



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale INGEGNERIA CIVILE E AMBIENTALE

RINFORZO CON FRP DI NODI IN TELAI IN C.A.

FRP REINFORCEMENT OF KNOTS IN R.C. FRAMES

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. Ing. ROBERTO CAPOZUCCA

Tesi di Laurea di:

ALESSIO SCIAMANNA

A.A. 2022 / 2023

*A ME,
ALLA MIA FAMIGLIA,
AI MIEI NONNI
E A TUTTI COLORO CHE SENTONO DI AVER
CONTRIBUITO AL RAGGIUNGIMENTO DI QUESTO
PRIMO TRAGUARDO.*

INDICE

INTRODUZIONE	PAG.4
CAP. I NODI DI TELAI IN CEMENTO ARMATO	PAG.6
1.1 COMPORTAMENTO DELLE PARTI NODALI NEI TELAI IN C.A.	PAG.7
1.2 TECNICHE PER MITIGARE LE CRITICITÀ NEI NODI IN C.A.	PAG.9
CAP. II ATTIVITÀ SPERIMENTALE	PAG.11
2.1 MODELLO SPERIMENTALE	PAG.12
2.2 ESECUZIONE PRIMA PROVA SU MODELLO NON RINFORZATO	PAG.17
2.3 DATI SPERIMENTALI	PAG.18
2.4 EVIDENZE STRUTTURALI	PAG.22
CAP. III RINFORZO CON BFRP	PAG.25
3.1 PECULIARITÀ MATERIALI FRP	PAG.26
3.2 PROPRIETÀ DEL MATERIALE IMPIEGATO	PAG.26
3.3 APPLICAZIONE DEL RINFORZO STRUTTURALE	PAG.28
CAP. IV ATTIVITÀ SPERIMENTALE SU MODELLO RINFORZATO	PAG.32
4.1 MODELLO SPERIMENTALE RINFORZATO	PAG.33
4.2 DATI SPERIMENTALI	PAG.35
4.3 EVIDENZE STRUTTURALI	PAG.40
CONCLUSIONI	PAG.42
BIBLIOGRAFIA	PAG.43
RINGRAZIAMENTI	PAG.44

INTRODUZIONE

Tutti gli ambiti dell'ingegneria sono in continua evoluzione, e non è da meno quello dell'Ingegneria Civile. Si tratta di una evoluzione che mira sempre più a migliorare il benessere e la funzionalità delle strutture, sia di quelle che verranno costruite ma soprattutto di quelle già esistenti.

L'Italia oltre ad essere un paese di grande qualità artistica è anche fortemente esposta al rischio sismico, per cui la tematica della salvaguardia delle strutture esistenti e le conseguenze che ne portano su di esse le diverse sollecitazioni d'esercizio sono di nostro principale interesse. Quindi la finalità è quella di riuscire ad ottenere, o recuperare, il massimo dalle nostre strutture pur mantenendone la corretta funzionalità e sicurezza.

Questo cercando metodi e sistemi innovativi e sempre più mirati che possano sostituire molti dei metodi di rinforzo strutturale tradizionali, i quali risultano essere invasivi per le strutture ed in alcuni casi possono anche generare importanti variazioni della rigidità degli elementi strutturali con conseguenze sulla diversa risposta alle azioni orizzontali, quali sono quelle sismiche.

Quindi la riabilitazione ed il rinforzo strutturale sono le migliori soluzioni per ridurre i rischi che le sollecitazioni possono portare sulle strutture esistenti. Queste soluzioni risultano essere vantaggiose anche dal punto di vista dello sfruttamento delle risorse in quanto, utilizzando materiali sempre più all'avanguardia, ci permettono di ottenere elevate prestazioni potendo quindi sfruttare al massimo ciò che le strutture esistenti ci possono offrire.

Il tutto è quindi costantemente affiancato dalle nuove tecnologie, con soluzioni sempre più mirate ed efficaci.

La presente attività è infatti volta allo studio di una delle più attuali tecniche per il rinforzo strutturale, ovvero l'utilizzo di materiali compositi a base di fibre naturali di diversa natura (FRP). In questo caso particolare sono state utilizzate le fibre di basalto (BFRP).

I risultati ottenuti sono frutto di diverse prove sperimentali effettuate presso il “Laboratorio Prove Materiali e Strutture” dell’Università Politecnica delle Marche di Ancona. Laboratorio di eccellenza nell’ambito strutturale in Italia.

La finalità è quella di presentare l’efficacia della tecnica di rinforzo applicata e poterne quindi quantificare gli effettivi benefici sul modello indagato.

Lo studio verte nel rinforzo di un sistema trave pilastro, ricreando un tipico nodo delle strutture intelaiate in cemento armato; che è stato sottoposto ad uno stato tensionale che va a simularne la risposta sotto azione sismica.

Quindi si valuta la risposta della struttura prima e dopo l’applicazione del rinforzo strutturale.

In ambito ingegneristico le strutture che sfruttano i benefici dei materiali compositi sono diventate molto comuni perché quest’ultimi permettono di sviluppare elevate capacità di resistenza nonostante il loro ridotto peso.

Più nel dettaglio, nei successivi capitoli, vengono inizialmente evidenziate le caratteristiche e le problematiche legate alla risposta delle parti nodali nelle strutture intelaiate in c.a., nei confronti delle diverse sollecitazioni alle quali sono sottoposte.

In seguito, è presentato il modello del nodo trave-pilastro sulla quale sono stati effettuati gli studi.

Di questo, mediante prova di carico in prossimità di un nodo libero, è stata valutata la risposta in termini di deformazioni, prima dell’applicazione del trattamento, quindi valutando l’effettiva risposta del solo calcestruzzo armato.

Successivamente è presentato nello specifico il materiale impiegato nel rinforzo ed oggetto di studio, facendo riferimento alle proprie caratteristiche specifiche e al comportamento in esercizio.

L’attenzione è soprattutto posta sulla corretta posa in opera del rinforzo.

Infine, è stata nuovamente effettuata la prova, in questo caso però sul modello rinforzato, che ci ha permesso poi di trarre le dovute conclusioni sull’efficacia e sui benefici del trattamento di rinforzo.

CAP. I

NODI DI TELAI IN

CEMENTO ARMATO

1.1 COMPORTAMENTO DELLE PARTI NODALI NEI TELAI IN C.A.

Come riporta il Dipartimento della Protezione Civile, fino al 1984 la superficie del territorio nazionale classificata come “sottoposta a rischio sismico” era solo pari al 45%. Questo ne comporta che molte delle strutture con cui ci troviamo ad interagire oggi possono non presentare criteri costruttivi che tengano conto delle sollecitazioni sismiche o nelle migliori delle ipotesi, ne sono provviste, ma non con le dettagliate modalità riportate nelle NTC 2018, per il quale l’intero territorio nazione è considerato ad elevato rischio sismico.

Queste strutture sprovviste di adeguati criteri antisismici sono concepite per resistere principalmente ai carichi gravitazionali e quindi vengono parzialmente a trascurare le sollecitazioni flessionali e di taglio che le travi trasmettono al pilastro quando sono sottoposte ad importanti sollecitazioni orizzontali, creandone criticità alle parti nodali.

A sua volta si andrà quindi ad utilizzare un minor quantitativo di armatura trasversale e longitudinale sul pilastro, che risulta essere più debole della trave. Quindi se venisse sollecitato orizzontalmente, simulando l’azione sismica, si può verificare il collasso della struttura a livello del nodo per schiacciamento del calcestruzzo.

In particolar modo possiamo osservare le seguenti criticità:

- Plasticizzazione nella trave e nel pilastro sia in testa che al piede.
- Rottura al taglio della trave e nel nodo.
- Perdita di aderenza delle barre longitudinale nella trave e nel pilastro.

La principale causa di collasso è legata alla presenza di deformazioni anelastiche che si concentrano nel nodo trave-pilastro, in quanto l’armatura arriva a snervamento e inizia ad accumulare deformazioni non recuperabili o, meglio, non lo sono con le convenzionali tecniche di recupero strutturale.

Nello specifico, nelle strutture assenti di criteri antisismici si va fortemente a limitare la duttilità del nodo e a favorire il presentarsi di significative riduzioni di resistenza.

Ad esempio, nell’articolo “Comportamento ciclico-sperimentale di un nodo trave-pilastro estratto da una struttura esistente in c.a.” dell’Università degli studi della Basilicata, emerge come per valori di deformazioni pari all’1% si possono verificare anche cadute del 50% della rigidità; questo avviene quando nel nodo si iniziano a verificare le prime significative

fessurazioni. Successivamente poi al crescere degli spostamenti i fenomeni di plasticizzazione si spostano dal nodo al pilastro rendendo quindi la situazione molto più instabile.



Figure 1.1 - TIPICA FESSURAZIONE DI UN NODO TRAVE-PILASTRO

1.2 TECNICHE PER MITIGARE LE CRITICITÀ NEI NODI IN C.A.

Una delle prime accortezze, nel caso di strutture di nuova progettazione, è quella di progettare facendo riferimento ai criteri antisismici riportati nelle NTC 2018 nel capitolo 7 “PROGETTAZIONE PER AZIONI SISMICHE”.

In secondo luogo, invece, per strutture già esistenti, non provviste di criteri antisismici o danneggiate, si possono utilizzare tecniche di recupero e rinforzo strutturale che sfruttano moderni materiali dell'ingegneria civile come:

- RINFORZO TRAMITE FASCE DI MATERIALI COMPOSITI A BASE DI FIBRE NATURALI DI DIVERSA NATURA (FRP)
- RINFORZO CON FRP TRAMITE TECNICA NSM,
- RINFORZO MEDIANTE PLACCAGGI CON FRP,
- INCAMICIATURA DEL NODO TRAVE-PILASTRO.

La prima tecnica di rinforzo verrà trattata nello specifico nei successivi capitoli.

Per quanto riguarda la tecnica NSM, delle lamine di FRP vengono inserite all'interno di intagli eseguiti nel copriferro dell'elemento da rinforzare e poi vengono incollate mediante resina epossidica. Questo permette alle lamine di FRP di sviluppare elevata aderenza con il calcestruzzo, che consente di sfruttare al massimo le elevate caratteristiche meccaniche del rinforzo con FRP.



Figure 1.2 - RINFORZO FRP CON TECNICA NSM

La terza tecnica consiste nel realizzare un placcaggio diffuso con delle lastre di spessore contenuto di circa 3cm armate con reti in materiale composito FRP opportunamente connesse al supporto mediante sistema di connessioni trasversali.



Figure 1.3 - PLACCAGGIO CON FRP

L'ultima tecnica consiste nel creare delle verre e proprie incamiciature attorno al nodo in calcestruzzo fibro-rinforzato ad elevate prestazioni (HPFRC). Ovvero si va a gettare attorno all'elemento strutturale una camicia di spessore di 3-4 cm. Risulta essere una tecnica vantaggiosa perché utilizza un materiale simile al calcestruzzo già esistente ed inoltre presenta anche un comportamento debolmente incrudente a trazione.

L'uso dell'HPFRC va a sostituire la classica tecnica d'incamiciatura con calcestruzzo non fibro-rinforzato per cui si avevano spessori di 7-10 cm circa.

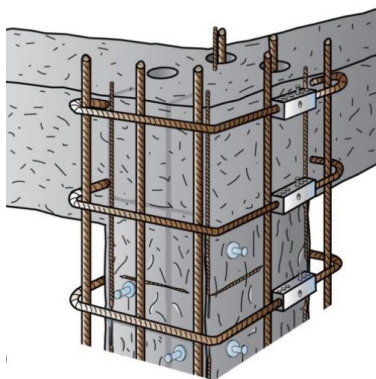


Figure 1.4 - INCAMICIATURA CLASSICA



Figure 1.5 - INCAMICIATURA CON HPFRC

CAP. II

ATTIVITÀ SPERIMENTALE

2.1 MODELLO SPERIMENTALE

Il modello sperimentale è rappresentato da un tipico nodo trave-pilastro presente nelle strutture intelaiate in calcestruzzo armato, con finalità di rappresentarne il suo comportamento quando è sottoposto ad azione orizzontale tipica di un evento sismico.

Poiché il telaio risulta emisimmetricamente caricato, è stato possibile optare per una modello dove si considera solo una porzione di telaio, incernierato alla base e con un appoggio in prossimità del nodo che funge da contrasto, rendendo quindi il sistema isostatico.

Questo schema semplificativo ci permette di ricreare lo stesso stato tensionale al nodo che genererebbe una azione orizzontale; tramite l'applicazione di una forza verticale in prossimità del nodo libero.

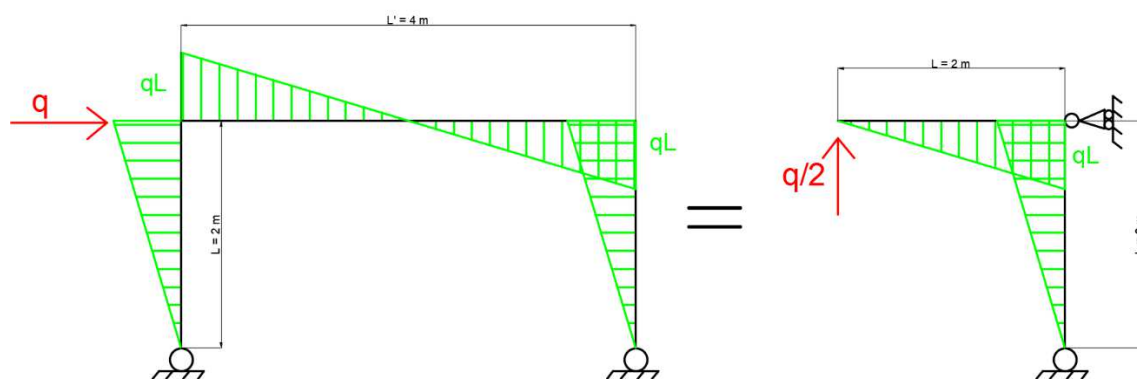


Figure 2.1 - MODELLO SPERIMENTALE, SOLLECITAZIONI INDOTTE

Il modello è costituito da:

- Trave in calcestruzzo 20/25 di sezione 20 cm x 20 cm, con armatura longitudinale $\phi 12$ (due tondini all'intradosso e due all'estradosso) e staffe $\phi 6$ con passo 10 cm (raffittito a 5 cm in prossimità del nodo).
- Pilastro in calcestruzzo armato 20/25 di sezione 20 cm x 20 cm, con armatura longitudinale e staffatura analoghe alla trave.
- Cerniera di base (A).
- Martinetto idraulico orizzontale al nodo (B) che funge da contrasto per dare stabilità al sistema.

- Martinetto idraulico verticale al nodo (B) per dare carico verticale verso il basso costante sul pilastro e simulare la presenza del carico d'esercizio, generando sul pilastro il tipico stato tensionale di presso flessione che si ha in esercizio.
- Martinetto idraulico nel nodo libero (C) per fornire carico verticale verso l'alto e poter quindi simulare lo stato tensionale di un'azione orizzontale.
- Trasduttore verticale LVDT (5) (Linear Variable Displacement Transducer, dispositivo elettromeccanico/sensore che converte moto meccanico o vibrazione meccanica in segnale elettrico per misurare una deformazione); per misurare lo spostamento al nodo libero della trave.
- Trasduttori LVDT (3, 4) sulla superficie del calcestruzzo compresso per misurarne le deformazioni.
- Trasduttori strain gauge (1, 2), per misurare le deformazioni locali, inseriti nel getto in prossimità dell'armatura della trave e del pilastro nei pressi del nodo.
- Trasduttori LVDT (7, 8) per misurare la deformazione del calcestruzzo nel nodo.

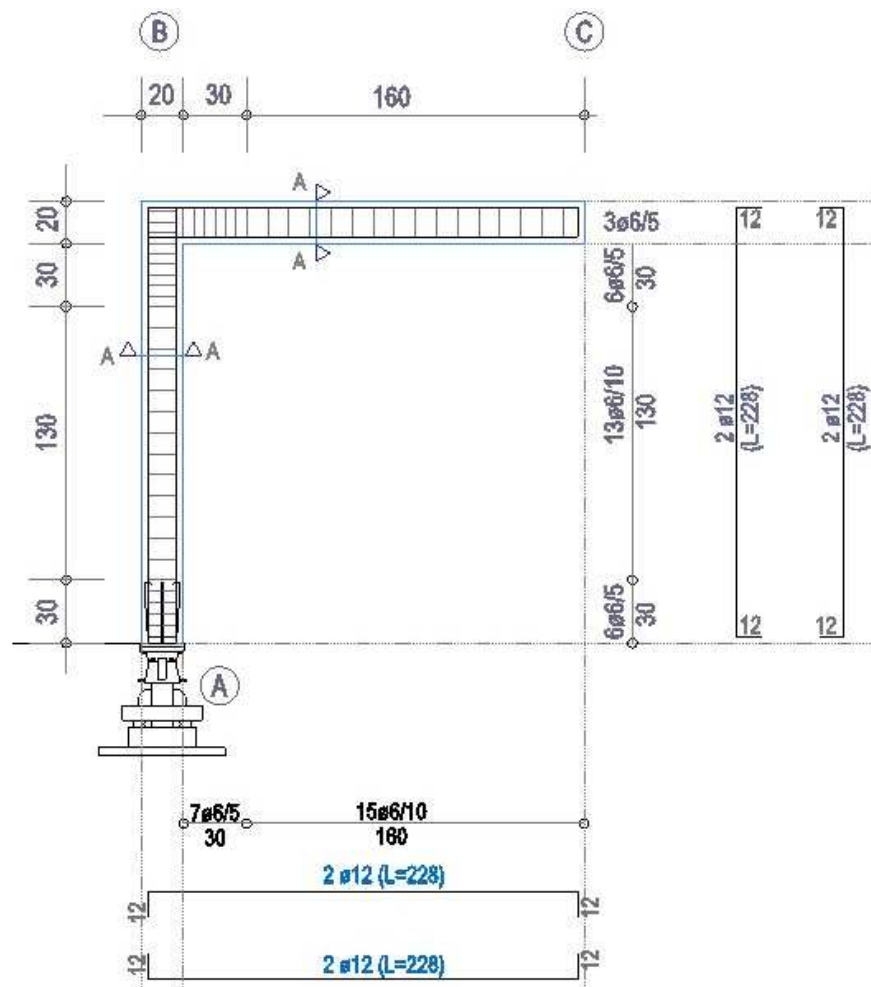


Figure 2.2 - MODELLO SPERIMENTALE - GEOMETRIA e DISTINTA DELLE ARMATURE



Figure 2.3 – CERNIERA DI BASE



Figure 2.4 – MARTINETTI NEL NODO (B)



Figure 2.5 – MARTINETTO NEL NODO (C)



Figure 2.6 – TRASDUTTORE 5 NODO (C)



Figure 2.7 – TRASDUTTORI 7,8 NODO (B)

Technical drawing of a mechanical assembly, likely a crane or lifting device, showing dimensions and components.

Dimensions:

- Horizontal dimensions: 90, 100, 20.
- Vertical dimensions: 20, 90, 100.

Labels and Components:

- A:** Base or support structure.
- B:** Vertical support or guide.
- C:** Horizontal support or guide.
- 1, 2:** Components of the vertical support structure.
- 3:** Component of the horizontal support structure.
- 4:** Component of the vertical support structure.
- 5:** Component of the horizontal support structure.
- 6:** Component of the horizontal support structure.
- 7, 8:** Components of the horizontal support structure.
- Carico verticale costante:** Constant vertical load.
- Contrasto orizzontale:** Horizontal resistance.

- 1 Strain guage (nel getto) armatura trave tesa
- 2 Strain guage (nel getto) armatura pilastro tesa
- 3 LVDT superficie pilastro compressa
- 4 LVDT superficie trave compressa
- 5 LVDT per spostamento punta trave
- 6 Misura forza da applicare al provino
- 7 LVDT superficie compressa nodo
- 8 LVDT superficie compressa nodo



Figure 2.9 SETUP DI PROVA

2.2 ESECUZIONE PRIMA PROVA SU MODELLO NON RINFORZATO

Nella prima prova il modello è stato sollecitato tramite il martinetto idraulico del nodo (C) con forza diretta verso l'alto attraverso quattro cicli di carico e scarico.

Rispettivamente:

- PRIMO CICLO: carico 0 – 2 KN, scarico 2 – 0 KN
- SECONDO CICLO: carico 0 – 3 KN, scarico 3 – 0 KN
- TERZO CICLO: carico 0 – 3 KN, scarico 3 – 0 KN
- QUARTO CICLO: carico 0 – 4 – 5 – 6 KN, scarico 6 – 0 KN

Mentre il martinetto idraulico verticale in (B) ha esercitato una azione costante di compressione sul pilastro pari a 40KN.

La prova presenta otto canali (martinetto idraulico in (B) e sette trasduttori (1,2,3,4,5,7,8)) collegati ad un pc che tramite un software ci permette di registrare la forza generata dal martinetto idraulico e le deformazioni/spostamenti dei trasduttori.

Il risultato ci viene restituito sottoforma di forza (KN), spostamento (in mm per i trasduttori 5,7,8) e deformazione (μm per i trasduttori 1,2,3,4).

I trasduttori posti all'estradosso (3,4) permettono di misurare la deformazione a compressione del calcestruzzo (ϵ_c), mentre quelli intradossali immersi nel calcestruzzo (1,2) permettono di misurare la deformazione a trazione dell'acciaio (ϵ_s).

Da queste due misure è possibile individuare analiticamente la curvatura; mentre dalla forza agente è stato ricavato il momento sollecitante.

MOMENTO (KNmm) = $F \times L$ (con $L=2\text{m}=2000\text{mm}$)

CURVATURA (adimensionale) = $\frac{\epsilon_s + |\epsilon_c|}{d}$ (con $d = h - \text{copriferro} = 20 - 3 = 17\text{cm}$).

Da queste due grandezze è quindi possibile costruire il diagramma momento-curvatura che rappresenta uno dei migliori approcci per valutare la risposta delle strutture in c.a.

Mentre per le misure ottenute dai trasduttori 7,8 è necessario normalizzare il risultato facendo riferimento alle rispettive lunghezze dello strumento (243mm per il trasduttore 7, 133 mm per il trasduttore 8).

2.3 DATI SPERIMENTALI

Di seguito sono presentati i grafici forza-deformazione dei relativi trasduttori ed i grafici momento-curvatura ottenuti in maniera analitica e normalizzati ad una curva trilatera.

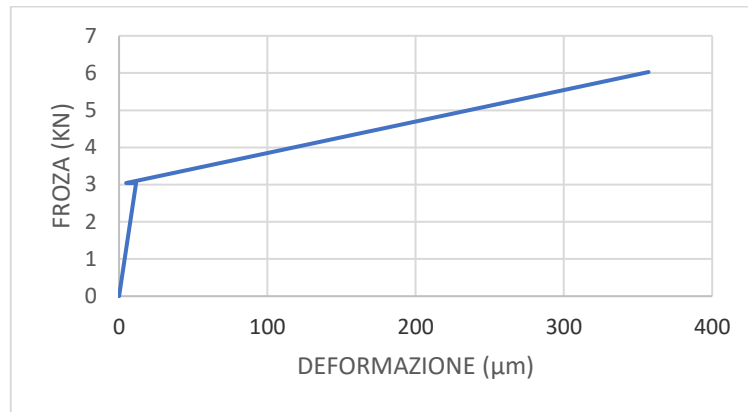


Figure 2.10 - GRAFICO INVILUPPO TRASDUTTORE ACCIAIO 1

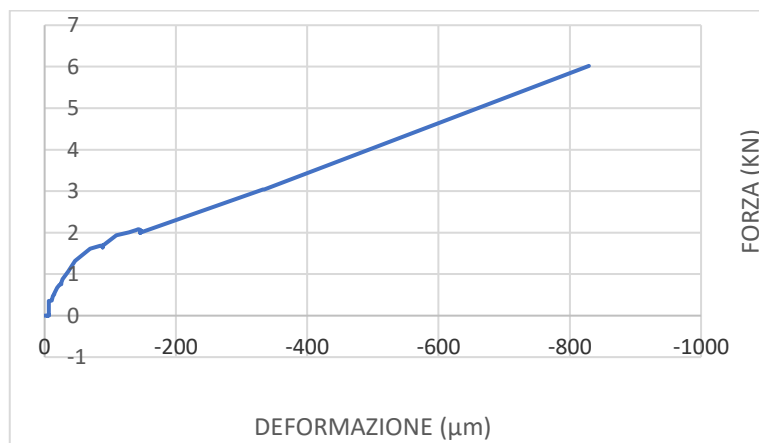


Figure 2.11 - GRAFICO INVILUPPO TRASDUTTORE CLS 4

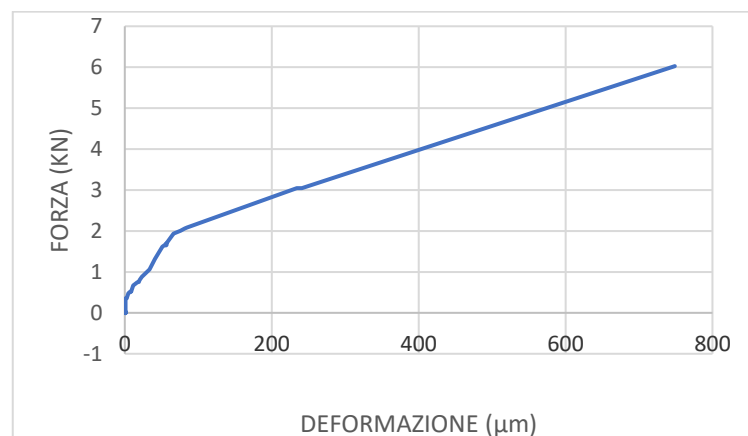


Figure 2.12 - GRAFICO INVILUPPO TRASDUTTORE ACCIAIO 2

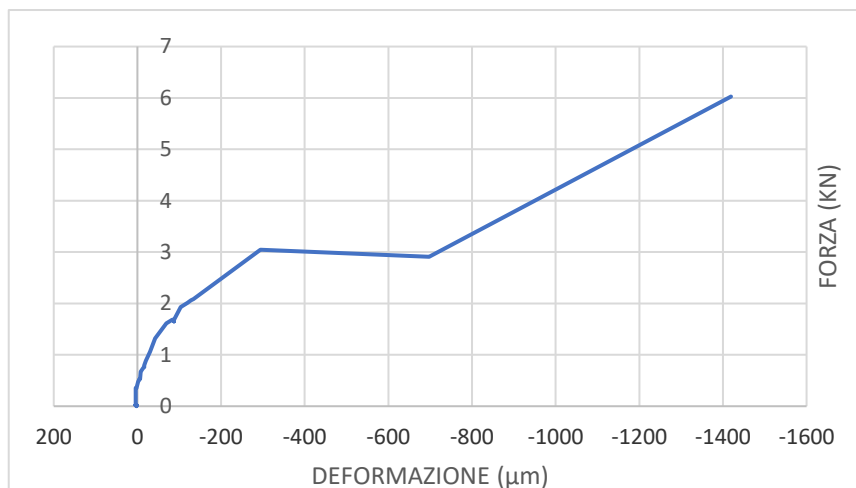


Figure 2.13 - GRAFICO INVILUPPO TRASDUTTORE CLS 3

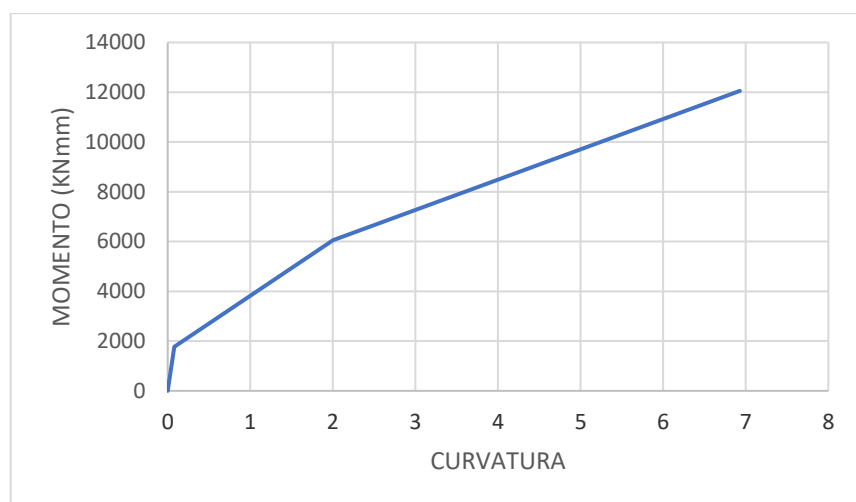


Figure 2.14 - TRILATERA MOMENTO-CURVATURA TRASDUTTORI 1-4

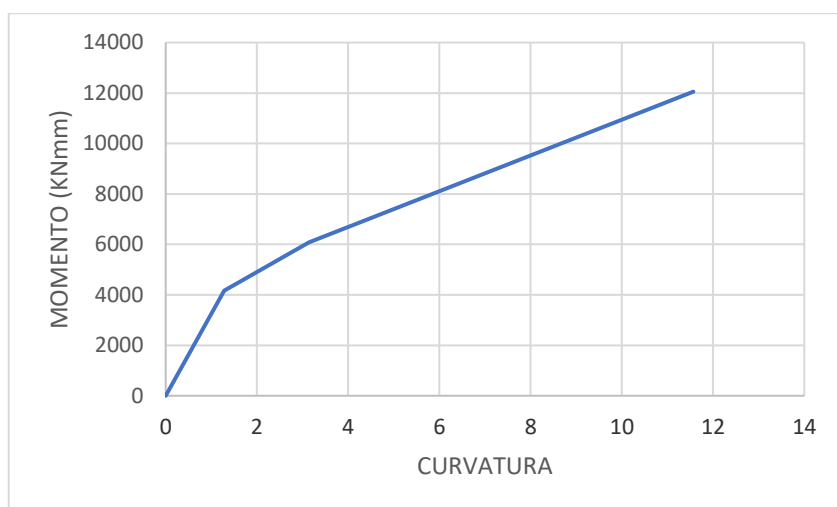


Figure 2.15 - TRILATERA MOMENTO-CURVATURA TRASDUTTORI 2-3

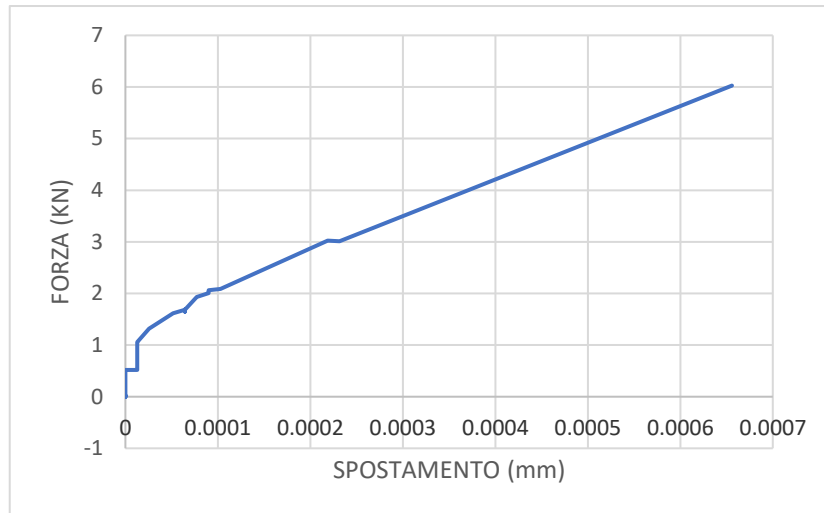


Figure 2.16 - GRAFICO INVILUPPO TRASDUTTORE CLS 7

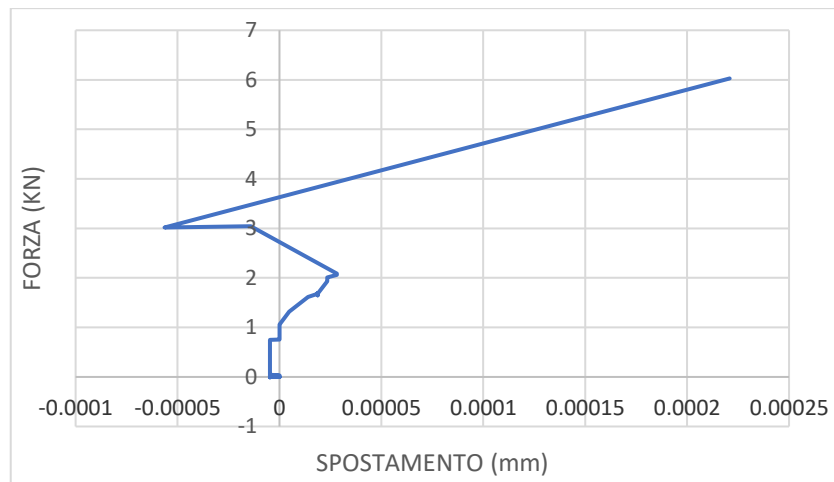


Figure 2.17 - GRAFICO INVILUPPO TRASDUTTORE CLS 8

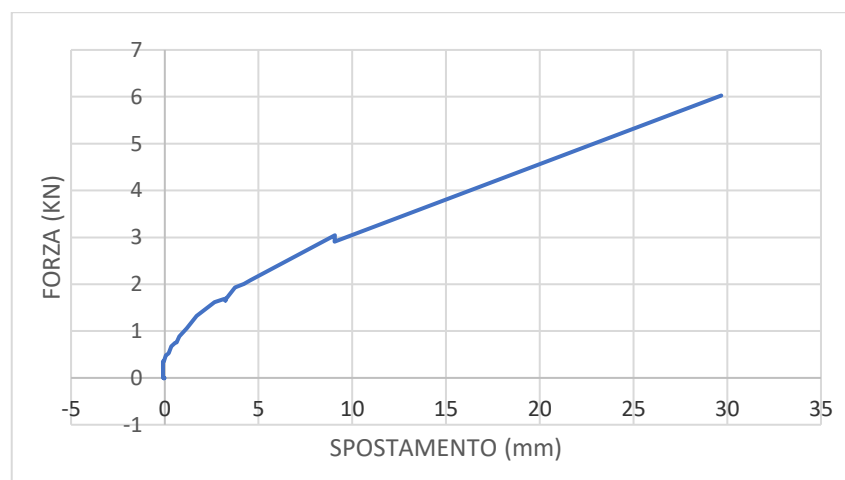


Figure 2.18 - GRAFICO INVILUPPO TRASDUTTORE 5

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per ogni ciclo di carico e scarico:

CICLO DI CARICO	FORZA KN	TRASDUTTORE 1 μm	TRASDUTTORE 4 μm	TRASDUTTORE 2 μm	TRASDUTTORE 3 μm	TRASDUTTORE 5 mm
1	0	0	0	0	0	0
	1	-17	-36	33	-30	1
	2	-38	-145	82	-135	4,5
2	0	-23	-19	8	-2	0
	1,5	-45	-80	46	-60	2,5
	3	12	-334	234	-302	9
3	0	-45	-29	15	1720	0
	1,5	-72	-80	48	2900	2,5
	3	4	-336	240	-690	9
4	0	-55	-40	19	-412	0
	2	-77	-134	64	-541	4
	4	145	-526	416	-993	14
	6	356	-818	749	-1423	30
	0	-46	-179	4	-454	1,8

CICLO DI CARICO	FORZA KN	MOMENTO 1-4 KNmm	CURVATURA 1-4	MOMENTO 2-3 KNmm	CURVATURA 2-3
1	0	0	0	0	0
	1	2000	0,1	2000	0,3
	2	4000	0,5	4000	1,3
2	0	0	0	0	0
	1,5	3000	0,1	3000	0,6
	3	6000	2	6000	3,2
3	0	0	0	0	0
	1,5	3000	0,05	3000	17
	3	6000	2	6000	18
4	0	0	0	0	0
	2	4000	0,3	4000	3,6
	4	8000	4	8000	8,2
	6	12000	7	12000	12,8
	0	0	0	0	0

2.4 EVIDENZE STRUTTURALI

Possiamo osservare come sulla trave ci siano tipiche fessure da flessione semplice, dirette verso l'alto, che tendono a spostarsi sempre più verso l'alto all'aumentare del carico (in quanto l'asse neutro tende ad alzarsi); inoltre notiamo come la distanza reciproca tra le fessure sia all'incirca costante, e che all'aumentare del carico tendano a propagarsi lungo tutta la trave anche in zone più lontane dal nodo.

Per elevato carico (5-6 kN) la fessurazione si propaga verticalmente anche sul pilastro, per via dell'elevata azione combinata di momento e compressione (pressoflessione).

Di seguito sono riportate le fessure che si sono aperte durante la prova sperimentale, rispettivamente numerate in riferimento al ciclo di carico nel quale si sono aperte.

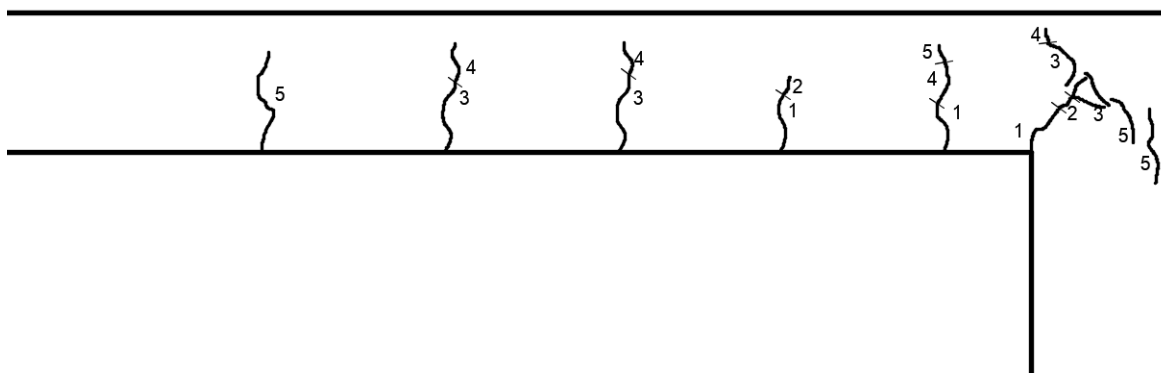


Figure 2.19 - MODELLO DEL QUADRO FESSURATIVO (4 fa riferimento al quarto ciclo da 0 a 4 kN, mentre 5 fa riferimento al quarto ciclo da 4 a 6 kN)

Nel nodo la fessurazione è principalmente obliqua in quanto vi agisce una spinta a vuoto orizzontale proveniente dalla trave ed una verticale dal pilastro; quindi, con risultante obliqua e fessurazione ad essa perpendicolare.

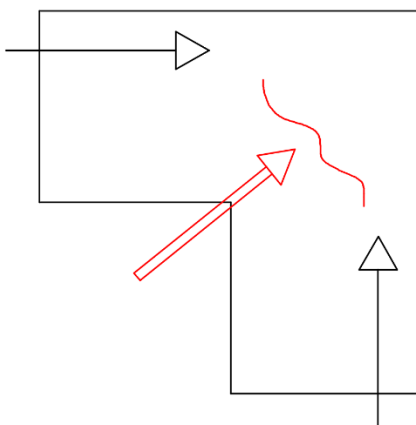


Figure 2.20 - MODELLO FESSURATIVO DEL NODO



Figure 2.21 - FESSURE DA FLESSIONE SULLA TRAVE



Figure 2.22 - FESSURE PRIMA DELL'ULTIMO CICLO DI CARICO

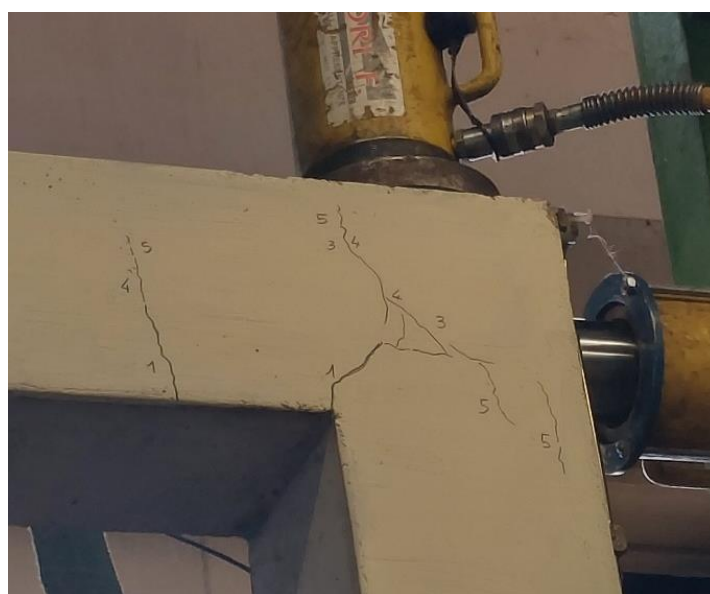


Figure 2.23 - FESSURAZIONE SUL NODO



Figure 2.24 - FESSURAZIONE COMPLESSIVA DEL MODELLO

CAP. III

RINFORZO CON BFRP

3.1 PECULIARITÀ MATERIALI FRP

I materiali impiegati nel rinforzo sono dei laminati FRP (Fiber Reinforced Polymers, materiali fibrorinforzati composti da fibre di varia natura) in fibre di basalto (BFRP); tramite l'applicazione di fasce nelle zone sottoposte a trazione.

La peculiarità dei materiali FRP è quella di riuscire a sviluppare elevata resistenza meccanica pur possedendo elevata leggerezza. Inoltre, l'elevata varietà delle fibre che possono essere utilizzate permette di avere moduli elastici a trazione variabili in modo da poter ottenere deformabilità differenziali a seconda delle esigenze.

A differenza degli interventi basati sulle tecniche tradizionali, i tessuti FRP possono essere messi in opera impiegando un minor numero di operatori ed in tempi estremamente brevi senza andare ad interrompere l'esercizio della struttura alla quale sono applicati.

Inoltre, si tratta di materiali che si adattano a qualsiasi forma dell'elemento da rinforzare, senza la necessità di sostegni provvisori durante la posa in opera.

Nello specifico, è stato utilizzato il materiale FIDBASALT UNIDIR 400 C95® composto da fibre di basalto prodotte dalla fusione e successiva filatura di rocce vulcaniche. Il tessuto è poi termosaldato con fili di poliestere per evitare sfilacciamenti e facilitarne la posa in cantiere. Si tratta di un tessuto adatto per rinforzare elementi in CA, CAP, muratura e viene impiegato anche per la protezione di elementi sottoposti ad impatti violenti grazie alla sua tenacità.

3.2 PROPRIETÀ DEL MATERIALE IMPIEGATO

Le peculiarità del FIDBASALT UNIDIR 400 C95® sono:

- Resistente ad usura per sfregamento;
- Non suscettibile a fenomeni di idrolisi;
- Sistema di rinforzo resistente alla corrosione;
- Elevata tenacità, resistente ad urti e impatti violenti;
- Elevata resistenza a fatica, urti, vibrazioni ed elevata stabilità termica;
- Durabilità e leggerezza;
- Incremento trascurabile di spessore;

- Scarsa conducibilità termica ed elettrica;
- Trasparente alla radiazione elettromagnetica.

Gli utilizzi ideali di tale materiale sono per:

- Rinforzo di strutture soggette ad azioni dinamiche e impatti violenti;
- Adeguamento sismico;
- Rinforzi di travi e solai alle sollecitazioni di flessione o di taglio;
- Il confinamento di pilastri per incrementare la resistenza a compressione;
- Rimediare a difetti di progetto o costruzione;
- Rinforzo di strutture modificate a causa di nuove esigenze architettoniche o di utilizzo;

Tra le proprietà più rilevanti abbiamo:

- Tensione a trazione della fibra secca 3080 Mpa
- Modulo elastico della fibra secca 95 GPa
- Deformazione a rottura della fibra secca 3,15 %
- 3,3 fili/cm nel tessuto
- Massa 396 g/m²
- Resistenza caratteristica del rinforzo FRP 1900 Mpa
- Modulo di elasticità del rinforzo FRP 90 GPa
- Deformazione a rottura del rinforzo FRP 2,1 %



Figure 3.1 - STRISCIA BFRP FIDBASALT UNIDIR 400 C95

3.3 APPLICAZIONE DEL RINFORZO STRUTTURALE

Il tessuto, sottoforma di strisce, per l'applicazione necessita di una matrice a base di resina epossidica che ha due importanti funzioni: garantire l'incollaggio sull'elemento da rinforzare e favorire lo sviluppo di una resistenza uniforme da parte di tutte le fibre che compongono la striscia.



Figure 3.2 - MATRICE DI RESINA EPOSSIDICA

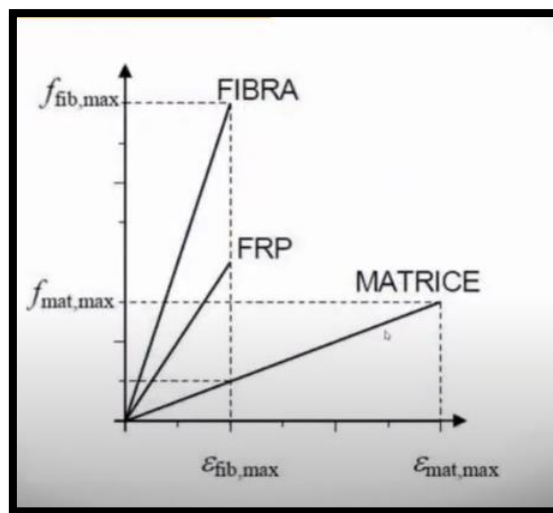


Figure 3.3 - GRAFICO SFORZO-DEFORMAZIONE FRP

Per una corretta applicazione, il materiale deve essere posto nelle zone della struttura soggette a sforzi di trazione. Perché, se al contrario venisse applicato nelle zone compresse si potrebbe perdere l'aderenza con l'elemento strutturale e avere delamination buckling (che porta alla perdita del beneficio del rinforzo, con lo sfilamento del materiale di rinforzo).

La corretta applicazione necessita di una specifica procedura.

Si va a preparare il sottofondo pulendo il substrato, tramite spazzolatura o sabbiatura e poi rasatura della superficie per eliminare eventuali asperità e materiali incoerenti.

Sarà quindi poi necessario preparare il composto per l'incollaggio, in tal caso viene utilizzato un adesivo epossidico MasterBrace SAT 4500, caratterizzato da due componenti A e B, che vengono uniti seguendo il rapporto consigliato dalla casa produttrice.

Prima si miscela il componente A e successivamente si aggiunge il componente B nel rapporto A : B = 19 : 6 per poi miscelare nuovamente per almeno un minuto.



Figure 3.4 - MISCELAZIONE COMPONENTI PER LA MATRICE ADESIVA

A questo punto si procede ad applicare il prodotto nelle zone della struttura dove è prevista l'applicazione del rinforzo (zone sottoposte a trazione), tramite pennello, con successiva lisciatura.



Figure 3.5 - ZONE PREVISTE PER L'APPLICAZIONE DEL RINFORZO



Figure 3.6, 3.7 - APPLICAZIONE MATRICE ADESIVA

Quindi, assicurandosi che lo strato di resina sia ancora fresco, si può procedere all'incollaggio del tessuto di rinforzo, precedentemente tagliato in strisce della lunghezza necessaria. L'applicazione è eseguita prestando attenzione a non formare grinze, spianandolo manualmente oppure passando un rullo che elimina le eventuali bolle d'aria.



Figure 3.8, 3.9 - APPLICAZIONE RINFORZO



Figure 3.10 - APPLICAZIONE RINFORZO NEL NODO

Infine, si procede ad applicare una seconda mano di resina, questa volta sopra le strisce di materiale da rinforzo, facendo attenzione che tutti i bordi siano correttamente impregnati d'adesivo per garantirne l'ancoraggio.

Per cui il modello risulterà essere correttamente rinforzato.



Figure 3.11, 3.12 - APPLICAZIONE SECONDA MANO DI RESINA



Figure 3.13 - APPLICAZIONE SECONDA MANO DI RESINA



Figure 3.14 - MODELLO RINFORZATO

CAP. IV
ATTIVITÀ
SPERIEMENTALE SU
MODELLO RINFORZATO

4.1 MODELLO SPERIEMTNALE RINFORZATO

Il modello sperimentale con applicato il rinforzo strutturale è differente da quello della prova precedente per via della presenza di due trasduttori (strain guage) (7 ed 8) disposti rispettivamente nelle zone compressa e tesa delle fibre di rinforzo, per valutarne il comportamento deformativo (μm) durante l'esecuzione della prova. Inoltre, i precedenti trasduttori LVDT 7 ed 8 per misurare la deformazione del calcestruzzo al nodo sono stati eliminati, in quanto i canali a disposizione per la prova sono sempre otto.

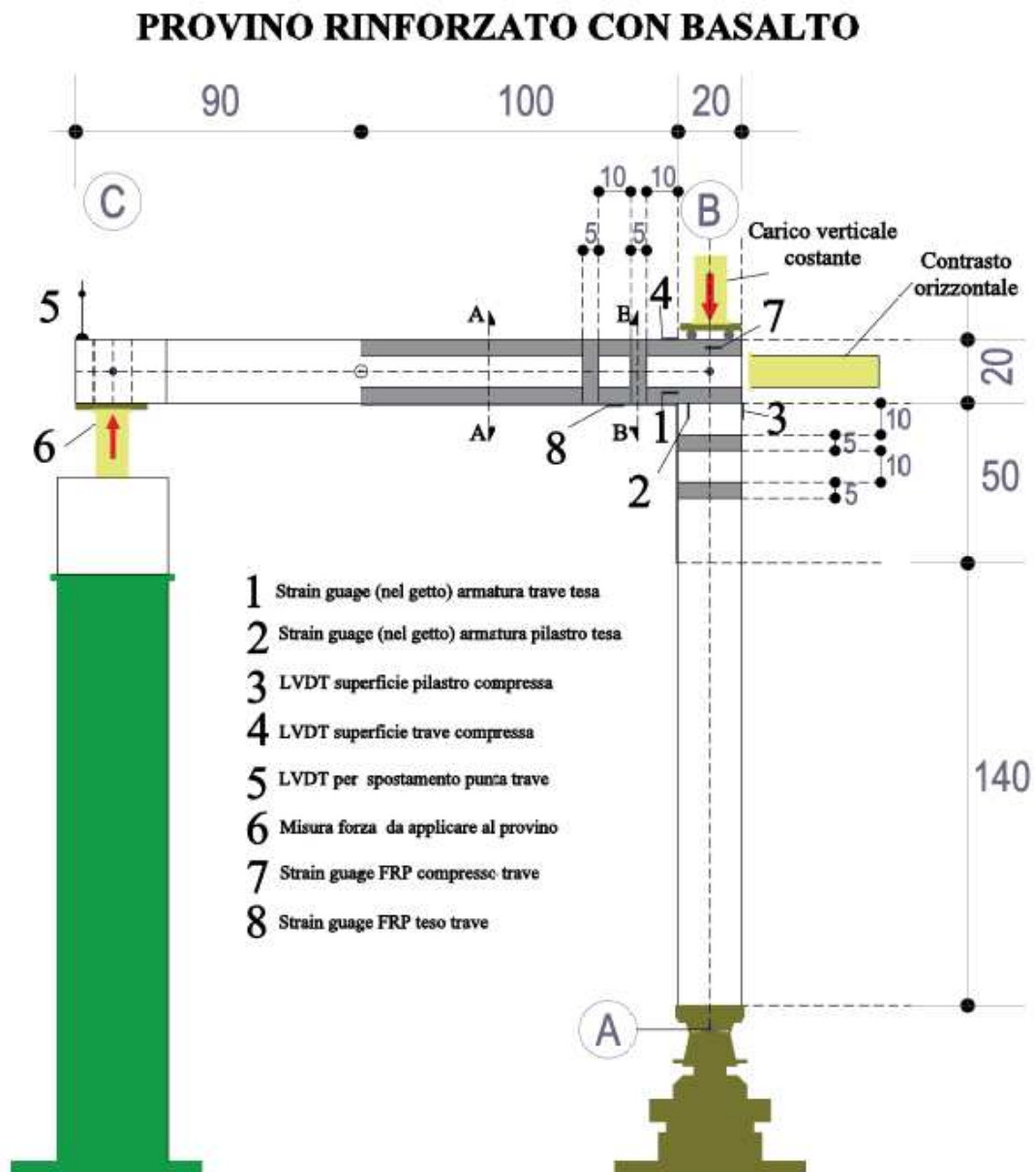


Figure 4.1 – SET UP MODELLO SPERIMENTALE RINFORZATO

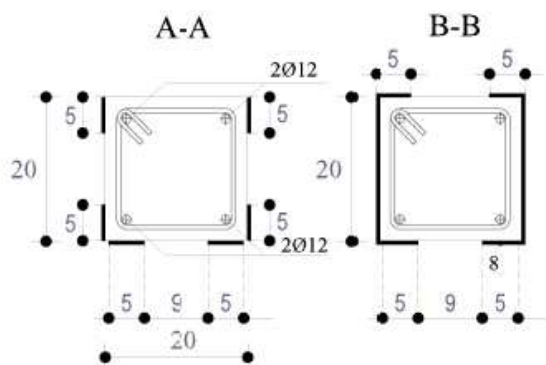


Figure 4.2 – SEZIONE RINFROZATA

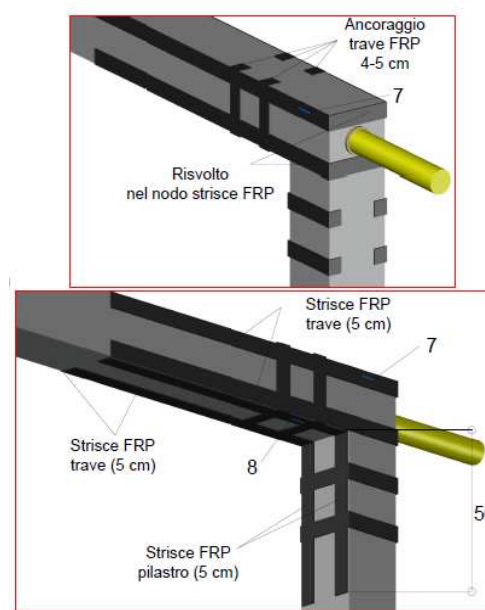


Figure 4.3 – TRASDUTTORI SUL RINFORZO

La prova è stata condotta con le stesse procedure e stessi gradini di carico della precedente, con l'unica differenza che l'ultimo ciclo di carico, piuttosto che fermarsi a 6KN, è stato spinto fino a 10,9 KN, reso appunto possibile per la presenza delle fibre di rinforzo:

- PRIMO CICLO: carico 0 – 2 KN, scarico 2 – 0 KN
- SECONDO CICLO: carico 0 – 3 KN, scarico 3 – 0 KN
- TERZO CICLO: carico 0 – 3 KN, scarico 3 – 0 KN
- QUARTO CICLO: carico 0 – 4 – 10,9 KN.

Allo stesso modo il martinetto idraulico verticale in B ha esercitato una azione costante di compressione pari a 40KN.

4.2 DATI SPERIMENTALI

I risultati sono presentati sottoforma di grafici forza-deformazione per i trasduttori e momento-curvatura ottenuti in modo analitico e normalizzati ad una trilatera, dei quali vengono confrontati quelli ottenuti considerando il trasduttore dell'acciaio teso (1) e quello delle fibre BFRP tese (8) con il trasduttore del calcestruzzo compresso (4).

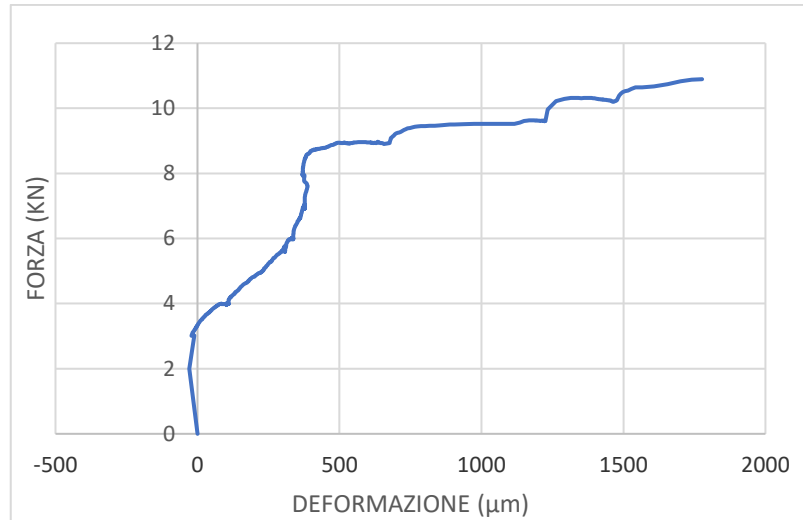


Figure 4.4 – INVILUPPO TRASDUTTORE ACCIAIO 1

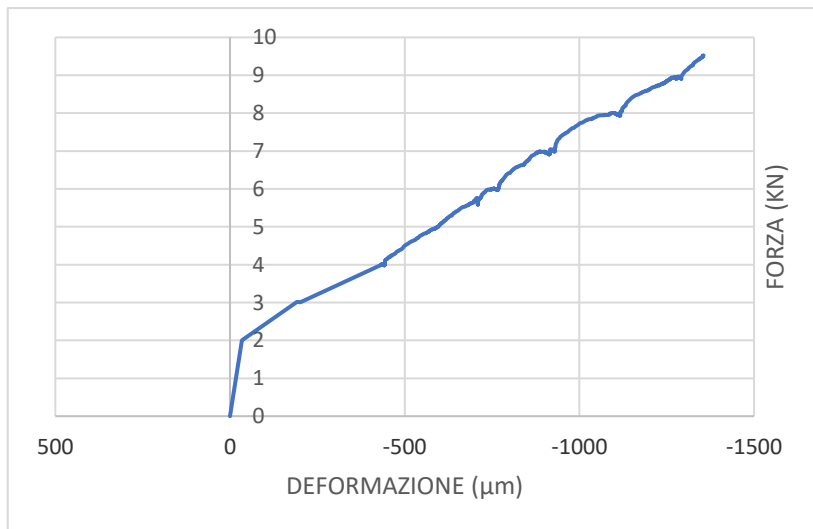


Figure 4.5 - INVILUPPO TRASDUTTORE CLS 4

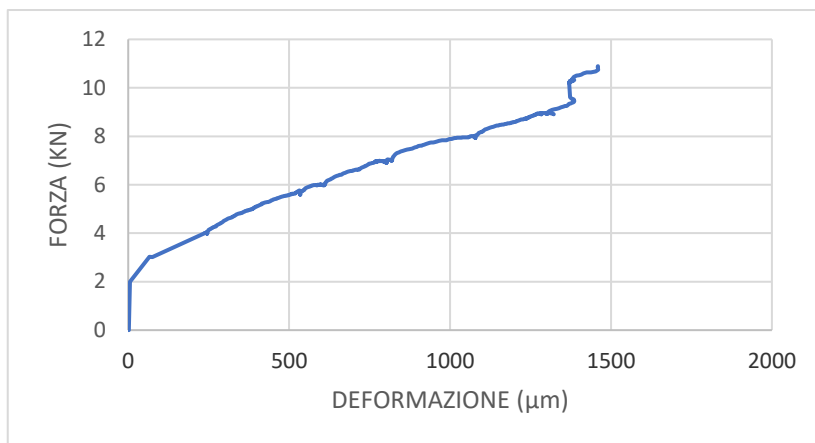


Figure 4.6 - INVILUPPO TRASDUTTORE ACCIAIO 2

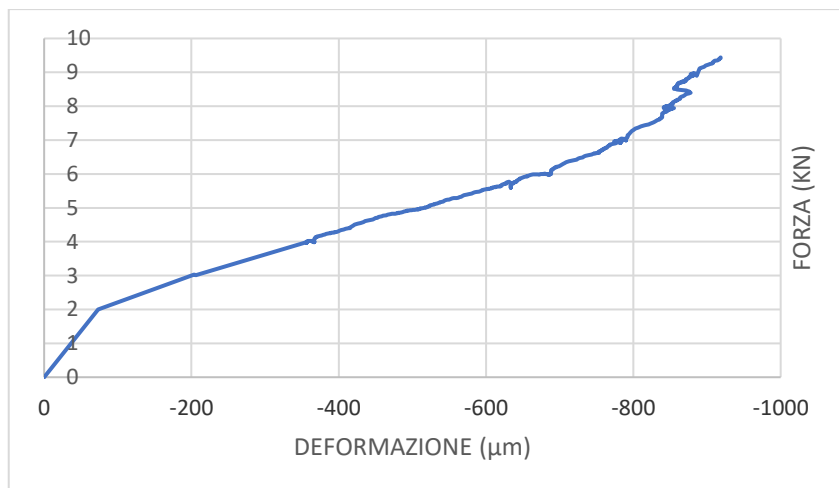


Figure 4.7 - INVILUPPO TRASDUTTORE CLS 3

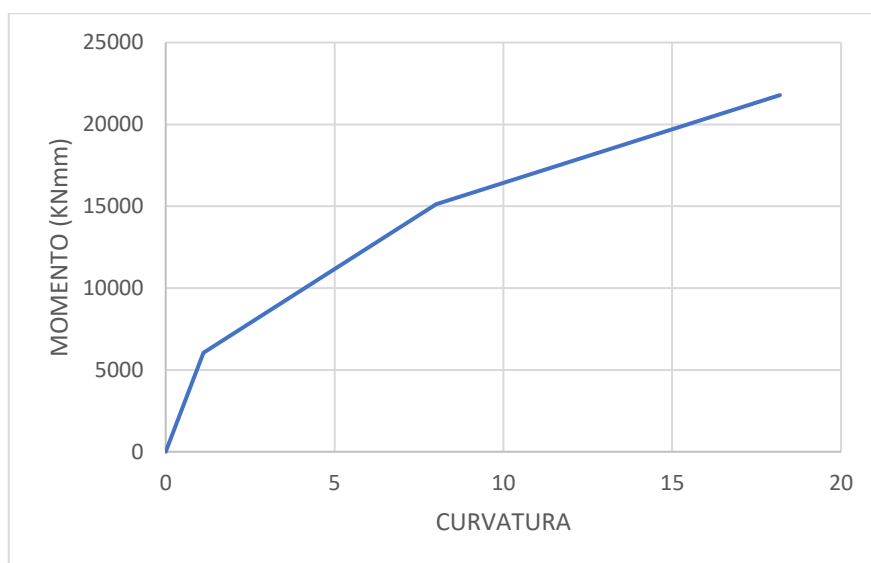


Figure 4.8 - TRILATERA MOMENTO CURVATURA TRASDUTTORI 1-4

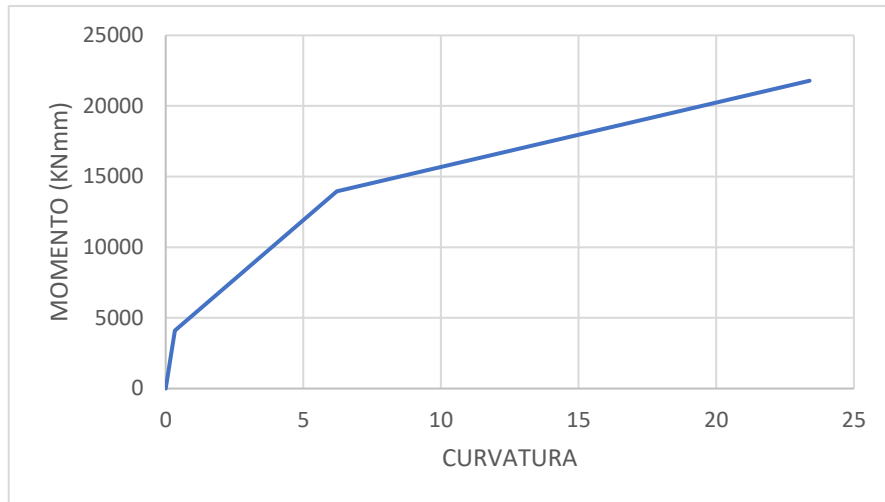


Figure 4.9 - TRILATERA MOMENTO CURVATURA TRASDUTTORI 8-4

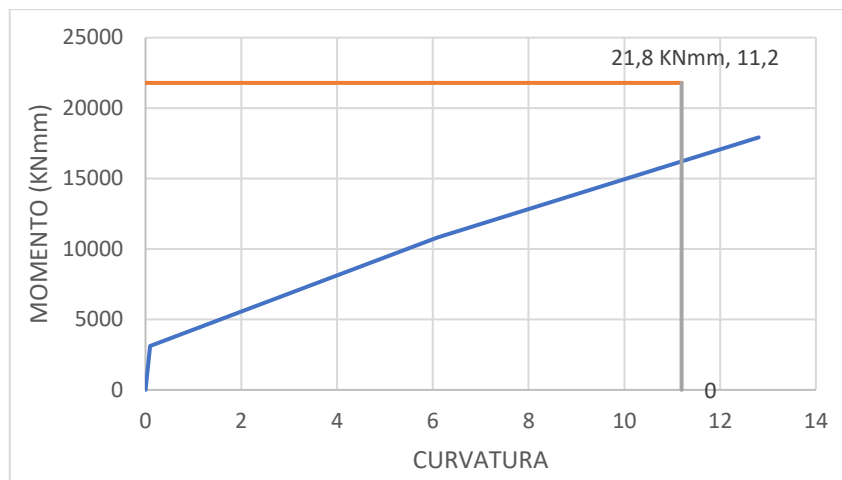


Figure 4.10 – TRILATERA MOMENTO CURVATURA TRASDUTTORI 2-3

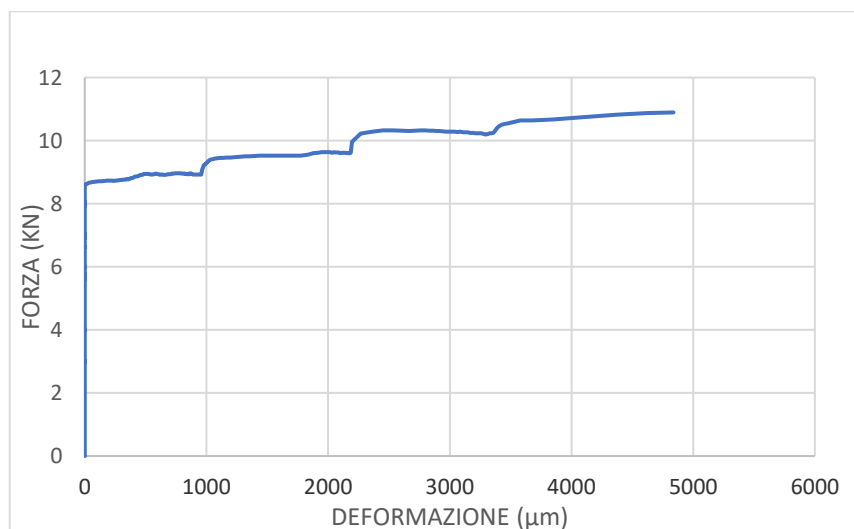


Figure 4.11 - INVILUPPO TRASDUTTORE FRP 7

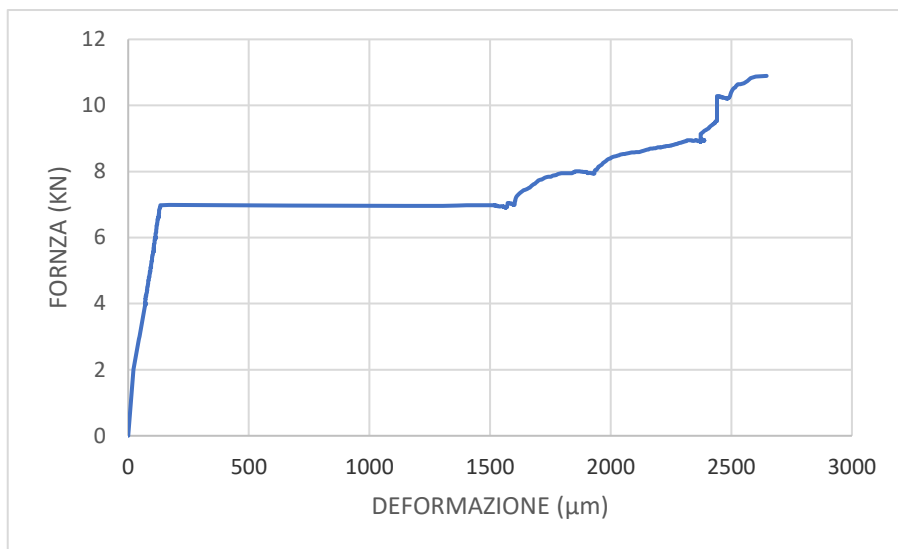


Figure 4.12 - INVILUPPO TRASDUTTORE FRP 8

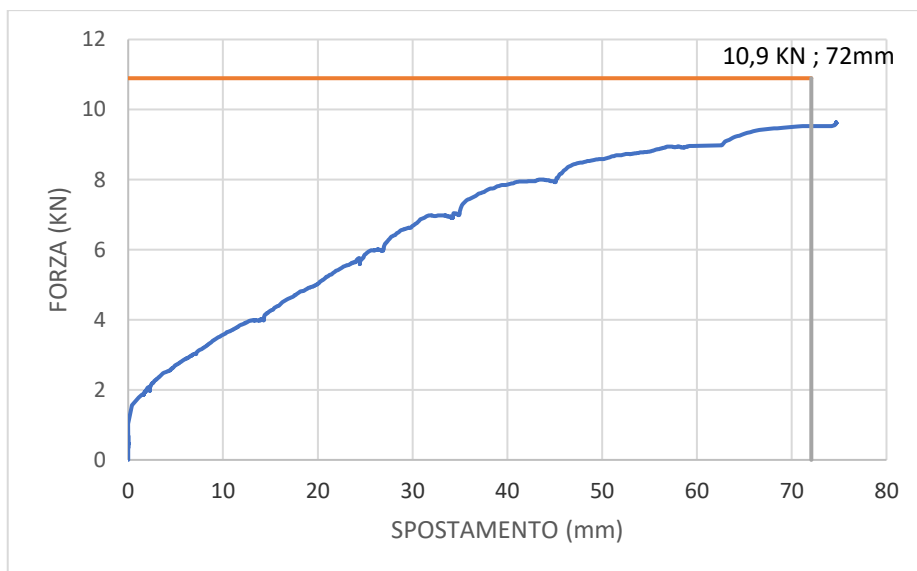


Figure 4.13 - INVILUPPO TRASDUTTORE 5

Di seguito sono riportati i risultati ottenuti per ogni ciclo di carico e scarico:

CICLO DI CARICO	FORZA KN	TRASDUTTORE 1 μm	TRASDUTTORE 4 μm	TRASDUTTORE 2 μm	TRASDUTTORE 3 μm
1	0	0	0	0	0
	1	0	2	1	-2
	2	-27	-33	5	-75
2	0	-5	21	-3	-8
	1,5	-18	2	2	-32
	3	-10	-200	57	-197
3	0	-7	27	-2	48
	1,5	-20	10	4,8	18
	3	-16	-202	75	-205
4	0	-9,6	31	-2	50
	2	-45	-35	10	-40
	4	104	-435	245	-366
	6	337	-768	609	-686
	10,9	1776	-1332	1459	-443

CICLO DI CARICO	FORZA KN	TRASDUTTORE 7 μm	TRASDUTTORE 8 μm	TRASDUTTORE 5 mm
1	0	0	0	0
	1	0	0	0
	2	-10	21	2
2	0	2,5	-4	0
	1,5	-2,5	6,4	0,8
	3	-25	47	7
3	0	0	-12	0
	1,5	-5	2	1
	3	-25	47	7
4	0	0	-12	0
	2	-12	19	3
	4	-41	70	14
	6	-69	113	30
	10,9	4837	2646	72

CICLO DI CARICO	FORZA KN	MOMENTO 1-4 KNmm	CURVATURA 1-4	MOMENTO 4-8 KNmm	CURVATURA 4-8	MOMENTO 2-3 KNmm	CURVATURA 2-3
1	0	0	0	0	0	0	0
	1	2000	0	2000	0	2000	0
	2	4000	0	4000	0	4000	0,4
2	0	0	0	0	0	0	0
	1,5	3000	0	3000	0	3000	0,2
	3	6000	1	6000	1,4	6000	1,6
3	0	0	0	0	0	0	0
	1,5	3000	0	3000	0	3000	0,1
	3	6000	1	6000	1,4	6000	1,6
4	0	0	0	0	0	0	0
	2	4000	0	4000	0,2	4000	0,3
	4	8000	3	8000	3	8000	3,5
	6	12000	6,4	12000	5	12000	7,6
	10,9	21686	18	21686	23,4	21686	12,8

4.3 EVIDENZE STRUTTURALI

Dalla prova emerge che non si sono verificate ulteriori fessurazioni oblique sul nodo che si vanno a sommare alle già presenti dalla prima prova.

La principale evidenza è invece l'elevata inflessione che subisce la trave con uno spostamento verso l'alto del nodo libero di circa 7cm, visibile ad occhio nudo e reso possibile grazie alla presenza del rinforzo strutturale.



Figure 4.14 - QUADRO FESSURATIVO

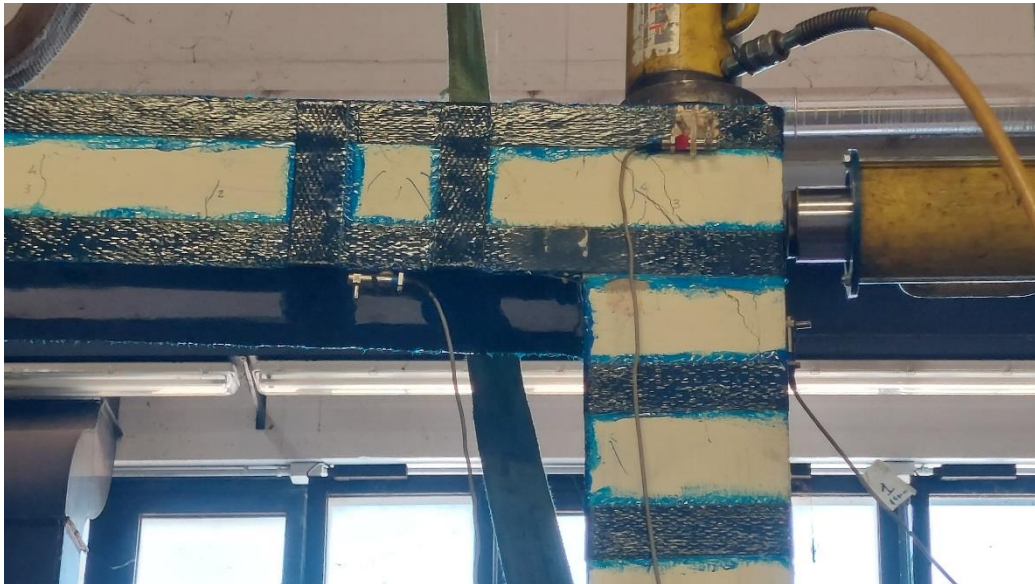


Figure 4.15 - FESSURAZIONE AL NODO

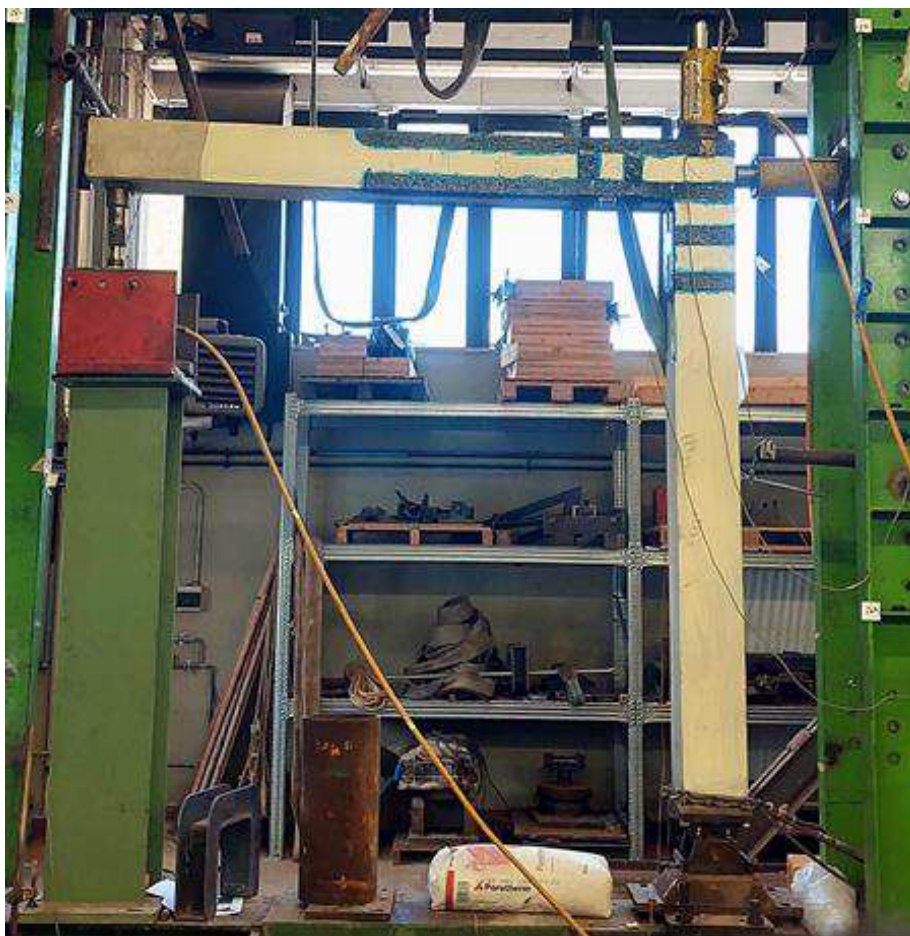


Figure 4.16 - MODELLO DEFORMATO



Figure 4.17 – ELEVATA INFLESSIONE DELLA TRAVE

CONCLUSIONI

Confrontando quanto ottenuto dalle due prove, possiamo arrivare a delle importanti conclusioni sull'efficacia del rinforzo strutturale applicato; in particolar modo i benefici li possiamo osservare a livello di:

- Assenza di ulteriore propagazione della fessurazione obliqua al nodo trave pilastro rispetto al modello non rinforzato.
- Elevato carico raggiunto dalla prova col modello rinforzato. Infatti, è stato possibile raggiungere una forza applicata al nodo libero di 10,9 KN, con quindi un momento sollecitante massimo al nodo di circa 22 KNm; la quale risulta essere una sollecitazione relativamente superiore a quelle tipiche d'esercizio.
- Spostamento massimo al nodo libero pari a 7 cm, contro i soli 3 cm della prova non rinforzata, che risulta anch'esso essere un valore impensabile da raggiungere in esercizio senza il rinforzo; in quanto si parla di una deformazione di circa il 3,5%.
- Assenza di fenomeni di delamination backing che avrebbero potuto far distaccare le fibre del materiale di rinforzo e perderne quindi i benefici.
- Assenza di distacchi importanti del calcestruzzo in prossimità del nodo (cosa che invece si sarebbe verificata se avessimo raggiunto tali carichi in assenza del rinforzo).
- Facilità di utilizzo, d'applicazione ed economicità del rinforzo in relazione agli elevati benefici riportati alla struttura.

Quindi è certamente possibile affermare che il rinforzo di una struttura intelaiata in calcestruzzo armato mediante l'utilizzo di materiale composito BFRP, adeguatamente applicato, risulta essere una delle migliori soluzioni per salvaguardare l'integrità e la resistenza delle strutture in c.a.

Bibliografia

NTC 2018 – *Nuove norme sismiche per il calcolo strutturale - Capitolo 7 - PROGETTAZIONE PER AZIONI SISMICHE.*

R. Capozucca, B. Bonci - Composite Structures - *Notched CFRP laminates under vibration – Structural Section DICEA, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy* - article from “*ELSEVIER*”, 2014, *Introduction.*

Mahmoud Higazey, Mohammad Alshannag and Ali Alqarni - *Numerical Investigation on the Performance of Reinforced 2 Concrete Beam-Column Joints Upgraded with Shape Memory 3 Alloys* – article from “*BUILDINGS*”, 2023, 13, page.1-2.

Mauro Dolce, Angelo Masi, Claudio Moroni, Domenico Nigro, Giuseppe Santarsiero, Maurizio Ferrini - *Comportamento ciclico-sperimentale di un nodo trave-pilastro estratto da una struttura esistente in c.a.* – article of “Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia applicata all’Ingegneria, Università degli Studi della Basilicata”,

Natalino Gattesco - *Criticità degli edifici a telaio in calcestruzzo armato soggetti ad eccitazione sismica* – article from “*Ingenio*”, 2021, page.1-3

FIDIA s.r.l. – *SCHEDA TECNICA FIDBASALT UNIDIR 400 C95®*

DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE – *Classificazione sismica* – from the site “*Governo.it*”.

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il Prof. Ing. Roberto Capozucca per la grande opportunità che mi è stata offerta nel poter affrontare da vicino una delle tematiche più attuali e stimolanti nell'ambito dell'Ingegneria Civile. Lo ringrazio per la disponibilità e chiarezza con la quale ha saputo aiutarmi nel poter comprendere ed elaborare quanto fatto durante l'attività di tesi.

Ringrazio le sue collaboratrici Ing. Erica Magagnini ed Ing. Elisa Bettucci per la disponibilità e gentilezza.

Ringrazio la Mia Famiglia per aver creduto in me e per aver avuto sempre la piena fiducia nelle mie scelte; per avermi cresciuto in modo genuino e rispettoso.

Ringrazio la Mia Meravigliosa Giulia, che è sempre stata al mio fianco, supportandomi sempre, credendo in me più di quanto io non lo faccia; alla quale devo molto del traguardo raggiunto. Traguardo mio quanto Suo.

Ringrazio tutti i miei parenti per la fiducia, la presenza e gli incoraggiamenti.

Ringrazio i miei fantastici nonni, soprattutto chi di loro non c'è più e che avrebbero fortemente apprezzato questo traguardo.

Ringrazio i miei coinquilini per il caloroso ambiente di vita che hanno saputo creare e per l'appoggio ed aiuto che hanno saputo offrirmi.

Ringrazio i miei compagni di corso, sempre presenti e sinceri; con quale ho passato alcuni dei migliori anni della mia vita.

Ringrazio i miei amici di una vita, che nonostante la mia assenza si sono rivelati sempre fedeli e presenti; pronti a darmi supporto e momenti di leggerezza quando ne avevo necessità.

Vi sarò sempre grato.

