



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Edile

---

VALUTAZIONE SPERIMENTALE DEL COMPORTAMENTO MECCANICO DI  
NODI IN CALCESTRUZZO ARMATO RINFORZATI CON COMPOSITI  
INNOVATIVI

Experimental evaluation of the mechanical behavior of reinforced concrete joints  
reinforced with innovative composites

Relatore:

**Prof. Roberto Capozucca**

Tesi di Laurea di:

**Lucia Manari**

Correlatrice:

**Dott.ssa Erica Magagnini**

A.A 2022/2023

*A mio papà Francesco*

# INDICE

## Sommario

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Introduzione .....                                                                                               | 1  |
| Capitolo 1 - Comportamento di nodi in calcestruzzo armato.....                                                   | 2  |
| 1.1 I nodi in calcestruzzo armato.....                                                                           | 2  |
| 1.2 Sollecitazioni nei nodi in calcestruzzo armato.....                                                          | 3  |
| 1.3 Azioni agenti sul pannello nodale.....                                                                       | 6  |
| 1.3.1 Nodo trave-pilastro interno.....                                                                           | 6  |
| 1.3.2 Nodo trave-colonna esterno.....                                                                            | 9  |
| 1.4 Danneggiamenti dei nodi in calcestruzzo armato .....                                                         | 11 |
| Capitolo 2 – Utilizzo di materiali compositi innovativi per il rinforzo di strutture in calcestruzzo armato..... | 14 |
| 2.1 I materiali compositi fibrorinforzati.....                                                                   | 14 |
| 2.1.1 I materiali compositi.....                                                                                 | 14 |
| 2.1.2 I materiali compositi nell’edilizia .....                                                                  | 17 |
| 2.2 Fibre utilizzate per il rinforzo strutturale .....                                                           | 19 |
| 2.2.1 Fibre di vetro.....                                                                                        | 19 |
| 2.2.2 Fibre di carbonio.....                                                                                     | 20 |
| 2.2.3 Le fibre aramidiche .....                                                                                  | 21 |
| 2.3 Materiali compositi innovativi a base di fibre di basalto .....                                              | 22 |
| 2.3.1 Le fibre di basalto .....                                                                                  | 23 |
| 2.3.2 Tipologie di prodotti commerciali.....                                                                     | 26 |
| Capitolo 3 – Sperimentazione su nodi di telai in calcestruzzo armato .....                                       | 30 |
| 3.1 Introduzione .....                                                                                           | 30 |
| 3.2 Analisi statica del telaio .....                                                                             | 31 |
| 3.3 Decrizione del set-up di prova .....                                                                         | 34 |
| 3.3.1 Descrizione del telaio in calcestruzzo armato non rinforzato.....                                          | 34 |
| 3.3.2 Descrizione del telaio in calcestruzzo armato rinforzato.....                                              | 38 |
| 3.4 Prova sperimentale e risultati del telaio in calcestruzzo armato.....                                        | 46 |
| 3.4.1 Descrizione del test sperimentale sul telaio in c.a. non rinforzato.....                                   | 46 |
| 3.4.2 Analisi dei risultati del test sperimentale sul telaio in c.a. non rinforzato.....                         | 47 |
| 3.4.3 Descrizione del test sperimentale sul telaio in c.a. rinforzato.....                                       | 57 |
| 3.4.4 Analisi dei risultati del test sperimentale sul telaio in c.a. rinforzato.....                             | 58 |
| Capitolo 4 – Conclusioni e discussione dei risultati.....                                                        | 67 |
| 4.1 Confronto prove sperimentali .....                                                                           | 67 |
| 4.1.1 Confronto tabelle Carico-Spostamento-Deformazione .....                                                    | 67 |
| 4.1.2 Confronto grafico Forza-Spostamento.....                                                                   | 69 |

|                                                  |    |
|--------------------------------------------------|----|
| 4.1.3 Confronto grafici Forza-Deformazione ..... | 70 |
| 4.2 Valutazioni finali .....                     | 75 |
| Bibliografia – Sitografia.....                   | 76 |

## **Introduzione**

In questo elaborato di tesi viene trattato uno studio sperimentale eseguito presso il laboratorio Prove Materiali e Strutture del dipartimento DICEA dell'Università Politecnica delle Marche con lo scopo di andare a studiare il comportamento di strutture in calcestruzzo armato rinforzate con materiali compositivi innovativi. Il seguente lavoro è stato suddiviso in quattro differenti capitoli; nei primi due vengono trattati argomenti d'interesse per i test sperimentali oggetto di studio mentre i restanti sono focalizzati sulla sperimentazione e sull'analisi dei risultati.

In particolare, nel capitolo 1 si è eseguito uno studio sui nodi in calcestruzzo armato e sulla tipologia di azioni sollecitanti che convergono in esso sia in zona sismica che non. Nel capitolo 2, invece, è presente un approfondimento sui materiali compositi e sulla loro applicabilità in campo edilizio, focalizzandosi in particolar modo sulle caratteristiche e sull'utilizzo delle fibre di basalto come materiale di rinforzo strutturale.

Dal capitolo 3 inizia la trattazione delle prove sperimentali eseguite in laboratorio, partendo in primis con l'individuazione degli obiettivi, la descrizione del provino in calcestruzzo armato (c.a.) e l'analisi statica del telaio. Durante la sperimentazione sono state eseguite due differenti prove di carico, la prima sul telaio in c.a. non rinforzato mentre la seconda sullo stesso telaio sul quale, però è stato applicato il materiale composito a base di fibre di basalto. In questa sezione della tesi vengono quindi descritte le due diverse tipologie di prove realizzate con successiva analisi dei rispettivi risultati.

Infine, nel capitolo 4, sono stati eseguiti numerosi confronti tra i risultati delle due prove con lo scopo di andare a valutare la variazione dello stato fessurativo e deformativo del telaio prima e dopo il rinforzo.

## Capitolo 1 - Comportamento di nodi in calcestruzzo armato

### 1.1 I nodi in calcestruzzo armato

I nodi in calcestruzzo armato (c.a.) sono i volumi in cui gli elementi monodimensionali di una costruzione, variamente inclinati e disposti nello spazio, si connettono tra di loro, scambiandosi sollecitazioni. In particolare in edifici regolari, sono i volumi in cui gli elementi verticali (pilastri) e gli elementi orizzontali (travi) si connettono mutuamente, generalmente in due direzioni ortogonali. Nell'ambito dell'ingegneria strutturale, in particolare nella modellazione delle strutture propedeutica all'analisi delle sollecitazioni, sono schematizzati come i punti in cui si incontrano le linee degli assi baricentrici degli elementi strutturali monodimensionali.

Possiamo distinguere due diverse tipologie di nodi (Figura 1.1): i nodi interamente confinati e i nodi non interamente confinati. I primi si hanno quando in ognuna delle facce verticali si innesta una trave che copre almeno  $\frac{3}{4}$  della larghezza del pilastro e la cui sezione si ricopre per almeno  $\frac{3}{4}$  dell'altezza. Si definiscono invece nodi non interamente confinati tutti quelli che non soddisfano le caratteristiche appena elencate. Questi possono a loro volta essere divisi in esterni o interni in ciascuna delle due direzioni ortogonali di innesto delle travi (Figura 1.2). Avremo un nodo esterno se si innesta una trave solo da un lato; ad esempio nel caso di un nodo perimetrale in direzione ortogonale al lato del perimetro oppure in corrispondenza di un nodo d'angolo in entrambe le direzioni di innesto delle travi. Si ha invece un nodo interno quando da entrambi i lati si innesta una trave, come nel caso di un nodo perimetrale in direzione parallela al lato del perimetro.



Figura 1.1 – Nodo interamente confinato e nodo non interamente confinato

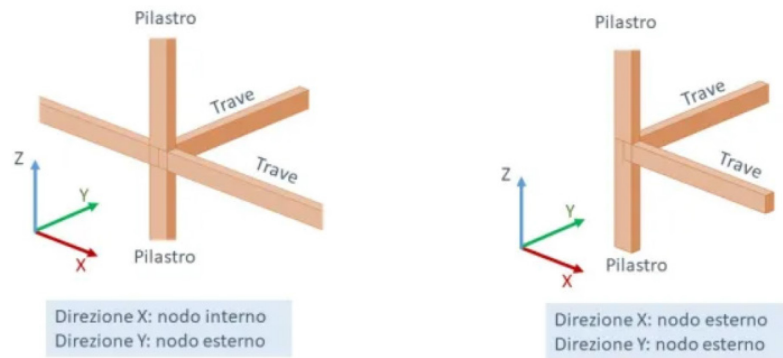


Figura 1.2 – Nodo esterno e nodo interno

Possiamo trovare nodi non interamente confinati in corrispondenza dei pilastri esterni, dei punti nei quali convergono travi a spessore e calate (in quanto non vengono rispettati i rapporti tra le dimensioni della trave e del pilastro) e in presenza di pilastri rettangolari allungati. Nella parte interna dell'edificio è sicuramente più facile la progettazione e l'esecuzione di nodi interamente confinati. Questi ultimi presentano sicuramente, anche per solo effetto geometrico, un aumento della resistenza del calcestruzzo ed anche una maggiore duttilità che consente meccanismi resistenti più estesi che coinvolgono un volume più esteso di materiale. Nel caso di assenza di confinamento geometrico è necessario garantire un adeguato confinamento meccanico tramite l'inserimento di staffe di adeguate dimensioni e geometria.

## 1.2 Sollecitazioni nei nodi in calcestruzzo armato

È ormai riconosciuto che i nodi trave-pilastro costituiscono una regione critica nelle strutture a telaio in calcestruzzo armato. Il comportamento del nodo influenza significativamente la risposta dell'intero sistema strutturale in termini sia di deformabilità che di resistenza; affinché questi siano in grado di resistere ai notevoli stati tensionali tridimensionali di tensioni normali e di tensioni tangenziali, devono necessariamente avere un certo volume di calcestruzzo opportunamente armato. Da una serie di studi condotti si può osservare che dimensioni più generose dei pannelli nodali, consentono di:

- Limitare complicazioni costruttive per sovraffollamento di armature;
- Ridurre le escursioni in campo plastico dei materiali per terremoti con maggiore probabilità di accadimento.

Inoltre, facendo riferimento all'altezza, all'aumentare di questa è possibile ridurre i quantitativi di armatura nelle travi, ovvero:

- Un'area minore di armature longitudinali delle travi consente di ridurre le sollecitazioni che le armature trasferiscono al pannello nodale come azione tagliante;

- Un diametro minore delle armature consente di ridurre le problematiche di scorrimento tra le barre e il calcestruzzo e quindi di aumentare la monoliticità dell'elemento strutturale.

Quando la struttura è soggetta ad azioni prevalentemente gravitazionali raramente i nodi risultano essere altamente sollecitati ; al contrario, nel caso di azioni sismiche rilevanti, lo stato tensionale del nodo aumenta notevolmente con la possibilità di arrivare alla crisi del nodo stesso. Analizzando un semplice telaio simmetrico sottoposto esclusivamente a carichi verticali e tracciando il diagramma del momento agente sulla struttura (Figura 1.3), si può notare che nel nodo centrale il momento negativo nelle travi a sinistra e a destra risulta uguale (per simmetria). Il pilastro, invece, ha solo sforzo normale proveniente dal peso proprio e dallo scarico dei piani superiori, senza sollecitazione flettente.

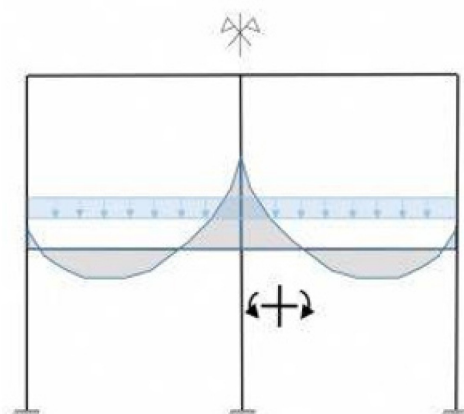


Figura 1.3 – Diagramma momento telaio soggetto ad azioni gravitazionali

Ne risulta quindi che l'armatura superiore della trave, in corrispondenza del nodo (Figura 1.4), è soggetta a forze di trazione  $T$ , che avendo versi opposti, si bilanciano tra loro andando ad annullare lo stato tensionale agente. Per il principio di azione e reazione, la parte interna del nodo non è “mediamente” sollecitata, non ricevendo complessivamente alcuna azione dalle barre orizzontali, ovvero la tensione tangenziale media  $\tau_m$  risulta nulla. Localmente lungo tutta la barra longitudinale sono presenti delle tensioni tangenziali con un andamento emisimmetrico e quindi a risultante nulla. Si può inoltre aggiungere che, lo sforzo normale di compressione proveniente dal pilastro superiore va a migliorare le condizioni di aderenza e va a diminuire lo sforzo locale di aderenza.

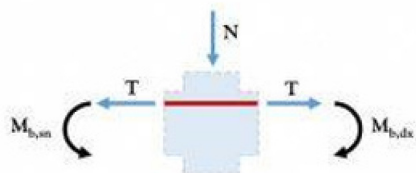


Figura 1.4 – Azioni sollecitanti in corrispondenza del nodo

Diverso sarebbe stato il caso in cui i due momenti negativi fossero di valore molto diverso, ad esempio per differenza di luci e/o rigidezze delle travi e/o carico delle travi in un telaio non simmetrico. Sicuramente la forza di trazione agente alla destra del nodo non sarebbe stata uguale a quella agente alla sinistra, generando quindi la nascita di un maggiore stato tensionale.

Differente è la situazione dello stesso modello di telaio soggetto però anche ad azioni sismiche rilevanti. Analizzando il diagramma del momento e confrontandolo con il caso di studio precedente si nota un'inversione del segno del momento sia nei pilastri che nelle travi (Figura 1.5).

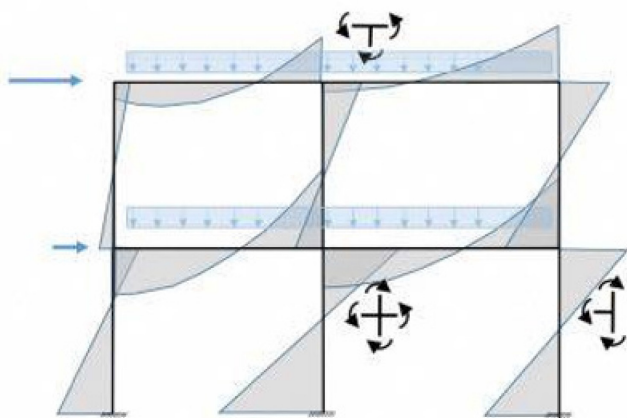


Figura 1.5 – Diagramma del momento in un telaio soggetto ad azioni sismiche

Si avrà quindi un trasferimento delle fibre tese orizzontali dall'alto al basso delle travi e un passaggio da sinistra a destra delle fibre tese verticali dei pilastri. Pertanto, si genera un elevatissimo stato tensionale tridimensionale nel nodo che può provocare la crisi delle zone nodali soggette a sollecitazioni flettenti di segni opposto sia lungo l'asse verticale che lungo l'asse orizzontale (Figura 1.6).

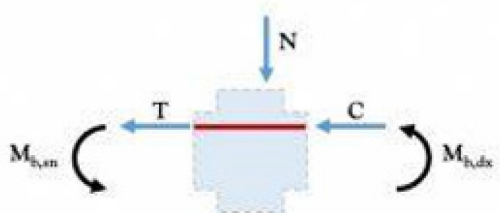


Figura 1.6 – Azioni sollecitanti in corrispondenza del nodo

## 1.3 Azioni agenti sul pannello nodale

### 1.3.1 Nodo trave-pilastro interno

In condizioni sismiche un nodo trave-pilastro interno è soggetto a sforzo normale,  $N_{ed}$ , proveniente dai carichi verticali, momenti,  $M_b$ , provenienti dalle travi, non più autoequilibrati sulla sola travata come nel caso di soli carichi verticali e quindi equilibrati dai momenti sulla colonne,  $M_c$ , e i corrispondenti tagli provenienti da travi e pilastri,  $V_t$  e  $V_c$  (Figura 1.7). In genere quindi le zone nodali sono soggette a stati tensionali molto rilevanti per via della nascita di momenti flettenti di segno opposto sia in corrispondenza delle travi che del pilastro.

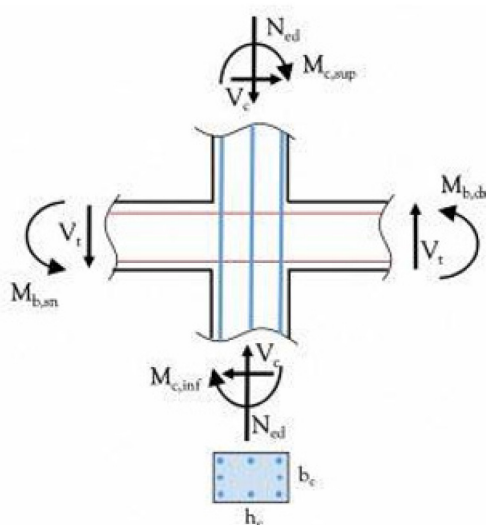


Figura 1.7 – Sollecitazioni nodo trave – pilastro interno in condizioni sismiche

Il nodo sarà sottoposto a tensioni normali che presentano verso opposto tra una faccia e l'altra (Figura 1.8), questa inversione richiede che l'armatura della trave, che è in trazione su un lato, diventi compressa dall'altro lato del nodo grazie al trasferimento per aderenza con il calcestruzzo.

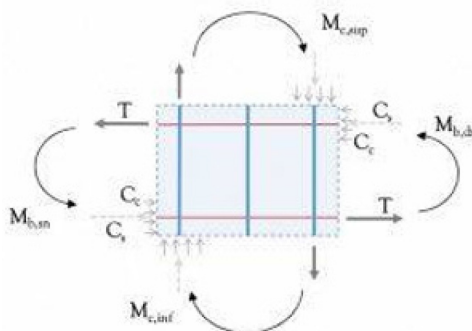


Figura 1.8 – Risultanti tensioni sul pannello nodale

Si prende in analisi un pannello nodale in condizioni ultime allo SLV. Partendo dalla trave, nel lato sinistro del nodo per via della coppia  $M_{RD1}$  ne risulta che le fibre superiori sono tese. Questi sforzi di trazione sono assorbiti dall'armatura superiore ( $A_{s1}$ ) che è sottoposta ad una forza  $T_1 = A_{s1}f_{yd}$ ; pertanto, nella zona inferiore si hanno tensioni di compressione che si ripartiscono tra il calcestruzzo e le barre di armatura. La risultante  $C$  è quindi, pari alla somma di un contributo  $C_{s1}$  dato dalla resistenza a compressione dell'armatura inferiore e da un contributo  $C_{c1}$  dato dalla resistenza del calcestruzzo. Per l'equazione di equilibrio alla traslazione la risultante di compressione è uguale alla forza di trazione  $T$ , si ha quindi una compressione  $C_1 = A_{s1}f_{yd}$  distribuita tra acciaio e calcestruzzo. Analogamente, sul lato destro del nodo per la coppia  $M_{RD2}$  si ha compressione superiormente e trazione inferiormente entrambe uguali a  $A_{s2}f_{yd}$  con  $A_{s2}$  armatura inferiore.

Considerando invece il pilastro in pressoflessione, si può assumere la presenza di due forze di trazione e compressione uguali in prossimità delle armature longitudinali esterne della colonna per la presenza di  $M_{c,sup}$  e una compressione agente sul calcestruzzo in prossimità dell'armatura compressa, per la presenza dello sforzo normale. Lo stesso accade sul lato inferiore su cui agisce la coppia  $M_{c,inf}$  con azioni invertite nelle armature longitudinali e, quindi, nel calcestruzzo (Figura 1.9).

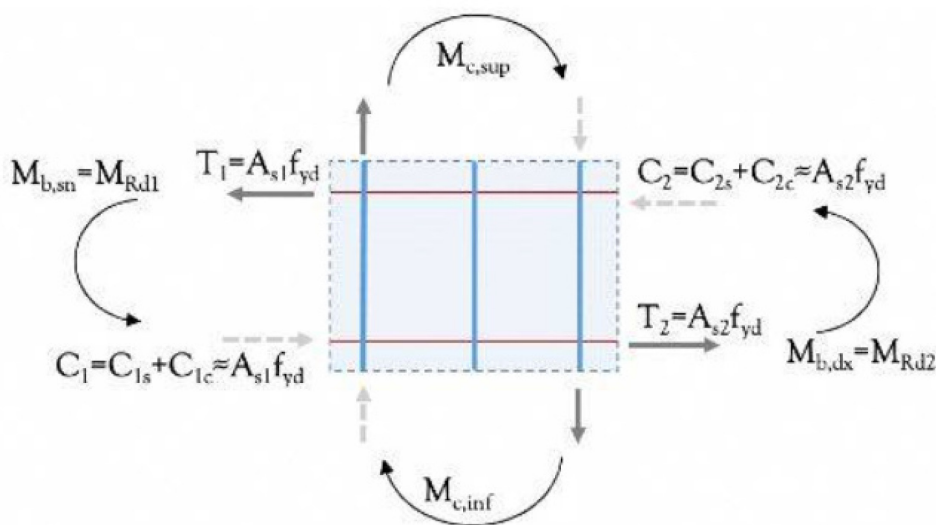


Figura 1.9 – Azioni agenti sul pannello nodale in condizioni ultime

Il pannello è quindi sottoposto a compressione nella direzione congiungente i vertici in cui agiscono  $C_1$  e  $C_2$  e a trazione nella direzione congiungente i vertici in cui agiscono  $T_1$  e  $T_2$  (Figura 1.10).

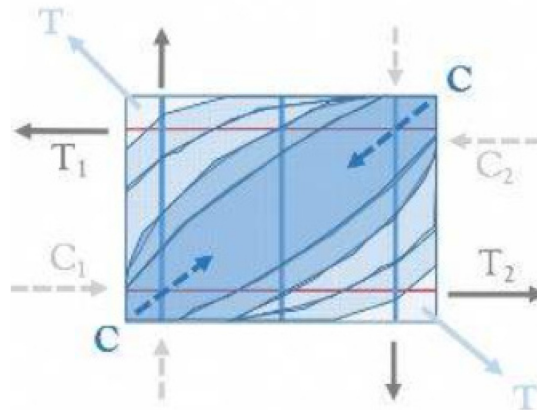


Figura 1.10 – Risultanti nel pannello nodale in condizioni ultime

Considerando la presenza del taglio  $V_c$  proveniente dal pilastro superiore e eseguendo l'equilibrio alla traslazione orizzontale in corrispondenza della faccia orizzontale superiore immediatamente al di sotto delle armature delle travi, si ottiene una forza  $V_{jb}$  trasferita alla parte inferiore del nodo (Figura 1.11).

$$V_{jb} = (A_{s1} + A_{s2}) f_{yd} - V_c$$

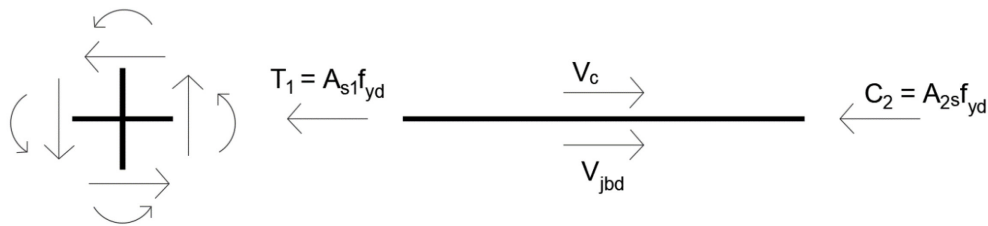


Figura 1.11 – Azioni trasferite sulla faccia orizzontale superiore del pannello nodale interno

Ai fini del progetto del nodo, l'azione che interviene sullo stesso viene incrementata dal fattore di sovrarresistenza,  $\gamma_{rd}$ , e viene dunque definita:

$$V_{jb} = \gamma_{rd}(A_{s1} + A_{s2}) f_{yd} - V_c$$

In genere il taglio  $V_c$  viene trascurato sia per la sua entità rispetto alle altre azioni, sia per effettuare una stima a vantaggio di sicurezza.

### 1.3.2 Nodo trave-colonna esterno

Il nodo di estremità in condizioni sismiche è soggetto a sforzo normale,  $N_{ed}$ , ad un momento della trave,  $M_b$ , equilibrato dai momenti della colonna,  $M_c$ , e i corrispondenti tagli,  $V_t$  e  $V_c$  (Figura 1.12).

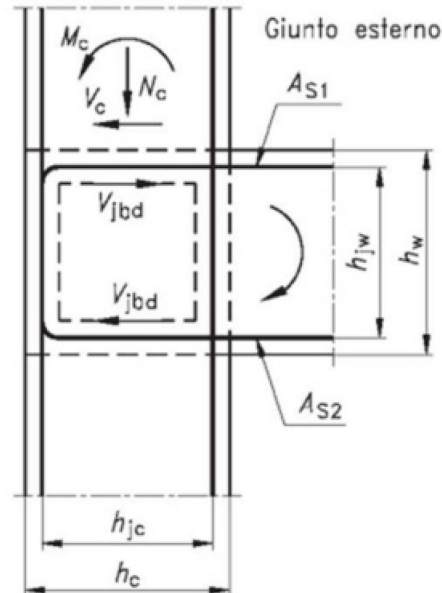


Figura 1.12 – Sollecitazioni nodo trave-pilastro in condizioni sismiche

Anche in questa situazione, come nel caso di studio precedente, il nodo risulta essere molto sollecitato. Analogamente al nodo interno, prendendo in considerazione la trave, l'armatura inferiore è sottoposta ad una forza di trazione  $T$  che sarà uguale alla risultante delle azioni di compressione che agiscono sulla parte superiore. Restano inoltre invariate le forze in corrispondenza del pilastro (Figura 1.13).

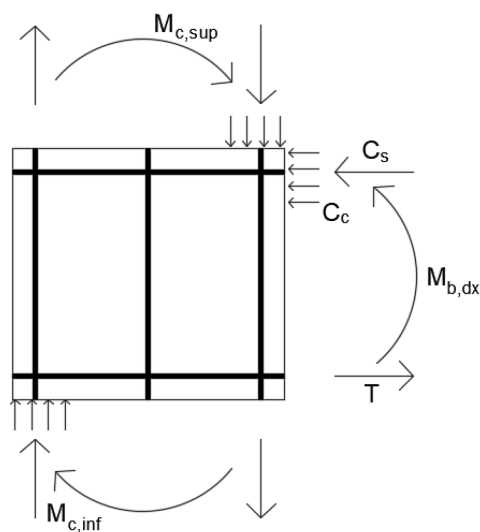


Figura 1.13 – Coppie sul pannello nodale

Dall'equilibrio alla traslazione orizzontale (Figura 1.14) facendo riferimento alla faccia orizzontale superiore del nodo si ottiene una forza  $V_{jbd}$  pari a:

$$V_{jbd} = \gamma_{rd} A_{s2} f_{yd} - V_c$$

Oppure se si considerano sollecitazioni di verso opposto:

$$V_{jbd} = \gamma_{rd} A_{s1} f_{yd} - V_c$$

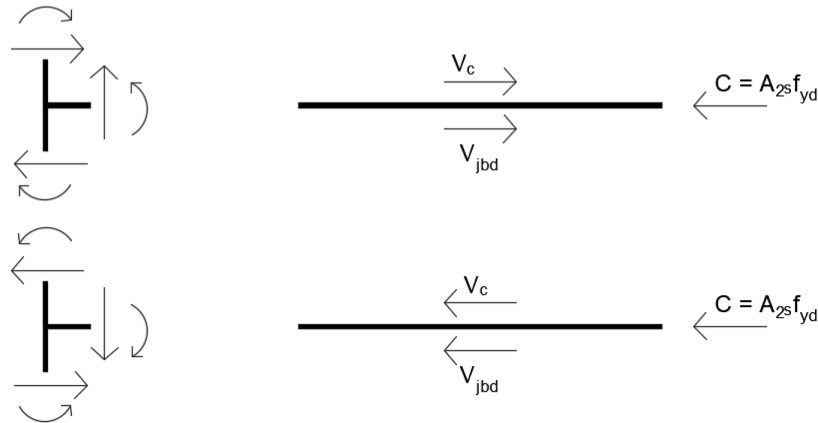


Figura 1.14 – Azioni trasferite sulla faccia orizzontale superiore del pannello nodale esterno

In un nodo esterno, rispetto al nodo interno, trascurare il taglio proveniente dalla colonna  $V_c$ , può condurre a una stima a vantaggio di sicurezza. La differenza tra i valori di  $V_c$  nelle due formule appena elencate è trascurabile, si può infatti calcolare  $V_{jbd}$  anche come:

$$V_{jbd} = \gamma_{rd} A_s f_{yd} - V_c$$

Con  $A_s = \max [A_{s1}, A_{s2}]$  e assumendo per  $V_c$  il valore minimo. Generalmente l'armatura superiore, in questo caso  $A_{s1}$ , è maggiore in quantità dell'armatura inferiore, qui nominata  $A_{s2}$

## 1.4 Danneggiamenti dei nodi in calcestruzzo armato

Negli ultimi decenni sono stati condotti numerosi studi sul comportamento dei nodi in cemento armato in zona sismica, andando principalmente ad analizzare i meccanismi di risposta di nodi trave-pilastro in strutture progettate per opporsi ai soli carichi verticali. L'osservazione degli effetti dei terremoti del passato su questa tipologie di edifici ha evidenziato come, spesso, siano i meccanismi meno duttili (quindi più pericolosi) a causare severi danneggiamenti o il crollo di tali strutture. Tra questi meccanismi prevale il collasso dei nodi trave-pilastro, legato al superamento della resistenza a taglio e alla perdita di aderenza delle barre di armatura. In particolare, studi sperimentali hanno evidenziato che i nodi trave-pilastro esterni non solo possono rappresentare l'elemento più debole di una struttura a telaio, ma ne condizionano fortemente anche il comportamento globale in termini di deformabilità.

Le osservazioni su edifici danneggiati dal sisma dimostrano che le modalità di danneggiamento sono caratterizzate prevalentemente da:

- Plasticizzazione dei pilastri in testa e al piede
- Rotture a taglio dei nodi
- Plasticizzazione delle travi, anche in sezioni diverse da quelle di estremità
- Perdita di aderenza delle barre longitudinali, sia delle travi che dei pilastri

Facendo riferimento, ad esempio, al terremoto dell'Abruzzo del 2009 è evidente come in alcuni casi la crisi del pannello nodale sia arrivata per assenza o limitatezza di armatura orizzontale e verticale. Si sono quindi generate fessure nella direzione ortogonale alle isostatiche di trazione per superamento della resistenza del calcestruzzo teso (Figura 1.15).



Figura 1.15 – Rottura nodo in C.A. per superamento resistenza a trazione

In altre circostanze le barre di armatura longitudinali dei pilastri hanno raggiunto il fenomeno dell'instabilità in quanto prive di armature orizzontali, quali staffe o ferri di parete della trave, che limitassero la lunghezza di libera inflessione e che impedissero il raggiungimento del carico critico. Si può infatti vedere come le barre siano state sottoposte al fenomeno dello svergolamento con successiva espulsione dello strato di copriferro (Figura 1.16).



Figura 1.16 – Fenomeno instabilità dell'armatura longitudinale del pilastro

È evidente quindi come la carenza o addirittura l'assenza di staffe può condurre, in nodi non interamente confinati, quali quelli esterni emergenti sui fronti di edifici o in nodi d'angolo (non confinati su due lati), a bruschi collassi per superamento della resistenza a taglio oppure per schiacciamento per pressoflessione in seguito ad instabilità dell'armatura longitudinale.

Il comportamento dei nodi analizzato fin'ora è tipico di telai in c.a. con comportamento strutturale cosiddetto a travi forti-pilastri deboli, nel quale il collasso della struttura riguarda innanzitutto i nodi trave-colonna con la formazione di cerniere plastiche che possono provocare la nascita di piani deboli che renderanno la struttura estremamente vulnerabile.

I meccanismi di rottura più favorevoli per le strutture in c.a. sono quelli in cui vengono evitate rotture fragili dei nodi e degli elementi strutturali per taglio, dunque meccanismi di collasso globale determinati dalla plasticizzazione delle travi a tutti i piani ed alla base dei pilastri al solo piano terra (*“travi deboli e colonne forti”*), ovvero meccanismi che coinvolgono il maggior numero possibile di cerniere plastiche, sezioni nelle quali vengono garantite grandi deformazioni grazie all'impiego di materiali deformabili oltre il limite elastico (duttilità dei materiali). Sarà dissipata tanta più energia quante più saranno le cerniere plastiche che la struttura è in grado di innescare prima della labilità. La realizzazione di queste condizioni richiede però un'accurata progettazione, basata sul principio di gerarchia delle resistenze o *Capacity Design*, materia dell'Eurocodice n. 8. La moderna progettazione

secondo la gerarchia delle resistenze ha introdotto il concetto di duttilità dei nodi trave-pilastro, con l'obiettivo di determinare una gerarchia di danno all'interno del meccanismo di collasso di una struttura intelaiata sottoposta ad azioni taglianti. Questa gerarchia di danno si identifica in una gerarchia dei meccanismi di plasticizzazione, che può essere così sintetizzata:

- Formazione di cerniere plastiche in corrispondenza delle estremità di tutte le travi del telaio: la plasticizzazione di queste zone non comporta il crollo dei solai e la maglia strutturale rimane iperstatica. La formazione di cerniere plastiche alle estremità delle travi e non sui pilastri assicura la stabilità della struttura per carichi verticali e di conseguenza l'incolumità delle persone.

- Formazione di cerniere plastiche alle estremità dei pilastri: ciò rende la struttura labile per forze orizzontali e, conseguentemente, provoca il crollo dell'edificio per rottura dei pilastri.

Per ottenere questo tipo di gerarchia nel meccanismo di danno, occorre armare i nodi trave-pilastro in maniera che essi risultino duttili (Figura 1.17- 1.18).



Figura 1.17– Armatura nodo interno in condizioni sismiche



Figura 1.18– Armatura nodo esterno in condizioni sismiche

## Capitolo 2 – Utilizzo di materiali compositi innovativi per il rinforzo di strutture in calcestruzzo armato

### 2.1 I materiali compositi fibrorinforzati

#### 2.1.1 I materiali compositi

I materiali compositi rappresentano l'evoluzione della scienza e delle tecnologie dei materiali fondendo al loro interno le migliori caratteristiche di più materiali, prodotti con tecnologie innovative che ne determinano le elevatissime caratteristiche fisico-meccaniche. Dal punto di vista storico il concetto di rinforzo con fibra è assai vecchio, ci sono addirittura riferimenti nella Bibbia al rinforzo di laterizi con paglia nell'antico Egitto. Nel corso degli anni le applicazioni dei compositi si sono espanse in numerosi campi: aeronautico, sportivo, automobilistico, medico ed edilizio.

Il materiale composito viene definito come un sistema costituito da due o più fasi, le cui proprietà e prestazioni sono progettate in modo tale da essere superiori a quelle dei materiali costituenti che agiscono indipendentemente. La fase discontinua, maggiormente rigida e forte viene chiamata “rinforzo”, mentre è nominata “matrice” quella continua, meno rigida e più debole. Talvolta a causa di interazioni chimiche, esiste una fase aggiuntiva, chiamata “interfase”, tra rinforzo e matrice (Figura 2.1).

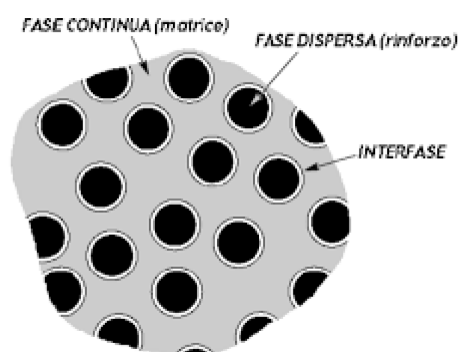


Figura 2.1 – Fasi materiale composito

Il rinforzo costituisce lo scheletro del materiale, determinando la rigidità e la resistenza nella direzione della fibra. La matrice, invece, funge da sostegno per le fibre e garantisce il trasferimento degli sforzi locali da una fibra all'altra. L'interfase, anche se di piccola dimensione, può giocare un ruolo importante nel controllo del meccanismo di rottura, nella resistenza alla frattura e nel comportamento sforzi/deformazioni del materiale.

Come anticipato, le proprietà di un materiale composito dipendono dalle caratteristiche dei costituenti, dalla geometria e dalla distribuzione delle fasi. Il parametro che maggiormente influisce è il peso della frazione di rinforzo o il rapporto di volume delle fibre. Ma non è sicuramente di minore importanza la geometria e l'uniformità del rinforzo, minore è l'uniformità maggiore sarà la probabilità di rottura nelle aree deboli. A seconda del tipo di rinforzo, i materiali compositi si suddividono in:

- Compositi con fase dispersa particellare
- Compositi con fase dispersa fibrosa
- Compositi strutturati

I compositi con fase dispersa particellare sono caratterizzati da rinforzo costituito da “particelle” (Figura 2.2) . Le sue proprietà chimico-fisiche dipendono dalla geometria del sistema particellare, ovvero da, dimensioni, forma, concentrazione e orientamento delle particelle.



Figura 2.2 – Carbon crack, fase di rinforzo nelle produzioni della gomma per pneumatici

I compositi rinforzati con fibre possono essere a loro volta classificati in:

- Compositi a fibre continue (o lunghe)
- Compositi a fibre discontinue (o corte) allineate tra loro
- Compositi a fibre discontinue (o corte) disposte in maniera casuale

Questi materiali presentano un'elevata anisotropia, che se controllata costituisce sicuramente un vantaggio in quanto il materiale di rinforzo verrà disposto nella direzione di sollecitazione. Le principali tipologie di fibre utilizzate sono: fibre di vetro, carbonio (Figura 2.3), ceramiche, aramidiche e di basalto. Quest'ultime sono le fibre utilizzate come rinforzo nel test sperimentale oggetto di studio di questa tesi.



Figura 2.3 – Fibre di carbonio

I compositi strutturati sono manufatti realizzati con uno o più strati di tessuto di rinforzo su cui è applicata una matrice di resina e, se previsto, anche con un materiale di anima, ovvero il laminato a sandwich. Il laminato è costituito da due strati resistenti, chiamati pelli o facce, tra loro distanziati e collegati in maniera rigida a un elemento connettivo chiamato anima (Figura 2.4).

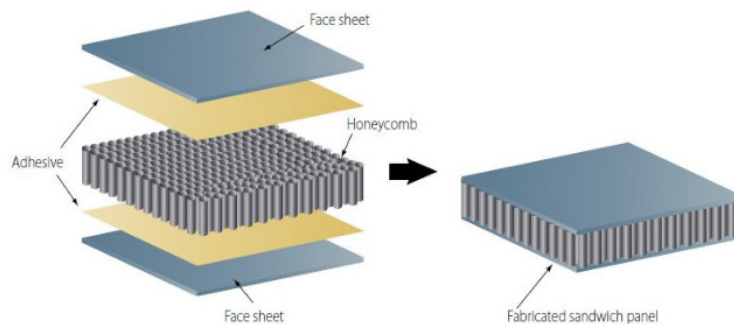


Figura 2.4 – Composito strutturato

I materiali compositi presentano un'ulteriore classificazione in base alla tipologia di matrice che viene utilizzata, si hanno:

- PMC: Polymer-Matrix Composite, compositi a matrice polimerica;
- MMC: Metallic-Matrix Composite, compositi a matrice metallica, generalmente alluminio, o titanio e le loro leghe;
- CMC: Ceramic-Matrix Composite, compositi a matrice ceramica, in genere carburo di silicio o allumina;
- Compositi carbonio-carbonio: sia la matrice che il rinforzo sono costituiti da carbonio;
- Compositi ibridi: contengono due o più tipologie di fibre.

Nella maggior parte dei materiali compositi si ha una matrice polimerica perché garantisce bassa densità; principalmente vengono utilizzate resine epossidiche o resine fenoliche.

### 2.1.2 I materiali compositi nell'edilizia

I materiali compositi impiegati nel settore edile per interventi di rinforzo strutturale stanno trovando in Italia una diffusione sempre maggiore. È proprio nel consolidamento strutturale che emergono molti dei vantaggi dei compositi rispetto alle tecniche tradizionali. In primo luogo l'elevata resistenza a trazione in relazione a spessore e peso specifico. Ciò permette di effettuare fasciature con spessori molto ridotti e quindi di garantire variazioni minime rispetto alle dimensioni originarie degli elementi oggetto di intervento. Inoltre, a parità di aumento delle resistenze apportate, sono molto più leggeri rispetto agli interventi tradizionali, permettono quindi di non incrementare in maniera significativa i carichi di progetto. Si apprezza molto anche la versatilità, adattabilità e reversibilità offerta dai materiali all'interno del progetto di consolidamento.

In ambito edilizio vengono utilizzati diversi tipi di sistemi compositi:

- FRP: Fiber Reinforced Polymers
- FRCM: Fiber Reinforced Cementitious Matrix
- CRM: Composite Reinforced Mortars
- FRC: Fiber Reinforced Concrete

Gli FRP (Figura 2.5) nascono dall'accoppiamento di fibre di varia natura (carbonio, vetro, aramidiche...) con matrici organiche, in genere resine epossidiche. Hanno un comportamento elastico lineare a trazione con rottura fragile. Non resistono invece a compressione e lavorano in adesione a supporti in calcestruzzo, muratura, legno e acciaio. Si suddividono in due categorie: i sistemi impregnati in situ e i sistemi preformati. I primi prevedono che le fibre vengano incollate alla struttura da rinforzare e impregnate dalla resina, mentre i secondi si presentano invece sotto forma di lamine pre-impregnate tramite processo industriale di pultrusione.

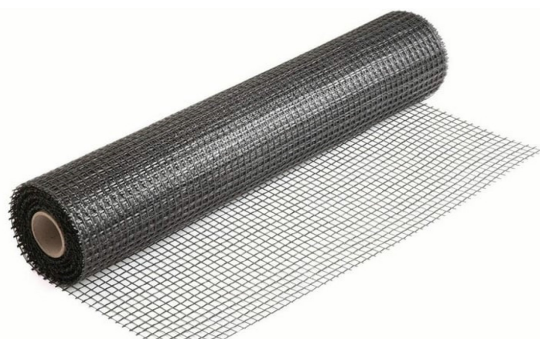


Figura 2.5 – Fibra di vetro alcali

Gli FRCM (Figura 2.6) sono costituiti da reti di fibra di vario tipo (vetro alcali-resistente, basalto, carbonio) o da fasce con trefoli in acciaio ad elevata resistenza, inglobati all'interno di matrici inorganiche, quindi malte a base di calce o cementizie. Questi sistemi hanno dimostrato di avere numerosi vantaggi tecnici e applicativi quali la maneggevolezza, la lavorabilità in cantiere e la possibilità di applicazione delle reti di rinforzo con matrici a base di calce idraulica naturale, che presenta una buona compatibilità con le murature esistenti. Come gli FRP, lavorano anche questi in adesione al supporto e le modalità di rottura possono essere molteplici: rottura per trazione della rete, distacco dal supporto e scorrimento tra rete e malta.



Figura 2.6 – FRCM

I sistemi CRM (Figura 2.7) sono costituiti da reti di rinforzo, con spaziatura di maglia maggiore di 30x30 mm, inglobate all'interno di intonaci di spessore compreso tra i 30 e i 50 mm. Il collegamento è consentito da connessioni trasversali passanti in modo da realizzare un placcaggio meccanico delle murature. Si va in questo modo a rinforzare la muratura sfruttando la resistenza a trazione dell'armatura realizzata dalle singole barre di FRP costituenti la rete.



Figura 2.7 – CRM

In ultimo i sistemi FRC (Figura 2.8) sono compositi fibrorinforzati con matrice cementizia e fibre di rinforzo organiche o metalliche, che conferiscono duttilità al calcestruzzo. Trovano largo impiego negli interventi di rinforzo degli elementi strutturali in cemento armato e nel consolidamento estradossale di solai.



Figura 2.8 – Calcestruzzo rinforzato con fibre di vetro

## 2.2 Fibre utilizzate per il rinforzo strutturale

Si analizzano ora le caratteristiche delle diverse tipologie di fibre utilizzate in campo edilizio per il rinforzo strutturale. Come anticipato nei paragrafi precedenti, le principali fibre impiegate sono: le fibre di vetro, di carbonio, ceramiche, aramidiche e di basalto. Tutte queste devono avere alta resistenza meccanica o elevato modulo elastico, a seconda della problematica da affrontare.

### 2.2.1 Fibre di vetro

Le fibre di vetro (Figura 2.9) sono le più diffuse nell'ambito civile dato l'ottimo rapporto qualità-prezzo, inoltre godono di un'ottima resistenza, un ottimo isolamento, una bassa rigidità e una dilatazione termica simile a quella dell'acciaio. Sono, infatti, utilizzate per la fabbricazione di materiali compositi dalle caratteristiche medio-alte. I principali vantaggi di queste fibre sono la buona resistenza a trazione, all'impatto e agli attacchi chimici, gli svantaggi sono invece legati al basso valore del modulo elastico in linea con le fibre di carbonio o aramidiche. Per migliorarne le caratteristiche spesso vengono utilizzate insieme alle fibre di carbonio all'interno di compositi ibridi. Un ulteriore svantaggio è quello della scarsa resistenza all'abrasione e alla fatica ed una scarsa adesione alle matrici polimeriche. Per incrementare l'adesione alle matrici, le fibre vengono trattate con sostanze (processo di sizing) che vanno a migliorare le caratteristiche di durabilità e resistenza alla fatica. Le fibre, inoltre, risultano facilmente attaccabili in ambiente alcalino, risultano quindi non adatte all'impiego in matrici cementizie o in presenza di alcali.

Al variare dei compositi presenti nella pasta fusa si ottengono diverse classi (Figura 2.10), di seguito descritte:

- E-Glass: costituite da silicati di calcio, vengono utilizzate solo dove c'è la possibilità di avere proprietà elettriche;
- C-Glass: costituite da carbonato di sodio-calce-borosilicato, utilizzate prevalentemente in ambienti acidi;
- S-Glass: costituite da silicati di magnesio, la loro caratteristica fondamentale è l'elevata resistenza;
- AR-Glass: costituite da ossido di zirconio, permettono di mantenere una elevata resistenza meccanica anche in ambienti alcalini.

| Tipo di fibra | Modulo di elasticità (GPa) | Resistenza a trazione (GPa) | Deformazione ultima (%) | Densità (g/cm <sup>3</sup> ) | Coefficiente di dilatazione termica longitudinale | Massima Temperatura di esercizio (°C) |
|---------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------|
| E-Glass       | 72                         | 3,5                         | 4,4                     | 2,5-2,6                      | 5,04-5,4                                          | 550                                   |
| S-Glass       | 85                         | 4,8                         | 5,3                     | 2,46-2,4                     | 1,6-2,9                                           | 650                                   |
| C-Glass       | 69                         | 3,3                         | 4,8                     | 2,56                         | 6,3                                               | 600                                   |
| AR-Glass      | 55                         | 2,5                         | 4,7                     | 2,14                         | 3,06                                              | 477                                   |

Figura 2.10 – Proprietà meccaniche delle diverse classi di fibre di vetro



Figura 2.9 – Fibre di vetro

### 2.2.2 Fibre di carbonio

Le fibre di carbonio (Figura 2.11) vengono utilizzate per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni, essendo caratterizzate da un elevato valore di modulo elastico e di resistenza meccanica. Si distinguono dalle fibre in vetro e aramidiche, oltre che per una migliore resistenza meccanica, anche per la maggiore resistenza a fatica, a scorrimento viscoso e per il minore decadimento prestazionale nel tempo. Gli FRP a base di carbonio si denotano con l'acronimo CFRP. Le tipologie di fibre più diffuse vengono denominate come carbonio ad alta tenacità (HT), ad alto modulo (HM) e ad altissimo modulo (UHM). I tre tipi differiscono per i valori delle proprietà meccaniche (Figura 2.12).



Figura 2.11 – Fibre di carbonio

| CLASSIFICAZIONE DELLE FIBRE DI CARBONIO IN FUNZIONE DEL<br>MODULO ELASTICO |                  |                |                     |                   |                     |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------|----------------|---------------------|-------------------|---------------------|
|                                                                            | Alta<br>tenacità | Alto<br>modulo | Altissimo<br>modulo | Acciaio<br>FeB44K | Acciaio<br>Armonico |
| Modulo elastico [GPa]                                                      | 230              | 400            | 700                 | 210               | 210                 |
| Resistenza a trazione [MPa]                                                | 5000             | 3000           | 1500                | 540               | 1000 –<br>2000      |
| Deformazione ultima [%]                                                    | 2.0              | 0.9            | 0.3                 | 20                | 5                   |
| Densità [g/cm <sup>3</sup> ]                                               | 1800             | 1850           | 2100                | 7850              | 7850                |
| Resistenza specifica                                                       | 2,68             | 1,62           | 0,71                | 0.07              | 0.12 –<br>0.15      |

Figura 2.12 – Proprietà meccaniche delle fibre di carbonio

### 2.2.3 Le fibre aramidiche

Le fibre aramidiche sono di natura organica, costituite da poliammidi aromatiche in forma estremamente orientata. La struttura a catena (lineare) presenta i legami tra gli atomi di carbonio e i vari gruppi funzionali sviluppati prevalentemente lungo una linea. Si distinguono per l'elevata tenacità e per la loro resistenza alle operazioni di manipolazione. Presentano una resistenza meccanica a trazione confrontabile con quella delle comuni fibre di carbonio, ma hanno un modulo elastico più basso, di valore intermedio tra quello delle fibre di vetro e di carbonio (Figura 2.13).

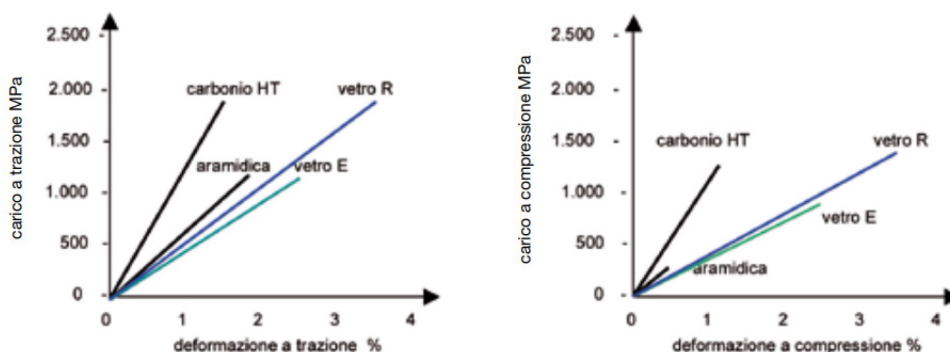


Figura 2.13 – Confronto resistenza tra fibra di vetro, carbonio e aramidiche

La loro resistenza a compressione è di norma  $1/8$  di quella a trazione: infatti, a causa dell'anisotropia della struttura della fibra, i carichi di compressione favoriscono lo snervamento localizzato con conseguente instabilità e formazione di piegatura (kinks). Il comportamento viscoso (creep) è simile a quello delle fibre di vetro, ma rispetto a queste ultime, la resistenza a rottura è molto più elevata. Anche la resistenza a fatica flessionale è più elevata di quella delle fibre di vetro. Gli FRP a base di fibre aramidiche si denotano con l'acronimo AFRP (Figura 2.14) .

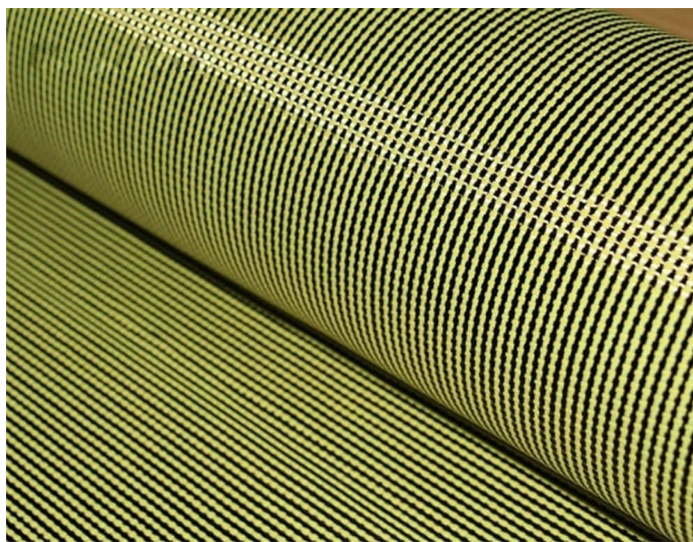


Figura 2.14 - Fibre aramidiche

### 2.3 Materiali compositi innovativi a base di fibre di basalto

Recentemente, con l'aumentare, dei problemi legati all'inquinamento e la ricerca di nuove fonti di energia rinnovabile, è sempre maggiore l'interesse verso prodotti naturali che non danneggino l'ambiente. Nel campo specifico dei compositi, la ricerca si sta concentrando soprattutto sull'utilizzo delle fibre naturali e minerali. I materiali compositi innovativi, ovvero realizzati impiegando elementi di rinforzo in fibra naturale e minerale (canapa, lino, bambù, iuta e basalto) e matrici inorganiche, in particolare, permettono di combinare alti valori di resistenza e rigidità con ottime caratteristiche di leggerezza, durabilità, versatilità e sostenibilità. Si presentano, quindi, come soluzioni a basso impatto ambientale e non invasive sia su strutture in calcestruzzo armato che su murature storiche. Particolarmente significativo ed innovativo dal punto di vista ambientale risulta essere il processo produttivo degli elementi di rinforzo in fibra naturale e minerale che, rispetto ad elementi di rinforzo in acciaio, necessitano di un minor consumo di energia garantendo quindi, un minor impatto ambientale anche per effetto della minore CO<sub>2</sub> emessa in atmosfera. In particolare, in questa tesi si va a studiare l'utilizzo di materiali compositi a base di fibre di basalto per il rinforzo di strutture in calcestruzzo armato.

### 2.3.1 Le fibre di basalto

Le fibre di basalto sono fibre molto sottili di basalto (Figura 2.15), roccia vulcanica composta di plagioclasti, pirosseni e olivine. Esse appartengono alla categoria delle fibre minerali assieme alle fibre di carbonio e alle fibre di vetro ma, rispetto a queste ultime, hanno migliori proprietà meccaniche e fisiche e un costo significativamente inferiore rispetto alle prime. Provenienti dalla fusione e successiva filatura della roccia basaltica, presentano infatti caratteristiche intrinseche fisico-chimiche particolarmente interessanti in chiave energetico-ambientale: origine naturale, un ciclo di produzione a minor impatto energetico rispetto alle fibre sintetiche, un'elevata inerzia chimica e quindi un elevato grado di durabilità, bassa conducibilità termica, buone proprietà meccaniche, buon isolamento termico ed acustico, alta resistenza al fuoco, un costo assolutamente competitivo con quello delle fibre sintetiche.

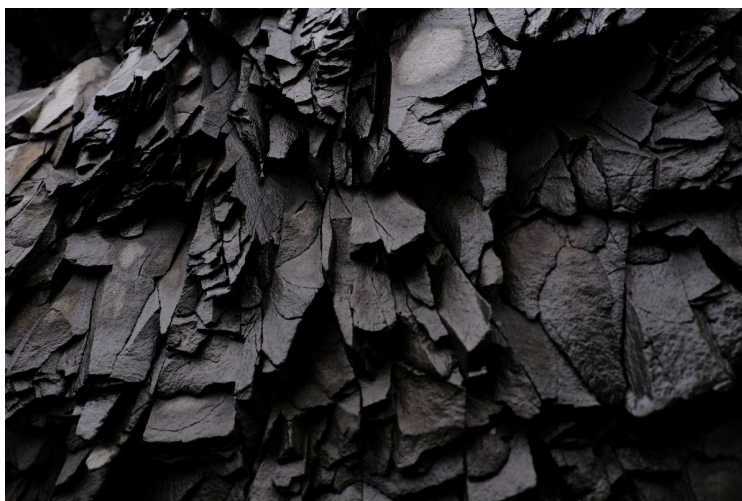


Figura 2.15 – Basalto, roccia vulcanica

Per quanto riguarda la composizione chimica, prevalgono il biossido di silicio  $\text{SiO}_2$  con un contenuto intorno al 50% e l'ossido di alluminio  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Oltre a questi due composti principali vi sono anche  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . In particolare il contenuto di  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{FeO}$  ha un ruolo molto importante perchè determina alcune proprietà fisico meccaniche come la densità (  $2.70 \text{ g/cm}^3$ ), il colore, la bassa conduttività del calore e una buona stabilità termica. La composizione chimica del basalto (Figura 2.16) influenza molto le proprietà delle fibre che presenteranno caratteristiche differenti a seconda della cava di estrazione.

| Componenti chimici             | Fibra di Basalto<br>(% w/w) | Fibra di Vetro-E<br>(% w/w) |
|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 51.6 – 57.5                 | 52 – 56                     |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 16.9 – 18.2                 | 12 - 16                     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4.0 – 9.5                   | ≤ 0.3                       |
| MgO                            | 1.3 – 3.7                   | 0 - 5                       |
| CaO                            | 5.2 – 7.8                   | 16 – 25                     |
| Na <sub>2</sub> O              | 2.5 – 6.4                   | 0.8                         |
| K <sub>2</sub> O               | 0.8 - 4.5                   | 0.2 – 0.8                   |
| TiO <sub>2</sub>               | 1.1                         | -                           |
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | -                           | 5 – 10                      |
| F                              | -                           | 0.3                         |

Figura 2.16 – Confronto composizione chimica fibre di basalto e fibre di vetro

Oltre che dalla composizione chimica, le proprietà delle fibre continue di basalto, sono influenzate anche dalle condizioni di stampaggio. Il processo produttivo varia a seconda che si tratti di fibre corte o fibre continue. Per quanto riguarda le prime, le tecnologie più diffuse sono quelle del melt-blowing, come il metodo Junkers. La roccia di basalto fusa viene fatta colare su un insieme di cilindri rotanti in acciaio; il fuso viene poi soffiato fuori dal cilindro per effetto di getti d'aria grazie ai quali solidifica rapidamente sotto forma di fibre. Le fibre continue, invece, vengono prodotte attraverso lo spinneret method (Figura 2.17), per estrusione e stiratura di rocce di basalto selezionate.

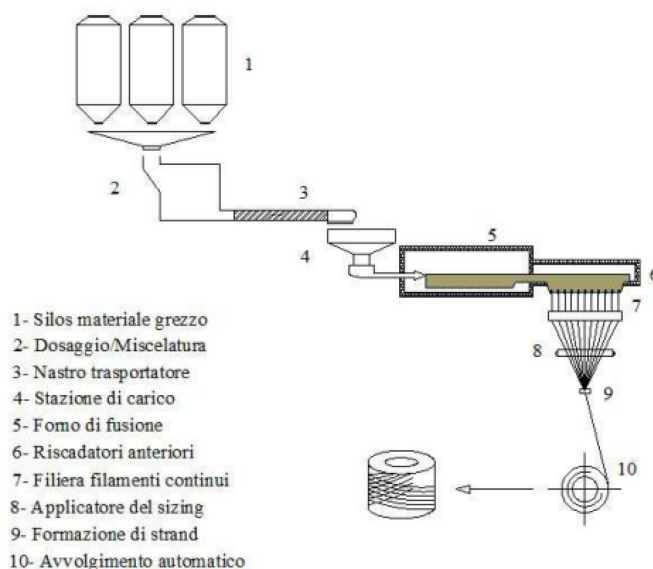


Figura 2.17 – Spinneret Method

La materia prima contenuta in silos viene frantumata, lavata e convogliata mediante nastri trasportatori all'interno del forno riscaldato a gas alla temperatura di 1450-1500 °C. Per effetto della

pressione idrostatica, il basalto fuso scorre attraverso una boccia di estrusione di platino-rodio, con un numero di 200 fori minimo. Successivamente, sulla superficie dei singoli filamenti continui di basalto, è applicato un composto chimico liquido, con la funzione di:

- Lubrificante al fine di ridurre la rottura delle fibre durante il processo di tessitura;
- Miglioramento dell'adesione fibra-matrice;
- Regolare le proprietà triboelettriche delle fibre.

Segue poi la fase di formazione dello “strand”, ovvero di un fascio di singoli filamenti paralleli tenuti insieme per mezzo di un legante (binder), e di avvolgimento in bobine. Per alcuni aspetti la produzione delle fibre di basalto è più semplice, infatti queste hanno una composizione meno complessa rispetto a quelle di vetro. A differenza del vetro, per la produzione di fibre di basalto non sono necessari materiali secondari e quindi si ha un'unica linea di alimentazione che trasporta le rocce frantumate ai forni di fusione.

Numerosi studi sono stati condotti con lo scopo di determinare le caratteristiche delle fibre di basalto, in particolar modo con l'obiettivo di confrontarle poi con le fibre di uso comune. Da prove meccaniche su laminati plastici rinforzati con fibre di basalto e di vetro ne risulta un'elevata performance del basalto in termini di Modulo di Young, resistenza a compressione e flessione, energia e forza di impatto. Risulta invece leggermente inferiore la resistenza a trazione del basalto, rispetto alle fibre di vetro (Figura 2.18).

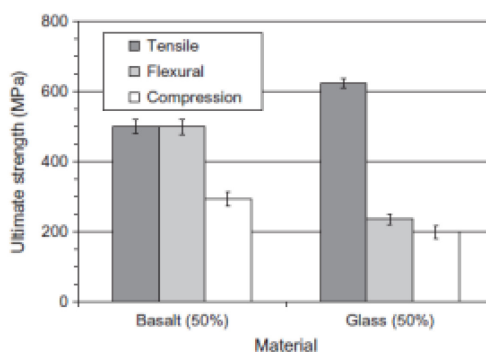


Figura 2.18 - Confronto resistenza a trazione, compressione e flessione

Inoltre, da particolari prove statiche e dinamiche descritte in un articolo di Czigány T., 2008 si è ricavato che le proprietà meccaniche del composito con fibre di basalto sono simili a quelle del composito con fibre di vetro e, in alcuni casi, si avvicinano a quelle del laminato in fibre di carbonio.

Una caratteristica che contraddistingue le fibre di basalto è il buonissimo comportamento alle alte temperatura e resistenza al fuoco (Figura 2.19).

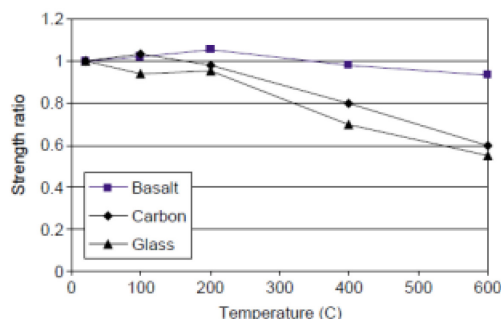


Figura 2.19 – Variazione di resistenza in funzione della temperatura

Confrontando la risposta al fuoco tra compositi realizzati con fibre di basalto e con fibre di vetro, si riscontra, che il composito con basalto ha una migliore risposta termica, una minore perdita di peso, una maggiore integrità di superficie e una regione ad alta temperatura più piccola. Oltre ad essere buoni isolanti termici, queste fibre vengono utilizzate anche per pannelli acustici e posseggono un basso assorbimento di umidità.

Un altro aspetto importante riguarda la valutazione della resistenza chimica delle fibre di basalto. Le percentuali di silicio, alluminio, calcio, magnesio e ossido di ferro nella composizione del basalto hanno un'importanza fondamentale; permettono infatti alle fibre di basalto di sviluppare una grande resistenza chimica e al calore. Considerando ad esempio la risposta chimica in un ambiente acido, le fibre di basalto mostrano una resistenza più grande delle fibre di vetro. Quando quest'ultime vengono a contatto con acidi molto forti sulla superficie della fibra non si forma un film protettivo e gli acidi sono quindi in grado di trasformare rapidamente queste fibre. Al contrario, quando le fibre di basalto si trovano in un mezzo acido, si forma un film protettivo che permette di ridurre l'attacco alle fibre e le conseguenti perdite di resistenza.

### 2.3.2 Tipologie di prodotti commerciali

Le fibre di basalto sono prodotte e vendute in molteplici forme. I principali prodotti presenti in commercio sono:

- Wool (Figura 2.20): sotto forma di lana, può essere utilizzato come isolante termico e acustico e come sistema di filtrazione. In genere è mantenuto insieme sotto forma di boards e sheets e applicato al posto dell'amianto proprio come isolante termico e acustico nell'edilizia civile e industriale.



Figura 2.20 – Lana di roccia basaltica

- Roving (Figura 2.21): si tratta di una matassa continua di fibra di basalto, facilmente utilizzabile nell'industria tessile. Ci sono due modi per utilizzare le matasse di fibre di basalto: lo stampaggio di compositi tramite pultrusione (formatura a filo) o filament winding (formatura per avvolgimento di fili). Entrambe le tecniche non prevedono l'impiego di una resina in particolare, questo grazie al trattamento che il filo di basalto subisce durante la produzione.



Figura 2.21 – Roving di fibre di basalto

- Chopped strand (Figura 2.22): la fibra di basalto viene tritata per essere utilizzata per diverse tipologie di applicazioni, tra le quali in ambito edilizio: rinforzo e alleggerimento di cementi e calcestruzzi anche in elevate percentuali.



Figura 2.22 – Chopped strands

- Fabrics (Figura 2.23): stoffe e tele formate da fibre di basalto utilizzate nell'industria tessile realizzate con varie tecniche di tessitura. Il loro impiego riveste anche il settore elettrico e della nautica.



Figura 2.23 – Fabrics di basalto

- Nonwoven (Figura 2.24): si tratta di un tessuto non tessuto, prodotto da uno o più strati uniformi di chopped strand. Ha ottima resistenza meccanica, termica e chimica e la sua capacità di isolamento termico, elettrico e acustico la rende di vasto impiego nel settore dei trasporti e della cantieristica edilizia.



Figura 2.24 – Tessuto tipo nonwoven di basalto

## Capitolo 3 – Sperimentazione su nodi di telai in calcestruzzo armato

### 3.1 Introduzione

In questo capitolo si tratta la sperimentazione eseguita su un telaio in calcestruzzo armato rinforzato e non con materiali compositi innovativi. Sono, infatti, state eseguite due differenti prove: la prima su un telaio isostatico in calcestruzzo armato portato a rottura, la seconda sullo stesso provino fessurato precedentemente e rinforzato con materiali compositi a base di fibre di basalto. Sono stati ricavati, in funzione delle diverse sollecitazioni, dei dati relativi a deformazioni e spostamenti con lo scopo di andarli a confrontare e studiare l'evoluzione del comportamento del provino prima e dopo il rinforzo. L'obiettivo, infatti, è quello di paragonare, al termine delle prove sperimentali, il diverso stato deformativo e gli spostamenti alla quale la struttura viene sottoposta sia nel caso di telaio rinforzato che non.

La struttura, oggetto di analisi, è formata da un pilastro ed una trave entrambi di lunghezza pari a 2 m e di sezione 200 x 200 mm. Il telaio si presenta come una struttura isostatica vincolata, alla base del pilastro, da una cerniera e da un carrello verticale in corrispondenza del nodo. Il tutto viene sollecitato da un carico verticale costante nel nodo e da una forza verticale crescente applicata sull'estremo libero della trave ( Figura 3.1).

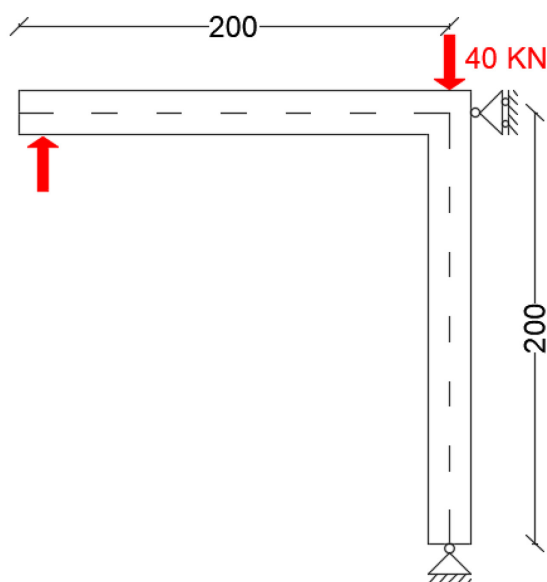


Figura 3.1 – Telaio isostatico

Questo telaio isostatico deriva in realtà da una struttura iperstatica emisimmetrica (Figura 3.2), ovvero simmetrica di vincolo ma non di sollecitazioni rispetto ad un asse verticale. Per motivi dimensionali e semplificativi la sperimentazione è stata eseguita su metà del telaio iperstatico, trasformandolo in una struttura isostatica aggiungendo un carrello in corrispondenza del nodo e applicando una forza verticale in prossimità dell'asse di simmetria verticale.

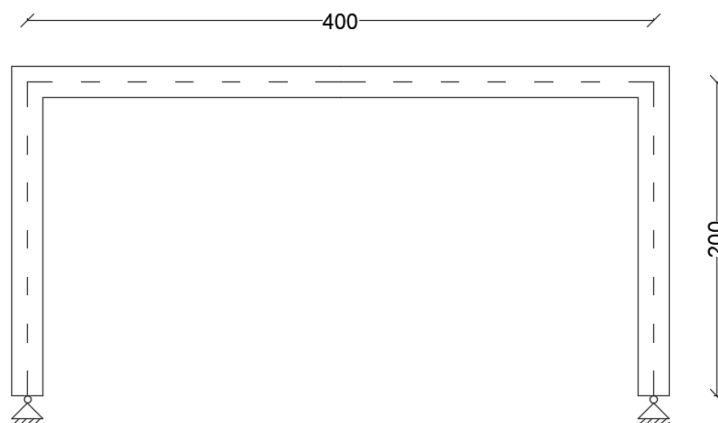


Figura 3.2 – Struttura iperstatica emisimmetrica

### 3.2 Analisi statica del telaio

Il telaio, oggetto di studio della sperimentazione, è come anticipato nel paragrafo precedente una struttura isostatica vincolata a terra da una cerniera e da un carrello verticale e sollecitata da due carichi concentrati verticali. Il primo, variabile nel corso della sperimentazione, è applicato, dal basso verso l'alto, in corrispondenza dell'estremo libero della trave. Mentre il secondo, costante pari a 40 KN, è concentrato sul nodo ed è applicato per garantire una maggiore stabilità alla struttura e per evitare che la cerniera ai piedi del pilastro trasli rigidamente verso l'alto.

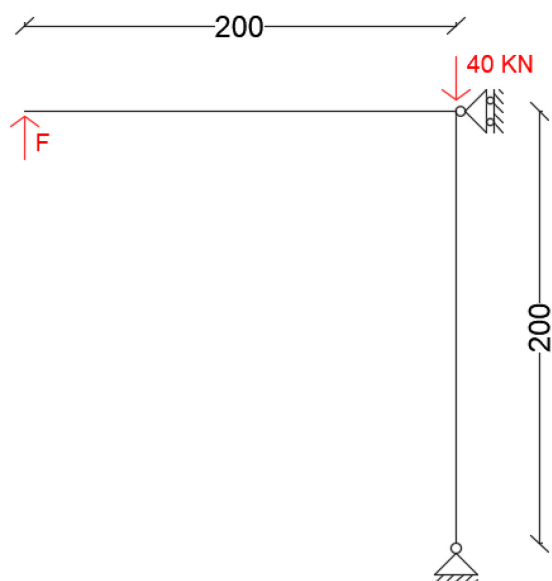


Figura 3.3 – Sollecitazioni applicate al telaio isostatico

Sostituendo ai vincoli le apposite reazioni vincolari e applicando le equazioni cardinali della statica è possibile risolvere la struttura isostatica (Figura 3.4)

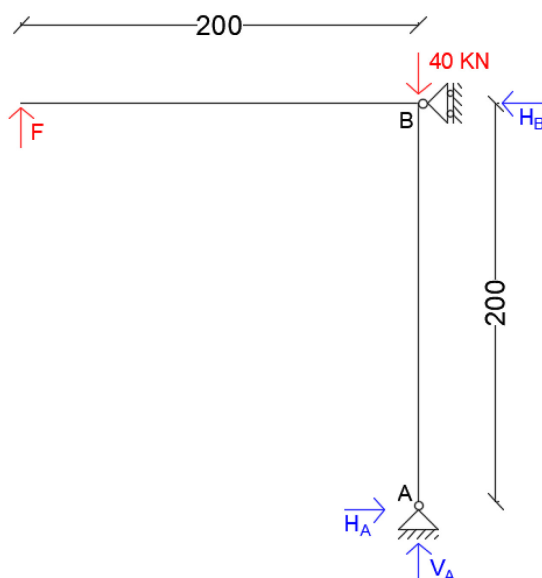


Figura 3.4 – Sollecitazioni e reazioni vincolari del telaio

Si scrivono e si risolvono tre equazioni in tre incognite, ovvero le tre reazioni vincolari  $V_A, H_A, H_B$ :

$$\begin{cases} V_A + F - 40 = 0 \\ H_A = H_B \\ F(2) - H_B(2) = 0 \end{cases}$$

Risolvendo il sistema si ricava:  $H_B = F$ ,  $H_A = F$ ,  $V_A = 40 - F$  (Figura 3.5). Si può notare che tutte le incognite del sistema sono in funzione di  $F$ , la forza applicata nell'estremo libero della trave, che costituisce la variabile durante la sperimentazione.

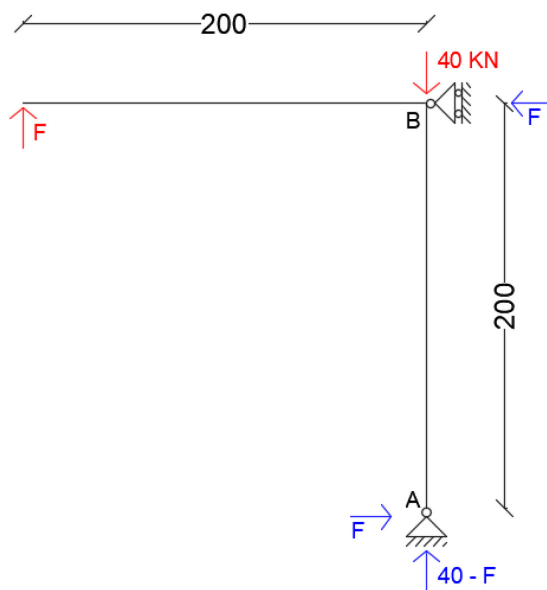


Figura 3.5- Telaio con reazioni vincolari

Si possono a questo punto ricavare i diagrammi di sforzo assiale, taglio e momento (Figura 3.6).

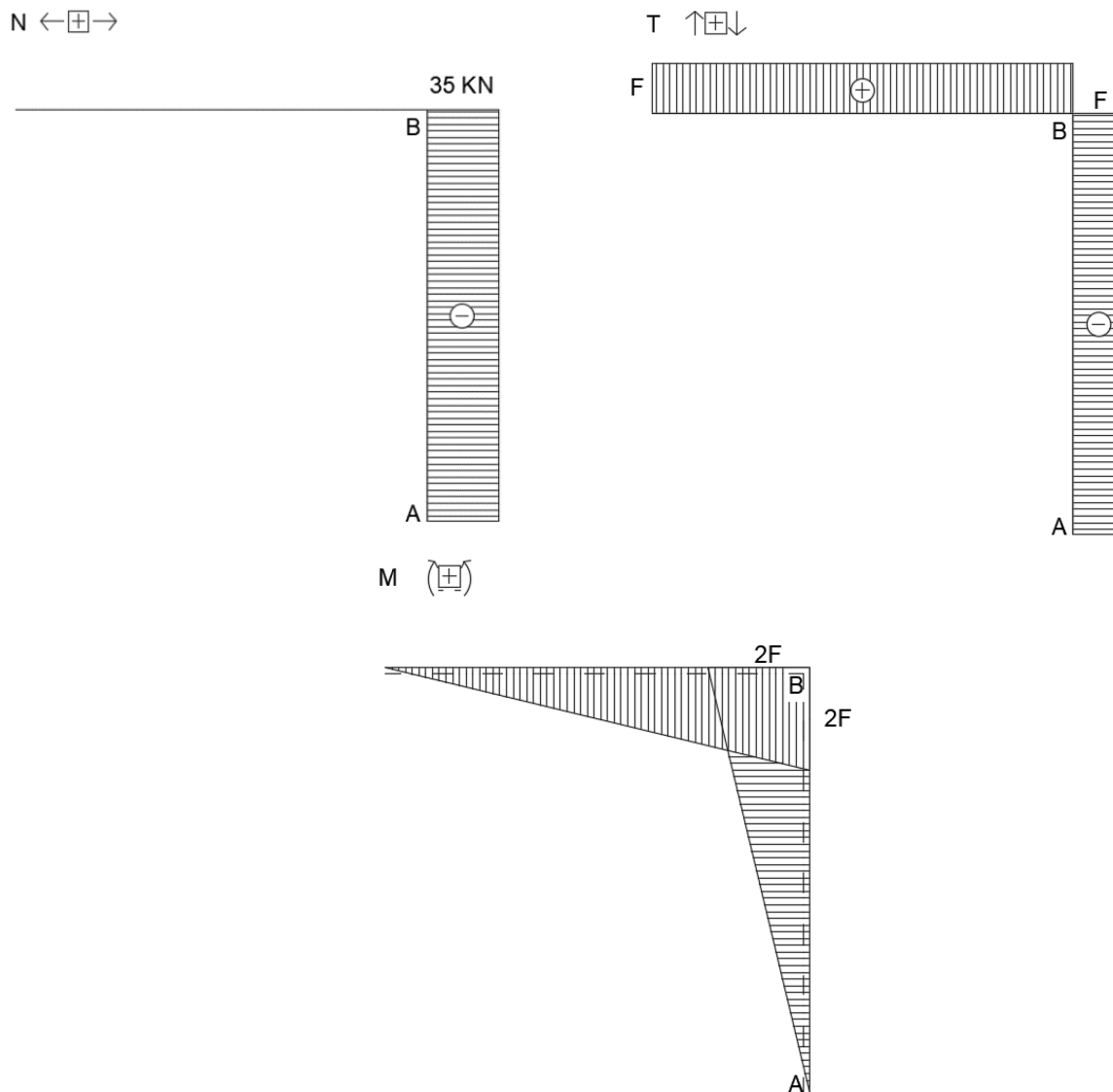


Figura 3.6 – Diagramma dello sforzo assiale, del taglio e del momento

### 3.3 Descrizione del set-up di prova

#### 3.3.1 Descrizione del telaio in calcestruzzo armato non rinforzato

Il telaio, oggetto di sperimentazione, come anticipato nel paragrafo precedente è formato da una trave e un pilastro entrambe di lunghezza pari a 2 m e di sezione 200 x 200 mm. Per la realizzazione del provino è stato utilizzato un calcestruzzo C28/35, armatura longitudinale di tipo  $\Phi 12$  e staffatura  $\Phi 8$  sia per la trave che per il pilastro (Figura 3.7).

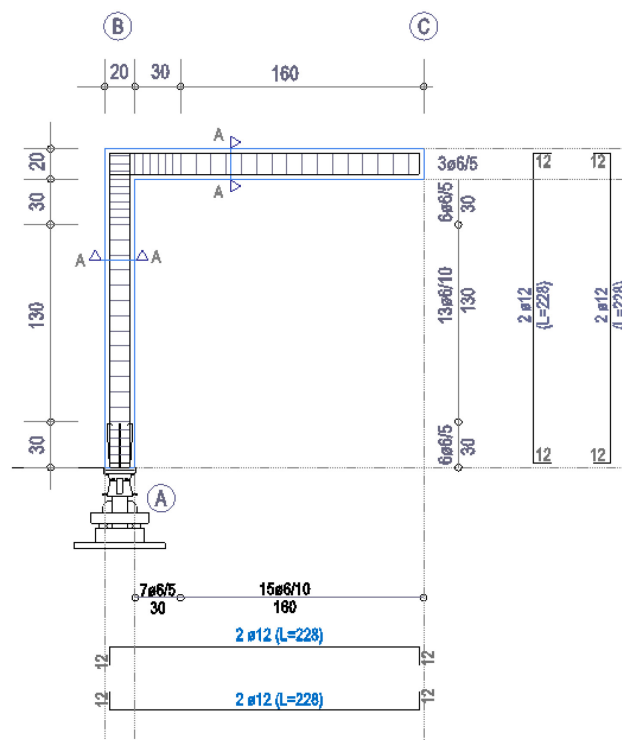


Figura 3.7 – Armatura all'interno del telaio

La staffatura risulta essere più fitta, con un passo di 5 cm, in corrispondenza del nodo trave-pilastro e dell'attacco a terra del pilastro, mentre è posizionata con un passo maggiore, di 10 cm, in tutta la restante porzione di trave e al centro del pilastro. Dalle sezioni A-A' indicata in Figura 3.7 si può notare che i ferri di armatura hanno un copriferro di 3 cm (Figura 3.8).

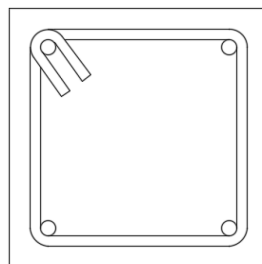


Figura 3.8 – Sezione A-A'

Per l'esecuzione del test, il provino in c.a. è stato fissato ad un telaio di contrasto interamente in acciaio.



Figura 3.9 – Struttura in acciaio per la sperimentazione

Questo controtelaio è dotato di una componente verticale che termina con un martinetto, collegato ad un sistema di pompa, tramite il quale viene applicata la forza verticale crescente in corrispondenza dell'estremo libero della trave. Sul lato destro del telaio in acciaio si trovano altri due martinetti collegati alla struttura in c.a. nel nodo trave-pilastro; il primo posizionato orizzontalmente non ha nessuno scopo in termini di sollecitazione del provino ma serve esclusivamente da contrasto, mentre quello posto verticalmente viene utilizzato per applicare un carico costante di 40 KN dall'alto verso il basso (Figura 3.10).



Figura 3.10 – Martinetti verticali ed orizzontali utilizzati per l'applicazione dei carichi o come vincolo

Il provino in c.a. è collegato al telaio in acciaio tramite un sistema di vincolo a cerniera a terra posizionato alla base del pilastro. In fase di realizzazione del provino, dei tirafondi collegati ad una piastra in acciaio (Figura 3.11), sono stati collegati alle barre di armatura alla base del pilastro e inglobati nel getto di calcestruzzo. La piastra di acciaio alla base presenta dei fori che hanno permesso il collegamento tramite bullonaggio alla cerniera (Figura 3.12) presente sul controtelaio in acciaio.



Figura 3.11 – (da sinistra) Piastra e tirafondi in acciaio, bulloni per il collegamento con la cerniera



Figura 3.12 – Cerniera alla base del pilastro

Con l'obiettivo di monitorare gli spostamenti e le deformazioni della struttura sono stati inseriti dei sensori, estensimetri e trasduttori, sia sulla trave che sul pilastro. Alcuni di questi sono stati inglobati nel getto, in corrispondenza delle barre di armatura, in modo da valutare il comportamento di queste dal momento in cui vengono sollecitate da forze esterne. Per monitorare le deformazioni delle fibre compresse di calcestruzzo in prossimità del nodo sono, invece, stati posizionati dei L.V.D.T

(Linear Variable Displacement Transducer), ovvero dei dispositivi elettrici in grado di valutare gli spostamenti lineari.

In totale si hanno 8 canali di acquisizione dati: 2 estensimetri per la trave, 2 per il pilastro, 2 nel nodo, un trasduttore per valutare lo spostamento della trave nell'estremo nel quale è applicata la forza e un sensore che va a misurare il carico applicato (Figura 3.13).

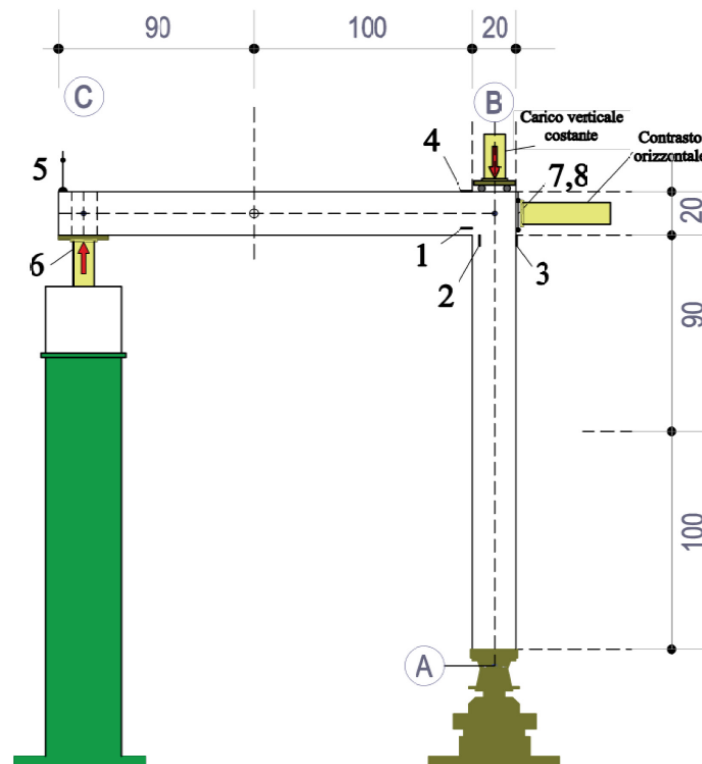


Figura 3.13 – Posizionamento sensori all'interno del telaio in c.a.

- Est1: deformazione dell'armatura della trave nel nodo;
- Est2: deformazione dell'armatura del pilastro nel nodo;
- Est3: deformazione delle fibre compresse di calcestruzzo del pilastro nel nodo;
- Est4: deformazione delle fibre compresse di calcestruzzo della trave nel nodo;
- Trasd5: Spostamento verticale della trave;
- 6: Misura forza da applicare al provino;
- Est7: deformazione delle fibre compresse nel nodo;
- Est8: deformazione delle fibre compresse nel nodo.

### 3.3.2 Descrizione del telaio in calcestruzzo armato rinforzato

Con la prima prova si è portato a rottura il telaio in c.a. non rinforzato, sono quindi state analizzate e messe in evidenza tutte le fessurazioni che si sono generate in seguito alla sollecitazione.



Figura 3.14 – Telaio fessurato al termine della prima prova

Si può osservare che gran parte delle fessurazioni si sono concentrate in prossimità del nodo (Figura 3.15), sia in corrispondenza della trave che del pilastro. Questo perché, come si può anche vedere dall'analisi statica del telaio (paragrafo 3.2), i maggiori sforzi di flessione sono concentrati proprio nella zona di intersezione tra trave e pilastro. Tutte le fessurazioni, inoltre, sono distribuite sulla parte intradossale del nodo, questo lo si poteva intuire anche dal diagramma del momento dal quale si evince che le fibre tese sono proprio quelle all'intradosso della trave e del pilastro.



Figura 3.15 – Fessurazioni in prossimità del nodo

Nella seconda parte del test sperimentale, il provino fessurato è stato rinforzato tramite l'applicazione di materiali compositi, a base di fibre di basalto, posizionati nelle zone del telaio maggiormente sottoposte a sollecitazione e fessurate. Il tessuto utilizzato per questa prova è il FIDBASALT UNIDIR 400 C95, un tessuto unidirezionale in fibra di basalto utilizzato prettamente per il rinforzo strutturale. Le fibre sono prodotte dalla fusione e successiva filatura di rocce vulcaniche, queste sono poi termosaldare tra di loro tramite fili di poliestere per evitare sfilacciamenti e facilitarne la posa in cantiere. Di seguito in Figura 3.16 vengono elencate le principali caratteristiche tecniche del tessuto.

| Proprietà geometriche e meccaniche*                   |                       |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|
| <b>Fibra secca (singolo filamento)</b>                |                       |
| Tensione caratteristica a trazione, $\sigma_{fibra}$  | 3080 MPa              |
| Modulo elastico, $E_{fibra}$                          | 95 GPa                |
| Deformazione a rottura, $\epsilon_{fibra}$            | 3,15 %                |
| Densità                                               | 2,8 g/cm <sup>3</sup> |
| <b>Tessuto impregnato (valori per il calcolo)</b>     |                       |
| Titolo filato                                         | 1200 Tex              |
| n° fili/cm                                            | 3,3 Fili/cm           |
| Massa                                                 | 396 g/m <sup>2</sup>  |
| Spessore equivalente del rinforzo FRP, $t_r$          | 0,140 mm              |
| Resistenza caratteristica del rinforzo FRP, $f_{rk}$  | 1900 MPa              |
| Modulo di elasticità normale del rinforzo FRP, $E_r$  | 90 GPa                |
| Deformazione a rottura del rinforzo FRP, $\epsilon_r$ | 2,11 %                |
| Aggiornamento al 04 Agosto 2010                       |                       |

Figura 3.16 – Caratteristiche tecniche del tessuto a base di fibre di basalto utilizzato per il rinforzo

In genere questa tipologie di tessuto viene utilizzata per:

- Adeguamento sismico;
- Confinamento di pilastri in modo da incrementare la resistenza a compressione;
- Rimediare a difetti di progetto o costruzione;
- Strutture soggette ad azioni dinamiche;
- Rinforzo di strutture modificate a causa di nuove esigenze architettoniche.

Presenta numerose applicazioni per via dei suoi numerosi vantaggi, come:

- Elevata resistenza ad usura per sfregamento;
- Elevata tenacità;
- Resistente ad urti e impatti violenti;
- Elevata resistenza a fatica, urti, vibrazioni;
- Elevata stabilità termica,
- Durabilità e leggerezza
- Incremento trascurabile di spessore,
- Scarsa conducibilità termica ed elettrica;
- Trasparenza alla radiazione elettromagnetica.

L'applicazione del tessuto FIDBASALT UNIDIR 400 C95 può essere effettuata solamente mediante l'utilizzo di matrici organiche, ovvero resine epossidiche, ottenendo così il composito BFRP (Basalt Fiber Reinforced Polymer). Affinchè il tessuto in uso garantisca resistenze elevate bisogna seguire determinate regole durante l'applicazione. In primis dal substrato dell'elemento in calcestruzzo devono essere rimosse polveri, grassi e parti incoerenti sottoponendolo a rasatura. A questo punto si va ad applicare il primer sulla superficie e trascorse circa 2/3 ore si stende una mano di resina adesivo-impregnante che renderà più facile l'adesione del tessuto alla struttura. Quando quest'ultimo strato è ancora fresco, si va a stendere il tessuto facendo attenzione che non si vadano a formare pieghe, esso va spianato manualmente oppure utilizzando un rullo per eliminare le eventuali bolle d'aria. Per terminare si applica una seconda mano di resina, uno spolvero di sabbia e uno strato di pittura epossidica e poliuretanica per la protezione del sistema di rinforzo.

Come indicato precedentemente, per favorire l'applicazione delle strisce di fibre di basalto, è stata utilizzata una matrice organica, in particolare la MASTERBRACE SAT 4500. Si tratta di un prodotto bicomponente a base epossidica, ad alto contenuto di solidi, indicato per l'impregnazione e l'adesione al supporto dei tessuti di rinforzo. Può essere applicata su diverse tipologie di superfici: calcestruzzo, muratura, legno e pietra naturale. Di seguito in Figura 3.17 vengono riassunte tutte le principali caratteristiche tecniche della resina.

| Dati identificativi e applicativi                                                                                                                                                                      |                  |                                                                                                                    |                                                                            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| Tempo di miscelazione                                                                                                                                                                                  |                  | Almeno 3 minuti                                                                                                    |                                                                            |
| Densità dei singoli componenti A e B                                                                                                                                                                   |                  | A: $1,05 \pm 0,05$ kg/litro<br>B: $1 \pm 0,05$ kg/litro                                                            |                                                                            |
| Densità (A+B)                                                                                                                                                                                          |                  | $1,04 \pm 0,05$ kg/litro                                                                                           |                                                                            |
| Tempo di lavorabilità a:                                                                                                                                                                               |                  | A 5°C: 120 minuti<br>A 10°C: 70 minuti<br>A 20°C: 60 minuti<br>A 35°C: 20 minuti                                   |                                                                            |
| Tempo di miscelazione                                                                                                                                                                                  |                  | Almeno 3 minuti                                                                                                    |                                                                            |
| Temperatura d'applicazione                                                                                                                                                                             |                  | $5 \div 40^\circ\text{C}$                                                                                          |                                                                            |
| Confezioni                                                                                                                                                                                             |                  | componente A secchiello da 3,81 kg;<br>componente B secchiello da 1,19 kg                                          |                                                                            |
| Consumo                                                                                                                                                                                                |                  | Da 1,00 litri/m <sup>2</sup> fino a 1,40 litri/m <sup>2</sup> a seconda della grammatura del tessuto da impregnare |                                                                            |
| Dati tecnici secondo UNI EN 1504-4                                                                                                                                                                     |                  | Limiti di accettazione                                                                                             | Prestazione                                                                |
| Modulo di elasticità in flessione                                                                                                                                                                      | EN ISO 178       | $>2.000$ N/mm <sup>2</sup>                                                                                         | 2.200 MPa                                                                  |
| Resistenza al taglio                                                                                                                                                                                   | EN 12188         | $>12$ N/mm <sup>2</sup>                                                                                            | 95 MPa                                                                     |
| Tempo aperto                                                                                                                                                                                           | EN 12189         | -                                                                                                                  | 60 min                                                                     |
| Tempo di lavorabilità                                                                                                                                                                                  | EN ISO 9514      | -                                                                                                                  | 70 min                                                                     |
| Resistenza a compressione                                                                                                                                                                              |                  | -                                                                                                                  | 90 MPa                                                                     |
| Modulo di elasticità in compressione                                                                                                                                                                   | EN 13412         | $>2.000$ N/mm <sup>2</sup>                                                                                         | 2.800 MPa                                                                  |
| Temperatura di transizione vetrosa                                                                                                                                                                     | ISO 11357-2:2019 | $>40^\circ\text{C}$                                                                                                | $56,4^\circ\text{C}$                                                       |
| Coefficiente di espansione termica                                                                                                                                                                     | EN 1770          | $<100 \times 10^{-6}$ per $^\circ\text{C}$                                                                         | $0,875 \times 10^{-6}$ per $^\circ\text{C}$                                |
| Ritiro totale per agenti adesivi strutturali                                                                                                                                                           | EN 12617-1       | $<0,1\%$                                                                                                           | 0,09%                                                                      |
| Aderenza                                                                                                                                                                                               | EN 12188         | a $50^\circ > 50$ MPa<br>a $60^\circ > 60$ MPa<br>a $70^\circ > 70$ MPa                                            | a $50^\circ > 100$ MPa<br>a $60^\circ > 110$ MPa<br>a $70^\circ > 120$ MPa |
| Durabilità (temperatura e umidità),<br><br>CICLI TERMICI<br>Cls fresco – cls indurito<br>Cls indurito – cls indurito<br><br>CICLI UMIDITA'<br>Cls fresco – cls indurito<br>Cls indurito – cls indurito | EN 13733         | -                                                                                                                  | 4,80 MPa<br>4,90 MPa<br><br>4,60 MPa<br>5,10 MPa                           |
| Adesione per trazione                                                                                                                                                                                  | UNI EN 1542      | -                                                                                                                  | 3,5 MPa                                                                    |
| Adesione cls-cls                                                                                                                                                                                       | UNI EN 12636     | -                                                                                                                  | 12 MPa                                                                     |
| Adesione acciaio-acciaio                                                                                                                                                                               | UNI EN 12188     | -                                                                                                                  | 17 MPa                                                                     |
| Adesione acciaio-cls                                                                                                                                                                                   | UNI EN 12188     | -                                                                                                                  | 5,5 MPa                                                                    |

Figura 3.17 – Resina MASTERBRACE SAT 4500

Come anticipato precedentemente l'adesivo è composto da due componenti, un componente A e un componente B che adeguatamente miscelati danno vita ad un composto che garantisce un'ottima adesione tra la superficie del calcestruzzo e il tessuto di rinforzo. In questa sperimentazione i due componenti, forniti in due contenitori separati, sono stati utilizzati in rapporto A/B pari a 19/6 come indicato dalla scheda tecnica. In particolare è stata realizzata una prima miscela con 314 g di componente A e 100 g di componente B, al termine di questa sono stati utilizzati altri 250 g e 82 g, rispettivamente del componente A e B, per realizzare una seconda matrice adesiva.



Figura 3.18 – Componente A e componente B

Una volta pesate le giuste quantità, nel rapporto prescritto, delle due componenti (Figura 3.18), si va a miscelare meccanicamente il componente A prima dell'aggiunta del componente B. Al termine di questa operazione, tramite l'utilizzo di un trapano a frusta a bassa velocità, si vanno a mescolare entrambe le parti fino ad ottenere un impasto di colorazione uniforme (Figura 3.19).



Figura 3.19 – Aggiunta del componente B al componente A

È stato quindi steso un primo strato di matrice adesiva in prossimità del nodo e delle fessurazioni presenti sia sulla trave che sul pilastro (Figura 3.20), al di sopra di questo è stato applicato il tessuto unidirezionale avendo cura di garantire una perfetta adesione con la superficie ed evitando che si vadano a creare delle bolle di aria.



Figura 3.20 – Applicazione della matrice adesiva

Come si può notare dalla Figura 3.21 sono state disposte una serie di fibre nella direzione longitudinale alla lunghezza della trave, altre nell'intradosso sia della trave che del pilastro e quattro strisce finali come cerchiatura di trave e pilastro. In corrispondenza dei punti di sovrapposizione si applicherà un'ulteriore mano di resina epossidica sulla superficie esterna del foglio da sormontare. Al termine una seconda mano di matrice adesiva verrà stesa al di sopra della superficie del tessuto di rinforzo (Figura 3.22).



Figura 3.21 – Applicazione del tessuto in fibre di basalto



Figura 3.22 – (da sinistra) Cerchiatura del pilastro, applicazione del secondo strato di matrice, telaio rinforzato

Al termine dell'applicazione la resina epossidica deve esser lasciata indurire per un tempo non inferiore alle 24 ore alla temperatura di 20 °C prima di poter utilizzare la struttura. Nel caso in cui le temperature fossero inferiori a 20 °C sarà necessario attendere un tempo superiore. Quando invece le temperature sono inferiori ai 10°C l'applicazione potrà avvenire adottando speciali accorgimenti, quali ad esempio il riscaldamento del supporto e dell'ambiente di applicazione della resina ad una temperatura compresa tra i 10°C e i 20°C, utilizzando opportuni riscaldatori. È altamente sconsigliato l'applicazione della resina ad una temperatura ancora inferiore ai 5°C in quanto il tempo di polimerizzazione risulterebbe estremamente lungo.

Anche in questo caso si hanno 8 canali di acquisizione, due dei quali sono cambiati rispetto alla prima prova. Rimangono invariati gli estensimetri posti sull'armatura e sulle fibre di calcestruzzo compresso, mentre sono stati spostati gli estensimetri 7 e 8. Sono stati posti infatti due nuovi sensori al di sopra delle fibre di tessuto, in particolare l'estensimetro 7 in corrispondenza della zona compressa della trave e l'estensimetro 8 sulla parte sottoposta a tensioni di trazione, con lo scopo di misurare le deformazioni delle fibre del materiale composito durante una sollecitazione di tipo sismico. Nella Figura 3.23 viene mostrata la posizione di ogni estensimetro in questa seconda prova sperimentale. Mentre in Figura 3.24 si possono vedere dei particolari per meglio evidenziare la posizione degli estensimetri e delle fibre per il rinforzo.

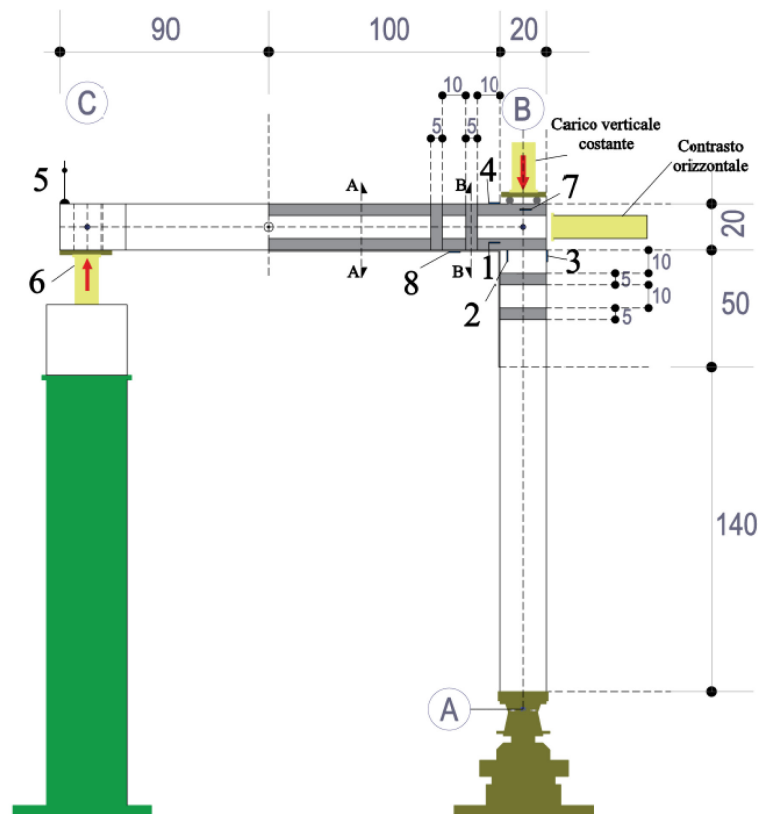


Figura 3.23 – Posizionamento estensimetri nel provino in c.a. rinforzato

- Est1: deformazione dell'armatura della trave nel nodo;
- Est2: deformazione dell'armatura del pilastro nel nodo;
- Est3: deformazione delle fibre compresse di calcestruzzo del pilastro nel nodo;
- Est4: deformazione delle fibre compresse di calcestruzzo della trave nel nodo;
- Trasd5: Spostamento verticale della trave;
- 6: Misura forza da applicare al provino;
- Est7: deformazione del materiale composito sul lato compresso della trave;
- Est8: deformazione del materiale composito sul lato teso della trave.

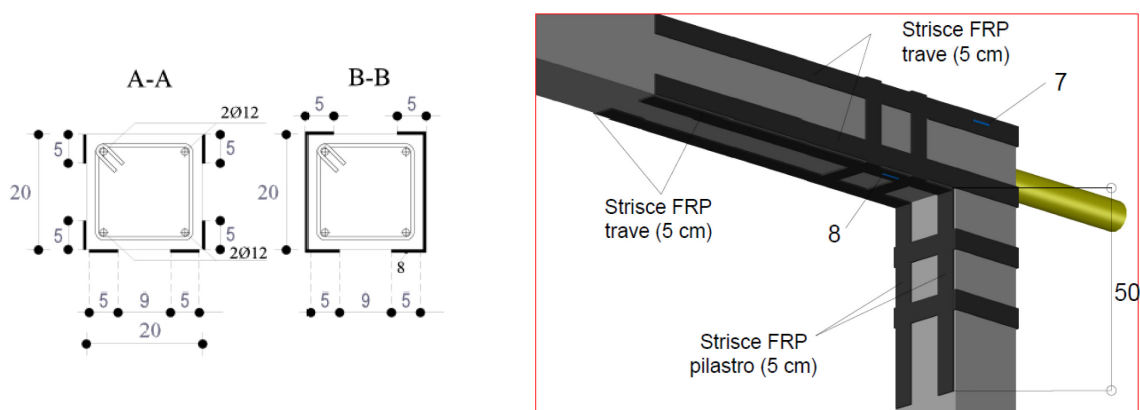


Figura 3.24 – Sezioni e posizione EST7 e EST8

Di seguito in figura 3.25 si possono vedere gli estensimetri applicati al di sopra delle fibre di basalto, che hanno permesso di misurare le loro deformazione durante la seconda prova.

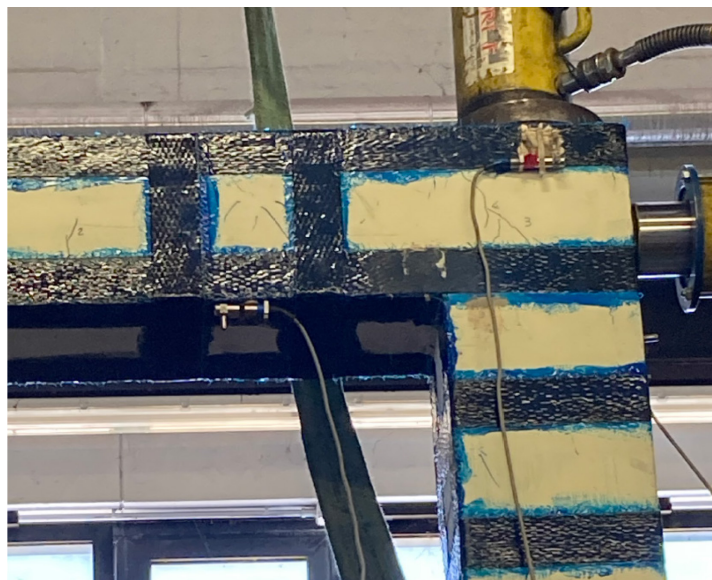


Figura 3.25 – Estensimetro 7 e 8 al di sopra delle fibre in basalto

### 3.4 Prova sperimentale e risultati del telaio in calcestruzzo armato

#### 3.4.1 Descrizione del test sperimentale sul telaio in c.a. non rinforzato

Come già anticipato al paragrafo 3.1, l'obiettivo della sperimentazione è quello di confrontare i valori di deformazione e spostamento della struttura, rinforzata e non, sottoposta in entrambi i casi alla stessa tipologia di sollecitazione. Si prende ora in considerazione la prima tipologia di prova realizzata sul provino in c.a. non rinforzato. Con lo scopo di andare a studiare il comportamento fessurativo del nodo in c.a. sottoposto ad azioni sollecitanti di tipo sismico, il telaio è stato sottoposto a due carichi concentrati. Il primo, costante pari a 40 KN, è applicato in corrispondenza del nodo, mentre il secondo, variabile nel corso della prova, è concentrato nell'estremo libero della trave. Il telaio, è stato infatti sottoposto a 4 diversi cicli di carico, in ognuno dei quali è stato aumentato il carico massimo raggiunto ad eccezione dell'ultimo nel quale si è andati ad incrementare la forza fino a raggiungimento della rottura. Nella seguente tabella vengono riassunti tutti i cicli di carico-scarico della prima prova.

Tabella 3.1 – Cicli carico-scarico prima prova

| <b>CICLI CARICO-SCARICO</b>     |
|---------------------------------|
| CICLO 1: 0 → 2 KN → 0           |
| CICLO 2A: 0 → 3 KN → 0          |
| CICLO 2B: 0 → 3 KN → 0          |
| CICLO 3: 0 → 4 KN → 5 KN → 6 KN |

Il telaio è quindi stato sottoposto in totale a 3 cicli differenti di carico-scarico, nel primo si è raggiunto un carico massimo di 2 KN in circa 80 secondi, nel secondo si è arrivati fino a 3 KN in un tempo maggiore pari a 7 min per poi terminare con l'ultimo dove non è stato variato il carico massimo ma il tempo di raggiungimento che si è ridotto a circa 110 secondi. Nell'ultimo test la forza applicata è stata aumentata nel tempo fino al raggiungimento, dopo 10 min, di un carico pari a 6 KN, raggiunto il quale si ha la rottura del provino.

Ad ogni ciclo i vari estensimetri posti internamente o esternamente alla struttura hanno misurato due valori di deformazione al secondo; in particolare sono state registrate le deformazioni dell'acciaio (est1 e est2), le deformazioni del calcestruzzo (est4 e est3) e le deformazioni sul nodo (est7 e est8). Anche il trasduttore 5, posto nell'estremo libero della trave, ha misurato ogni secondo due valori di spostamento. Tutte queste misurazioni sono state raggruppate in una serie di grafici, in modo da garantire un confronto con i risultati della seconda prova realizzata, invece, sul provino fessurato e poi rinforzato. Sono stati tracciati tre diverse tipologie di grafici: grafici forza-spostamento facendo

riferimento ai dati del trasduttore 5, i grafici forza-deformazione utilizzando i valori degli estensimetri e il grafico momento-curvatura.

### 3.4.2 Analisi dei risultati del test sperimentale sul telaio in c.a. non rinforzato

Nella tabella 3.2 si vanno a riassumere tutti i valori registrati da estensimetri e trasduttori nel corso della prova, in modo tale da poter già confrontare velocemente i valori delle deformazioni delle barre di armatura e del calcestruzzo all'aumentare del carico massimo.

Tabella 3.2 – Riassunto valori delle deformazioni e degli spostamenti della prima prova sperimentale

| FORZA<br>[kN] | Est1<br>[10 <sup>-6</sup> ] | Est2<br>[10 <sup>-6</sup> ] | Est3<br>[10 <sup>-6</sup> ] | Est4<br>[10 <sup>-6</sup> ] | Trasd5<br>[mm] | Est7<br>[10 <sup>-6</sup> ] | Est8<br>[10 <sup>-6</sup> ] |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0.00          | 0.00                        | 0.96                        | 2.02                        | 0                           | -0.01          | 0                           | 0                           |
| 2.00          | -38.44                      | 83.52                       | -135.84                     | -147.30                     | 4.6            | 100                         | 28.21                       |
| 0.00          | -23.41                      | 7.68                        | -6.08                       | -18.93                      | -0.01          | 10                          | -4.72                       |
| 3.00          | 10.56                       | 234.24                      | -298.05                     | -330.38                     | 8.96           | 220                         | -23.51                      |
| 0.00          | -44.16                      | 14.40                       | -6.08                       | -29.46                      | -0.11          | 30                          | -75.18                      |
| 3.00          | 3.84                        | 237.12                      | -691.40                     | -334.59                     | 9.05           | 230                         | -61.13                      |
| 0.00          | -55.68                      | 19.20                       | -409.57                     | -39.98                      | -0.21          | 40                          | -93.98                      |
| 4.00          | 152.64                      | 414.72                      | -991.48                     | -526.09                     | 15.12          | 400                         | 42.33                       |
| 5.00          | 273.62                      | 571.20                      | -1232.77                    | -679.71                     | 23.21          | 550                         | 146                         |
| 6.00          | 357.12                      | 748.80                      | -1419.32                    | -822.81                     | 29.68          | 660                         | 221                         |

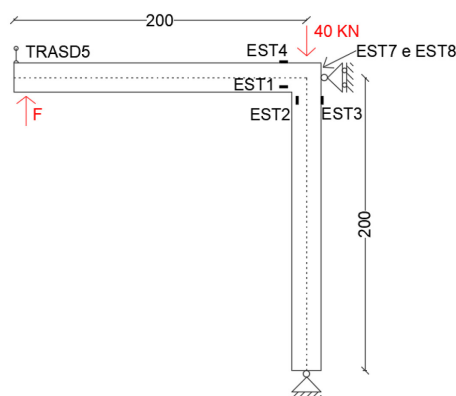


Figura 3.26 – Riepilogo posizione estensimetri e trasduttore prima prova

Si può notare che nel primo ciclo di carico-scarico l'estensimetro 1 non è riuscito a lavorare bene, sono stati infatti registrati valori negativi di deformazione come se l'armatura fosse sottoposta a tensioni di compressione. In realtà si può facilmente notare, dall'analisi statica del telaio, che le fibre tese sono proprio quelle all'intradosso della trave. Questi sforzi di trazione vengono assorbiti

dall'armatura longitudinali inferiore ( $2\Phi 12$ ) della sezione, nella quale si dovrebbero registrare valori positivi di deformazione. Solo nell'ultimo ciclo, quindi quello con carichi maggiori, sono stati registrati valori ragionevoli di deformazioni positive le quali sono aumentate con l'incremento della forza applicata. Analogamente anche l'estensimetro 2 posto sull'armatura longitudinale sinistra della sezione del pilastro ha registrato valori sempre positivi di deformazione. Al contrario gli estensimetri posti sulle fibre di calcestruzzo compresso hanno sempre riportato deformazioni negative, in quanto sotto questa condizione di carico sono le fibre estradossali ad assorbire i maggiori sforzi di compressione. Si può notare che, come si poteva prevedere, lo spostamento verticale della trave aumenta con il crescere della forza e si annulla ogni qual volta si va a scaricare il provino. Di seguito vengono riportati per ogni ciclo i grafici di forza-spostamento e forza-deformazione che verranno poi utilizzati per un confronto con i grafici della seconda prova.

### Grafici forza-spostamento

I grafici forza-spostamento sono stati realizzati facendo riferimento ai valori dello spostamento verticale misurati, dal trasduttore 5, in corrispondenza dell'estremo libero della trave. In figura 3.27 è riportato lo schema di carico del telaio e la posizione del trasduttore.

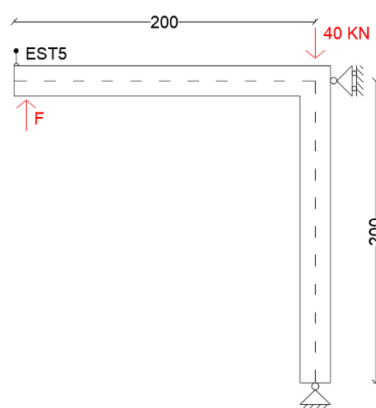


Figura 3.27 – Posizione TRASD5

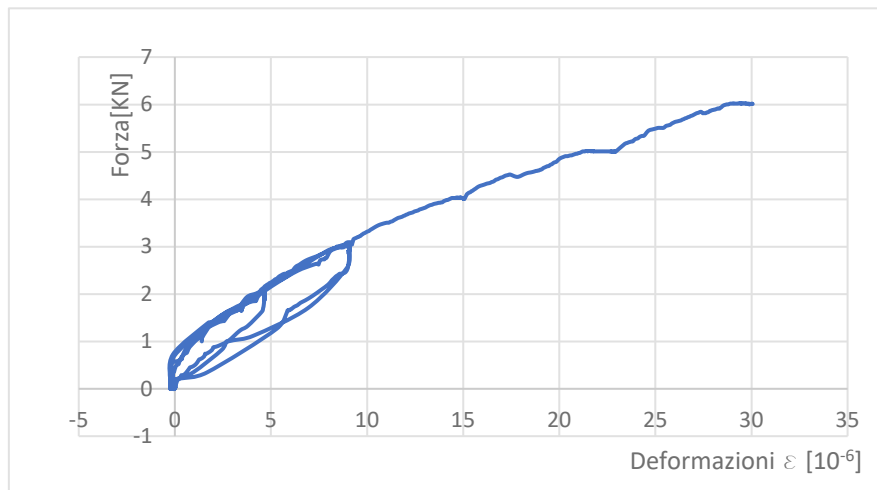


Figura 3.28 – Grafico dei cicli di carico-scarico (TRASD5)

Dall'analisi dei vari grafici si può notare come lo spostamento verticale sia aumentato man mano, con l'incremento della forza applicata, e come si vada completamente ad annullare ogni qual volta si va a scaricare il provino. Non si notano differenze di spostamento tra il ciclo 2A e il ciclo 2B, in entrambi si ha una freccia di circa 9 mm nonostante nella prima prova si sia raggiunto il carico di 3 KN in un tempo molto maggiore rispetto alla seconda. Nell'ultimo test si ha un grande incremento della traslazione verticale, si registra uno spostamento di 15 mm con un carico applicato di 4 KN fino ad arrivare a circa 3 cm di traslazione con una forza concentrata di 6 KN.

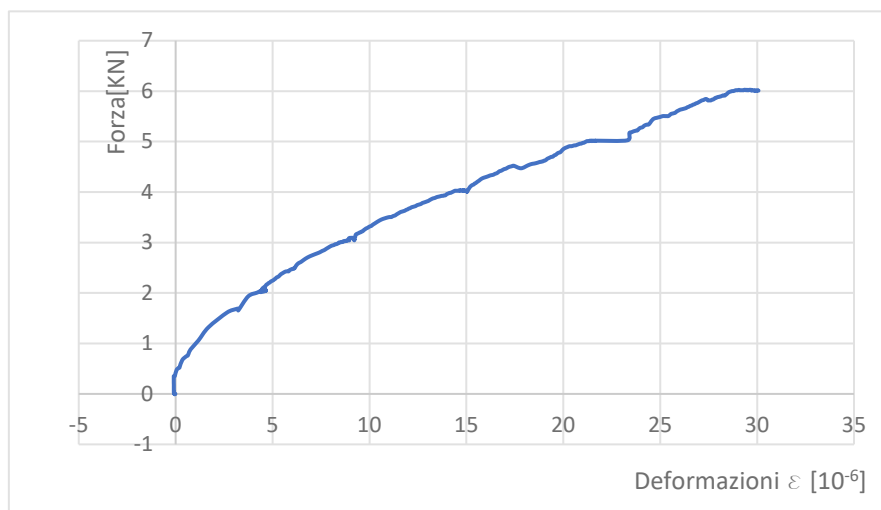


Figura 3.29 – Involuppo Forza-Spostamento (TRASD5)

### Grafici Forza – Deformazione

I grafici forza-deformazione sono stati tracciati facendo riferimento ai dati registrati dai sei diversi estensimetri posti in vari punti del provino. Come anticipato i sensori che rilevano le deformazioni sono: l'est1 e est2 per le deformazioni dell'acciaio rispettivamente di trave e pilastro, l'est3 e est4 per le deformazioni del calcestruzzo compresso nella parte estradossale di pilastro e trave ed infine l'est7 e est8 per le deformazioni nella parte compressa del nodo. Si prendono ora in considerazione gli estensimetri posti sulle barre di armatura:

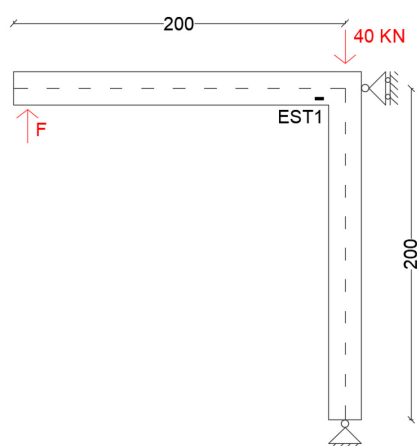


Figura 3.30 – Posizione EST1

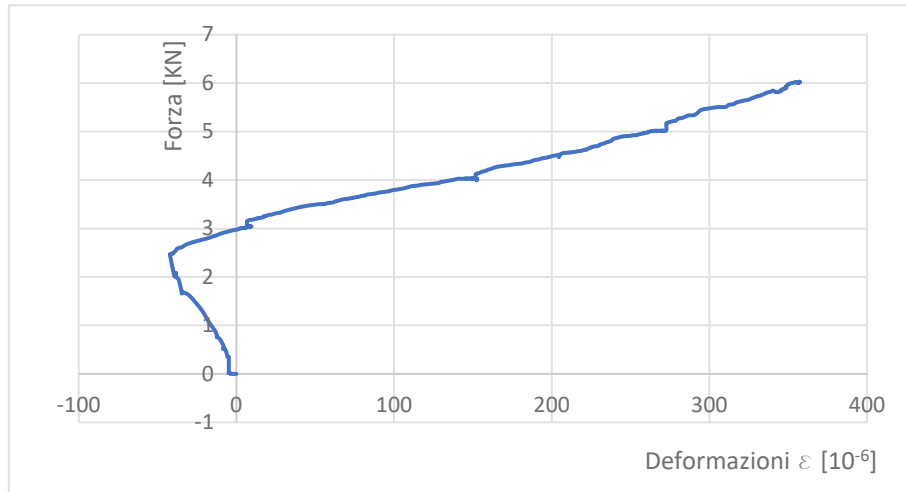


Figura 3.31 – Grafico dei cicli di carico-scarico (EST1)

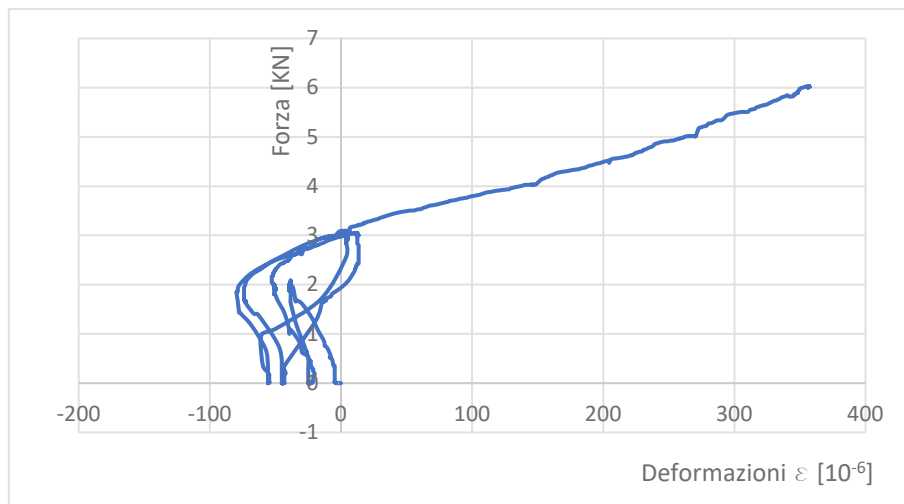


Figura 3.32 - Grafici involucro Forza-Deformazione (EST1)

Nei primi cicli di prova l'estensimetro 1 non è riuscito a lavorare bene, sono stati infatti registrati deformazioni negative nell'armatura longitudinale inferiore che invece dovrebbe esser sottoposta a tensioni di trazione. Solo nell'ultimo test si sono raggiunti elevati valori di deformazione a trazione con un massimo di circa  $350 \times 10^{-6} \mu\text{m/mm}$ .

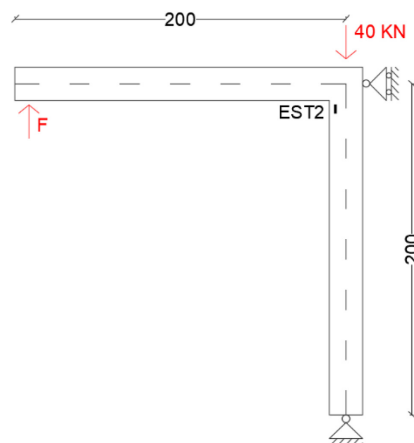


Figura 3.33 – Posizione EST2

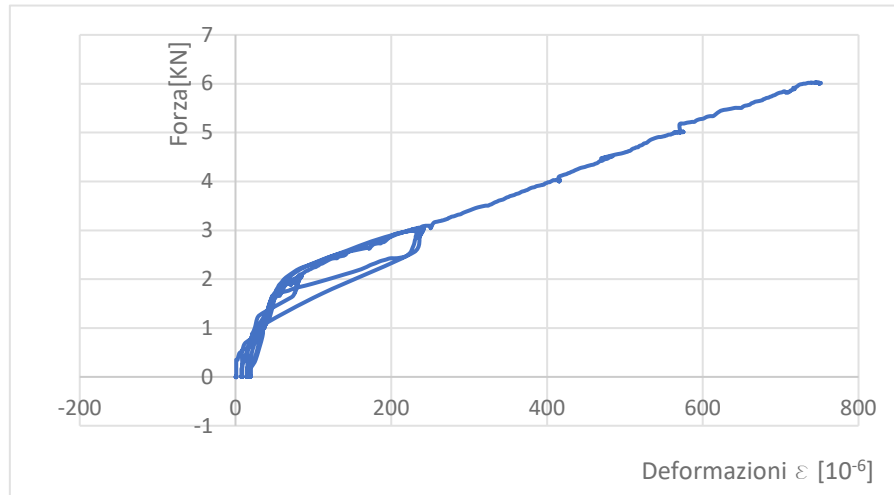


Figura 3.34 – Grafico dei cicli di carico-scarico (EST2)

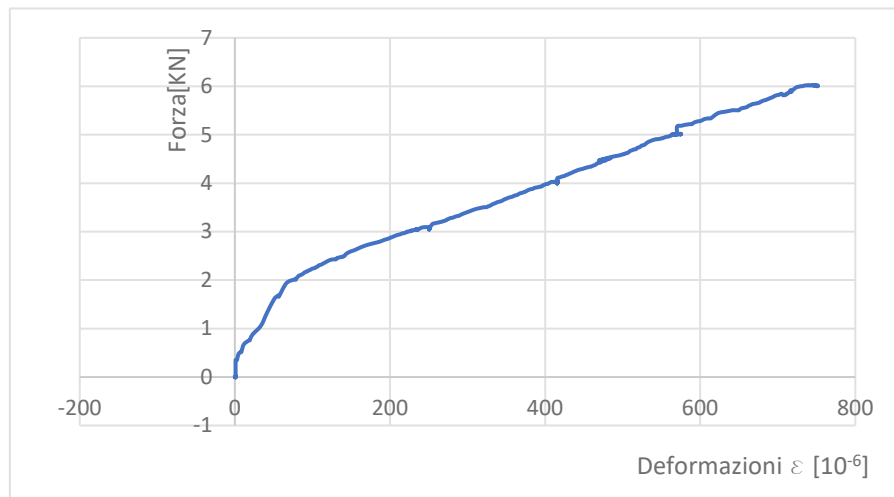


Figura 3.35 – Grafico involucro Forza-Deformazione (EST2)

A differenza dell'estensimetro 1, il sensore posto sull'armatura longitudinale del pilastro è riuscito in ogni ciclo a registrare valori ragionevoli di deformazione. Si verifica infatti una crescita delle deformazioni positive in seguito all'aumento delle tensioni di trazione.

Si prendono ora in considerazione gli estensimetri 3-4 posti sulle fibre di calcestruzzo compresse:

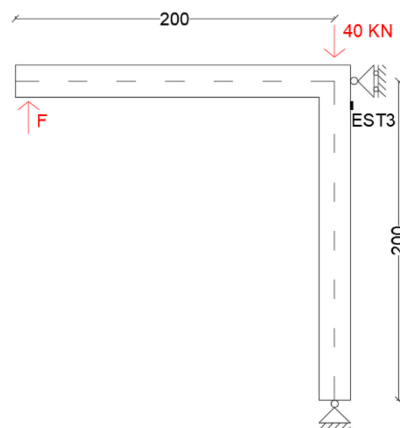


Figura 3.36 – Posizione EST3

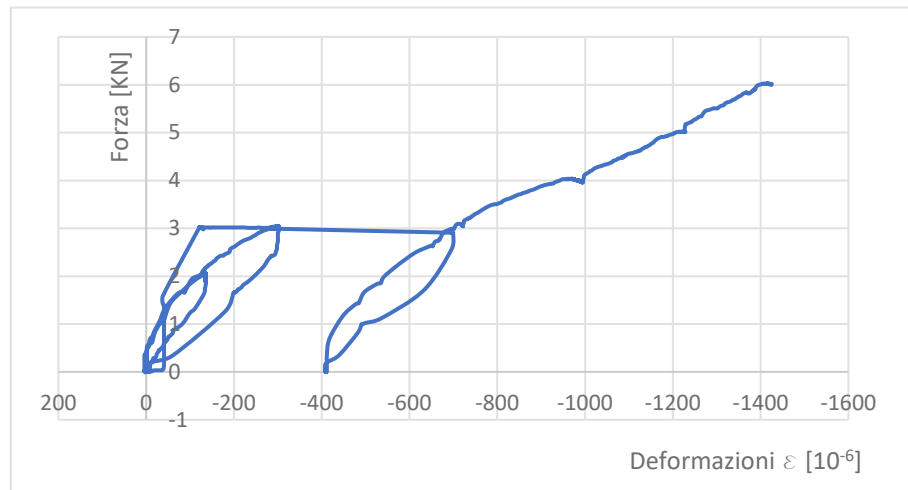


Figura 3.37 – Grafico dei cicli di carico-scarico (EST3)

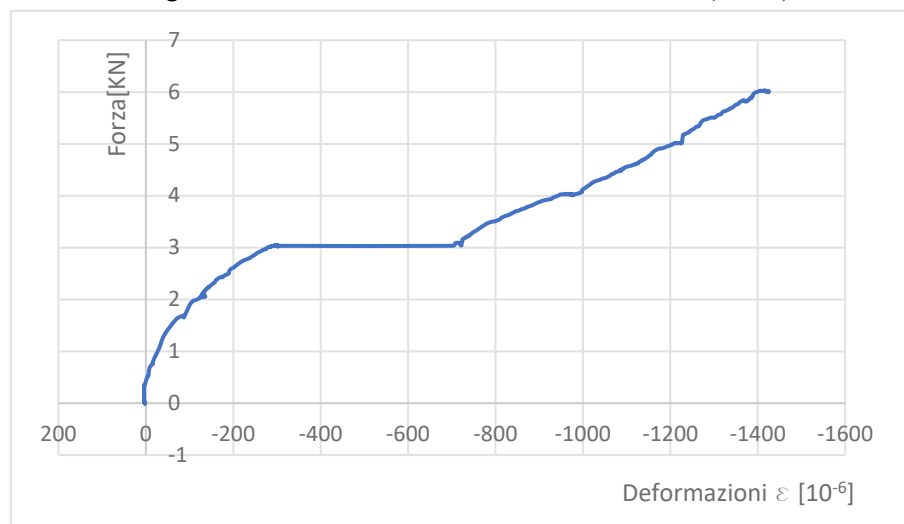


Figura 3.38 – Grafico involucro Forza-Deformazione (EST3)

Analizzando in particolar modo la figura 3.37 si osserva un forte incremento di deformazione nel ciclo 2B di carico-scarico ( $0 \rightarrow 3 \text{ kN} \rightarrow 0$ ) rispetto al ciclo 2A nel quale si raggiunge il carico massimo di 3 kN in un tempo minore. Infatti dal momento in cui si va a scaricare il provino la deformazione del provino non si va ad annullare come nei due cicli precedenti, rimane una deformazione residua di circa  $-400 \times 10^{-6} \mu\text{m/mm}$  per via delle fessurazioni che stanno nascendo.

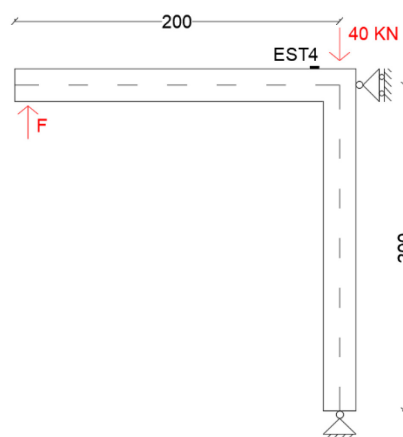


Figura 3.39 – Posizione EST4

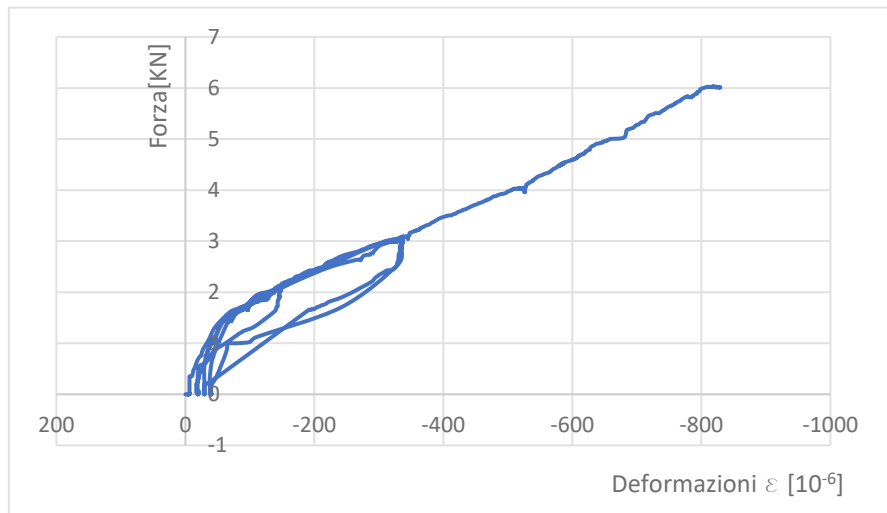


Figura 3.40 – Grafico dei cicli di carico-scarico (EST4)

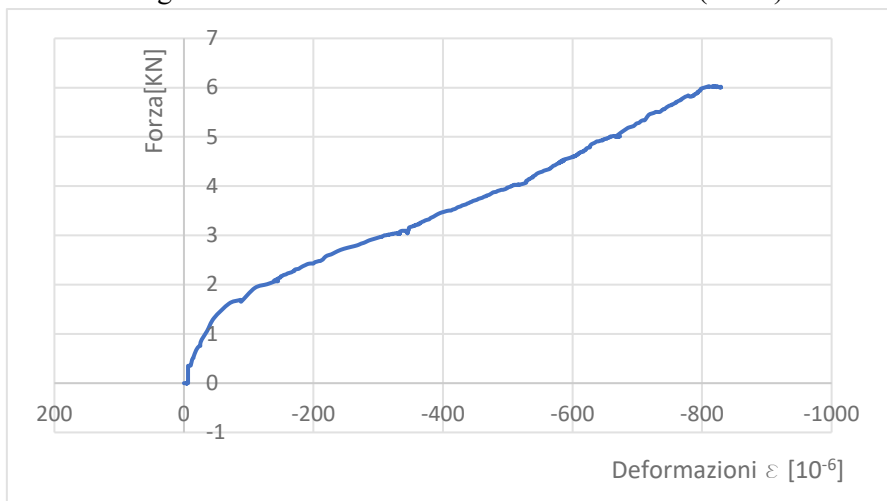


Figura 3.41 - Inviluppo Forza-Deformazione (EST4)

L'estensimetro 4 registra una crescita maggiormente lineare delle deformazioni nei vari cicli di prova, al contrario dell'estensimetro 3 dove si può individuare un tratto quasi costante nel quale nonostante si abbia una minima crescita della forza applicata si registra un forte aumento delle deformazioni. Inoltre la deformazione finale, registrata in corrispondenza delle fibre di calcestruzzo compresse della trave, è inferiore rispetto a quella misurata nel pilastro, ne risulta quindi che quest'ultimo sarà maggiormente sollecitato.

In ultimo vengono presi in considerazione gli estensimetri 7 e 8 posti sul nodo:

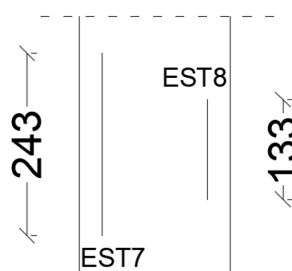


Figura 3.42 – Posizione e dimensioni degli EST7 e EST8

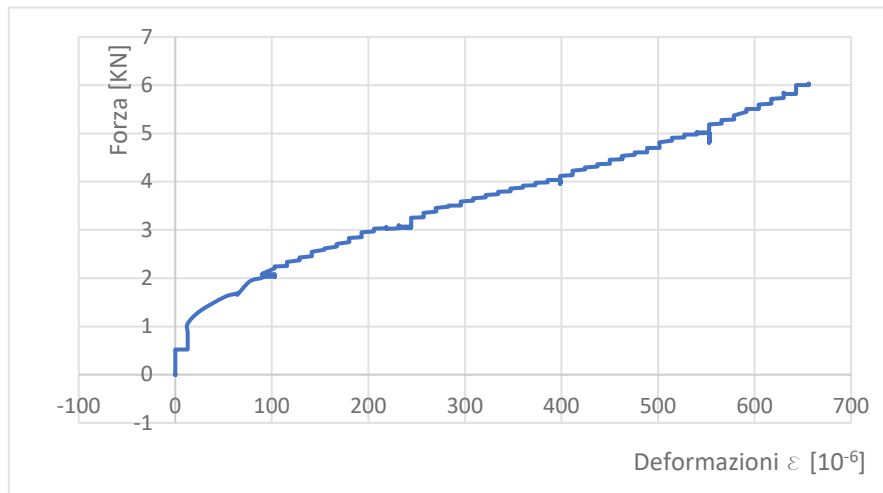


Figura 3.43 – Inviluppo Forza-Deformazione (EST7)

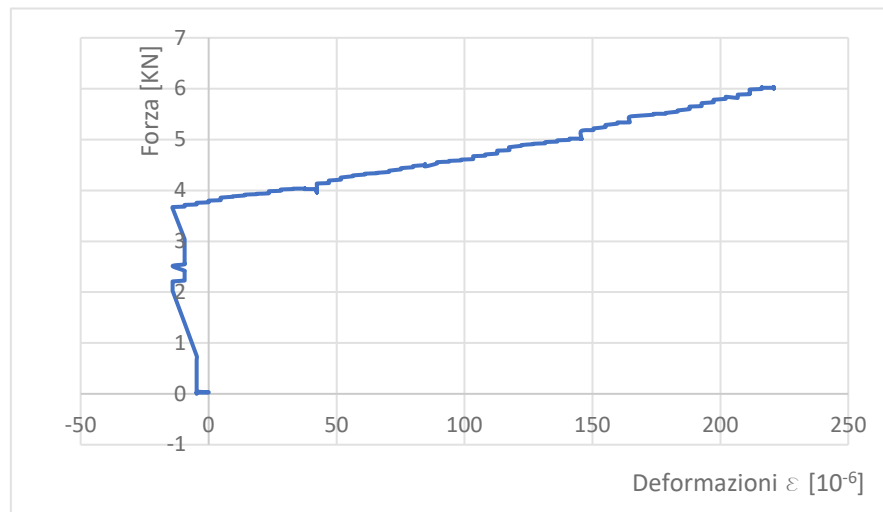


Figura 3.44 – Inviluppo Forza-Deformazione (EST8)

Gli estensimetri 7 e 8 sono due dispositivi meccanici, che a differenza di tutti gli altri sensori utilizzati, non misurano le deformazioni delle fibre di calcestruzzo sulle quali sono applicati ma il loro accorciamento. Questi sottoposti a delle tensioni di compressione diminuiscono quindi la loro lunghezza e riportano come dato proprio questa variazione. Per poter determinare la deformazioni si va quindi a dividere il valore della contrazione per la lunghezza di ciascun estensimetro.

### Grafici momento-curvatura

I grafici momento-curvatura sono stati tracciati facendo riferimento a due sezioni, una in corrispondenza dei sensori (est1 e est4) della trave e l'altra in corrispondenza degli estensimetri 3 e 2 del pilastro. Prima di illustrare i due grafici momento-curvatura, si espone in seguito un approfondimento sul concetto di curvatura nelle sezioni in calcestruzzo armato.

Si definisce curvatura la rotazione relativa tra due sezioni di un concio di trave poste a distanza unitaria. La curvatura è una deformazione tipica di una generica trave sottoposta a momento flettente, per andare a valutarla si prende in considerazione un concio di trave semplicemente armata di lunghezza unitaria sottoposta alla sollecitazione di flessione (Figura 3.):

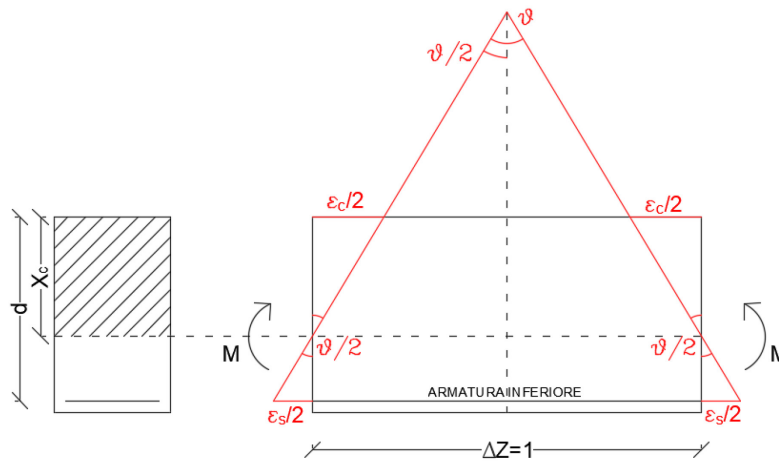


Figura 3.45 – Concio di trave sottoposto a momento flettente

Si può notare che si fa riferimento alla deformazione dell'armatura tesa in quanto si vuole dare una definizione di curvatura adatta per ogni tipologia di stadio in cui la sezione si può trovare (sezione interamente reagente o sezione parzializzata). Si va ora a ricavare una formula che permette di determinare il valore della curvatura a partire dalle deformazioni dell'armatura tesa e del calcestruzzo compresso.

$$\tan (v/2) = [\varepsilon_c/2]/x_c \quad \text{per l'ipotesi di piccoli spostamenti} \quad \tan (v/2) = v/2$$

$$v/2 = [\varepsilon_c/2]/x_c \rightarrow v = \varepsilon_c / x_c \rightarrow x_c = \varepsilon_c / v \quad (3.1)$$

Analogamente si può anche scrivere:

$$\tan (v/2) = [\varepsilon_s/2]/(d-x_c) \rightarrow v = \varepsilon_s / (d-x_c) \quad (3.2)$$

Sostituendo la 3.1 all'interno della 3.2:

$$v = \varepsilon_s / (d - \varepsilon_c / v) \rightarrow v = (\varepsilon_s + \varepsilon_c) / d$$

È stato tracciato il diagramma momento-curvatura facendo riferimento al valore del momento sul nodo che è pari al valore delle forza  $F$  applicata in corrispondenza dell'estremo libero della trave per la distanza tra il nodo e il punto di applicazione:

$$M = F \times 2 \text{ [KNm]}$$

Ad un aumento della forza applicata corrisponde quindi una aumento del momento flettente che agisce sul nodo.

Dopo aver ricavato il valore del momento e della curvatura dai dati registrati dagli estensimetri, sono stati tracciati i diagrammi momento-curvatura sia per la trave che per il pilastro.

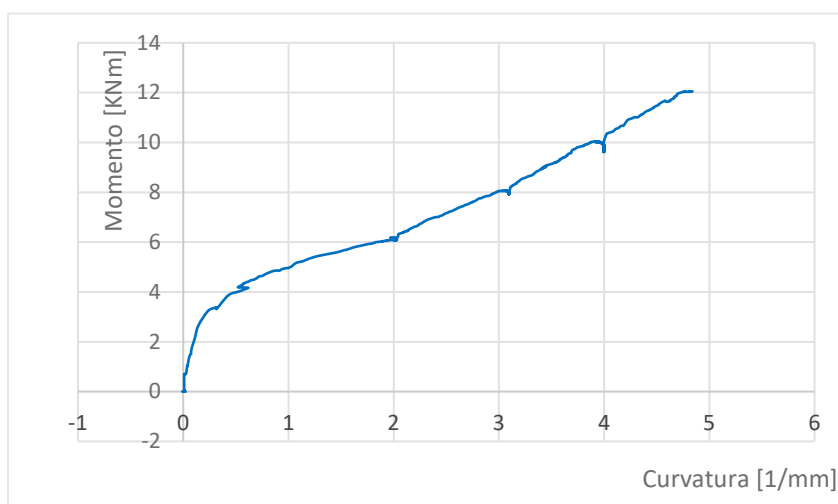


Figura 3.46 – Involuppo Momento-Curvatura della trave (EST1 e EST4)

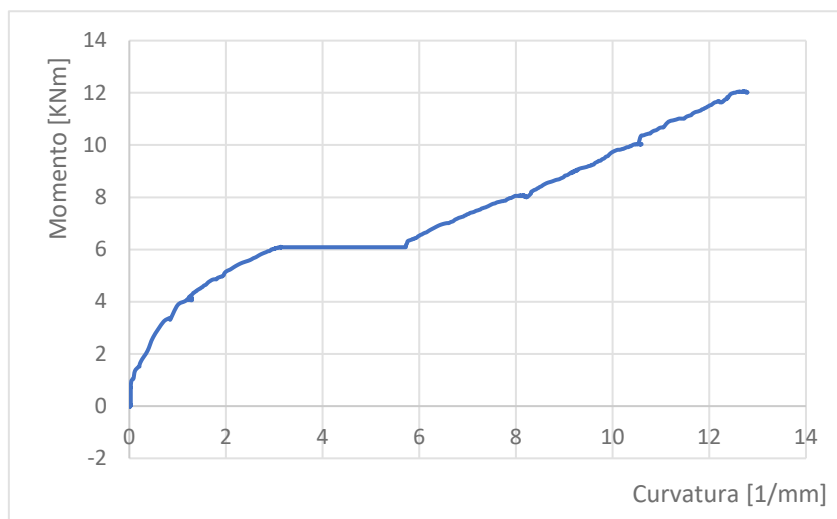


Figura 3.47 – Involuppo Momento-Curvatura del pilastro (EST2 e EST3)

Sia per la trave che per il pilastro si registra all'incirca lo stesso valore massimo di curvatura corrispondente ad un momento pari a 12 KNm. Analogamente alla figura 3.38 anche nella 3.47 è presente un tratto quasi costante per via del forte aumento di deformazioni nel calcestruzzo compresso del pilastro durante il ciclo 2B di carico.

### 3.4.3 Descrizione del test sperimentale sul telaio in c.a. rinforzato

Al termine della prova, come già anticipato al paragrafo 3.3.2, è stato applicato il materiale composito di rinforzo a base di fibre di basalto. terminate le 24 ore necessarie per garantire la completa adesione dei tessuti alla superficie in calcestruzzo è stato eseguito il secondo test sperimentale. Rispetto alla prova precedente non è stato variato il sistema di carico; una forza costante di 40 KN è applicata sul nodo e un carico concentrato variabile nell'estremo libero della trave. Anche qui sono stati eseguiti 4 cicli differenti di carico, in particolar modo nell'ultimo si è andati ad incrementare il carico concentrato applicato fino a raggiungere rottura (Tabella 3.3).

Tabella 3.3 – Cicli di carico-scarico della seconda prova sperimentale

| <b>CICLI CARICO-SCARICO</b>                            |
|--------------------------------------------------------|
| CICLO 1: 0 → 2 KN → 0                                  |
| CICLO 2A: 0 → 3 KN → 0                                 |
| CICLO 2B: 0 → 3 KN → 0                                 |
| CICLO 3: 0 → 4 KN → 6 KN → 8 KN → 9 KN → 10 KN → 11 KN |

Si può fin da subito notare che il carico finale, in corrispondenza del quale si ha il raggiungimento della rottura, è molto maggiore rispetto a quello della prima prova realizzata sul provino non rinforzato. Si è raggiunto un carico finale massimo di quasi 11 KN, a confronto della prima prova nella quale la forza massima è di 6 KN. In questo caso i primi tre cicli di carico-scarico sono stati eseguiti velocemente, infatti sia per il CICLO 1 che per il CICLO 2A e 2B si è arrivati al carico massimo in circa 120 secondi. Durante il test, gli estensimetri e il trasduttore, posizionati negli stessi punti precedenti, hanno registrato numerosi valori di deformazione e spostamento che verranno utilizzati per tracciare grafici Forza-Spostamento, Forza-Deformazione e Momento-Curvatura. Al termine questi verranno confrontati con i diagrammi precedenti in modo da poter analizzare come si è evoluto il comportamento della struttura in calcestruzzo armato dopo esser stata rinforzata.

### 3.4.4 Analisi dei risultati del test sperimentale sul telaio in c.a. rinforzato

Nella seguente tabella 3.4 vengono riassunte tutte le deformazioni e gli spostamenti registrati dai sensori nel corso della prova.

Tabella 3.4 - Riassunto valori delle deformazioni e degli spostamenti della seconda prova sperimentale

| FORZA<br>[KN] | Est1<br>[10 <sup>-6</sup> ] | Est2<br>[10 <sup>-6</sup> ] | Est3<br>[10 <sup>-6</sup> ] | Est4<br>[10 <sup>-6</sup> ] | Trasd5<br>[mm] | Est7<br>[10 <sup>-6</sup> ] | Est8<br>[10 <sup>-6</sup> ] |
|---------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0.00          | 0.00                        | 1.92                        | 0.00                        | 0.00                        | 0.00           | 0.00                        | 0.00                        |
| 2.00          | -27.84                      | 5.76                        | -73.31                      | -33.67                      | 2.025          | -10.24                      | 21.39                       |
| 0.00          | -5.76                       | -1.92                       | -8.14                       | 21.04                       | 0.01           | 2.56                        | -6.41                       |
| 3.00          | -11.52                      | 65.28                       | -205.68                     | -197.81                     | 7.08           | -25.60                      | 47.06                       |
| 0.00          | -6.72                       | -0.96                       | 48.87                       | 27.35                       | 0.03           | 0                           | -10.69                      |
| 3.00          | -16.32                      | 74.88                       | -205.68                     | -202.02                     | 7.23           | -25.60                      | 47.06                       |
| 0.00          | -9.6                        | -0.96                       | 50.91                       | 31.56                       | 0.03           | 0                           | -10.69                      |
| 4.00          | 109.44                      | 245.76                      | -366.56                     | -444.02                     | 14.31          | -40.94                      | 70.60                       |
| 6.00          | 333.12                      | 600.96                      | -68.18                      | -757.57                     | 26.45          | -66.58                      | 113.39                      |
| 8.00          | 370.56                      | 1080                        | -849.21                     | -1117.42                    | 45.61          | -89.63                      | 1934.07                     |
| 9.00          | 679.68                      | 1308.48                     | -881.80                     | -1296.3                     | 62.79          | 692.89                      | 2355.54                     |
| 10.00         | 1233.6                      | 1344                        | -539.67                     | -1323.65                    | 74.66          | 2197.25                     | 2398.33                     |
| 11.00         | 1776.96                     | 1459.2                      | -443.95                     | -1315.24                    | 72.07          | 4837.53                     | 2646.51                     |

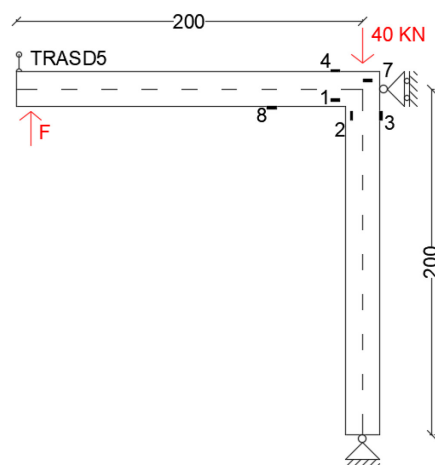


Figura 3.48 – Riepilogo posizione estensimetri e trasduttore seconda prova

Anche qui si può notare che l'estensimetro 1 nei primi cicli di prova, quindi con carichi minori, ha registrato deformazioni molto basse e negative. Solo una volta che si sono raggiunti carichi maggiori

si è verificato un aumento delle deformazioni in seguito alla crescita delle tensioni di trazione sull'armatura longitudinale inferiore della trave. In generale, facendo un veloce confronto con i dati della prova precedente, si verifica che a parità di carico applicato le deformazioni e gli spostamenti verticali sono diminuiti. Il confronto tra i risultati dei due test sperimentali verrà approfondito nel Cap.4 di questa tesi. Ora utilizzando i valori registrati dai sensori si vanno a tracciare i grafici in modo da poter andare a studiare il comportamento del provino rinforzato.

### Grafici forza-spostamento

Dai valori degli spostamenti registrati dal trasduttore 5 viene tracciato il grafico che permette di stabilire come cresce la traslazione verticale del traverso all'aumentare della forza  $F$  applicata.

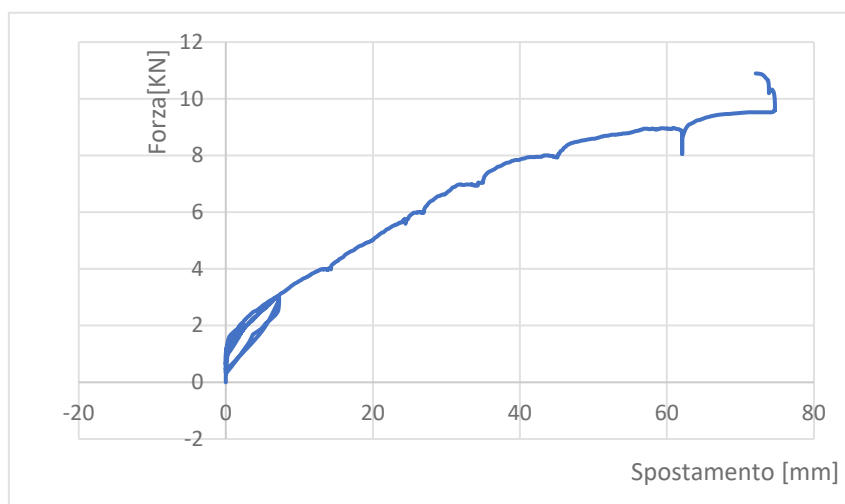


Figura 3.49 - Grafico dei cicli di carico-scarico (TRASD5)

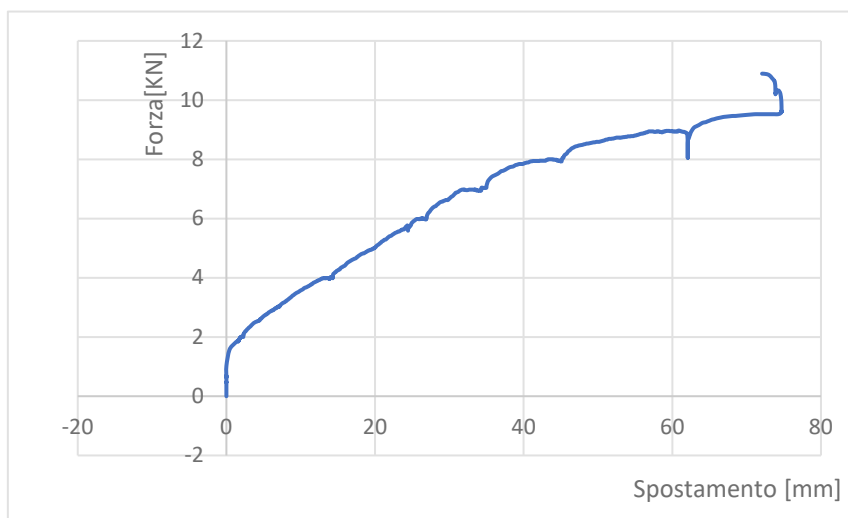


Figura 3.50 – Inviluppo Forza-Spostamento (TRASD5)

Si ha una grandissima differenza in termini di spostamento tra i primi tre cicli di carico rispetto all'ultimo nel quale si ha un incremento notevole della forza. Infatti mentre nel ciclo 2A o 2B si ha uno spostamento massimo di soli 8 mm, nel terzo si registra una forte crescita della traslazione

verticale fino ad arrivare ad un massimo di 7.2 cm in corrispondenza del carico di circa 11 kN. Durante la sperimentazione una volta raggiunti i 9 kN di forza applicata, il provino è stato scaricato fino ad 8 kN. Come si può anche notare dal grafico, durante questa fase di scarico lo spostamento è rimasto invariato e il provino non ha recuperato freccia. In figura 3.51 è schematizzato lo spostamento massimo al quale è sottoposto il traverso del provino.

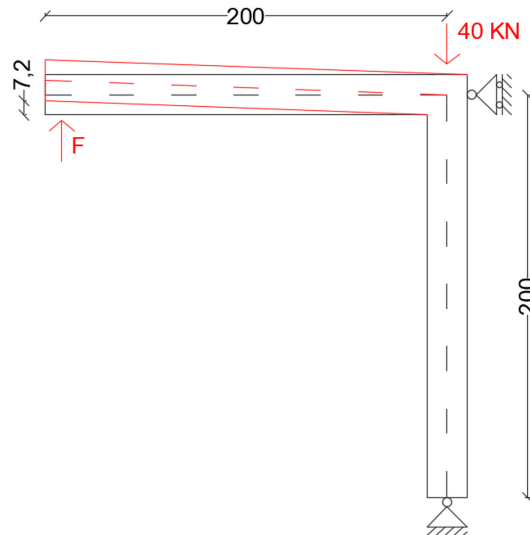


Figura 3.51 – Spostamento massimo durante il secondo test sperimentale

### Grafici Forza-Deformazione

Come nella prova precedente, i grafici forza-deformazione sono stati tracciati facendo riferimento alle misurazioni degli estensimetri. Si prendono ora in considerazione gli estensimetri posti in corrispondenza dell'armatura sia della trave che del pilastro.

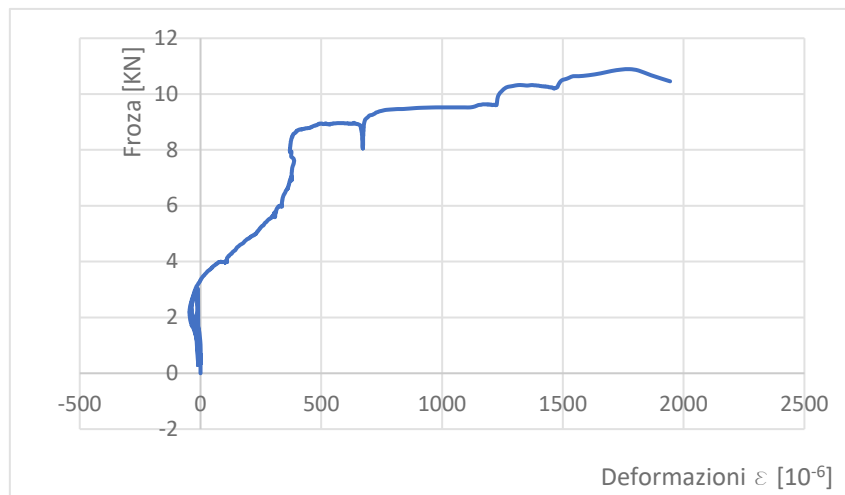


Figura 3.52 - Grafico dei cicli di carico-scarico (EST1)

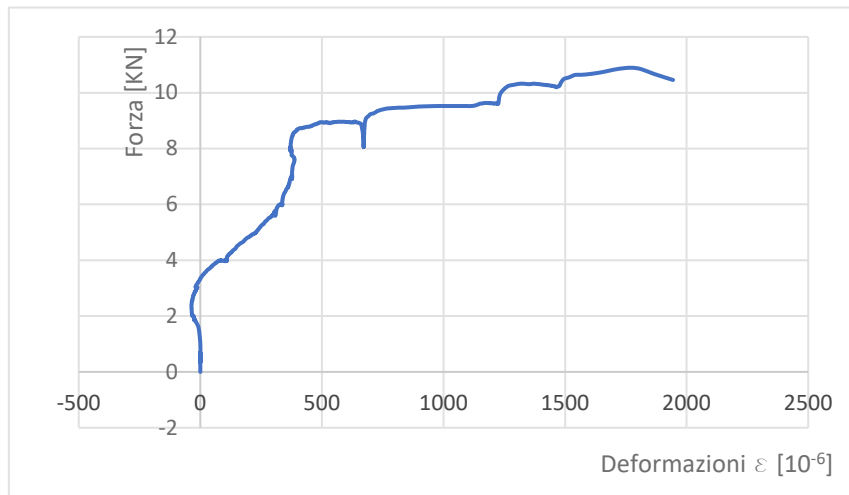


Figura 3.53 – Inviluppo Forza-Deformazione (EST1)

Anche in questo caso si nota una grande differenza in termini di deformazione tra i primi tre cicli di carico-scarico e l'ultimo set di carico. Infatti nella prima parte della prova l'estensimetro registra esclusivamente valori molto bassi e negativi di deformazione, solo una volta che si raggiungono carichi maggiori di 3 kN l'armatura inizia a deformarsi maggiormente fino a raggiungere un valore massimo di circa  $1770 \mu\text{m/mm}$ . Nelle fasi di scarico del CICLO 1 e del CICLO 2A e 2B si ha un completo annullamento delle deformazioni, a differenza dello scarico tra i 9 kN e gli 8 kN dove non si registra una variazione delle deformazioni.

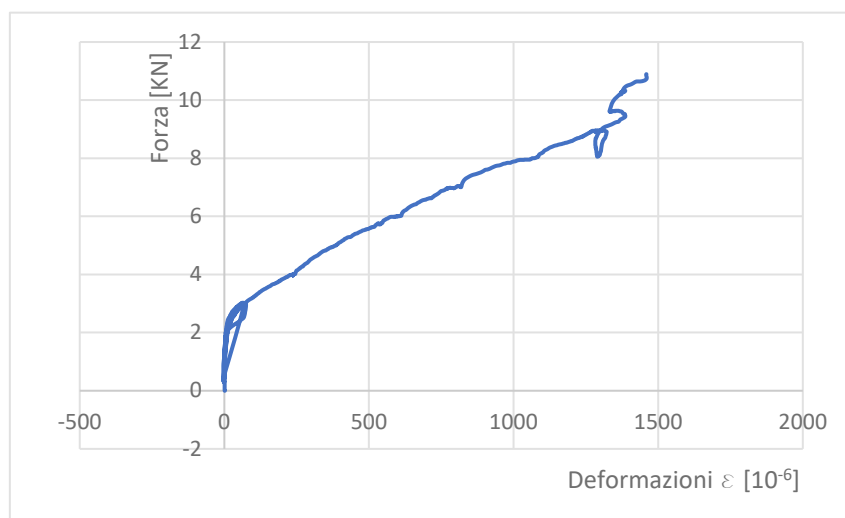


Figura 3.54 - Grafico dei cicli di carico-scarico (EST2)

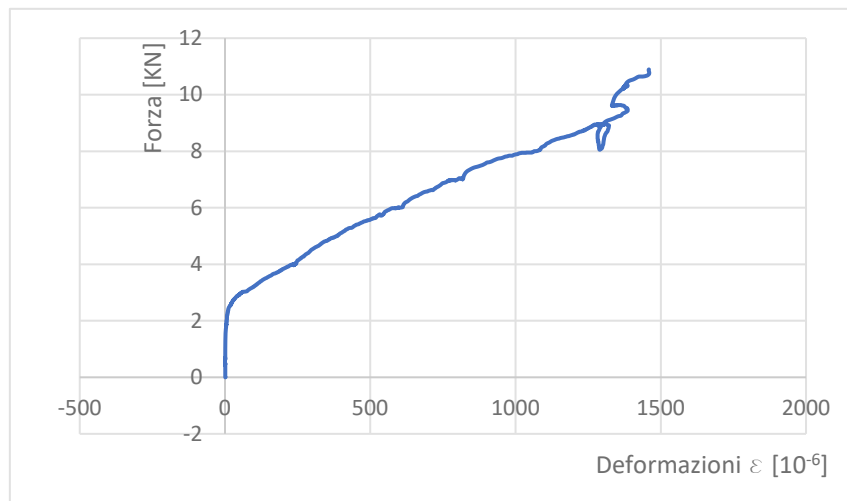


Figura 3.55 – Involuppo Forza-Deformazione (EST2)

L'armatura longitudinale del pilastro in prossimità del nodo ha riportato esclusivamente valori positivi di deformazione. Come per i ferri di armatura longitudinale della trave, anche qui, si hanno deformazioni molto basse che raggiungono un massimo di circa  $60 \mu\text{m}/\text{mm}$  con un carico di 3 kN. A rottura, invece, si registra una deformazione dell'acciaio pari a  $1460 \mu\text{m}/\text{mm}$ .

Si tracciano ora i grafici relativi alle deformazioni del calcestruzzo, utilizzando i dati raccolti grazie all' EST3, EST4, EST7 e EST8.

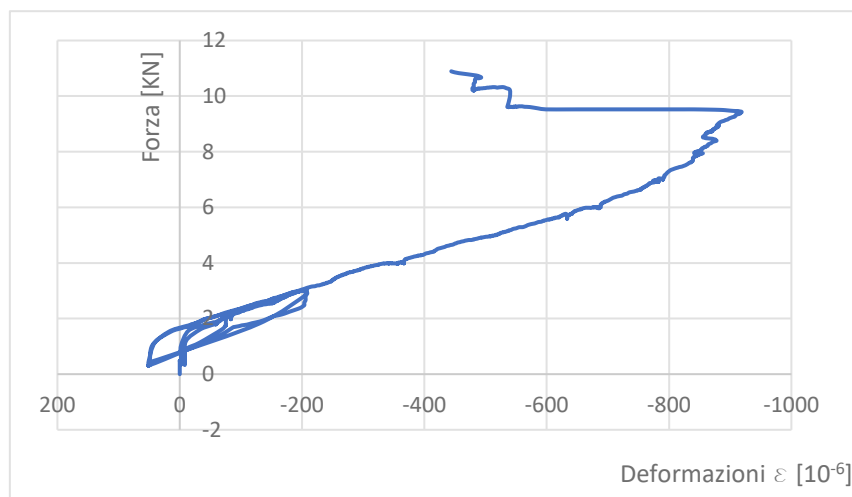


Figura 3.56 - Grafico dei cicli di carico-scarico (EST3)

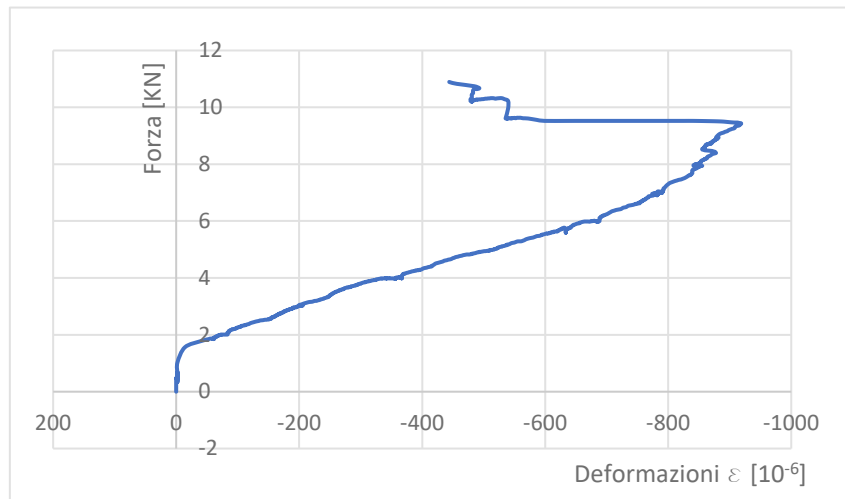


Figura 3.57 – Involuppo Forza-Deformazione (EST3)

Nelle fibre di calcestruzzo estradossali del pilastro si raggiunge la deformazione massima, pari a circa  $900 \mu\text{m}/\text{mm}$ , per un carico inferiore agli 11 kN in corrispondenza del quale si ha una deformazione di circa  $-445 \mu\text{m}/\text{mm}$ .

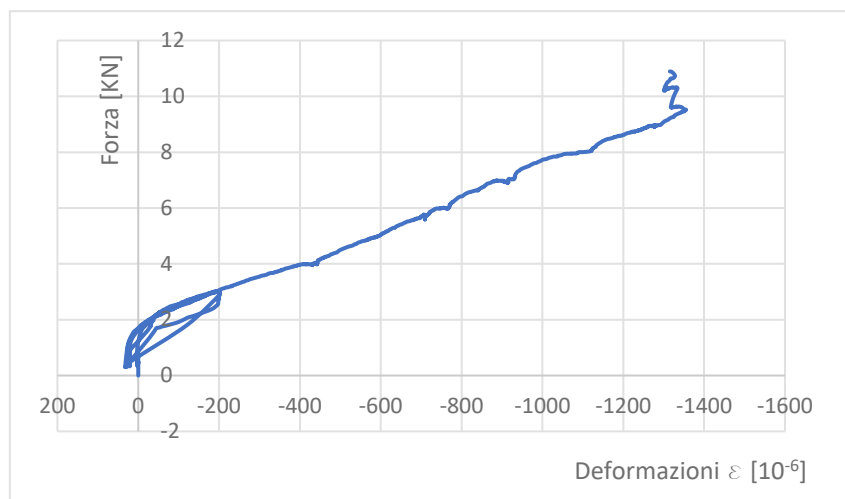


Figura 3.58 – Grafico dei cicli di carico-scarico (EST4)

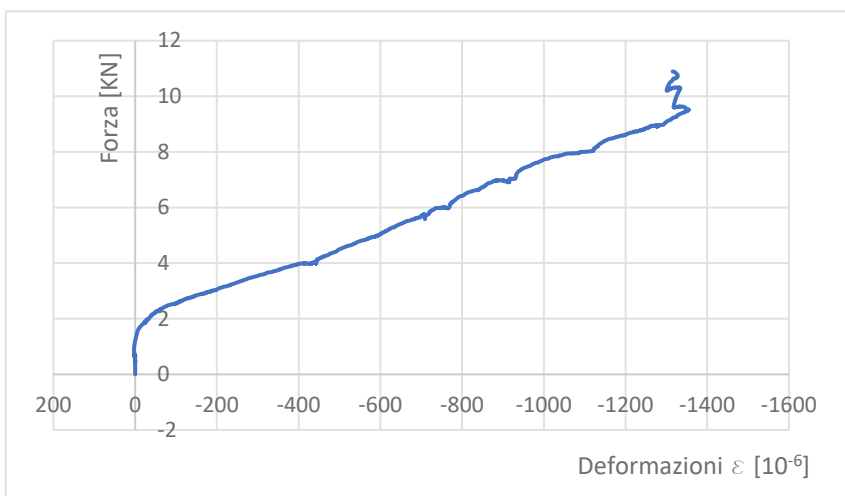


Figura 3.59 – Involuppo Forza-Deformazione (EST4)

Sono invece sicuramente maggiori le deformazioni del calcestruzzo compresso nella parte estradossale della trave. Infatti in questo caso si arriva ad una deformazione massima di circa  $-1300 \mu\text{m}/\text{mm}$ .

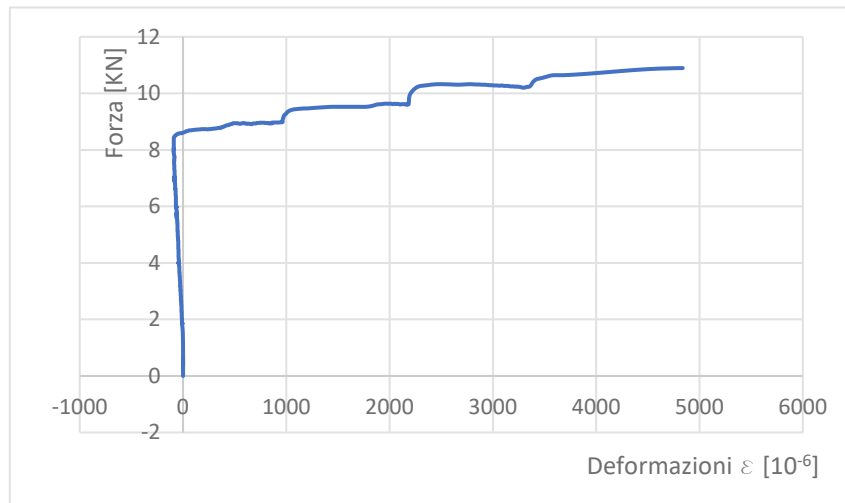


Figura 3.60– Involuppo Forza-Deformazione (EST7)

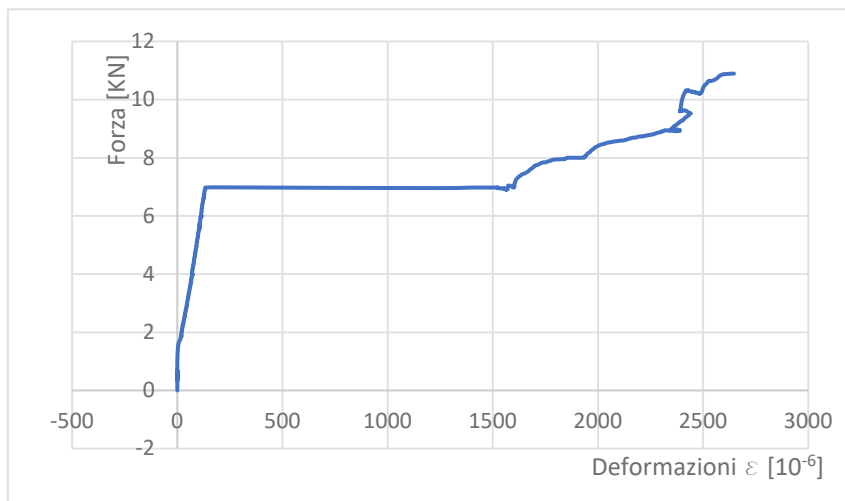


Figura 3.61 – Involuppo Forza-Deformazione (EST8)

### Grafici Momento-Curvatura

Come nel caso precedente sono stati tracciati i diagrammi momento-curvatura facendo riferimento a due sezioni in corrispondenza dei sensori della trave e del pilastro. È stata determinata la curvatura utilizzando le deformazioni registrate dagli estensimetri, in particolare:

$$(est1 + est4) / d \quad (3.3)$$

$$(est2 + est3) / d \quad (3.4)$$

È stata utilizzata la (3.3) per il calcolo della curvatura della trave e la (3.4) per il pilastro. Di seguito vengono raffigurati i due grafici Momento-Curvatura:

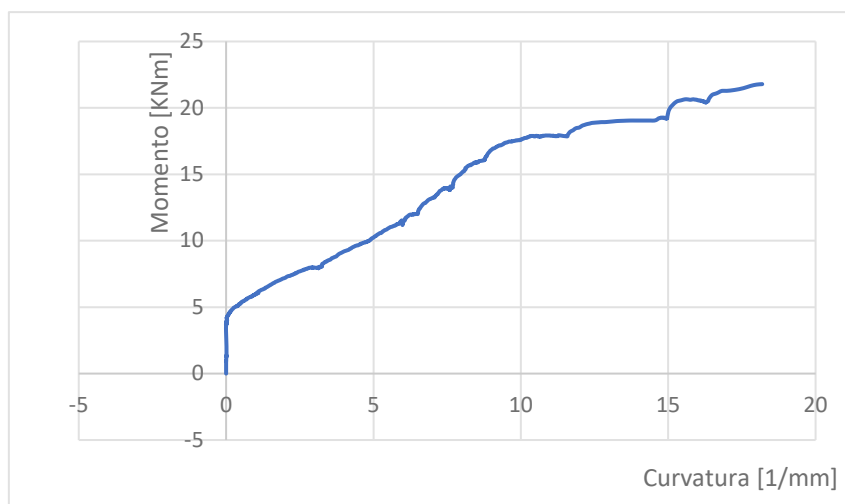


Figura 3.62 – Involuppo Momento-Curvatura trave (EST1 e EST4)

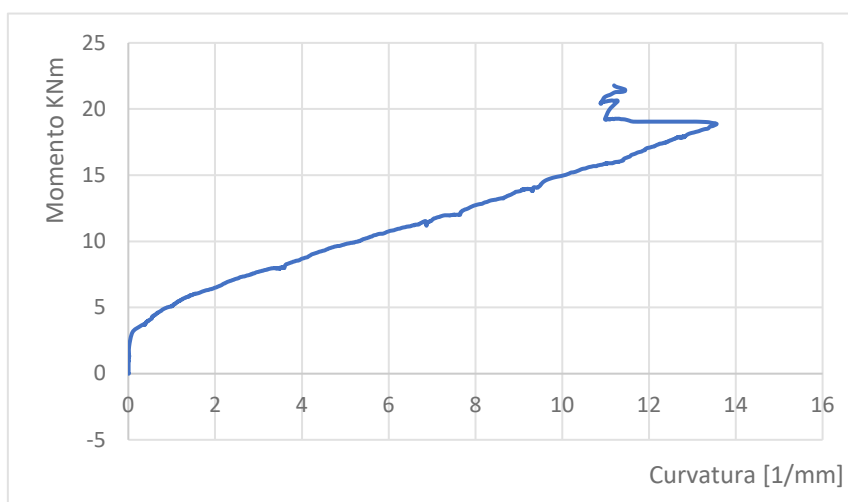


Figura 3.63 – Involuppo Momento-Curvatura pilastro (EST2 e EST3)

Mettendo a confronto i due diagrammi si registra, a parità di momento sollecitante, una minore curvatura del pilastro rispetto alla trave. Quando il nodo è sollecitato con un momento flettente massimo, pari a circa 22 kNm, la curvatura del pilastro risulta essere di 11.44 1/mm a differenza della trave dov'è pari a 18.18 1/mm. Si può vedere dal grafico 3.28 che la curvatura non presenta una

crescita lineare con il momento, infatti una volta arrivati ai 19 KNm di momento sollecitante si registra una diminuzione della curvatura il cui valore massimo a pari a 13.33 1/mm.

## Capitolo 4 – Conclusioni e discussione dei risultati

### 4.1 Confronto prove sperimentali

In questo capitolo finale della tesi si andranno a confrontare i diversi diagrammi tracciati e mostrati precedentemente nel Cap.3, con lo scopo di andare a studiare l'evoluzione del comportamento del provino dopo esser stato rinforzato. L'obiettivo è quello di andare ad analizzare lo stato fessurativo di una struttura sottoposta a carichi sismici e verificare come l'applicazione di materiali compositi innovativi, nelle zone maggiormente fessurate, possa renderla maggiormente resistente e duttile. In particolar modo si vuole mettere in evidenza, a parità di carico concentrato applicato, com'è variato lo stato deformativo e fessurativo del telaio. Le due prove sono state realizzate con lo stesso sistema di carico, andando quindi a variare solo l'intensità della forza concentrata in corrispondenza dell'estremo libero della trave. Da un veloce confronto delle forze applicate nelle due prove si può notare fin da subito che nella prova con il provino rinforzato si registra un aumento della forza necessaria per portare a rottura il telaio in calcestruzzo armato.

#### 4.1.1 Confronto tabelle Carico-Spostamento-Deformazione

Tabella 4.1 – Riassunto dei valori forza, deformazioni e spostamento della prima prova sperimentale

| <b>FORZA</b><br>[KN] | <b>Est1</b><br>[10 <sup>-6</sup> ] | <b>Est2</b><br>[10 <sup>-6</sup> ] | <b>Est3</b><br>[10 <sup>-6</sup> ] | <b>Est4</b><br>[10 <sup>-6</sup> ] | <b>Trasd5</b><br>[mm] | <b>Est7</b><br>[10 <sup>-6</sup> ] | <b>Est8</b><br>[10 <sup>-6</sup> ] |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 0.00                 | 0.00                               | 0.96                               | 2.027                              | 0                                  | -0.0125               | 0                                  | 0                                  |
| 2.00                 | -38.4                              | 83.52                              | -135.84                            | -147.30                            | 4.665                 | 100                                | 28.2                               |
| 3.00                 | 10.56                              | 234.24                             | -298.05                            | -330.38                            | 8.96                  | 220                                | -23.5                              |
| 3.00                 | 3.84                               | 237.12                             | -691.40                            | -334.59                            | 9.05                  | 230                                | -61.1                              |
| 4.00                 | 152.64                             | 414.72                             | -991.48                            | -526.09                            | 15.12                 | 400                                | 42.3                               |
| 5.00                 | 273.6                              | 571.2                              | -1232.77                           | -679.71                            | 23.21                 | 550                                | 146                                |
| 6.00                 | 357.12                             | 748.8                              | -1419.3                            | -822.81                            | 29.68                 | 660                                | 221                                |

Tabella 4.2 – Riassunto dei valori di forza, deformazioni e spostamento della seconda prova sperimentale

| <b>FORZA</b><br>[KN] | <b>Est1</b><br>[10 <sup>-6</sup> ] | <b>Est2</b><br>[10 <sup>-6</sup> ] | <b>Est3</b><br>[10 <sup>-6</sup> ] | <b>Est4</b><br>[10 <sup>-6</sup> ] | <b>Trasd5</b><br>[mm] | <b>Est7</b><br>[10 <sup>-6</sup> ] | <b>Est8</b><br>[10 <sup>-6</sup> ] |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 0.00                 | 0.00                               | 1.92                               | 0.00                               | 0.00                               | 0.00                  | 0.00                               | 0.00                               |
| 2.00                 | -27.84                             | 5.76                               | -73.31                             | -33.67                             | 2.02                  | -10.24                             | 21.39                              |
| 3.00                 | -11.52                             | 65.28                              | -205.68                            | -197.81                            | 7.08                  | -25,60                             | 47.06                              |
| 3.00                 | -16.32                             | 74.88                              | -205.68                            | -202.02                            | 7.23                  | -25.60                             | 47.06                              |
| 4.00                 | 109.44                             | 245.76                             | -366.56                            | -444.02                            | 14.31                 | -40.97                             | 70.60                              |
| 6.00                 | 333.12                             | 600.96                             | -68.18                             | -757.57                            | 26.45                 | -66.58                             | 113.39                             |
| 8.00                 | 370.56                             | 1080                               | -849.21                            | -1117.42                           | 45.61                 | -89.63                             | 1934.07                            |
| 9.00                 | 679.68                             | 1308.48                            | -881.80                            | -1296.3                            | 62.79                 | 692.89                             | 2355.54                            |
| 10.00                | 1233.6                             | 1344                               | -539.67                            | -1323.65                           | 74.669.21             | 2197.25                            | 2398.33                            |
| 11.00                | 1776.96                            | 1459.2                             | -443.95                            | -1315.24                           | 72.07                 | 4837.53                            | 2646.51                            |

Si può osservare che la sollecitazione massima nelle due prove è differente, infatti mentre nella prima è necessaria una forza di 6 KN per portare il provino a rottura nella seconda si è dovuti arrivare ad un carico di quasi 11 KN. Nonostante, quindi, i materiali compositi siano stati applicati su un provino già fessurato, questi sono comunque stati in grado di garantire una maggiore resistenza a carichi di tipo sismico. È interessante sottolineare che l'introduzione delle fibre non modifica in maniera sostanziale la resistenza a flessione del calcestruzzo, in quanto il comportamento del sistema fino alla fase di fessurazione è governato dalla matrice cementizia. Le fibre vanno invece a modificare in maniera considerevole il comportamento postfessurativo del sistema, in particolare la presenza di fibre aumenta la duttilità del materiale. Di conseguenza si ha un incremento anche della tenacità, ovvero dell'energia di frattura che indica il lavoro necessario per deformare il materiale fino al collasso. In funzione del quantitativo di fibre applicato si possono avere due diverse tipologie di comportamento: per un quantitativo basso di fibre il comportamento si definisce degradante, ovvero il materiale resiste a sollecitazioni di trazione a patto che queste siano inferiori a quella che ha provocato la prima fessurazione; diversamente, per un quantitativo alto di fibre il comportamento si definisce di tipo incrudente. Ovvero grazie alla presenza di fibre, in questo caso di basalto, che tendono a “cucire” le fessure si verifica un aumento della resistenza del materiale. La forza quindi necessaria per portare il provino al collasso è quindi maggiore rispetto a quella della prima prova. Prendendo in considerazione un particolare carico applicato in entrambe le prove, ad esempio 4 KN, si può notare una variazione delle deformazioni misurate dall'estensimetro 2, 3 e 4. Infatti nella

seconda prova, a parità di forza concentrata, si verifica una diminuzione delle deformazioni sia per la parte di calcestruzzo compresso che per le barre di armatura. Questo è la prova che l'applicazione delle fibre di basalto ha garantito alla struttura di aumentare la propria duttilità e di raggiungere grandi valori di deformazione per carichi maggiori rispetto a quelli raggiunti nella prima prova. Come conseguenza della diversa entità del carico finale tra le due prove si ha anche una differenza sostanziale nella traslazione verticale del traverso della struttura. Con il primo test sperimentale si raggiunge uno spostamento massimo di circa 3 cm mentre con il secondo si arriva a 7,5 cm di traslazione.

#### 4.1.2 Confronto grafico Forza-Spostamento

Dopo aver confrontato, tramite le tabelle (4.1 e 4.2), le deformazioni e gli spostamenti della struttura durante le due prove si vanno ora ad analizzare le differenze che intercorrono tra i vari grafici. Di seguito viene mostrato un grafico di confronto tra l'involuppo del diagramma Forza-Spostamento della prima e della seconda prova.

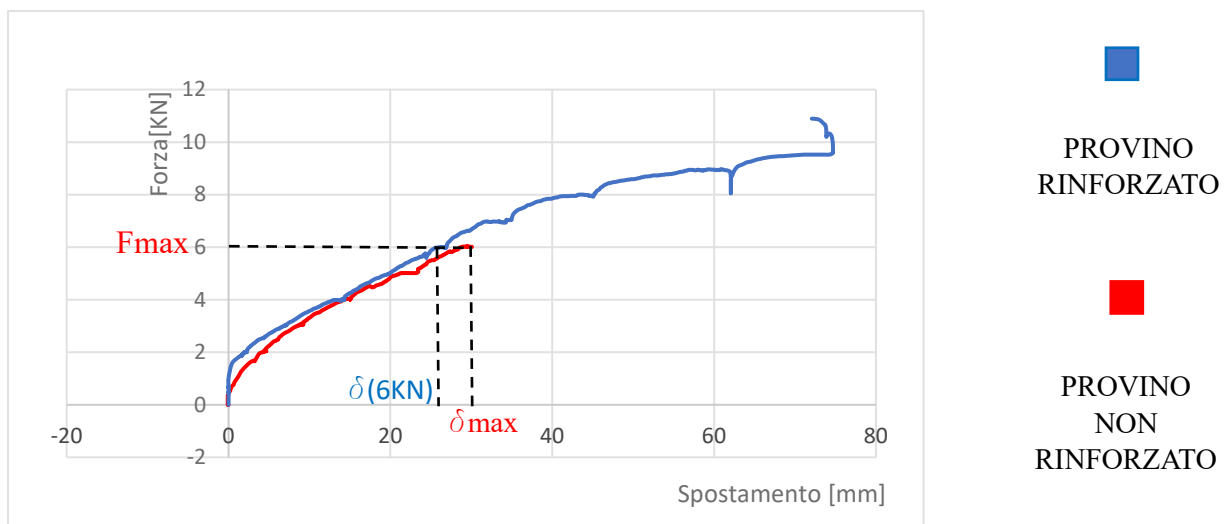


Figura 4.1 – Confronto involuppi dei grafici Forza-Spostamento

Tabella 4.3 – Confronto valori spostamento

| FORZA<br>[kN] | SPOST<br>[mm] | FORZA<br>[kN] | SPOST<br>[mm] |
|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 2             | 4.6656        | 2             | 2.025         |
| 3             | 8.969         | 3             | 7.234         |
| 4             | 15.125        | 4             | 14.313        |
| 6             | 29.681        | 6             | 26.45         |

Si può ben notare che in ogni istante, a parità di carico applicato, il grafico blu è sempre sopra a quello rosso; ciò sta ad indicare che la traslazione verticale del traverso, con carichi inferiori a 6 kN, durante la seconda prova è sempre stata inferiore rispetto a quella della prima (Tabella 4.3).

Dal momento in cui si raggiungono carichi maggiori aumenta lo spostamento verticale del provino rinforzato, che cresce fino ad arrivare ad un massimo di 7.5 cm in corrispondenza di un carico pari a 9.6 kN.

#### 4.1.3 Confronto grafici Forza-Deformazione

Si vanno ora a confrontare gli inviluppi dei diagrammi di Forza-Deformazione sia per le barre di armatura che per il calcestruzzo.

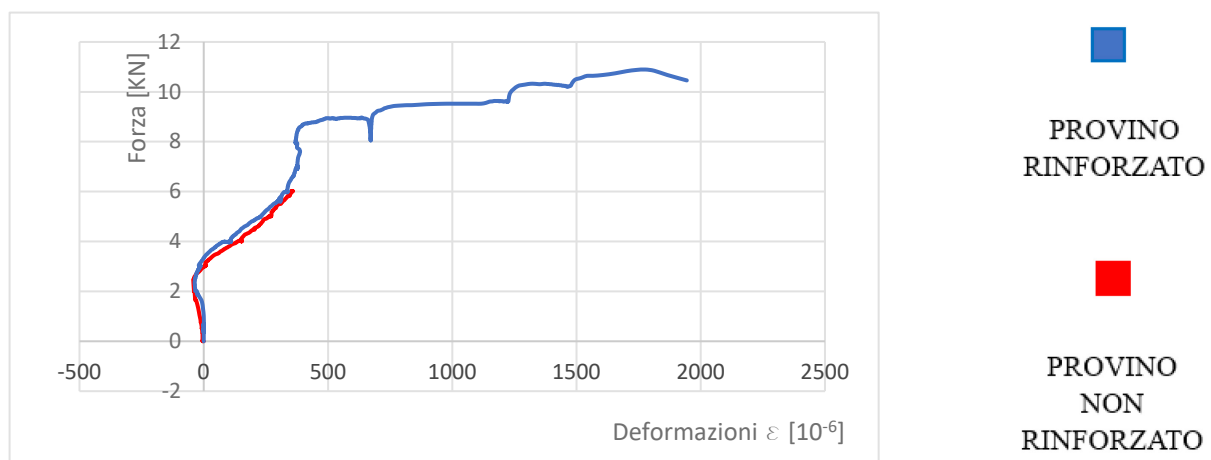


Figura 4.2 – Confronto inviluppo Forza-Deformazione (armatura tesa lato trave)

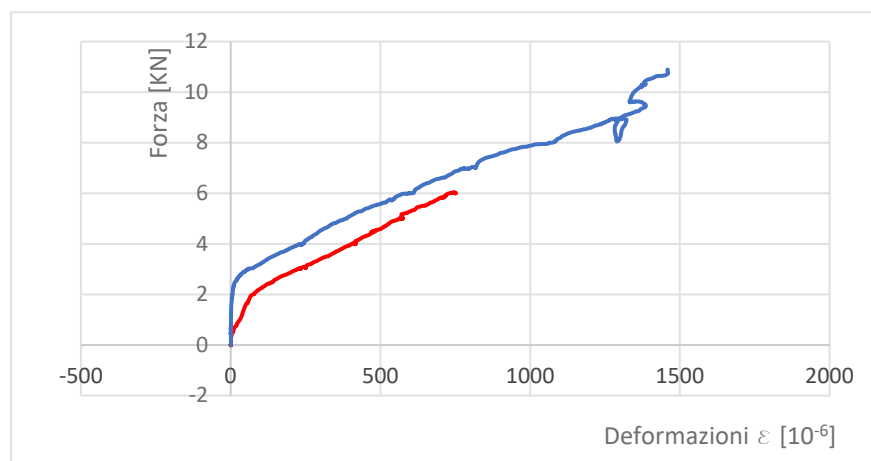


Figura 4.3 – Confronto inviluppo Forza-Deformazione (armatura tesa lato pilastro)

Osservando i grafici 4.2 e 4.3 si può notare che applicando un carico inferiore ai 6 kN le deformazioni nel caso di provino rinforzato sono sempre inferiori rispetto a quelle del telaio non rinforzato. Questo grazie all'applicazione del materiale composito a base di fibre di basalto che rende la struttura maggiormente duttile e fa sì che a parità di carico applicato si generino deformazioni inferiori.

Arrivati ai 6 kN, ovvero il carico di rottura per il provino non rinforzato, l'estensimetro 2 misura una deformazione di  $748.8 \mu\text{m/mm}$  per il telaio della prima prova a confronto dei  $600.96 \mu\text{m/mm}$  del provino rinforzato. Nel secondo test sperimentale si registra una grande aumento delle deformazioni con il crescere della forza applicata, fino ad arrivare ad un massimo di  $1776.96 \mu\text{m/mm}$  per l'armatura della trave e  $1459.2 \mu\text{m/mm}$  per i ferri longitudinale del pilastro.

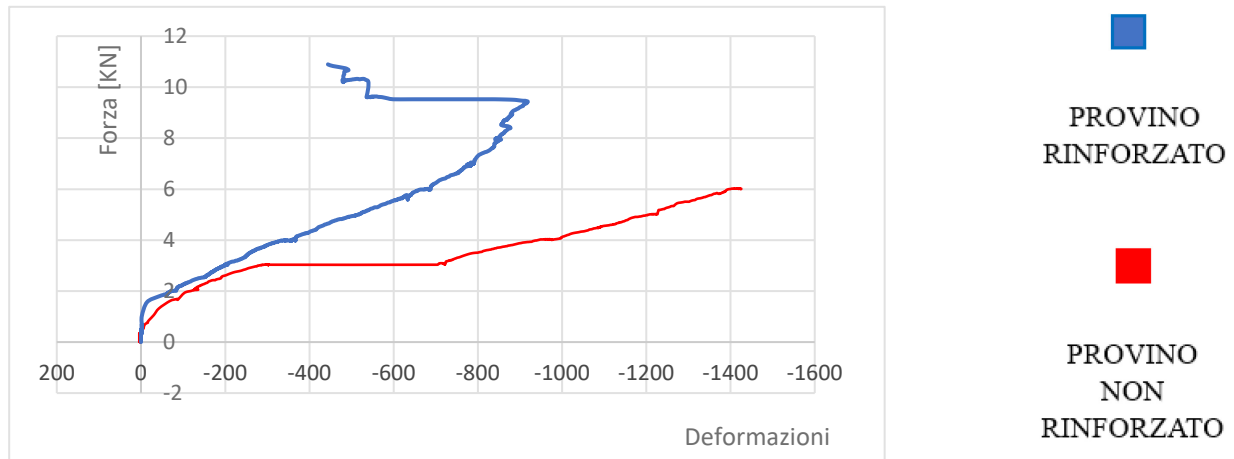


Figura 4.4 – Confronto involucro Forza-Deformazione (calcestruzzo compresso pilastro)

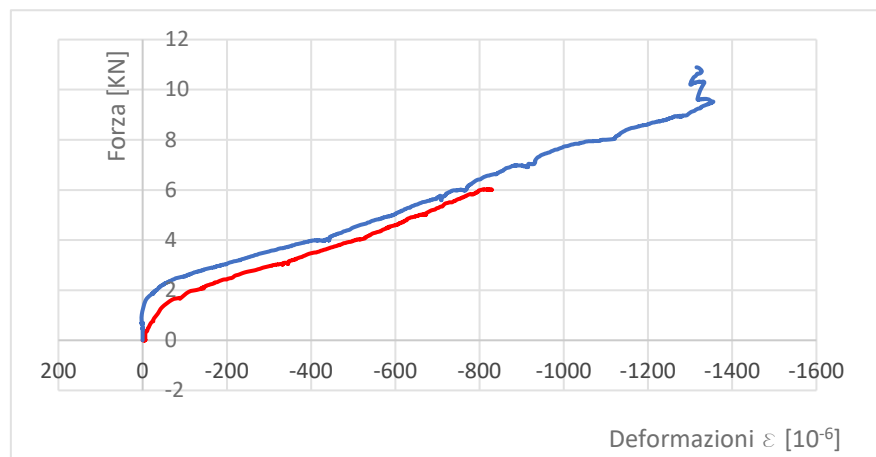


Figura 4.5 – Confronto involucro Forza-Deformazione (calcestruzzo compresso trave)

Si studiano ora invece i diagrammi relativi alle deformazioni del calcestruzzo compresso, in particolare si prende in considerazione il grafico 4.4 dove si verifica un andamento particolare del legame Forza-Deformazione nel caso del provino rinforzato. Si può notare infatti che la deformazione finale nel caso di telaio non rinforzato è maggiore rispetto a quella finale del secondo test sperimentale.

Nonostante quindi nella seconda prova si raggiungano carichi elevati le fibre di calcestruzzo del pilastro risulteranno avere una deformazione inferiore. L'estensimetro 4 misura invece un comportamento maggiormente lineare delle fibre di calcestruzzo compresse delle trave dove le

deformazioni aumentano con la forza fino ad arrivare ad una deformazione massimo di circa  $-1323.65 \mu\text{m/mm}$ .

Da tutti questi involuppi dei grafici di Forza-Deformazione si può infine notare un aumento dell'energia di frattura tra le due diverse prove. Si definisce energia di frattura il lavoro necessario per portare a collasso il provino e corrisponde all'area della zona sottesa alla curva Forza-Deformazione. Nel caso di strutture fessurate e poi rinforzate è necessario, quindi, un maggiore sforzo per raggiungere la rottura del telaio.

Si vanno ora prendere in considerazione gli estensimetri 7 e 8 della seconda prova sperimentale, con l'obiettivo di andare a confrontare la deformazione massima che le fibre di basalto hanno raggiunto al termine della seconda prova con la  $\varepsilon_{\text{max}}$  dichiarata dalla scheda tecnica. Si riportano di seguito, per maggiore chiarezza, i diagrammi Forza-Deformazione relativi sia all'estensimetro 7 che all'estensimetro 8.

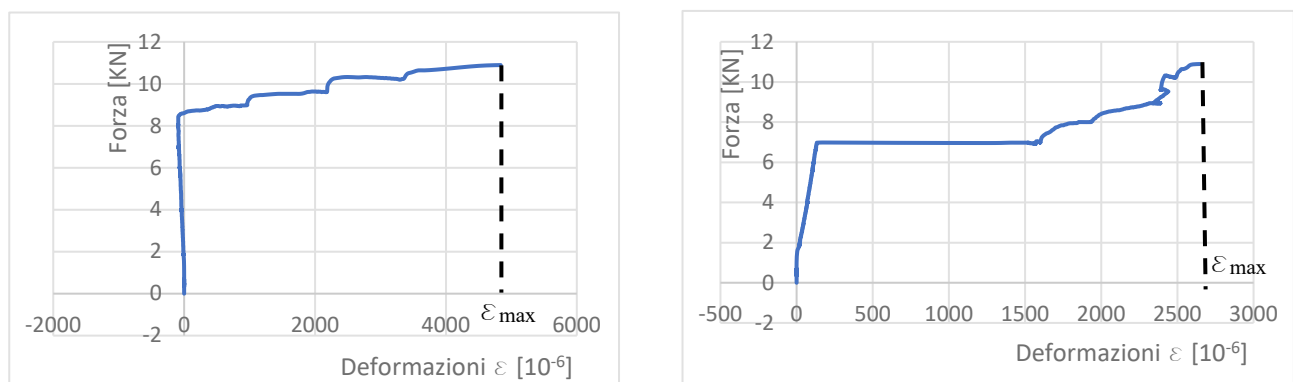


Figura 4.6 – (da sinistra) Forza-Deformazione delle fibre di basalto compresse, Forza-Deformazione delle fibre di basalto tese



| Proprietà geometriche e meccaniche*                         |                       |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------|
| Fibra secca (singolo filamento)                             |                       |
| Tensione caratteristica a trazione, $\sigma_{\text{fibra}}$ | 3080 MPa              |
| Modulo elastico, $E_{\text{fibra}}$                         | 95 GPa                |
| Deformazione a rottura, $\varepsilon_{\text{fibra}}$        | 3,15 %                |
| Densità                                                     | 2,8 g/cm <sup>3</sup> |
| Tessuto impregnato (valori per il calcolo)                  |                       |
| Titolo filato                                               | 1200 Tex              |
| n° fili/cm                                                  | 3,3 Fili/cm           |
| Massa                                                       | 396 g/m <sup>2</sup>  |
| Spessore equivalente del rinforzo FRP, $t_r$                | 0,140 mm              |
| Resistenza caratteristica del rinforzo FRP, $f_{rk}$        | 1900 MPa              |
| Modulo di elasticità normale del rinforzo FRP, $E_r$        | 90 GPa                |
| Deformazione a rottura del rinforzo FRP, $\varepsilon_r$    | 2,11 %                |
| Aggiornamento al 04 Agosto 2010                             |                       |

Figura 4.7 – Scheda tecnica delle fibre di basalto

Dal legame costitutivo  $\sigma$ - $\varepsilon$  delle fibre di basalto si determina il valore della deformazione massima a partire dalla resistenza caratteristica del rinforzo FRP e dal modulo di elasticità normale del rinforzo.

$$\varepsilon = \sigma/E \rightarrow \varepsilon = 1900 \text{ MPa} / 90 \text{ GPa} = 0.0211 = 21.11 \times 10^{-3}$$

La deformazione massima che si ha in corrispondenza della fibre di basalto compresse è pari a :

$$\varepsilon_{\max} (\text{EST7}) = 4837.53 \times 10^{-6} = 4.837 \times 10^{-3}$$

Mentre quella delle fibre di basalto tese:  $\varepsilon_{\max}(\text{EST8}) = 2646.51 \times 10^{-6} = 2.646 \times 10^{-3}$

Si può evidenziare in entrambi i casi che le deformazioni raggiunte dalle fibre di basalto durante la sperimentazione non raggiunge la deformazione a rottura.

### Confronto grafici Momento-Curvatura

Di seguito si vanno a confrontare i diagrammi Momento-Curvatura sia per la sezione in corrispondenza della trave che del pilastro.

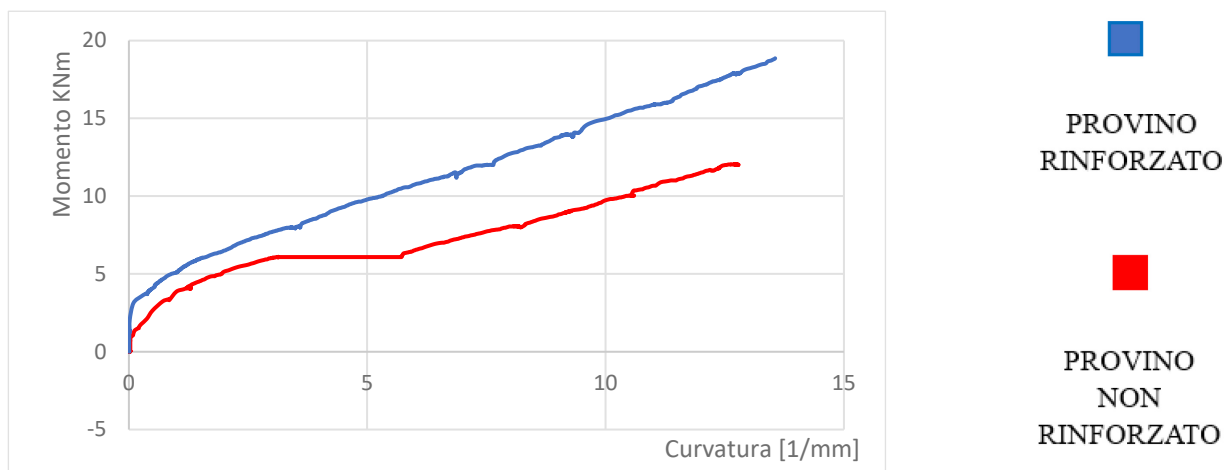


Figura 4.8 – Confronto involupi Momento-Curvatura del pilastro

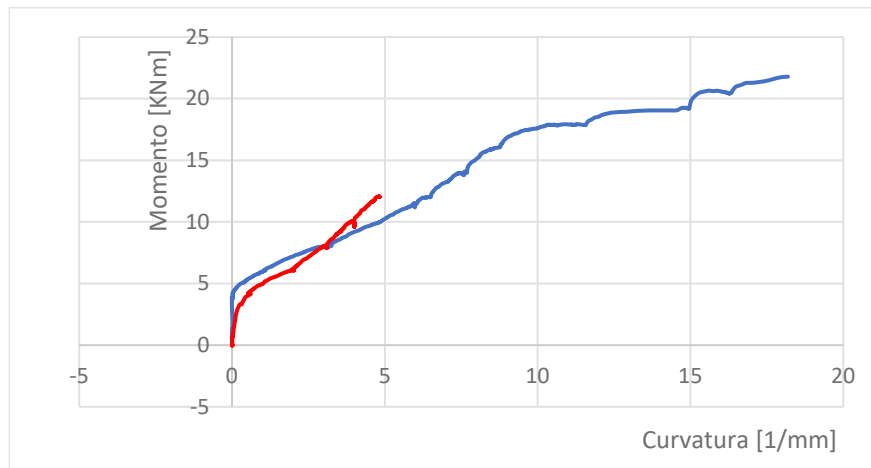


Figura 4.9 – Confronto involupi Momento-Curvatura della trave

Si verifica una diversa evoluzione della curvatura tra la trave e il pilastro. Infatti per il pilastro nonostante il momento sollecitante aumenti non si ha una grande variazione della curvatura, infatti nella prima prova si ha una curvatura massima di 12.78/mm mentre nella seconda di 13.55/mm. Al contrario, invece, per la trave è maggiore la differenza tra la curvatura finale del provino non rinforzato (4.84/mm) e quella del provino rinforzato (18.18/mm). Inoltre, quando si ha un momento flettente tra i 7 KNm e i 12 KNm si ha che la curvatura della sezione del telaio iniziale è maggiore di quella nel telaio rinforzato.

## 4.2 Valutazioni finali

Con questa sperimentazione, eseguita presso il laboratorio Prove Materiali e Strutture del dipartimento DICEA dell'Università Politecnica delle Marche, si è andati a studiare come l'applicazione di materiali compositi a base di fibre di basalto possa influire sul comportamento di strutture in calcestruzzo armato sottoposte a carichi ciclici. Al termine delle prove e dall'analisi dei risultati si è arrivati alla conclusione che l'applicazione di questa tipologia di tessuti ha permesso al telaio di acquisire una maggiore duttilità, resistenza e tenacità. Confrontando le due prove si registra una crescita della forza necessaria per portare a rottura il provino e di conseguenza anche delle deformazioni e degli spostamenti della struttura. Si denota, quindi, un ottimo comportamento dal punto di vista meccanico delle fibre di basalto che hanno permesso di migliorare il comportamento postfessurativo della struttura. Le proprietà meccaniche di questa tipologia di materiale di rinforzo, possono però subire delle modifiche al variare della propria composizione chimica; in seguito a questa grande variabilità intrinseca al basalto stesso, spesso è possibile incorrere in risultati differenti e contraddittori. Numerosi studi realizzati su tessuti in fibre di basalto hanno confermato le buone prestazioni in termini di resistenze e rigidezze dei provini, soprattutto dei sistemi con matrici organiche. Sono però necessari studi approfonditi che vadano a scandagliare tutte le possibili risposte dei compositi in fibre di basalto prima di andarli ad utilizzare per scopi strutturali.

Negli ultimi anni è stata molto approfondita la ricerca sull'applicabilità di tessuti in fibre di basalto come materiali per il rinforzo strutturale. In Cina e in alcuni Paesi dell'Ex Unione Sovietica, come l'Ucraina e la Georgia, è ormai da decenni che viene utilizzata la fibra di basalto nel settore edilizio. In Italia e in altri Paesi europei si è ancora alle prime applicazioni, in particolare si sta studiando la possibilità di sostituire l'acciaio con il basalto nel calcestruzzo armato. Numerosi sarebbero i vantaggi legati all'uso del basalto; senza dubbio quello più importante è legato al fatto che è un materiale naturale, sostenibile, facilmente riciclabile e con bassissime emissioni di CO<sub>2</sub> durante la produzione

## **Bibliografia – Sitografia**

- [1]- Edoardo Cosenza, Gaetano Manfredi, Marisa Pecce. Strutture in cemento armato, basi della progettazione;
- [2]-[https://www.ingenio-web.it/articoli/il-progetto-dei-nodi-negli-edifici-nuovi-in-cemento-armato/#:~:text=I%20nodi%20degli%20edifici%20in,baricentrici%20degli%20elementi%20strutturali%20monodimensionali](https://www.ingenio-web.it/articoli/il-progetto-dei-nodi-negli-edifici-nuovi-in-cemento-armato/#:~:text=I%20nodi%20degli%20edifici%20in,baricentrici%20degli%20elementi%20strutturali%20monodimensionali;);
- [3]-<https://www.marcodepisapia.com/nodo-trave-pilastro/>;
- [4]-  
[http://simonettapaccagnini.altervista.org/collassotelai.html#:~:text=Meccanismi%20per%20travi%20forti%20%E2%80%93%20pilastri,%20applicazione%20dell'azione%20sismica](http://simonettapaccagnini.altervista.org/collassotelai.html#:~:text=Meccanismi%20per%20travi%20forti%20%E2%80%93%20pilastri,%20applicazione%20dell'azione%20sismica;);
- [5]-<https://zedprogetti.it/2017/08/11/meccanismi-collasso-pilastri-deboli-travi-forti/>;
- [6]-<https://www.chimicamo.org/chimica/materiali-compositi/>;
- [7]-<https://www.infobuild.it/approfondimenti/materiali-compositi/>;
- [8]-<https://www.kimia.it/it/blog/materiali-compositi-edilizia-consolidamento-strutturale-frp-frcm-srg>;
- [9]-<https://www.ingenio-web.it/articoli/conoscere-i-compositi-per-impieghi-strutturali-certificazioni-caratteristiche-e-campi-d-impiego/>;
- [10]-<http://www.edil-lab.it/wp-content/uploads/2017/11/Materiali-innovativi-041017-lowres.pdf>;
- [11]-<https://iris.enea.it/retrieve/dd11e37c-d7d4-5d97-e053-d805fe0a6f04/RT-2017-16-ENEA.pdf>;
- [12]-[https://amslaurea.unibo.it/3021/1/Pirri\\_Alessandra\\_Tesi.pdf](https://amslaurea.unibo.it/3021/1/Pirri_Alessandra_Tesi.pdf);
- [13]-<https://www.lavorincasa.it/fibra-di-basalto/>;
- [14]-<https://www.calcolostrutturale.com/calcestruzzi-fibro-rinforzati-frc/>;
- [15]- R. Capozucca, Vibration analysis of damaged RC beams strengthened with GFRP, Composite Structures, 2018, Volume 200, 624-634;
- [16]- R. Capozucca, S. Bossoletti, S. Montecchiani, Assessment of RC beams with NSM CFRP rectangular rods damaged by notches, Composite Structures, 2015, Volume 128, 322-341;
- [17]- R. Capozucca, S. Bossoletti, Dynamic response of RC beams – in different scale – with near surface mounted CFRP rectangular rods, Composite Structures, 2015, Volume 131, 516-529;

- [18]- Roberto Capozucca, Vibration of CFRP cantilever beam with damage, *Composite Structures*, 2014, Volume 116, 211-222;
- [19]- Capozucca R., Magagnini E. RC beam models damaged and strengthened with GFRP strips under bending loading and free vibration. *Composite Structures*, 2020, 253, 112730;
- [20]- Capozucca R., Magagnini E. Analysis of cracked RC beams under vibration. *Proceedings of the 12th International Conference on Damage Assessment of Structures (DAMAS 2017)*, Kitakyushu, Japan, 10-12 July 2017. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 842, 012076;
- [21]- Capozucca R., Magagnini E., Vecchietti M.V. Damaged RC beams strengthened with GFRP. In: Bartoli G., Betti M., Fagone M., Pintucchi B. (eds) *Proceedings of the 14th International Conference on Building Pathology and Constructions Repair, Procedia Structural Integrity (CINPAR 2018)*, Firenze, Italy, 20-22 July 2018, 2018, 11: 402-409;
- [22]- Capozucca R., Magagnini E., Vecchietti M. V. Experimental Free Vibration of Damaged RC Beam Models. In: Paipetis S.A., M.H. Aliabadi Ferri (eds) *Proceedings of 18th International Conference on Fracture and Damage Mechanics (FDM 2019)*, Rhodes, Greece, 16-18 September 2019, *Key Engineering Materials*, 2019, 827, 499–504;
- [23]- Capozucca R., Magagnini E. Assessment of RC elements strengthened with NSM FRP rods by experimental tests. In: Golewski G.L. (eds) *Proceeding of the 10th International Conference on Advanced Models and New Concepts in Concrete and Masonry Structures (AMCM2020)*, Lublin, Poland, 21-23 October, 2020. *MATEC Web of Conferences*, 2020, 323, 01008;
- [24]- Magagnini E., Capozucca R. Detection of Damage in RC Beams Strengthened with NSM CFRP Rectangular Rod by Finite Element Modeling. In: Abdel Wahab M. (eds) *Proceedings of the 8th International Conference on Fracture, Fatigue and Wear (FFW 2020)*, 2020. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore, 2020, 227-2.