuttavia rimane costante nella ripetizione dei cicli caratterizzati dallo stesso spostamento. Questo è probabilmente legato a fenomeni di danneggiamento del calcestruzzo già ammalorato che, con il primo ciclo tende a danneggiarsi mentre non si propagano con le ripetizioni dei cicli; tuttavia, si registra un carico leggermente inferiore rispetto ai cicli precedenti. La rottura, come nel caso precedente avviene in assenza di plasticizzazione delle armature per uno spostamento inferiore rispetto alla prova monotona (8.81 mm) pur registrando un carico molto simile a quello precedente pari a 22.96kN. (5.74 kNm). L'assenza di plasticizzazione dell'armatura la si osserva nel grafico riportato in Figura 28, dove si evidenzia come il comportamento sia praticamente lineare a meno dei fenomeni di degrado del calcestruzzo.

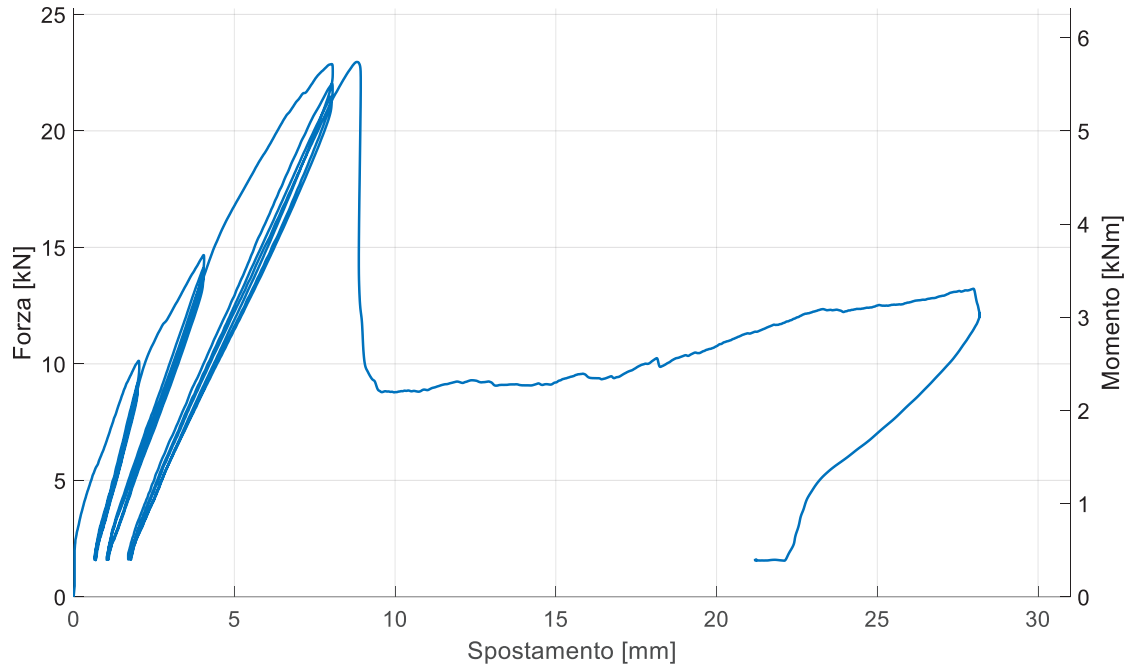


Figura 27 Curva forza spostamento in mezzeria dell'intera prova

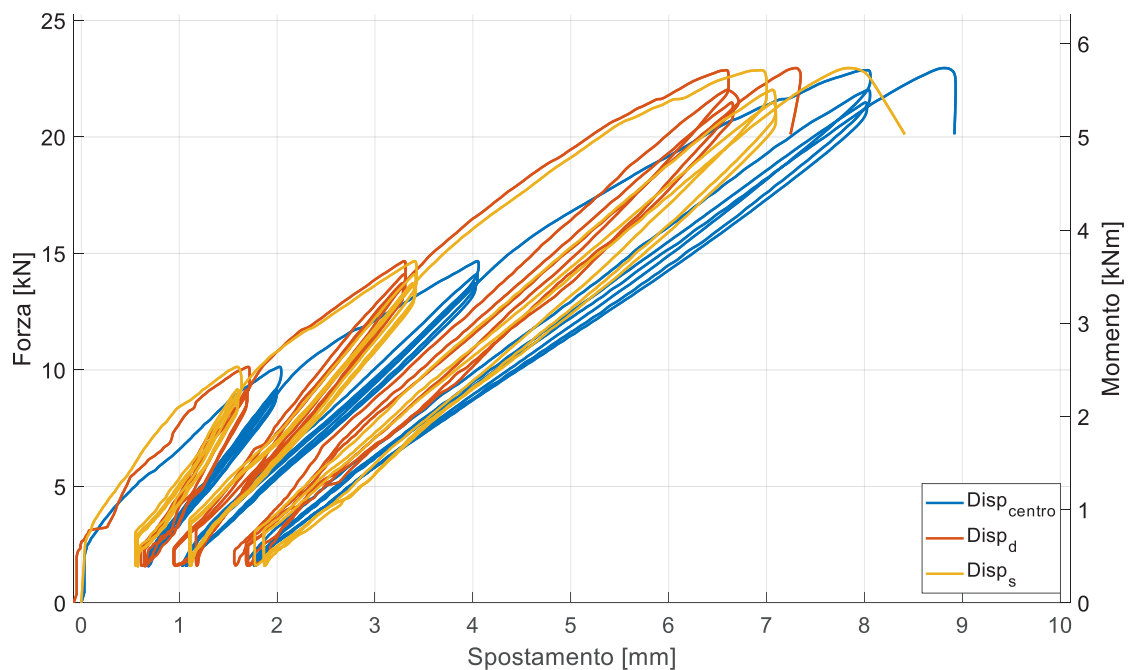


Figura 28 Curva forza spostamento fino al raggiungimento del carico di picco

In Figura 31 vengono mostrate le foto dei travetti dopo la prova effettuata, come nel caso precedente il comportamento del travetto dopo la rottura vede aprirsi la fessura diagonale in corrispondenza del punto di applicazione del carico mantenendo un carico pseudo costante di entità superiore rispetto al precedente. Questo è probabilmente dovuto alla miglior qualità del travetto rispetto a quello utilizzato nella prova monotona. Oltre alla formazione della fessura si osserva anche un'importante espulsione di copriferro a causa dell'effetto spinotto generate dalle barre longitudinali.



*Figura 29 Dettaglio della fessurazione diagonale del travetto nelle due facce*



*Figura 30 Dettaglio della fessurazione diagonale del travetto con evidente deformazione plastica della barra superiore ed espulsione di copriferro all'intradosso*



*Figura 31 Condizioni del travetto dopo la prova di flessione in 4 punti*

### 3.3.3 Prova monotona sul travetto da 4.25m (T3)

#### *Condizioni del campione prima della prova*

In questo caso il travetto si presenta ammalorato sia dal punto di vista del calcestruzzo sia dal punto di vista dell'acciaio. È presente un importante quadro fessurativo su tutto il travetto provocato probabilmente dalla corrosione dell'armatura del travetto e dalle condizioni di conservazione dello stesso. In prossimità della mezzeria si registra anche un'importante espulsione di copriferro che lascia le barre longitudinali a vista. In Figura 32 e Figura 33 vengono mostrate le immagini delle condizioni del travetto prima di effettuare il test.





Figura 32 Condizioni del travetto prima della prova di flessione, con dettaglio dell'espulsione di copriferro in mezzeria



Figura 33 Condizioni del travetto prima della prova di flessione, con dettaglio del quadro fessurativo all'intradosso del travetto

#### Risultati delle prove sperimentali

In Figura 34 è possibile osservare la curva forza spostamento (con i valori di forza leggibili sull'asse di sinistra) e la curva momento spostamento (con i valori del momento resistente leggibili sull'asse di destra) della prova condotta, in questo caso si evidenzia come raggiunto il valore di carico pari a 20.11 kN (15.08 kNm) in corrispondenza di uno spostamento di circa 51.3 mm si ha un breve (circa 5 mm) tratto plastico prima di perdere progressivamente carico. È interessante osservare come, da una rapida stima, considerando una tensione di snervamento dell'acciaio pari a 450 MPa, un'altezza utile di 180 mm e trascurando l'armatura in zona compressa il momento resistente risulta essere pari a 15.1 kNm, molto prossimo al valore ottenuto in fase sperimentale. Questo, unito alla modalità di perdita del carico molto meno rapida rispetto a quanto visto con le prove precedenti, ci consente di affermare che la plasticizzazione delle barre in zona tesa è stata raggiunta. Tuttavia, si evidenzia come il meccanismo di collasso continui a risultare fragile a causa dell'instabilità dell'armatura superiore. Considerazioni molto simili possono essere fatte dal grafico riportato in Figura 35 dove non è possibile osservare tutta la completa storia di spostamento del travetto per gli strumenti in prossimità del punto di carico a causa dei limiti di corsa degli strumenti stessi.

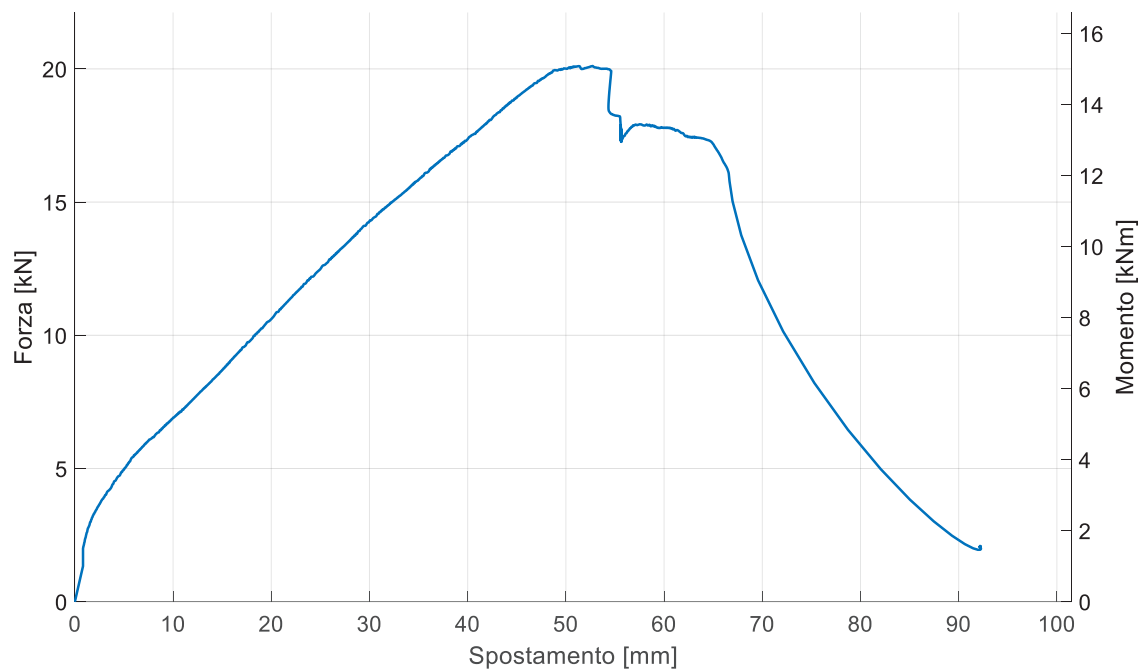


Figura 34 Curva forza spostamento e momento spostamento in mezzeria dell'intera prova

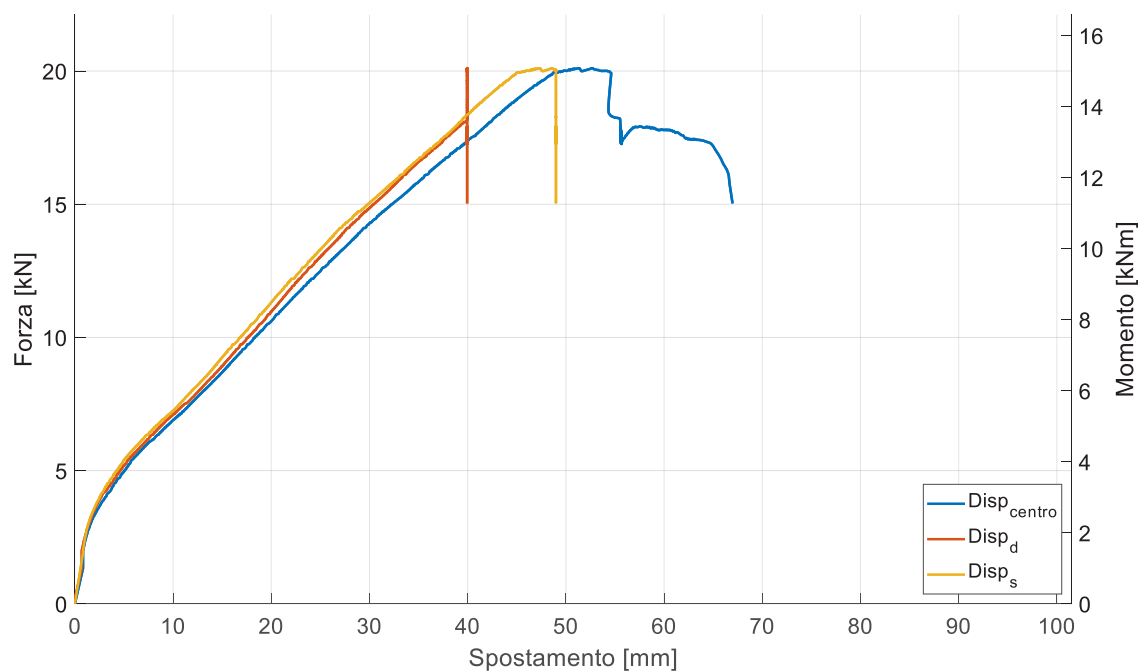


Figura 35 Curva forza spostamento e momento spostamento fino al raggiungimento del carico di picco

Da Figura 36 a Figura 38 vengono mostrate le foto dei travetti dopo la prova effettuata, in questo caso si osserva come la parte centrale del travetto sottoposta a momento costante presenta tutta la parte all'intradosso fessurata con lesioni tipiche di una crisi per flessione. Tuttavia, l'entità delle fessure rimane limitata poiché poco dopo aver raggiunto il valore di snervamento il collasso sopraggiunge per instabilità dell'armatura superiore.





Figura 36 Dettaglio del quadro fessurativo a fine prova

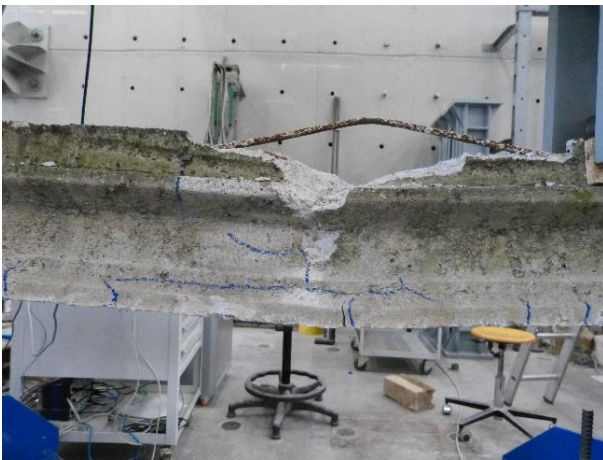


Figura 37 Dettaglio dell'espulsione del copriferro all'estradosso con instabilità della barra



Figura 38 Condizioni del travetto dopo la prova di flessione

### 3.3.4 Prova ciclica sul travetto da 4.25m (T4)

#### Condizioni del campione prima della prova

In questo caso il campione si presenta ammalorato sia dal punto di vista del calcestruzzo che dal punto di vista dell'acciaio. Non è presente alcun tipo di espulsione di copriferro, tuttavia si denota un importante quadro fessurativo parallelo al travetto (molto probabilmente legato a problemi di durabilità). In Figura 39 e Figura 40 vengono mostrate le immagini delle condizioni del travetto prima di effettuare il test.



*Figura 39 Condizione del travetto prima di eseguire la prova*



*Figura 40 Condizioni del travetto prima della prova di flessione, con dettaglio della fessurazione longitudinale*

#### *Risultati delle prove sperimentali*

In Figura 41 è possibile osservare la curva forza spostamento e la curva momento spostamento della prova condotta. Come nel caso della prova ciclica precedente, riportata al capitolo 3.3.2, si osserva come nelle fasi di scarico ad ogni tripletta si registra uno spostamento residuo via via crescente, che tuttavia rimane costante al ripetersi dei cicli di pari entità. È inoltre interessante osservare come si abbia un primo cedimento al secondo ciclo della tripletta a 40mm di spostamento. In particolare, tra il primo ed il secondo ciclo a spostamento massimo si evidenzia una perdita di carico di circa 2 kN. Il carico massimo viene invece raggiunto successivamente con uno spostamento di 49.4 mm (18.26 kN corrispondenti a 13.69 kNm). Anche in questo caso il collasso avviene per crisi a compressione del calcestruzzo con successiva instabilità dell'armatura superiore senza aver plasticizzato completamente l'armatura tesa. Si osserva infatti come il collasso avvenga in prossimità del punto di applicazione del carico nel momento in cui la curva cambia pendenza e tende ad appiattirsi. In Figura 42 è possibile osservare lo stesso fenomeno fino al raggiungimento del carico massimo per tutti gli strumenti installati sul travetto.



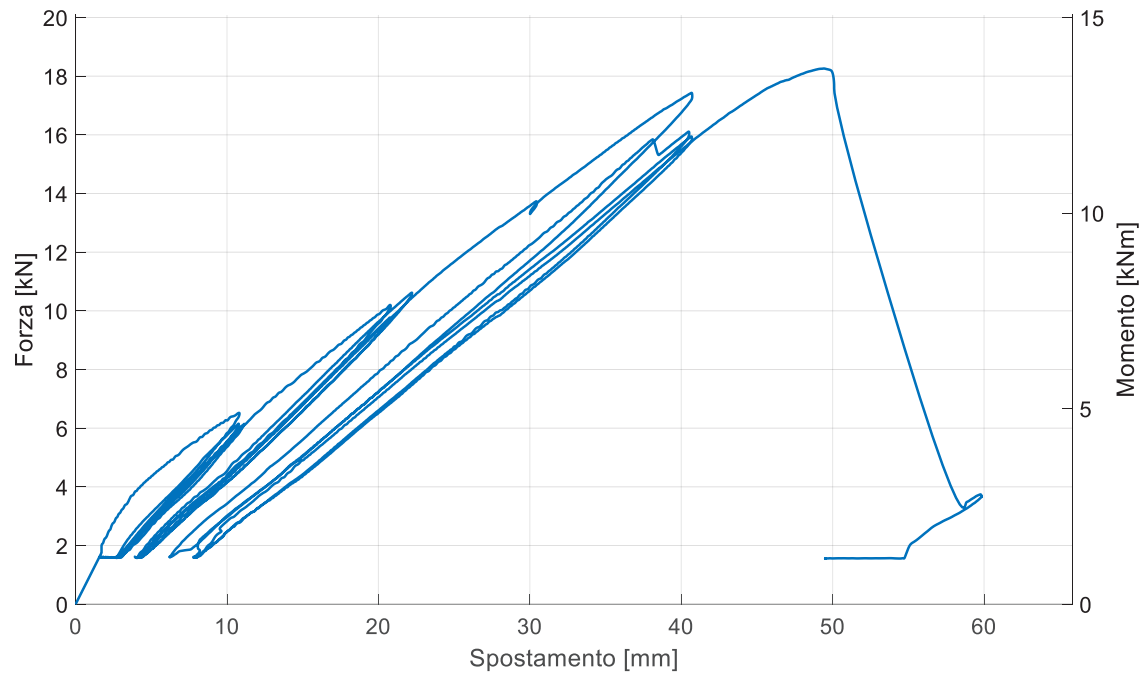


Figura 41 Curva forza spostamento e momento spostamento in mezzeria dell'intera prova

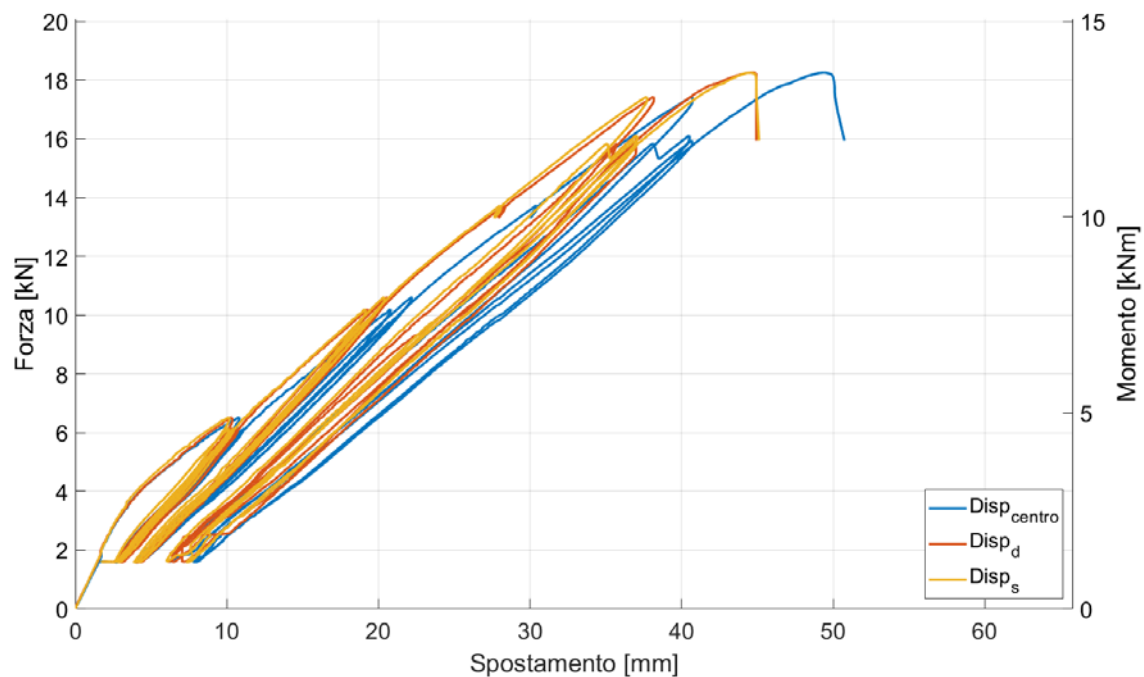


Figura 42 Curva forza spostamento e momento spostamento fino al raggiungimento del carico di picco

In Figura 43 e Figura 44 vengono mostrate le foto dei travetti dopo la prova effettuata, è evidente come la rottura a compressione della parte superiore del calcestruzzo abbia portato ad una crisi per instabilità della barra d'armatura. Dal punto di vista della fessurazione si evidenzia qualche fessura diagonale e in prossimità del punto di applicazione del carico qualche fessura tipica delle rotture a flessione





Figura 43 Condizioni dei travetti a fine test con dettaglio dell'instabilità del corrente superiore



Figura 44 Condizioni del travetto dopo la prova di flessione

### 3.3.5 Riepilogo dei risultati

In Tabella 2 viene riportato il riepilogo dei risultati in termini di prestazioni a collasso dei travetti testati.

Tabella 2 Riepilogo dei risultati delle prove condotte sui travetti

Lunghezza Travetto [m]	Luce appoggi [m]	Distanza punti di carico [m]	Tipo di prova	Carico Massimo [kN]	Momento Massimo [kNm]	Taglio Massimo [kN]	Spostamento a collasso [mm]
2.25	2.00	1.00	Monotona	23.79	5.95	11.90	11.52
2.25	2.00	1.00	Ciclica	22.96	5.74	11.48	8.80
4.25	4.00	1.00	Monotona	21.10	15.08	10.05	52.72
4.25	4.00	1.00	Ciclica	18.26	13.69	9.13	49.42

In generale si osserva una riduzione di resistenza nelle prove cicliche rispetto alle prove monotone.

Si osserva inoltre come in generale le modalità di collasso siano differenti tra le due tipologie di prove. Nel caso di travetti da 2.25 m si ha un collasso per crisi a taglio in prossimità del punto di applicazione del carico con fessura diagonale. Dalla tabella si osserva come in entrambe le prove si riscontri il massimo valore di taglio sollecitante. Viceversa i travetti da 4.25 m evidenziano un collasso che avviene per crisi a compressione del calcestruzzo con instabilità del corrente superiore nel tratto sollecitato a momento costante, in questo caso si evidenzia il massimo momento sollecitante di tutte le prove, molto vicino al momento resistete stimato con formulazioni analitiche.

Nonostante il differente stato di conservazione dei travetti si può tuttavia osservare come i valori di collasso risultino essere abbastanza omogenei tra di loro, sia in termini di carico che di spostamento.

## 4 CAMPAGNA SPERIMENTALE PRELIMINARE SUI SOLAI

Dopo aver caratterizzato i travetti, con le prove descritte al capitolo precedente, la campagna sperimentale è proseguita con la realizzazione dei solai descritti in Tabella 1. In particolare, i solai sono stati realizzati accostando tra loro tre travetti di lunghezza uguale e posizionando tra loro tavelle in laterizio dalla lunghezza di circa 80 cm sia all'estradosso che all'intradosso. Così facendo si ottiene una dimensione del solaio pari a circa 1.80 m per la lunghezza del travetto. Va tuttavia sottolineato come solo le tavelle all'intradosso non hanno uno scopo strutturale ma bensì la funzione di chiudere la parte inferiore del solaio per questo motivo vengono messe solo qualora la condizione dei travetti siano tali da garantire il completo appoggio delle tavelle. Per i solai "lungi" (da 4 e 4.25), lo stato di degrado dei travetti è tale da non consentire il posizionamento delle tavelle lungo tutto l'intradosso, per questo motivo si è deciso di inserire le tavelle solo in punti specifici in modo da agevolare le operazioni di movimentazione dei solai. A completamento dei solai viene infine effettuato un getto di una cappa in calcestruzzo dallo spessore di circa 2.5 cm.

La realizzazione dei solai è avvenuta presso il Laboratorio Prove Materiali dell'Università degli Studi di Bergamo, da parte del personale del committente nella settimana del 17/07/2023. Mentre i successivi rinforzi vengono realizzati nella settimana del 06/09/2023 dopo la scadenza dei 28gg di maturazione del calcestruzzo. Per quanto riguarda nello specifico i rinforzi dei solai questi vengono effettuati mediante due tipologie. La prima prevede la realizzazione di una cappa con il prodotto LECACLS 1400 dallo spessore di 50 mm all'interno del quale viene annegata una rete elettrosaldata maglia 200x200 mm con diametro dei fili di 5 mm. La connessione tra il calcestruzzo "esistente" ed il rinforzo viene garantita attraverso il CONNETTORE CENTROSTORICO CHIMICO. La seconda tipologia di rinforzo prevede invece la realizzazione di una cappa collaborante dallo spessore di 30 mm con il prodotto MICRO CALCESTRUZZO CENTROSTORICO senza nessuna rete all'interno connettendo i due strati con il prodotto chimico utilizzato in precedenza. Per ogni tipologia di solaio vengono inoltre realizzati almeno due provini cubici lato 150 sia per il calcestruzzo "esistente" che per i materiali di rinforzo per verificare le prestazioni dei materiali, in particolare per il prodotto LECACLS 1400 vengono realizzati 3 provini aggiuntivi per la determinazione della massa volumica in seguito alla permanenza in forno per eliminare l'acqua in eccesso contenuta nel provino, mentre per il prodotto MICRO CALCESTRUZZO CENTROSTORICO vengono realizzate due travette 150x150x600 per effettuare le prove di flessioni in 3 punti con controllo di apertura della fessura.

### 4.1 Setup di prova

Le prove sui solai vengono effettuate utilizzando due diversi setup di prova con l'obiettivo di mandare in crisi i solai per taglio e per flessione. Vista la dimensione dei provini e le incertezze relative alla resistenza dei travetti base, si è deciso di utilizzare un setup di prova di flessione in 4 punti per indagare la prima modalità di collasso mentre prove su 3 punti per la seconda modalità. In generale per entrambe le tipologie di prove si è deciso di posizionare gli appoggi ad una distanza di 10 cm (per i solai da 2,00 e 4.00m) e di 12.5 cm (per i solai da 2.25 e 4.25m). In Figura 45 e Tabella 3 vengono riportati rispettivamente gli schemi statici utilizzati e le indicazioni relative alle distanze tra gli appoggi ed il punto di applicazione dei carichi per tutte le prove effettuate.

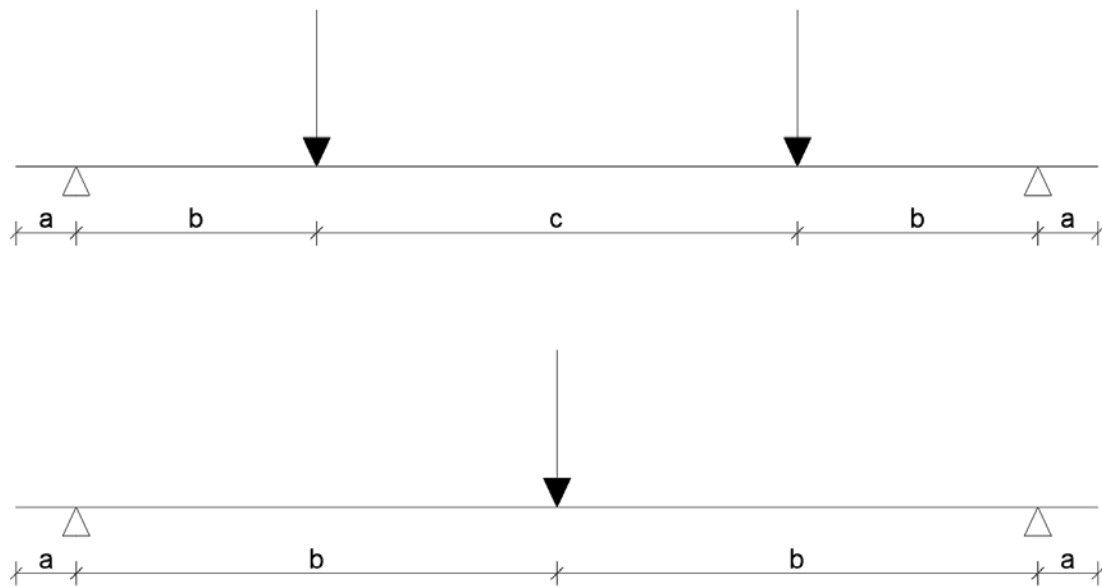


Figura 45 Schemi statici per le prove effettuate sui solai nella configurazione a 4 punti (in alto) e in 3 punti (in basso)

Tabella 3 Valori relative alle distanze  $a$ ,  $b$  e  $c$  riportate nello schema di Figura 45

Solaio	Tipologia di test	Massa [g]	$a$ [mm]	$b$ [mm]	$c$ [mm]
S1	4 punti	2000	100	450	900
S2		2000	100	450	900
S3		2250	125	500	1000
S4		4250	125	1000	2000
S5	3 punti	2250	125	1000	-
S6		2250	125	1000	-
S7		2250	125	1000	-
S8		4000	100	2000	-

I punti di appoggio vengono realizzati con 6 cilindri in acciaio discontinui posizionati a coppie sotto ogni travetto. Il diametro dei cilindri è variabile tra le varie prove per consentire di mantenere lo stesso setup generale e compensare le diverse altezze dei solai e le maggiori richieste di deformazioni. Al di sotto dei cilindri sono infatti presenti dei profili metallici utilizzati come binari per inserire il solaio e rullarlo nella corretta posizione all'interno del telaio di prova. I punti di applicazione del carico sono stati collocati ad un quarto e tre quarti della luce libera per la prova in quattro punti ed in mezzeria per la prova in tre punti. In entrambi i casi il punto di applicazione del carico viene garantito dalla spinta puntuale di un martinetto elettromeccanico che viene ridistribuita lungo le linee di carico mediante un telaio rigido. Tra il martinetto ed il telaio viene inserita una cella di carico dotata di snodo sferico per garantire l'allineamento del telaio alla superficie estradossate del solaio, mentre tra il telaio di ridistribuzione ed il solaio vengono collocati dei tubi o cilindri in acciaio che poggiano su uno strato di neoprene, eventualmente a spessore variabile per compensare la mancanza di planarità del solaio stesso. Anche in questo caso il diametro dei cilindri può variare tra le prove per gli stessi motivi elencati per i cilindri d'appoggio. I cilindri di trasmissione del carico vengono realizzati in modo continuo per caricare tutto la cappa di completamento o rinforzo. Anche il profilo rigido di ripartizione viene modificato tra i vari setup di prova per consentire di collocare nello spazio disponibile le diverse configurazioni di carico. Di seguito in Figura 46 e Figura 47 è possibile osservare il setup di prova utilizzato rispettivamente per le prove in 3 e 4 punti, mentre in Figura 48 e Figura 49 si possono vedere i dettagli della realizzazione del punto di applicazione del carico e degli appoggi.



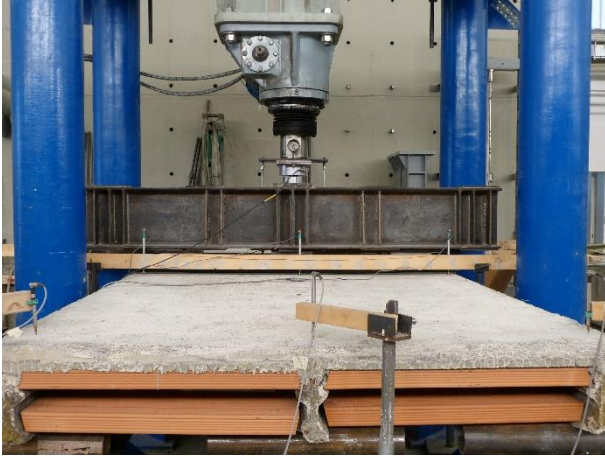


Figura 46 Setup di prova utilizzato per le prove di flessione in 3 punti



Figura 47 Setup di prova utilizzato per le prove di flessione in 4 punti



Figura 48 Dettaglio del punto di applicazione del carico



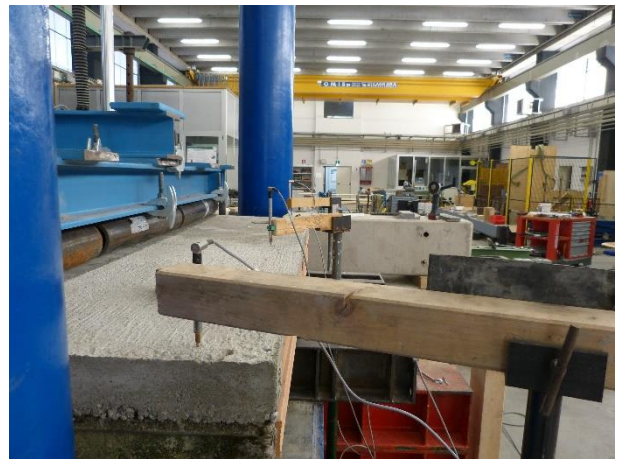
Figura 49 Dettaglio del punto di realizzazione dell'appoggio

#### 4.2 Strumentazione e procedura di prova

Analogamente a quanto fatto con i travetti e descritto nel capitolo 3.2, la strumentazione si concentra nella determinazione della deformazione del solaio e del carico raggiunto. È tuttavia importante sottolineare come quasi tutti i solai, in modo particolare i solai con il rinforzo attraverso il micro calcestruzzo e i solai “lunghi”, perdono la planarità della superficie estradossale a causa del ritiro differenziale tra il substrato ed il rinforzo. Questo provoca l'innalzamento differenziale delle 6 estremità dei travetti che vengono solo in parte



compensate posizionando degli spessori in acciaio tra il telaio ed il rullo d'appoggio. L'inserimento di questi spessori unito al danneggiamento locale del travetto crea nei punti d'appoggio un cedimento misurato attraverso una serie di trasduttori (1 per estremità di ogni travetto) per poter successivamente depurare la freccia effettiva. La freccia viene misurata attraverso 3 trasduttori di posizione collocati il più vicino possibile alla mezzeria del solaio (è possibile raggiungere la mezzeria nelle prove in 4 punti mentre è solo possibile avvicinarsi nelle prove in 3 punti) sulla proiezione del travetto all'estradosso, tale deformazione. Nel caso delle prove sui solai rinforzati viene aggiunta una nuova coppia di trasduttori in prossimità della superficie di incollaggio tra cappa esistente e rinforzo per verificare e misurare l'eventuale distacco tra le due superfici. Nelle immagini successive (Figura 50 - Figura 55) viene mostrata la strumentazione utilizzata. Tutte le misure vengono prese rispetto ad un riferimento esterno appoggiato al pavimento del laboratorio.



*Figura 50 Strumentazione utilizzata per la lettura dei cedimenti agli appoggi*



*Figura 51 Strumentazione utilizzata per la lettura della freccia massima in mezzeria nelle prove in 4 punti*



*Figura 52 Strumentazione utilizzata per la lettura della freccia massima in mezzeria dei travetti laterali nelle prove in 3 punti*



*Figura 53 Strumentazione utilizzata per la lettura della freccia massima in mezzeria dei travetto centrale nelle prove in 3 punti*



*Figura 54 Strumentazione utilizzata per la lettura del distacco tra cappa esistente e rinforzo*



*Figura 55 Strumentazione utilizzata per il rilevamento del carico*

La misura del carico, osservabile in Figura 55, viene effettuata mediante la cella di carico dotata di snodo sferico posizionata tra il martinetto e il telaio di ripartizione del carico. È importante evidenziare come tutti questi elementi posti tra il solaio e la cella non vengono misurati dalla cella e di conseguenza vengono sommati analiticamente a fine test come carico sollecitante successivamente alla pesa di tutti i profili.

Per quanto riguarda la procedura di prova tutti i solai sono stati testati con prove cicliche seguendo un protocollo simile a quanto fatto con i travetti. In particolare, la fase di carico viene eseguita in controllo di spostamento utilizzando come strumento di controllo il trasduttore in mezzeria del travetto centrale (non depurato dal cedimento degli appoggi), mentre la fase di scarico viene effettuata sempre in controllo di spostamento ma fermandosi al momento in cui si annulla il valore letto dalla cella di carico. In questo modo continua a gravare sul solaio il peso dei cilindri e del telaio di ripartizione del carico evitando la perdita di allineamento dei punti di carico del solaio, l'inconveniente introdotto da questa scelta è che non è possibile leggere uno spostamento residuo a zero carico ma bensì un carico noto (comunque inferiore al 10% del carico massimo raggiunto dai test).

Per la definizione degli step di prova si è deciso di differenziare tra solai in "corti" (lunghezza < 2.5m) e lunghi (>2.5 m). Per i solai corti vengono eseguite triplete con spostamenti incrementali di 1 mm fino a 10 mm (con incrementi di 1 mm), successivamente il test è proseguito con incrementi di 2 mm fino a quando viene registrata una perdita di carico maggiore del 20% rispetto al carico massimo raggiunto. In alcuni casi i test vengono terminati con una prova monotona per valutare la capacità residua del solaio. Gli stessi step vengono eseguiti anche con le prove sui solai "lunghi" andando a raddoppiare gli spostamenti (cercando di mantenere lo stesso rapporto luce/freccia).

### 4.3 Presentazione dei risultati e analisi dei dati

Dal capitolo successivo verranno mostrati i risultati di tutta la campagna sperimentale di tutti i solai. Lo scopo di questo sotto capitolo è quello di presentare le modalità con cui i risultati verranno presentati per evitare ripetizione all'interno dei capitoli specifici. Seguendo quanto fatto con i travetti nella prima fase verranno mostrate le condizioni dei solai ad inizio prova con una serie di fotografie aventi lo scopo di individuare i punti già degradati e danneggiati. Successivamente verranno mostrati i grafici di prova con le relative tabelle.

Per quanto riguarda l'elaborazione dei dati verrà mostrato per ogni solaio il ciclo forza/momento del singolo travetto (nell'ipotesi che si distribuisca in modo uguale sui tre travetti) – deformazione del singolo travetto. Il grafico viene strutturato con il doppio asse, sulla sinistra (asse azzurro) è possibile leggere il valore di forza mentre a destra (asse arancio) il valore del momento. Con deformazione del singolo travetto si intende l'abbassamento in mezzeria depurato dal cedimento medio dei due appoggi. I risultati verranno mostrati in tre grafici affiancati tra di loro, come viene mostrato nell'esempio riportato in Figura 56, in cui vengono mostrati in posizione centrale il risultato del travetto centrale (punto di controllo della prova) e lateralmente verranno mostrati i risultati dei travetti di bordo.

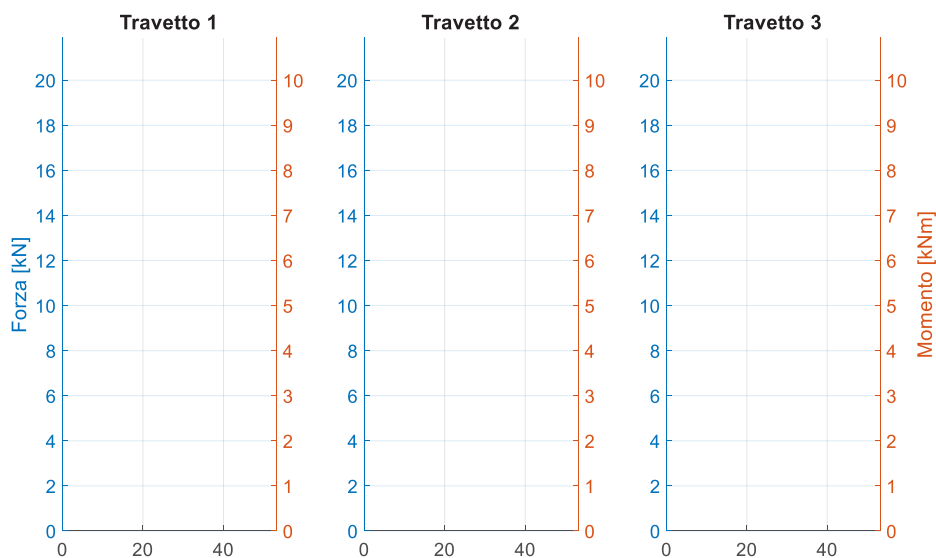


Figura 56 Schema tipo per la modalità di rappresentazione dei grafici Forza Spostamento dei singoli travetti [mm]

Successivamente verranno mostrati sia in forma grafica sia in forma tabellare i risultati di forza massima registrata nei tre cicli di prova ed il valore di spostamento residuo al termine dei tre cicli (o del ciclo singolo nel caso dell'ultima rampa monotona), in questo modo sarà possibile osservare l'eventuale decadimento delle prestazioni al ripetersi dei cicli e il travetto che viene maggiormente danneggiato. Infine i punti di carico/momento massimo per ogni ciclo verranno mostrati, in relazione alla freccia depurata; anche in questo caso verranno mostrati tre grafici incolonnati l'uno sull'altro in cui troviamo in alto ed in basso i risultati dei travetti di bordo mentre centralmente i risultati del travetto centrale (punto di controllo della prova), analogamente sull'asse di sinistra (in azzurro) vengono indicati i valori di forza, mentre su quello di destra (in arancio) vengono indicati i valori di momento. La struttura del grafico è osservabile in Figura 57.



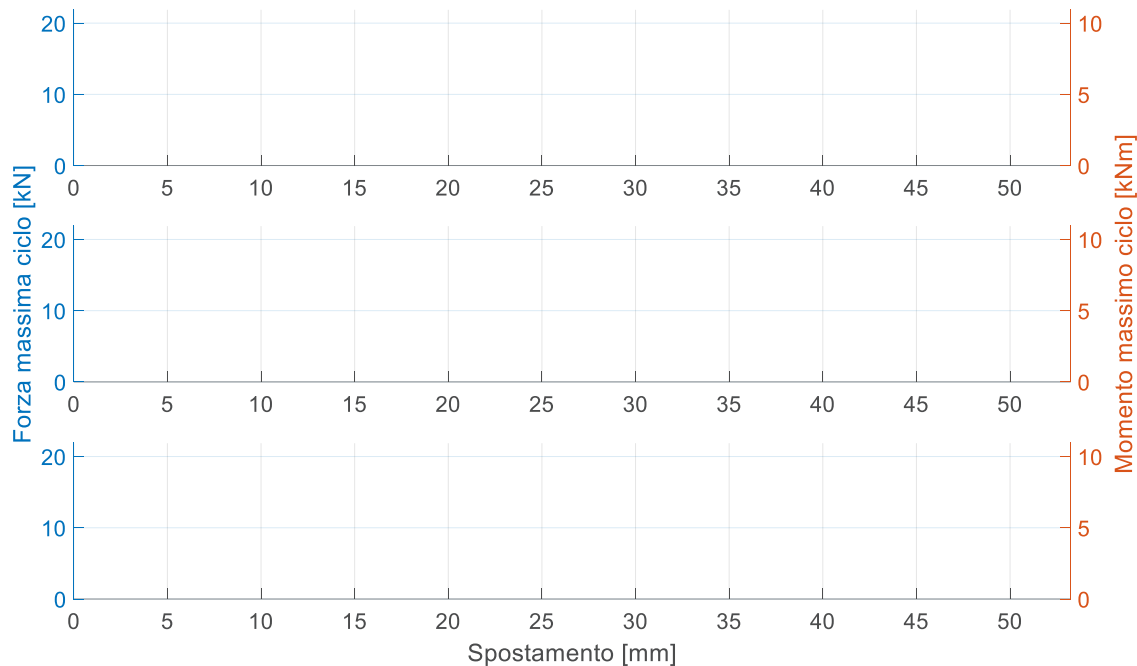


Figura 57 Schema tipo per la modalità di rappresentazione dei grafici Forza massima del ciclo --Spostamento dei singoli travetti

Nel caso dei solai rinforzati verrà mostrato un ulteriore grafico in cui è possibile osservare il valore di distacco tra la cappa esistente ed il rinforzo.

Al termine del capitolo, dopo aver presentato i risultati delle singole prove, vengono riepilogati i risultati di tutte le prove andando ad effettuare i confronti tra lo stesso setup di prova (flessione in 4 punti ed in 3 punti) cercando di uniformare la sollecitazione (verrà riportato taglio e momento sollecitante) e le deformazioni (uniformando la deformata rispetto alla luce libera tra appoggi).

#### 4.4 Risultati delle prove sperimentali

##### 4.4.1 Prove eseguite sui materiali base

In questo capitolo vengono riportati i risultati delle prove effettuate sui materiali base, in particolare:

- prove di compressione sul calcestruzzo utilizzato per la realizzazione dei solai e dei rinforzi;
- prove di flessione in 3 punti con intaglio per il MICROCALCESTRUZZO CENTROSTORICO;
- prove di determinazione della massa volumica per il prodotto LECACLS 1400;
- prove di trazione su spezzoni di barra ricavati da travetti non testati.

Tutte le prove sui materiali cementizi, ad eccezione della prova di flessione in tre punti con intaglio sono stati effettuate lo stesso giorno in cui è stato eseguito il test sperimentale sul solaio.

La determinazione del valore caratteristico viene effettuata applicando le seguenti formulazioni:

$$f_k = e^{(m_y - k_n \cdot s_n)}$$

dove:  $f_k$  rappresenta il valore caratteristico,  $m_y$  e  $s_n$  vengono calcolati come riportato nelle formule seguenti mentre  $k_n$  viene preso dalla tabella riportata in seguito considerando una dispersione nota.

$$m_y = \frac{\sum_{i=1}^n \ln(f_i)}{n},$$

con  $f_i$  che rappresenta il valore dell' $i$ -esimo campione  
 $n$  rappresenta il numero di campioni

$$s_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\ln(f_i) - m_y)^2}{n - 1}}$$



n	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
Dispersione nota	2.31	2.01	1.89	1.83	<b>1.80</b>	<b>1.77</b>	1.74	1.72	1.68	1.67	1.64
Dispersione non nota	-	-	3.37	2.63	2.33	2.18	2.00	1.92	1.76	1.73	1.64

Prove di compressione sul calcestruzzo base

Tabella 4 Valori di resistenza del calcestruzzo base

Solaio	Data Test	Massa	Larg.	Lung.	Altez.	Densità	Carico rottura	
		[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kN]	[MPa]
S1	20/09/2023	7288	150	150	150	2159.41	581.7	25.85
S1	20/09/2023	7080	150	150	150	2097.78	473.5	21.04
S2	02/10/2023	7199	150	150	150	2133.04	565.5	25.13
S2	02/10/2023	7024	150	150	150	2081.19	462	20.53
S3	06/10/2023	7240	150	150	150	2145.19	446.7	19.85
S3	06/10/2023	6978	150	150	150	2067.56	450.3	20.01
S4	12/10/2023	7213	150	150	150	2137.19	435	19.33
S4	12/10/2023	7146	150	150	150	2117.33	452.4	20.10
S5	17/10/2023	7101	150	150	150	2104.00	552.1	24.53
S5	17/10/2023	7055	150	150	150	2090.37	544.6	24.20
S6	19/10/2023	7305	150	150	150	2164.44	567.7	25.23
S6	19/10/2023	7297	150	150	150	2162.07	582	25.86
S7	25/10/2023	7337	150	150	150	2173.93	573.9	25.50
S7	25/10/2023	7231	150	150	150	2142.52	608.1	27.02
S8	27/10/2023	7142	150	150	150	2116.15	585.5	26.02
S8	27/10/2023	7218	150	151	150	2124.50	582.6	25.72
<b>Media</b>		<b>7178.375</b>				<b>2126.04</b>	<b>528.97</b>	<b>23.50</b>
<b>Valore caratteristico</b>		<b>6996.70</b>				<b>2072.49</b>	<b>427.21</b>	<b>18.99</b>

Prove di compressione sul materiale di rinforzo (LECACLS 1400)

Tabella 5 Valori di resistenza del prodotto LECACLS 1400

Solaio	Data Test	Massa	Larg.	Lung.	Altez.	Densità	Carico rottura	
		[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kN]	[MPa]
S2	06/10/2023	5348	150	150	150	1584.59	509.2	22.63
S2	06/10/2023	5227	150	150	150	1548.74	538.5	23.93
S4	17/10/2023	5142	150	150	150	1523.56	528.7	23.50
S4	17/10/2023	5025	150	150	150	1488.89	528.7	23.50
S6	25/10/2023	5188	150	150	150	1537.19	707.8	31.46
S6	25/10/2023	5178	149	150	150	1544.52	648.5	29.01
S6	25/10/2023	5142	150	150	150	1523.56	716	31.82
S8	27/10/2023	5058	149	150	150	1508.72	525.3	23.50
S8	27/10/2023	5071	150	150	150	1502.52	543.3	24.15
S8	27/10/2023	5048	150	150	150	1495.70	556.9	24.75
S8	27/10/2023	5105	150	150	150	1512.59	483.9	21.51
<b>Media</b>		<b>5139.27</b>				<b>1524.60</b>	<b>571.53</b>	<b>25.43</b>
<b>Valore caratteristico</b>		<b>4980.28</b>				<b>1477.68</b>	<b>450.55</b>	<b>20.03</b>

Prove di compressione sul materiale di rinforzo (MICROCALCESTRUZZO CENTROSTORICO)

Tabella 6 Valori di resistenza del prodotto MICROCALCESTRUZZO CENTROSTORICO

Solaio	Data Test	Massa	Larg.	Lung.	Altez.	Densità	Carico rottura	
		[g]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kN]	[MPa]
S3	12/10/2023	7550	150	150	150	2237.04	1866.1	82.94
S3	12/10/2023	7542	150	150	150	2234.67	1868.2	83.03
S7	19/10/2023	7305	150	150	150	2164.44	1917.3	85.21
S7	19/10/2023	7297	149	150	150	2176.58	1877.1	83.99
<b>Media</b>		<b>7423.5</b>				<b>2203.183</b>	<b>1882.17</b>	<b>83.79</b>
<b>Valore caratteristico</b>		<b>7167.97</b>				<b>2146.856</b>	<b>1839.07</b>	<b>81.88</b>

Prove per la determinazione della massa volumica del calcestruzzo essiccato in stufa (UNI EN 12390 – 7)

h in forno	S3-3		S8-3		S8-4	
	Peso	Variazione	Peso	Variazione	Peso	Variazione
	[g]	[%]	[g]	[%]	[g]	[%]
<b>0</b>	5142	-	5048	-	5105	-
<b>24</b>	4989	2.98%	4895	3.03%	4935	3.33%
<b>48</b>	4918	1.42%	4836	1.21%	4887	0.97%
<b>72</b>	4882	0.73%	4819	0.35%	4862	0.51%
<b>96</b>	4865	0.35%	4810	0.19%	4853	0.19%
<b>156</b>	4856	0.18%	4804	0.12%	4844	0.19%
<b>Massa Volumica [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>1438</b>		<b>1423</b>		<b>1435</b>	

Prove per la determinazione della resistenza a flessione di calcestruzzi con fibre (UNI EN 14651:2007)

Camp.	CMOD			0.05		0.5	1.5	2.5	3.5
	b	h <sub>sp</sub>	l	F	f <sub>ct,L</sub> <sup>f</sup>	f <sub>R,1</sub>	f <sub>R,2</sub>	f <sub>R,3</sub>	f <sub>R,4</sub>
	[mm]	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Solaio S3	149.78	125.07	500	10.54	3.432	2.232	2.175	1.582	1.038
Solaio-S7	149.62	125.34	500	9.50	3.093	1.437	1.403	1.047	0.600

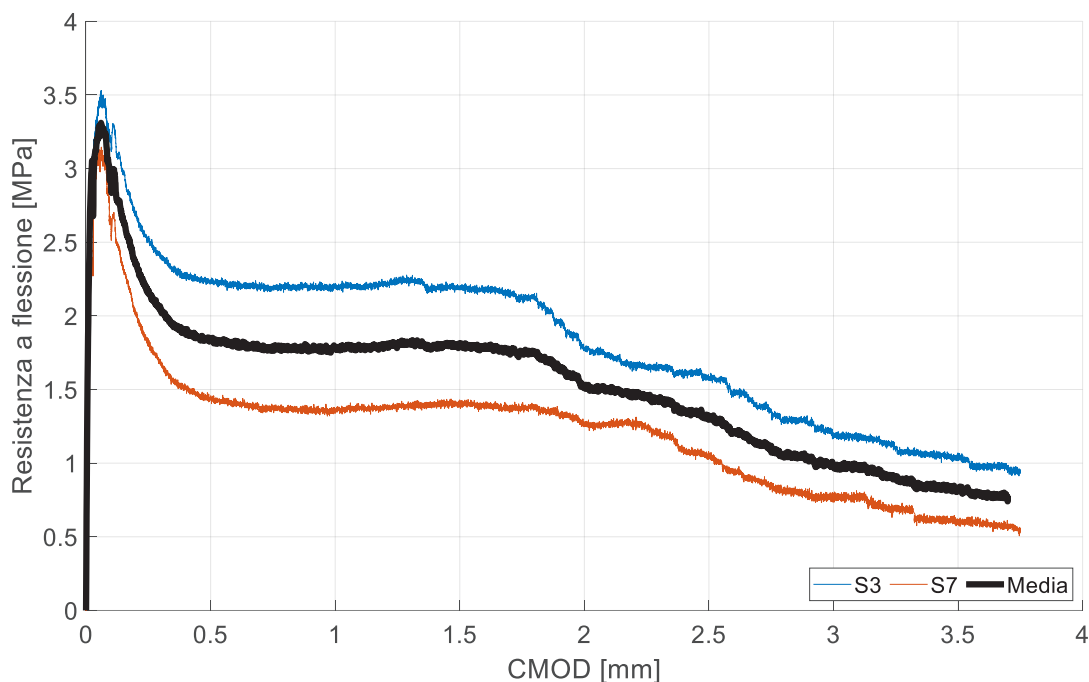


Figura 58 Grafico resistenza a flessione – apertura di fessura per i due provini testati

#### Prove di trazione sull'acciaio

Dopo aver terminato le prove sono state recuperati due spezzoni di barre d'armatura, caratterizzate da un diametro nominale di 8 mm (si parla di diametro nominale in quanto lo stato di corrosione delle barre potrebbe aver modificato il diametro effettivo). Di seguito vengono riportati i dati della prova di trazione.

Campione	Diametro [mm]	Lunghezza [mm]	Peso [g]	Diametro equivalente [mm]	Valori a snervamento		Valori a rottura	
					Forza [kN]	Sforzo [MPa]	Forza [kN]	Sforzo [MPa]
					1	8	600	237
2	8	600	240	8.057	25.71	511.74	31.68	630.57

Visti i valori elevati individuati dalle prove di trazione (sono valori che si trovano in prossimità del limite superiore di un B450C attuale) per le stime del momento a snervamento verrà utilizzato il valore di 450 MPa, ben consapevoli che si sottostimerà il momento a snervamento della sezione.

#### 4.4.2 S1 -Solaio non rinforzato, L=2.00 m (prova in 4 punti)

##### *Condizioni del campione prima della prova*

Di seguito, in Figura 59- Figura 61 vengono mostrate le condizioni del campione prima di effettuare la prova, dal punto di vista strutturale non si osserva un quadro fessurativo particolare se non la rottura del copriferro in prossimità dell'appoggio (ma comunque esterno alla zona sollecitata durante la prova) in cui si evidenzia lo stato di corrosione delle armature. Si evidenzia inoltre una condizione generale di degrado dal punto di vista superficiale con la presenza di vegetazione e muschi.

In questo caso la prova viene condotta per mandare in crisi il solaio a taglio posizionando gli appoggi a 10 cm dai bordi (180 cm di luce libera) mentre i coltelli di applicazione del carico (prova in 4 punti) ad una distanza di 45 cm dagli appoggi (90 cm tra di loro).



Figura 59 Dettaglio degli appoggi in cui si può osservare la condizione del travetto prima della prova



Figura 60 Dettaglio della misura tra il centro dell'appoggio ed il bordo



Figura 61 Rilievo di dettaglio della distanza tra i punti di applicazione del carico

##### *Risultati delle prove sperimentali*

Dal grafico mostrato in Figura 62 si può osservare come il collasso del solaio sia avvenuto con un importante danneggiamento dei travetti 1 e 2. Si registra inoltre come il numero di cicli sia relativamente basso (il collasso avviene precocemente). Il carico massimo, pari a 105.69 kN (35.23 kN a travetto) viene raggiunto in corrispondenza del ciclo caratterizzato da uno spostamento di 6 mm. Tale valore di carico genera un momento sollecitante inferiore al momento di snervamento del solaio (stimato cautelativamente in circa 9 kNm). Tutto questo, porta a dire che la modalità di rottura del travetto è puramente a taglio senza lo snervamento delle armature e di conseguenza senza la possibilità di sviluppare duttilità nel travetto. Il collasso avviene infatti in modo fragile nel terzo ciclo dello spostamento che ha registrato il carico massimo. Questo lo si osserva in

modo particolare dal grafico relativo allo spostamento residuo (Figura 64) in cui si vede un'importate crescita di quest'ultimo per i travetti 1 e 2 mentre il travetto 3 continua a crescere in modo lineare.

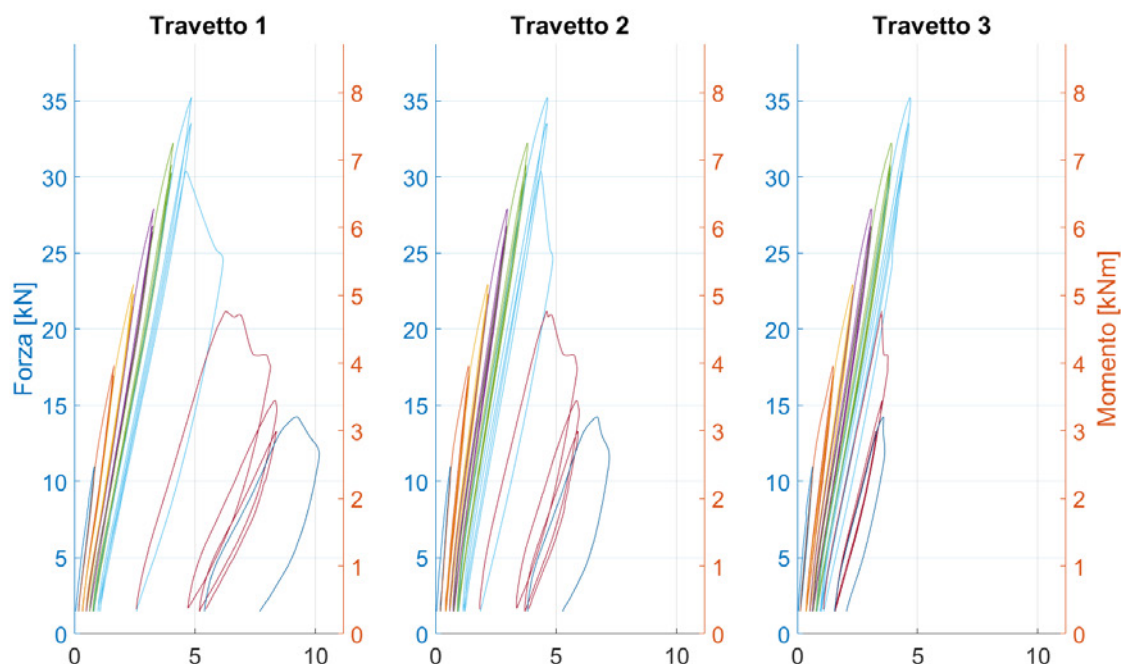


Figura 62 Grafico Forza/Momento – Spostamento dei singoli travetti [mm]

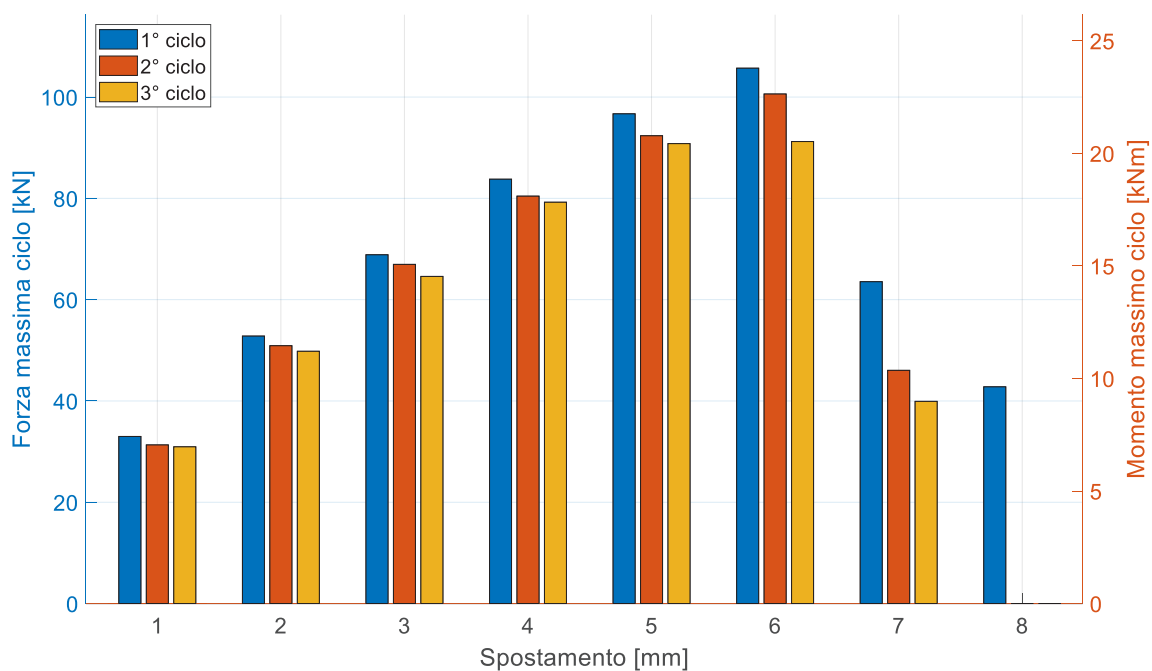


Figura 63 Grafico Forza/Momento massimo registrato per ogni ciclo di prova

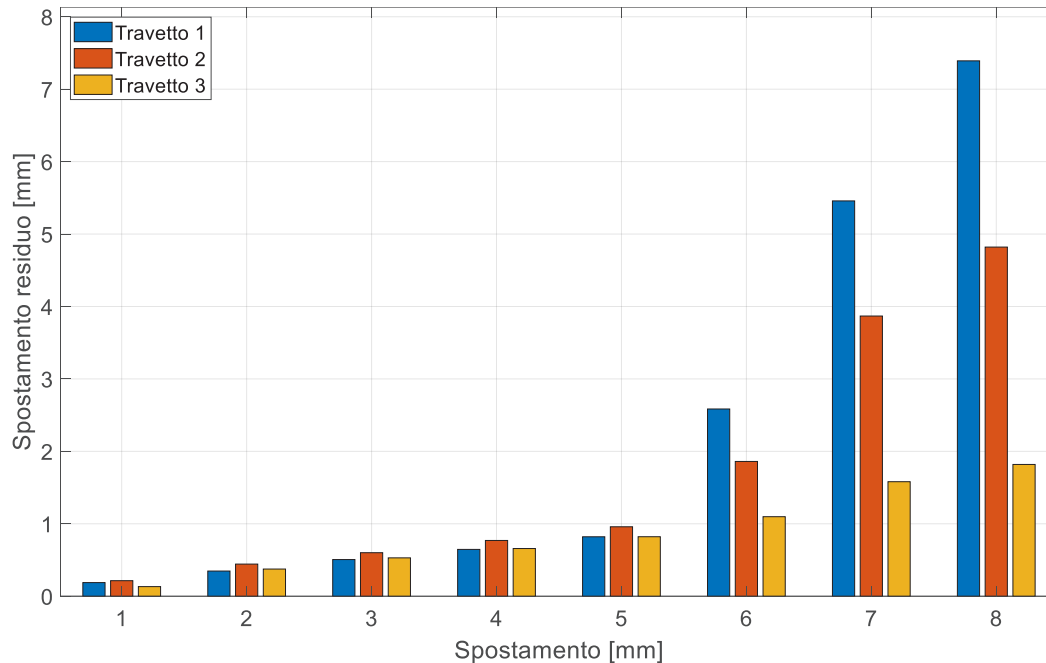


Figura 64 Valore dello spostamento residuo registrato al termine dell'ultimo ciclo ad un dato spostamento

Tabella 7 Riepilogo dei risultati della prova in termini di forza, momento sollecitante e spostamento residuo

Spostamento	Carico Singolo Travetto [kN]			Momento sollecitante singolo travetto [kNm]			Spostamento Residuo [mm]		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Travetto 1	Travetto 2	Travetto 3
1	9.50	8.94	8.81	2.14	2.01	1.98	0.188	0.214	0.132
2	16.10	15.47	15.10	3.62	3.48	3.40	0.347	0.444	0.375
3	21.45	20.82	20.03	4.83	4.68	4.51	0.506	0.601	0.530
4	26.43	25.31	24.91	5.95	5.69	5.60	0.646	0.770	0.658
5	30.73	29.29	28.77	6.91	6.59	6.47	0.820	0.959	0.821
6	33.73	32.03	28.91	7.59	7.21	6.50	2.585	1.860	1.098
7	19.68	13.85	11.81	4.43	3.12	2.66	5.458	3.868	1.581
8	12.76	-	-	2.87	-	-	7.391	4.820	1.819

Dal grafico riportato in Figura 65, si osserva inoltre come l'andamento del carico è pressoché lineare nelle deformazioni fino al raggiungimento del carico massimo. A livello di degrado al ripetersi dei cicli si nota come il secondo ed il terzo ciclo siano caratterizzati da un carico tra loro simile ed inferiore al primo ciclo, ad esclusione del terzo ciclo a spostamento di 6 mm (5 effettivi di spostamento a causa del cedimento e del degrado degli appoggi) dove si osserva soprattutto per il travetto 1 (in alto) come i primi due cicli siano molto vicini tra di loro mentre il terzo registra un'importante crescita fino a superare il valore di 6 mm (in precedenza era di poco inferiore a 5). Tutto ciò conferma come la modalità di rottura sia da attribuire alla rottura per taglio dei travetti come si può osservare nelle immagini riportate di seguito.



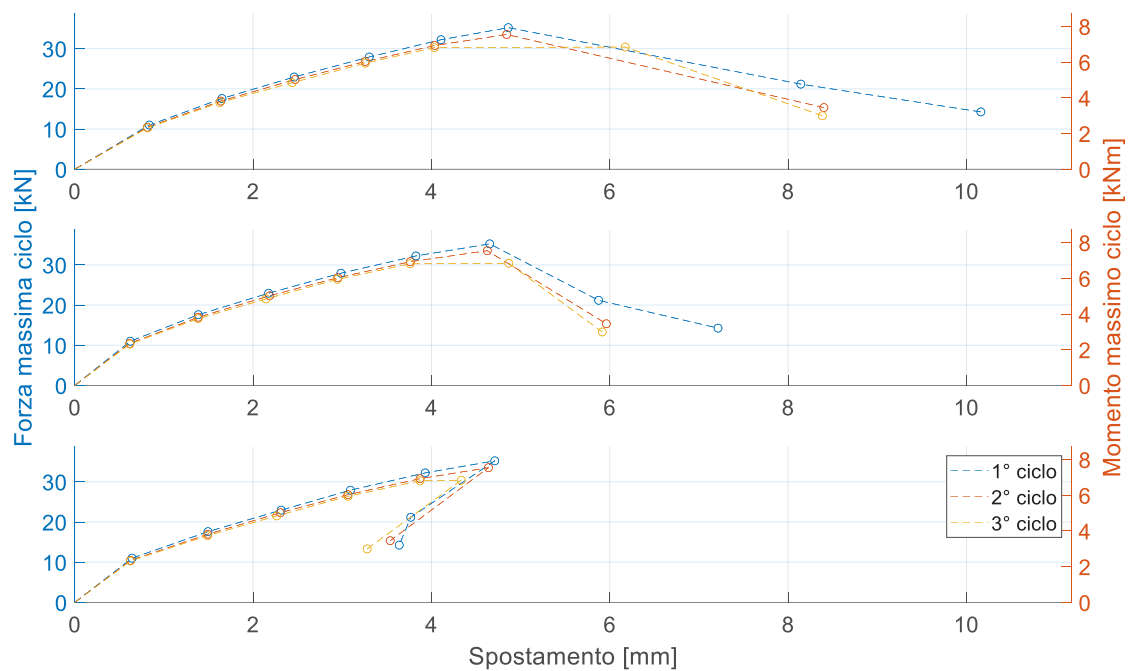


Figura 65 Grafico Carico/Momento massimo – Spostamento per ogni travetto



Figura 66 Dettaglio della rottura per taglio del travetto 1 in prossimità dell'appoggio destro



Figura 67 Collasso delle tavole inferiori in seguito al collasso per taglio del travetto 2 (centrale)



Figura 68 Formazione di un quadro fessurativo perpendicolare alla direzione dei travetti nella cappa



Figura 69 Dettaglio di una fessura obliqua formatasi nella cappa dopo il collasso del travetto 1



Figura 70 Condizione dell'appoggio di destra del travetto 1 a fine prova



Figura 71 Condizione dell'appoggio di destra del travetto 2 a fine prova

#### 4.4.3 S2 -Solaio rinforzato con LECACLS 1400, L=2.00 m (prova in 4 punti)

##### *Condizioni del campione prima della prova*

Di seguito, da Figura 72 a Figura 74 vengono mostrate le condizioni del campione prima di effettuare la prova. Si osserva come i travetti costituenti il solaio risultino essere già danneggiati in prossimità degli appoggi per quanto riguarda il travetto 1 e lungo tutto il travetto per quanto riguarda il travetto 3. In nero vengono ricalcate le fessure rilevate prima dell'avvio della prova. Come tutti gli altri casi si osserva inoltre una condizione generale di degrado (peggiore rispetto ai solai non rinforzati) dal punta di vista superficiale con la presenza di vegetazione e muschi.

In questo caso, viene mantenuto lo stesso setup di prova utilizzato per il solaio non rinforzato (paragrafo 4.4.2) ovvero: appoggi a 10 cm dai bordi (180 cm di luce libera) e i due coltelli di applicazione del carico ad una distanza di 45 cm dagli appoggi (90 cm tra di loro).





Figura 72 Dettaglio del travetto 3 in cui si può osservare lo stato di degrado prima della prova



Figura 73 Dettaglio dell'appoggio destro del travetto 1



Figura 74 Dettaglio dell'appoggio sinistro del travetto 1

#### *Risultati delle prove sperimentali*

Dal grafico mostrato in Figura 75 si può osservare come il collasso del solaio sia avvenuto in modo uniforme su tutti e tre i travetti (qualitativamente i grafici hanno un andamento molto simile). In particolare, si osserva come il collasso sia sopraggiunto al primo ciclo allo spostamento imposto di 5 mm quando viene registrato un carico di 80.3 kN totali (26.76 kN a travetto). È interessante osservare come il carico raggiunto sia inferiore al carico registrato dalla prova senza rinforzo. Tuttavia, va evidenziato come le condizioni originali dei travetti siano decisamente peggiori rispetto a quelle osservate nel capitolo 4.4.2. Va inoltre evidenziato come la rottura abbia interessato direttamente i travetti senza danneggiare la cappa di rinforzo che ha potuto dare solo un contributo minimo in termini di resistenza. Pertanto, è abbastanza logico imputare il “peggioramento” delle prestazioni alla pessima condizione dei travetti base. Il punto di rottura del solaio viene inoltre ben evidenziato anche dal grafico riportato in Figura 77 dove si evidenzia la perdita di linearità nello spostamento residuo che subisce un salto (quasi costante) in tutti e 3 i travetti di 2 mm. Una volta formatasi la fessura diagonale si evidenzia la capacità del solaio di mantenere lo stesso carico fino a 8 mm di spostamento.

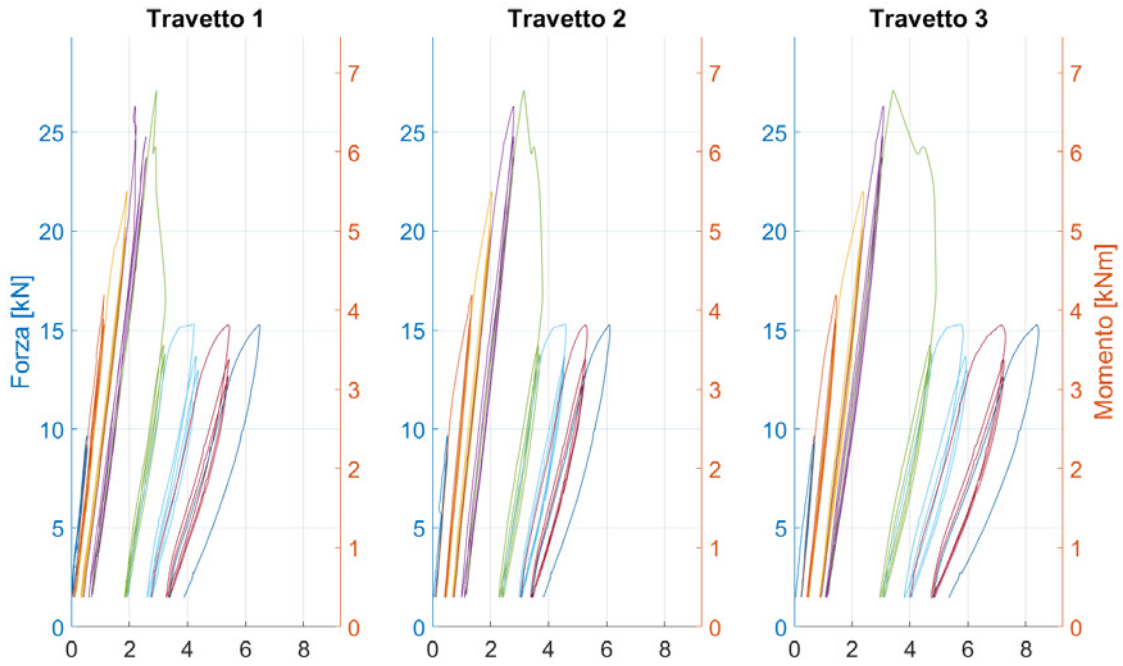


Figura 75 Grafico Forza/Momento – Spostamento dei singoli travetti [mm]

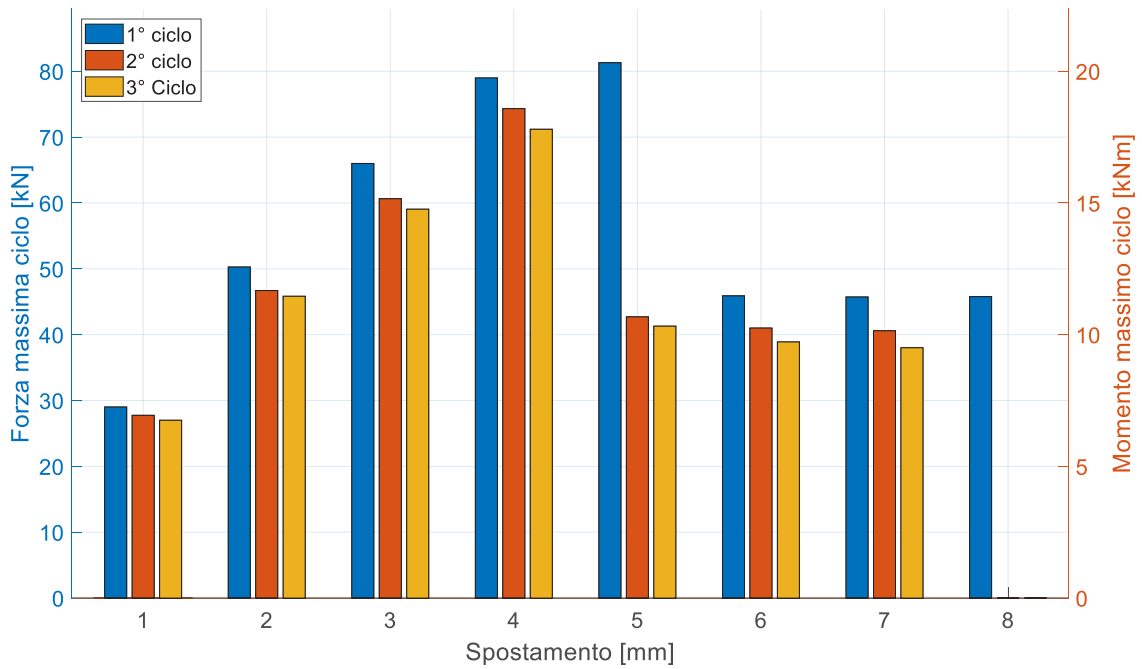


Figura 76 Grafico Forza/Momento massimo registrato per ogni ciclo di prova



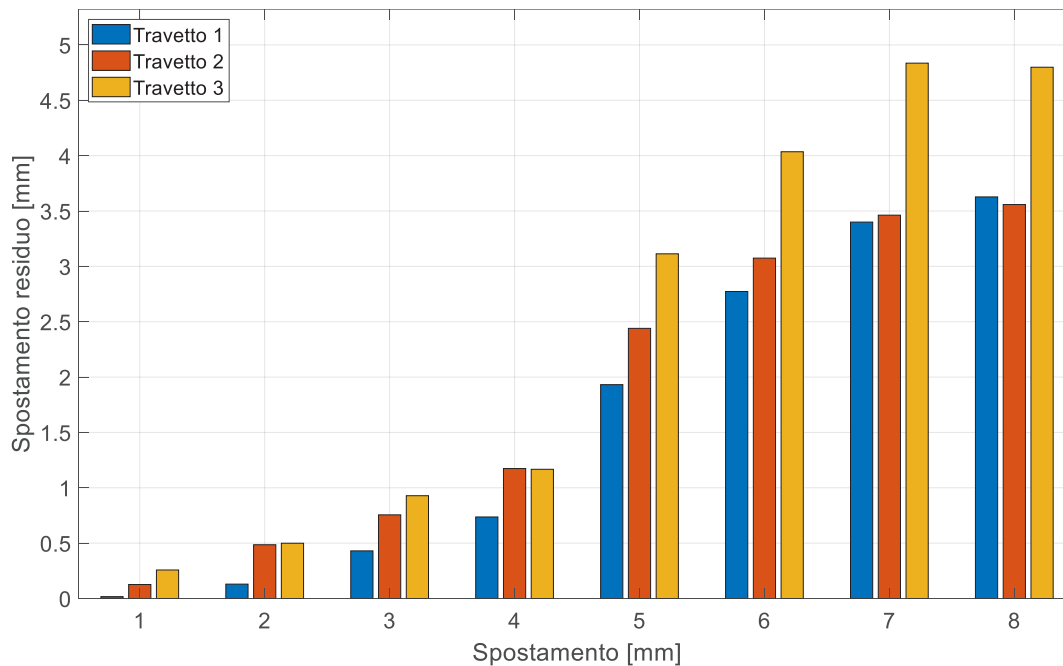


Figura 77 Valore dello spostamento residuo registrato al termine dell'ultimo ciclo ad un dato spostamento

Tabella 8 Riepilogo dei risultati della prova in termini di forza, momento sollecitante e spostamento residuo

Spostamento	Carico Singolo Travetto [kN]			Momento singolo travetto [kNm]			Spostamento Residuo [mm]		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Travetto 1	Travetto 2	Travetto 3
1	9.67	9.25	9.00	2.42	2.31	2.25	0.017	0.126	0.258
2	16.76	15.57	15.28	4.19	3.89	3.82	0.130	0.486	0.499
3	22.00	20.21	19.68	5.50	5.05	4.92	0.430	0.755	0.928
4	26.33	24.77	23.73	6.58	6.19	5.93	0.737	1.174	1.167
5	27.10	14.23	13.76	6.78	3.56	3.44	1.932	2.440	3.113
6	15.30	13.67	12.96	3.82	3.42	3.24	2.773	3.075	4.035
7	15.24	13.53	12.67	3.81	3.38	3.17	3.400	3.463	4.836
8	15.26	-	-	3.81	-	-	3.627	3.558	4.799

Dal grafico riportato in Figura 78, si osserva inoltre come in tutti i cicli, ad eccezione del primo, vi sia una distanza tra il primo ciclo ed i successivi. È inoltre interessante osservare una grande discrepanza tra lo spostamento nominale ricercato nel travetto centrale e lo spostamento effettivo (in seguito alla depurazione del cedimento/danneggiamento negli appoggi). Ad esempio, lo spostamento nominale di 3 mm porta ad uno spostamento effettivo di 2 mm. Particolarmente interessante è anche l'andamento del travetto 1 che prima di sopraggiungere ha collasso mostra un'importante danneggiamento degli appoggi che lo portano ad avere un incremento di deformazione effettiva molto ridotto. Tutti questi aspetti vanno ad avvalorare la tesi precedentemente indicata in cui la causa della prematura rottura del solaio è da imputarsi ai travetti, senza che la cappa aggiuntiva possa aver dato il proprio contributo in termini di miglioramento delle prestazioni. A dare ulteriore conferma di questo c'è il grafico in Figura 79 in cui si osserva che il distacco tra i due strati strutturali è pressoché nullo (inferiore al centesimo di millimetro) anche quando avviene il collasso.

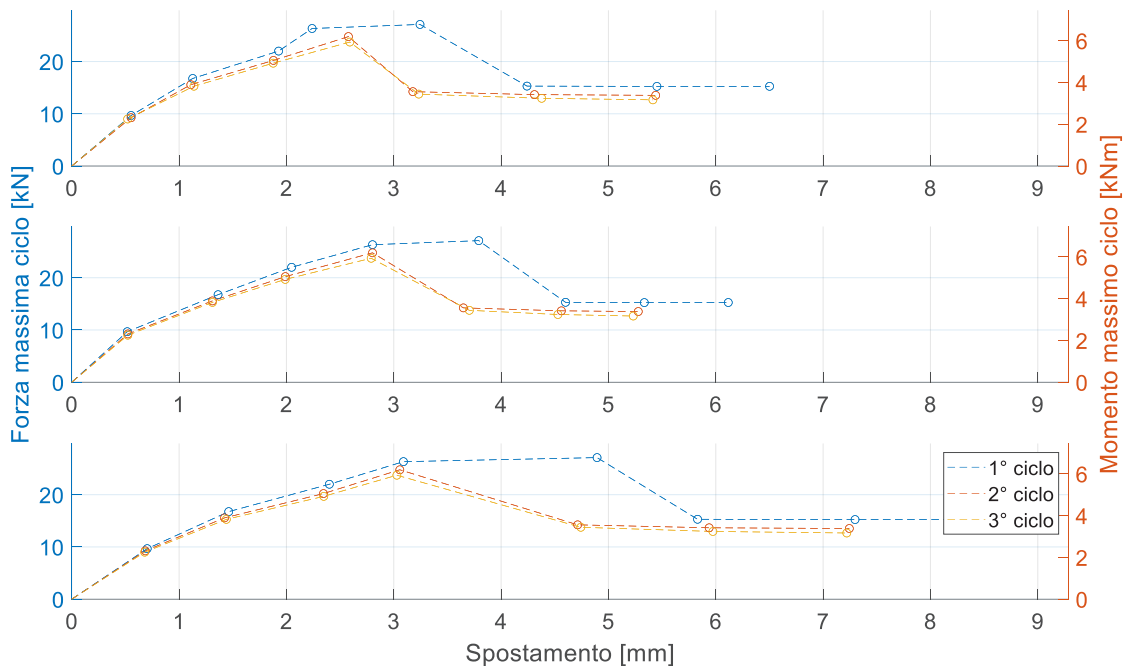


Figura 78 Grafico Carico/Momento massimo – Spostamento per ogni travetto

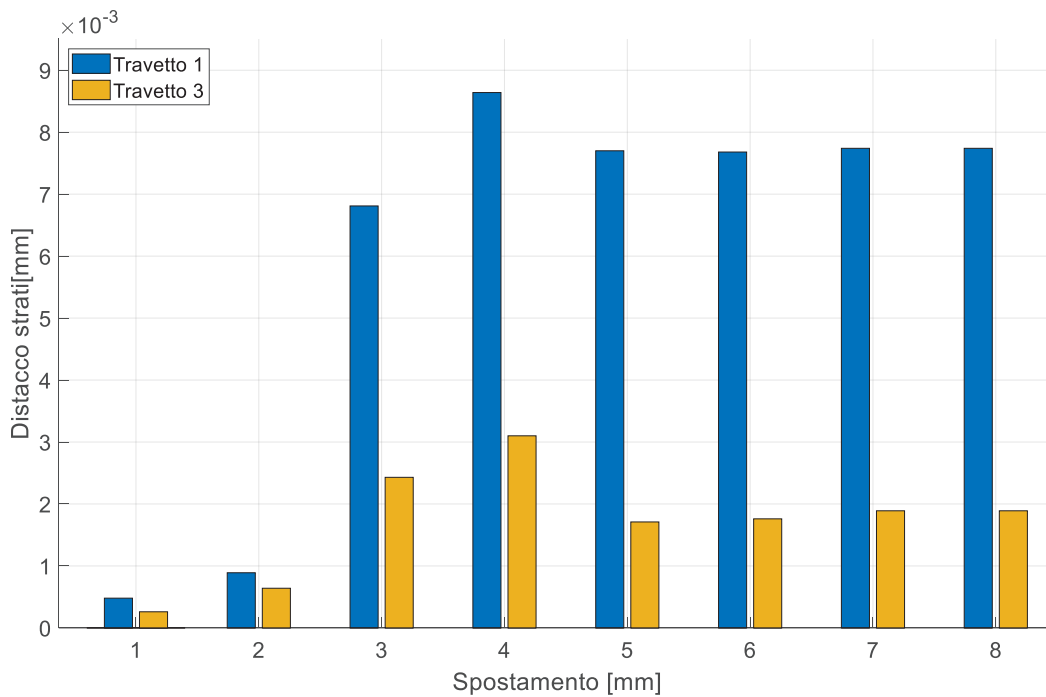


Figura 79 Distacco tra la cappa del solaio e lo strato dei rinforzo



*Figura 80 Condizioni dell'appoggio sinistro del travetto 1 a fine prova*



*Figura 81 Condizioni dell'appoggio destro del travetto 2 a fine prova*



*Figura 82 Condizioni dell'appoggio destro del travetto 3 a fine prova*



*Figura 83 Condizione del travetto 3 nella porzione tra i coltelli di carico*



*Figura 84 Dettaglio delle condizioni del travetto 3 con rottura del copriferro e perdita dell'appoggio della pignatta*



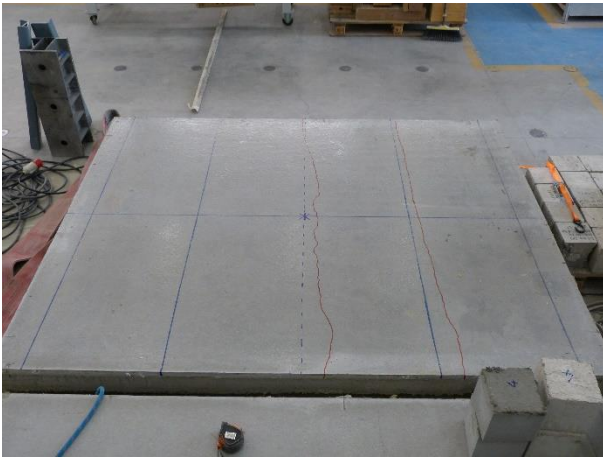
*Figura 85 Vista interna tra i travetti 2 e 3 con il collasso del calcestruzzo all'intradosso del travetto 3 con perdita dell'appoggio delle tavole*



#### 4.4.4 S3 - Solaio rinforzato con MICROCALCESTRUZZO CENTROSTORICO, L=2.25 m (prova in 4 punti)

##### *Condizioni del campione prima della prova*

Di seguito, da Figura 86 a Figura 93 vengono mostrate le condizioni del campione prima di effettuare la prova. Si osserva come i travetti siano in buono stato di conservazione. Tuttavia, si evidenzia un'importante deformazione del solaio, generata dal ritiro differenziale tra il prodotto utilizzato per la realizzazione della cappa collaborante ed il substrato. In particolare, si evidenzia un'importante perdita di planarità della superficie con un innalzamento dei bordi rispetto al travetto centrale maggiore di 15 mm. Analizzando in dettaglio il campione si osserva come i quattro spigoli del solaio si siano sollevati di circa 20 mm portando alla rottura per eccessivo sforzo di trazione le tavole. In questo caso, viene mantenuto lo stesso setup di prova utilizzato per il solaio non rinforzato (paragrafo 4.4.2), andando a modificare le distanze dagli appoggi a causa della maggior lunghezza del solaio (2.25 m contro 2.00 m), in particolari gli appoggi vengono posizionati a 12.5 cm dai bordi (200 cm di luce libera) e i due coltelli di applicazione del carico ad una distanza di 50 cm dagli appoggi (100 cm tra di loro).



*Figura 86 Quadro fessurativo della cappa collaborante prima di iniziare la prova*



*Figura 87 Dettaglio della perdita di planarità (luce tra il riferimento ligneo e il solaio) della superficie*



*Figura 88 Rilievo del sollevamento dello spigolo sinistro del travetto 1*



*Figura 89 Rilievo del sollevamento dello spigolo destro del travetto 1*





*Figura 90 Dettaglio della perdita di planarità*



*Figura 91 Condizioni dei travetti a inizio prova*



*Figura 92 Condizioni dei travetti a inizio prova  
(fessure evidenziate in nero)*



*Figura 93 Condizioni delle tavole ad inizio prova  
(rottura per ritiro contrastato della cappa  
collaborante)*

#### *Risultati delle prove sperimentali*

Dal grafico mostrato in Figura 94 si può osservare il grafico forza spostamento dei singoli travetti, Da essi si osserva come il collasso sopraggiunge per la rottura del travetto 1, che in corrispondenza del primo ciclo caratterizzato da uno spostamento di 16 mm registra il carico massimo di 153.28 kN (51.09 kN per singolo travetto). Si evidenzia inoltre come l'aumento di carico tra un ciclo ed il successivo è pressoché costante fino a 9 -10 mm di spostamento mentre con i cicli successivi l'incremento tende a diminuire. Considerazioni analoghe possono essere fatte nei confronti dello spostamento residuo in cui si vede una crescita importante a partire dai cicli caratterizzati da uno spostamento nominale superiore a 8 mm. Questi risultati avvengono in corrispondenza di un momento sollecitante sul singolo travetto pari a 10 kNm circa. Nota la sezione dell'armatura resistente e ipotizzando una tensione di snervamento di 450 MPa ed un'altezza utile di 210 mm si può stimare un momento a snervamento di 10.4 kNm. Pertanto si può affermare che il collasso a taglio sia sopraggiunto in concomitanza con lo snervamento delle barre tese dei travetti.

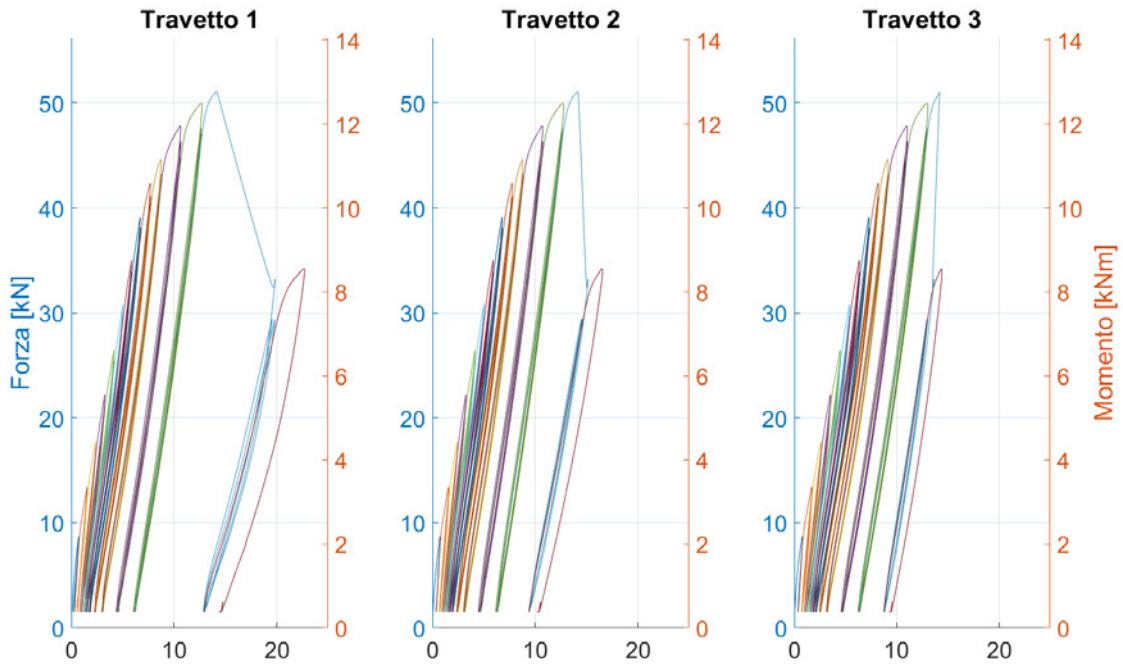


Figura 94 Grafico Forza/Momento – Spostamento dei singoli travetti [mm]

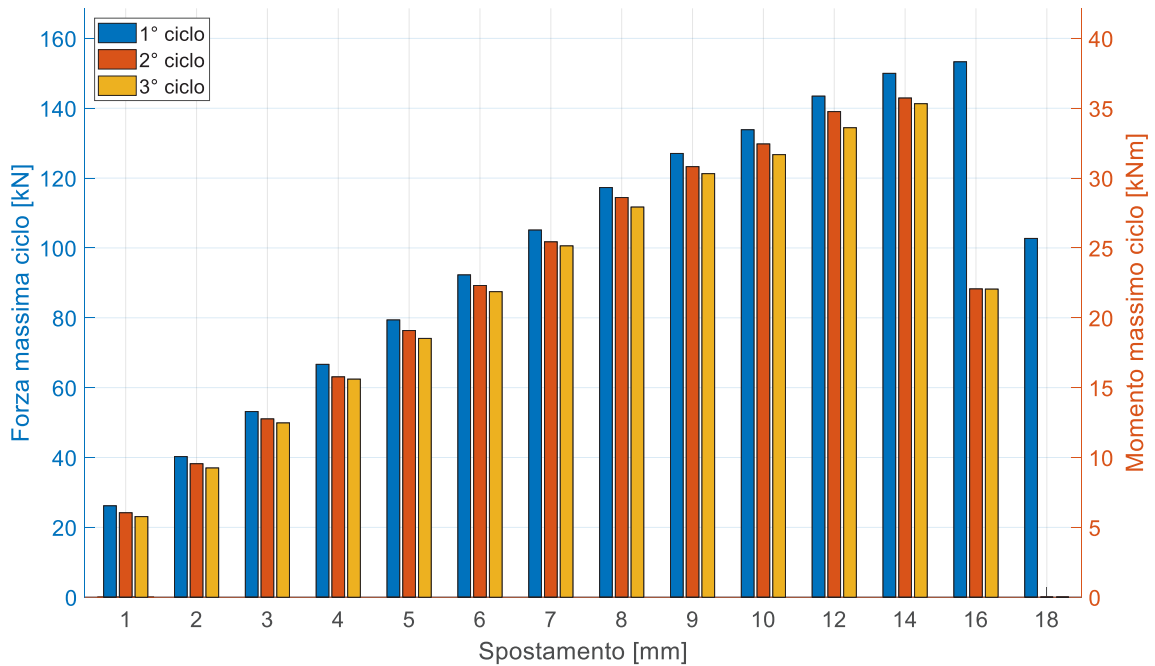


Figura 95 Grafico Forza/Momento massimo registrato per ogni ciclo di prova

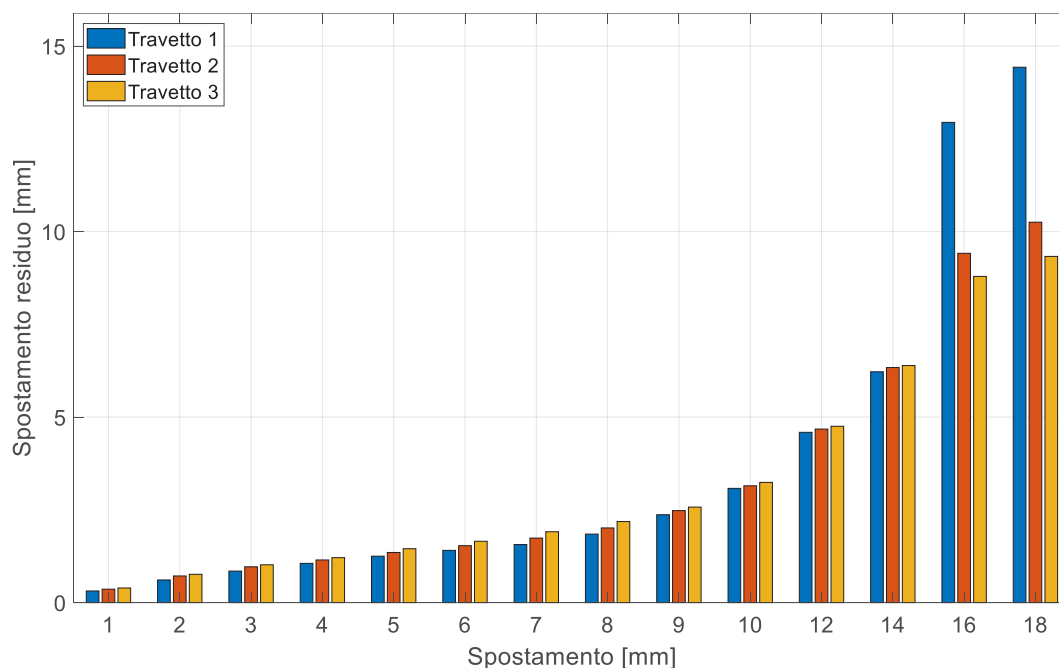


Figura 96 Valore dello spostamento residuo registrato al termine dell'ultimo ciclo ad un dato spostamento

Tabella 9 Riepilogo dei risultati della prova in termini di forza, momento sollecitante e spostamento residuo

Spostamento	Carico Singolo Travetto [kN]			Momento singolo travetto [kNm]			Spostamento Residuo [mm]		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Travetto 1	Travetto 2	Travetto 3
1	8.72	8.06	7.69	2.18	2.01	1.92	0.313	0.361	0.393
2	13.42	12.74	12.33	3.35	3.18	3.08	0.610	0.718	0.762
3	17.72	17.01	16.63	4.43	4.25	4.16	0.849	0.965	1.018
4	22.22	21.03	20.81	5.56	5.26	5.20	1.057	1.149	1.211
5	26.46	25.45	24.70	6.61	6.36	6.17	1.251	1.351	1.452
6	30.76	29.75	29.16	7.69	7.44	7.29	1.407	1.533	1.652
7	35.04	33.91	33.53	8.76	8.48	8.38	1.565	1.739	1.910
8	39.10	38.14	37.23	9.77	9.54	9.31	1.846	2.012	2.184
9	42.35	41.09	40.42	10.59	10.27	10.11	2.368	2.479	2.574
10	44.61	43.25	42.24	11.15	10.81	10.56	3.079	3.147	3.240
12	47.82	46.34	44.80	11.95	11.59	11.20	4.589	4.677	4.752
14	49.99	47.64	47.10	12.50	11.91	11.77	6.221	6.335	6.389
16	51.09	29.42	29.40	12.77	7.36	7.35	12.944	9.414	8.792
18	34.24	-	-	8.56	-	-	14.429	10.253	9.331

Lo snervamento delle barre inferiori si osserva in modo ancor più evidente dal grafico riportato in Figura 97, dove si osserva il plateau con un incremento di carico quasi trascurabile rispetto ai cicli precedenti (soprattutto nel travetto 1) a partire dallo spostamento di 8-9 mm. Si osserva inoltre come nell'ultimo ciclo di carico il travetto 3 non subisca alcun tipo di deformazione aggiuntiva in quanto il danno registrato negli altri è tale da incassare completamente la deformazione. Dal punto di vista del distacco si evidenzia come vi sia una prima fase di incremento del distacco raggiungendo circa 2.2 centesimi di millimetro per poi decrescere leggermente fino al ciclo a 16 mm dove in seguito al collasso si ha l'annullamento del distacco sul travetto rimasto integro mentre si ha un'importante crescita (4 centesimi di millimetro) nel travetto collassato. Va tuttavia sottolineato

come questi ragionamenti siano svolti sull'andamento qualitativo dei valori letti; analizzandolo in valore assoluto, l'entità del distacco risulta trascurabile, soprattutto se rapportato alle deformare in gioco.

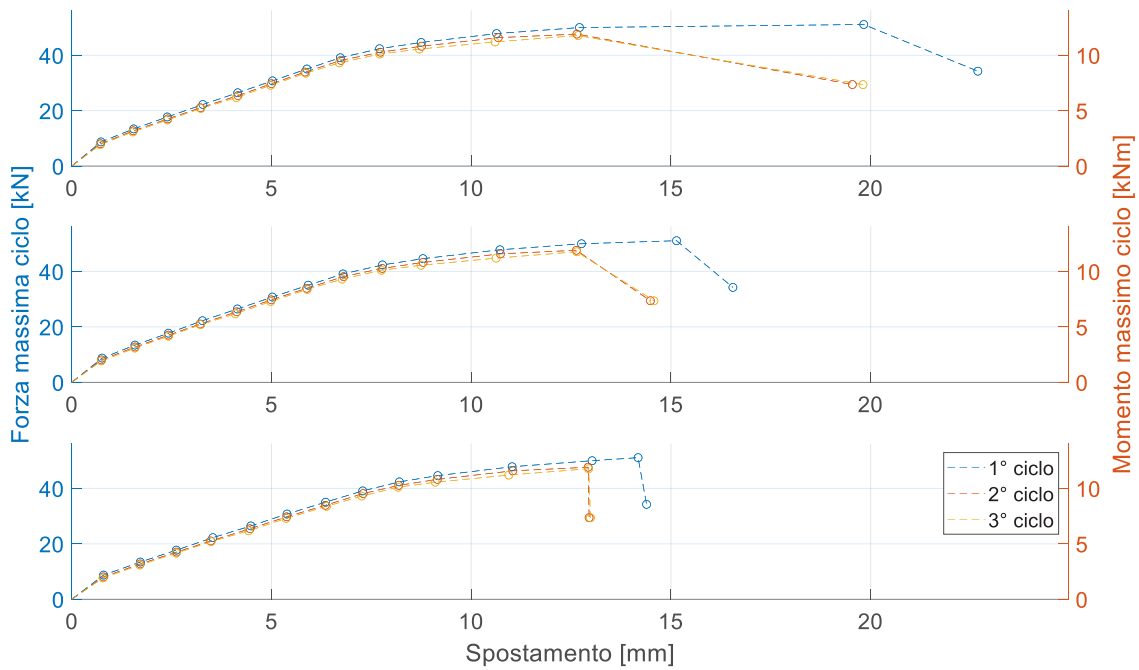


Figura 97 Grafico Carico/Momento massimo – Spostamento per ogni travetto

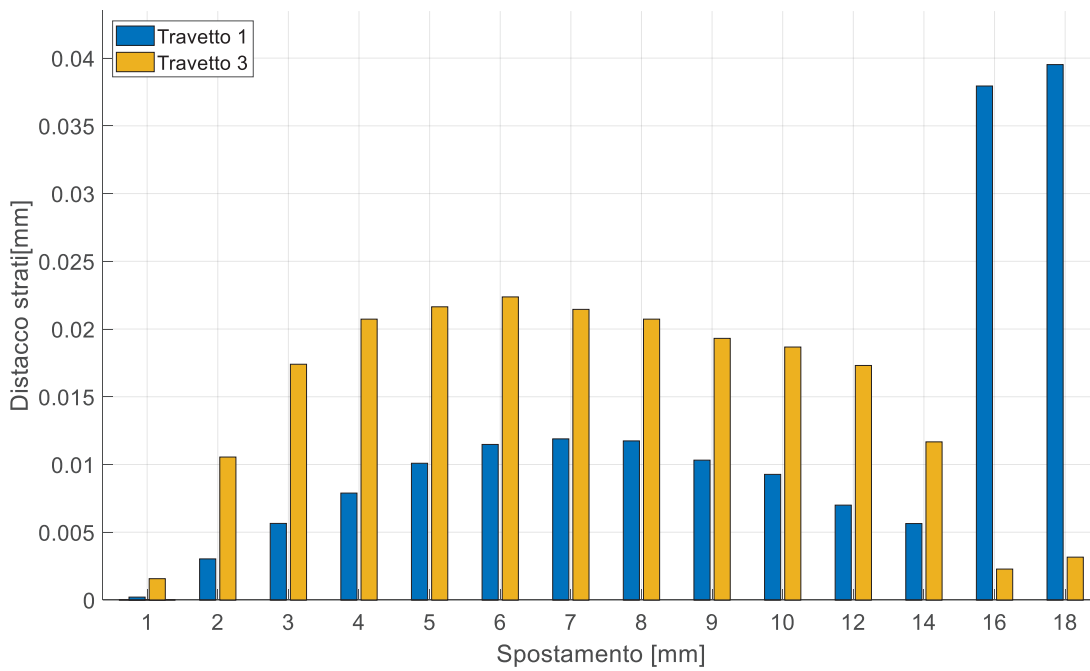


Figura 98 Distacco tra la cappa del solaio e lo strato dei rinforzo





*Figura 99 Condizioni dell'appoggio destro del travetto 1 a fine prova*



*Figura 100 Condizioni delle tavelle dopo aver rimosso lo strato inferiore (probabilmente non dovuto alla prova ma al ritiro della cappa di rinforzo)*



*Figura 101 Quadro fessurativo della cappa a fine prova (rosso pre-prova, verde post-prova)*



*Figura 102 Condizioni dell'appoggio destro del travetto 3 a fine prova*

#### 4.4.5 S4 - Solaio rinforzato con LECACLS 1400, L=4.25 m (prova in 4 punti)

##### *Condizioni del campione prima della prova*

Da Figura 103 a Figura 109 vengono mostrate le condizioni del campione prima di effettuare il test. Si osserva come i travetti costituenti il solaio siano contraddistinti da condizioni di degrado generale sia in prossimità degli appoggi che in prossimità della mezzeria. Si può infatti osservare un importante quadro fessurativo che evidenzia l'inizio della fase di espulsione del copriferro dell'intradosso dei travetti. In alcuni punti specifici, probabilmente a causa di urti in fase di trasporto e movimentazione, si è già verificata la rottura del copriferro.

Diversamente da quanto visto per i campioni "corti" rinforzati con il prodotto LECACLS 1400, la cappa di rinforzo presenta un importante quadro fessurativo dovuto al ritiro contrastato dello strato superiore. Questo ha inoltre portato a deformazioni residue sul solaio tendendo ad innalzare i travetti di bordo rispetto a quello centrale. L'entità di queste deformazioni è simile a quanto visto con i solai rinforzati con il MICROCALCESTRUZZO CENTROSTORICO. Probabilmente causati dalle maggiori dimensioni del solaio. Il setup di prova utilizzato per questo campione è quello della flessione in 4 punti con l'obiettivo di ottenere uno sforzo flessionale simile a quanto avviene con un carico uniformemente distribuito. Gli appoggi vengono pertanto posizionati a 125 mm dal bordo del solaio lasciando una luce libera di 4 m con i coltelli di applicazione del carico posizionati a circa 1 m dall'appoggio (2 metri tra i due coltelli), in questo caso la storia di carico viene modificata raddoppiando i valori di spostamento e mantenendo circa costante il rapporto freccia-luce.



*Figura 103 Quadro fessurativo della cappa collaborante prima di iniziare la prova*



*Figura 104 Rilievo della perdita della planarità dell'estradosso della cappa*





*Figura 105 Condizioni dell'appoggio destro del travetto 1 (in blu il rilievo delle fessure)*



*Figura 106 Condizioni dell'appoggio destro del travetto 3 (in blu il rilievo delle fessure)*



*Figura 107 Condizioni dell'appoggio sinistro del travetto 1 (in blu il rilievo delle fessure)*



*Figura 108 Condizioni dell'appoggio sinistro del travetto 3 (in blu il rilievo delle fessure)*



*Figura 109 Condizioni generali dei travetti ad inizio prova (in blu il rilievo delle fessure)*

#### *Risultati delle prove sperimentali*

Dal grafico mostrato in Figura 110 è possibile osservare il grafico forza/momento - spostamento dei singoli travetti. È interessante osservare come la curva non presenti un tratto post snervamento delle armature ma bensì cresca in modo lineare fino al raggiungimento del collasso del travetto 1 e 2, sopraggiunto al ciclo caratterizzato da uno spostamento nominale di 24 mm per un valore di carico totale pari a 112.5 kN (37.5 kN a travetto, 18.75 kNm) con una modalità di rottura tipica dei collassi a taglio. Applicando le ipotesi precedentemente indicate (modificando l'altezza utile a 230 mm) ed aggiornando la sezione resistenze in

acciaio ( $2\phi 10 + 1\phi 8$ ), otteniamo che il momento a snervamento è pari a 21.45 kNm, valore superiore a quanto ottenuto in fase sperimentale a conferma che il collasso è avvenuto per crisi a taglio dei travetti.

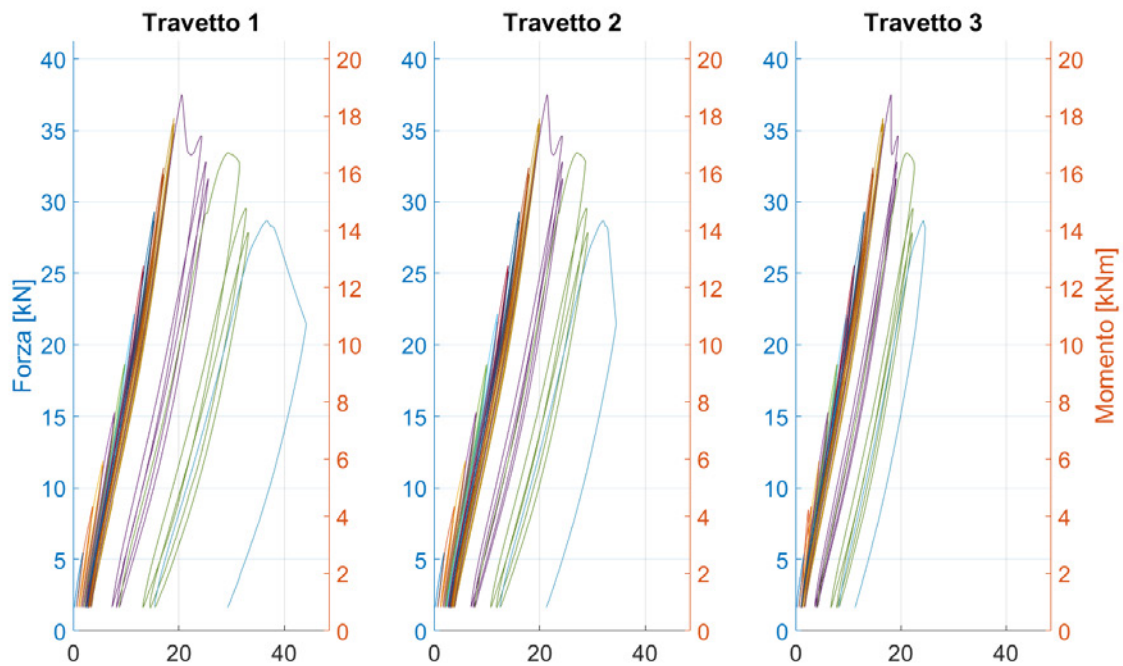


Figura 110 Grafico Forza/Momento – Spostamento dei singoli travetti [mm]

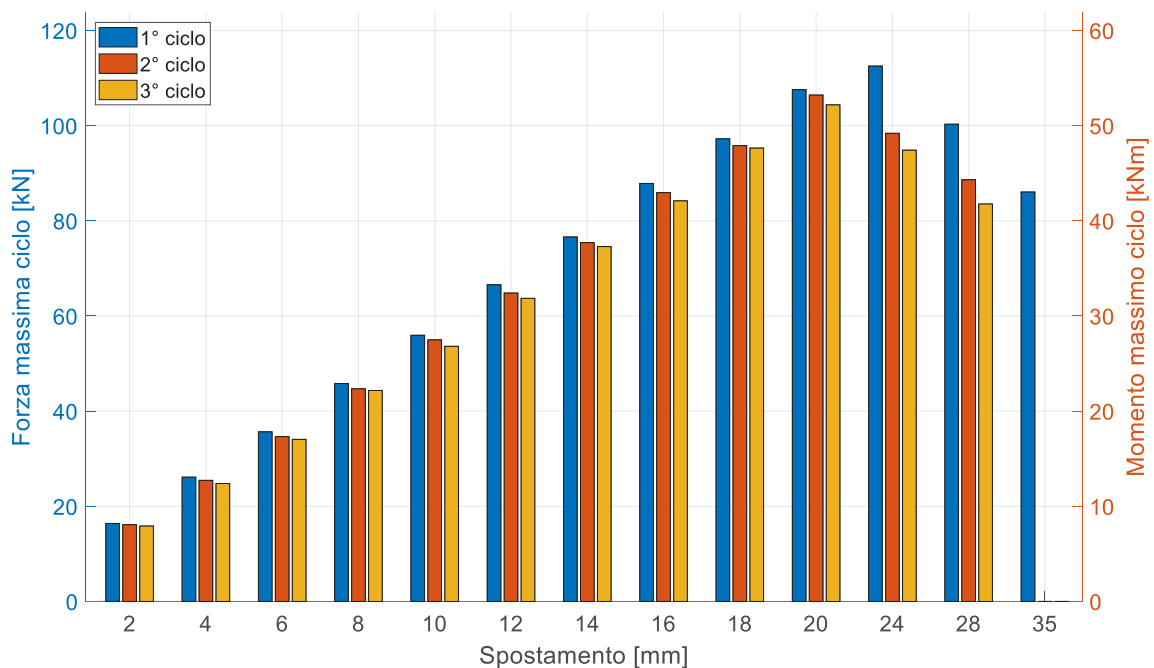


Figura 111 Grafico Forza/Momento massimo registrato per ogni ciclo di prova



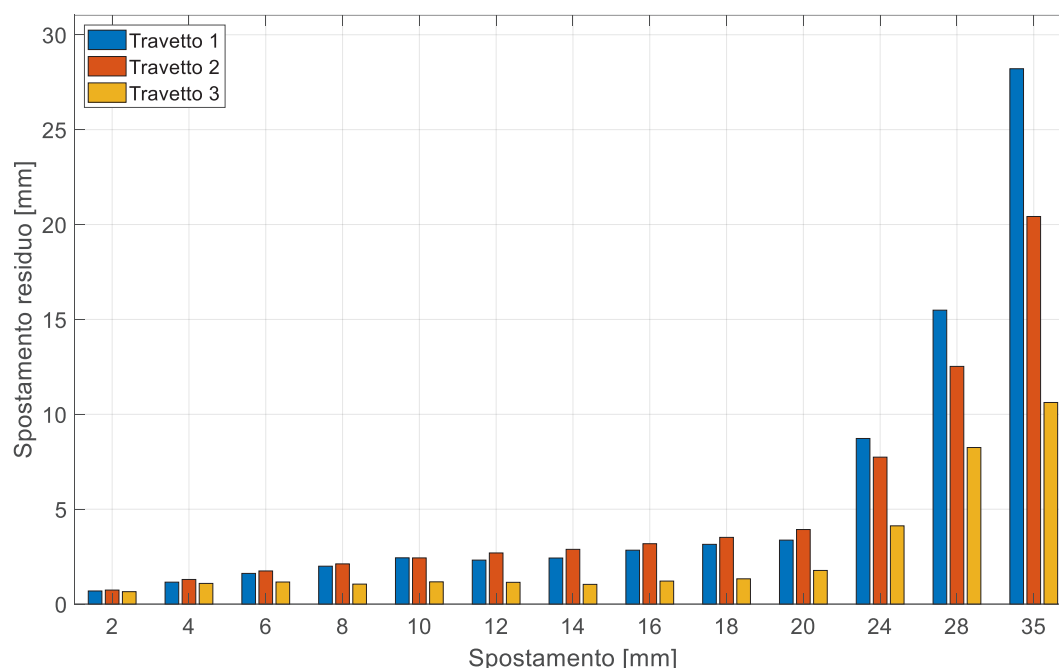


Figura 112 Valore dello spostamento residuo registrato al termine dell'ultimo ciclo ad un dato spostamento

Tabella 10 Riepilogo dei risultati della prova in termini di forza, momento sollecitante e spostamento residuo

Spostamento	Carico Singolo Travetto [kN]			Momento singolo travetto [kNm]			Spostamento Residuo [mm]		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Travetto 1	Travetto 2	Travetto 3
2	5.47	5.38	5.28	2.73	2.69	2.64	0.313	0.361	0.393
4	8.70	8.48	8.26	4.35	4.24	4.13	0.610	0.718	0.762
6	11.88	11.54	11.35	5.94	5.77	5.68	0.849	0.965	1.018
8	15.27	14.89	14.78	7.63	7.45	7.39	1.057	1.149	1.211
10	18.64	18.32	17.87	9.32	9.16	8.94	1.251	1.351	1.452
12	22.18	21.60	21.23	11.09	10.80	10.62	1.407	1.533	1.652
14	25.53	25.14	24.86	12.76	12.57	12.43	1.565	1.739	1.910
16	29.28	28.64	28.06	14.64	14.32	14.03	1.846	2.012	2.184
18	32.41	31.93	31.76	16.20	15.96	15.88	2.368	2.479	2.574
20	35.85	35.47	34.78	17.93	17.74	17.39	3.079	3.147	3.240
24	37.50	32.79	31.61	18.75	16.40	15.81	4.589	4.677	4.752
28	33.43	29.54	27.84	16.71	14.77	13.92	6.221	6.335	6.389
34	28.68	-	-	14.34	-	-	12.944	9.414	8.792

Quanto precedentemente indicato viene inoltre confermato dal grafico riportato in Figura 111 e Figura 113 dove si vede la perfetta linearità del carico fino al sopraggiungere del collasso. Analogo è anche il comportamento registrato per lo spostamento residuo che ha un brusco incremento al ciclo caratterizzato da 24 mm di spostamento e dal grafico relativo al distacco tra i due strati che cresce linearmente nel travetto 3 fino ad assestarsi al momento del collasso del travetto opposto (travetto 1). Viceversa, quest'ultimo ha valori molto limitati nelle prime fasi di prova per crescere molto rapidamente una volta verificatasi la rottura. Non vengono riportati i valori per i cicli superiori ad uno spostamento di 20 mm poiché la comparsa di una fessura in prossimità dello strumento ha reso i dati non attendibili (distacchi superiori a 5 mm anche quando i due strati continuavano ad essere molto vicini tra loro) e per questo si è deciso di non presentare i valori.

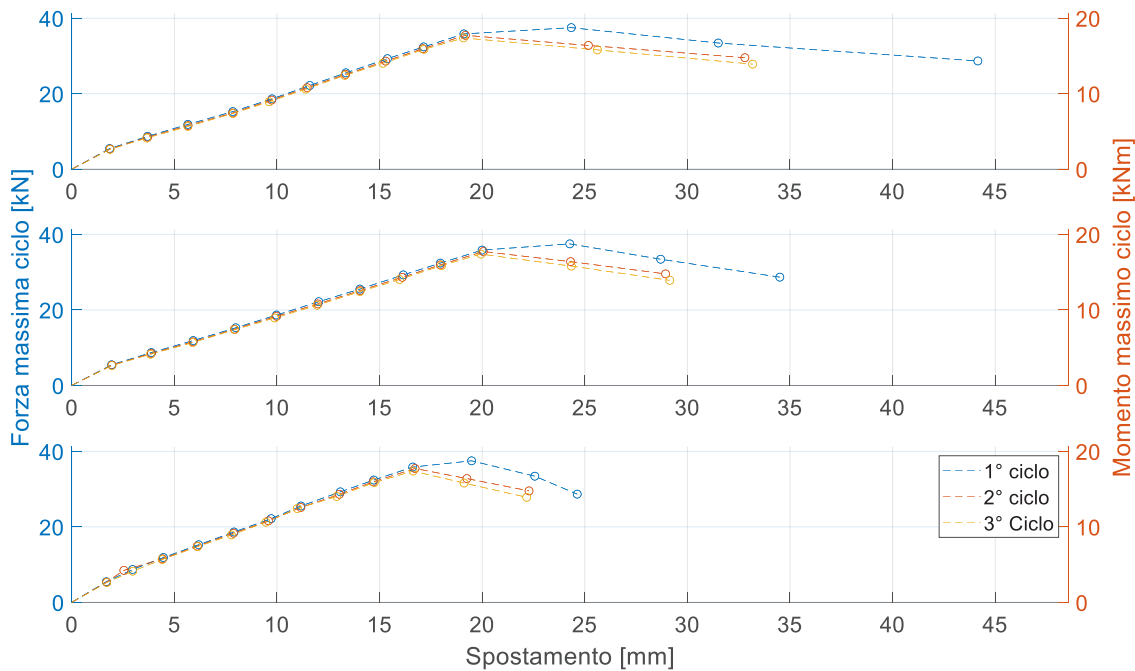


Figura 113 Grafico Carico/Momento massimo – Spostamento per ogni travetto

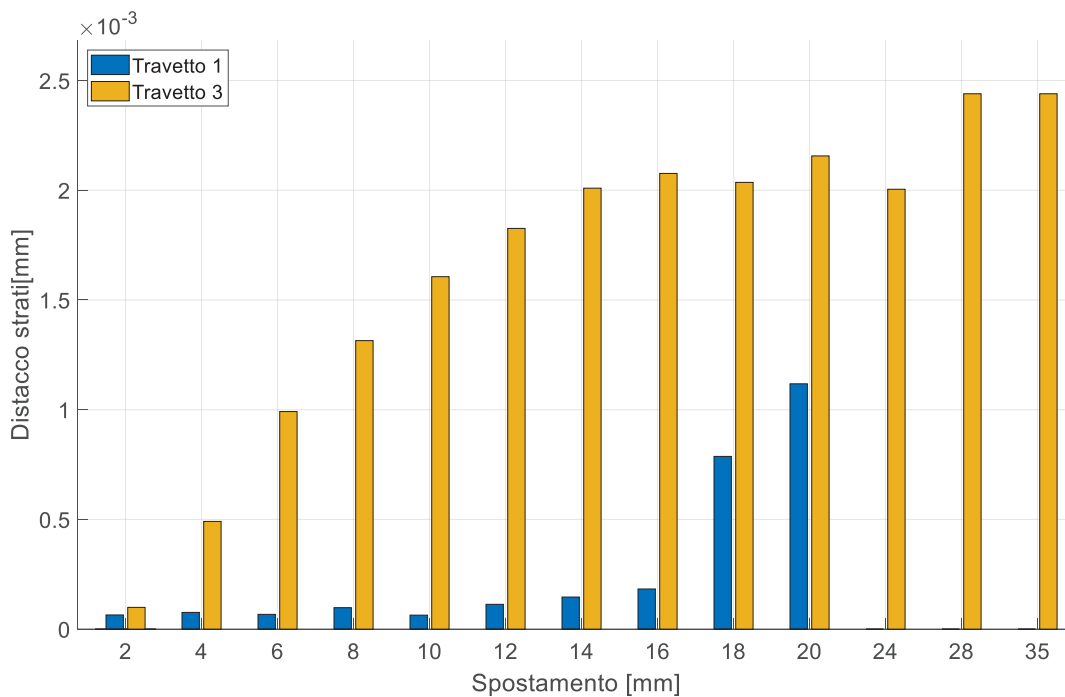


Figura 114 Distacco tra la cappa del solaio e lo strato dei rinforzo



Figura 115 Dettaglio del collasso per taglio dell'appoggio destro del travetto 1



Figura 116 Propagazione della fessura a taglio nella porzione centrale del travetto 1



Figura 117 Condizioni dell'appoggio destro del travetto 1 a fine prova



Figura 118 Condizioni dell'appoggio destro del travetto 3 a fine prova



Figura 119 Condizione dell'appoggio destro del travetto 2 a fine prova



Figura 120 Condizione generale del travetto 3 a fine prova

#### 4.4.6 S5 -Solaio non rinforzato, L=2.25 m (prova in 3 punti)

##### Condizioni del campione prima della prova

Di seguito, in Figura 121 - Figura 126, vengono mostrate le condizioni del campione prima di effettuare la prova, in particolare va sottolineato come durante le fasi di trasporto tra il punto in cui il campione è stato realizzato ed il banco prova, in seguito alla caduta di una tavella, il solaio si sia danneggiato spezzandosi in due porzioni con una fessura quasi parallela al travetto centrale. Il collasso completo del solaio è stato evitato



mediante un sistema di fasce e cricchetti messi a cerchiare il solaio stesso, questo ha consentito di salvare il solaio e verificare i danni riportati dopo averlo correttamente collocato all'interno del banco prova. In particolare, una volta messo in posizione il solaio è stato "riparato" andando a sigillare la fessura colando una resina epossidica bicomponente ad alte prestazioni, caratterizzata da una resistenza a trazione maggiore della resistenza del calcestruzzo che ha consentito di ricostruire la monoliticità dell'elemento. Si ipotizza infatti che, vista la natura e la direzione della fessura (parallela ai travetti) questa non porti ad una riduzione della resistenza del solaio ma bensì, nel caso in cui non fosse stata riparata, modificherebbe la risposta in quanto non verrebbe garantita la risposta d'insieme ma di due singole componenti separate.

Oltre a questo imprevisto generato in fase di movimentazione, va segnalato come i travetti evidenzino una condizione generale di degrado dal punto di vista superficiale con la presenza di vegetazione e muschi. Dal punto di vista strutturale invece non si osserva un quadro fessurativo particolare se non la rottura del copriferro in alcuni punti in prossimità dell'appoggio, evidenziando come lo stato delle armature sia fortemente corroso.



*Figura 121 Dettaglio degli appoggi in cui si può osservare la condizione del travetto prima della prova*



*Figura 122 Vista del campione in prossimità degli appoggi con evidente espulsione di copriferro*



*Figura 123 Vista da sotto del solaio in cui si osserva la presenza delle tavole e dell'intradosso dei travetti*



*Figura 124 Vista superiore del solaio*



Figura 125 Dettaglio della fessura formata in fase di trasporto del provino e successivamente riparata con resina epossidica bicomponente



Figura 126 Dettaglio della fessura formata in fase di trasporto del provino e successivamente riparata con resina epossidica bicomponente

#### Risultati delle prove sperimentali

Di seguito vengono riportati i grafici di prova utilizzando la modalità di presentazione descritta al capitolo 4.3. Già dal grafico mostrato in Figura 127 si può osservare come il collasso del solaio sia avvenuto in modo non uniforme. Troviamo infatti come il grafico del travetto 3 sia molto compatto rispetto a tutti gli altri ed in particolar modo rispetto al grafico del travetto 1. Questo è sintomo di una rottura non omogenea del solaio, che può essere associata a differenti modalità di ripartizione del carico o a diversi stati di degrado dei travetti. Si osserva inoltre come nei primi cicli le curve risultino essere molto schiacciate tra di loro e con andamento lineare mentre negli ultimi si evidenzia una maggior distanza tra i vari cicli. Questo risultato lo si può osservare in modo più approfondito anche dal grafico riportato in Figura 129 dove si osserva una crescita lineare dello spostamento residuo fino al ciclo di 10 mm per poi avere una crescita esponenziale che porta alla rottura del primo travetto.

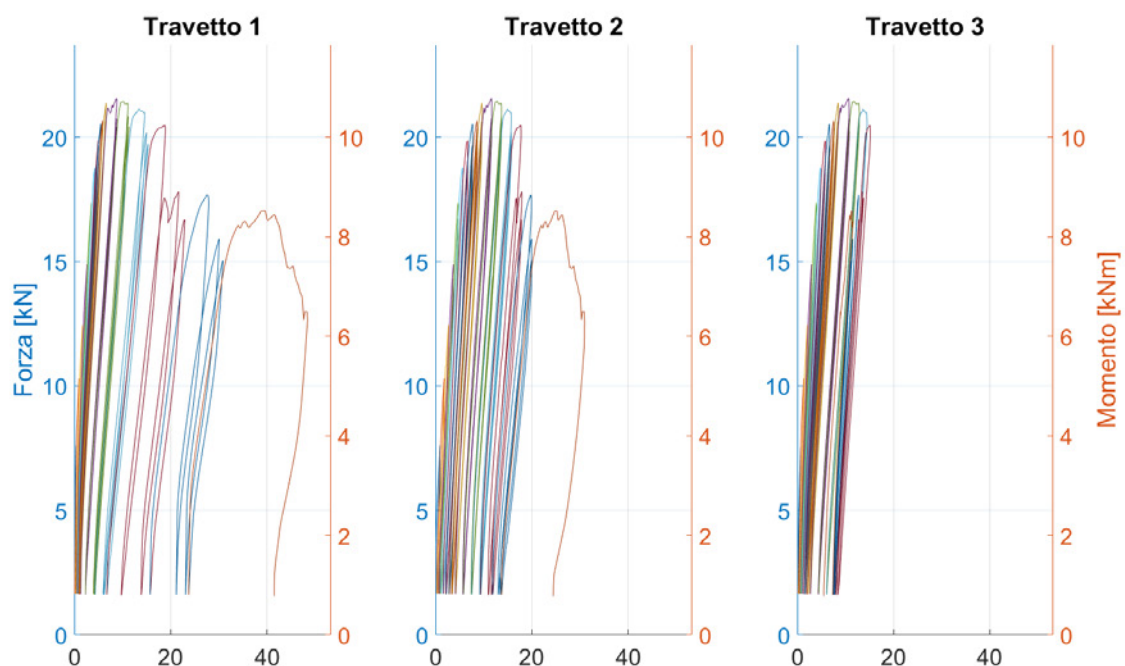


Figura 127 Grafico Forza/Momento – Spostamento dei singoli travetti [mm]

Analogamente dal grafico in Figura 128 si osserva come il carico di prova cresce fino al ciclo caratterizzato da uno spostamento di 12 mm in cui viene registrato un carico totale di 64.65 kN, (circa 22 kN a travetto con 11

kNm di momento sollecitante) per poi decrescere progressivamente fino ad un'importante caduta al ciclo caratterizzato da 18 mm nominali di spostamento.

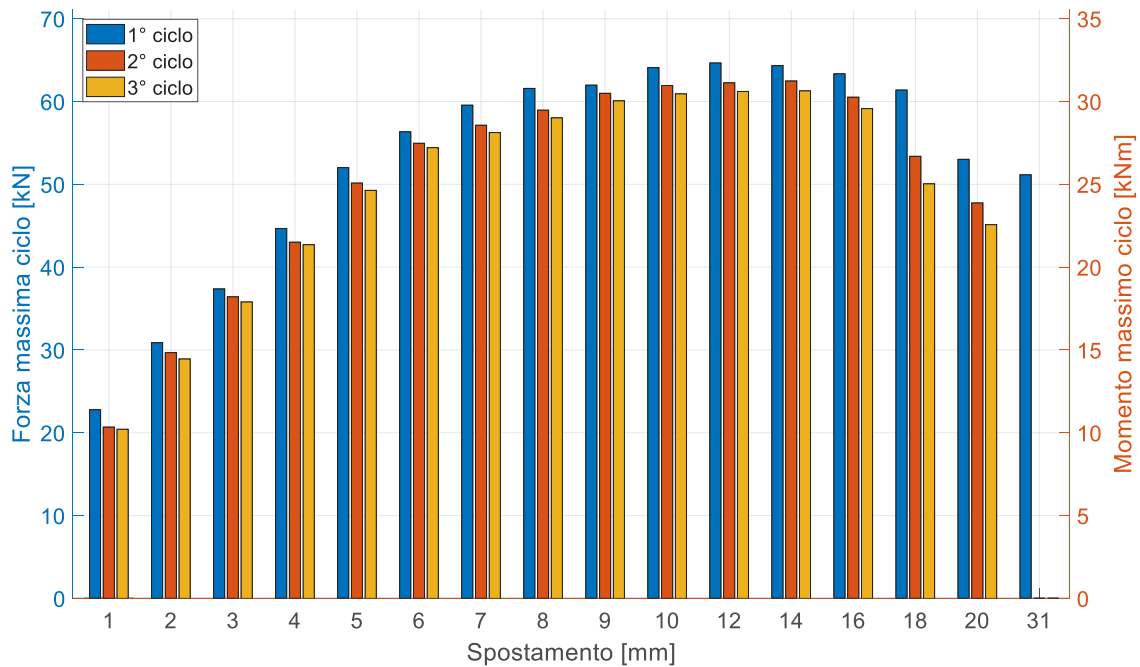


Figura 128 Grafico Forza/Momento massimo registrato per ogni ciclo di prova

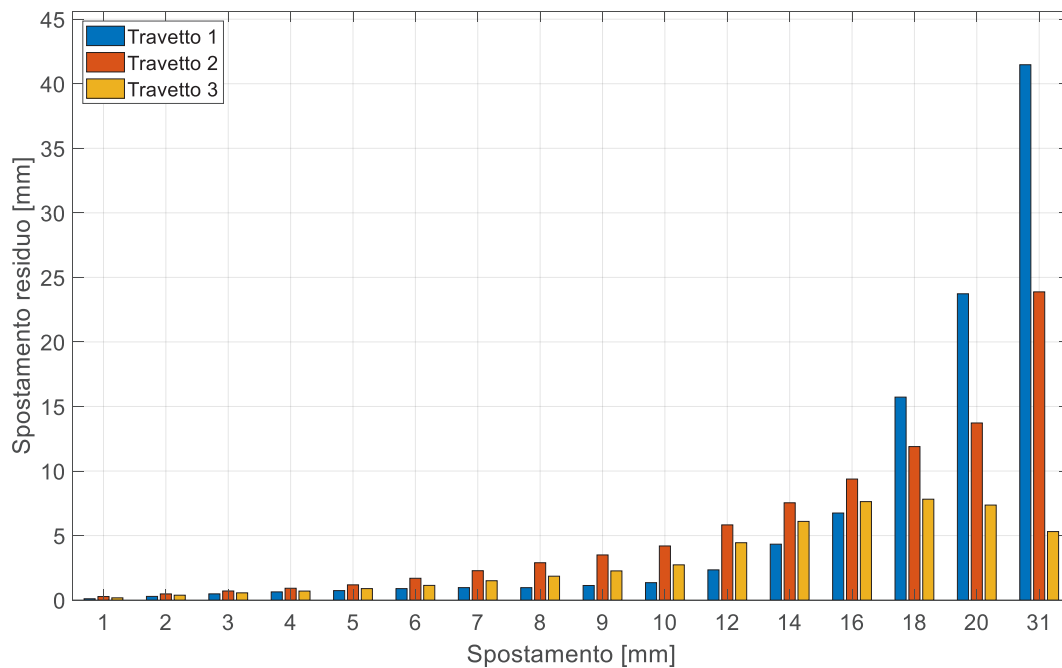


Figura 129 Valore dello spostamento residuo registrato al termine dell'ultimo ciclo ad un dato spostamento

Tabella 11 Riepilogo dei risultati della prova in termini di forza, momento sollecitante e spostamento residuo

Spostamento	Carico Singolo Travetto [kN]			Momento singolo travetto [kNm]			Spostamento Residuo [mm]		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Travetto 1	Travetto 2	Travetto 3
1	7.59	6.89	6.81	3.80	3.45	3.40	0.103	0.275	0.176
2	10.29	9.89	9.63	5.15	4.94	4.82	0.287	0.479	0.380



4	14.89	14.34	14.24	7.44	7.17	7.12	0.636	0.918	0.700
5	17.34	16.71	16.42	8.67	8.36	8.21	0.735	1.182	0.891
6	18.78	18.32	18.14	9.39	9.16	9.07	0.890	1.691	1.140
7	19.85	19.04	18.75	9.92	9.52	9.37	0.966	2.278	1.501
8	20.53	19.65	19.34	10.26	9.82	9.67	0.964	2.894	1.852
9	20.66	20.33	20.03	10.33	10.16	10.01	1.132	3.498	2.262
10	21.37	20.64	20.31	10.68	10.32	10.15	1.351	4.194	2.731
12	21.55	20.75	20.40	10.77	10.37	10.20	2.342	5.826	4.445
14	21.45	20.82	20.43	10.72	10.41	10.21	4.332	7.538	6.096
16	21.11	20.17	19.71	10.56	10.09	9.86	6.746	9.377	7.630
18	20.46	17.79	16.69	10.23	8.90	8.34	15.724	11.892	7.817
20	17.67	15.91	15.04	8.84	7.96	7.52	23.728	13.721	7.362
31	17.05	-	-	8.52	-	-	41.471	23.877	5.309

Dal grafico riportato in Figura 130, è possibile osservare il comportamento generale dei singoli travetti in cui si osserva come vi sia una riduzione tra il primo ciclo ed i successivi mentre sia estremamente limitata tra il secondo ed il terzo. È inoltre interessante osservare come, nota l'armatura ed ipotizzando uno sforzo di snervamento di 450 MPa ed un'altezza utile di 180 mm, attraverso la formulazione analitica si può stimare un momento a snervamento di 9.043 kNm. Si osserva infatti tutto un tratto di prova a forza quasi costante in cui è stato raggiunto il carico di snervamento e si manifesta la plasticizzazione dell'armatura dei travetti. Il collasso sopraggiunge al ciclo di 20 mm per collasso a taglio del primo travetto, come si può osservare nelle figure successive.

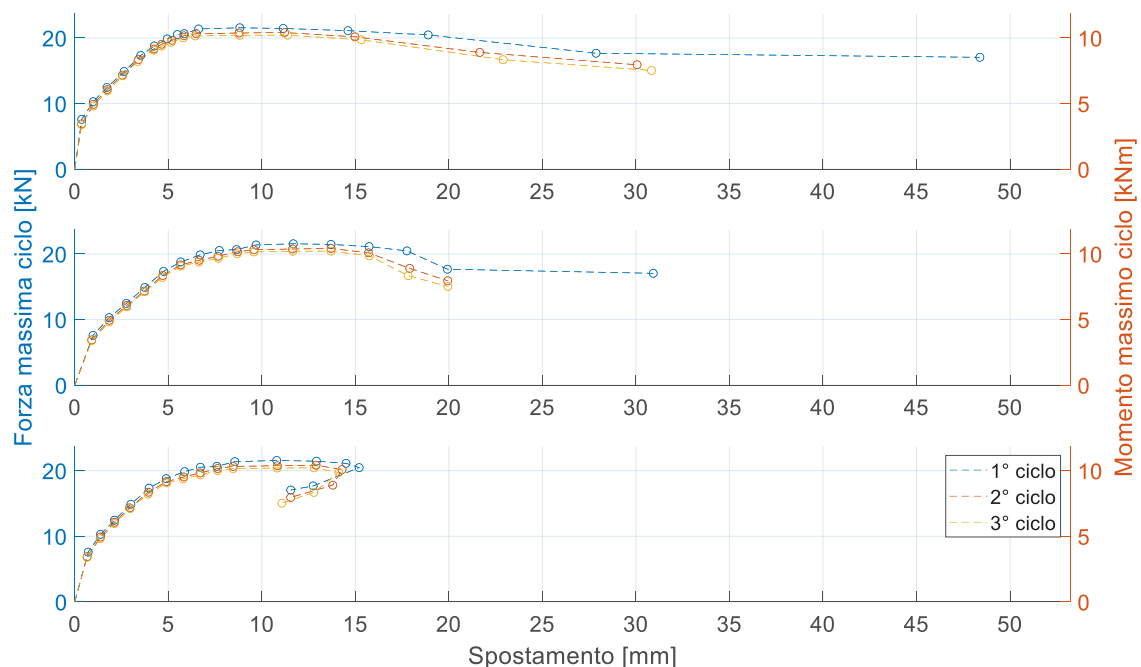


Figura 130 Grafico Carico/Momento massimo – Spostamento per ogni travetto



*Figura 131 Formazione della cerniera plastica in mezzaria del travetto con la presenza di fessure perpendicolari al travetto*



*Figura 132 Fessura a taglio nel travetto 1 che ha portato alla perdita di capacità portante del solaio*



*Figura 133 Fessura a taglio nel travetto 2 (centrale) che ha portato alla perdita di capacità portante del solaio*



*Figura 134 Condizione delle pignatte superiori a fine prova*



*Figura 135 Condizioni dell'estradosso del solaio a fine prova*





*Figura 136 Dettaglio della formazioni di una nuova fessura parallela al travetto a fine prova in posizione esterna alla zona riparata*



*Figura 137 Formazione della fessura all'intradosso a seguito del collasso differenziale dei travetti*

#### 4.4.7 S6 -Solaio rinforzato con LECACLS 1400, L=2.25 m (prova in 3 punti)

##### *Condizioni del campione prima della prova*

Da Figura 138 a Figura 141 vengono mostrate le condizioni del campione prima di effettuare il test. Si osserva come i travetti costituenti il solaio siano contraddistinti da buone condizioni di conservazione. Dal punto di vista del rilievo del quadro fessurativo si evidenzia solo una leggera fessurazione nella porzione centrale dei travetti d'estremità. Analogamente gli appoggi sembrano essere in buone condizioni con solo un accenno di fessurazione ed espulsione di copriferro in due angoli, in posizioni comunque esterne rispetto all'appoggio. Dal punto di vista superficiale i travetti sembrano ben conservati (probabilmente vengono riparati dagli altri più degradati) e non presentano muschi e vegetazione sulla superficie. A differenza dei provini rinforzato con il MICROCALCESTRUZZO CENTROSTORICO non si registrano particolari deformazioni del solaio per ritiro della cappa di rinforzo. Il setup di prova viene mantenuto lo stesso utilizzato per il solaio non rinforzato (paragrafo 4.4.6), mantenendo una distanza tra gli appoggi di 2.00 m (appoggi posizionati a 12.5 cm dai bordi) ed il punto di applicazione del carico in mezzeria al solaio.



*Figura 138 Quadro fessurativo del travetto 1 prima di iniziare la prova*



*Figura 139 Condizioni del travetto 3 prima di iniziare la prova*





Figura 140 Condizione dell'appoggio destro del travetto 1 ad inizio prova



Figura 141 Condizione dell'appoggio sinistro del travetto 3 ad inizio prova

#### *Risultati delle prove sperimentali*

Dal grafico mostrato in Figura 142 viene mostrato il grafico forza/momento - spostamento dei singoli travetti. È evidente come la modalità di rottura sia avvenuta in seguito ad un'importante plasticizzazione degli elementi. Abbiamo infatti tutta una porzione di grafico in cui le curve traslano verso destra mantenendo una rigidità pressoché invariata. Si evidenzia inoltre come la modalità di rottura abbia interessato in modo particolare i travetti 1 e 2 in quanto presentano gli ultimi cicli ben più ampi rispetto al travetto 3 che vede lo spostamento rimanere fermo ai valori imposti dai cicli precedenti. Questo è dovuto alla rottura improvvisa dei travetti 1 e 2 che ha portato a concentrare tutte le deformazioni in quei punti specifici senza lasciare la possibilità di distribuire il carico in tutti i punti. Per questa prova si osserva come il carico massimo sia stato raggiunto in corrispondenza del ciclo caratterizzato da uno spostamento di 30 mm e sia pari a 106.77 kN (35.59 kN a travetto, pari a 17.79 kNm) con una improvvisa perdita della resistenza (superiore al 20% rispetto al carico massimo) al secondo ciclo della prova caratterizzata da uno spostamento di 35 mm. Dopo aver registrato una perdita di carico superiore al 15% del carico massimo si è deciso di interrompere il test ciclico e terminare il test con una rampa monotona per valutare il comportamento residuo del solaio. Purtroppo, a causa dell'eccessiva deformazione del travetto 1 (il solaio va in appoggio sui "i binari" utilizzati per inserire il campione in macchina), il test viene interrotto per uno spostamento nominale del punto di controllo di 38 mm. In questo caso, utilizzando le stesse ipotesi applicate al paragrafo 4.4.6 (incrementando l'altezza utile dello spessore della cappa) è possibile stimare un momento a snervamento pari a 11.304 kNm inferiore al massimo momento sollecitante raggiunto. Dal punto di vista dello spostamento residuo si evidenzia una crescita pressoché costante in tutti i travetti ad eccezione del travetto 1 in seguito al ciclo che ha portato alla rottura a taglio.

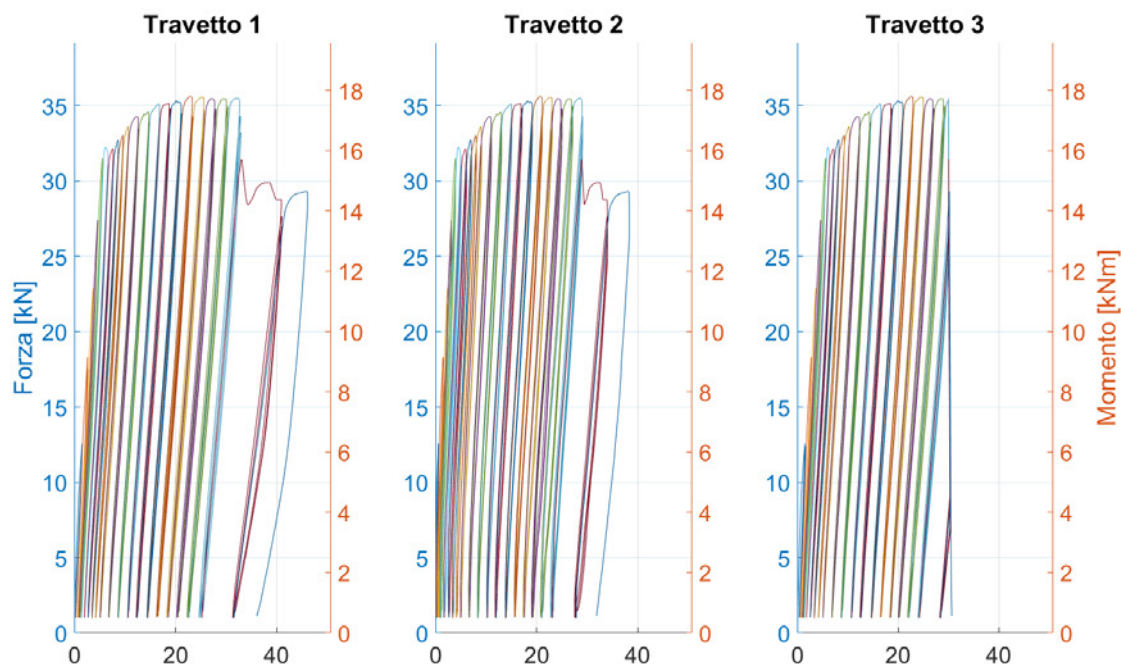


Figura 142 Grafico Forza/Momento – Spostamento dei singoli travetti [mm]

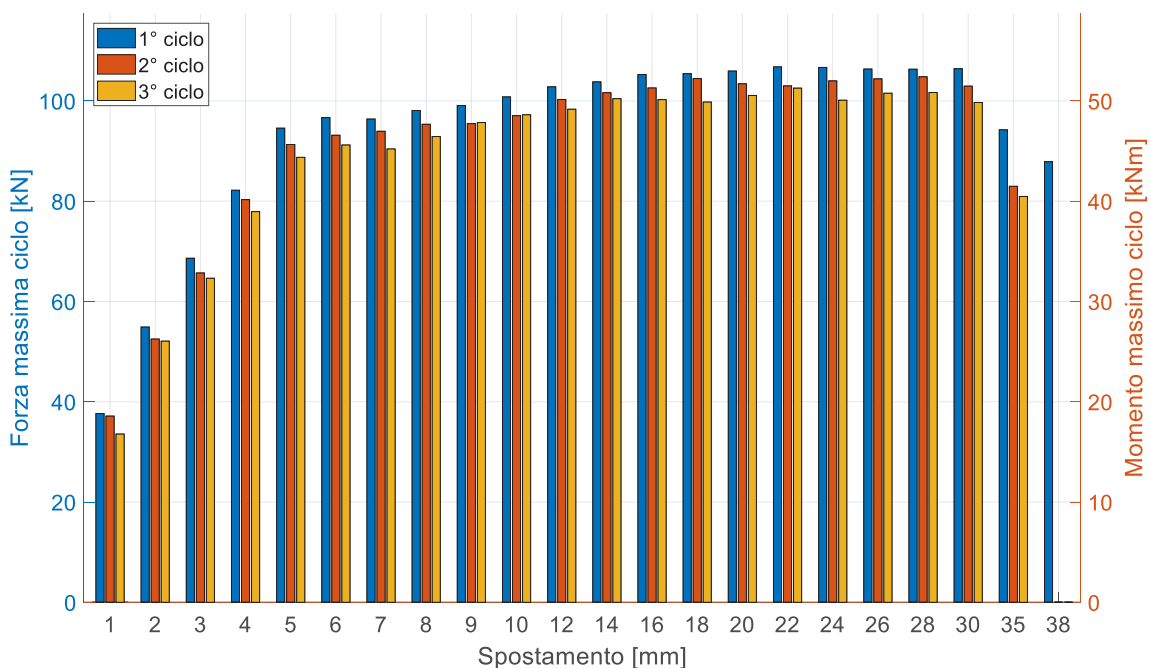


Figura 143 Grafico Forza/Momento massimo registrato per ogni ciclo di prova

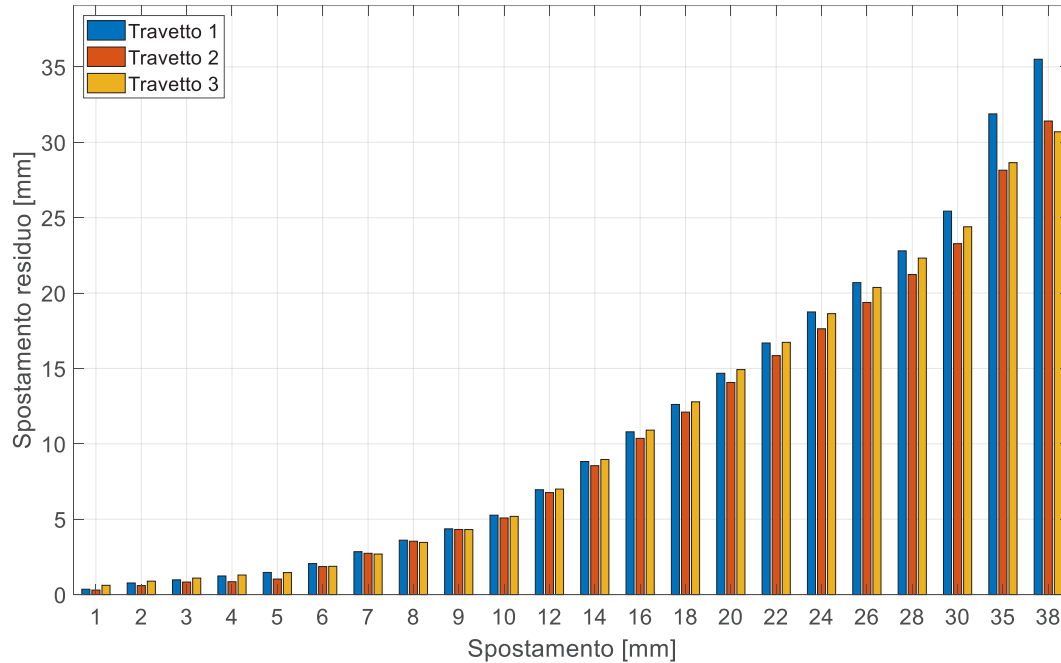


Figura 144 Valore dello spostamento residuo registrato al termine dell'ultimo ciclo ad un dato spostamento

Tabella 12 Riepilogo dei risultati della prova in termini di forza, momento sollecitante e spostamento residuo

Spostamento	Carico Singolo Travetto [kN]			Momento singolo travetto [kNm]			Spostamento Residuo [mm]		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Travetto 1	Travetto 2	Travetto 3
1	12.55	12.38	11.18	6.28	6.19	5.59	0.356	0.300	0.616
2	18.30	17.50	17.36	9.15	8.75	8.68	0.771	0.598	0.891
3	22.87	21.89	21.54	11.43	10.95	10.77	0.978	0.832	1.095
4	27.39	26.77	25.97	13.70	13.38	12.99	1.235	0.852	1.299
5	31.52	30.43	29.58	15.76	15.22	14.79	1.469	1.030	1.460
6	32.22	31.05	30.40	16.11	15.52	15.20	2.056	1.859	1.875
7	32.12	31.31	30.13	16.06	15.66	15.07	2.846	2.739	2.690
8	32.70	31.78	30.96	16.35	15.89	15.48	3.609	3.540	3.462
9	33.03	31.83	31.90	16.51	15.91	15.95	4.361	4.321	4.315
10	33.60	32.35	32.41	16.80	16.18	16.20	5.268	5.083	5.188
12	34.27	33.43	32.78	17.13	16.71	16.39	6.955	6.766	6.999
14	34.60	33.88	33.48	17.30	16.94	16.74	8.827	8.550	8.963
16	35.09	34.19	33.42	17.54	17.10	16.71	10.796	10.362	10.908
18	35.14	34.82	33.25	17.57	17.41	16.63	12.612	12.103	12.786
20	35.32	34.47	33.70	17.66	17.23	16.85	14.680	14.066	14.924
22	35.59	34.33	34.18	17.80	17.16	17.09	16.688	15.849	16.732
24	35.56	34.66	33.38	17.78	17.33	16.69	18.747	17.630	18.634
26	35.45	34.80	33.84	17.72	17.40	16.92	20.691	19.376	20.373
28	35.44	34.94	33.89	17.72	17.47	16.95	22.799	21.229	22.318
30	35.47	34.31	33.23	17.74	17.16	16.61	25.434	23.274	24.394
35	31.41	27.65	26.98	15.70	13.83	13.49	31.883	28.149	28.649
38	29.29	0.00	0.00	14.65	0.00	0.00	35.508	31.410	28.649



In Figura 145 è evidente la modalità di rottura a flessione del provino, in particolare la curva si mostra con un comportamento bilineare, con il primo tratto caratterizzato dalla rigidezza elastica (fino a 5 mm circa) ed il secondo tratto con rigidezza molto inferiore che tuttavia si propaga fino ad uno spostamento di oltre 5 volte lo spostamento elastico del campione. Dal punto di vista del distacco tra cappa collaborante e substrato si osserva come il travetto 1 registri valori ridotti nei primi cicli per superare in modo deciso i valori letti dal travetto 3 in corrispondenza del cambio di pendenza del grafico fino a raggiungere valori di circa 0.16 mm. Viceversa, il travetto 3 (che ricordiamo essere quello integro a fine prova) mantiene un valore di distacco sempre inferiore a 0.02 mm.

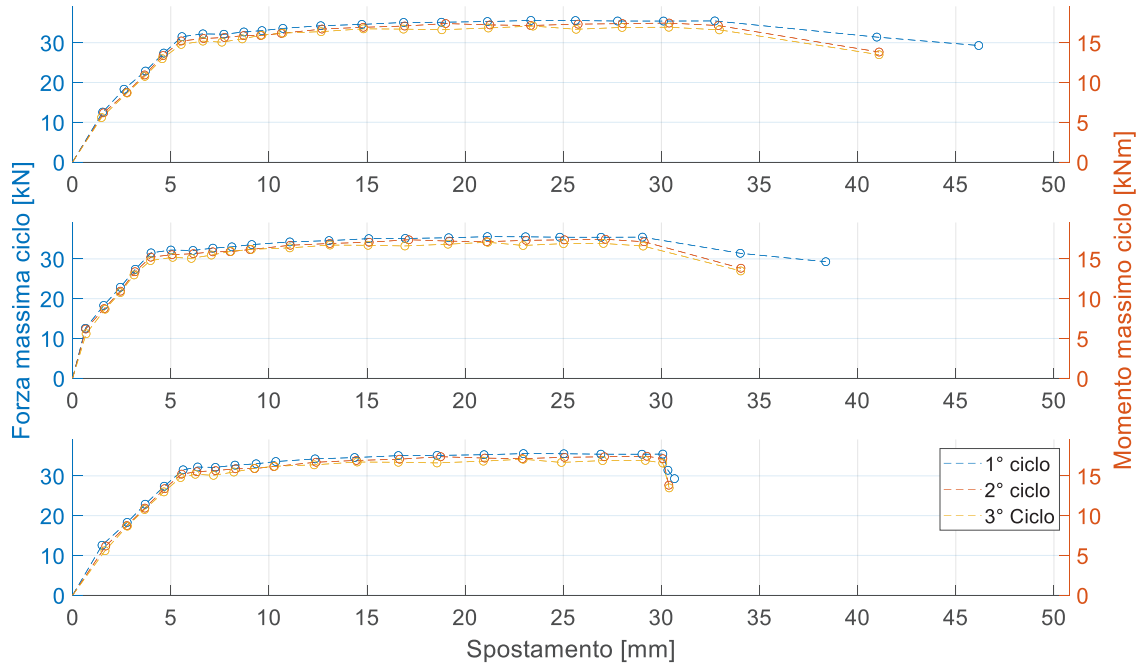


Figura 145 Grafico Carico/Momento massimo – Spostamento per ogni travetto

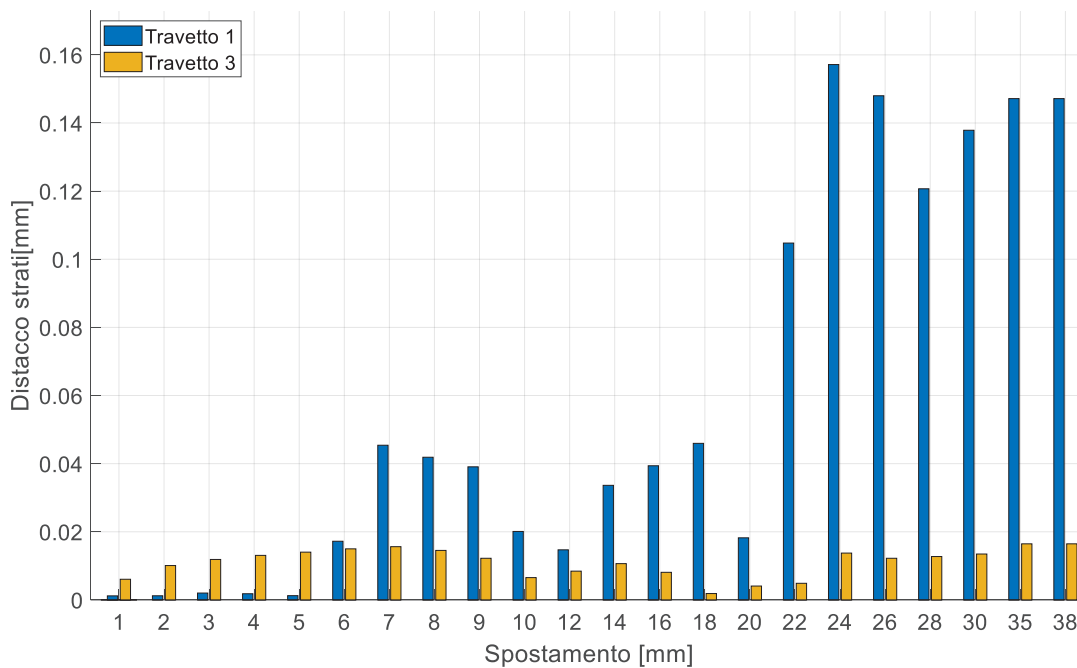


Figura 146 Distacco tra la cappa del solaio e lo strato dei rinforzo

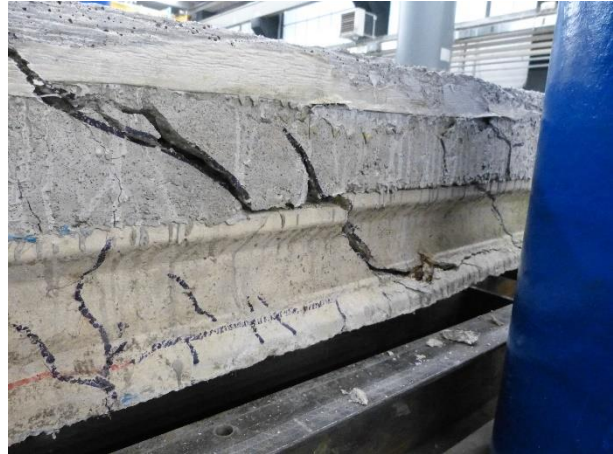


Figura 147 Condizioni del travetto 1 a fine prova con dettaglio della rottura a taglio del travetto



Figura 148 Condizioni del travetto 3 a fine prova



Figura 149 Condizioni del travetto centrale a fine prova



Figura 150 Condizioni dell'appoggio destro del travetto 1 a fine prova

#### 4.4.8 S7 - Solaio rinforzato con MICROCALCESTRUZZO CENTROSTORICO, L=2.25 m (prova in 3 punti)

##### Condizioni del campione prima della prova

Da Figura 151 a Figura 158 vengono mostrate le condizioni del campione prima di effettuare il test. Si osserva come i travetti costituenti il solaio siano contraddistinti da condizioni di degrado da considerarsi nella media rispetto a quelli disponibili. In particolare, si evidenzia un'importante espulsione di copriferro in mezzera per i travetti laterali (in corrispondenza dell'armatura tesa) e in prossimità dell'appoggio destro del travetto centrali. Come per l'altro caso di solaio rinforzato con il MICROCALCESTRUZZO CENTROSTORICO si evidenzia un



importante deformazione del solaio, generata dal ritiro differenziale tra il prodotto di rinforzo ed il substrato esistente. In particolare, si evidenzia un'importante perdita di planarità della superficie con un innalzamento dei quattro spigoli del solaio di circa 20 mm portando una rottura per eccessivo sforzo di trazione nelle tavelle con un evidente quadro fessurativo della cappa stessa. In questo caso, viene mantenuto lo stesso setup di prova utilizzato per il solaio non rinforzato (paragrafo 4.4.6) ed il solaio rinforzato con LECACLS 1400 (paragrafo 4.4.7), mantenendo una distanza tra gli appoggi di 2.00 m (appoggi posizionati a 12.5 cm dai bordi) ed il punto di applicazione del carico in mezzzeria al solaio.

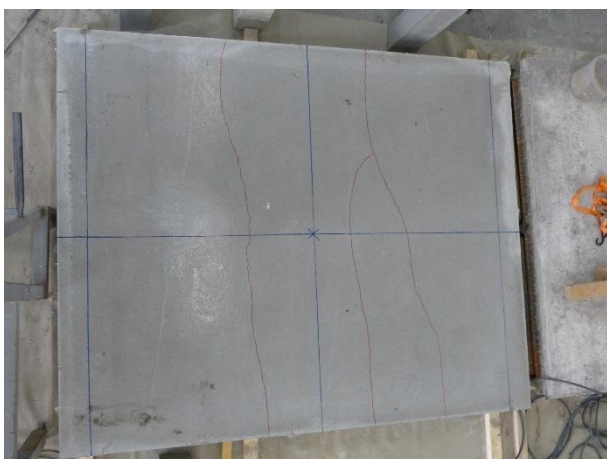


Figura 151 Quadro fessurativo della cappa collaborante prima di iniziare la prova



Figura 152 Dettaglio delle rotture per trazione nelle tavelle in laterizio (condizione pre-prova)



Figura 153 Rilievo del sollevamento dello spigolo sinistro del travetto 1



Figura 154 Rilievo del sollevamento dello spigolo destro del travetto 1





Figura 155 Condizioni dei travetti a inizio prova



Figura 156 Condizioni dei travetti a inizio prova



Figura 157 Condizioni dei travetti a inizio prova  
(fessure evidenziate in rosso)



Figura 158 Condizioni delle tavole ad inizio prova  
(rottura per ritiro contrastato della cappa  
collaborante)

#### Risultati delle prove sperimentali

Dal grafico mostrato in Figura 159 viene mostrato il grafico forza/momento - spostamento dei singoli travetti. È interessante osservare come le deformazioni siano molto simili in tutti e tre i travetti, questo è sintomo di una buona omogeneità del campione e di una buona distribuzione del carico di prova. Il collasso del solaio arriva solo in seguito al ciclo caratterizzato da uno spostamento di 18 mm con un carico massimo agente pari a 91.04 kN (30.34 kN a travetto, pari a 15.17 kNm) con una progressiva perdita del carico massimo raggiunto. Il test viene terminato con un ciclo singolo a spostamento di 41 mm. La buona redistribuzione dei carichi da parte del solaio la si può osservare anche dal grafico relativo allo spostamento residuo in cui si evidenzia come i tre travetti abbiano valori molto simili tra di loro per tutti i cicli di prova. Ricordando che il momento resistente della sezione è stimato in circa 10.4 kNm, come riportato nel paragrafo 4.4.4 si può affermare che la rottura è avvenuta attraverso un meccanismo di flessione per snervamento delle barre d'armatura.

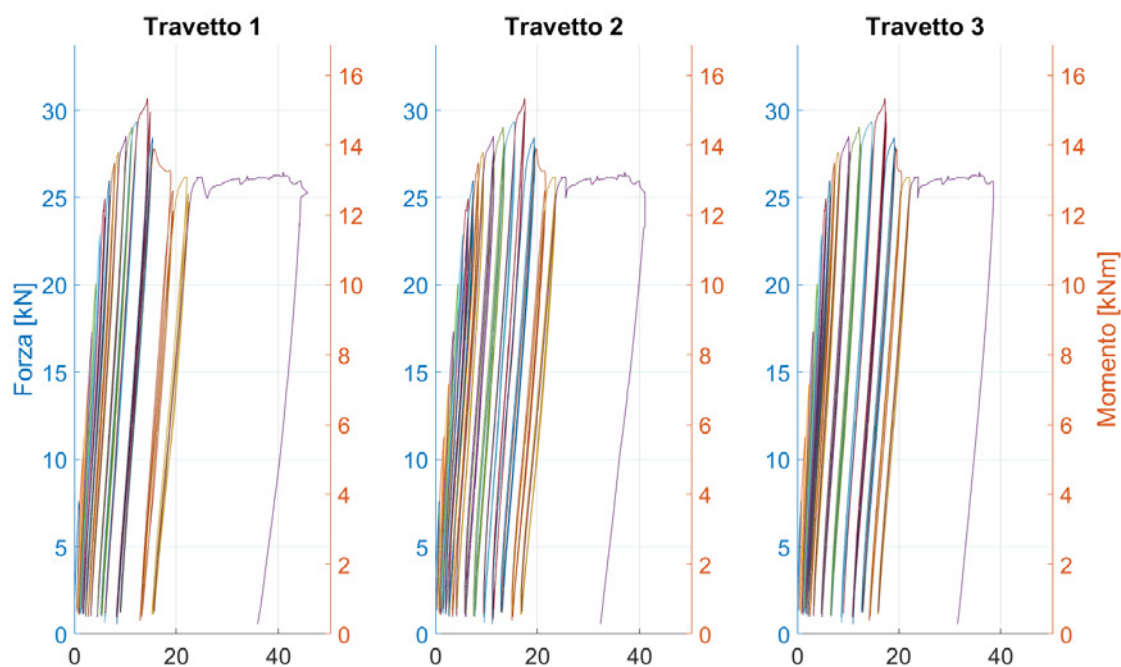


Figura 159 Grafico Forza/Momento – Spostamento dei singoli travetti [mm]

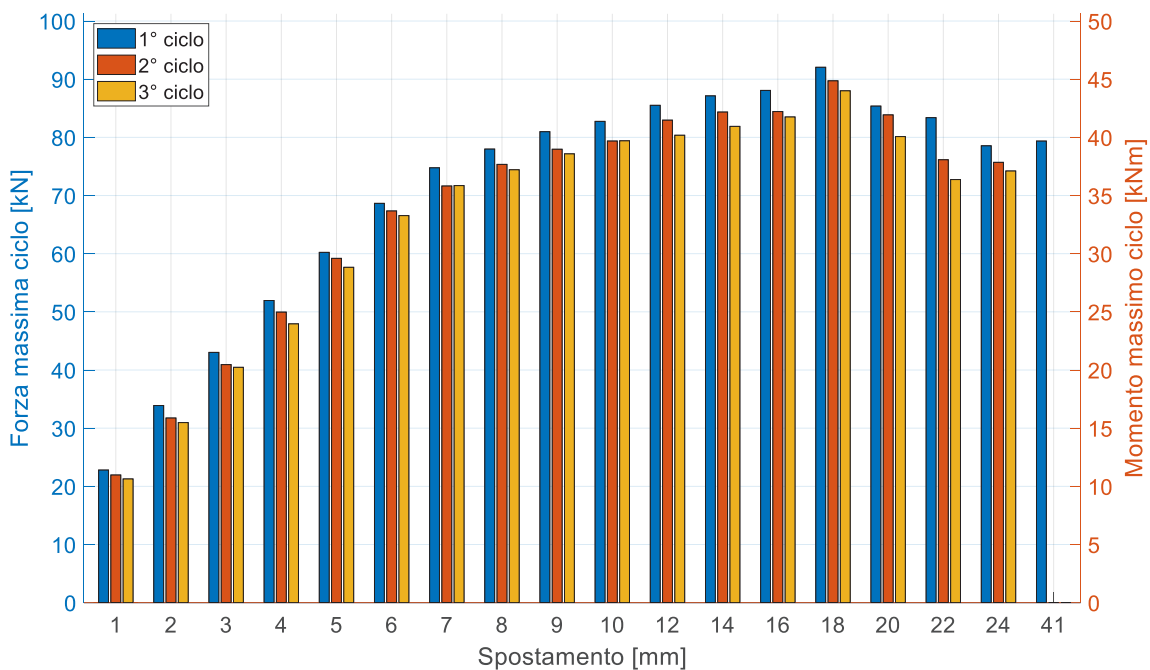


Figura 160 Grafico Forza/Momento massimo registrato per ogni ciclo di prova

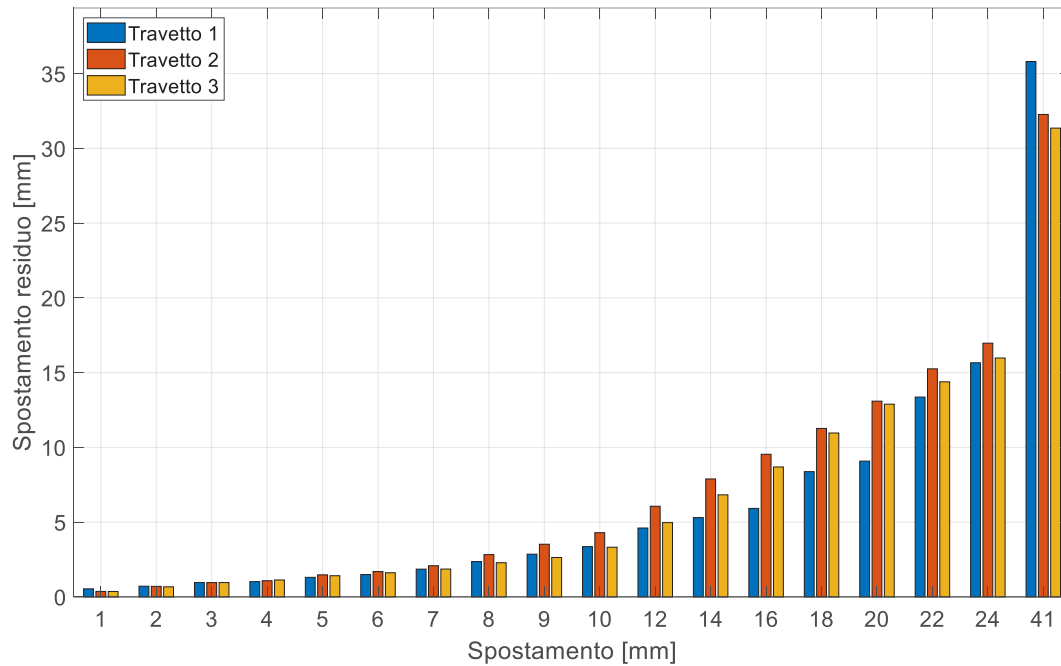


Figura 161 Valore dello spostamento residuo registrato al termine dell'ultimo ciclo ad un dato spostamento

Tabella 13 Riepilogo dei risultati della prova in termini di forza, momento sollecitante e spostamento residuo

Spostamento	Carico Singolo Travetto [kN]			Momento singolo travetto [kNm]			Spostamento Residuo [mm]		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Travetto 1	Travetto 2	Travetto 3
1	7.60	7.31	7.09	3.80	3.66	3.54	0.537	0.365	0.361
2	11.30	10.58	10.32	5.65	5.29	5.16	0.713	0.702	0.672
3	14.34	13.64	13.49	7.17	6.82	6.74	0.957	0.954	0.955
4	17.32	16.65	15.98	8.66	8.32	7.99	1.019	1.080	1.130
5	20.07	19.73	19.22	10.04	9.87	9.61	1.305	1.473	1.414
6	22.88	22.45	22.18	11.44	11.22	11.09	1.494	1.691	1.612
7	24.92	23.88	23.90	12.46	11.94	11.95	1.855	2.082	1.860
8	25.99	25.12	24.81	13.00	12.56	12.40	2.363	2.827	2.284
9	26.99	25.98	25.72	13.49	12.99	12.86	2.854	3.521	2.635
10	27.58	26.45	26.47	13.79	13.23	13.23	3.362	4.291	3.320
12	28.50	27.65	26.79	14.25	13.82	13.39	4.606	6.060	4.967
14	29.04	28.11	27.29	14.52	14.06	13.65	5.301	7.887	6.824
16	29.36	28.14	27.83	14.68	14.07	13.92	5.916	9.537	8.688
18	30.68	29.90	29.33	15.34	14.95	14.67	8.375	11.266	10.961
20	28.46	27.95	26.71	14.23	13.98	13.36	9.078	13.091	12.889
22	27.79	25.38	24.25	13.90	12.69	12.12	13.362	15.252	14.383
24	26.18	25.23	24.74	13.09	12.62	12.37	15.656	16.966	15.977
41	26.45	-	-	13.23	-	-	35.806	32.266	31.353

La modalità di rottura con lo snervamento delle barre inferiori si osserva in modo ancor più evidente dal grafico riportato in Figura 162 dove si evidenzia una crescita costante del carico fino a 7-8 mm di spostamento in cui viene raggiunto un carico sollecitante di circa 25 kN, successivamente la crescita è molto inferiore fino al raggiungimento del carico massimo. Differentemente rispetto a quanto evidenziato con le rottura a taglio si evidenzia come la perdita di carico sia progressiva mantenendo comunque una capacità di circa l'85% anche



nel ciclo finale. Dal punto di vista del distacco tra rinforzo e strato esistente si evidenzia come i valori letti siano molto maggiori rispetto ai casi precedenti, in particolare nel travetto 1 si ha un progressivo incremento del distacco fino a valori di 0.2 mm, mentre nel travetto 3 si hanno valori decisamente inferiori (di almeno un ordine di grandezza) con un deciso incremento nella fase plastica della prova, raggiungendo valori di circa 0.15 mm. Questo aspetto può tuttavia essere influenzato da un precedente distacco locale della cappa per i problemi di ritiro precedentemente mostrati in fase di descrizione dello stato pre-test.

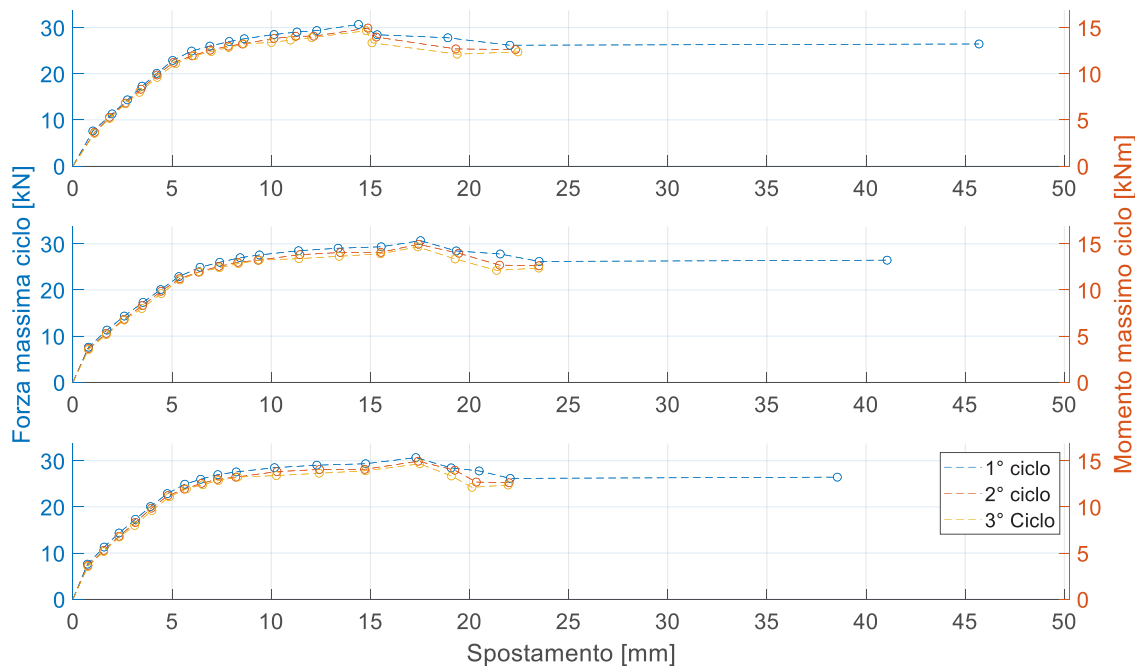


Figura 162 Grafico Carico/Momento massimo – Spostamento per ogni travetto

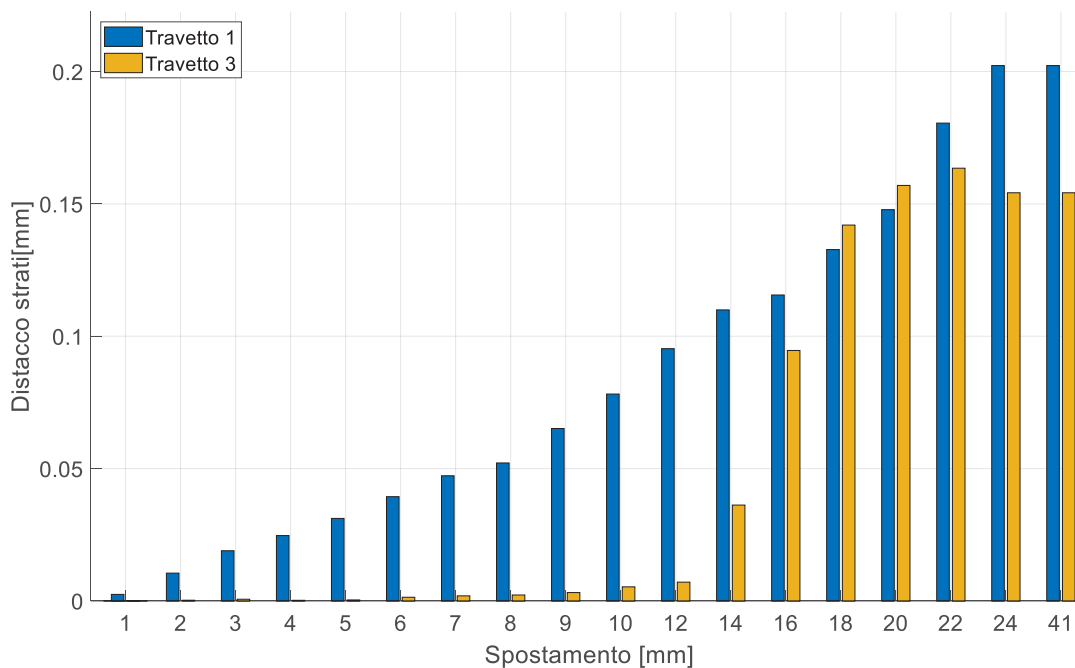


Figura 163 Distacco tra la cappa del solaio e lo strato dei rinforzo



Figura 164 Condizioni del travetto 1 a fine prova



Figura 165 Condizioni del travetto 3 a fine prova



Figura 166 Quadro fessurativo della cappa a fine prova (non si notano fessurazioni aggiuntive)



Figura 167 Condizioni dell'appoggio sinistro del travetto 1 a fine prova

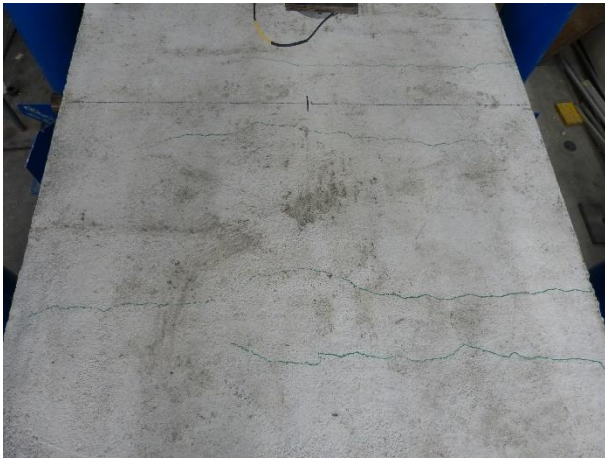
#### 4.4.9 S8 - Solaio rinforzato con LECACLS 1400, L=4.00 m (prova in 3 punti)

##### Condizioni del campione prima della prova

Da Figura 168 a Figura 172 vengono mostrate le condizioni del campione prima di effettuare il test. Come per l'altro campione "lungo" si evidenzia un quadro fessurativo importante nella cappa realizzata per effettuare il rinforzo del solaio. Questa fessurazione è dovuta al ritiro contrastato dal substrato del getto di rinforzo che ha portato a deformare in modo permanente il campione. Dal punto di vista dei travetti si osserva un importante quadro fessurativo su tutti i travetti causato in parte dalle cattive condizioni di conservazione degli stessi in magazzino e in parte dagli sforzi introdotti dal ritiro della cappa. Va tuttavia evidenziato come la maggior parte



di questa fessurazione sia dovuta alla corrosione delle barre d'armatura che ha portato in alcuni punti ad un importante perdita di copriferro. Il setup di prova utilizzato per questo campione è quello della flessione in 3 punti ed è stato scelto dopo i risultati della prova descritta al paragrafo 4.4.5 con l'obiettivo di forzare la rottura del campione per flessione cercando di escludere ogni possibilità di rottura a taglio. Gli appoggi vengono quindi posizionati a 100 mm dal bordo del solaio lasciando una luce libera di 3.8 m con il punto di applicazione del carico posizionati in mezzeria al solaio. Come per l'altro solaio lungo, la storia di carico viene modificata raddoppiando i valori di spostamento e mantenendo circa costante il rapporto freccia-luce.



*Figura 168 Quadro fessurativo della cappa collaborante prima di iniziare la prova*



*Figura 169 Condizioni del travetto 1 ad inizio prova (in verde vengono segnate le fessure preesistenti)*



*Figura 170 Condizioni del travetto 31 ad inizio prova (in verde vengono segnate le fessure preesistenti)*





Figura 171 Condizioni generali del travetto 1 (in verde il rilievo delle fessure)



Figura 172 Condizioni generali del travetto 3 (in verde il rilievo delle fessure)

#### Risultati delle prove sperimentali

Dal grafico mostrato in Figura 173 è possibile osservare il grafico forza/momento - spostamento dei singoli travetti. È interessante osservare come il comportamento dei tre travetti sia molto simile tra di loro fino alla rottura caratterizzata da due punti distinti, il primo al ciclo caratterizzato da 62 mm di spostamento, in cui si ha la rottura di un primo ferro d'armatura ( $\varphi 8$  mm) ed il secondo in corrispondenza della prova monotona finale in cui si rompe il secondo ferro del travetto 2 con diametro di 8 mm. Il carico massimo raggiunto durante la prova è di 88.37 kN (29.46 kN per travetto, 27.98 kNm) ben superiore al carico stimato per lo snervamento del travetto ( $2\varphi 8 + 1\varphi 10$ ) pari a 20.135 kNm. Analizzando lo spostamento residuo si osserva inoltre come vengano registrati valori contenuti fino a 20 mm (in prossimità del punto di snervamento) per poi crescere molto velocemente nelle fasi plastiche della prova.

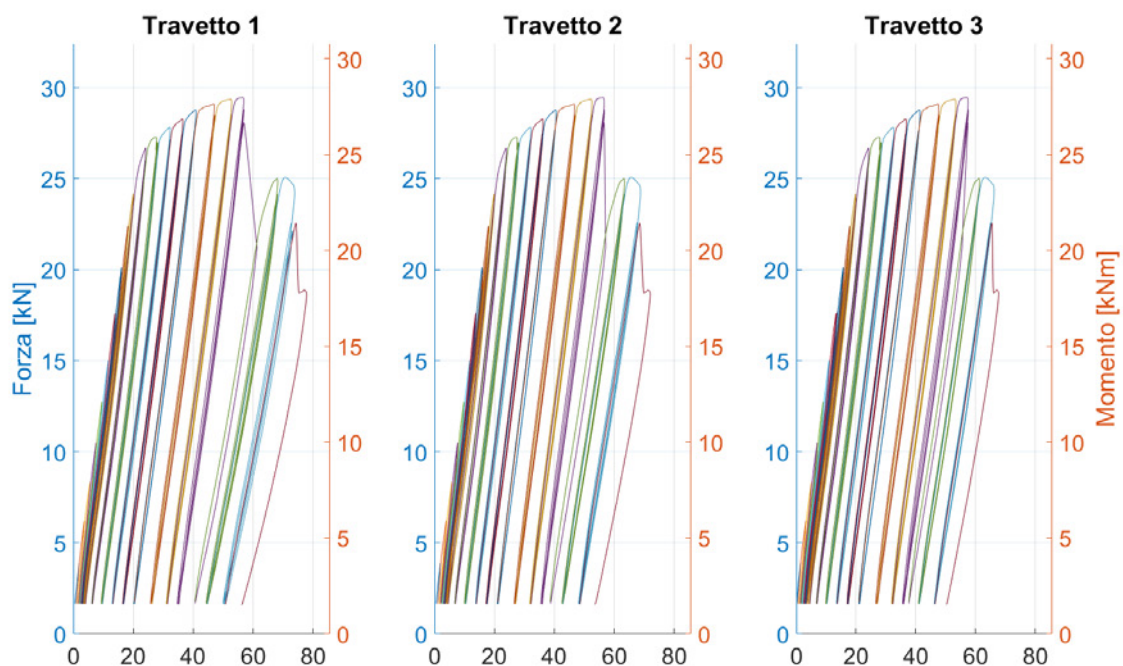


Figura 173 Grafico Forza/Momento – Spostamento dei singoli travetti [mm]

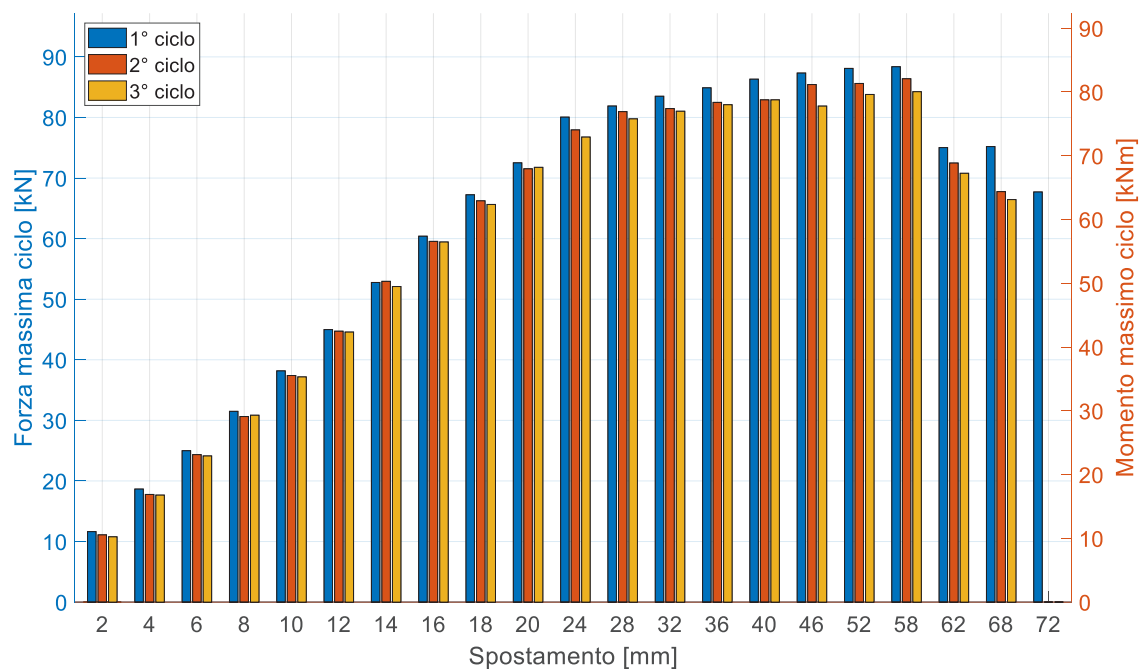


Figura 174 Grafico Forza/Momento massimo registrato per ogni ciclo di prova

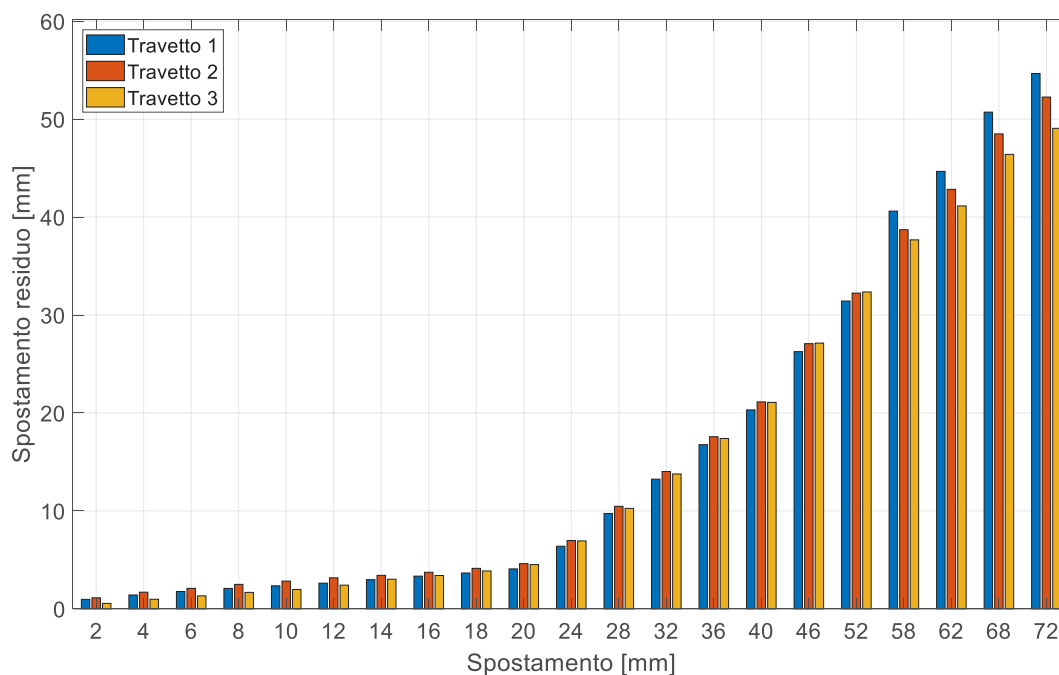


Figura 175 Valore dello spostamento residuo registrato al termine dell'ultimo ciclo ad un dato spostamento

Tabella 14 Riepilogo dei risultati della prova in termini di forza, momento sollecitante e spostamento residuo

Spostamento	Carico Singolo Travetto [kN]			Momento singolo travetto [kNm]			Spostamento Residuo [mm]		
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Travetto 1	Travetto 2	Travetto 3
2	3.88	3.70	3.59	3.68	3.51	3.41	0.968	1.123	0.553
4	6.22	5.92	5.89	5.91	5.63	5.59	1.413	1.698	0.976
6	8.33	8.11	8.04	7.91	7.71	7.64	1.773	2.091	1.325
8	10.50	10.21	10.28	9.97	9.70	9.77	2.085	2.498	1.680
10	12.72	12.47	12.39	12.08	11.84	11.77	2.351	2.832	1.980

12	14.99	14.90	14.86	14.24	14.16	14.11	2.621	3.164	2.419
14	17.59	17.65	17.36	16.71	16.77	16.50	2.979	3.418	3.024
16	20.13	19.85	19.81	19.13	18.85	18.82	3.339	3.732	3.401
18	22.41	22.08	21.88	21.29	20.97	20.79	3.656	4.135	3.867
20	24.17	23.84	23.92	22.96	22.65	22.72	4.076	4.611	4.514
24	26.68	25.98	25.59	25.35	24.68	24.31	6.390	6.972	6.934
28	27.29	26.99	26.59	25.93	25.64	25.26	9.739	10.469	10.255
32	27.83	27.15	27.01	26.44	25.80	25.66	13.241	14.015	13.768
26	28.30	27.50	27.37	26.88	26.12	26.00	16.760	17.572	17.392
40	28.77	27.63	27.63	27.33	26.25	26.25	20.311	21.127	21.080
46	29.11	28.48	27.29	27.65	27.05	25.93	26.260	27.074	27.131
52	29.36	28.54	27.93	27.90	27.11	26.54	31.426	32.235	32.351
58	29.46	28.79	28.08	27.98	27.35	26.68	40.606	38.708	37.670
62	25.01	24.16	23.59	23.76	22.95	22.41	44.665	42.832	41.136
68	25.06	22.59	22.15	23.81	21.46	21.04	50.713	48.490	46.401
72	22.57	-	-	21.44	-	-	54.660	52.252	49.060

Quanto precedentemente indicato viene inoltre confermato dai grafici riportati in Figura 176 dove è ben evidente la distinzione tra il comportamento lineare fino a 20 mm circa ed il successivo comportamento plastico fino a 58 mm, è inoltre interessante osservare come anche dopo la rottura per trazione dei ferri d'armatura il comportamento del solaio rimanga perfettamente plastico seppur ad un carico inferiore del precedente. Dal punto di vista del distacco tra le due cappe si osserva come sia sempre contenuto per il travetto 3 mentre il travetto 1, in concomitanza della rottura della prima barra registri un deciso salto di circa 0.2 mm per poi mantenersi costante ad un valore prossimo a 0.23 mm.

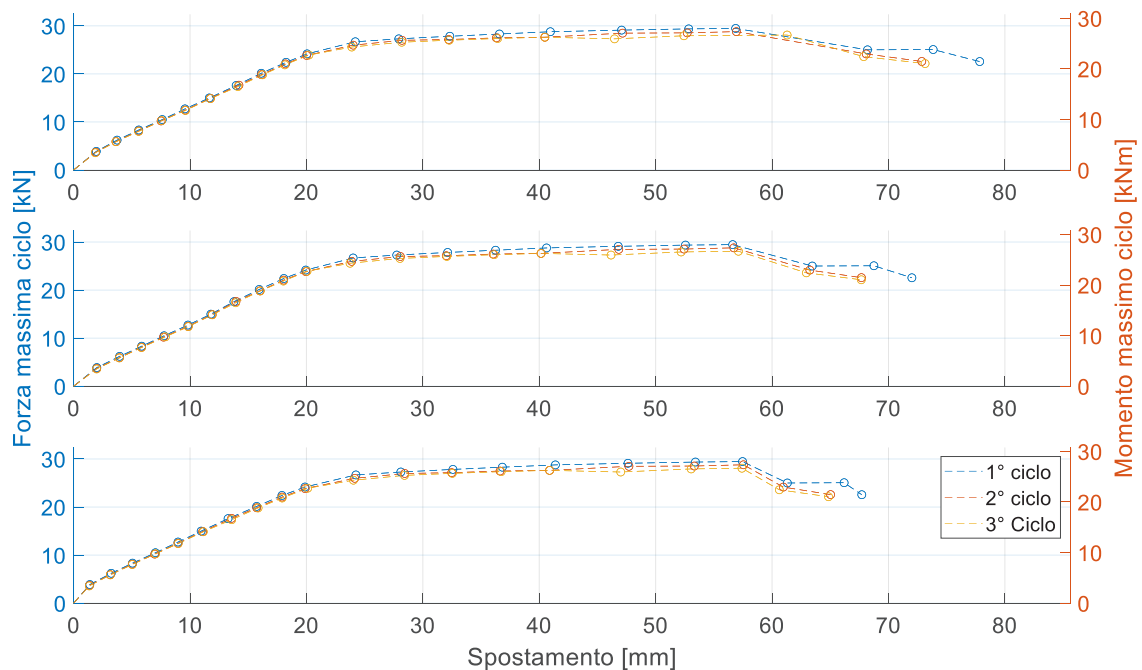


Figura 176 Grafico Carico/Momento massimo – Spostamento per ogni travetto



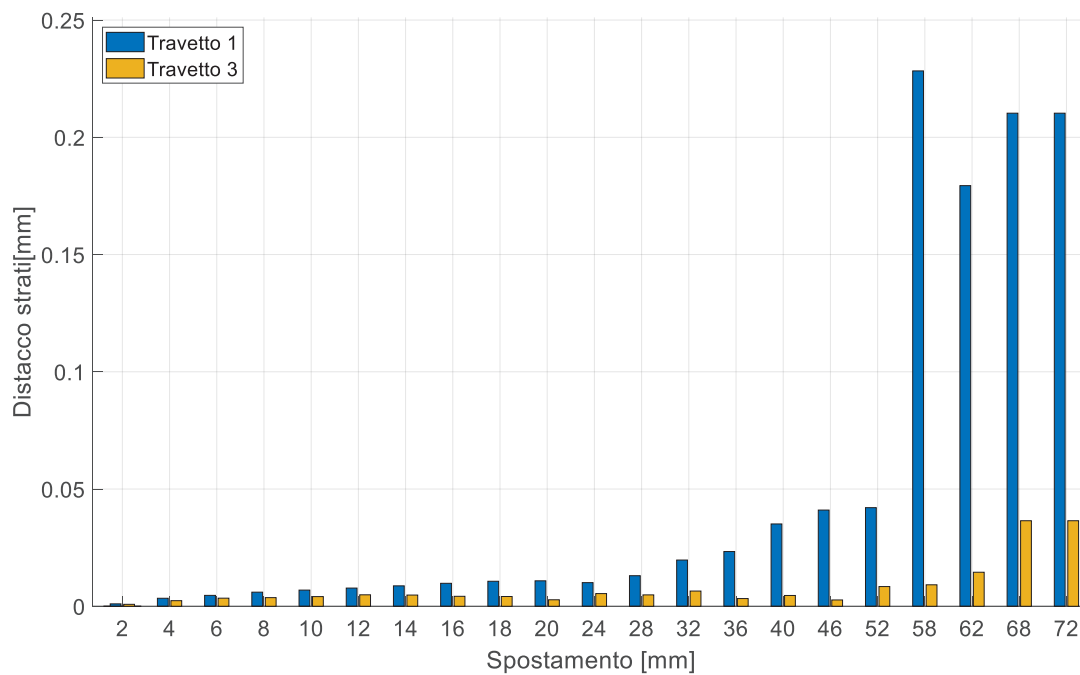


Figura 177 Distacco tra la cappa del solaio e lo strato dei rinforzo



Figura 178 Dettaglio della formazione della cerniera plastica nel travetto 1



Figura 179 Dettaglio della formazione della cerniera plastica nel travetto



Figura 180 Particolare del distacco tra la cappa di rinforzo ed il substrato





Figura 181 Quadro fessurativo in mezzeria del travetto 2



Figura 182 Dettaglio della formazione della cerniera plastica nel travetto 3



Figura 183 Dettaglio del collasso per instabilità della barra superiore del travetto 1 in seguito all'espulsione del calcestruzzo della cappa (come avvenuto nelle prove sui singoli travetti)



Figura 184 Dettaglio osservabile dopo un accurata demolizione delle barre  $\phi 8$  del travetto 2 portate a rottura durante la prova

#### 4.4.10 Riepilogo dei risultati

In quest'ultimo capitolo viene riportato il confronto tra le due tipologie di prove svolte, in particolare per uniformare campioni di lunghezza differente e caratterizzati da una sezione resistente differente si è deciso di presentare le deformazioni in modo adimensionale andando a dividere il valore di deformazione registrato per la luce libera. Per quanto riguarda invece le sollecitazioni imposte si è deciso, per le prove in 4 punti di mostrare lo sforzo di taglio agente in prossimità dell'appoggio (tutte le prove hanno portato ad una rottura a taglio dei travetti), mentre per le prove in 3 punti si è deciso di rendere adimensionale il momento sollecitante dividendolo per il momento resistente calcolato sul solo travetto con la seguente formulazione:

$$M_{rd,approssimato} = A_s \cdot 450 \text{ MPa} \cdot 180 \text{ mm}$$

In questo modo sono stati approssimati i seguenti momenti di snervamento;

Tabella 15 Stima del momento a snervamento del singolo travetto con cappa collaborante

Solaio	Armatura		Altezza utile [mm]	$M_{rd,approssimato}$ [kNm]
	barre	[mm <sup>2</sup> ]		
S5-S6-S7	2 $\phi 8$	100.48	180	8.139
S8	2 $\phi 8$ +1 $\phi 10$	178.98	180	14.497



In Figura 185, viene mostrato il grafico di riepilogo delle prove svolte nella configurazione di flessione in 4 punti che hanno mandato in crisi a taglio il solaio, nei diversi colori sono rappresentate le diverse tipologie di solaio mentre vengono proposti con un tratto continuo, tratteggiato e successivamente puntinato i valori relativi al primo, secondo e terzo ciclo di carico. Come si può vedere solo in caso con rinforzo attraverso il prodotto LECACLS 1400 per il solaio da 2m ha portato ad un peggioramento delle prestazioni. La stessa modalità di rinforzo, ma applicata al solaio più lungo (4.25 m), ha invece dato prestazioni molto simili al solaio non rinforzato in termini di capacità mentre vengono quasi raddoppiate la capacità di deformazione (sia in termini relativi che assoluti). Nel caso di rinforzo con il MICROCALCESTRUZZO CENTROSTORICO si osserva invece un incremento della resistenza rispetto al non rinforzato. È tuttavia importante sottolineare come il rinforzo mediante cappa collaborante dia un contributo minimo nei confronti della resistenza a taglio. In particolare si evidenzia come, il solaio da 2m in cui viene realizzato il rinforzo con il prodotto LECACLS 1400, (l'unico in cui apparentemente si ha un peggioramento delle prestazioni) coincide con il provino realizzato con i travetti apparentemente peggio conservati, come si può osservare dalle foto di dettaglio del capitolo 4.4.4. Al contrario il solaio S3 è realizzato con i travetti meglio conservati.

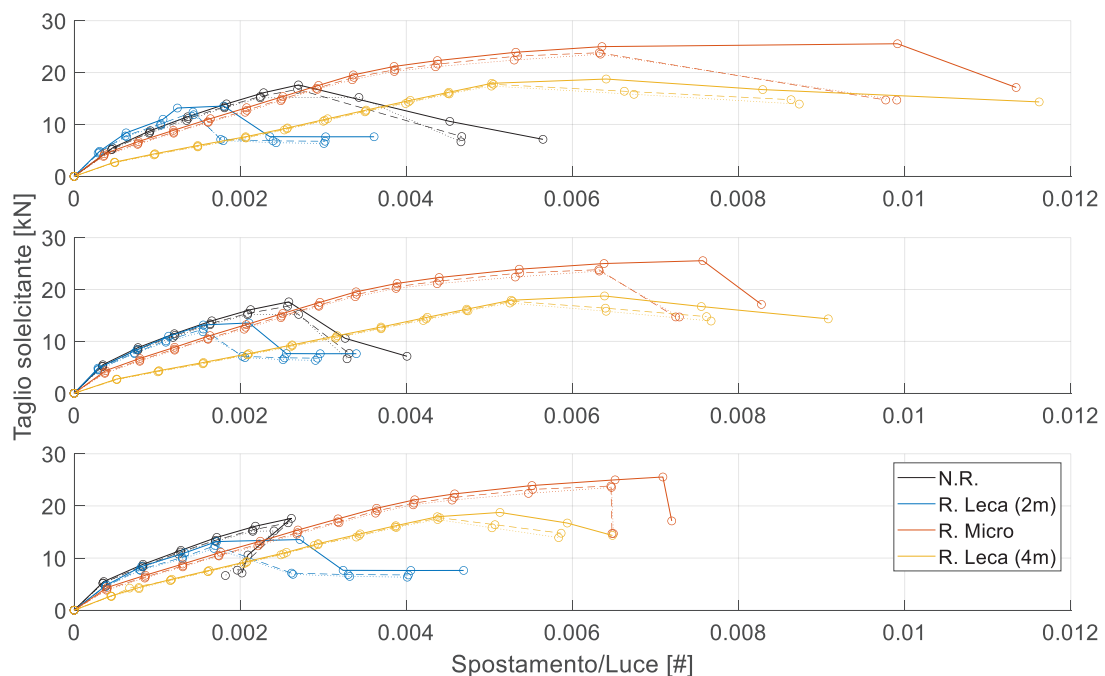


Figura 185 Riepilogo delle prove svolte nella configurazione di flessione in 4 punti

Per chiarezza viene proposto, in Figura 186, il grafico non adimensionato in cui vengono riportate le sole prove relative ai solai "corti" (2 m e 2.25 m) per poter effettuare un confronto diretto in termini di spostamento registrato durante i test.



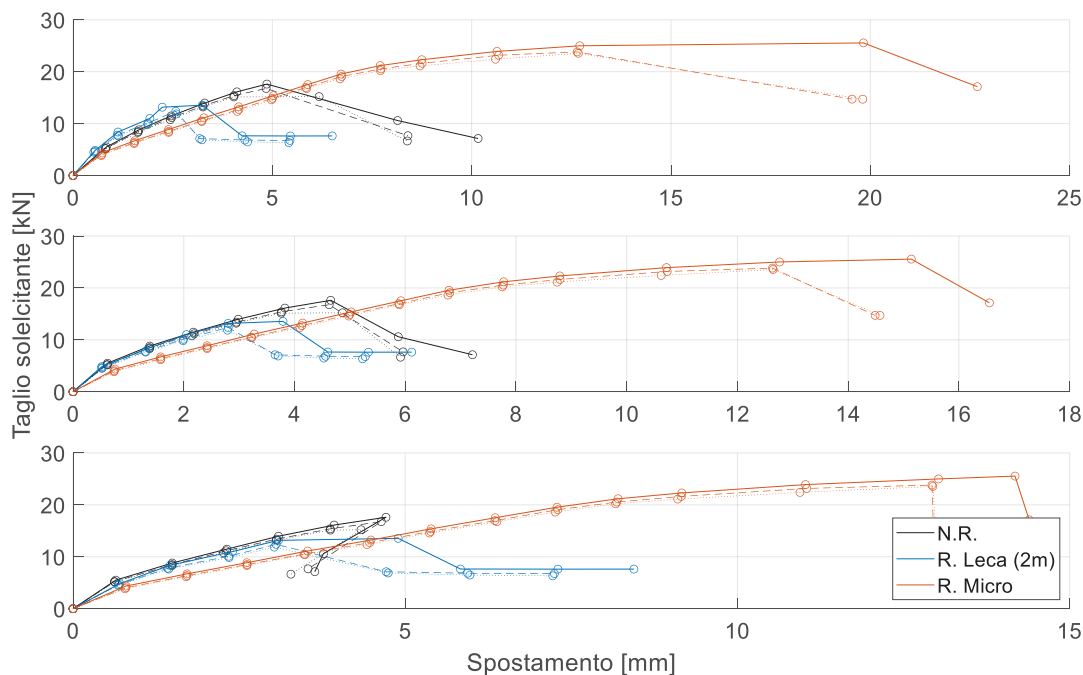


Figura 186 Riepilogo delle prove svolte nella configurazione di flessione in 4 punti per i solai "corti"

Analogamente a quanto fatto per le prove di flessione in 4 punti, in Figura 187 viene proposto il riepilogo delle prove a flessione in 3 punti che hanno portato alla rottura del solaio per flessione. In questo caso si evidenzia come il rinforzo con cappa collaborante sia efficace in tutte le condizioni, in particolare i casi riportati in azzurro e arancio (rinforzo con LECACLS 1400) riportano l'incremento maggiore rispetto al momento resistente garantito dal solo travetto. Questo viene confermato anche in termini assoluti, (osservabili in Figura 188 per i soli campioni da 2.25 m che presentano la stessa geometria dei travetti). L'efficacia del rinforzo si osserva inoltre anche per il caso rinforzato con MICROCALCESTRUZZO CENTROSTORICO seppur in termini minori rispetto a quanto visto precedentemente.

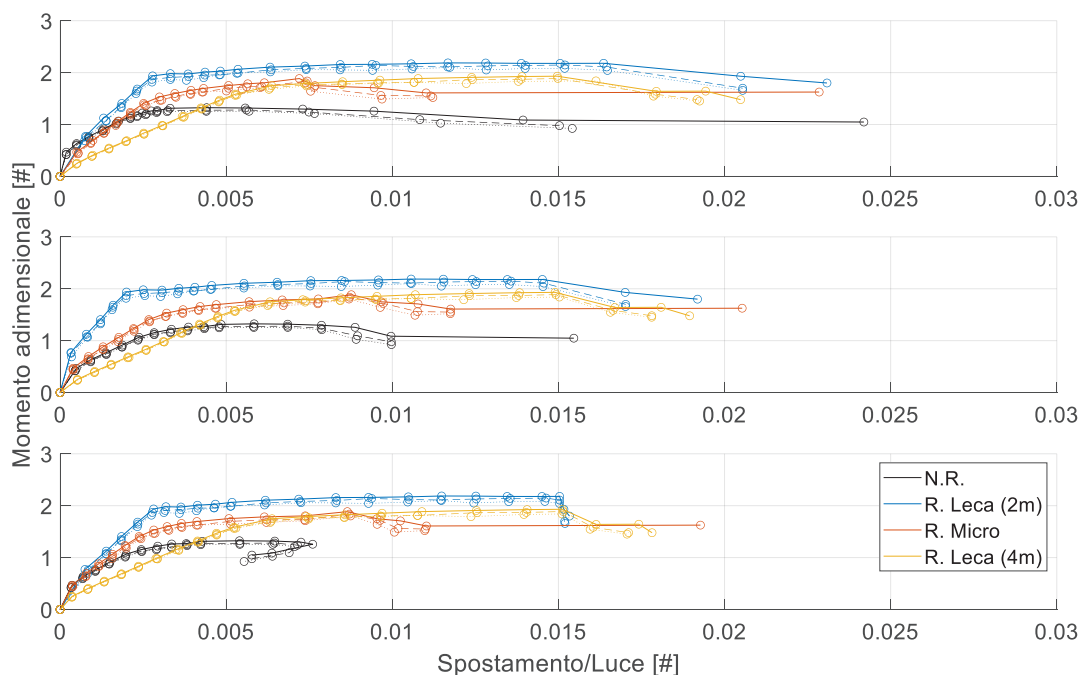


Figura 187 Riepilogo delle prove svolte nella configurazione di flessione in 3 punti

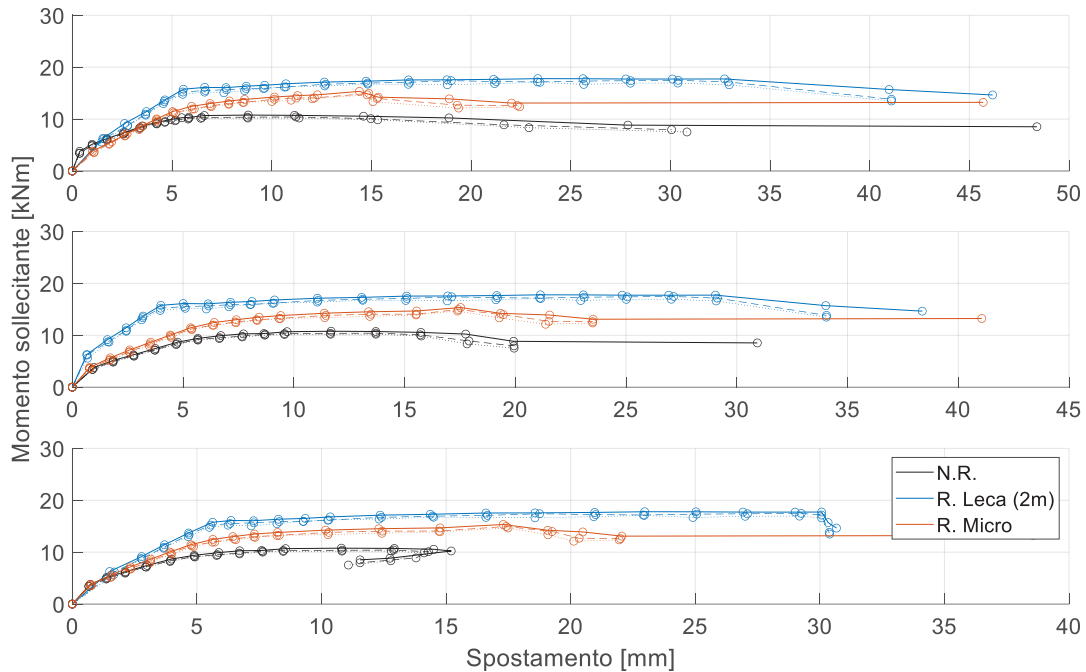


Figura 188 Riepilogo delle prove svolte nella configurazione di flessione in 3 punti (campioni da 2.25 m)

Per completezza viene riportato, in Figura 189, un ulteriore confronto relativo al momento sollecitante – spostamento (entrambi in termini non adimensionalizzati), delle prove condotte sui solai lunghi (4 e 4.25 m). In particolare si osserva come il tratto iniziale fino a circa 20 mm è molto simile per entrambi i test. Le differenze in termini di rigidità infatti imputabili alle diverse geometria del campione (4.25 m nella prova in 4 punti e 4 m nella prova in 3 punti) nonché alla differente schema statico di carico. Tuttavia si evidenzia come il momento massimo sollecitante raggiunto sia minore nel caso di test in 4 punti poiché sopraggiunge il collasso a taglio discusso nel capitolo 4.4.5 prima di poter sviluppare la completa plasticizzazione dell’armatura tesa.

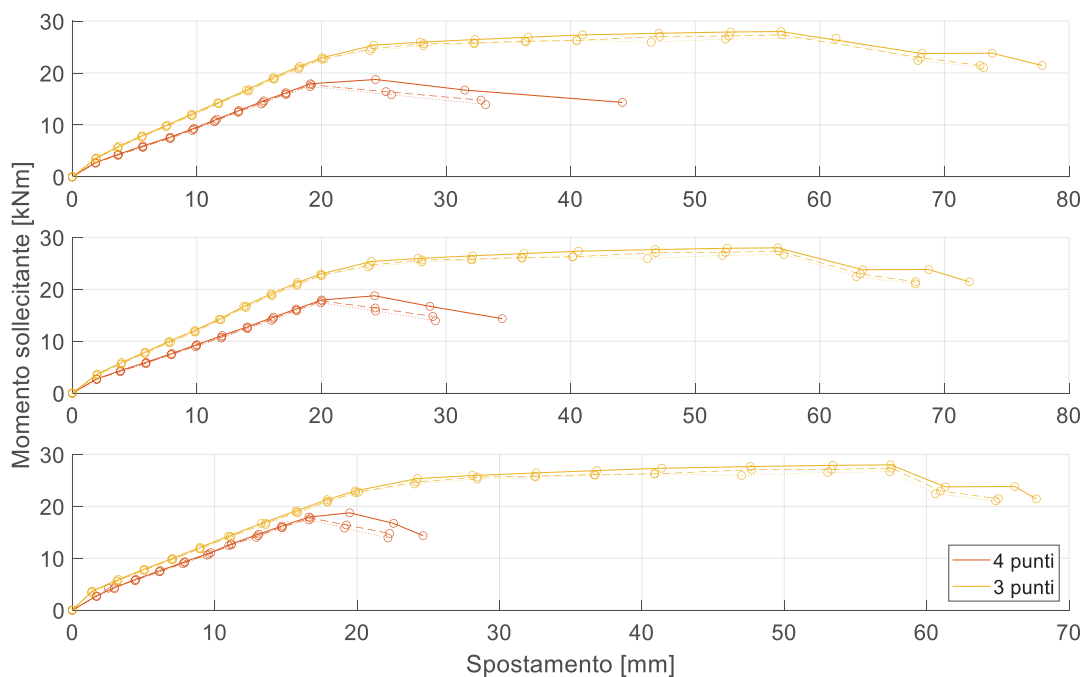


Figura 189 Riepilogo delle prove svolte sui solai “lunghi”

In generale si può quindi affermare come il rinforzo con cappa collaborante sia effettivamente in grado di aumentare le prestazioni dei solai poiché si va ad incidere sull'altezza utili del provino, tuttavia nel caso di solaio non rinforzato e di solaio da 2.25 m rinforzato con LECACLS 1400 il collasso è sopraggiunto per crisi a taglio dei travetti dopo aver raggiunto la capacità di snervamento delle barre d'armatura. La modalità di collasso può quindi essere considerata mista tra taglio e flessione. Ciò evidenzia come la verifica a taglio di questi elementi si imprescindibile in fase di progettazione di un intervento di recupero.



## CONCLUSIONI

La campagna sperimentale condotta nei laboratori dell'Università degli Studi Bergamo ha permesso di approfondire la conoscenza e il comportamento dei solai tipo "Varese" unitamente ai benefici derivanti da interventi di consolidamento strutturale.

Il tema dei solai Varese è stato approfondito grazie a prove di flessione su tre e quattro punti in modo da andare ad osservare e studiare le crisi sia per flessione che per taglio degli elementi sottoposti a prova. La campagna ha previsto diversi test su vari elementi quali:

- Travetti tipo Varese di diverse lunghezze;
- Solai tipo Varese composti da tre travetti, tavelloni superiori e inferiori e sottile cappa (2 cm) di ripartizione estradossale;
- Solai tipo Varese con tre travetti, tavelloni superiori e inferiori e sottile cappa (2 cm) di ripartizione estradossale e consolidamento mediante **Connettore CentroStorico Chimico** e 5 cm di calcestruzzo leggero strutturale **LecaCLS 1400** (testate diverse luci di solai);
- Solai tipo Varese con tre travetti, tavelloni superiori e inferiori e sottile cappa (2 cm) di ripartizione estradossale e consolidamento mediante **Connettore CentroStorico Chimico** e 2.5 cm di **Microcalcestruzzo CentroStorico**.



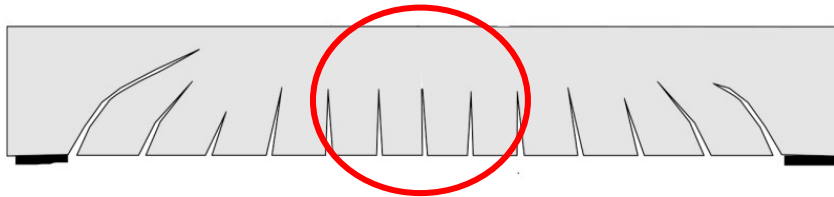
In questo capitolo conclusivo si riporta l'analisi delle tre principali evidenze emerse durante la sperimentazione e meglio approfondite nel documento:

- 1) Interventi di rinforzo estradossale su solai Varese con carenze di natura flessionale;
- 2) Interventi di rinforzo estradossale su solai Varese con carenze relative al taglio;
- 3) Efficacia della connessione mediante **Connettore CentroStorico Chimico** per creare una sezione composta su solai tipo Varese in abbinamento al calcestruzzo leggero strutturale **LecaCLS 1400** e **Microcalcestruzzo CentroStorico**.

Oltre ad un resoconto della vasta campagna precedentemente esposta, caso per caso, si farà anche un confronto diretto con valutazioni di carattere numerico.

## 1 Interventi di rinforzo estradossale su solai Varese con carenze di natura flessionale

La sperimentazione ha permesso di testare i campioni su tre punti, andando a ricercare il comportamento flessionale con il proprio caratteristico quadro fessurativo.



Questo comportamento è stato ritrovato sia nei soli travetti testati che nei solai composti, rimanendo perfettamente coerenti con la teoria (come si può notare dalle immagini riportate).



Rottura a flessione singolo travetto



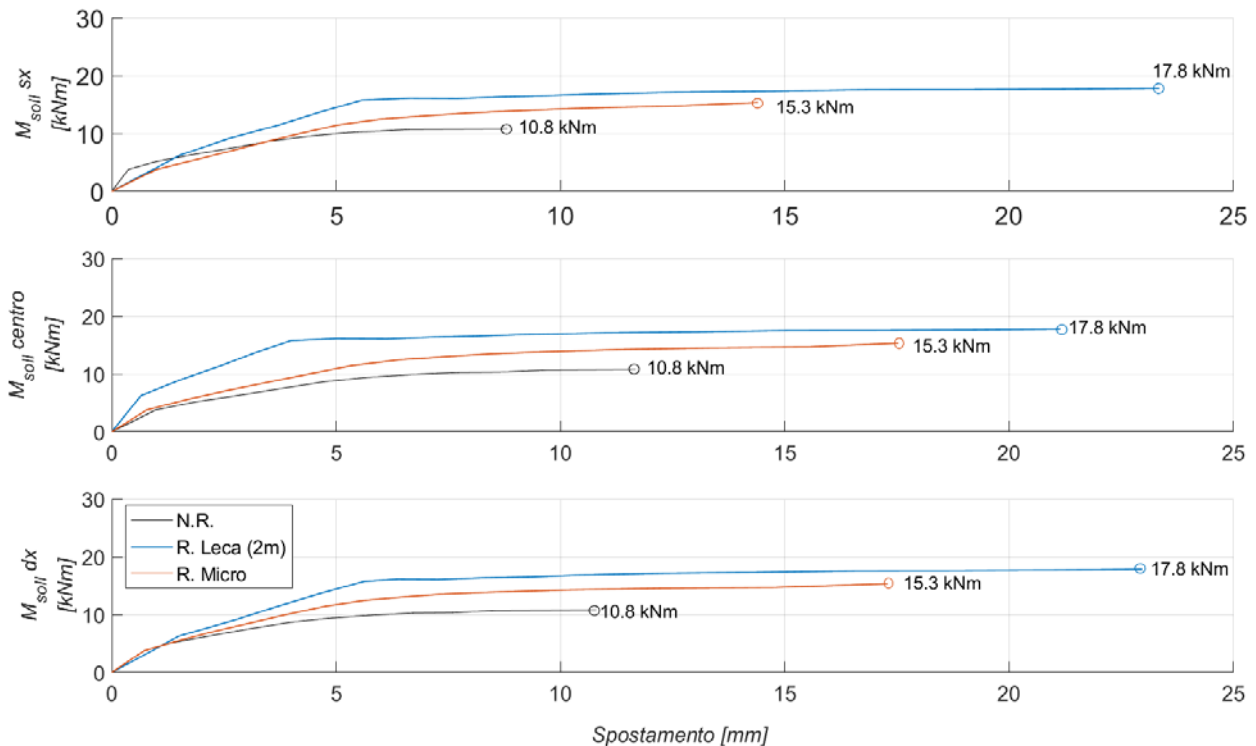
Rottura a flessione su solaio rinforzato

Con il set up a tre punti nei solai di dimensioni inferiori si sono evidenziati comportamenti flessionali e taglianti in modo misto, mentre su lunghezze maggiori si raggiunge la crisi per flessione dei solai.

Come da aspettative teoriche i migliori risultati, in termini di incremento di carico supportabile e di momento flettente della sezione composta, sono quelli offerti dalla soluzione con una soletta collaborante di spessore 5 cm in calcestruzzo leggero strutturale **LecaCLS 1400** e connessione con **Connettore CentroStorico Chimico**. Il risultato è frutto della combinazione della **leggerezza, resistenza e maggiore inerzia** (5 cm aggiunti) che la soluzione conferisce al solaio.

Nonostante l'altezza della soluzione sia inferiore (2.5 cm di nuova cappa), anche la proposta con **Microcalcestruzzo Centrostorico** ha portato ad un incremento in ambito flessionale rispetto alla condizione non rinforzata.

Di seguito si riportano i grafici momento sollecitante-spostamento dei tre travetti componenti il solaio.



Ne risulta un incremento di + **65%** con **LecaCLS 1400** (nel grafico in blu come R. Leca) a livello di comportamento flessionale e di + **42%** con **Microcalcestruzzo CentroStorico** (nel grafico in arancione come R. Micro).

TIPOLOGIA DI RINFORZO	Incremento Momento resistente
<b>Connettore CentroStorico Chimico e 5 cm Leca CLS 1400</b>	<b>+ 65%</b>
<b>Connettore CentroStorico Chimico e 2,5 cm Microcalcestruzzo CentroStorico</b>	<b>+ 42%</b>

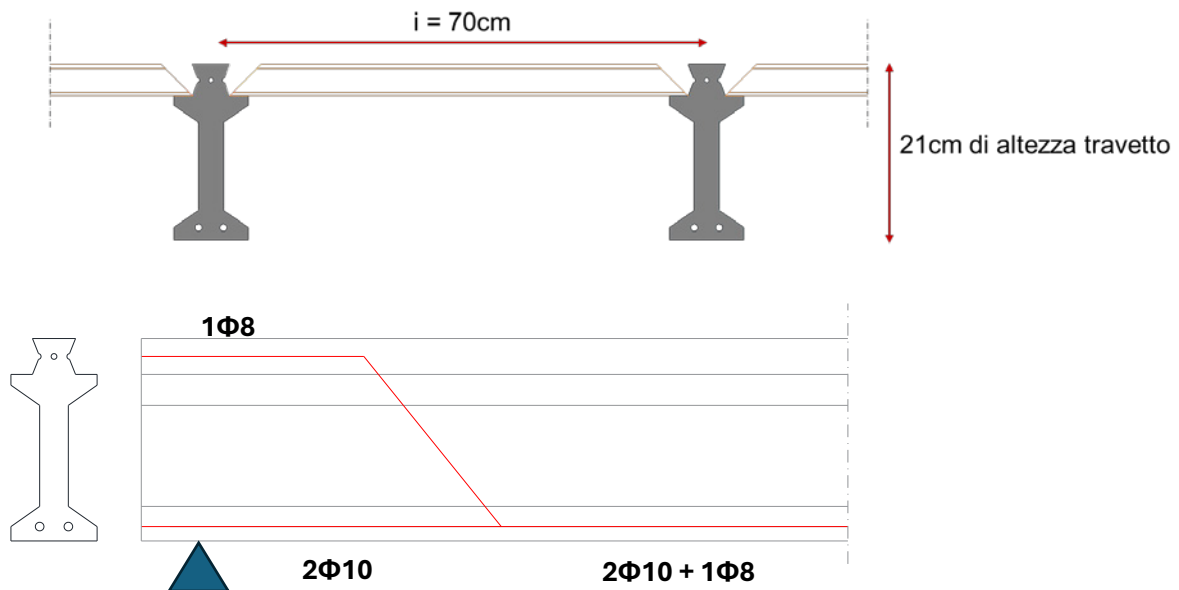
La soluzione con **LecaCLS 1400** nello spessore di 5 cm è stata testata anche per solai con luci maggiori pari a 4.00 m, assicurando ottimi risultati e arrivando ad un momento resistente pari a 27.98 kNm.

Tipo di solaio	$M_{rd}$ [kNm]
Non rinforzato $l=2.00m$	10.80
5cm LecaCLS 1400 $l=2.00m$	17.79
5cm LecaCLS 1400 $l=4.00m$	27.98

A favore di una maggiore comprensione della tematica, di seguito si riporta un esercizio numerico per sottolineare come tale intervento sia fortemente influenzato dall'inerzia della sezione composta finale.



Si considera, a titolo di esempio, il caso di un solaio Varese con luce di 4.4 m, caratterizzato da un vincolo di semplice appoggio agli estremi e le restanti caratteristiche geometriche esplicitate in figura.



I travetti vedono la presenza di 1  $\Phi 8$  superiore e 2  $\Phi 10$  inferiori nella sezione d'appoggio, mentre 2  $\Phi 10$  + 1  $\Phi 8$  solo inferiormente nella sezione di mezzeria (si riporta uno schema dell'andamento dei ferri fino alla sezione di mezzeria).

Il carico in combinazione SLU (Stato Limite Ultimo) sul singolo travetto è pari a 4.47 kN/m.

Spostando l'attenzione allo stato di fatto si possono notare le criticità del solaio proposto.

Stato di fatto del solaio			
$M_{sd}^+$	10.81	kNm	<b>Non Verificato</b>
$M_{Rd}^+$	7.82	kNm	<b>Verificato</b>
$V_{sd}$	9.17	kN	<b>Non Verificato</b>
$V_{Rd}$	7.78	kN	<b>Verificato</b>

Confrontiamo ora analiticamente le due soluzioni proposte, indagate anche nella campagna sperimentale, ovvero:

- Soluzione con 5 cm di calcestruzzo leggero strutturale **LecaCLS 1400** e **Connettore CentroStorico Chimico**.
- Soluzione con 2.5 cm di **Microcalcestruzzo CentroStorico** e **Connettore CentroStorico Chimico**.

Rinforzo estradossale con 5 cm <b>LecaCLS 1400 e Connettore CentroStorico Chimico</b>				Rinforzo estradossale con 2.5 cm <b>Microcalcestruzzo CentroStorico e Connettore CentroStorico Chimico</b>			
$M_{sd}^+$	12.52	kNm	<b>Verificato</b>	$M_{sd}^+$	12.08	kNm	<b>Non Verificato</b>
$M_{Rd}^+$	13.31	kNm		$M_{Rd}^+$	12.00	kNm	
$V_{sd}$	10.62	kN	<b>Verificato</b>	$V_{sd}$	9.17	kN	<b>Non Verificato</b>
$V_{Rd}$	10.64	kN		$V_{Rd}$	7.78	kN	
$\tau_{sd}$	0.07	MPa	<b>Verificato</b>	$\tau_{sd}$	0.08	MPa	<b>Verificato</b>
$\tau_{Rd}$	0.72	MPa		$\tau_{Rd}$	0.72	MPa	

Il confronto analitico riportato mostra come la soluzione mediante la soletta collaborante costituita da 5 cm di **LecaCLS 1400 e Connettore CentroStorico Chimico** sia la soluzione ottimale per il consolidamento dei solai, anche di tipo Varese, con un incremento di circa il **70%** del momento resistente rispetto alla condizione di partenza non consolidata. **La soluzione con soletta collaborante leggera riesce ad adeguare il solaio grazie alla combinazione di spessore dell'intervento e alla leggerezza con il quale viene eseguito, senza ridurre le caratteristiche resistenti.**

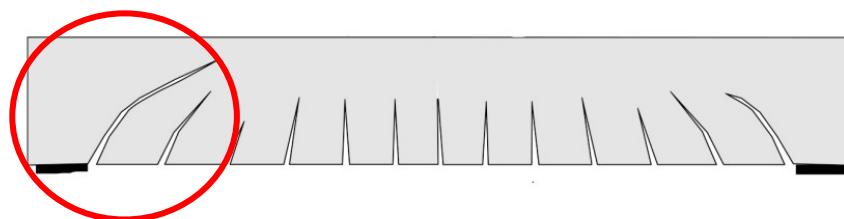
Questo risultato risulta del tutto in linea e coerente con quanto ottenuto sperimentalmente su una luce di solaio inferiore.

L'esito analitico della soluzione con **Microcalcestruzzo CentroStorico**, mette invece in evidenza come non si arrivi ad un superamento delle verifiche da normativa ma si riesca ad ottenere un incremento del momento resistente di circa il **53%** rispetto alla condizione di partenza. Anche in questo caso l'incremento analitico ottenuto, su una luce di solaio maggiore, risulta coerente con la campagna sperimentale condotta e precedentemente dettagliata.

## 2 Interventi di rinforzo estradossale su solai Varese con carenze relative al taglio

La sperimentazione ha permesso di testare i campioni su quattro punti, andando a ricercare il comportamento a taglio con il proprio caratteristico quadro fessurativo.

È utile ricordare che nei travetti di solaio non sono presenti armature specifiche per sforzi di taglio; per questa ragione sono le armature longitudinali che assolvono al compito di assorbire le sollecitazioni taglianti che portano alle caratteristiche fessure inclinate a  $45^\circ$  rispetto all'asse della trave.



Le armature longitudinali, insieme ai contributi dell'ingranamento degli inerti, dell'altezza utile della sezione, dell'effetto spinotto e dello sforzo assiale, giocano un ruolo fondamentale ai fini delle azioni che generano sforzi di taglio.

Questo comportamento resistente è stato ritrovato sia nei soli travetti Varese testati che nei solai composti (non rinforzati), rimanendo quindi perfettamente coerenti con la teoria (come si può notare dalle immagini riportate).



Rottura a taglio singolo travetto

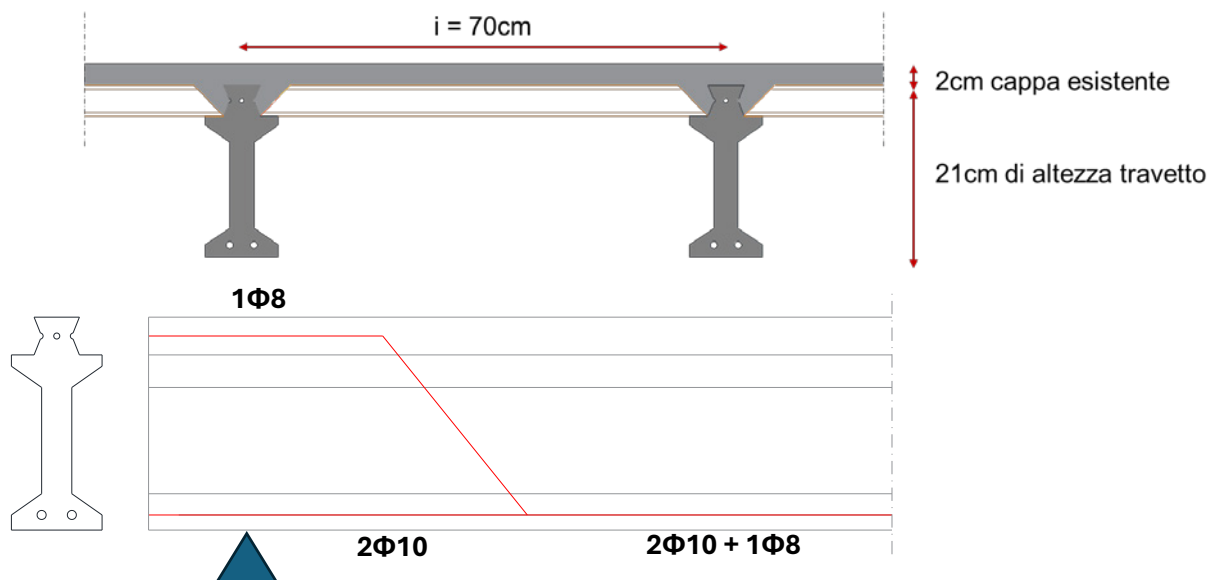


Rottura a taglio su solaio non rinforzato

Nel report di prova si evidenzia come i rinforzi realizzati non contribuiscano ad aumentare la resistenza a taglio, in perfetta coerenza tra teoria e campagna sperimentale.

A favore di una maggiore comprensione della tematica, di seguito si riporta un esercizio numerico utile a sottolineare come anche analiticamente l'intervento costituito dalla soletta collaborante offra miglioramenti minimi nei confronti delle sollecitazioni taglianti.

A titolo di esempio si considera un solaio Varese con luce di 4.4 m con un grado di vincolo di rigidità molto bassa agli estremi (significa che non si è considerato semplicemente appoggiato, ma con un minimo grado di vincolo agli estremi pari a  $ql^2/48$ ) e le restanti caratteristiche geometriche esplicitate in figura.



I travetti vedono la presenza di 1Φ8 superiore e 2 Φ10 inferiori nella sezione d'appoggio, mentre 2 Φ10 + 1 Φ8 solo inferiormente nella sezione di mezzeria (si riporta uno schema dell'andamento dei ferri nella sezione di appoggio).

Il carico in combinazione SLU (Stato Limite Ultimo) sul singolo travetto è pari a 6.13 kN/m.



Valutando la situazione allo stato di fatto si evidenziano le criticità del solaio proposto.

Stato di fatto del solaio			
$M_{sd}^+$	10.94	kNm	<b>Non Verificato</b>
$M_{Rd}^+$	10.28	kNm	<b>Verificato</b>
$M_{sd}^-$	-2.19	kNm	<b>Verificato</b>
$M_{Rd}^-$	-2.40	kNm	<b>Verificato</b>
$V_{sd}$	11.94	kN	<b>Non Verificato</b>
$V_{Rd}$	5.39	kN	<b>Verificato</b>

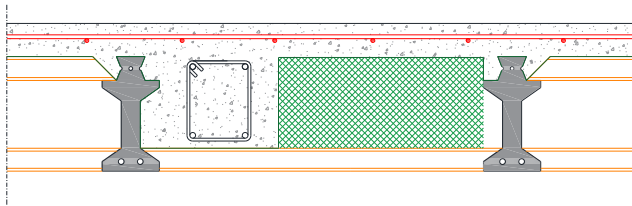
Si confrontano ora analiticamente le due soluzioni proposte anche nella campagna sperimentale, ovvero la soluzione con rinforzo mediante cappa collaborante di 5 cm di calcestruzzo leggero strutturale **LecaCLS 1400** e **Connettore CentroStorico Chimico** rispetto a 2.5 cm di **Microcalcestruzzo CentroStorico** e **Connettore CentroStorico Chimico**.

Rinforzo estradossale con 5 cm <b>LecaCLS 1400</b> e <b>Connettore CentroStorico Chimico</b>				Rinforzo estradossale con 2.5 cm <b>Microcalcestruzzo CentroStorico</b> e <b>Connettore CentroStorico Chimico</b>			
$M_{sd}^+$	12.37	kNm	<b>Verificato</b>	$M_{sd}^+$	12.00	kNm	<b>Non Verificato</b>
$M_{Rd}^+$	13.10	kNm	<b>Verificato</b>	$M_{Rd}^+$	11.69	kNm	<b>Verificato</b>
$M_{sd}^-$	-2.47	kNm	<b>Verificato</b>	$M_{sd}^-$	-2.40	kNm	<b>Non Verificato</b>
$M_{Rd}^-$	-7.09	kNm	<b>Verificato</b>	$M_{Rd}^-$	-2.39	kNm	<b>Verificato</b>
$V_{sd}$	13.49	kN	<b>Non Verificato</b>	$V_{sd}$	13.09	kN	<b>Non Verificato</b>
$V_{Rd}$	7.44	kN	<b>Verificato</b>	$V_{Rd}$	5.39	kN	<b>Verificato</b>
$\tau_{sd}$	0.07	MPa	<b>Verificato</b>	$\tau_{sd}$	0.07	MPa	<b>Verificato</b>
$\tau_{Rd}$	0.72	MPa	<b>Verificato</b>	$\tau_{Rd}$	0.72	MPa	<b>Verificato</b>

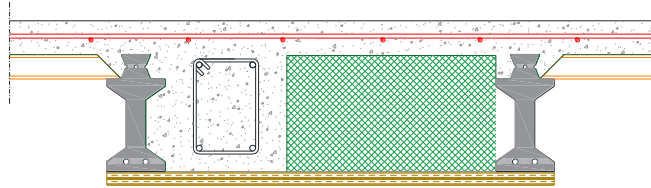
Per la soluzione con calcestruzzo leggero strutturale **LecaCLS 1400** si è andati a considerare l'inserimento di uno spezzone  $\Phi 8$ , soluzione non attuabile in ambito di rinforzo con **Microcalcestruzzo CentroStorico** avendo altezze di solette incompatibili col mantenimento del copriferro da normativa. Tale integrazione permette di apportare miglioramenti sia a flessione negativa che in ambito di resistenza a taglio.

Con entrambe le soluzioni, nell'esempio proposto, rimane pertanto confermata la problematica relativa al taglio, mentre il consolidamento soddisfa quello flessionale per la sola soluzione con **LecaCLS 1400** e **Connettore CentroStorico Chimico**.

Negli interventi di adeguamento, dove risulta imprescindibile anche il superamento delle verifiche a taglio come da Normativa, la soluzione proposta si presenta sotto forma di irrigidimento nello spessore del solaio stesso (come evidenziato nelle immagini seguenti).



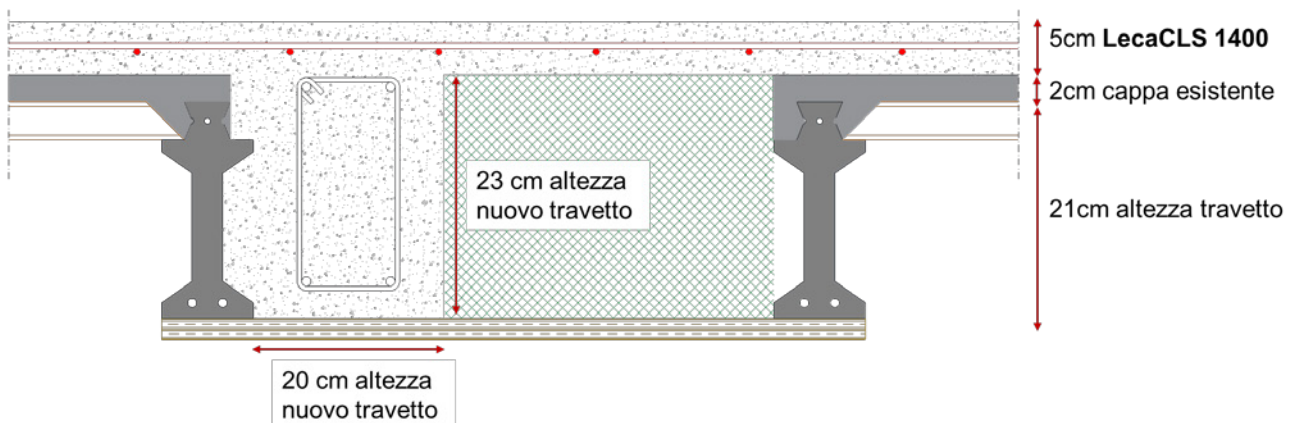
Soluzione con doppio travellone



Soluzione con travellone superiore e cassero

Tale soluzione si presenta come un'ottimizzazione in quanto va a contenere al massimo gli incrementi di peso e non apporta variazioni di altezza, rimanendo complessivamente nelle altezze stratigrafiche precedentemente valutate.

Nell'esempio sopra riportato, per necessità di adeguamento del solaio, si realizza un cassero al piede del travetto esistente in modo da poter applicare un pannello di alleggerimento avente altezza pari all'intera cavità e un'estensione di 34 cm; l'intervento si completa con l'inserimento delle armature e il getto di calcestruzzo leggero strutturale **LecaCLS 1400** nelle dimensioni sotto riportate.



La soluzione prevede l'impiego di 2  $\Phi 14$  superiori e 2  $\Phi 16$  inferiori per l'armatura del nuovo travetto

Irrigidimento e 5cm <b>LecaCLS 1400</b> + <b>Connettore CentroStorico Chimico</b>			
$M_{sd}^+$	39.36	kNm	<b>Verificato</b>
$M_{Rd}^+$	40.70	kNm	
$M_{sd}^-$	-7.86	kNm	<b>Verificato</b>
$M_{Rd}^-$	-24.67	kNm	
$V_{sd}$	42.94	kN	<b>Verificato</b>
$V_{Rd}$	57.26	kN	
$\tau_{sd}$	0.12	MPa	<b>Verificato</b>
$\tau_{Rd}$	0.72	MPa	

La soluzione individuata contribuisce così all'adeguamento del solaio e al mantenimento della struttura esistente.

In sintesi, sulla base delle considerazioni precedentemente descritte e l'esercizio numerico proposto, si evidenzia la necessità di valutare con attenzione le carenze a taglio per solai tipo "Varese", ricordando in ogni caso, che un intervento posto all'estradosso del solaio esistente potrebbe essere sufficiente al fine di soddisfare la verifica flessionale dello stesso, perseguendo un obiettivo di miglioramento.

Se l'obiettivo fosse quello di adeguare il solaio oggetto di intervento, sarebbe opportuno studiare tecniche differenti, come quella di un irrigidimento con calcestruzzi leggeri e strutturali inserita nell'altezza del solaio esistente, come presentato in precedenza.

### 3 L'efficacia della connessione mediante Connettore CentroStorico Chimico per creare una sezione composta su solai tipo Varese in abbinamento a calcestruzzo leggero strutturale LecaCLS 1400 e Microcalcestruzzo CentroStorico

Nel seguito, a mezzo degli strumenti di misurazione applicati all'interfaccia del solaio "esistente" e delle nuove solette in calcestruzzo (sia quelle con **LecaCLS 1400** che con **Microcalcestruzzo CentroStorico**) è stato possibile confermare, come da precedenti sperimentazioni condotte da Laterlite, come l'impiego di **Connettore CentroStorico Chimico** sia la scelta più prestazionale per creare collaborazione tra la nuova soletta collaborante e il solaio Varese, nonostante le complessità costruttive che caratterizzano queste tipologie di solaio.

Si riportano i dettagli tra solaio esistente e nuova cappa al termine della prova; la nomenclatura fa riferimento a quella impiegata nel report di prova del capitolo precedente.



Interfaccia S2 post prova



Interfaccia S3 post prova



Interfaccia S4 post prova



Interfaccia S6 post prova





Interfaccia S7 post prova



Interfaccia S8 post prova

Nelle figure sopra riportate è possibile rilevare come **non sia mai stata evidente una crisi della connessione all'interfaccia**, in dettaglio:

- Nel caso della prova indicata in figura come “interfaccia S2” si nota come la crisi sia sopraggiunta in corrispondenza della testa del travetto Varese, così come nel caso indicato come “interfaccia S4”.
- Nel caso della prova indicata in figura come “interfaccia S3” la crisi sia sopraggiunta a livello della cappa superiore esistente.
- Nel caso della prova indicata in figura come “interfaccia S6” sia avvenuta invece la crisi a taglio dell'intera sezione, a partire da quella del travetto Varese esistente.
- Nelle figure indicate come “interfaccia S7 ed S8” è possibile invece apprezzare la tipica crisi flessionale nella mezzera della sezione, in corrispondenza della quale la connessione non risulta particolarmente impegnata.

L'ordine di grandezza rilevato dagli strumenti (mai superiore al decimo di millimetro nei casi peggiori) conferma inoltre, come anche in prossimità del collasso non si verificano distacchi o perdita di adesione, confermando come **Connettore CentroStorico Chimico sia la connessione efficace anche con solai tipo Varese** e del tutto coerente con le tensioni di esercizio alle quali vengono sottoposti queste tipologie di solai.

Per approfondimenti leggi anche “Indagine sperimentale sul consolidamento dei solai a travetti armati tipo SAP”.



Disponibile  
su Leca.it



Dichiarazione di esclusione di responsabilità:

Il presente Documento non costituisce specifica. I dati/soluzioni/informazioni riportate, pur dettate dalla nostra migliore esperienza e conoscenza, sono a carattere generale e puramente indicativi. Laterlite S.p.A. non si assume alcuna responsabilità in ordine all'adeguatezza, congruità, adattabilità e utilizzabilità dei dati riportati all'impiego previsto ed allo specifico intervento nel quale il Cliente intende impiegare gli elementi di consolidamento. La valutazione in ordine alla adeguatezza del prodotto/sistema all'impiego previsto è di esclusiva competenza dell'utilizzatore, il quale si assume ogni responsabilità derivante dall'uso del prodotto/sistema stesso. Verificare che la revisione della scheda sia quella attualmente in vigore. I prodotti Laterlite sono destinati al solo uso professionale. Verificare con la massima attenzione le caratteristiche geometriche e i materiali costitutivi del solaio da consolidare. Porre particolare attenzione alla soluzione di consolidamento dei solai in calcestruzzo, in termini di qualità e resistenza della caldana in calcestruzzo esistente posta sopra le pignatte, alla tipologia e sezione dell'armatura dei travetti al fine di stabilire se e come procedere.

Per maggiori informazioni e relazioni tecniche contattare l'Assistenza Tecnica Laterlite (02-48011962 - [laterlite@laterlite.it](mailto:laterlite@laterlite.it)).

Finito di stampare presso Presscolor - Milano

© by Laterlite - Tutti i diritti riservati - Giugno 2024 - Pubblicazione fuori commercio