

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

DISTART - STRUTTURE

TESI DI LAUREA

in

Materiali Innovativi e Riabilitazione Strutturale LS

**ANALISI SPERIMENTALE E VERIFICA DI
FATTIBILITA' DI ELEMENTI
STRUTTURALI RINFORZATI CON FIBRE
NATURALI**

CANDIDATO:
Riccardo Bernabini

RELATORE:
Chiar.mo Prof. Andrea Benedetti

CORRELATORE:
Dott. Ing. Federica Marani

Anno Accademico 2009/2010

Sessione II

*A mio nonno Pino ed
a tutta la mia famiglia...*

INDICE:

INTRODUZIONE	5
1. LA FIBRA DI CANAPA	11
1.1 La Canapa.....	11
1.2 Lavorazione della fibra e trattamenti post estrattivi	14
1.2.1 La tecnica dell'esplosione a vapore	15
1.2.2 L'alcalinizzazione	16
1.3 Influenza della temperatura, dell'umidità e della porosità sulle proprietà meccaniche delle fibre di canapa	18
1.3.1 Gli effetti della temperatura sulle fibre di canapa	18
1.3.2 Gli effetti della porosità sui compositi in fibra di canapa	20
1.3.3 Gli effetti dell'umidità sulle fibre di canapa	24
2. ATTIVITÀ SPERIMENTALE RELATIVA AI CAMPIONI IN COMPOSITO	27
2.1 Introduzione	27
2.2 Simulazione numerica	29
2.3 Attività di laboratorio	38
2.3.1 Attività preliminare	39
2.3.2 Operazioni di misura e peso dei campioni	40
2.3.3 Descrizione della macchina di prova	47
2.3.4 Strumentazione dei canapini	50
2.3.5 Fase di prova – Rottura dei canapini	58
2.3.6 Analisi dei risultati.....	61
2.3.7 Discussione dei risultati	70

3. ATTIVITÀ SPERIMENTALE RELATIVA ALLA FIBRA DI CANAPA SECCA	81
3.1 Introduzione	81
3.2 Attività di laboratorio	83
3.2.1 <i>Selezione del materiale e realizzazione dei provini</i>	83
3.2.2 <i>Operazioni di misura e peso dei provini</i>	93
3.2.3 <i>Esecuzione della prova</i>	96
3.2.4 <i>Analisi dei risultati</i>	107
3.2.5 <i>Discussione dei risultati e conclusioni finali</i>	114
4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	123
5. BIBLIOGRAFIA	127

INTRODUZIONE:

Negli ultimi anni l'interesse della ricerca, dell'industria e in particolare dell'ingegneria si è concentrato sul passaggio dai materiali monolitici ai materiali compositi rinforzati da fibre.

L'utilizzo di materiali compositi, cioè formati combinando due o più componenti, generalmente una fase continua (detta matrice) ed una discontinua (detta rinforzo), nell'ambito di applicazioni strutturali, offre notevoli vantaggi rispetto ai materiali convenzionali come gli acciai e le leghe metalliche leggere, infatti essi consentono, tramite una adeguata distribuzione del rinforzo, di ottimizzare le proprietà del componente rispetto alla distribuzione spaziale degli sforzi. Questa eventualità permette di ottenere elevate caratteristiche di leggerezza, resistenza, rigidità e quindi di ottenere strutture di peso sensibilmente inferiore alle omologhe in metallo.

Negli ultimi decenni, la crescente attenzione verso l'ambiente e le specifiche richieste legislative riguardo alla salvaguardia dell'ambiente e il riciclo dei materiali, hanno fatto in modo che i ricercatori rivolgessero i propri studi verso lo sviluppo di materiali provenienti da fonti rinnovabili e facilmente recuperabili o degradabili alla fine della propria vita utile.

Si è cercato perciò, soprattutto in Europa, di sostituire i compositi di più largo uso (a base di resine epossidiche, fibre di vetro, carbonio e kevlar) di difficile smaltimento perché difficilmente separabili, con rinforzi meno invasivi per l'ambiente.

In questo ambito un recente interesse è stato rivolto ai compositi rinforzati con fibre naturali.

In passato le fibre naturali non sono state prese in considerazione come rinforzi per materiali compositi a causa di alcuni problemi

connessi al loro utilizzo: la bassa stabilità termica e quindi la possibilità di degradazione della fibra durante le fasi di produzione del composito dove si raggiungono temperature superiori anche ai 200°C, la natura idrofila che da un lato causa instabilità dimensionale (rigonfiamento) e dall'altro abbassa la compatibilità con le matrici polimeriche (problemi di adesione matrice/rinforzo che possono provocare l'inefficacia totale del rinforzo), la variabilità di proprietà a seconda della qualità del raccolto, dell'età, delle tecniche di estrazione e delle condizioni ambientali.

D'altro canto però, i rinforzi naturali presentano indubbi vantaggi rispetto a quelli tradizionali: hanno costi molto meno elevati, sono facilmente reperibili, sono biodegradabili, riciclabili e biocompatibili e presentano in genere una densità minore rispetto a quelli di natura sintetica.

Questa serie di pregi ha permesso alle fibre naturali di riscuotere enorme successo, soprattutto negli ultimi anni, in diversi settori dell'industria oltre che nell'edilizia: per esempio da qualche anno a questa parte i pannelli interni delle portiere della maggioranza delle automobili prodotte in Europa, sono rinforzati con fibre naturali, che oltre ad evitare grosse problematiche di smaltimento determinano rilevanti vantaggi per quanto riguarda i consumi grazie alla loro maggior leggerezza; il settore meccanico ha iniziato ad utilizzare fibre naturali per la produzione di materiali resistenti a fatica e usura, cinghie di trasporto, materiali isolanti; analogamente l'industria aerospaziale, navale e quella biomedica che ha iniziato ad utilizzare fibre di origine naturale per la realizzazione di valvole cardiache, protesi dell'anca e del ginocchio, impianti dentali ecc..., al posto di materiali come fibre sintetiche, acciaio inossidabile e titanio che oltre a creare problemi di biocompatibilità, necessitavano di ulteriori interventi chirurgici per la rimozione delle protesi stesse.

La ricerca che si è sviluppata negli ultimi anni riguardo le fibre naturali, ha permesso un grosso aumento nell'uso di questi prodotti, perché attraverso l'industria chimica principalmente, sono stati superati molti limiti che ne circoscrivevano l'utilizzo.

Infatti le fibre naturali sia durante, che dopo i processi di estrazione, vengono sottoposte a vari trattamenti di natura termica e chimica che permettono di scongiurare la variabilità delle loro proprietà meccaniche dovuta sia alle condizioni ambientali di crescita della pianta che possono essere molto influenti, che ai processi estrattivi veri e propri che permettono di ottenere le fibre partendo dallo stelo della pianta. Tra i trattamenti utilizzati durante l'estrazione individuiamo quelli a esplosione di vapore, quelli idrotermali, quelli di decorticazione standard e quelli di pilling, mentre a valle dei processi estrattivi le fibre vengono sottoposte nella maggioranza dei casi a trattamenti di natura chimica di alcalinizzazione e trattamenti enzimatici che permettono alle fibre di conservare buone doti di aderenza nei confronti della matrice e di stabilità delle caratteristiche meccaniche [7 e 8].

	Hydrothermal	Alkaline	Enzymatic	Hydrothermal-enzymatic	Alkaline-enzymatic
Tensile strength	0	-	--	--	--
Young's modulus	0	--	-	-/--	--
Elongation	0	++	0	-	0
Cellulose content	+	-	+	++	-

*0: little or no change, +: increase, and -: decrease.

Tabella 1 Tabella che mostra l'influenza dei trattamenti applicati alle fibre sulle caratteristiche meccaniche

Ad oggi si conoscono numerosi autori che hanno pubblicato delle trattazioni che descrivono attività di laboratorio il cui scopo è quello di determinare le caratteristiche meccaniche delle fibre naturali e la loro costanza, a prescindere dal tipo di trattamento subito in fase di estrazione.

Le prestazioni raggiunte dalle fibre naturali si sono dimostrate paragonabili, ed in alcuni casi migliori, di quelle delle fibre di vetro normalmente usate nei rinforzi che però presentano grossi limiti per lo smaltimento perché la loro combustione rilascia in atmosfera grosse quantità di anidride carbonica che sembra essere una delle cause principali dell'effetto serra e dell'estensione dei cambiamenti climatici del pianeta. Per queste motivazioni si è già iniziato a sostituire i rinforzi in fibra di vetro con quelli in fibra naturale per lo più nelle applicazioni non strutturali [10].

	Natural fibres	Glass fibres
Density	Low	Twice that of natural fibres
Cost	Low	Low, but higher than NF
Renewability	Yes	No
Recyclability	Yes	No
Energy consumption	Low	High
Distribution	Wide	wide
CO ₂ neutral	Yes	No
Abrasion to machines	No	Yes
Health risk when inhaled	No	Yes
Disposal	Biodegradable	Not biodegradable

Tabella 2 Confronto Fibre naturali - Fibre di vetro

Tra le fibre di origine naturale maggiormente utilizzate come rinforzo nei materiali compositi troviamo il kenaf, il cotone, l'abaca, il sisal, il cocco, la palma, la juta, il lino e la canapa (cannabis sativa).

Lo scopo di questa trattazione è quello di determinare le caratteristiche e le proprietà meccaniche delle fibre di canapa e di individuare un meccanismo di rottura delle fibre stesse, in modo da poter determinare l'idoneità o meno di questo tipo di fibre al loro utilizzo nelle applicazioni composite.

Durante le due fasi sperimentali distinte che sono state svolte in laboratorio, sono stati testati e portati a rottura sia campioni di fibra secca monodirezionale che campioni in composito rinforzati con tessuto a fibre disperse di canapa corte.

1. LA FIBRA DI CANAPA:

1.1 La Canapa:

La canapa (*Cannabis sativa*) è una pianta erbacea annua appartenente alla famiglia delle Cannabinacee. Il fusto è eretto, sottile, alto fino a 4 m, non ramificato se la semina è abbastanza fitta.

Le fibre di canapa sono composte principalmente di cellulosa, circa l'88 – 90% in peso, mentre l'emicellulosa e la lignina rappresentano il restante 10%, dividendosi rispettivamente l'8 – 9% e l'1.5 – 2%. Dalle analisi chimiche le parti di sostanze inorganiche, estratti di acqua e cellule della parete come ad esempio la pectina, sono risultate in quantità trascurabili.

Le fibre della corteccia (*liberiane*¹), possiedono in natura un alto grado di variabilità e come prezioso materiale grezzo sono adatte alla più grande varietà di usi industriali. La canapa è sempre stata una delle principali piante coltivate, di grande importanza sia economica che strategica, perché era utilizzata per fabbricare i più diffusi tessuti, le vele delle navi e le corde. Negli ultimi anni ha avuto una notevole espansione anche nei settori dell'isolamento sia termico che acustico giustificata dalla ricorrenza sempre più frequente alla bio – edilizia, inoltre, grazie anche al suo elevatissimo contenuto di cellulosa è utilizzata per la produzione di carta al posto del legno, per salvaguardare le foreste ma anche perché può essere coltivata intensamente senza il bisogno di particolari lavorazioni dopo la raccolta.

¹ Fibre liberiane sono le fibre che derivano dallo stelo delle piante erbacee, contengono percentuali elevate di lignina solitamente e hanno fibre elementari coese. In generale le fibre liberiane sono più rigide e meno igroscopiche di quelle ottenute dalle foglie.

La struttura dei filati può essere descritta come numerose singole fibre intrecciate tra loro con un angolo destro quasi costante attorno al proprio asse longitudinale. Assumendo che le sezioni trasversali delle fibre siano circolari, il diametro delle fibre è funzione dell'angolo di torsione, infatti all'aumentare del diametro delle fibre, diminuisce l'angolo di torsione. Inoltre dalle osservazioni al microscopio si può notare come l'angolo di torsione diminuisca dall'esterno verso l'interno.

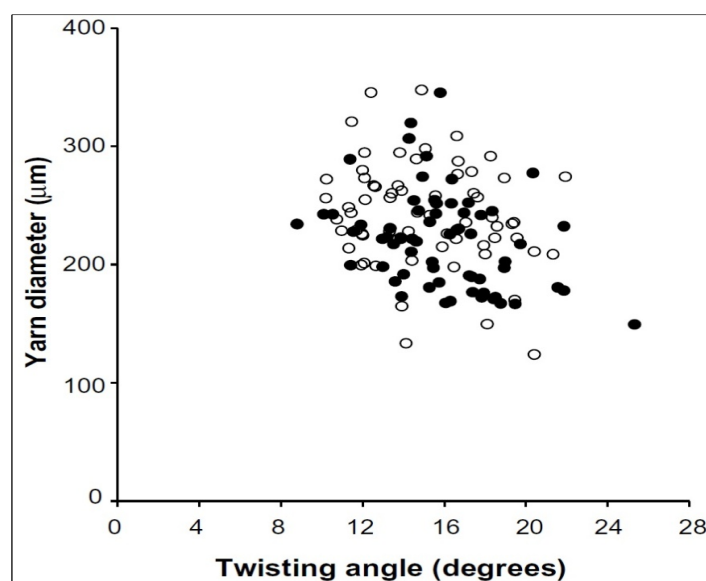


Figura 1.1 Grafico Diametro del filato - Angolo di torsione

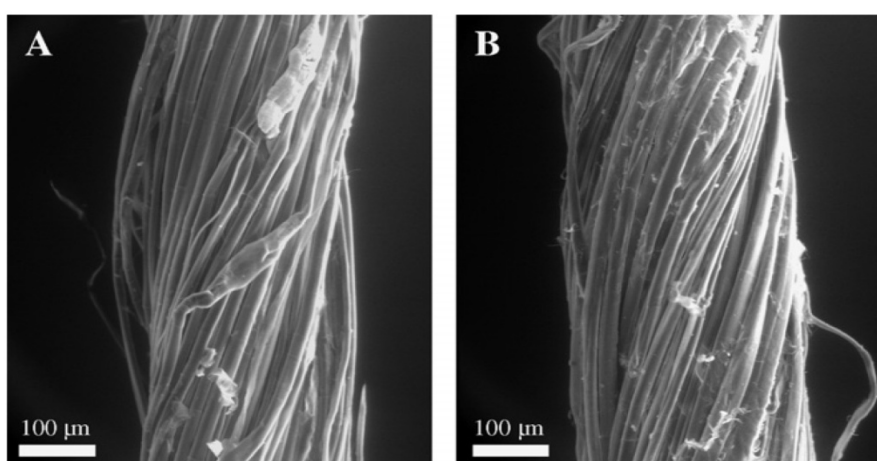


Figura 1.2 Foto al microscopio elettronico del filato di canapa in cui è evidente l'angolo di torsione delle singole micro - fibre

La struttura elicoidale del filato di canapa, a differenza dei filamenti di norma non torti come quelli delle fibre sintetiche (ad esempio i fasci di fibre di vetro), è una caratteristica importante nella prospettiva di rinforzo del composito. Infatti il beneficio di una struttura ritorta del filato nei compositi è giustificato da una maggiore resistenza al taglio assiale.

La struttura interna dei filati può essere valutata con osservazioni trasversali. La forma del filato è pressappoco circolare, la distribuzione spaziale delle fibre all'interno del filato è praticamente uniforme, le fibre hanno dimensioni variabili e sezioni più vicine a quelle di forma poligonale che circolare, inoltre si notano fibre raggruppate in fasci più che fibre isolate e la presenza di piccole cavità.

Dalla figura 1.3 si può notare un numero di 162 fibre che compongono il filato, per un'area complessiva di $24.000 \mu\text{m}^2$.

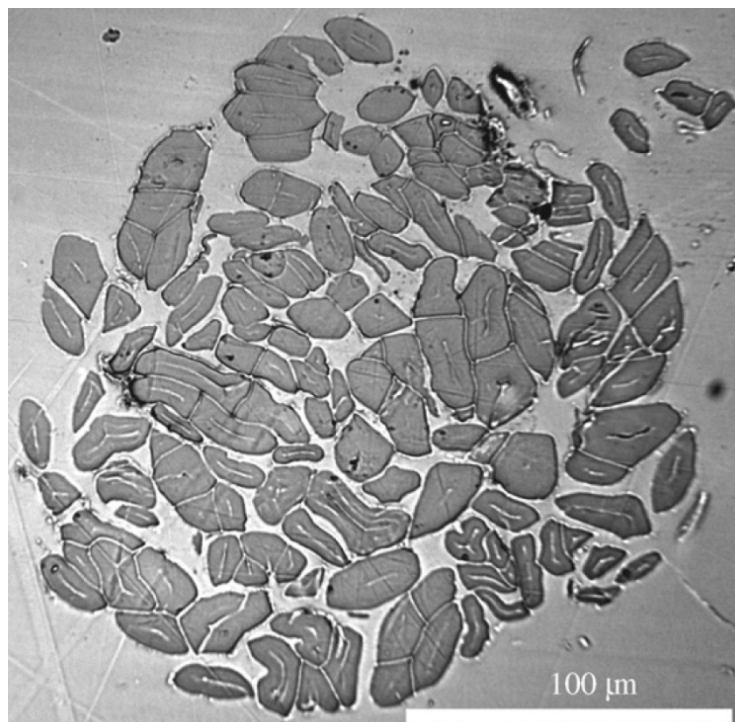


Figura 1.3 Foto al microscopio della sezione trasversale del filato

1.2 Lavorazione delle fibre e trattamenti post estrattivi:

La lavorazione tradizionale della canapa può generalmente essere divisa in tre settori:

- *Lavorazione della fibra lunga*
- *La lavorazione della canapa*
- *La cotonizzazione*

In questa esposizione, per completezza, si fa cenno solamente alla lavorazione delle fibre lunghe di canapa, perché l'esposizione delle tecniche di lavorazione della canapa esula dagli scopi di questa relazione.

La lavorazione della fibra lunga di canapa è principalmente usata nella produzione di filati di canapa a filatura bagnata. Dopo la raccolta e dopo aver completato il processo di macerazione (macerazione con rugiada, macerazione con acqua), i fusti di canapa "defogliati" vengono poi seccati, liberati dal nocciolo di legno in una sequenza di procedimenti quali: pigiatura, spezzatura e gramolatura.



Figura 1.4 Particolare dello stelo di pianta di canapa da cui si ricavano le fibre lunghe (liberiane)

Con l'uso del cosiddetto rullo, le fibre scorticate vengono rese più tenere e flessibili. L'accorciamento della lunghezza iniziale della fibra da 3 m a 650 mm è effettuato da una speciale macchina da taglio. Le fibre corte ed intricate vengono pettinate, quelle lunghe invece, parallelizzate e lisciate con una macchina per la scapecciatura. Dopo alcuni passaggi di tiratura e doppiatura, i frammenti manufatti sono prefilati in filati cardati e, a seconda della qualità della finezza desiderata, filati in filo di canapa attraverso processi di filatura a secco o con acqua.

La tecnologia dell'esplosione a vapore, di cui si parlerà di seguito, consente la realizzazione di fibre speciali che possono essere modificate in base ai prodotti oppure alle esigenze dei test. Attraverso l'adattamento del processo ingegneristico, si possono produrre manufatti di fibre "su misura", come, per esempio, nuovi tipi di filati di canapa creati nelle filature per il cotone.

1.2.1 La tecnica dell'esplosione a vapore:

Una nuova tecnica per la lavorazione delle fibre è quella dell'esplosione al vapore, tale tecnica risale agli anni Trenta ma successivamente è stata sviluppata e migliorata.

Il principio dell'esplosione al vapore consiste nel far penetrare il vapore, ed eventuali additivi, nello spazio tra le fibre. Questo avviene in condizioni di alta pressione e temperatura crescente all'interno di un reattore. Così facendo la lamella centrale e le sostanze aderenti alla fibra vengono separate e successivamente allontanate nella fase di lavaggio del prodotto.

Sia la pressione (0-12 bar) ed il tempo (1-30 minuti), che la concentrazione alcalina variano in base alla qualità ed allo scopo designato delle fibre. Dopo il tempo di reazione necessario, il

reattore si decompressa ad un livello di pressione normale per mezzo di una valvola (esplosione a vapore). Le fibre elementarizzate vengono mandate, con un sistema di tubi, in recipienti di raccolta. Attraverso una repentina ebollizione ed accelerazione delle fibre che escono, si compie la raffinatura delle fibre.

Dopo l'asciugatura, ed un primo processo di apertura, se necessario, le fibre possono essere consegnate per la filatura.

Questa tecnica permette di ottenere un corretto grado di elementarizzazione delle fibre.

Inoltre, studi recenti hanno dimostrato che l'applicazione della tecnica dell'esplosione a vapore porta qualche lieve beneficio anche dal punto di vista prestazionale delle fibre; in particolare si è osservato per fibre di lino, un aumento di circa il 10% della forza a rottura e dell'allungamento a rottura rispetto alle fibre in cui si è utilizzata la separazione meccanica [7].

C'è però da dire che il processo di estrazione attraverso la tecnica dell'esplosione a vapore fa crescere leggermente il prezzo delle fibre rispetto a quelle ottenute con normale macerazione in acqua e Sali minerali.

1.2.2 L'alcalinizzazione:

L'alcalinizzazione è un trattamento chimico, tipicamente utilizzato dalle industrie tessili, che viene applicato talvolta a tutti i tipi di fibre naturali, quindi anche alla canapa, per migliorarne le doti di aderenza.

Attraverso questo processo, non vengono rimosse solo le sostanze che tengono insieme le fibre (principalmente pectina e cere naturali), ma anche alcune componenti della parete cellulare con una

conseguente trasformazione del tipo di reticolo di cellulosa; questo si traduce in una conseguente proporzione maggiore di cellulosa, e quindi in valori di densità lievemente superiori alla media (0.0018 – 0.0024 g/mm³) [2].

Il trattamento delle fibre di canapa con soluzioni di idrossido di sodio (NaOH) a diverse concentrazioni e per durate differenti, provoca un significativo miglioramento nell'aderenza tra fibra e matrice che si sviluppa una volta che la fibra è stata inserita e incorporata al composito [7].

Di contro, il processo di alcalinizzazione, peggiora in maniera significativa le prestazioni delle fibre: infatti, da studi condotti su filati di fibra di canapa secca sottoposti a trattamenti di alcalinizzazione, si è osservata una diminuzione di rigidità e forza a rottura rispettivamente del 13 e del 30% dovute con ogni probabilità alla rimozione di sostanze amorfe; allo stesso tempo la deformazione a rottura delle fibre raggiunge valori quasi tre volte superiori rispetto alla fibra non trattata.

Attraverso osservazioni al microscopio ottico, non si sono notate apprezzabili riduzioni della sezione della fibra dopo i trattamenti di alcalinizzazione, cosa che invece si verifica abitualmente durante i trattamenti enzimatici che però non sono usati per le fibre di canapa da rinforzo perché riducono troppo le caratteristiche meccaniche delle fibre (per alcuni tipi di fibra si è osservata una riduzione della forza e della rigidità fino a valori del 60%) [7].

Infine è doveroso far notare che questo tipo di trattamenti può portare risultati sostanzialmente differenti a seconda del tipo di fibre di canapa al quale vengono applicati (tipo di macerazione, durata della macerazione, tipo di estrazione, condizioni ambientali di crescita della pianta, periodo di raccolta). Infatti trattamenti troppo aggressivi e prolungati possono portare ad un peggioramento

sensibile delle condizioni delle fibre che si riflette poi ovviamente sulle prestazioni delle stesse.

1.3 Influenza della temperatura, dell'umidità e della porosità sulle proprietà meccaniche delle fibre di canapa:

Le fibre di canapa sono un materiale naturale che a meno di trattamenti post estrattivi non subisce generalmente prima di essere inserito nel rinforzo, particolari processi protettivi, di conseguenza esso è molto sensibile alle alte temperature e agli ambienti umidi, modificando le sue proprietà meccaniche in maniera anche rilevante.

1.3.1 Gli effetti della temperatura sulle fibre di canapa:

Molto spesso la realizzazione di materiali da rinforzo compositi in fibra naturale comporta necessariamente alte temperature perché in molti casi vengono utilizzate matrici di natura termoplastica.

Per questo motivo si sono susseguiti diversi studi che hanno indagato il comportamento delle fibre di canapa una volta che queste avevano subito almeno un ciclo di riscaldamento a temperature che facilmente superavano i 200° C: le prove effettuate prevedevano la realizzazione di provini in materiale composito utilizzando la stessa fibra e lo stesso tipo di matrice ma variando la temperatura di processo [1 e 2].

L'analisi dei dati ha permesso di osservare un peggioramento significativo delle proprietà meccaniche delle fibre per processi realizzativi interessati da temperature superiori ai 180° C, infatti fino

a questa soglia la tensione ultima, che è quella che risente maggiormente degli effetti della temperatura, subisce riduzioni del 3 – 4 %, mentre già per processi con temperatura di 200° C, il calo è dell'ordine del 15 %.

In generale all'aumentare della temperatura di processo, la tensione ultima e la deformazione ultima subiscono dei peggioramenti proporzionali all'aumento di temperatura, al contrario la rigidezza è interessata da incrementi modesti (vedi fig. 1.5).

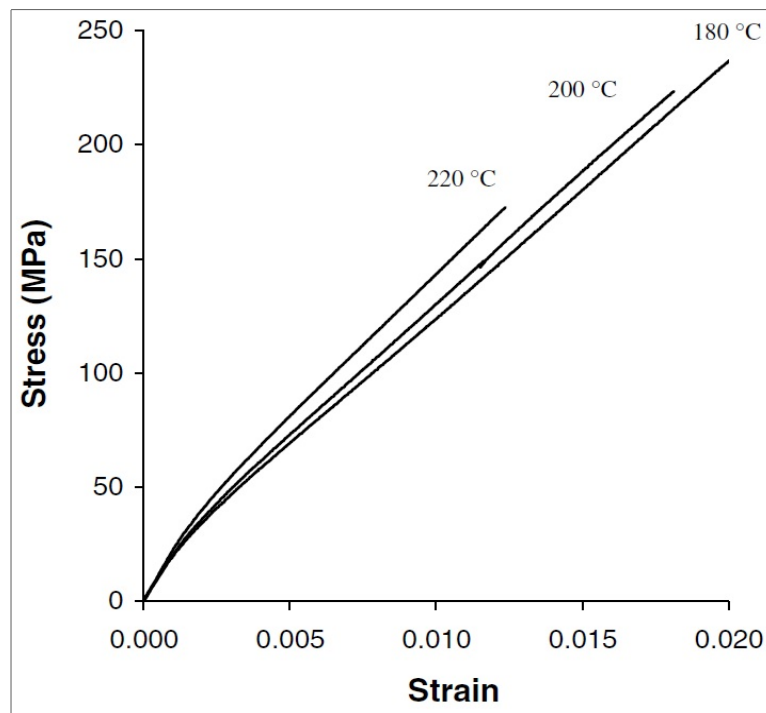


Figura 1.5 Grafico Tensione - Deformazione di provini sottoposti a processi con diverse temperature

Il calo di tensione e deformazione a rottura è facilmente riconducibile ad un processo di degradazione termica che si verifica nelle fibre.

La figura mostra che la rigidezza è sicuramente la grandezza meno influenzata dalla temperatura, infatti si mantiene su un range piuttosto ristretto compreso tra i 62 e i 68 GPa. Questo tipo di comportamento può essere causato da una riduzione della porosità

concomitante con l'aumento di temperatura: infatti, un fattore determinante per quanto riguarda il controllo della porosità del composito è la viscosità della matrice che come è ovvio diminuisce all'aumentare della temperatura di processo. Essendo più fluida la matrice riesce ad impregnare meglio le fibre di canapa e a riempire più facilmente gli interstizi che si formano tra le fibre, provocando una riduzione di porosità.

Nel complesso, i risultati dimostrano quanto sia difficile e delicato trovare un compromesso nella realizzazione di materiali compositi rinforzati con fibre di canapa e matrici termoplastiche poiché una bassa temperatura di processo limita il deterioramento delle fibre di origine naturale causato da degradazione termica, ma allo stesso tempo incrementa la porosità del composito provocata da una matrice molto viscosa.

Tuttavia, con l'esperienza e le prove sperimentali si è giunti alla conclusione che un processo ottimale utilizza temperature elevate poiché i compositi rinforzati con fibre naturali presentano sempre frazioni volumetriche elevate di fibra, intorno a 0.5 – 0.55, e con temperature di processo basse non si riuscirebbe ad ottenere una corretta impregnazione delle fibre, aspetto decisamente più rilevante della degradazione termica delle fibre.

1.3.2 Gli effetti della porosità sui compositi in fibra di canapa:

Fino ad ora la maggior parte degli studi si è concentrata sulle proprietà meccaniche di due componenti fondamentali dei compositi, la fibra e la matrice, ignorando così l'esistenza di un terzo

componente, la porosità, spesso inevitabile in tutti i materiali compositi.

La porosità è definita come la quantità di cavità presenti in un materiale continuo riempite di aria; nei materiali compositi i vuoti sono provocati dalla miscelazione e dal consolidamento di due materiali discreti.

Mentre con materiali di natura sintetica (fibre di vetro e carbonio, resine epossidiche ecc...) nel corso degli anni è stata acquisita una notevole conoscenza del problema e i processi di fabbricazione sono stati ottimizzati fino a contenere i valori di porosità dei compositi a circa il 2 % dell'intero volume, con i materiali in fibra naturale le tecniche di fabbricazione non sono ancora molto sviluppate, per di più la natura di questi materiali induce già di per se una quantità di vuoti intrinseca; entrambi i fattori causano un notevole contributo della porosità nel volume complessivo del composito, che spesso si aggira attorno al 30 %.

La porosità maggiore dei compositi in fibra naturale è causata da diversi fattori: l'esistenza di cavità luminale nelle fibre vegetali, la composizione chimica delle superfici di fibre vegetali che complica la compatibilità fibra – matrice, l'eterogenea forma e dimensione delle fibre vegetali che limita l'impregnazione della matrice.

In un composito la porosità può essere suddivisa in tre componenti: la porosità della fibra (cavità interne e compatibilità fibra – matrice), la porosità della matrice e la porosità strutturale, ovvero lo spazio libero rimanente tra le fibre, che dipende dal tipo di fibra e dal suo orientamento.

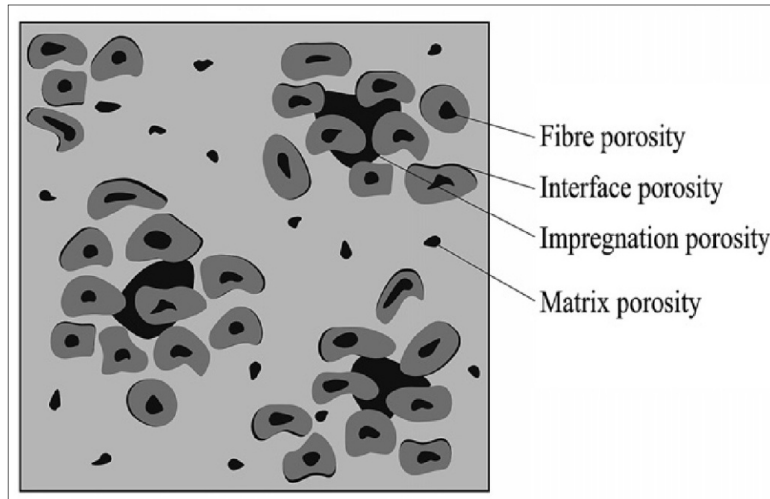


Figura 1.6 Rappresentazione dei tipi di porosità presenti all'interno del composito

Oltre ad abbassare il volume portante del composito, la porosità abbassa anche le proprietà meccaniche con l'introduzione di concentrazioni di tensione nel materiale.

Inoltre, la relazione tra la frazione volumetrica della fibra e la frazione di peso, non è disciplinata solamente dalla densità della fibra, ma anche dalla porosità stessa.

Anzi, è stato dimostrato da recenti studi [6], che tra la frazione volumetrica di fibra e la porosità del composito esiste una importante relazione.

Le proprietà meccaniche dei compositi dimostrano un incremento proporzionale alla frazione volumetrica di fibra fino ad un valore pari o di poco superiore allo 0.5, dopodiché è stato osservato che per valori di frazione volumetrica superiori il beneficio è inesistente, anzi la qualità del composito è peggiorata notevolmente a causa di una scarsa impregnazione delle fibre, infatti con quantità di fibre troppo elevate la compattazione non riesce ad essere ottimale con importanti conseguenze nelle prestazioni dei compositi.

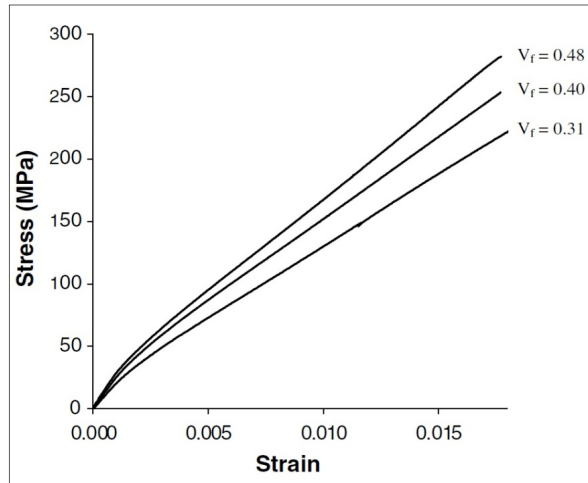


Figura 1.7 Grafico Tensione - Deformazione in funzione di VF

Così per evitare di realizzare compositi con fibre naturali scarsamente impregnate è stato posto un limite pratico superiore della frazione volumetrica di fibra pari a 0.5.

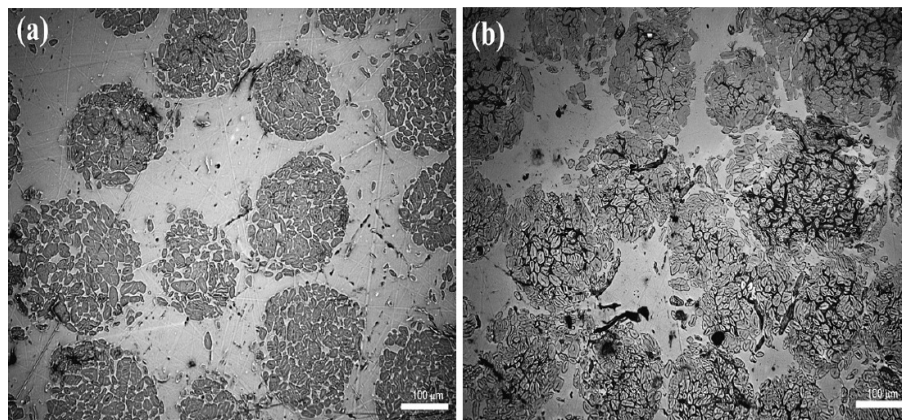


Figura 1.8 Fotografia al microscopio che evidenzia la quantità di vuoti maggiore nel provino con VF superiore a 0.5 (I vuoti sono rappresentati dalle parti in nero)

In figura 1.8 sono rappresentate due immagini ottenute da osservazioni al microscopio che evidenziano come per valori di fibra superiori a 0.5, la porosità del composito aumenti in maniera evidente. L'immagine (a) rappresenta la sezione trasversale di un campione con VF pari a 0.362, mentre l'immagine (b) è relativa ad un provino con VF pari a 0.654.

All'aumentare della frazione volumetrica di fibra all'interno del composito, aumenta la differenza tra i valori, di tensione a rottura e di deformazione ultima, calcolati considerando una porosità pari a zero e quelli ricavati da prove sperimentali (vedi fig. 1.9).

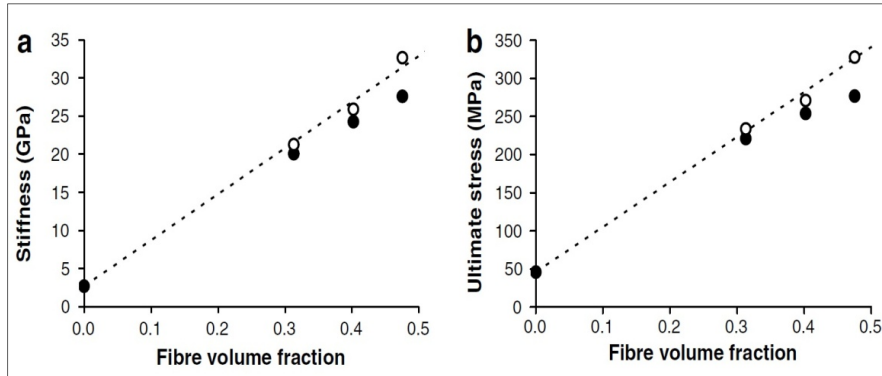


Figura 1.9 Grafico Tensione ultima - VF (a) e Grafico Deformazione ultima - VF. (•) Valori ottenuti considerando la porosità pari a zero, (○) Valori ricavati dalle prove sperimentali

1.3.3 Gli effetti dell'umidità sulle fibre di canapa:

In contrasto con la maggior parte delle fibre sintetiche, le fibre vegetali hanno una grande capacità di assorbimento dell'umidità; recenti studi hanno dimostrato che le proprietà meccaniche a trazione della fibra di canapa sono fortemente influenzate dal contenuto di umidità [2].

È stato dimostrato per il legno, e in generale si applica a tutte le fibre vegetali, che la capacità di assorbimento di umidità può essere stimata dalla distribuzione di massa dei componenti della parete cellulare.

La componente con la maggior capacità di assorbimento è l'emicellulosa, succeduta dalla cellulosa e in piccola parte dalla lignina.

Le fibre di canapa non sono particolarmente ricche di emicellulosa, ma presentano percentuali di cellulosa molto elevate, quindi sono molto sensibili all'umidità.

In breve, è stato dimostrato da recenti prove sperimentali e trattazioni sull'argomento, che aumentando il livello di umidità fino all'85 % per compositi rinforzati con fibre di canapa, si verificano delle riduzioni del modulo elastico di circa il 10% e degli incrementi di deformazione a rottura e tensione ultima rispettivamente del 50 e del 30% circa (vedi figura 1.10).

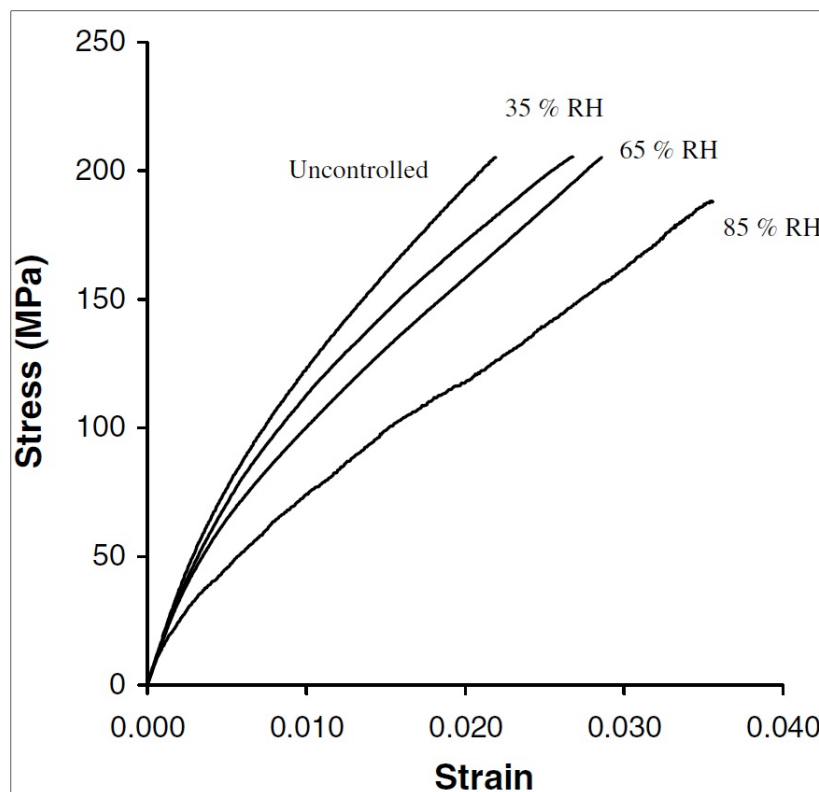


Figura 1.10 Grafico Tensione - Deformazione in funzione della percentuale di umidità

2. ATTIVITÀ SPERIMENTALE RELATIVA A CAMPIONI IN COMPOSITO:

2.1 Introduzione:

Questa trattazione si propone lo scopo di descrivere, analizzare e confrontare i risultati delle attività di simulazione numerica e di sperimentazione in laboratorio svolte su provini di fibra di canapa sottoposti a sforzi di trazione uniassiale nel loro piano.

La parte di simulazione numerica, è stata condotta attraverso codice Matlab. All'interno di detto codice è stata sviluppata una subroutine che permetteva ampia flessibilità nella modifica dei dati in ingresso e nella rappresentazione del risultato.

La simulazione si è composta di due fasi: nella prima, dopo aver definito le caratteristiche meccaniche e geometriche delle fibre attraverso distribuzioni di probabilità, sono state effettuate simulazioni di rottura per i diversi campioni generati in maniera casuale. Grazie alle curve di capacità ottenute è stato definito il comportamento del sistema e individuato il meccanismo di collasso dei provini.

Nella seconda fase, si è analizzato il comportamento del sistema al variare di una singola distribuzione di probabilità in ingresso, per determinare quale variabile aleatoria del problema condizioni maggiormente la risposta del sistema.

Disponendo di un sistema in grado di generare i campioni e simularne la rottura risulta di particolare interesse il possibile confronto tra risultati teorici e quanto emerso dalle indagini sperimentali.

La parte svolta in laboratorio, ha visto prima di tutto la realizzazione dei provini di canapa e resina da parte di un'azienda esterna, dopodiché si è passati alla vera e propria attività sperimentale.

I canapini sono stati pesati e accuratamente misurati in modo da poter determinare in fase di analisi dei dati, le percentuali in peso e volume di canapa, resina e vuoti; questo per capire come al variare di detti parametri, si modificano le risposte sperimentali dei campioni in termini di: allungamento a rottura, tensione ultima e modulo elastico.

Ogni provino è stato poi strumentato con tre estensimetri disposti nelle medesime posizioni rispetto ai talloni in alluminio fissati alle estremità. Si è così proceduto al test vero e proprio, con la rottura di ciascun provino ottenuta attraverso un'apposita macchina di prova che li sollecitava a trazione pura nel loro piano, e all'acquisizione dei dati. L'ultima parte della fase sperimentale si è concentrata sull'analisi dei dati ottenuti dalle prove attraverso dei file Excel; i risultati complessivi sono rappresentati sotto forma di grafici che permettono di valutare le caratteristiche meccaniche cercate.

2.2 Simulazione Numerica:

Scopo di studio di questa simulazione numerica è quello di determinare il comportamento di un sistema di fibre di canapa sottoposte a trazione, nello specifico, si cerca di determinare l'influenza sulla risposta del problema causata dall'aleatorietà dei parametri in ingresso del problema.

A tal fine si è proceduto eseguendo al calcolatore una simulazione numerica condotta tramite codice Matlab; la subroutine di simulazione necessaria al calcolo, è stata costruita basandosi sul metodo statistico che va sotto il nome di *Metodo di Monte Carlo*. Detto metodo, valuta l'affidabilità di un problema attraverso una tecnica basata sull'estrazione completamente casuale da distribuzioni note in ingresso; in particolare le fasi di generazione dei vettori che definiscono le caratteristiche fisico-meccaniche delle fibre e l'orientamento delle stesse nel campione simulato sono state scritte basandosi sul Metodo Monte Carlo.

Il codice si divide in tre parti: nella prima parte vengono generati i vettori che rappresentano le caratteristiche geometriche e meccaniche delle singole fibre che costituiscono il provino. Nella seconda si ha la struttura a ciclo che simula la procedura di rottura delle fibre. Mentre nella terza e ultima fase è implementata la memorizzazione e la rappresentazione dei risultati prodotti dalla simulazione.

Nel nostro problema le distribuzioni statistiche in ingresso erano rappresentate dalle distribuzioni uniforme e normale delle caratteristiche geometriche e meccaniche dei provini. Le distribuzioni di probabilità delle dimensioni della sezione della fibra, della resistenze della fibre e il loro modulo elastico sono state considerate di tipo Gaussiano.

Per quanto riguarda la distribuzione degli angoli di inclinazione delle fibre, essendo questo un parametro molto variabile, si è deciso di considerare la situazione più generale possibile adottando una distribuzione di tipo uniforme definendo gli estremi dell'intervallo; ne consegue che ogni valore appartenente all'intervallo ha la stessa probabilità di accadimento. Infine è stata definita la lunghezza iniziale delle fibre, o meglio la lunghezza iniziale del sistema, fissata in 10 mm per poter commettere un errore più piccolo possibile nel considerare le fibre perfettamente rettilinee.

La lunghezza della i -esima fibra viene calcolata in automatico dal programma di calcolo in funzione dell'angolo di inclinazione associato alla fibra stessa.



Figura 2.1 Tessuto di fibra di canapa isotropo

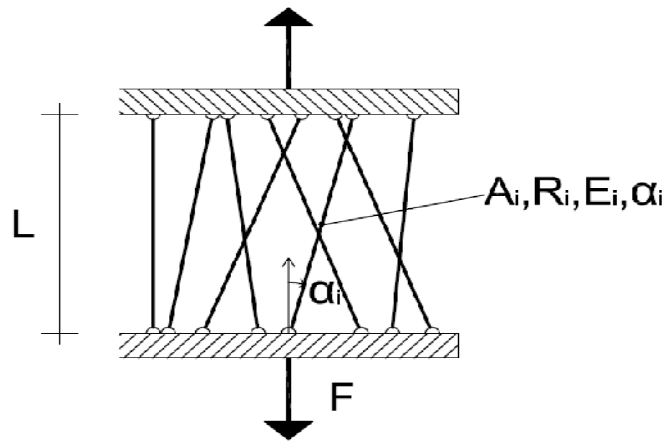


Figura 2.2 Rappresentazione schematica del modello della simulazione

VARIABILE	MEDIA	DEVIAZIONE STANDARD
Area fibra	0.003 mm ²	0.006 mm ²
Modulo Elastico	3000 MPa	300 MPa
Tensione Ultima fibra	150 MPa	15 MPa

Tabella 2.1 Variabili aleatorie del problema con distribuzione gaussiana

VARIABILE	ESTREMO a	ESTREMO b
Angolo di inclinazione delle fibre	0°	7°

Tabella 2.2 Variabili aleatorie del problema con distribuzione uniforme

Definite le distribuzioni statistiche delle variabili si è provveduto alla generazione dei vettori che fungono da input all'analisi; il codice in Matlab a partire da un prefissato numero di fibre costituenti il campione, genera le fibre che lo costituiscono

(sezione, resistenza, modulo elastico e inclinazione delle fibre) attraverso un'estrazione del tutto casuale dei valori dalle curve di distribuzione imposte.

Una volta generati i vettori, il codice esegue il vero e proprio test a trazione sui canapini, ognuno dei quali risulta ora caratterizzato da delle precise proprietà fisico-meccaniche. Il test a trazione è implementato numericamente attraverso un ciclo *for* in Matlab.

Ad ogni ciclo il codice individua la fibra più debole, ne registra la tensione ultima e l'allungamento a rottura in un vettore che consentirà di visualizzare graficamente la legge Carico-Spostamento, dopodiché elimina la fibra e ripete il procedimento con tutte le altre fibre fino alla rottura di tutte queste ultime.

Il ciclo termina con la costruzione del grafico Forza-Spostamento del campione esaminato.

Detta simulazione è stata eseguita per 50 campioni generati in modo random dal programma con diversi numeri di fibre costituenti in modo da individuare il numero di fibre migliore con cui eseguire le prove e studiare il comportamento del sistema.

Di seguito si riporta il grafico relativo a 5 campioni ognuno dei quali costituito da 2000 fibre; dallo studio eseguito è stato possibile osservare che il numero di fibre non influenza quantitativamente il comportamento del sistema. Si noti come i risultati ottenuti nel grafico Forza - Spostamento relativo ai 5 campioni siano contraddistinti da una forte sovrapposizione.

Si ricordi inoltre che ogni campione è stato generato dalle stesse distribuzioni di probabilità ma per cinque volte sono stati estratti valori completamente casuali per caratterizzare: sezione, resistenza, modulo elastico e inclinazione delle fibre.

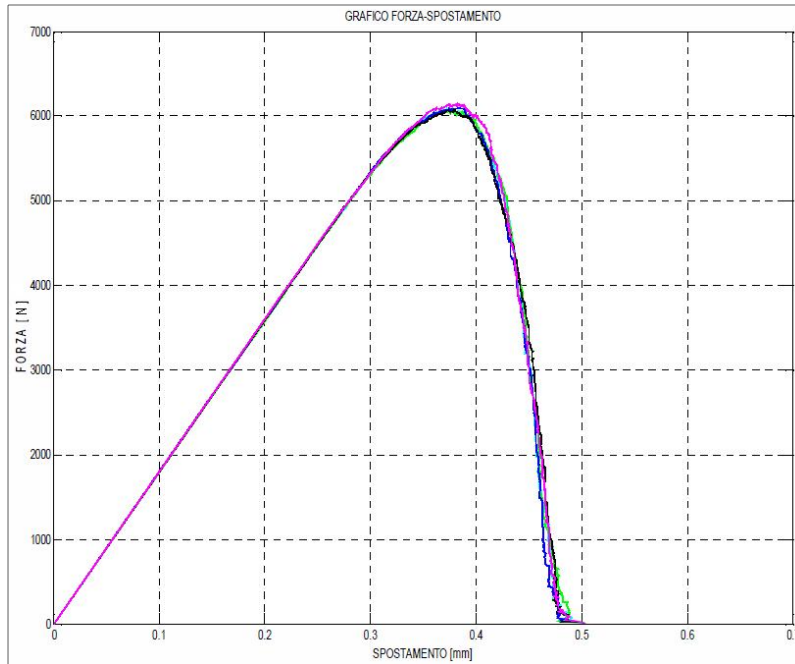
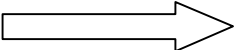


Figura 2.3 Curve Carico – Spostamento dei 5 campioni

Le curve dei 5 campioni si sovrappongono quasi completamente; assegnate le proprietà geometriche e meccaniche dei campioni come da tabella 2.1 e 2.2 si ha che i campioni composti da 2000 fibre collassano in corrispondenza di una tensione media riferita all'area efficace iniziale.

$$\sigma_{media} = \frac{6100}{(0.003 \cdot 2000)} = 102 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon = 100 \cdot \frac{0.375}{10} = 3.75 \%$$


 $E = 2.720 \text{ MPa}$

Prima di discutere i risultati è indispensabile ricordare che la distribuzione della resistenza, del diametro e del modulo elastico delle fibre non sono state ottenute da indagini deterministiche.

Ai fini di caratterizzare le proprietà in termini di valore più frequente e distribuzioni verranno condotte apposite indagini di laboratorio.

Analizzando i risultati della prima fase della simulazione numerica, è stato possibile caratterizzare il meccanismo di collasso di fasci di fibre di canapa. Innanzitutto si è potuto osservare come la resistenza di un sistema di fibre sia profondamente diversa da quella ottenuta dalla somma delle resistenze di tutte le fibre che lo compongono, in particolare si è messo in luce che la resistenza massima del campione è mobilitata quando la percentuale di fibre rotte è compresa tra il 20% e il 25%.

Questo comportamento è dovuto al fatto che durante la fase di carico di rottura, le fibre sono sollecitate in funzione della loro disposizione nel campione e delle loro caratteristiche meccaniche.

Ogni volta che una fibra raggiunge la rottura, lo sforzo si trasferisce alle fibre adiacenti che conservano ancora un margine di resistenza; di fatto si può pensare che al rompersi di una fibra l'area resistente del sistema diminuisca e la tensione nelle fibre sopravvissute aumenti fin quando queste ultime non raggiungano la loro tensione limite. Tuttavia, poiché tutte le fibre ancora integre sono al limite di resistenza, l'ulteriore incremento di carico viene sopportato per breve tempo. Questo provoca un effetto a catena che porta al collasso dell'intero sistema.

La crisi di tipo fragile è ben evidente se si osserva il grafico forza-spostamento, in cui si può notare un ramo di softening pressoché verticale oltre il punto di massima resistenza.

Il comportamento del sistema può, in ultima analisi, essere considerato elastico-lineare fino al punto di massima resistenza, con una rottura di tipo fragile.

La seconda parte della simulazione ha l'obiettivo di valutare come varia la risposta del sistema al variare delle deviazioni standard o degli estremi dell'intervallo, rispettivamente per le variabili con distribuzione normale o uniforme, dei dati in ingresso.

Le modifiche apportate al codice di calcolo, permettono di eseguire delle simulazioni su vari campioni generati mantenendo fissi tre dei quattro vettori e modificando il quarto. Il codice genera i primi tre vettori in modo *random* che restano uguali per il resto della simulazione, e successivamente il quarto vettore all'interno di un ulteriore ciclo *for*.

Il codice ad ogni passo modifica le caratteristiche della curva di distribuzione di probabilità, esegue la simulazione di rottura del sistema di fibre, memorizza i dati e infine rigenera il quarto vettore con una nuova distribuzione di probabilità.

Lo studio del comportamento del sistema al variare della distribuzione in ingresso è stato condotto attraverso la definizione della distribuzione normale della resistenza mobilitata dal provino in corrispondenza di percentuali diverse di fibre collassate.

Per provini costituiti da 2000 fibre si sono operate 4 campagne di simulazione all'interno delle quali i campioni variavano le loro caratteristiche per 50 volte, ovvero definito il parametro del quale variare la dispersione, si sono assegnati 50 vettori diversi estratti di volta in volta dalle diverse distribuzioni e combinati con le restanti proprietà e caratteristiche geometriche che rimanevano invariate.

La distribuzione della forza massima, corrispondente ad un prefissato valore percentuale di fibre rotte, è stata rappresentata attraverso un opportuno istogramma.

Attraverso la discretizzazione in 6 intervalli ed il successivo fit ad una distribuzione normale si sono valutate ogni volta media e deviazione standard della forza.

Per quanto riguarda la distribuzione di resistenza a trazione e modulo elastico si è fatta variare la deviazione standard mentre per l'angolo di inclinazione delle fibre che presenta una distribuzione di tipo uniforme, si sono cambiati gli estremi dell'intervallo.

Dai risultati si è osservato come la variazione della distribuzione di probabilità del modulo elastico e della forza resistente generino una dispersione maggiore nella risposta del sistema, mentre la variazione dell'intervallo dell'inclinazione delle fibre non comporta una notevole variazione della resistenza del sistema.

In figura 2.4 si riporta l'andamento della dispersione del risultato (adimensionalizzata rispetto al valore medio) in funzione della dispersione di σ , E e α .

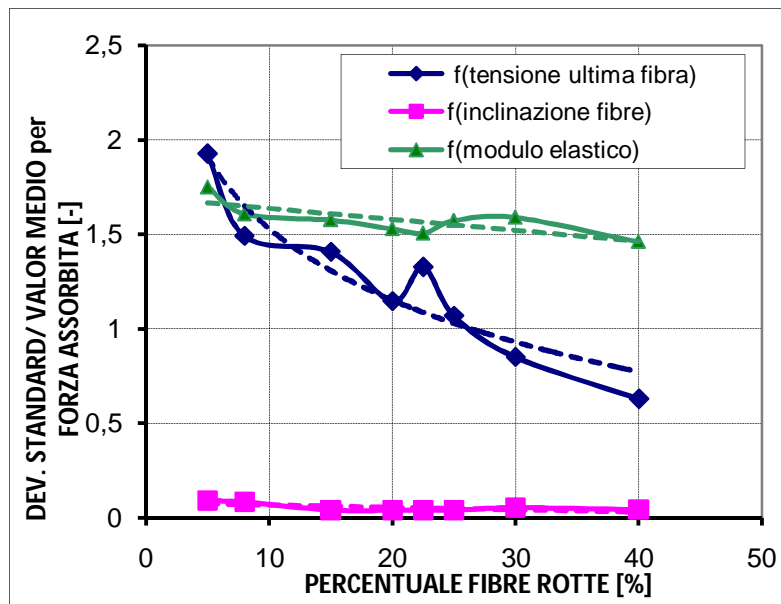


Figura 2.4 Grafico della dispersione del risultato in funzione della dispersione di tensione a rottura, deformazione a rottura e modulo elastico

All'aumentare di fibre collassate diminuisce l'influenza del risultato dell'incertezza sulla tensione mentre rimangono pressoché inalterati gli effetti provocati dall'incertezza sul modulo elastico.

Raccogliendo in un unico grafico tutti i legami Forza – Spostamento ottenuti dalle 200 simulazioni condotte risulta possibile valutare la dispersione della forza a prefissati valori di spostamento raggiunto.

La distribuzione della forza è stata valutata nei punti ai quali corrisponde uno spostamento del sistema pari a 0.25 mm, 0.30 mm, 0.35 mm, 0.375mm e 0.40 mm.

La scelta dei livelli di spostamento è stata eseguita in modo tale da poter studiare il comportamento del sistema in punti prossimi alla rottura del sistema.

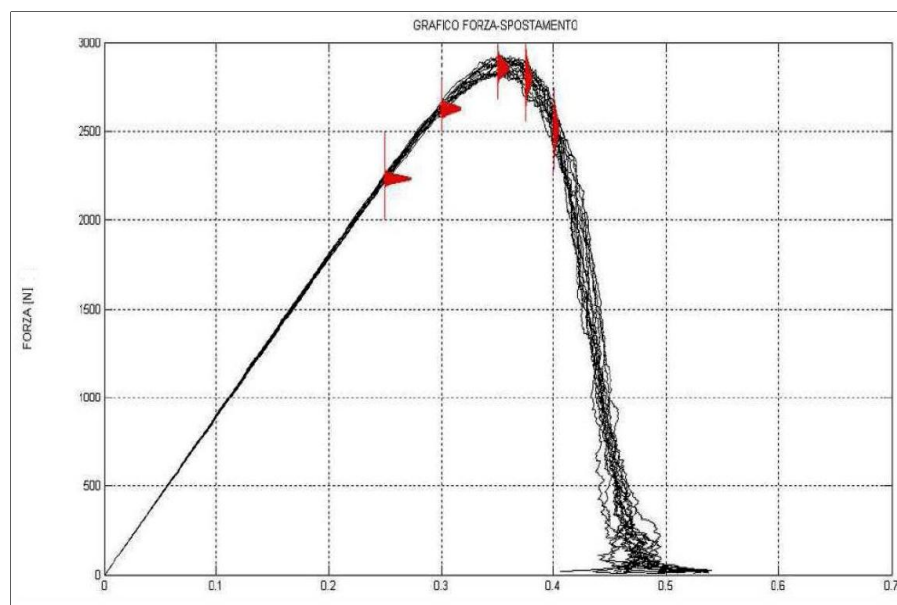


Figura 2.5 Grafico della distribuzione della forza in funzione di diversi livelli di spostamento

Valore dello spostamento [mm]	μ [N]	σ	σ/μ
0.25	2233	16.892	0.76 %
0.30	2628.2	22.088	0.84 %
0.35	2859.3	37.978	1.32 %
0.375	2800.7	68.431	2.4 %
0.40	2517.6	84.888	3.37 %

Tabella 2.3 Valori di media e deviazione standard per diversi livelli di spostamento

Dal grafico di figura 2.5 e dai valori di tabella 2.3 appare chiaro come la dispersione del risultato aumenti sensibilmente nella fase post-picco.

2.3 Attività di laboratorio:

L'attività di laboratorio vera e propria si è sviluppata in più fasi successive che hanno previsto rispettivamente:

- Realizzazione dei provini da parte di una azienda esterna alla Facoltà
- Operazioni di misura e peso dei provini
- Realizzazione della macchina di prova per test di trazione pura sui campioni
- Strumentazione dei canapini per acquisizione dei dati forniti dalle prove di trazione
- Rottura dei canapini con macchina di prova e acquisizione dei dati
- Analisi dei risultati ottenuti
- Discussione dei risultati e conclusioni finali

2.3.1 Attività preliminare:

I campioni sui quali sono state eseguite le prove sono stati realizzati da una azienda esterna alla Facoltà, la Res.In.Tec di Calderara di Reno, e non direttamente dal personale del laboratorio.

I provini sono stati realizzati con una geometria conforme a quella prevista per l'esecuzione di prove a trazione; il tessuto in fibra dispersa di canapa era annegato nella resina al fine di creare un composito monostrato o pluristrato (al massimo 3 strati).

Le dimensioni dei campioni erano pressoché uniformi e in generale presentavano: una lunghezza che si aggirava attorno ai 300 mm, una larghezza di circa 30 mm e uno spessore molto variabile, dipendente sia dal numero di strati dei fibra sia dal quantitativo di resina utilizzato, che oscillava da 2.25 mm a oltre 7 mm. La realizzazione di un numero di campioni composti da un numero crescente di strati di tessuto ha lo scopo di chiarire come si modifica il comportamento del sistema al variare del rapporto in volume tra i componenti che lo costituiscono.

Per poter trattare statisticamente i risultati, ciascuna serie di provini mono, bi e tri strato è composta da tre elementi. Ovviamente, anche all'interno della stessa serie i provini non erano identici, questo per ragioni di carattere prettamente tecnico; questo aspetto ha consentito di comprendere meglio le differenze nel comportamento di provini con un diverso rapporto canapa-resina, a parità di strati.

Elemento fondamentale del provino, è il tallone, cioè la parte terminale del campione che si trova alle sue estremità. Detto elemento consente l'attacco del provino alla macchina di prova, distribuendo sul medesimo la sollecitazione applicata. Per questo motivo l'azienda che ha realizzato i campioni ha cercato di utilizzare dei talloni che non avessero una rigidità troppo elevata rispetto a quella del composto, come suggerito anche dalle norme tecniche

fornite dal CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), CNR-DT 200/2004 “Istruzioni per la Progettazione, l’Esecuzione e il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l’utilizzo di Compositi Fibrorinforzati”.



Figura 2.6 Canapini mono-strato dopo l'applicazione dei talloni in alluminio e degli estensimetri

Sono quindi stati realizzati dei talloni in alluminio aventi larghezza pari a quella del provino, circa 30 mm, e lunghi almeno 70 mm; detti elementi sono stati resi solidali al campione mediante incollaggio e sono presenti sia sulla faccia superiore che sulla faccia inferiore.

Lo spessore di dette piastre si aggira attorno ai 3 mm.

2.3.2 Operazioni di misura e peso dei campioni:

Poiché i campioni sono stati forniti dall’azienda con i talloni già applicati, prima di passare alla rottura, si è resa necessaria un’operazione di caratterizzazione sia geometrica che fisica fondamentale per risalire alle caratteristiche del solo rinforzo.

La caratterizzazione geometrica consiste nel rilevare prima di tutto le lunghezze dei due lati di ciascun campione, L1 e L2.

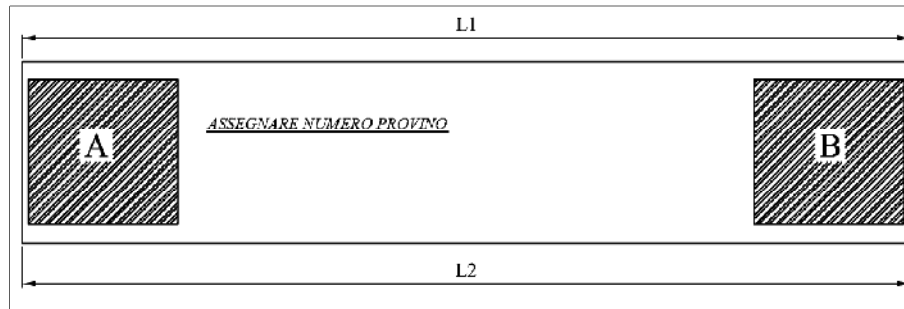


Figura 2.7 Lunghezza longitudinale del provino

Dalle misurazioni, è emersa una lunghezza dei campioni compresa tra 300 e 330 mm.

La larghezza del provino è stata misurata in 5 sezioni trasversali del provino in modo da ricavare un valore medio che fosse abbastanza rappresentativo e corretto per l'intero campione.

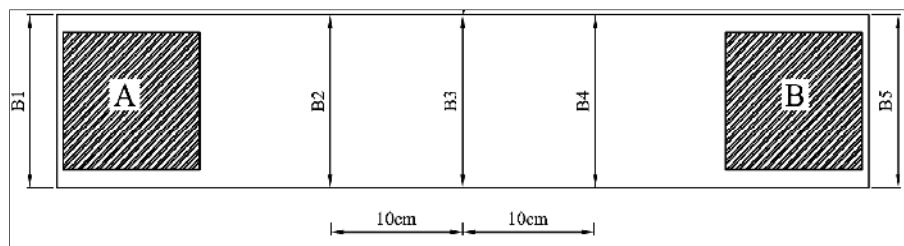


Figura 2.8 Larghezza del provino

La larghezza massima presentava un valore pari a 32.63 mm, mentre la minima un valore pari a 29.01 mm; i valori medi ricavati per ciascun provino erano compresi nell'intervallo 30-32 mm.

Vista la variabilità dello spessore, si è deciso di operare sette rilievi su ogni lato del provino: uno nella sezione di mezzeria e tre nelle sezioni poste a distanze come indicato in figura 2.9.

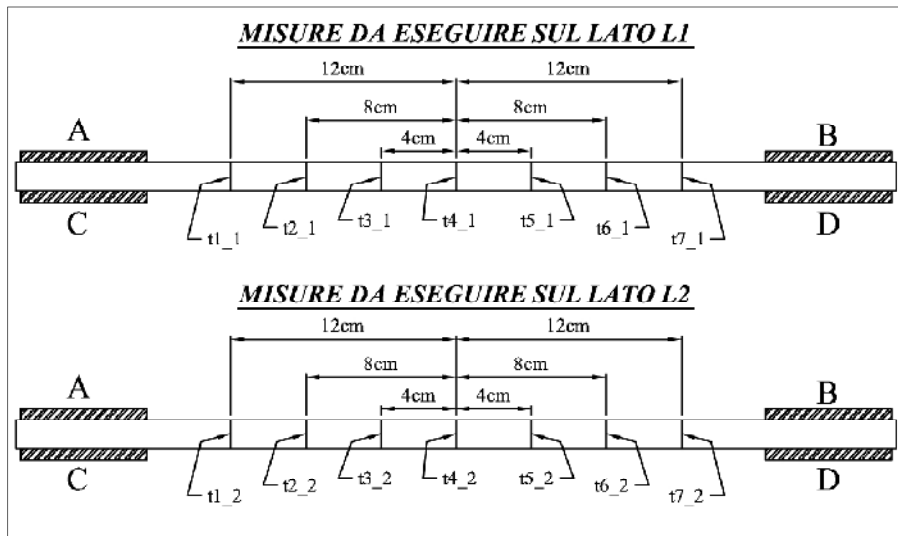


Figura 2.9 Sezioni di rilevamento spessore dei provini

In generale lo spessore del campione dipende direttamente dal numero di strati di fibra contenuti nel provino e dalla quantità di resina utilizzata per confezionarlo, come è logico aspettarsi.

Per i canapini mono-strato lo spessore oscilla da un valore minimo pari a 2.25 mm a uno massimo di 4.02 mm, per canapini bi-strato si va dai 3.89 mm ai 7.09 mm, mentre per i campioni con tre strati di canapa si va dai 5.34 mm di spessore ai 7.09mm.

La quantità di resina di ciascun provino non è direttamente misurabile, può essere ottenuta con buona approssimazione dai calcoli eseguiti sulle pesate di ciascun provino.

Particolare attenzione è stata prestata anche all'acquisizione delle dimensioni delle piastre in alluminio che fungono da talloni, infatti per ogni piastrina sono state annotate altezza, base e spessore, poiché una volta nota la densità dell'alluminio, pari a 0.0027 gr/mm^3 , e calcolato il volume di ogni piastra, attraverso rapidi calcoli è stato possibile ricavare il peso relativo ai talloni di ogni provino.

Un procedimento analogo è stato adottato per il calcolo della colla utilizzata per fissare i talloni al campione, che presentava una densità pari a 0.0012 gr/mm^3 .

Per il tessuto di canapa secco si sono eseguite 3 pesate di campioni di pari lunghezza definendo un peso per unità di lunghezza del materiale pari a 25.88 gr/m .

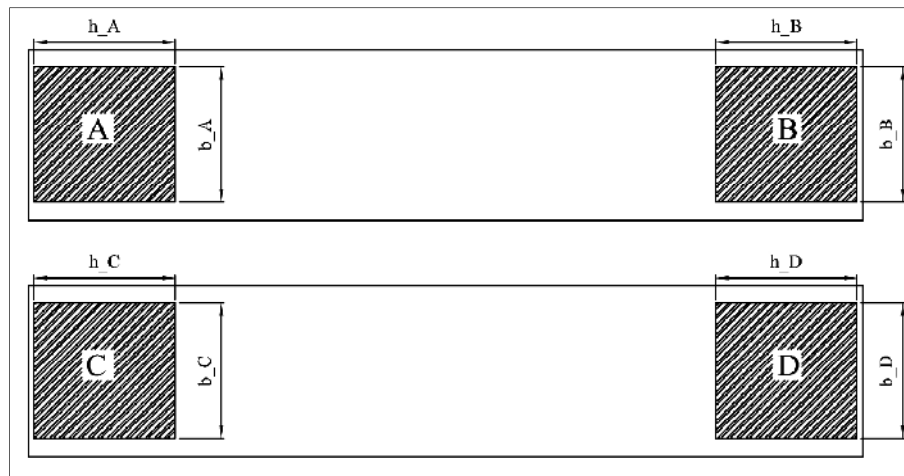


Figura 2.10 Dimensioni dei talloni dei provini

Dalle misurazioni eseguite e dalle densità imposte si deduce, dal peso complessivo del campione, il peso netto del solo composito.

Noto il peso a metro del tessuto secco, a ritroso si deduce il peso della resina utilizzata per impregnare la fibra di canapa.

Così facendo si può ottenere una prima informazione in merito al rapporto in peso tra matrice e fibra, si veda figura 2.11.

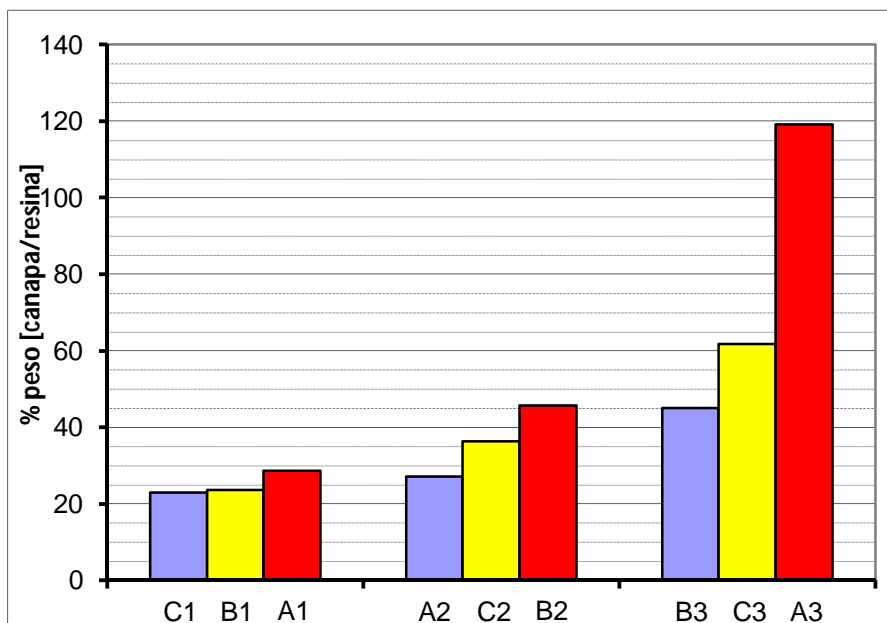


Figura 2.11 Istogramma delle percentuali in peso, contenuto di canapa rispetto al contenuto di resina

Generalmente, quando si trattano materiali di rinforzo compositi, non si fa riferimento alle percentuali in peso, bensì a quelle in volume. Avendo a disposizione il peso di ogni materiale che forma il provino, e imponendo altresì per la canapa una densità pari a 0.0024 gr/mm^3 , risulta facile dedurre le percentuali volumetriche dei due costituenti.

In figura 2.12 è riportato un esempio del foglio di lavoro utilizzato per la caratterizzazione dei provini, si noti a tal proposito che per caratterizzare le frazioni volumetriche si sono adottate due diverse procedure con grado di approssimazione crescente: ovvero considerando o meno il volume occupato dai vuoti.

PROVINO n°		A1		DIMENSIONE PIASTRE		COLLA FISSAGGIO PIASTRE	
LUNGHEZZA PROVINO				b_A	30,13 mm		
L1	324 mm	h_A	76,46 mm	h_colla A	80,22 mm		
L2	323 mm	t_A	3,17 mm	t_colla A	3,31 mm		
Lmedia	323,5 mm						
LARGHEZZA PROVINO				b_B	30,14 mm		
B1	30,04 mm	h_B	75,11 mm	h_colla B	76,77 mm		
B2	31,42 mm	t_B	3,05 mm	t_colla B	3,69 mm		
B3	31,22 mm						
B4	31,62 mm						
B5	29,81 mm						
Bmedia	30,622 mm						
SPESSORE PROVINO							
t1_1	3,11 mm						
t2_1	2,25 mm						
t3_1	2,01 mm						
t4_1	1,74 mm						
t5_1	2,29 mm						
t6_1	2,11 mm						
t7_1	2,25 mm						
tmedia	2,2543 mm						
t1_2	3,35 mm						
t2_2	3,26 mm						
t3_2	2,77 mm						
t4_2	2,91 mm						
t5_2	3,76 mm						
t6_2	3,69 mm						
t7_2	3,8 mm						
tmedia	3,36286 mm						
tmedio	2,807143						
PESI				DENSITA'			
		peso lordo provino	145,9 gr	alluminio	0,0027 g/mm ³		
		peso piastre&colla	108,26 gr	resina	0,0012 g/mm ³	valore rif resina cristallizzata	
		peso netto provino	37,6404 gr	canapa	0,0024 g/mm ³		
		peso canapa conten.	8,373116 gr	PESO MEDIO CANAPINO			
				canapa	25,88289 g/m ³	19,2	
						32,56579	
		peso resina conten.	29,26731 gr	AREE RESISTENTI			
		%peso Canapa/Resina	28,609	10,78 mm ²	area provino efficace (fibra)	0,35 mm	spessore stimato fibra
		VOLUMI		75,39 mm ²	area provino efficace (resina)	2,45 mm	spessore stimato resina
		volumi resina	24,389,4 mm ³	86,18 mm ²	area efficace totale		
		volume totale	27,989,8 mm ³	CALCOLO FRAZIONI VOLUMETRICHE DA DENSITA'			
		volume canapa	3,600,4 mm ³	3,488,8 mm ³	volume canapa dedotto da densità fibra		
		FRAZIONE VOLUI	14,8	111,6 mm ³	volume vuoti		
		FRAZ. VOL. CAN/	12,9	14,3 FRAZIONE VOLUMETRICA CANAPA RESINA			
				0,4 FRAZ. VOL. VUOTI/TOT.			
				12,5 FRAZ. VOL. CANAPA/TOT.			

Vol. Canapa ottenuto per differenza dei volumi totale e di resina (SENZA VUOTI)

Figura 2.12 Scheda di lavoro canapini

Vol. Canapa e Vol. Vuoti ottenuti attraverso il valore della densità della canapa

Per un calcolo più veritiero e corretto è infatti necessario tenere in considerazione il fatto che la resina non è in grado di saturare tutti i vuoti di aria presenti nel tessuto di canapa. I vuoti costituiti dall'aria intrappolata tra le fibre o anche nella resina, pur contribuendo ad aumentare il valore del volume complessivo, non contribuiscono al volume resistente a trazione.

Come fatto per le percentuali in peso, è quindi possibile ricavarsi le frazioni volumetriche di canapa-resina, canapa-vol.totale, vuoti-vol.totale e resina-vol. totale. Dividendo infine il volume di fibra

effettivo per la lunghezza del provino, si ricava con buona precisione l'area di fibra resistente o area efficace.

Per capire meglio l'importanza del volume dei vuoti nella composizione totale si mettono a confronto i risultati della composizione dei campioni ottenuti attraverso la metodologia appena descritta o mediante definizione del volume di canapa per differenza dal totale e volume di resina ricavato dal peso della stessa (essendo nota a priori e con certezza solo la densità del collante).



Figura 2.13 Istogramma frazioni volumetriche considerando i vuoti di aria

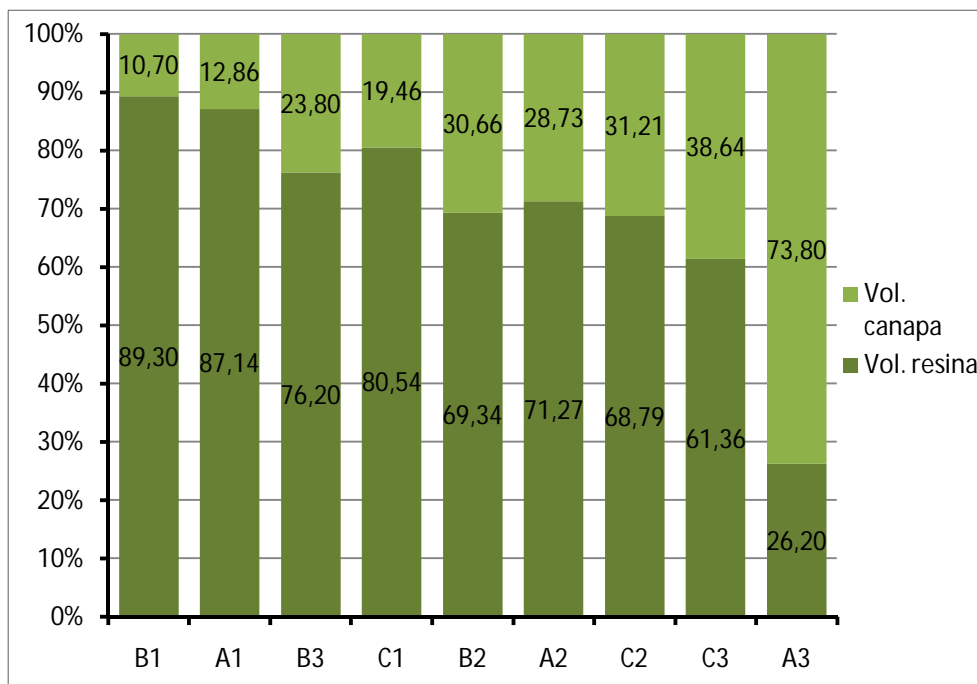


Figura 2.14 Istogramma frazioni volumetriche senza considerare i vuoti di aria

2.3.3 Descrizione della macchina di prova:

La macchina sulla quale sono stati testati a rottura i canapini, è progettata e costruita appositamente per eseguire test a trazione uniassiale.

L'apparecchio può essere diviso idealmente in due parti, una superiore e una inferiore: la parte inferiore costituisce la base e il contrasto del sistema ed è realizzata mediante un piccolo telaio in travi HEA di acciaio. Alla base è fissata, tramite bullonatura, la parte superiore che forma il vero e proprio sistema di prova.

Nella parte superiore si trova: l'aggancio al contrasto a destra (vedi figura 2.15) e la cella di carico con relativo dispositivo di attivazione a sinistra.

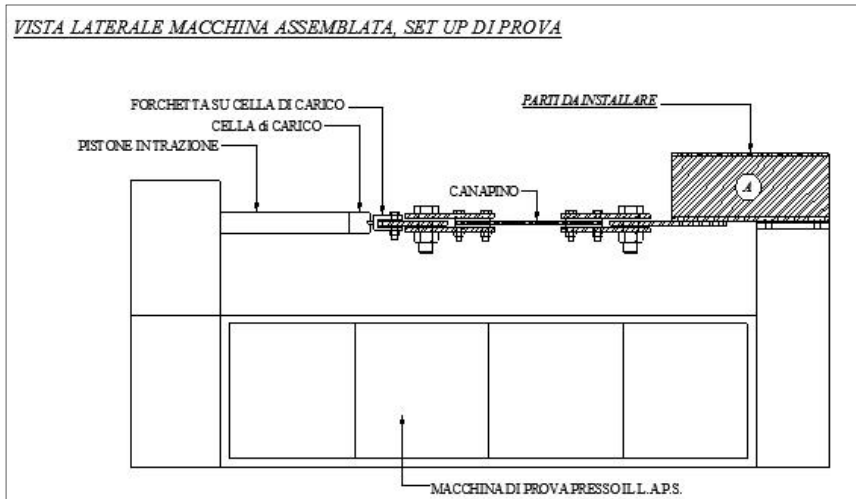


Figura 2.15 Schema macchina di prova

Il carico viene applicato manualmente mediante una manovella che per mezzo di un sistema a disco calettato trasforma il movimento rotatorio nella traslazione del pistone. La velocità di avanzamento del martinetto è ridotta da un apposito riduttore.

Il sistema induce così la trazione al provino e la sollecitazione applicata per ottenere un dato spostamento della testa del pistone è misurata dalla cella di carico.

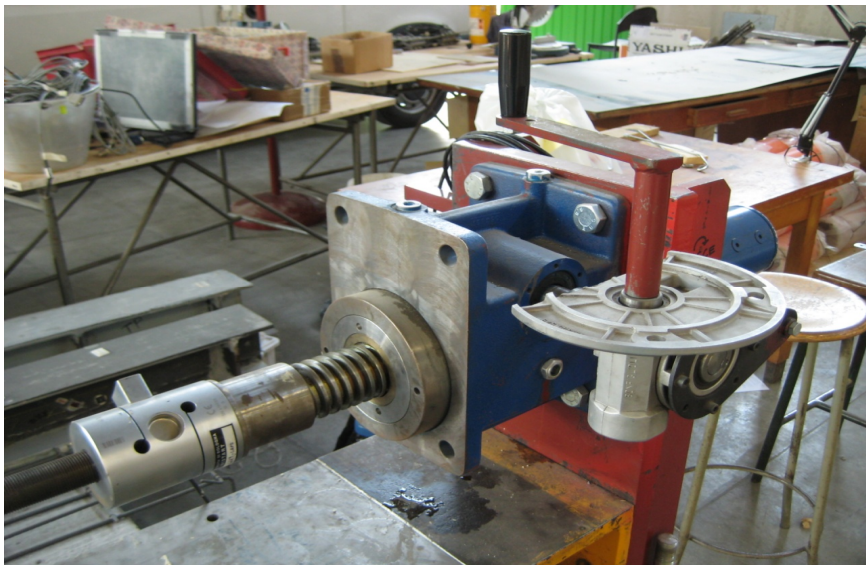


Figura 2.16 Cella di carico e meccanismo ad azione manuale per l'applicazione del carico

Il provino dopo essere stato adeguatamente strumentato e collegato alla strumentazione di acquisizione dati, viene fissato alla macchina attraverso quattro piastre, due per ogni estremità, che, essendo forate, permettono di immorsare i talloni del campione serrando 4 bulloni M12.

Le quattro piastre a loro volta presentano nella parte rotondeggiante, un foro di diametro decisamente maggiore, rispetto agli altri quattro che permette il corretto posizionamento del campione tramite l'inserimento di un grosso bullone M30 che attraversa anche le due piastre collegate alla macchina, sia quella sul contrasto sia quella collegata alla cella di carico.

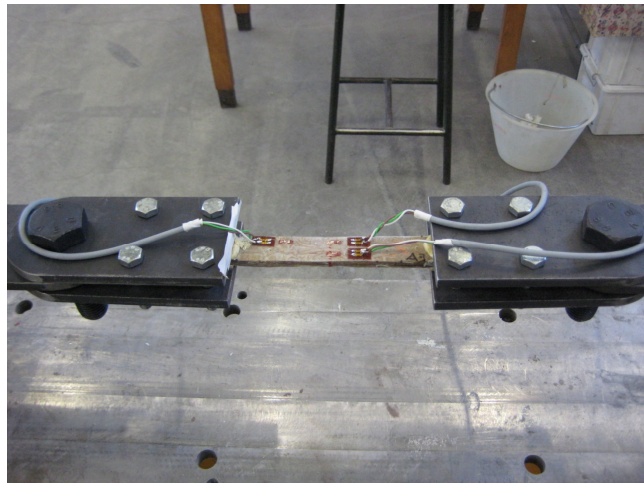


Figura 2.17 Canapino strumentato e posizionato nella macchina pronto per la fase di rottura



Figura 2.18 Vista laterale complessiva della macchina di prova

2.3.4 Strumentazione dei canapini:

Prima di procedere alla rottura dei campioni è stato necessario, strumentarli adeguatamente in modo da poter controllare in tempo reale l'andamento della prova e soprattutto registrare i dati relativi ad essa; in particolare è stata oggetto di misura, in tre punti distinti, la deformazione del provino espressa in mm/m.

Questa operazione è stata resa possibile grazie all'applicazione sui campioni di estensimetri elettrici.

L'estensimetro, o *strain gauge*, è uno strumento atto a misurare la deformazione locale della superficie di un corpo al quale viene applicato. Gli estensimetri possono classificarsi, secondo il loro principio di funzionamento, nelle seguenti categorie:

- *estensimetri a resistenza elettrica*

- *estensimetri meccanici*
- *estensimetri acustici*
- *estensimetri pneumatici*
- *estensimetri ottici*

Gli estensimetri a resistenza elettrica si basano sull'*effetto piezoresistivo* del materiale conduttore utilizzato, ossia sulla variazione di resistenza che il materiale stesso subisce quando si deforma. Gli estensimetri elettrici più comuni sono quelli metallici costituiti da un filo di lega speciale, generalmente manganina (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni) o costantina (60% Cu, 40% Ni) di resistenza elettrica nota e di diametro molto piccolo (da 0.01 a 0.03mm), disposto a serpentina su un supporto di carta o resina sintetica al quale aderisce. Il supporto viene a sua volta incollato con un opportuno adesivo sulla superficie del corpo nella zona in cui si desidera misurare la deformazione.

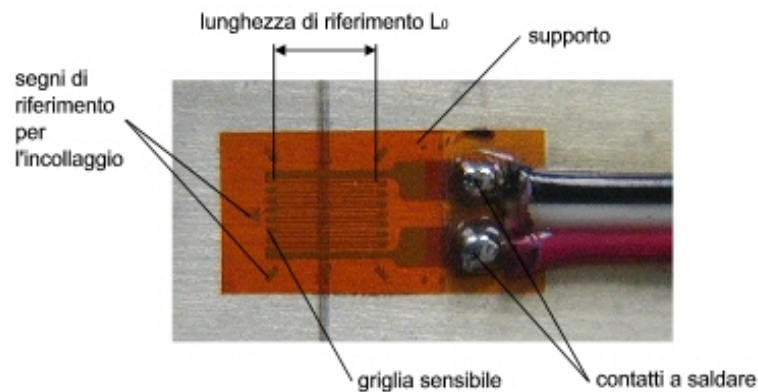


Figura 2.19 Elementi principali costituenti un estensimetro elettrico

La lunghezza del film metallico lungo la direzione principale (*gauge length*) è detta *base* dell'estensimetro: essa non va confusa con l'ingombro longitudinale dell'estensimetro (*backing length*) che è

sempre maggiore della base a causa delle maggiori dimensioni del supporto e della presenza dei terminali della resistenza.

Durante le prove svolte in laboratorio, sono stati montati sui provini di resina e canapa degli estensimetri elettrici con la lunghezza del film metallico lungo la direzione principale (*gauge length*) pari a 6 mm.

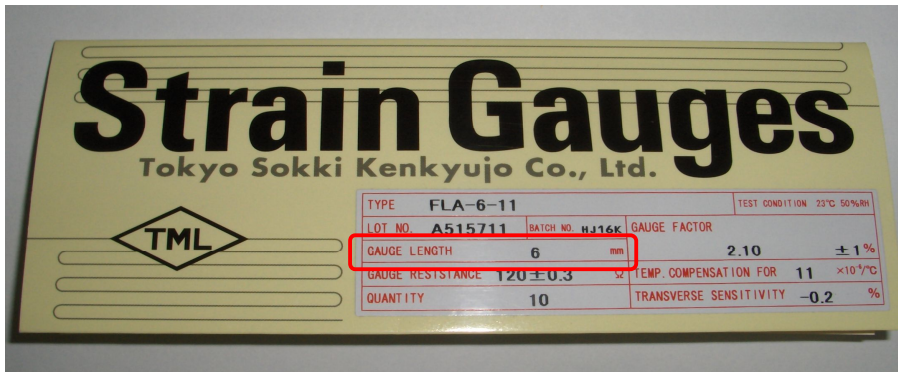


Figura 2.20 Confezione e scheda tecnica degli estensimetri elettrici utilizzati nelle prove

L'applicazione degli estensimetri è un processo molto delicato che richiede massima attenzione e precisione se si pretendono dei risultati affidabili e corretti. In ogni provino sono stati montati 3 estensimetri, tutti nelle medesime posizioni secondo lo schema di figura 2.21:

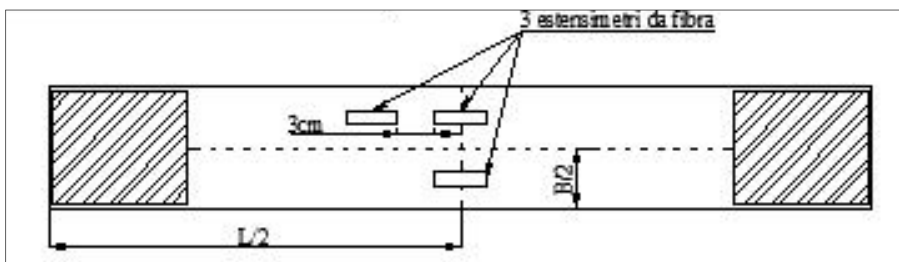


Figura 2.21 Schema disposizione estensimetri nei provini

I primi due estensimetri sono stati montati nella sezione di mezzeria, in maniera simmetrica rispetto all'asse longitudinale del provino,

mentre il terzo è stato posizionato ad una distanza di 30 mm dagli altri due verso una delle due estremità del provino.

La distanza di 30 mm non è casuale, ma è giustificata dal fatto che si è cercato di scongiurare il più possibile le inevitabili perturbazioni provocate dalla presenza dei talloni, che sono ovviamente maggiori nelle sezioni più prossime alle estremità; allora 30 mm risulta una sorta di compromesso dall'aver risultati il più possibile "puliti" e deformazioni in un'altra sezione del campione significativa che non sia quella di mezzeria.

Una volta scelti gli estensimetri adatti al tipo di prova e al tipo di materiale da testare, coerenti cioè con lo stato deformativo che ci si aspetta dai calcoli e dalla teoria, questi devono essere fissati alla superficie del provino e successivamente collegati al sistema di acquisizione. Brevemente: vengono segnate sul campione le sezioni dove posizionare la linea media degli estensimetri, la superficie di resina del campione viene levigata per renderla più regolare possibile, la parte dove vanno applicate bassetta ed estensimetro va adeguatamente preparata per scongiurare l'insuccesso dell'incollaggio, dopodiché attraverso una colla bi-componente "ciano – acrilato" vengono fissati l'estensimetro vero e proprio e la base per il collegamento dell'alimentazione.

Prima di posizionare il campione sulla macchina di prova gli estensimetri sono collegati, attraverso un processo di stagnatura, ai cavi di alimentazione del circuito che contemporaneamente consentono l'acquisizione del segnale.



Figura 2.22 Provino con estensimetri posizionati e fissati in maniera corretta

Per ragioni di completezza si riportano alcuni cenni in merito alla fase di acquisizione dati e al tipo di strumentazione utilizzata.

Sostanzialmente, una volta posizionato il provino sulla macchina di prova, è necessario collegare gli strumenti di misura e la cella di carico ai dispositivi in grado di leggere, eventualmente amplificare, e trasferire il segnale al pc utilizzato per visualizzare e immagazzinare i dati.

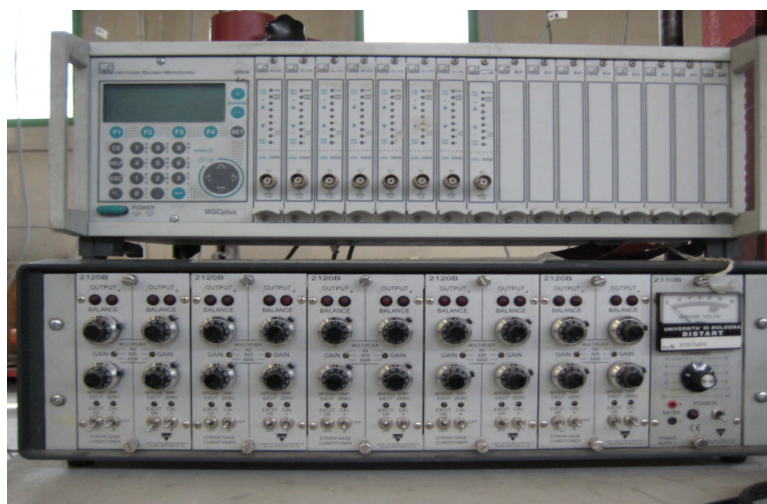


Figura 2.23 Centraline utilizzate per l'acquisizione dati

La cella di carico è uno strumento induttivo e deve essere collegato alla apposita centralina pluricanale “MGC” in cui l’ingresso è posto nella parte posteriore della macchina mentre l’uscita amplificata in quella anteriore. Detto sistema di acquisizione consente di rilevare fino ad un massimo di 8 strumenti induttivi.

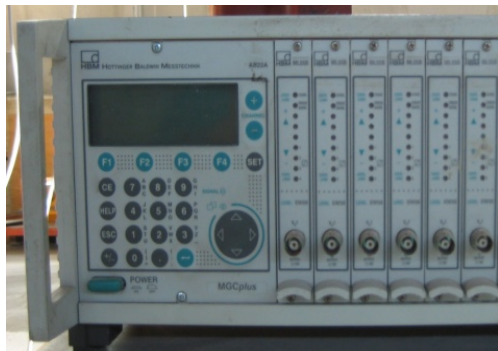


Figura 2.24 Uscita centralina MGC
(Parte anteriore)

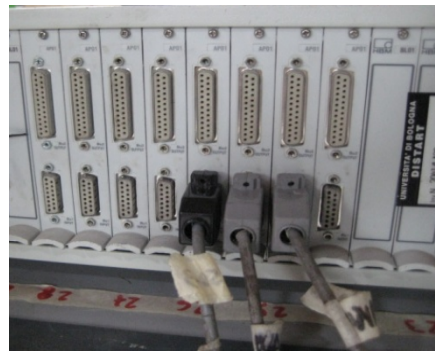


Figura 2.25 Ingresso centralina MGC
(Parte posteriore)

La centralina consente di memorizzare su di un prefissato canale tutti i parametri necessari alla lettura e amplificazione del segnale. I tre estensimetri vanno invece collegati ad un altro sistema di acquisizione che possiede un totale di dieci canali, che amplifica il segnale di strumenti a funzionamento resistivo e lo trasferisce al pc. L’ingresso e l’uscita sono in questo caso posti entrambi nella parte posteriore dello strumento.



Figura 2.26 Ingresso e uscita centralina per estensimetri (Parte posteriore)

Il sistema di acquisizione del segnale emesso dagli estensimetri consente il “bilanciamento” dello strumento ovvero consente di azzerare lo stress applicato al reticolo metallico in fase di montaggio.

Nelle prove di trazione sui canapini, è risultata di fondamentale importanza, la possibilità di variare, anche durante l’applicazione del carico, il fattore che amplifica il segnale ricevuto dall’estensimetro (gain).

Attraverso la piccola vite (particolare in figura 2.27) che può assumere tre valori, 2, 20 e 200 si può ridurre fino a due ordini di grandezza l’amplificazione del segnale. Il possibile settaggio, in corso di prova, dell’amplificazione del segnale, ed in particolare la sua riduzione è risultata di notevole utilità nel corso dei test sui campioni pluristrato che hanno mostrato grande capacità deformativa. In alcuni casi, pur essendo partiti con una bassa amplificazione del segnale, è comunque accaduto che alcuni estensimetri arrivassero al limite della propria deformazione.



Figura 2.27 Particolare vite che regola il gain di amplificazione della macchina

I cavi in uscita relativi alla cella di carico e agli estensimetri vanno poi collegati alla scheda di acquisizione dati attraverso cavi con connettori di tipo BNC. L'ordine di collegamento degli strumenti alla morsettiera definisce l'ordine dei vettori colonna all'interno dei quali vengono immagazzinati i dati rilevati in tempo reale grazie al programma Labview.



Figura 2.28 Morsettiera scheda di acquisizione dati e attacco cavi tipo BNC

2.3.5 Fase di prova – Rottura canapini:

La prova vera e propria inizia una volta che il campione è stato fissato alla macchina di prova e collegato adeguatamente al sistema di acquisizione dati.

In questa fase è fondamentale controllare che il provino sia disposto in posizione perfettamente orizzontale e allineato con l'asse del pistone che innesca la trazione, questo per non sottoporre il campione a stati di sollecitazione diversi da quelli ipotizzati.

La prima operazione da effettuare riguarda il settaggio di tutta la strumentazione applicata per il monitoraggio strutturale con imposizione di misura nulla per un carico applicato nullo.

Il controllo dello "0" per tutti gli estensimetri e la cella di carico viene effettuato in tempo reale grazie al software Labview.

Il programma possiede un'interfaccia grafica che permette di controllare istante dopo istante l'esecuzione della prova, perché riporta in tempo reale tutti i valori che sono registrati dagli strumenti di misura e dalle celle di carico, permettendo ad un dato momento di prova, il monitoraggio sia grafico che numerico della deformazione e del livello di carico raggiunti.

Settati gli strumenti di prova e la cella di carico, si inizia ad applicare lo sforzo al campione agendo sulla apposita manovella (vedi figure 2.16 e 2.18, pp. 48 e 50).

Per eseguire un test in cui la velocità di carico sia pressoché costante è necessario adeguare la velocità di rotazione del sistema di carico in base all'andamento del grafico Forza – Tempo plottato in tempo reale dal codice Labview.

Durante la prova, è capitato di udire dei rumori, sempre più frequenti all'aumentare della forza, simili a degli scricchiolii, che

evidenziavano con tutta probabilità la formazione di cricche nella resina e l'entrata in gioco della canapa, che nei primi istanti di prova offre un contributo evidentemente trascurabile.

Il tempo con cui si raggiunge la rottura del provino dipende dalla velocità con cui si agisce sul meccanismo di carico della macchina, anche se indicativamente ogni provino è stato portato a rottura in un tempo compreso tra i cinque e i dieci minuti.

La rottura è brusca e di tipo fragile, come suggerito dalla simulazione numerica, che delineava un comportamento elastico-lineare fino alla rottura di tipo fragile, quindi senza particolari segnali di preavviso.

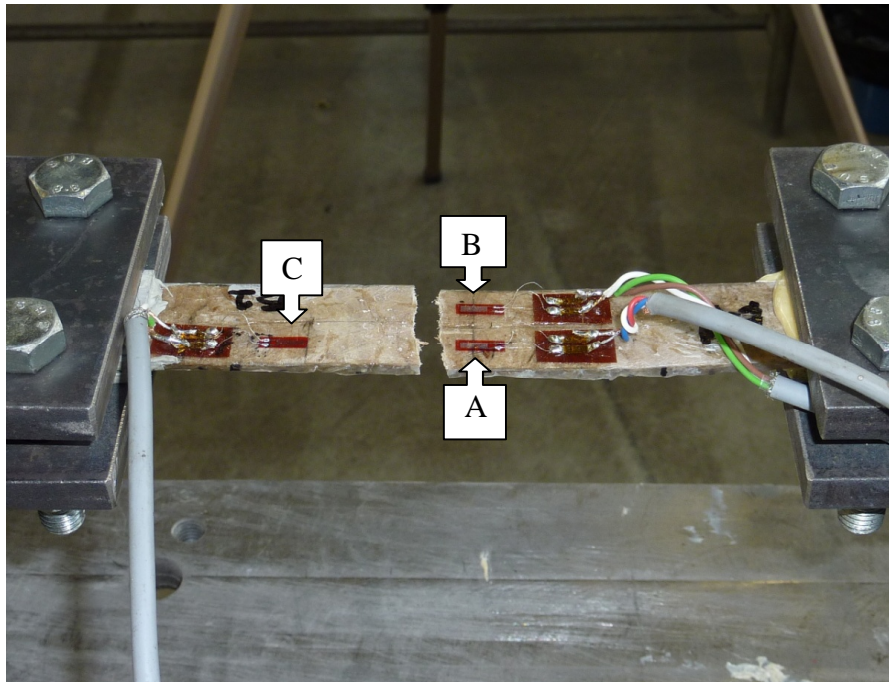


Figura 2.29 Canapino subito dopo la rottura ancora posizionato sulla macchina di prova

Labview, una volta terminata l'acquisizione, raccoglie i dati in un file di tipo ".dat", organizzato in colonne, che riportano ciascuna i valori assunti da una determinata grandezza, dall'inizio alla fine

della prova, le colonne sono collegate conformemente al collegamento degli strumenti della scheda di acquisizione.

I file prodotti dalla campagna sperimentale sono tutti caratterizzati da cinque colonne in cui compaiono in ordine: tempo, carico applicato, deformazione est. A, est. B, est. C (vedi figura 2.29).

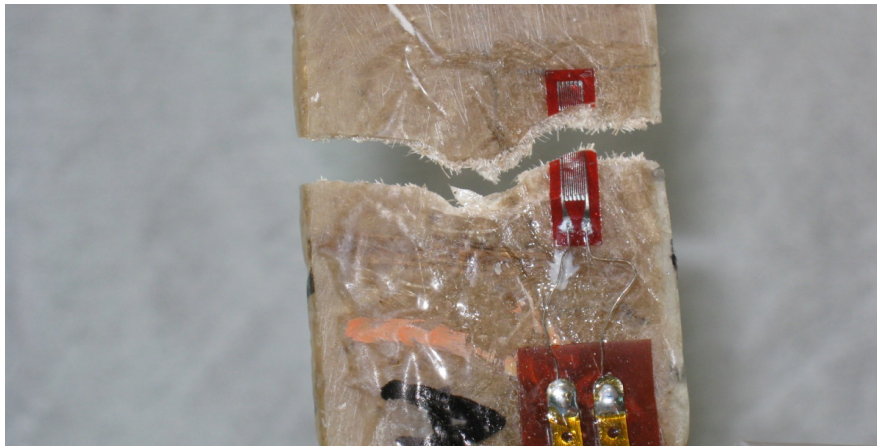


Figura 2.30 Particolare superficie di rottura del canapino

Durante tutte le prove a rottura, si è verificato raramente che due canapini si rompessero in corrispondenza della medesima sezione. Qualche campione ha raggiunto la rottura nelle sezioni prossime a quella di mezzeria, altri nelle sezioni prossime alle due estremità e uno dei nove campioni ha addirittura manifestato una crisi all'interno della parte confinata dai talloni di alluminio, probabilmente per un difetto presente in quella parte di fibra o per qualche errore legato ai processi realizzativi.

Le superfici di rottura sono risultate molto variabili, infatti se alcuni provini hanno mostrato una rottura netta, come se il provino fosse stato tranciato, altri provini hanno presentato una sezione di rottura molto frastagliata. In corrispondenza della sezione di crisi la resina mostra una superficie di rottura liscia e netta, mentre la canapa, in tutti i casi, dopo la rottura presentava fibre collassate orientate in direzione molto variabile.

Questo comportamento è evidentemente in accordo con quanto ipotizzato durante la fase di simulazione numerica, in cui il meccanismo di rottura presentava delle fibre che una alla volta raggiungevano la crisi e trasferivano lo sforzo alle fibre adiacenti ancora integre che possedevano ancora un margine di resistenza; localmente è difficile pensare che tutte le fibre si rompano nella stessa identica sezione, ma la rottura delle prime fibre provoca una concentrazione di tensioni elevate che porta alla rottura le fibre in una zona circoscritta. L'intero processo di rottura si sviluppa in pochi istanti.

2.3.6 Analisi dei risultati:

I file che Labview fornisce in uscita devono necessariamente essere rielaborati al fine di ottenere i legami costitutivi dei canapini ed interpretare così i risultati ottenuti durante le prove.

Il primo passo consiste nel trasferire i valori contenuti nel file di tipo .dat fornito da Labview, in un foglio di lavoro Excel per graficare l'andamento di forza e deformazioni monitorato nel corso dei test.

A questo punto inizia la parte di elaborazione vera e propria, infatti è in questa fase che si vanno ad omogeneizzare i valori misurati dagli estensimetri che hanno subito un'amplificazione differente durante il corso della prova, in modo da disporre di deformazioni tutte espresse in mm/m.

Disponendo quindi di un unico grafico Carico – Deformazione monitorata dai tre estensimetri, è possibile valutare quanto si discostano tra loro le misurazioni eseguite in punti differenti.

Dall'analisi delle deformazioni eseguita in tutti i canapini è emerso che a parità di carico applicato gli estensimetri in mezzzeria misurano deformazioni analoghe mentre l'estensimetro posto in prossimità del tallone di attacco alla macchina, subisce deformazioni maggiori. Detto strumento si trova in una zona di diffusione del carico, pertanto la misurazione è considerata non significativa.

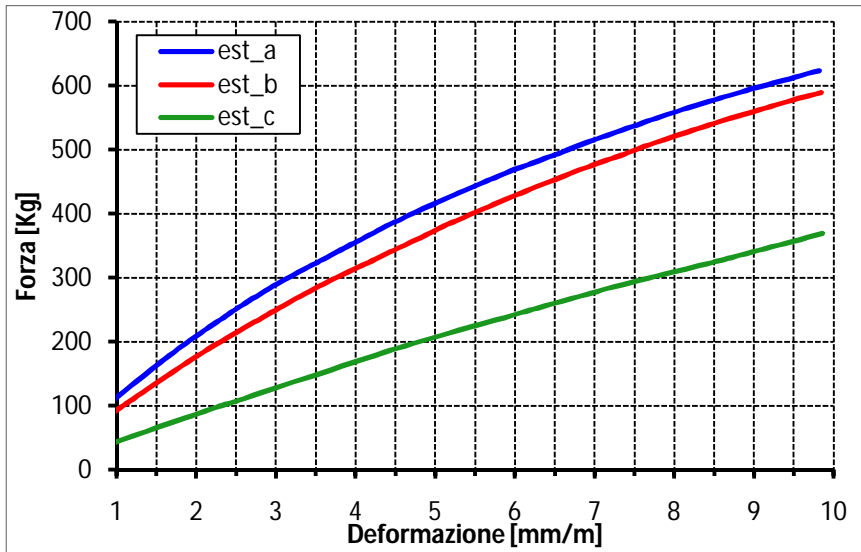


Figura 2.31 Grafico Forza - Deformazione estensimetri campione A1

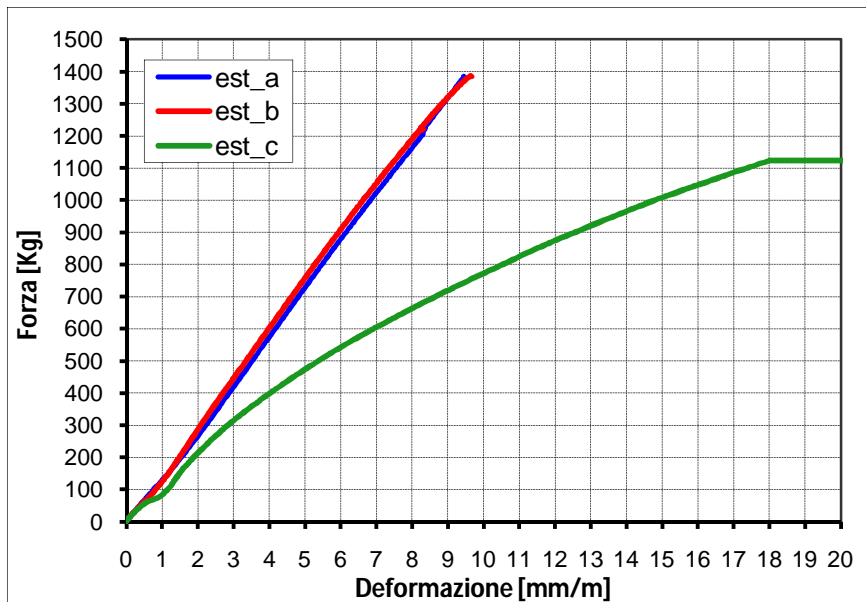


Figura 2.32 Grafico Forza - Deformazione estensimetri campione A2

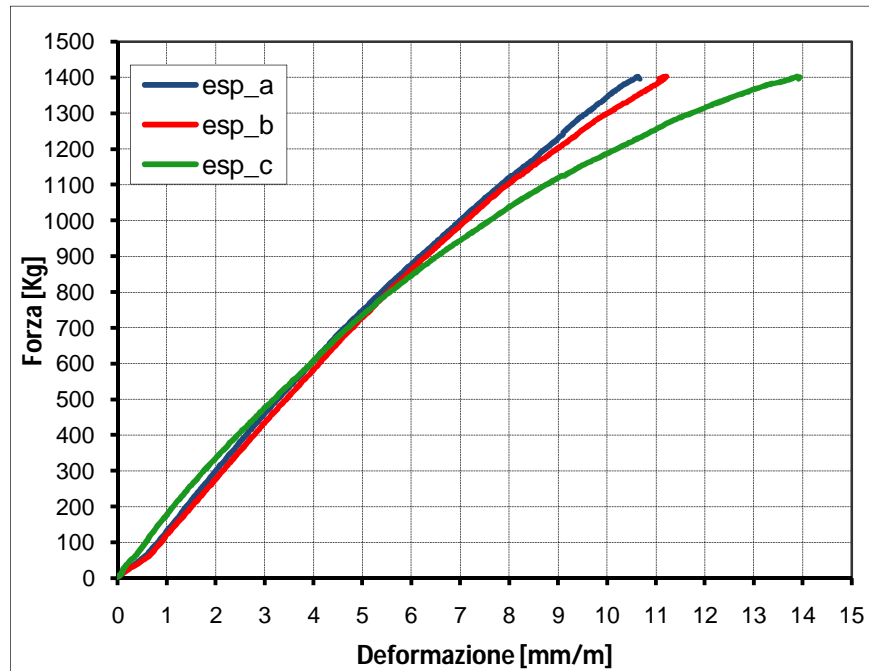


Figura 2.33 Grafico Forza - Deformazione estensimetri campione C3

Considerazioni conclusive sui grafici:

- A volte l'andamento si discosta dal lineare ma all'aumentare degli strati assomiglia sempre più ad una retta.
- La presenza di più strati fa in modo che le tensioni si distribuiscano uniformemente sul campione anche nelle zone prossime ai talloni di aggancio alla macchina di prova.

Oltre al grafico Forza – Deformazione viene realizzato anche quello che rappresenta la legge di applicazione del carico: il grafico Forza – Tempo.

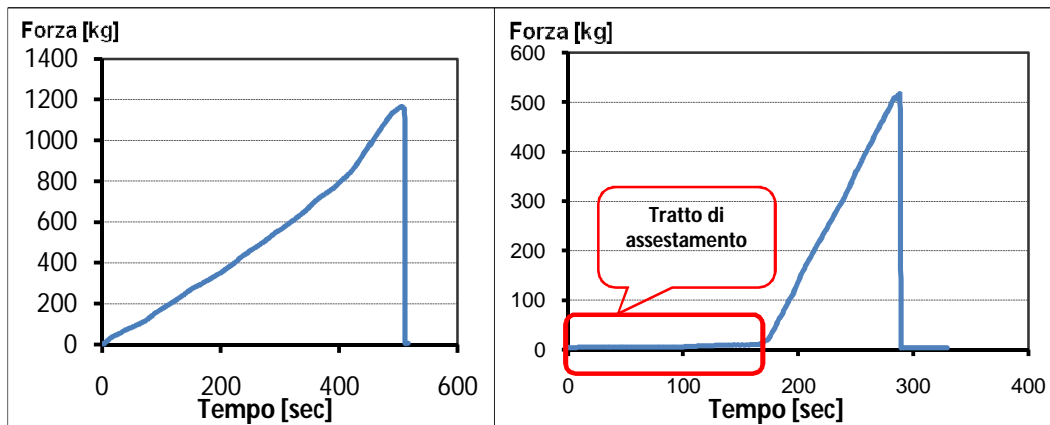


Figura 2.34 Grafico Forza-Tempo con e senza tratto di assestamento

Il grafico Forza - Tempo possiede lo stesso andamento per gran parte dei campioni testati, presentando un andamento pressoché lineare fino al punto di rottura del provino in cui si ha una cuspid e un successivo tratto verticale che arriva fino al valore di carico nullo.

In alcuni casi, nelle fasi iniziali del diagramma, si può osservare un tratto a pendenza pressoché nulla; ovvero, per livelli di carico modesti, il provino subisce degli assestamenti sulla macchina al termine dei quali inizia la vera e propria fase di sollecitazione del provino.

Nella fase di orientamento dei provini anche le deformazioni dei provini oscillano attorno al valore zero finché la curva Forza – Tempo non assume la pendenza maggiore, indice del vero e proprio inizio del test.

Per costruire il grafico del legame costitutivo la deformazione media è stata quindi ricavata come media delle due deformazioni misurate sulla sezione di mezzeria, mentre la tensione deve essere ricavata dalla forza attraverso l'area reagente.

Dai rilievi geometrici effettuati nelle fasi iniziali dell'attività sperimentale si è potuto ricavare un valore approssimato dell'area complessiva della sezione del provino moltiplicando la larghezza media per lo spessore medio.

Attraverso la fase di rilievo dei provini già descritta in precedenza e fissata la densità di canapa e resina dell'area lorda, è possibile ricavare l'area netta depurata dai vuoti (canapa + resina) e le singole aree sia di canapa che di resina.

La tensione ricavata considerando l'intera area del provino come omogenea, ovviamente non è molto significativa perché varia al variare soprattutto della quantità di resina usata per confezionare il campione e inoltre comprende anche i vuoti di aria intrappolati tra le fibre di canapa e tra la resina, che non possono essere considerati area efficace, quindi resistente a trazione.

Il confronto tra la tensione di rottura calcolata sull'area lorda e quella calcolata sull'area netta mostra come siano più significativi e rappresentativi del comportamento del materiale i grafici relativi alla tensione riferita all'area netta.

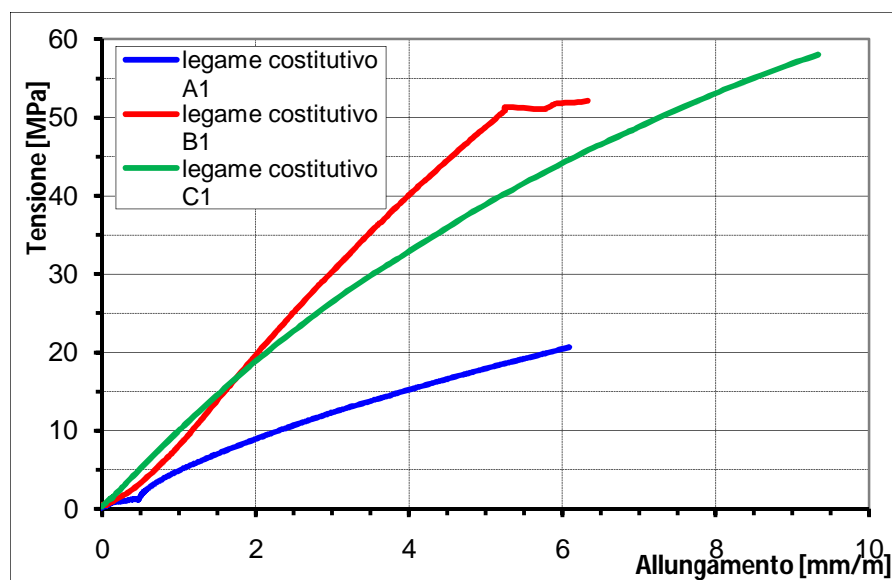


Figura 2.35 Legame costitutivo provini monostrato

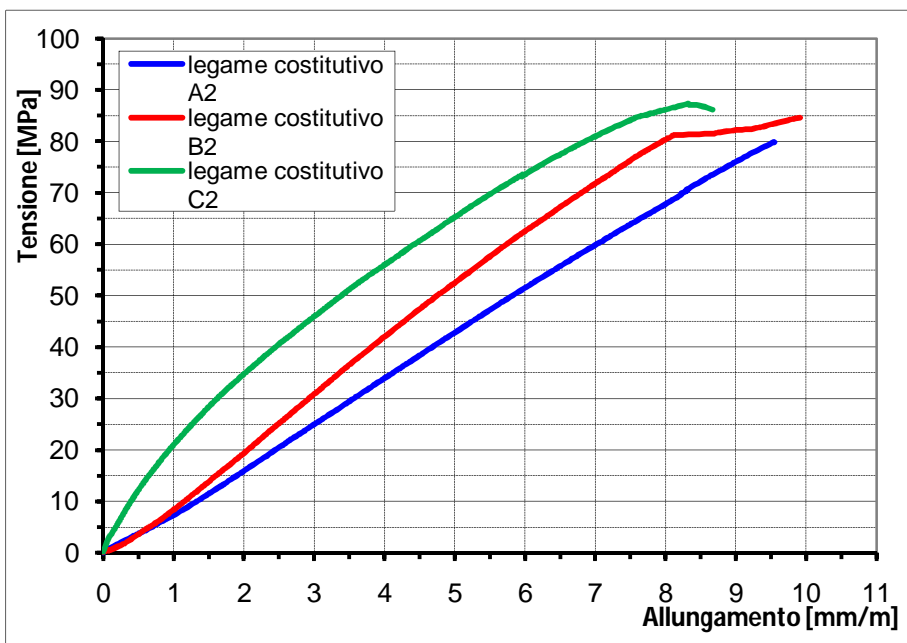


Figura 2.36 Legame costitutivo provini bistrato

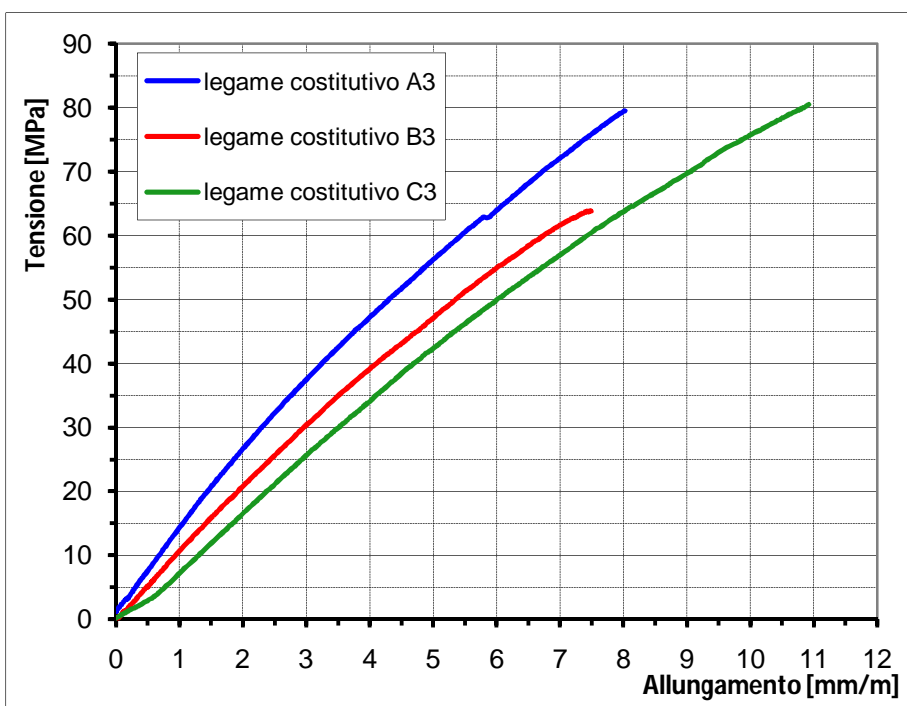


Figura 2.37 Legame costitutivo provini tristrato

Com'era logico aspettarsi già dall'analisi dei grafici Forza-Deformazione, anche l'andamento dei legami costitutivi dei campioni non si discosta molto dalla linearità, anzi in certi casi è

praticamente lineare se si escludono la parte iniziale e terminale del diagramma che rappresentano la fase di assestamento del campione e lo stato prossimo al collasso.

Dai grafici Tensione – Deformazione inoltre non emerge mai una brusca variazione di rigidità prima del collasso; si deduce quindi che il composito fibra – resina attiva una risposta globale fin dai primi passi di carico.

Come esemplificato nei grafici Forza – Deformazione di figura 2.31, 2.32 e 2.33 (pp. 62 e 63), si nota che per problemi di natura tecnica alcuni estensimetri perdono la capacità di rilevare la deformazione prima del collasso strutturale; la forza che determina la crisi è invece sempre nota in quanto misurata grazie alla cella di carico.

Per questo motivo le curve dei legami costitutivi riportate in precedenza, a volte si interrompono prima del vero e proprio collasso strutturale.

Osservando i grafici σ/ε delle tre serie emerge comunque chiaramente come il comportamento dei campioni sia molto prossimo a quello di un materiale elastico lineare.

Ogni singolo legame costitutivo è stato quindi approssimato ad una retta di migliore approssimazione mediante il metodo dei Minimi Quadrati.

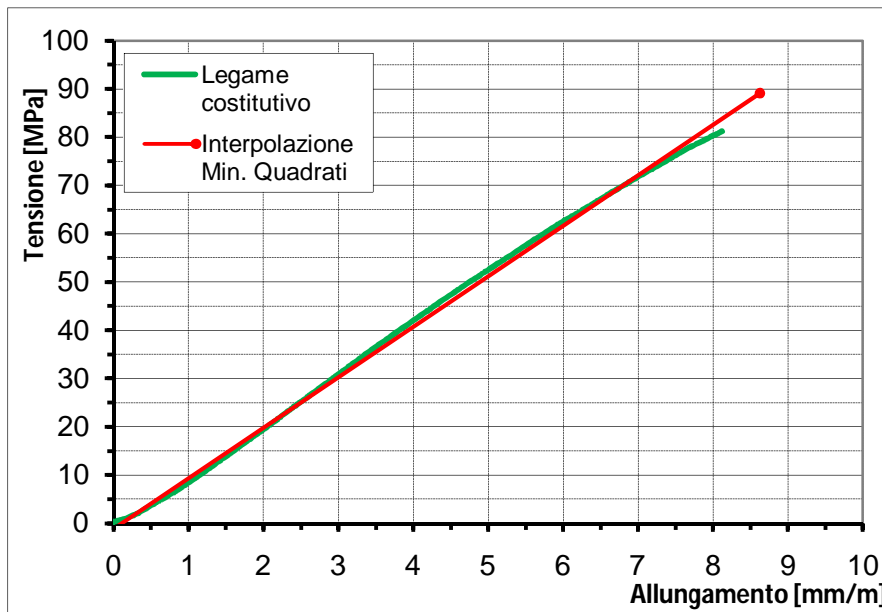


Figura 2.38 Grafico Legame Costitutivo con curva reale e retta ottenuta dall'approssimazione

Brevemente, questa operazione permette, data una serie di coppie di misure x e $y = f(x)$, di trovare la retta che meglio approssima la stessa serie di dati.

Per lo studio in esame l'approssimazione del legame costitutivo alla retta di migliore approssimazione consente altresì di eseguire delle stime relative a dati che altrimenti non sarebbe possibile ottenere direttamente attraverso le prove a trazione.

Nel nostro caso, eseguita l'approssimazione, è stato possibile ricavare in automatico la pendenza della retta, quindi una stima del Modulo elastico del materiale composito, oltre che una stima della deformazione ultima qualora non direttamente misurata, essendo nota la tensione ultima a rottura.

A questo punto è stato possibile quantificare, per ogni curva, quanto il comportamento si discosti dall'andamento lineare. Nei casi in cui la retta ai Minimi Quadrati è risultata molto distante dall'andamento

misurato (provini C1 e C2), il modulo elastico e la deformazione ultima a rottura dei campioni sono stati determinati tramite approssimazione del legame con la retta secante ottenuta collegando l'origine all'ultimo punto di misura disponibile sulla curva.

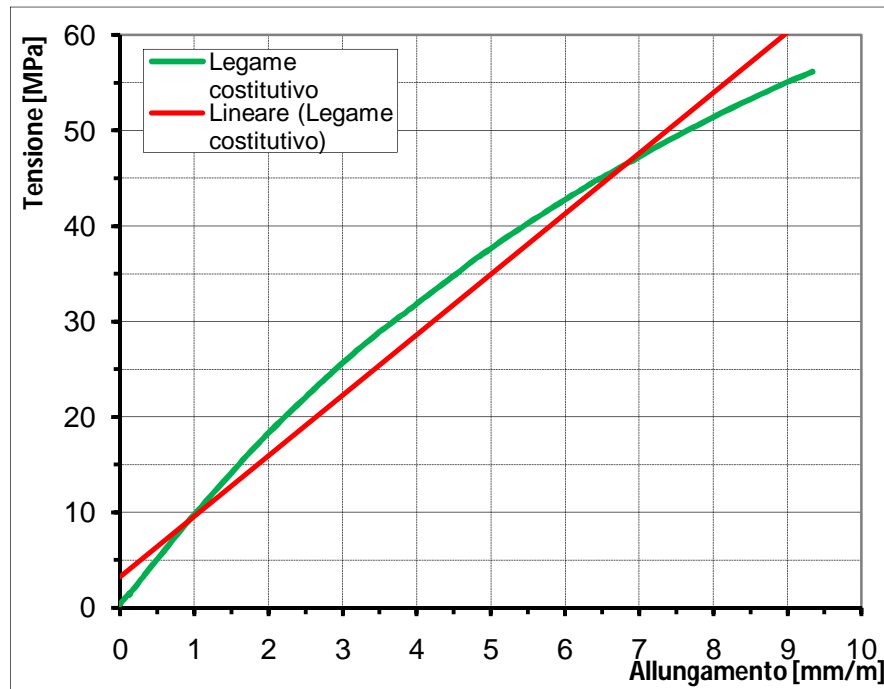


Figura 2.39 Grafico Legame Costitutivo con curva reale e retta ottenuta dall'approssimazione (Provino C1)

Grazie a questa serie di operazioni è stato riscontrato che nella maggioranza dei casi considerare il comportamento del composito come elastico lineare, genera un'approssimazione sufficientemente piccola con errori commessi sulla valutazione di Modulo Elastico e Deformazione ultima a rottura di piccola entità rispetto al valore assunto dalle grandezze in gioco.

2.3.7 Discussione dei risultati:

Lo scopo di questa attività sperimentale è in primo luogo quello di determinare le caratteristiche meccaniche di campioni in composito realizzati con tessuti in fibra corta di canapa multi direzionale immersi in matrici di resina e, come esse si modificano al variare delle percentuali in volume di resina per campioni a parità di strati di tessuto o al variare del numero di strati di fibra.

Non bisogna dimenticare, per una corretta discussione dei risultati, che lo studio ha interessato rinforzi di fibra di origine naturale e che quindi il comportamento di questi è governato dalla inevitabile dispersione rispetto ad un certo valore medio dei parametri meccanici di fibra e resina oltre che dalla casualità nell'orientamento delle fibre nel tessuto.

La prima parte dell'analisi dei dati si è concentrata sulla elaborazione dei risultati ottenuti durante le prove in laboratorio, in modo da evidenziare aspetti comuni nel comportamento di tutti i provini.

Indipendentemente dalle percentuali di resina e dal numero di strati di fibra, si è osservato come tutti i campioni presentino un comportamento simile, caratterizzato da una linearità quasi assoluta fino al punto di rottura, e che detta crisi viene raggiunta in maniera improvvisa e senza alcun segno di decadimento locale o generale, se si esclude qualche scricchiolio udito sempre con maggior frequenza durante la prova all'aumentare del carico impresso, ovvero all'avvicinarsi al collasso.

Si può quindi affermare che tutti i compositi in canapa resinata realizzati presentano un comportamento tenso - deformativo di tipo elastico - lineare, e che sono caratterizzati da una rottura fragile.

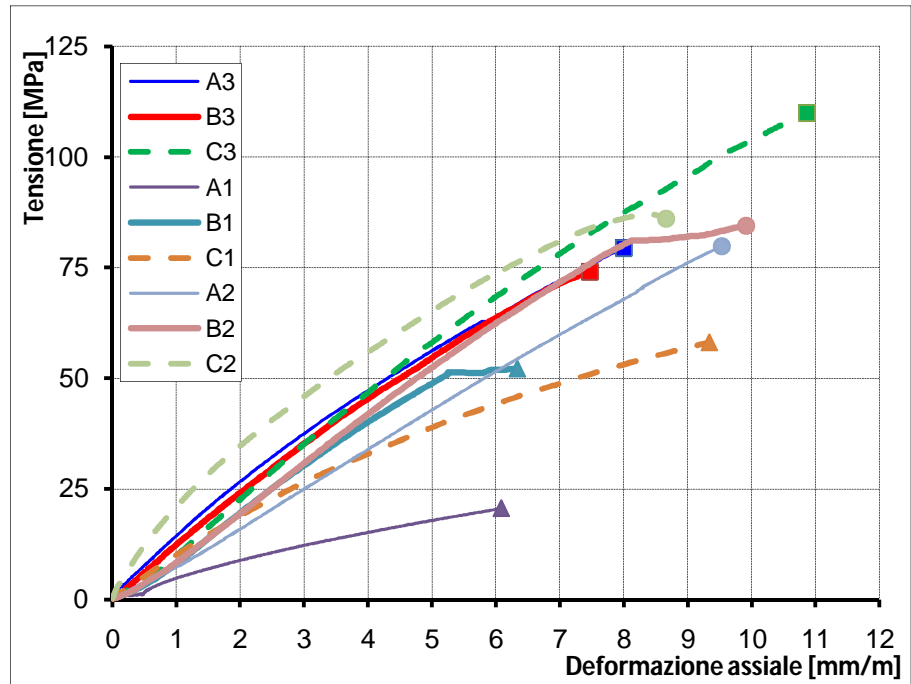


Figura 2.40 Diagramma Legge Costitutiva

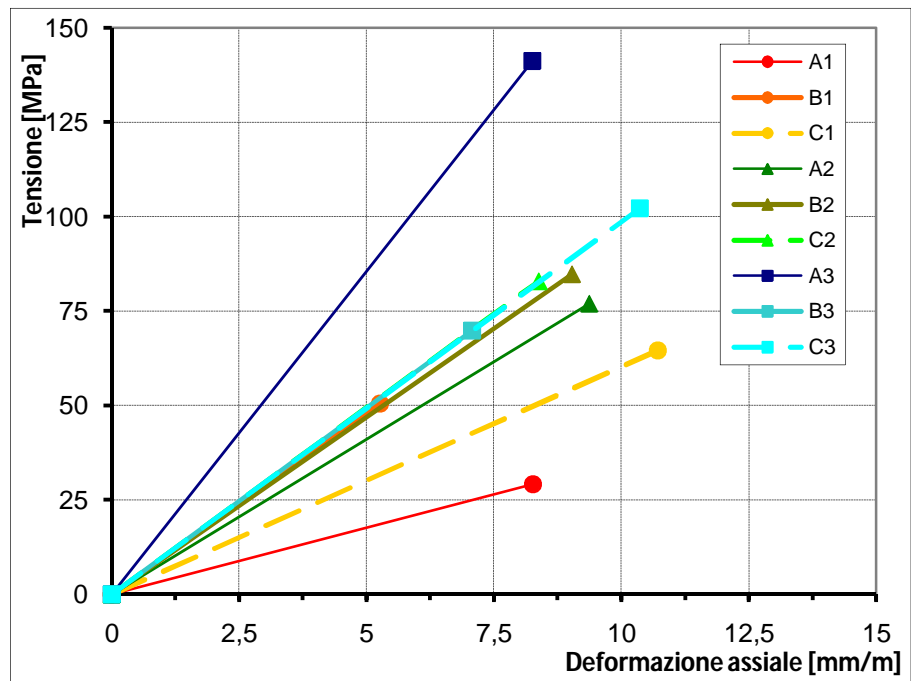


Figura 2.41 Diagramma Legge Costitutiva linearizzato

Come è logico aspettarsi, in linea generale, all'aumentare del numero degli strati di canapa contenuti nel campione, aumenta la forza massima sopportabile: si passa da un minimo di circa 129 Kg (C1) ad un massimo di 1.396 Kg (C3).

Questo aspetto emerge molto bene rappresentando il diagramma della forza massima sopportabile da ogni provino in funzione del contenuto di fibra al metro, espresso in gr/m (figura 2.42):

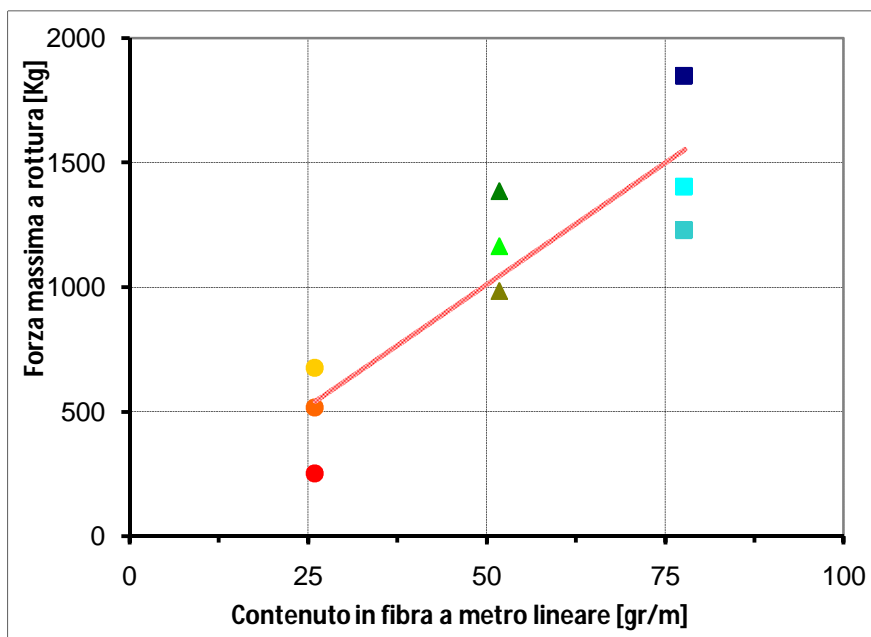


Figura 2.42 Grafico Forza massima - Contenuto di fibra al metro lineare

Infatti si nota come le tre serie di campioni, mono, bi e tri strato, siano praticamente disposte su una linea retta che passa per l'intersezione degli assi dimostrando che per una quantità di fibre praticamente nulla la forza sopportabile è pari a 0 Kg.

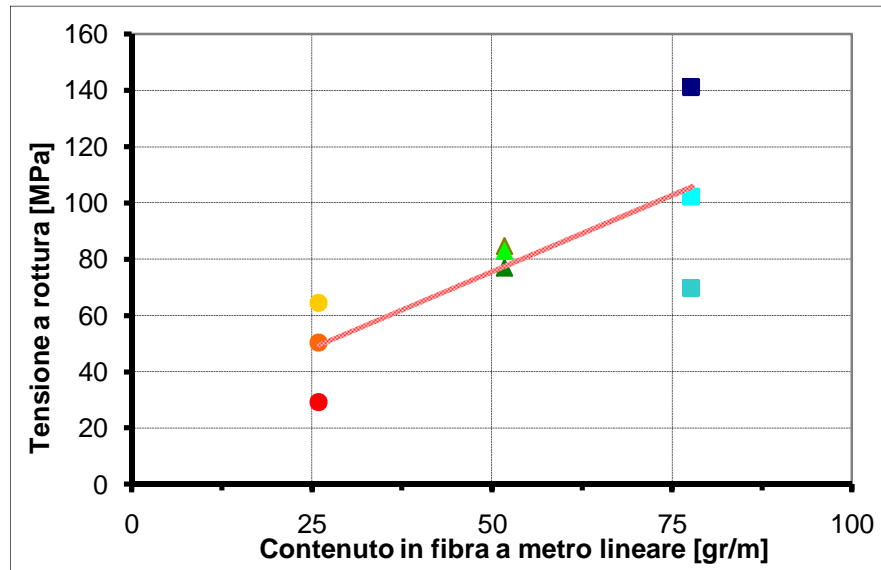


Figura 2.43 Grafico Tensione a rottura - Contenuto di fibra al metro lineare

Anche la tensione massima aumenta ma con un'escursione minore, perché pur aumentando la forza aumenta anche l'area resistente al netto dei vuoti, si passa quindi dai 30 MPa (A1) ad oltre i 100 MPa (A3). Ovvero si passa da tensioni a rottura equiparabili alla tensione massima sopportabile dalla semplice resina, a valori più che doppi che denotano l'attivazione d'insieme del composito.

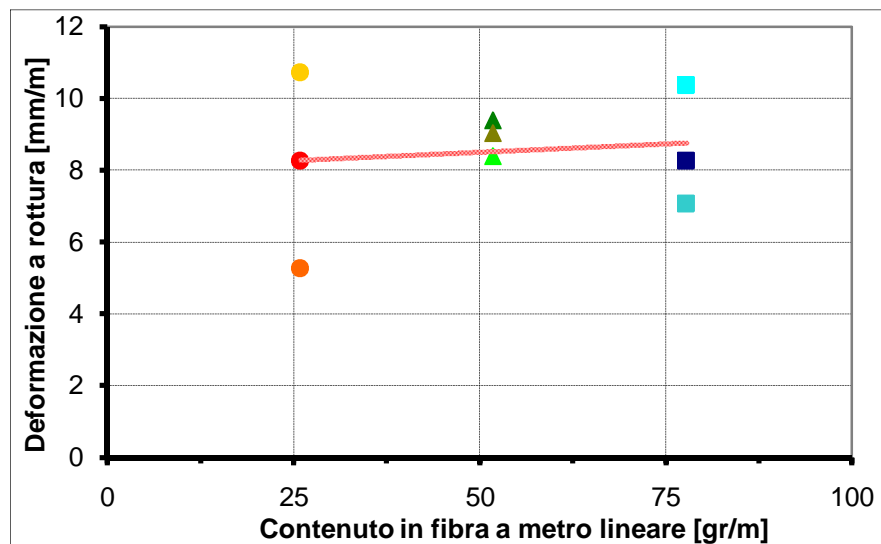


Figura 2.44 Grafico Deformazione a rottura - Contenuto di fibra al metro lineare

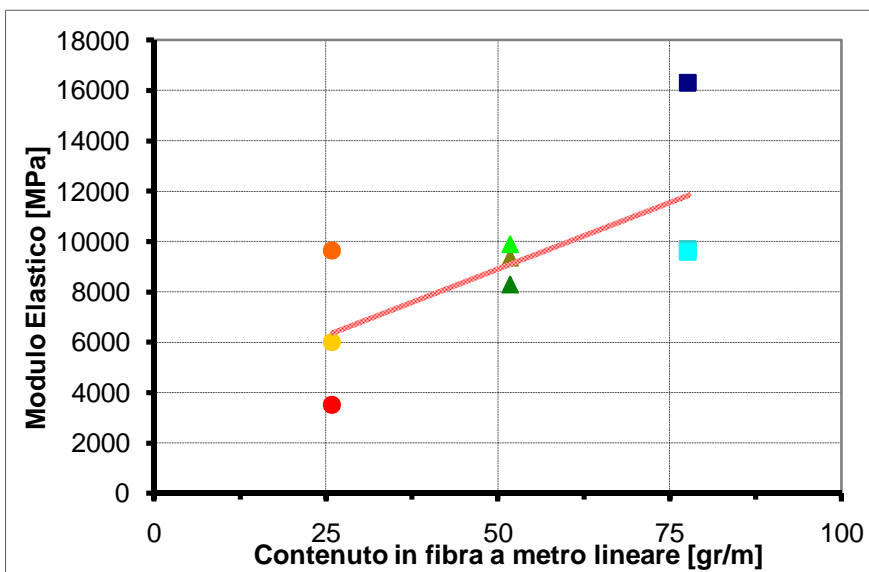


Figura 2.45 Grafico Modulo elastico - Contenuto di fibra al metro lineare

Particolarmente interessante e significativo risulta il confronto tra i risultati delle prove ottenuti considerando l'area netta dei campioni o l'area lorda, ovvero senza considerare l'aria intrappolata all'interno tra le fibre o tra la resina; si ricorda infatti che il volume di aria intrappolato all'interno di ogni provino non può ovviamente contribuire alla resistenza a trazione, pertanto valutare la tensione attraverso l'area lorda può risultare fortemente fuorviante nei casi in cui i vuoti costituiscano una parte considerevole del composito.

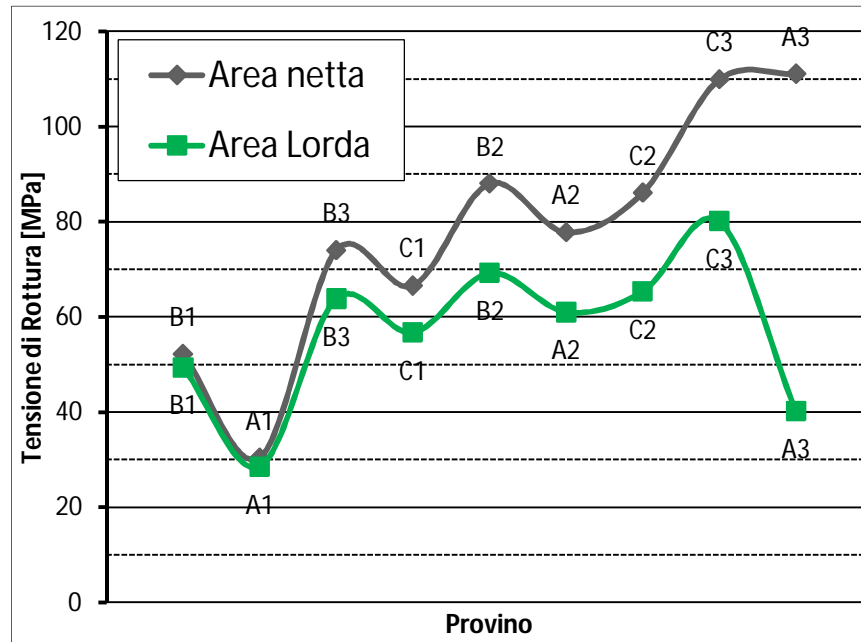


Figura 2.46 Grafico che rappresenta la differenza del valore di Tensione a rottura calcolato considerando l'area netta del campione o l'area lorda

Come mostrato chiaramente dal grafico di figura 2.46 considerando la presenza di aria, l'area che resiste allo sforzo di trazione applicato al provino diminuisce con conseguente aumento della tensione agente complessivamente su resina e canapa.

La dispersione tra le due curve aumenta all'aumentare del numero di strati del campione, questo a causa della maggior presenza di vuoti. Per ragioni di ordine tecnico risulta infatti più difficoltoso impregnare efficacemente un composito multistrato; pertanto nei compositi bi e tri strato si rilevano delle percentuali di vuoti più elevate.

Analogamente si riporta il rapporto anche in termini di modulo elastico:

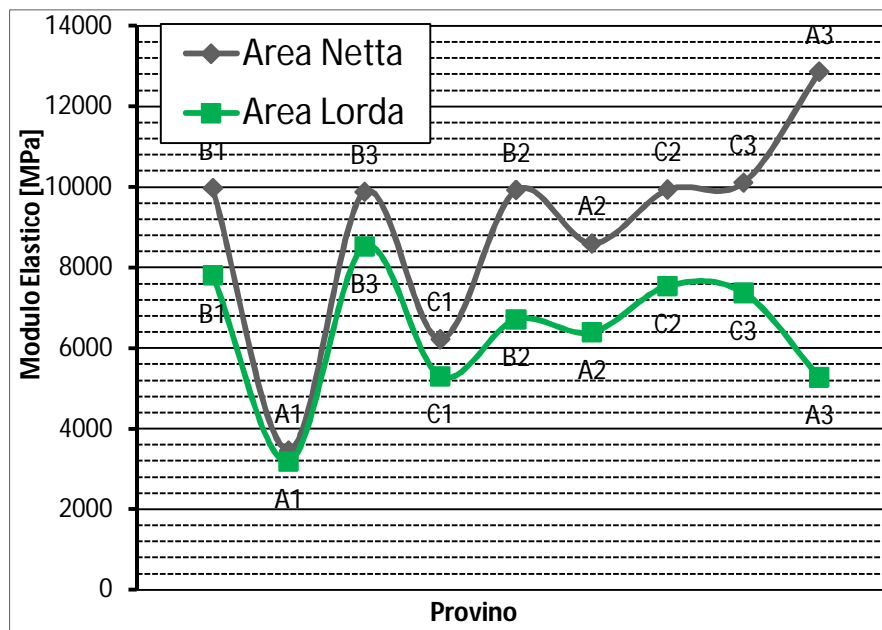


Figura 2.47 Grafico che rappresenta la differenza del valore di Modulo elastico calcolato considerando l'area netta del campione o l'area lorda

L'effetto dei vuoti è analogo a quello visto per la tensione massima.

Richiamando la caratterizzazione della composizione dei provini riportata al termine del paragrafo “Operazioni di misura e peso dei provini”, si può procedere ad una interpretazione più dettagliata della crisi dei campioni. Al crescere della percentuale in volume di fibra sul totale, la tensione di rottura tende ad aumentare fino a raggiungere un valore soglia molto maggiore del limite a trazione della resina.

Questo in ragione del fatto che è la canapa a divenire l'elemento resistente a trazione e non la resina che assume solo funzione di collante tra le fibre.

Nei grafici a seguire si riportano gli andamenti della tensione a rottura, allungamento a rottura e modulo elastico espressi in

funzione del rapporto tra l'area di fibra rispetto all'area totale al netto dei vuoti.

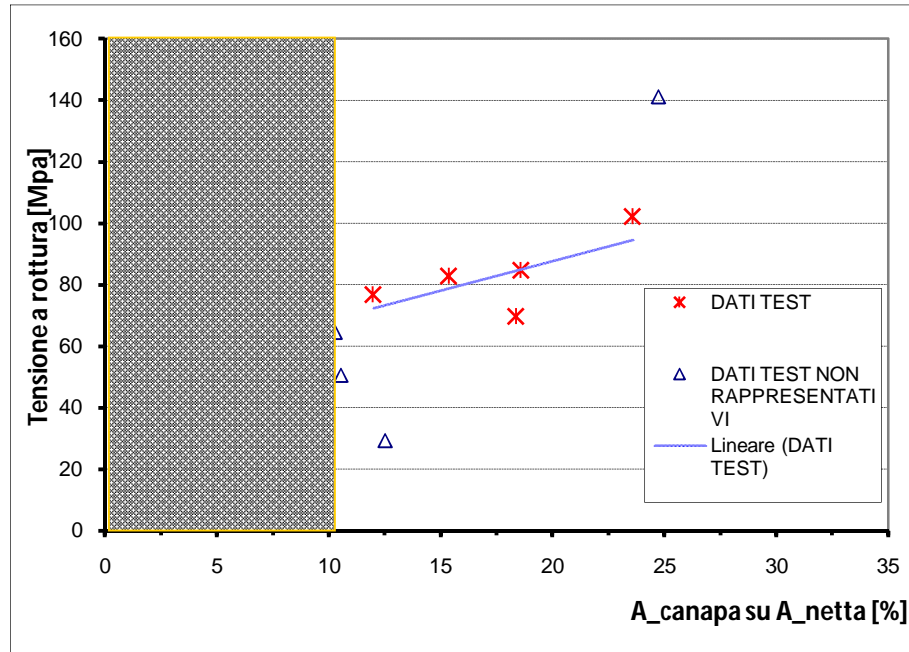


Figura 2.48 Grafico della dispersione dei valori di Tensione a rottura - Area canapa/Area netta

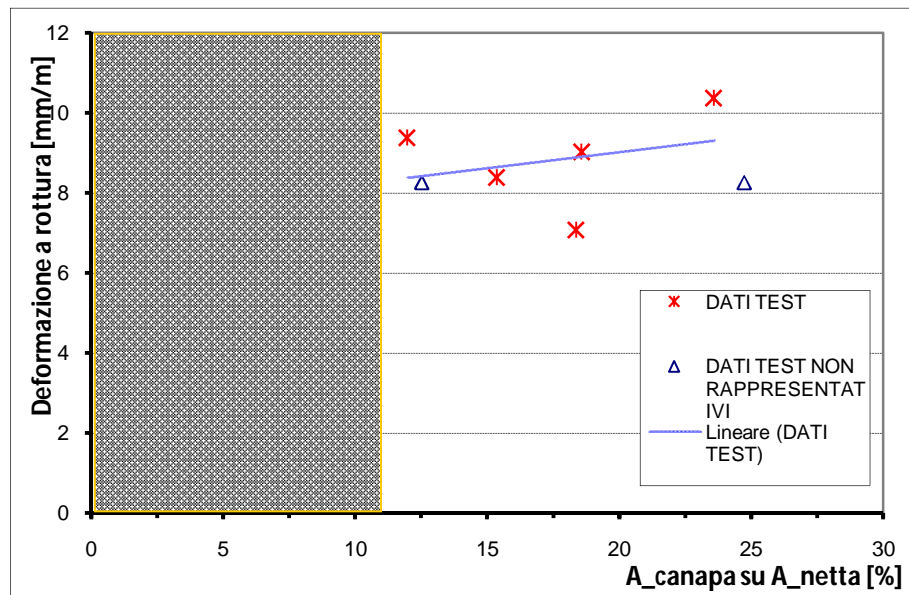


Figura 2.49 Grafico della dispersione dei valori di Deformazione a rottura - Area canapa/Area netta

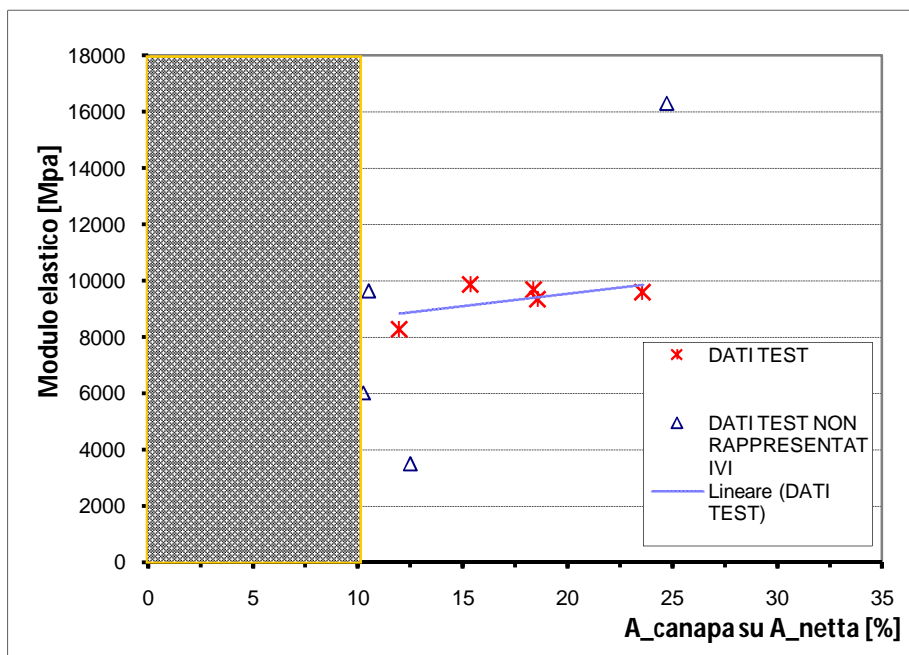


Figura 2.50 Grafico della dispersione dei valori di Modulo elastico - Area canapa/Area netta

Nei grafici vengono isolati come non rappresentativi tutti i campioni mostrati in quanto caratterizzati da risultati molto dispersi.

La percentuale di fibra contenuta rispetto al totale spesso inferiore al 10 – 12 % li rende campioni a composizione principale di resina.

A tal proposito si segnala che il campione A1 collassa alla tensione di 30 MPa pari alla resistenza a trazione della resina.

Sono stati considerati significativi solo i dati che si distribuivano in un'area di dimensioni modeste e che quindi presentavano valori piuttosto simili tra loro, tanto da poter tracciare una retta che potesse approssimarne l'andamento. La parte evidenziata infatti indica i valori esclusi perché già per il valore del rapporto area efficace su area totale i dati di questi campioni sarebbero risultati poco indicativi.

I dati nel complesso risultano abbastanza compatti, soprattutto per quel che riguarda tensione a rottura e modulo elastico, mentre nel

grafico della deformazione a rottura la dispersione è leggermente più marcata.

Escludendo i valori non rappresentativi, i restanti punti sui grafici sono stati fittati linearmente attraverso il metodo dei Minimi Quadrati. La buona approssimazione dei punti sperimentali con le curve ipotizzate ci permette di affermare che all'aumentare della percentuale di canapa costituente l'area efficace, la massima tensione sopportabile incrementa molto rapidamente, mentre per ciò che concerne il modulo elastico e conseguentemente la deformazione ultima, si rilevano benefici molto meno evidenti.

È evidente come il modulo elastico degli otto campioni, escludendo A1, aumenta all'aumentare del numero di strati di canapa immersi nel campione; infatti la resina possiede una propria rigidità, ed è presente in quantità diverse ma non tali da variare di molto il valore del modulo elastico, quindi la differenza è provocata dalla percentuale in volume di canapa e dal numero di strati.

Possiamo affermare che i campioni testati presentano un comportamento omogeneo e dei valori delle grandezze meccaniche convergenti in un intervallo di valori abbastanza ristretto.

3. ATTIVITÀ SPERIMENTALE RELATIVA ALLA FIBRA DI CANAPA SECCA:

3.1 Introduzione:

Terminata la parte sperimentale relativa ai campioni in materiale composito composti da fibra di canapa e resina, per meglio interpretare i risultati relativi a detti provini e comprendere il reale comportamento della fibra di canapa si è deciso di proseguire l'attività sperimentale testando campioni di fibra di canapa secca.

Infatti i provini che sono stati testati in questa fase, non rappresentavano dei campioni di materiale composito come nella prima parte della sperimentazione, ma erano dei semplici fasci di fibra di canapa sciolta opportunamente preparati che sono stati portati a rottura attraverso l'applicazione di sforzi di trazione uniassiale nel loro piano.

Questa seconda fase dell'attività, per certi versi è risultata più complessa e delicata perché ha visto anche la realizzazione dei campioni, aspetto che nella prima fase era stato bypassato poiché i provini da testare erano stati forniti da una azienda esterna alla facoltà.

Sono stati quindi realizzati una quindicina di campioni tutti diversi tra loro ma comunque riconducibili a tre serie distinte, realizzati assemblando piccoli fasci di fibre opportunamente selezionati e tali da mostrare lunghezza delle fibre e valori del peso di fibra al metro lineare simili tra loro.

La fase di costruzione dei provini non ha interessato solamente la parte iniziale della sperimentazione, ma è proseguita per parte della sua durata, poiché dopo i primi test a rottura sono stati riscontrati dei

difetti costruttivi nei provini che erano causa di risultati leggermente anomali e difficili da interpretare.

Durante la fase di analisi dei risultati è infatti emerso che la preparazione dei provini necessitava di grande precisione e peculiarità da parte dell'operatore, perché uno degli aspetti che influenzava maggiormente il risultato era l'allineamento delle fibre.

I campioni, privi dei talloni di aggancio alla macchina, sono successivamente stati pesati e accuratamente misurati in modo da poter determinare la quantità di fibra di canapa che resisteva allo sforzo di trazione applicato dalla macchina di prova. Questa operazione è risultata di fondamentale importanza nella fase di analisi dei risultati perché i talloni dei provini realizzati precedentemente in vetroresina, dovevano essere esclusi dal peso complessivo del provino per stabilire il peso della fibra effettivamente reagente a trazione.

La definizione della lunghezza netta del sistema è invece stata definita successivamente alla applicazione dei talloni.

Dopo la fase di caratterizzazione dei provini, si è passati alla fase di rottura e acquisizione dati con le stesse macchine e gli stessi strumenti utilizzati per la parte di test relativa ai canapini in composito.

Anche in questo caso l'ultima parte della fase sperimentale si è concentrata sull'analisi dei dati ottenuti dalle prove attraverso dei file Excel; i risultati complessivi sono rappresentati sotto forma di grafici che permettono di valutare le caratteristiche meccaniche cercate come tensione ultima a rottura, deformazione ultima a rottura e modulo elastico.

3.2 Attività di laboratorio:

L'attività di laboratorio si è sviluppata in più fasi successive che hanno visto rispettivamente:

- Selezione del materiale e Realizzazione dei provini
- Operazioni di misura e peso dei provini
- Preparazione dello schema di prova, esecuzione della prova e acquisizione dei dati
- Analisi dei risultati
- Discussione dei risultati e conclusioni finali

3.2.1 Selezione del materiale e Realizzazione dei provini:

I campioni sui quali sono state eseguite le prove sono stati realizzati direttamente dal personale del laboratorio in maniera integrale.

La canapa era stata fornita sotto forma di grossi grovigli di fibra lunga arrotolati tra loro che necessitavano innanzitutto di essere divisi tra loro in fasci di dimensione minori.



Figura 3.1 Particolare relativo a residui di corteccia presenti nelle fibre di canapa

Terminata questa prima fase, per la realizzazione dei campioni di fibra di canapa secca che dovevano essere testati, è iniziata la fase della selezione vera e propria delle ciocche di fibra che sarebbero andate poi a comporre il provino, quindi sono stati individuati e selezionati i fasci che contenevano la minor quantità possibile di residui di corteccia ancora attaccati alle fibre (vedi figura 3.1) e che presentavano un allineamento delle fibre migliore.



Figura 3.2 Provino B2 dove si notano i diversi fasci di fibra distinti che vanno a comporre l'intero campione

Isolati i fasci di fibra, questi sono stati associati tra loro fino a formare dei fasci di dimensioni maggiori che presentavano valori di peso di fibra al metro lineare uniformi; questi sono stati pettinati longitudinalmente con una semplice spazzola per capelli con lo scopo di migliorare l'allineamento delle fibre, eliminare eventuali residui di corteccia e togliere le fibre danneggiate e sfibrate che non avrebbero contribuito in fase di prova a resistere a trazione, ma che sarebbero state conteggiate sia nelle operazioni di peso che in quelle di misurazione.

Per realizzare campioni con le fibre più allineate possibile in modo che lo sforzo si distribuisse in maniera più uniforme e che le fibre si attivassero tutte nel medesimo istante, durante la costruzione i fasci di fibra sono stati sistemati su un telaio creato appositamente in laboratorio: i fasci di fibra erano legati da una estremità ad una barra

in alluminio mentre dall'altra estremità erano stretti tra due piccoli magneti che fungevano da peso e che venivano poi calati nel vuoto in modo da mettere in leggera tensione la fibra. Per mantenere il fascio in tensione, in certi casi è stato necessario sistemare delle piastre di acciaio più pesanti nelle sezioni intermedie del provino.



Figura 3.3 Fasi intermedie di realizzazione dei campioni

La prima serie di campioni, presentava delle dimensioni che oscillavano attorno ai seguenti valori: lunghezza delle fibre pari a 500 mm, larghezza del fascio di fibre pari a 70-80 mm e peso al metro lineare di fibra pari a 50-52 gr/m, per uno spessore resistente della fibra che variava da un minimo di 0.298 mm a un massimo di 0.357 mm.

La seconda serie di campioni, presentava delle dimensioni simili a quelle della prima ma che differivano principalmente per la lunghezza del fascio di fibre. Infatti le lunghezze in questo caso presentavano dei valori praticamente dimezzati rispetto a quelli della prima serie che oscillavano attorno ai 250-300 mm, con larghezze del fascio di fibre pari a 70-80 mm e peso al metro lineare di fibra intorno a 50 gr/m, come per i provini della prima serie.



Figura 3.4 Prima serie di campioni

La terza serie di campioni è quella che si differenzia di più dalle prime due perché sia i valori della lunghezza delle fibre che del peso al metro lineare si discostano molto da quelli ottenuti nei primi due casi: la serie era composta da sette campioni con lunghezze attorno ai 200 mm e peso della fibra al metro lineare che varia dai 4 ai 12 gr/m.

Lo spessore di fibra resistente è simile a quello delle serie precedenti, essendo questi provini decisamente più stretti trasversalmente per permettere al fascio di mantenere un aspetto “compatto”.

Il passaggio più complesso è stato quello della realizzazione dei talloni: il problema principale era legato al fatto che tutte le fibre al momento dell'applicazione del carico dovevano attivarsi, senza dei movimenti relativi tra loro che avrebbero inficiato i risultati della prova.

Allo stesso tempo però, così come per le prove di trazione svolte sui canapini in composito, i talloni non dovevano essere costituiti da materiale troppo rigido rispetto al materiale testato per un trasferimento degli sforzi uniforme e che non danneggiasse la fibra nelle zone prossime a quelle di attacco alla macchina. In un primo momento si era pensato di risolvere il problema utilizzando semplicemente delle piastrine in neoprene² che sarebbero servite per stringere il fascio di fibra tra le due piastre in acciaio di attacco della macchina, quella fissa e quella mobile da cui si impone lo sforzo di trazione. Il timore era quello che così facendo, le fibre che non erano a diretto contatto con le piastre in gomma, difficilmente sarebbero rimaste solidali alle altre e avrebbero offerto un contributo resistente a trazione.

Il problema è stato risolto optando per dei talloni in vetroresina, che pur necessitando di una lavorazione molto più delicata e lunga dei talloni in neoprene, garantivano però un risultato eccellente perché la resina, presentandosi allo stato liquido al momento dell'impregnazione, riusciva a penetrare all'interno del fascio di fibre e ad imbeverare anche le fibre più interne.

La vetroresina è diventata negli ultimi anni un materiale facilmente reperibile e molto impiegato perché viene utilizzata da molti settori dell'industria (automobilistico, nautico ...).

² Il neoprene è stato il primo residuo della gomma sintetica prodotto a larga scala. Esso appartiene alla famiglia degli elastomeri di sintesi (ovvero delle gomme sintetiche) e si presenta come una gomma porosa, la cui massa è costituita da cellule gassose uniformemente distribuite. Le principali caratteristiche sono la elasticità, la resistenza al taglio e allo schiacciamento, la resistenza all'invecchiamento atmosferico e al calore, ed inoltre risulta essere inerte verso molti agenti chimici, oli e solventi. Per questi motivi trova importanti applicazioni nel campo dell'industria chimica, automobilistica, nautica, e nella realizzazione di raccordi, guarnizioni, rivestimenti protettivi e indumenti.

L'attrezzatura necessaria si compone principalmente di tre elementi base: il mat (tessuto sottile composto da fibre di vetro di diversa lunghezza disposte con un'orientazione completamente casuale) che viene fornito sottoforma di fogli di dimensione standard e che in fase di esecuzione deve essere poi sagomato in pezzetti di dimensioni minori, la resina vera e propria, generalmente resina poliesteri, e l'induritore liquido apposito.



Figura 3.5 Resina induritore e mat in fibra di vetro utilizzati per la realizzazione dei talloni in vetroresina

La realizzazione del tallone avviene per fasi successive poiché per indurire completamente, la resina ha bisogno di un tempo di essiccazione che varia dall'ora alle due ore a seconda sia della quantità di induritore mescolata alla resina poliesteri, sia della temperatura esterna ³; prima di impregnare le estremità del fascio di fibra con la resina è necessario prestare molta attenzione alle

³ L'innalzamento della temperatura accelera fortemente il processo di essiccazione. Si tenga conto che con rapporti in peso resina - induritore di 100 a 1 e con 20° C di temperatura esterna il processo ha una durata complessiva di 2 ore. Nel nostro caso si è spesso operato con temperature decisamente maggiori, che andavano indicativamente dai 28° C ai 35° C.

operazioni di spazzolatura della zona interessata dal tallone perché se l'allineamento delle fibre è di fondamentale importanza nelle sezioni intermedie del campione, in queste zone lo è ancora di più. Per fissare il campione sono state utilizzate delle piastre di acciaio che oltre a mantenere le fibre ben allineate comprimevano il campione sul piano di lavoro in modo che questo restasse fermo, per di più fornivano un contrasto ai pezzetti di mat di fibra di vetro che andavano poi a formare il tallone vero e proprio.



Figura 3.6 Campione di fibra pronto per la prima impregnazione con resina poliesteri

Prima di iniziare le operazioni che hanno portato alla esecuzione dei talloni, sono stati ritagliati dal mat in fibra di vetro, tutti i pezzetti necessari per costruire i talloni che presentavano una forma pressoché quadrata con dimensioni dei lati che si aggiravano attorno ai 100 mm; in seguito è stata preparata la resina prestando molta attenzione ai rapporti in peso di resina e induritore per evitare che il prodotto indurisse prematuramente e diventasse così inutilizzabile.



Figura 3.7 Estremità del provino spazzolata e impregnata di resina prima dell'applicazione del mat in fibra di vetro

Terminate le operazioni necessarie per allineare le fibre di canapa, le estremità del provino sono state impregnate con la resina attraverso l'uso di un pennello; subito dopo, prima che la resina si solidificasse, è stato applicato il mat in fibra di vetro che a sua volta è stato ulteriormente imbevuto di resina per renderlo solidale alle fibre.



Figura 3.8 Parte superiore del tallone completata con lo strato di mat e resina poliestere

Dalle figure 3.6, 3.7 e 3.8 è possibile notare come nel piano di lavoro, prima di iniziare le operazioni di esecuzione dei talloni siano stati posizionati dei pezzetti di materiale plastico che hanno permesso un distacco più agevole del tallone una volta indurita la resina.

A questo punto è stato necessario attendere che la resina fosse completamente indurita per poter ruotare il campione ed eseguire le stesse operazioni nella parte inferiore del provino in modo che le estremità della fibra fossero contenute tra i due strati di mat in fibra di vetro.



Figura 3.9 Parte inferiore del campione pronta per essere completata con lo strato di vetroresina

Nel realizzare lo strato inferiore è stato necessario impregnare attentamente l'estremità delle fibre di canapa che non si presentavano disperse come erano inizialmente, ma essendo state impregnate in precedenza nelle operazioni che hanno portato alla

realizzazione della parte superiore del tallone, si presentavano attaccate le une alle altre con pochi vuoti disponibili per la resina.

Prima di eseguire la prova a trazione, i campioni sono stati fatti asciugare all'aria per almeno 24 ore per avere la certezza che la resina fosse completamente indurita e quindi salvaguardarsi da rotture del provino premature dovute al distacco della fibra dal tallone.

Alla fine del processo di indurimento i talloni si presentavano molto duri e monolitici (vedi particolare figura 3.11) tanto che, avendo i bordi piuttosto irregolari, per sagomarli e renderli più adatti alle piastre di attacco della macchina di prova, è stato necessario tagliarli con un disco elettrico.



Figura 3.10 Operazioni di sagomatura del tallone con disco elettrico

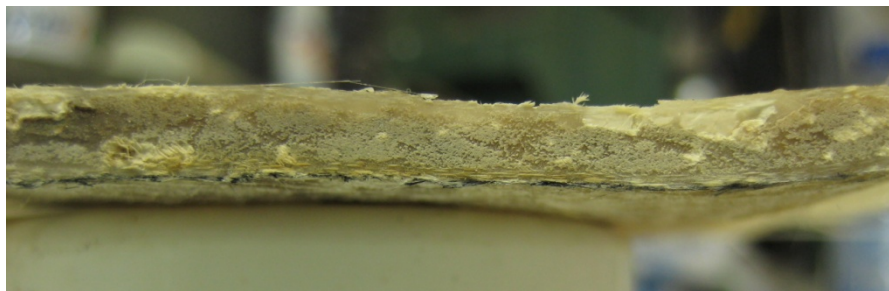


Figura 3.11 Particolare della sezione trasversale del tallone a indurimento della resina completato

3.2.2 Operazioni di misura e peso dei provini:

I campioni sui quali sono state eseguite le prove, prima di essere portati a rottura, sono stati accuratamente pesati e misurati in modo da poterli caratterizzare e poter elaborare i risultati ottenuti dalle prove.

I fasci di fibra sono stati pesati sia prima sia dopo la realizzazione dei talloni: inizialmente, appena sono stati generati i fasci che sarebbero andati a costituire ciascun campione, questi sono stati pesati per ricavare subito una stima del peso della fibra al metro lineare, considerato il fatto che i ciuffi di fibra erano stati tagliati tutti alla stessa lunghezza per le diverse serie di provini.

I campioni appartenenti alla prima ed alla seconda serie, presentavano una lunghezza delle fibre pari a 500 mm; il peso di ciascun fascio di fibre variava da 24.9 gr a 26.8 gr, quindi è stato possibile ricavare il peso della fibra al metro lineare semplicemente moltiplicando il peso dei diversi fasci di fibra per due.

I campioni della terza serie invece, sono stati pesati e misurati solo dopo la realizzazione dei talloni. Il peso totale dei provini, compreso il peso dei talloni, andava dagli 11.7 gr del provino minore, ai 28.5 gr del provino di dimensioni più grandi.

Dopo aver portato a rottura i provini, i talloni sono stati tagliati e pesati separatamente annotando i loro pesi per ciascun provino, quindi per differenza è stato possibile ottenere il peso netto della fibra reagente a trazione. Durante questa operazione non sono state eliminate dal provino solo le parti in vetroresina che costituivano il tallone, ma anche le piccole parti di fibra che risultavano impregnate di resina e quindi non potevano far parte della fibra netta reagente a trazione perché il comportamento delle fibre non poteva essere assimilato a quello del provino in fibra secca.

Attraverso questo processo, oltre alle dimensioni ed ai pesi dei talloni di ciascun provino, è stato possibile definire la luce netta tra i talloni, ovvero la lunghezza delle fibre che effettivamente hanno resistito allo sforzo di trazione applicato dalla macchina di prova: questo dato è risultato di notevole importanza perché ha permesso in primo luogo di ricavare il peso di fibra al metro lineare per i provini della terza serie (che non erano stati pesati prima della realizzazione dei talloni), eseguendo il rapporto tra peso netto della fibra tra i talloni e luce netta, ed in secondo luogo ha permesso di determinare la deformazione a rottura del provino espressa in mm/m dividendo lo spostamento assoluto, misurato dagli strumenti applicati alla macchina di prova, per la luce netta tra i talloni (Tabella 3.1).

Campione	Luce Totale tra i talloni [mm]	Luce Netta tra i talloni [mm]	Peso Netto della fibra [gr]	Peso fibra al metro lineare [gr/m]
1	200	175	0.7	4
2	201	170	0.8	4.71
3	200	173	0.9	5.20

4	200	163	0.8	4.91
5	205	180	1.3	7.22
6	215.5	178	1.2	6.74
7	205	170	2.1	12.35

Tabella 3.1 Dimensioni e pesi fondamentali campioni terza serie

Utilizzando le misurazioni e le pesate effettuate, e grazie alle considerazioni effettuate durante la precedente fase sperimentale relativa ai campioni in fibra di canapa e resina che ha permesso di determinare un valore della densità della fibra di canapa pari a 0.002 gr/mm^3 , è stato possibile calcolare altre grandezze particolarmente significative.

Infatti dividendo il peso della fibra al metro lineare per il valore di densità della fibra prefissata, è stata ottenuta l'area resistente di fibra di tutti i provini espressa in mm^2 ; valori più frequenti dell'area resistente relativi alla prima ed alla seconda serie si aggiravano attorno ai 25 mm^2 , mentre per i provini della terza serie i valori oscillavano tra 2.5 e 6 mm^2 . Utilizzando questi dati, nella fase di analisi dei risultati è stato possibile determinare il valore di tensione ultima di ogni provino.

Ricavata l'area resistente, dopo aver misurato manualmente la larghezza del provino, cioè la larghezza sulla quale si distribuiva la fibra trasversalmente, è stata calcolata una stima dello spessore del fascio di fibra stessa che in un secondo momento è stata poi paragonata alle misurazioni effettuate con un calibro elettronico.

Il valore dello spessore del fascio di fibra dipende principalmente dalla quantità di fibra inserita per realizzare il campione ma anche dal modo in cui questa è distribuita sulla sezione trasversale del provino (Tabella 3.2).

Campione	Peso fibra al metro lineare [gr/m]	Area resistente [mm ²]	Larghezza a fibra [mm]	Spessore fibra stimato [mm]	Spessore fibra misurato [mm]
1	4	2.00	11	0.18	-
2	4.71	2.35	19	0.12	0.23
3	5.20	2.60	18	0.14	0.36
4	4.91	2.45	17.5	0.14	0.43
5	7.22	3.61	27	0.13	0.55
6	6.74	3.37	52	0.06	0.17
7	12.35	6.18	43	0.14	0.56

Tabella 3.2 Grandezze ricavate campioni terza serie

3.2.3 Esecuzione della prova:

I test di trazione che hanno interessato i provini di fibra secca sono stati eseguiti sulla stessa macchina di prova utilizzata per i campioni in composito, con delle modifiche apportate sia alla macchina che allo schema di prova, poiché il problema principale era legato sia alla misurazione delle deformazioni sia ai suoi valori attesi.

Le differenze principali con le prove di trazione eseguite sui canapini resinati riguardavano infatti i valori di deformazione a rottura attesi e l'impossibilità di utilizzare estensimetri elettrici applicati ai campioni per valutare il valore di quest'ultima; è stato indispensabile quindi concepire uno schema di prova diverso da quello usato in precedenza che permettesse di valutare le deformazioni del campione sia durante la prova sia all'atto della rottura.

Per questo tipo di provini è stato necessario imporre una deformazione molto più grande rispetto a quelli in composito per arrivare alla rottura del campione, quindi anche la macchina di prova è stata modificata per evitare che la prova diventasse troppo lunga e che il carico venisse applicato troppo lentamente: in pratica è stato smontato il riduttore di applicazione del carico che era fissato alla manovella, in questo modo con un solo giro completo della manovella si riusciva ad imporre uno spostamento pari al valore che sarebbe stato raggiunto precedentemente con 20 giri.

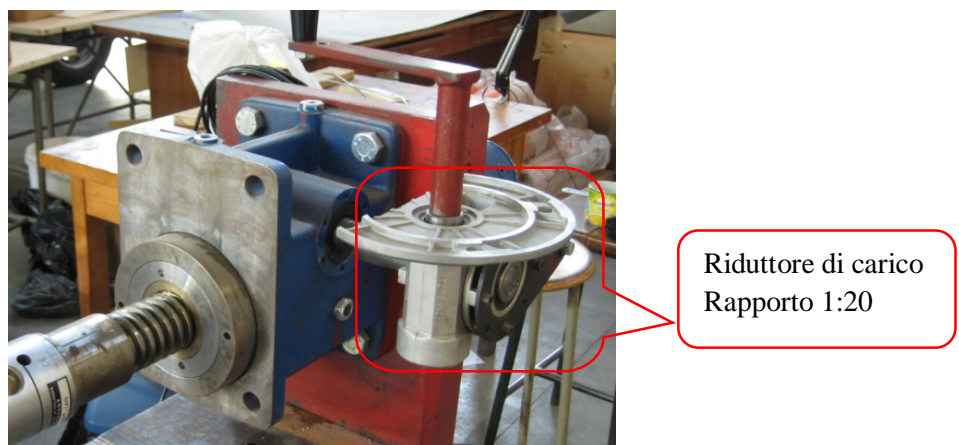


Figura 3.12 Sistema di carico della macchina di prova con riduttore di carico applicato

Per misurare la deformazione assiale dei campioni di fibra durante la prova, poiché la superficie dei campioni in questo caso non permetteva l'incollaggio degli estensimetri elettrici, è stato necessario ricorrere all'utilizzo di altri strumenti di misura presenti in laboratorio, identificati con il nome di LVDT, dei quali si fa cenno di seguito riguardo il loro funzionamento:

Gli LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sono dei dispositivi in grado di misurare lo spostamento di un punto prestabilito (vedi fig. 3.13).

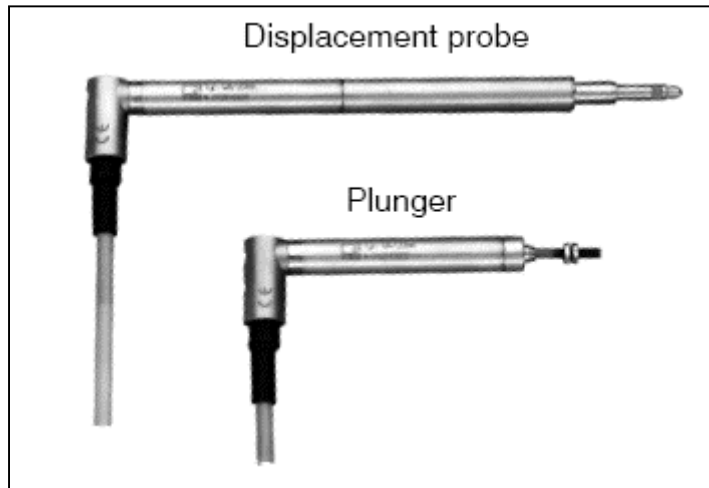


Figura 3.13 Esempi di LVDT utilizzati in laboratorio durante le prove

Il fenomeno che sfruttano è l'induzione elettromagnetica e di fatto essi non sono nient'altro che dei trasformatori a nucleo mobile e, come tali, sono in grado di manipolare solamente grandezze elettriche alternate.

Da un punto di vista strutturale i trasduttori di spostamento LVDT si compongono di due parti principali: il corpo cilindrico del trasduttore ed il nucleo mobile. Il corpo cilindrico, dotato di un foro assiale in cui può scorrere il nucleo, contiene un trasformatore differenziale, costituito da tre avvolgimenti, di cui uno primario (A in fig. 3.14) e due secondari (B in fig. 3.14). Il principio di funzionamento del trasduttore LVDT impone che lo spostamento del nucleo possa variare l'accoppiamento magnetico tra i due secondari rispetto all'avvolgimento primario.

Per soddisfare questa condizione, il nucleo è costruito in materiale ad elevatissima permeabilità magnetica e la prolunga deve essere costruita in materiale non-magnetico.

L'avvolgimento primario è alimentato in AC (1-10 kHz, 0.5-10 V) da un apposito oscillatore.

Il flusso magnetico prodotto si accoppia attraverso l'equipaggio mobile (nucleo) con gli avvolgimenti secondari.

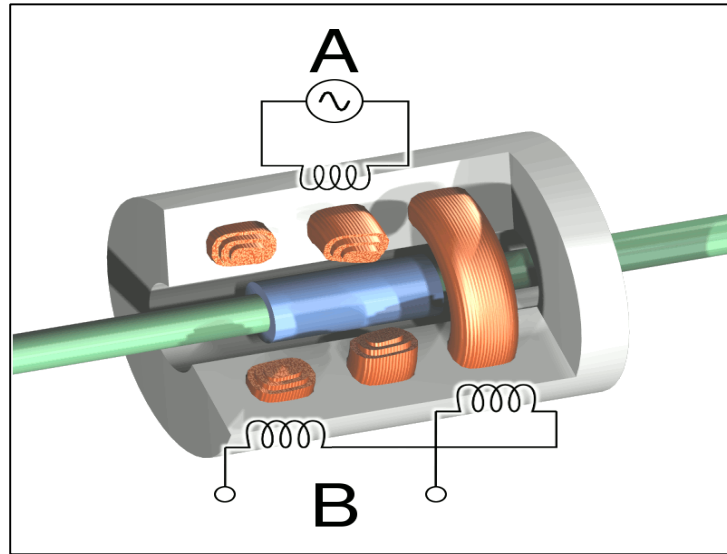


Figura 3.14 Schema illustrativo del funzionamento interno di un LVDT

La differenza delle tensioni indotte è proporzionale allo spostamento del nucleo dal centro.

In sintesi, variando la posizione del nucleo varia di conseguenza la posizione del materiale ferromagnetico rispetto ai tre avvolgimenti, di conseguenza varia anche la tensione indotta dall'avvolgimento primario sui due avvolgimenti secondari, e pertanto la tensione in uscita, determinando un segnale proporzionale alla posizione del nucleo stesso.

Durante le prove, l'LVDT viene collegato rigidamente ad un supporto esterno, magnetico o non, che ne garantisce il corretto posizionamento mentre la sonda dello strumento è posta a contatto con un elemento solidale al provino in corrispondenza del punto del quale si vuole misurare lo spostamento.

Quando il provino viene posto sotto carico l'LVDT permette di rilevare lo spostamento dell'elemento al quale la sonda durante lo sviluppo di tale spostamento continua a rimanere a contatto grazie all'azione di una molla interna.

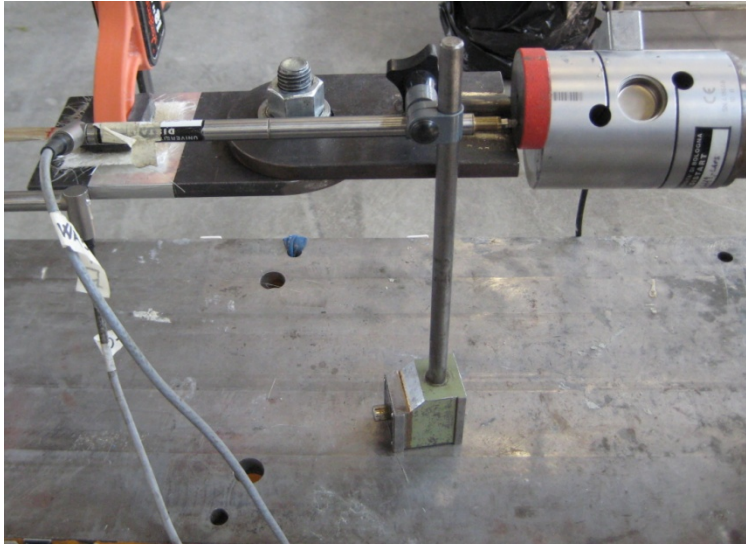


Figura 3.15 LVDT (50 mm) fissato al supporto esterno magnetico durante le prove

Prima di poter utilizzare un simile strumento occorre conoscere la costante di proporzionalità tra la differenza di potenziale [mV] in uscita e lo spostamento registrato dallo strumento.

La taratura degli strumenti consiste in pratica nell'assegnare ciclicamente spostamenti noti agli LVDT (tramite lo strumento rappresentato in fig. 3.16) e nel rilevare le differenze di potenziale in uscita; successivamente i dati vengono interpolati ricavando la pendenza e l'intercetta della retta che rappresenta la proporzionalità tra le due grandezze in esame.



Figura 3.16 Operazioni di taratura di un LVDT

I vantaggi di un trasduttore di spostamento LVDT possono essere così riassunti:

- Robustezza meccanica e ambientale
- Basso attrito, quindi alta sensibilità e risoluzione
- Vita a fatica virtualmente infinita
- Sensibilità incrociata praticamente nulla
- Misura assoluta
- Ripetibilità dello zero

Durante le prove di trazione sui provini di fibra di canapa secca eseguite in laboratorio, sono stati utilizzati due LVDT diversi: il primo, quello che misurava l'effettivo spostamento dell'estremità mobile del provino, quindi la deformazione assiale dello stesso, era in grado di misurare una deformazione massima pari a 50 mm, mentre quello montato per monitorare eventuali spostamenti dell'estremità fissa, era in grado di misurare uno spostamento massimo di 20 mm.

Entrambi gli strumenti di misura sono stati montati attraverso dei supporti magnetici che li rendevano solidali al piano di appoggio della macchina di prova; a seconda della lunghezza e del tipo di provino, sono state utilizzate delle configurazioni leggermente diverse perché non sempre l'LVDT poteva essere appoggiato direttamente alle piastre che comprimevano i talloni dei vari provini.

La configurazione base della prova consisteva nel posizionare i due LVDT lungo i lati longitudinali del provino sui supporti magnetici in modo che questi fossero perfettamente in asse con la direzione di applicazione del carico e l'asse del campione in fibra, dopodiché attraverso un livello a bolla veniva verificata la perfetta orizzontalità dello strumento.



Figura 3.17 Configurazione base della prova con i due LVDT posizionati lungo i lati opposti del provino ed accostati alle piastre della macchina di prova

Talvolta, quando le dimensioni del provino non permettevano di realizzare la configurazione base della prova (vedi fig. 3.18), venivano utilizzate delle piastrine magnetiche che fungevano da contrasto per la punta dell'LVDT che erano posizionate in diversi modi, ma sempre in modo da non modificare la lettura dello strumento.

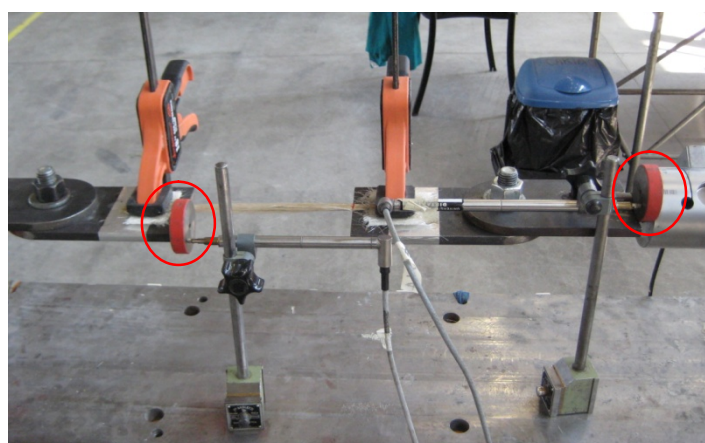


Figura 3.18 Configurazione alternativa con in evidenza le piastre magnetiche che fungono da contrasto ai due LVDT

Gli LVDT venivano posizionati e collegati in ogni caso, sempre dopo aver sistemato e fissato il campione alla macchina di prova; questa operazione veniva effettuata utilizzando dei morsetti che andavano a stringere il tallone alla piastra collegata alla macchina di prova.

Per evitare che durante la prova il tallone fosse interessato da una sorta di scorrimento relativo rispetto alla piastra causato dallo sforzo di trazione applicato al campione, venivano prese due precauzioni: innanzitutto tra la piastra di metallo o gomma del morsetto e il tallone veniva posizionato un piccolo spessore di neoprene che aumentava significativamente l'attrito tra i due materiali e scongiurava il rischio di scorrimento che avrebbe poi provocato l'annullamento della prova poiché la deformazione misurata sarebbe risultata errata; inoltre, dopo aver fissato il provino alla piastra, veniva incollato alla piastra stessa un pezzetto di nastro adesivo sul quale veniva segnato attraverso un pennarello il punto esatto in cui terminava il tallone del provino, in modo tale che se si fossero verificati dei movimenti, sia durante la prova che a prova terminata, questi sarebbero stati immediatamente rilevati.

Gli spessori in neoprene presentavano però anche un importante difetto che non poteva essere trascurato: infatti per livelli di sforzo a trazione elevato applicato al provino, quindi in particolare per i campioni che appartenevano alla seconda serie, lo spessore in neoprene subiva una deformazione tagliente nel suo piano significativa che rischiava di modificare i risultati della prova.

Per questo motivo sono stati realizzati appositamente degli spessori simili a quelli in neoprene a livello dimensionale ma in alluminio, di dimensioni 100 x 50 x 5 mm, indeformabili a taglio per livelli di sforzo di questo ordine di grandezza.

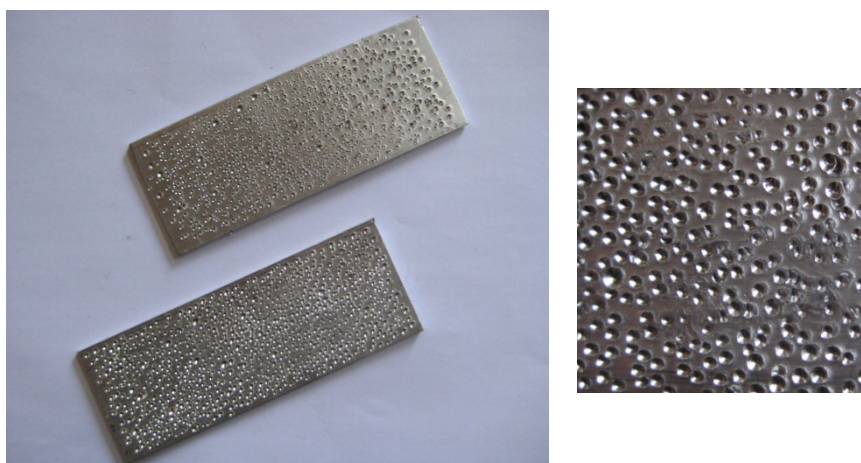


Figura 3.19 Piastrine in alluminio e particolare che evidenzia la loro scabrezza superficiale

Inizialmente la superficie delle piastrine risultava completamente liscia, successivamente, attraverso un martello e un punteruolo di acciaio, la superficie è stata resa scabra in modo da aumentare l'attrito piastra – tallone.

Posizionati correttamente gli LVDT e fissato il campione da testare alla macchina di prova, prima di iniziare il test vero e proprio, era necessario collegare gli strumenti di misura e la cella di carico alla centralina MGC così come era stato fatto durante le prove relative ai campioni di fibra e resina.

Per questo tipo di campioni è stato sufficiente utilizzare la sola centralina MGC perché non c'erano estensimetri elettrici da collegare al pc per l'acquisizione dati. Quindi durante la prova, attraverso la schermata fornita dal programma Labview, risultava possibile controllare il valore di forza applicato al provino, la sua deformazione assiale ed eventuali spostamenti relativi dell'estremità fissa del campione in tempo reale.

Durante i test a trazione di tutti e quindici i campioni non sono stati riscontrati problemi di scorrimento relativo tra tallone e piastra della

macchina di prova, neanche per i campioni di fibra che hanno presentato valori di forza a rottura maggiori, perché le piastre in alluminio si sono dimostrate molto efficaci.

La prova in sé presentava per tutti i campioni una durata complessiva piuttosto breve, probabilmente anche perché avendo rimosso il riduttore di giri per l'applicazione del carico alla macchina di prova, il carico veniva applicato più velocemente; prima di applicare lo sforzo di trazione vero e proprio i campioni venivano leggermente tensionati, si procedeva all'azzeramento degli strumenti di misura e della cella di carico e successivamente iniziava la prova di trazione che avrebbe portato a rottura il campione di lì a poco.

Per i primi step di carico, a seconda ovviamente delle dimensioni del campione, non si notò visivamente dei grossi cambiamenti nell'aspetto del campione se non l'allungamento dello stesso e una leggera strizione nella parte centrale (vedi fig. 3.20); all'aumentare del carico, le fibre iniziano a rompersi progressivamente, prima cedevano le fibre più corte e deboli, quelle cioè che nel suo sviluppo longitudinale erano caratterizzate dalla presenza di qualche difetto, e successivamente anche quelle di lunghezza maggiore, essendo impossibile nella pratica realizzare dei campioni in cui tutte le fibre si attivavano nel medesimo istante e per lo stesso livello di carico. Questo processo era evidente sia dal punto di vista visivo, perché le fibre che si rompevano mano a mano tendevano ad uscire dal fascio, sia da quello uditivo perché si potevano facilmente individuare gli istanti in cui si verificava la rottura delle fibre.

La rottura quindi sembrerebbe in prima analisi di tipo progressivo e non istantaneo – fragile come capitava per i campioni in composito; questa tesi è stata poi smontata dalla successiva analisi dei dati, poiché in tutti i casi il grafico Forza – Spostamento, e quindi quello Tensione – Deformazione, presentava un vistoso picco che andava

dalla fase di carico fino alla rottura del provino, dopodiché il fascio di fibra non opponeva più resistenza a trazione pur non essendo completamente disgiunto in due parti diverse.



Figura 3.20 Campione durante la prova in cui è evidente il fenomeno di strizione della sezione resistente di fibra nei pressi della mezzeria

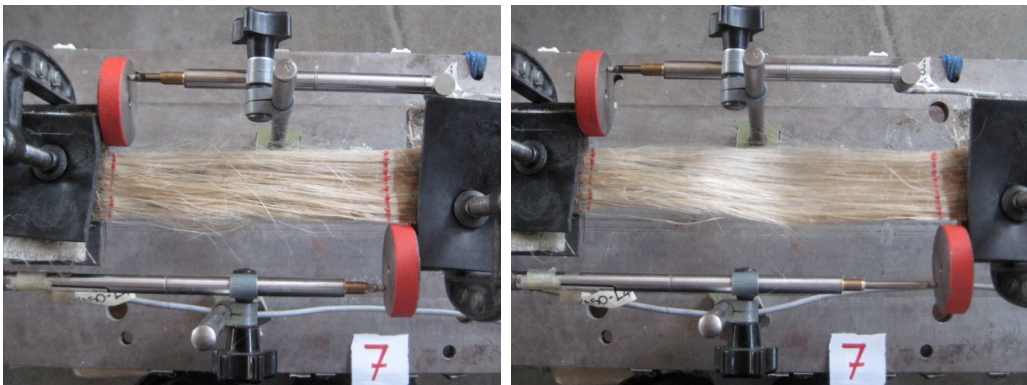


Figura 3.21 Comparativa del Campione 7 (terza serie) prima e dopo la rottura. E' evidente la deformazione a rottura osservando anche la corsa dell'LVDT da 50 mm che ne misura l'entità

La rottura del campione non è netta come nel caso dei provini testati nella prima parte di sperimentazione, ma avviene comunque in una zona piuttosto ristretta di fibra a cavallo della sezione di mezzeria.

In questa zona, tutte le fibre dopo il test risultavano avere una sezione ridotta ed essere completamente sfibrate.



Figura 3.22 Zoom nella zona di rottura del campione dove le fibre appaiono visibilmente sfibrate

3.2.4 Analisi dei risultati:

I risultati delle prove di trazione, che sono state eseguite sui provini di fibra secca realizzati in laboratorio, sono stati analizzati ed elaborati attraverso il programma Excel, così come era stato fatto per i risultati ottenuti dalle prove sui campioni di fibra e resina.

Per ogni provino è stato possibile creare un foglio di lavoro che racchiudesse tutte le informazioni ed i grafici utili ai fini dell'analisi del comportamento della fibra di canapa secca sottoposta a trazione. All'interno di ogni foglio, sono stati riportati i valori di deformazione misurati dai due LVDT, dai quali è stato possibile ricavare il valore di spostamento dell'estremità mobile del provino prima, e la deformazione assiale poi. Inoltre dai dati ricavati durante le operazioni di misura e peso dei provini e dai valori di forza misurati dalla cella di carico, sono stati ottenuti valori di forza a trazione ai quali è stato sottoposto il campione e conseguenti valori di tensione fino a rottura.

Con questi risultati è stato possibile costruire una serie di grafici significativi sia per descrivere il comportamento del singolo provino che per caratterizzare il materiale.

Innanzitutto è stato rappresentato l'andamento della forza applicata al campione, espresso in kilogrammi, in funzione dello spostamento dell'estremità mobile di quest'ultimo rilevato durante la prova, espresso in mm.

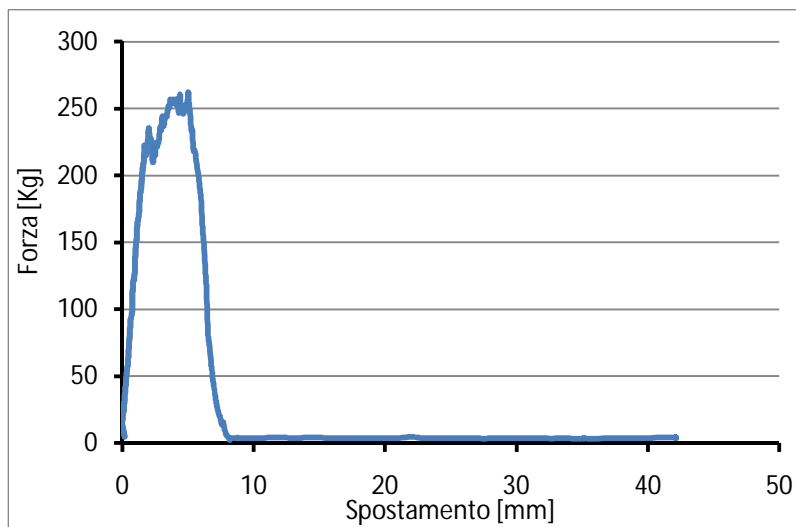


Figura 3.23 Grafico Forza - Spostamento (campione B7)

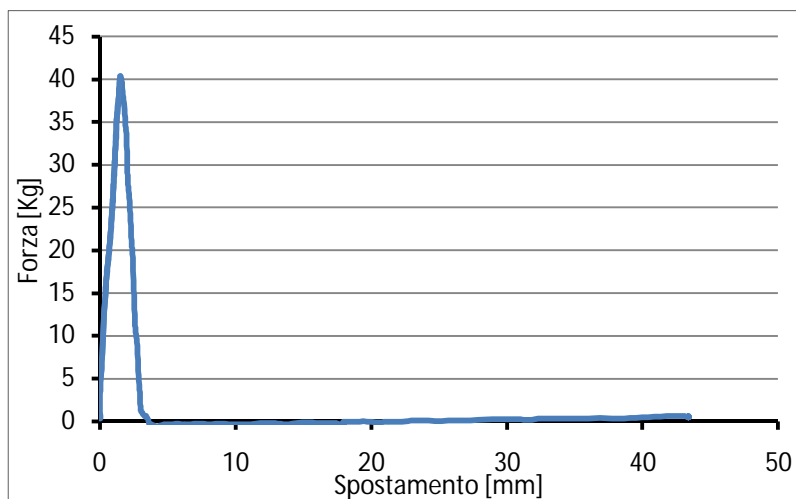


Figura 3.24 Grafico Forza - Spostamento (campione 3)

Osservando i grafici Forza – Spostamento di tutti i campioni è evidente come il tratto di carico abbia un andamento molto prossimo a quello lineare. Nella maggioranza dei campioni si ha un comportamento come quello rappresentato in figura 3.24, cioè caratterizzato da un ramo di carico lineare che arriva fino ad un picco dove si verifica la rottura delle fibre, un ramo di scarico anch'esso pressoché lineare che ha una pendenza simile a quello di carico ed infine una fase in cui la forza assorbita dal campione è quasi nulla con lo spostamento che cresce fino al limite di misura dello strumento.

Da subito è parso quindi sensato rappresentare nello stesso diagramma anche una linea retta che approssimasse il tratto di carico per poter evidenziare e quantificare la differenza dal comportamento lineare.

Dopo questa operazione è stato possibile notare che i campioni appartenenti alla prima serie, e cioè quelli che erano stati realizzati per primi, presentavano un ramo di carico che si discostava più o meno leggermente da quello lineare, mentre per i campioni realizzati in un secondo momento i due rami di carico coincidevano quasi esattamente.

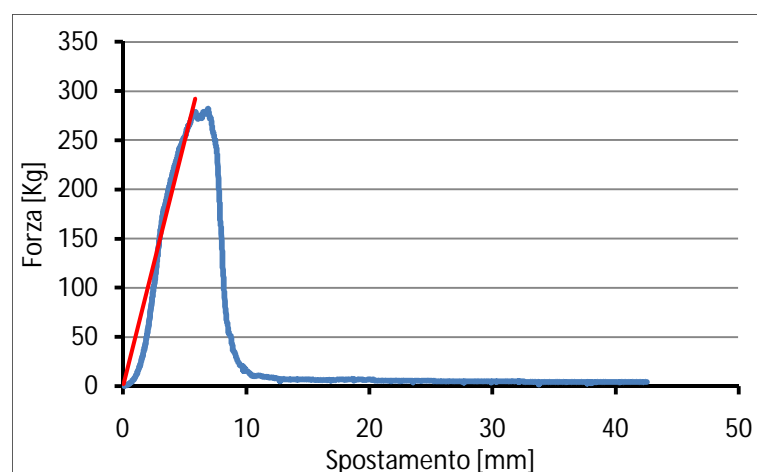


Figura 3.25 Grafico Forza - Spostamento con linea che rappresenta il comportamento lineare (campione B3-prima serie)

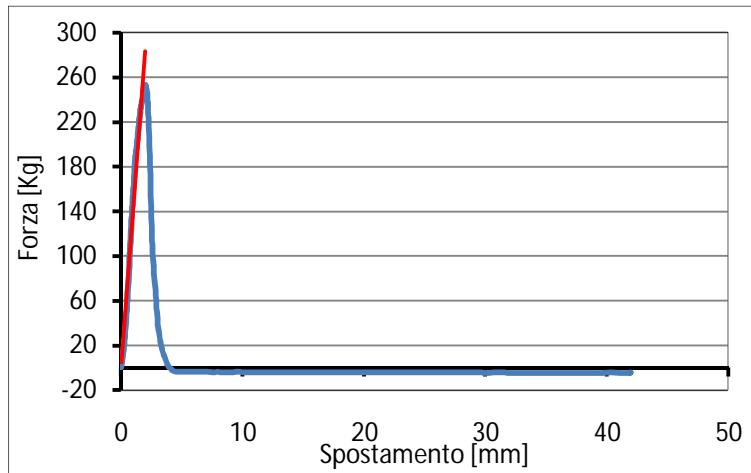


Figura 3.26 Grafico Forza - Spostamento con linea che rappresenta il comportamento lineare (campione B10-seconda serie)

Da subito è emersa l'importanza prestata nelle operazioni di realizzazione del campione, in particolare nelle fasi di spazzolatura che precedevano la realizzazione dei talloni e nel fatto di tensionare leggermente le fibre prima di eseguire gli stessi in modo da ottenere un fascio che fosse orientato in maniera più omogenea possibile.

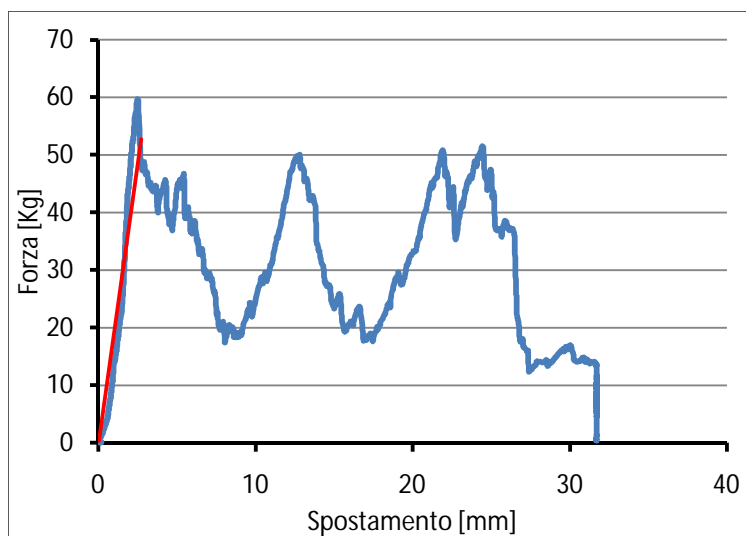


Figura 3.27 Grafico Forza - Spostamento (campione B2)

Infatti, osservando il grafico Forza – Spostamento del campione B2 (vedi fig. 3.27) appartenente alla prima serie, e caratterizzato dai piccoli fasci che lo componevano non ben allineati, è chiaro come il

campione non riesca ad essere sollecitato uniformemente dallo sforzo di trazione con ripresa della curva di carico conseguente allo scarico di un fascio collassato avvenuta in almeno tre o quattro momenti diversi.

Questo aspetto sicuramente da attribuire ad una non corretta costruzione del provino, è la causa di risultati poco significativi poiché dai grafici relativi alle prove di trazione difficilmente si riesce a valutare l'effettiva forza che può sopportare il campione; la logica porterebbe a pensare che la forza massima alla quale può resistere il campione sia data dalla somma di tutti i contributi dei picchi più piccoli che seguono quello principale che si verifica per primo, ma comunque il limite del provino è difficilmente identificabile specialmente quando si debba associare alla forza assorbita l'area del campione realmente reagente.

A questo punto è stato quasi immediato passare ai grafici che rappresentavano la tensione nel campione, espressa in MPa (N/mm^2), in funzione della deformazione espressa in mm/m, utilizzando i valori di area resistente e di lunghezza netta delle fibre precedentemente ricavati nella fase di misura e peso dei campioni.

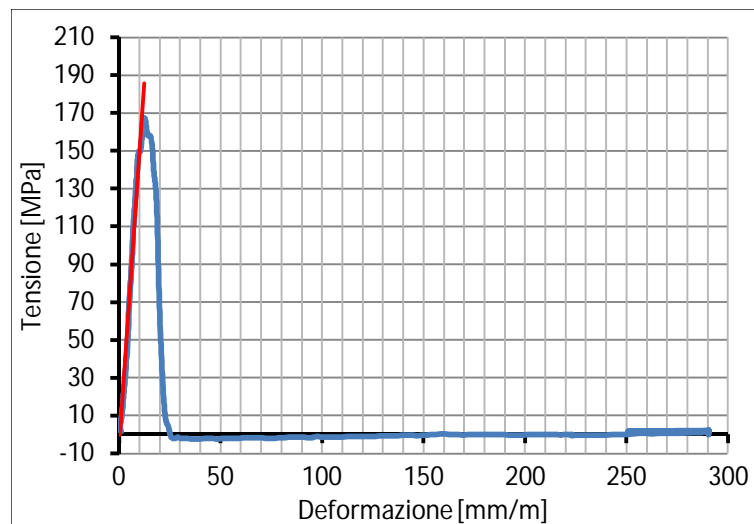


Figura 3.28 Grafico Tensione - Deformazione (campione 4 - terza serie)

L'andamento del grafico è naturalmente simile a quello del grafico Forza – Spostamento perché entrambi i valori, tensione e deformazione, sono stati ricavati da quelli di forza e spostamento dividendoli per una grandezza costante.

Il tratto di carico ha un andamento riconducibile a quello lineare, quindi anche in questa fase sono state rappresentate in ogni grafico delle rette che approssimavano il primo tratto del grafico per quantificare la differenza con l'andamento lineare.

Sfruttando questo aspetto legato alla linearità del primo tratto del diagramma Tensione – Deformazione, è stata ricavata una stima del modulo elastico del provino espresso in MPa; infatti essendo pressoché lineare il grafico Tensione – Deformazione fino al punto di rottura, la pendenza della retta rappresentava con buona approssimazione il parametro meccanico cercato.

Esclusivamente per i campioni della terza serie, a titolo di verifica, il modulo elastico dei provini è stato calcolato anche facendo il rapporto tra il valore di tensione a rottura e il valore di deformazione a rottura del provino.

Per tutti e sette i campioni appartenenti a questa serie i valori del modulo elastico ricavati con i due metodi differenti, hanno presentato delle differenze minime, quindi la verifica può considerarsi soddisfatta.

Una volta ottenuti i valori di tensione a rottura, deformazione a rottura e modulo elastico di tutti i campioni, questi sono stati ordinati in una tabella che permettesse di calcolare per ciascuna grandezza il valore di media e deviazione standard, che a loro volta sarebbero poi serviti per costruire le curve di distribuzione di probabilità di ogni grandezza, in modo da poter confrontare i

risultati ottenuti nella simulazione numerica con quelli ottenuti nella attività sperimentale.

Campione	Tensione a Rottura	Deformazione a Rottura	Modulo Elastico
B2	23,674	7,841	3382
B8	64,758	5,983	9777
B6	68,618	11,604	8227
B3	105,177	21,191	6168
B4	104,890	19,599	9802
B7	102,408	18,532	12570
B9	120,645	44,315	3286
B10	100,806	15,469	7495
1	178,895	9,760	18329
2	180,209	10,200	17668
3	155,289	8,751	17744
4	167,120	12,411	13465
5	148,002	16,344	9055
6	68,474	14,601	4690
7	63,280	25,453	2486

	Tensione a Rottura	Deformazione a Rottura	Modulo Elastico
Dev. Standard σ	47,70	9,50	5365,77
Media μ	110,15	16,14	9609,71
Dev. Standard σ	40,55	9,66	5702,82
SENZA CONSIDERARE B2, B8, B6:			
Media μ	124,60	18,05	10229,91
Dev. Standard σ	33,00	10,32	5264,52
SENZA CONSIDERARE B2, B8, B6, 6, 7:			
Media μ	136,34	17,66	11558,31

Tabella 3.3 Tabella con i valori di Tensione a rottura, Deformazione a rottura e Modulo elastico dei campioni e i rispettivi valori di Media e Deviazione standard di ciascuna grandezza

Come si può notare dalla tabella 3.3, i valori di media e deviazione standard delle tre grandezze sono stati calcolati per tre casi diversi:

nel primo caso sono stati presi in considerazione tutti e 15 i campioni, nel secondo sono stati esclusi i campioni della prima e della seconda serie che presentavano dei valori di tensione a rottura in disaccordo con quelli degli altri campioni e infine nel terzo caso sono stati esclusi oltre ai tre campioni precedenti, anche i campioni 6 e 7 appartenenti alla terza serie, sempre per lo stesso motivo.

3.2.5 Discussione dei risultati e conclusioni finali:

Ottenuti, nella fase di analisi dei risultati, i valori delle grandezze che caratterizzavano ogni provino, è stato interessante operare uno studio che mettesse a confronto i campioni appartenenti alle diverse serie per individuare quali fossero i parametri che influenzavano maggiormente il comportamento sia dei provini stessi che del materiale sottoposti a sforzi di trazione uniassiale.

Da subito, anche nella fase di analisi dei risultati, è emersa l'importanza rivestita dalla fase di realizzazione dei campioni alla quale si è fatto più volte cenno durante questa trattazione; infatti andando a confrontare i risultati dei diversi campioni che erano stati ottenuti dalle prove di trazione, è emerso subito che i campioni che erano risultati meno regolari e corretti per diversi motivi, evidenziavano valori delle grandezze anomali.

Questo aspetto può essere osservato anche in uno dei primi grafici che sono stati costruiti, e cioè quello in cui viene rappresentata la forza massima applicata al provino (Kg) in funzione del peso di fibra al metro lineare (gr/m) (vedi fig. 3.29).

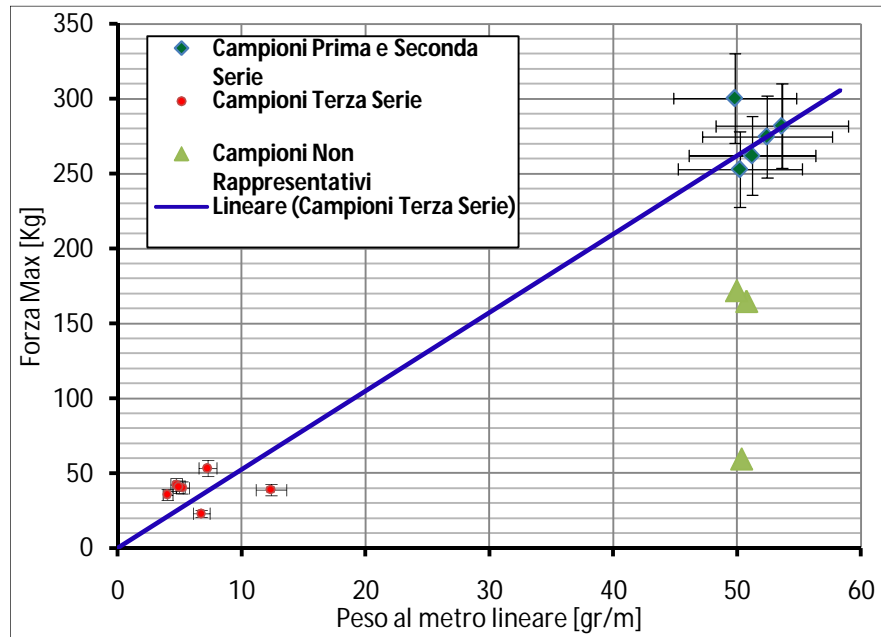


Figura 3.29 Grafico Forza massima - Peso di fibra al metro lineare

Nel grafico di figura 3.29, sono riportati i risultati dei campioni della prima e della seconda serie, quelli della terza e dei tre campioni che sono stati giudicati poco significativi perché i loro valori di forza erano decisamente distanti dalla curva dei valori attesi che ben interpreta la maggioranza dei valori sperimentali.

Per verificare che il valore di forza massima fosse in qualche modo collegato al peso di fibra per metro lineare del campione, è stata rappresentata una retta che approssimava l'andamento lineare dei soli campioni della terza serie, ma il cui andamento è stato proiettato fino ai valori di forza relativi ai campioni di dimensioni maggiori appartenenti alla prima ed alla seconda serie: questa operazione ha permesso di evidenziare la presenza di un legame lineare tra la forza massima ed il peso di fibra al metro lineare, quindi al crescere quest'ultimo, cresce il valore di forza necessario per portare a rottura il campione con uno sforzo di trazione applicato lungo il suo asse longitudinale.

Nel grafico sono state rappresentate anche le barre di incertezza delle grandezze graficate.

Nel caso dei nostri provini è stato ipotizzato di commettere un errore percentuale massimo del 10% sulla stima dell'area resistente: l'errore è derivante da incertezze legate sia al valore di densità assunto nelle prime fasi della sperimentazione, che alla possibilità di avere fibre rotte già durante la fase di costruzione del provino.

Di conseguenza, si definisce la medesima incertezza sul valore atteso della forza massima applicabile al fascio di fibre.

Questo modo di procedere trova giustificazione nel fatto che tutte le grandezze riferite alle proprietà fisiche e meccaniche dei provini sono state ricavate basandosi sulle operazioni di peso e misura fatte a monte delle prove in cui la parte di fibra danneggiata risultava ancora completamente efficiente.

Così come fatto per la forza massima, sono stati prodotti altri grafici che rappresentavano la distribuzione dei valori delle altre grandezze meccaniche fondamentali in funzione del peso della fibra al metro per verificare se il legame di linearità si ripeteva anche in questi casi.

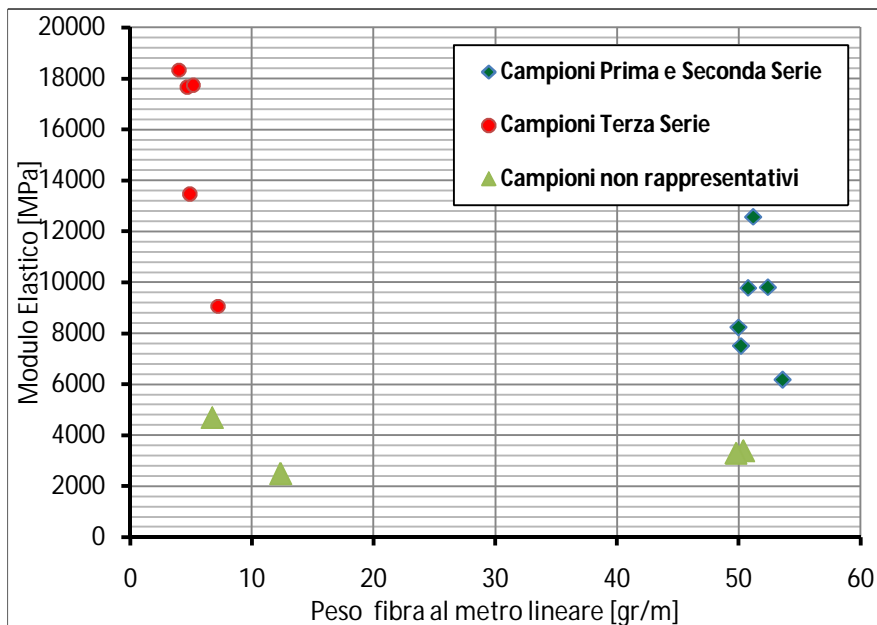


Figura 3.30 Grafico Modulo elastico - Peso di fibra al metro lineare

Dal grafico di figura 3.30 si osservano dei valori del modulo elastico (MPa) piuttosto dispersi che non seguono una relazione ben precisa come nel caso della forza massima di trazione; in generale i valori sono compresi nell'intervallo 6.000/8.000 MPa – 18.000 MPa, con i valori più bassi di modulo elastico che tendenzialmente appartengono ai campioni con peso di fibra al metro lineare maggiore. La media dei valori oscilla attorno ai 10.000 – 11.000 MPa sia considerando i campioni ritenuti in fase di analisi non rappresentativi, che escludendoli dal calcolo, valore non troppo diverso da quello ottenuto durante la sperimentazione relativa ai campioni di resina e canapa.

Si noti come, nel caso di campioni costituiti da un numero di fibre maggiore, si possa essere incorsi più facilmente nel problema di un non perfetto allineamento delle fibre. A questo consegue una difficile stima dell'area reagente da associare alla forza per ottenere la tensione.

Tipicamente si opera una sovrastima dell'area resistente con conseguente sottostima del modulo elastico dei campioni.

In figura 88 è riportato il diagramma che rappresenta la dispersione dei valori di deformazione a rottura espressa in mm/m in funzione del peso di fibra al metro lineare.

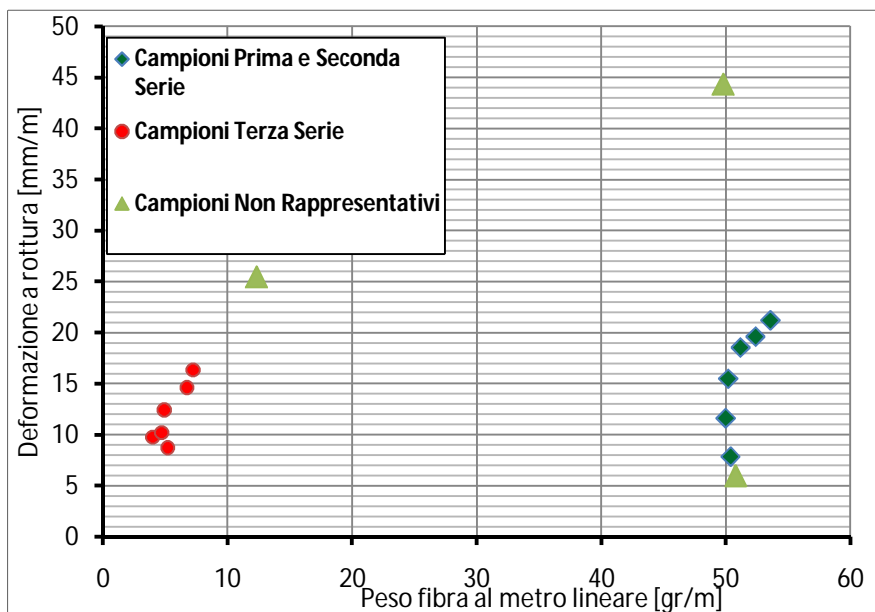


Figura 3.31 Grafico Deformazione a rottura - Peso di fibra al metro lineare

I valori sono comunque tutti distribuiti nell'intorno del 10 – 20 %, ovvero 10 – 20 mm per metro di fibra, inoltre per valori di peso di fibra al metro lineare simili, la deformazione a rottura è praticamente la medesima.

Per quanto riguarda la tensione a rottura, l'analisi si è concentrata sulla dispersione dei suoi valori in funzione di più grandezze: in particolare sono stati costruiti tre diversi diagrammi che rappresentavano la tensione a rottura in funzione rispettivamente di peso delle fibra al metro lineare, larghezza del fascio di fibra e spessore del fascio di fibra.

Già dal primo diagramma di figura 3.32 appare evidente come i valori siano abbastanza addensati a seconda della serie di appartenenza: i provini della prima e della seconda serie presentavano valori di tensione a rottura prossimi a 100 MPa, mentre per i campioni della terza serie sono stati raggiunti anche i 180 MPa. Questa differenza con ogni probabilità non è da attribuire a fattori dimensionali che contraddistinguono le serie, ma al fatto che i

campioni della terza serie, grazie alle operazioni di tesatura effettuate prima di realizzare i talloni, abbiano portato benefici significativi dal punto di vista della tensione ultima dovuti alla buona collaborazione delle fibre all'interno del fascio che determina una distribuzione omogenea degli sforzi sull'area resistente del provino con un'attivazione pressoché simultanea delle fibre.

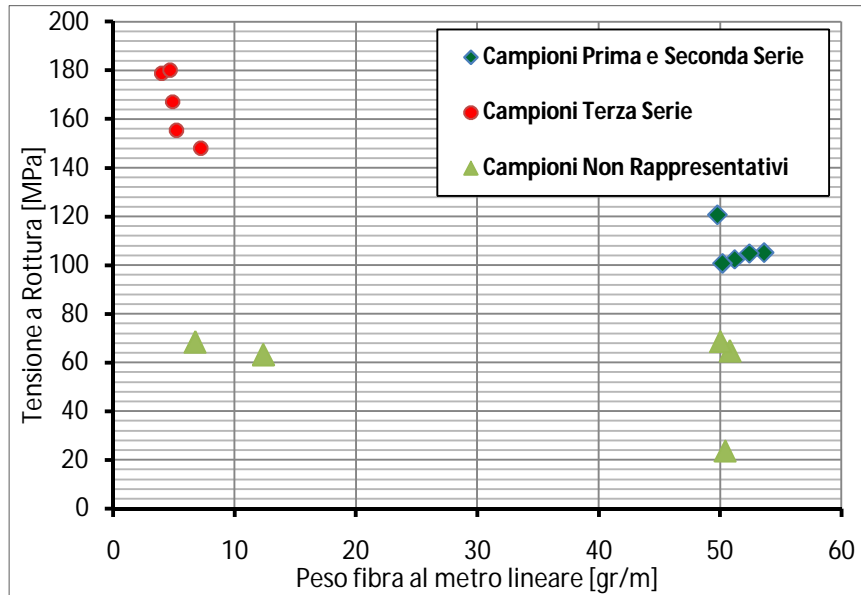


Figura 3.32 Grafico Tensione a rottura - Peso di fibra al metro lineare

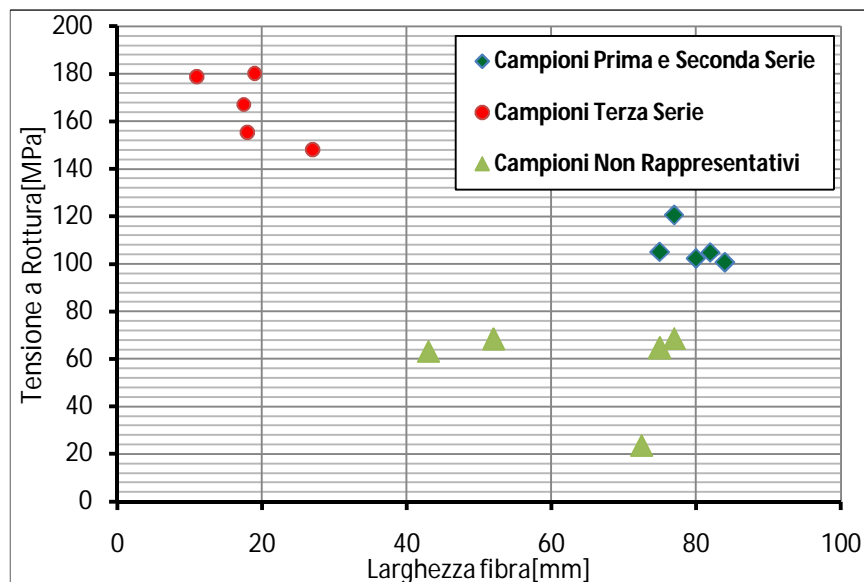


Figura 3.33 Grafico Tensione a rottura - Larghezza del fascio di fibra

Questo aspetto emerge anche nei due diagrammi successivi (vedi fig. 3.33 e 3.34) in cui sono stati presi in considerazione la larghezza del fascio di fibre e lo spessore, che per campioni a parità di peso di fibre al metro lineare sono ovviamente connessi, infatti aumentando la larghezza del fascio si determina una distribuzione delle fibre migliore che provoca una riduzione dello spessore del campione. È evidente nel grafico di figura 3.33 una sorta di andamento lineare “inverso”: in effetti diminuendo la larghezza del campione, quindi passando dal fascio alla singola fibra di canapa, la tensione a rottura aumenta a causa della minor difettosità del campione.

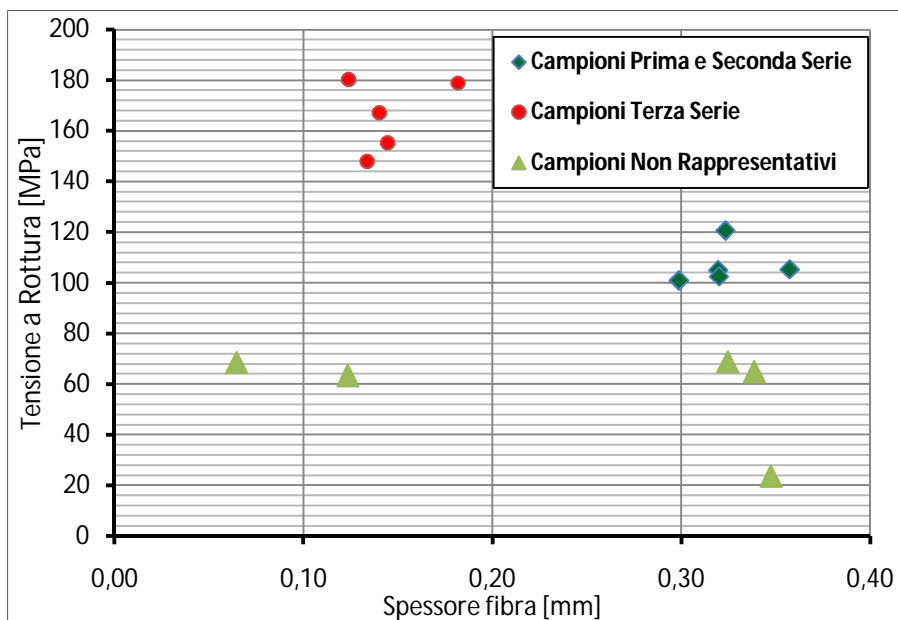


Figura 3.34 Grafico Tensione a rottura - Spessore del fascio di fibre

In conclusione, si nota come in ogni diagramma ci sia un 20 – 25 % di campioni che risultano non rappresentativi ai fini dell’analisi dei risultati; i campioni non rappresentativi che si ripetono in ogni diagramma sono sempre i medesimi, questo porta a pensare che siano affetti da qualche difetto costruttivo o che in fase di prova sia stato commesso qualche errore.

Questo aspetto sottolinea ancora una volta l'importanza fondamentale delle operazioni di realizzazione dei provini e soprattutto dei talloni che possono modificare o addirittura falsare gli esiti delle prove di trazione.

In questa specifica attività sperimentale i campioni appartenenti alla terza serie, ovvero quelli realizzati per ultimi con tutte le attenzioni del caso riservate in fase di costruzione dettate dall'esperienza acquisita nella costruzione dei campioni precedenti, sono quelli che hanno poi presentato in fase di analisi dei risultati, valori di tensione e modulo elastico più elevati e valori di deformazione a rottura minori.

4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI:

L'attività sperimentale svolta sui campioni in composito rinforzati con tessuto di fibre di canapa multidirezionale e sui provini di fibre di canapa secca monodirezionale, ha permesso di ricavare importanti dati e informazioni sul comportamento delle fibre sollecitate a trazione, sia in un caso che nell'altro.

Avendo a disposizione le proprietà meccaniche e le modalità di rottura delle fibre di canapa secca e dei provini in composito, era interessante cercare di capire il comportamento della fibra di canapa dispersa e impregnata, e confrontarlo con quello della fibra secca monodirezionale.

A tal proposito, dai grafici ottenuti dalle prove sui provini in composito, è stato possibile ricavare il modulo elastico di ogni campione, e dalle misure fatte precedentemente, la percentuale di area occupata dalla canapa sull'area totale.

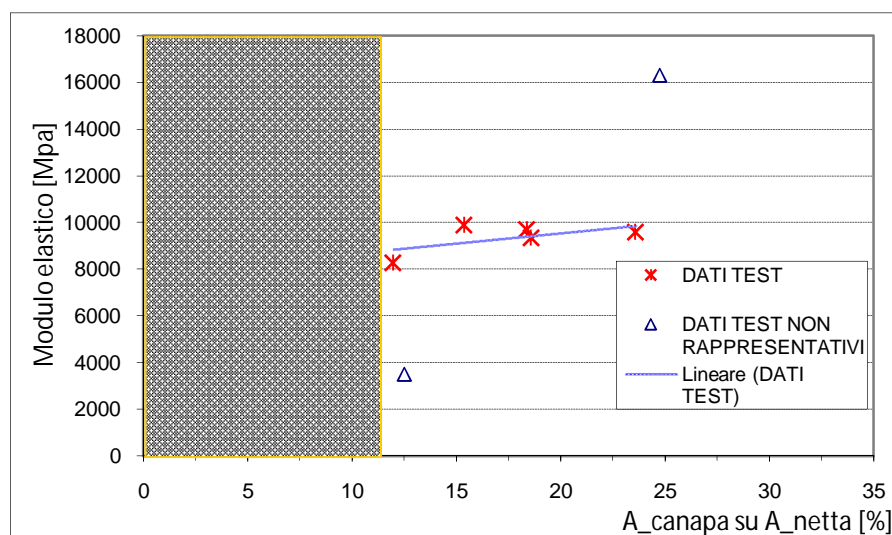


Figura 4.1 Grafico Modulo elastico - % Area canapa (Campioni in composito)

Note le caratteristiche meccaniche della resina utilizzata è stato possibile ricavare il modulo elastico della fibra di canapa impregnata di ciascun provino e ottenere una media di tal valore intorno ai 5600 MPa, relativa a campioni con un valore medio del rapporto di area di canapa sull'area totale pari a 0.17.

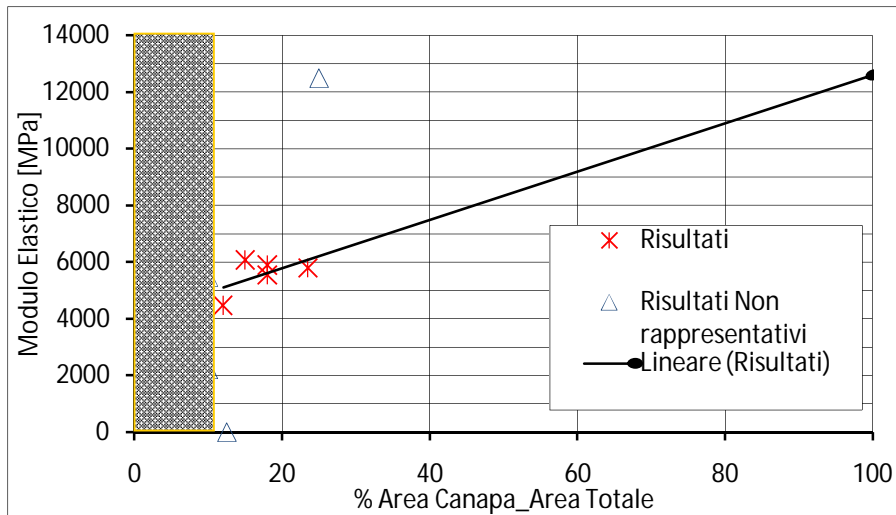


Figura 4.2 Grafico Modulo Elastico - % Area canapa (Canapa Resinata)

Dal grafico di figura 4.2 si osserva che ipotizzando una relazione di tipo lineare tra Modulo elastico e % di Area di canapa sul totale, per un campione di sola canapa (ovvero con il 100 % di canapa sull'area totale), si raggiungerebbe un valore di modulo elastico prossimo ai 12.800 – 13.000 MPa.

Per i campioni di fibra secca monodirezionale testati durante la campagna sperimentale erano stati ottenuti valori medi del modulo elastico vicini agli 11.500 MPa, quindi non troppo differenti da quelli stimati per la canapa impregnata di resina, ma comunque inferiori.

Emerge allora dai risultati un modesto incremento di rigidità dovuto alla sovrapposizione di più fibre lungo direzioni diverse ed alla impregnazione delle stesse con la resina, rispetto alle fibre secche monodirezionali.

I risultati e le informazioni di questa attività sperimentale suggeriscono quindi un'elaborazione futura, associata ad ulteriori prove sperimentali, che analizzi il comportamento di materiali compositi realizzati sovrapponendo più strati di fibre orientate in diverse direzioni.

La base di tale attività può riconoscersi nei dati ricavati nelle prove sperimentali e nelle simulazioni numeriche precedenti, con lo scopo di riuscire a creare e commercializzare un materiale composito multistrato che possa sostituire il legno, sia nell'edilizia che negli altri settori, con buone doti di resistenza, leggerezza e rigidità, costi inferiori, e che sia caratterizzato comunque da un materiale di base di origine naturale quale la fibra di canapa.

BIBLIOGRAFIA:

- [1] Bo Madsen, Preben Hoffmeyer e Hans Lilholt (2007), “*Hemp yarn reinforced composites – Tensile proprieties*”, in Composites, Part A: Applied science and manufacturing, n. 38, pp. 2204 – 2215.
- [2] Bo Madsen, Preben Hoffmeyer, Hans Lilholt e Anne Belinda Thomsen (2007), “*Hemp yarn reinforced composites – Yarn characteristics*”, in Composites, Part A: Applied science and manufacturing, n. 38, pp. 2194 – 2203.
- [3] M. Hautala, A. Pasila e J. Pirilä (2004), “*Use of hemp and flax in composites manufacture: a search for new production methods*”, in Composites Part A: Applied science and manufacturing, n. 35, pp. 11 - 16.
- [4] D. G. Hepworth, J. F. V. Vincent, G. Jeronimidis e D. M. Bruce (2000), “*The penetration of epoxy resin into plant fibre cell walls increases the stiffness of plant fibre composites*”, in Composites Part A: Applied science and manufacturing, n. 31, pp. 599 – 601.
- [5] Bo Madsen e Hans Lilholt (2003), “*Physical and mechanical properties of unidirectional plant fibre composites – an evaluation of the influence of porosity*”, in Composites Science and Technology, n. 63, pp. 1265 - 1272.
- [6] Bo Madsen, Anders Thygesen e Hans Lilholt (2007), “*Plant fibre composites – porosity and volumetric interaction*”, in Composites Science and Technology, n. 67, pp. 1584 – 1600.
- [7] Sandra Korte e Mark p. Staiger (2008), “*Effect of processing route on the composition and properties of hemp*”, in Fibers and Polymers, Vol. 9, n. 5, pp. 593 - 603.

- [8] Mark C. Symington, W. M. Banks, Opukuro David West e R. A. Pethrick (2009), “*Tensile testing of cellulose based natural fibers of structural composite applications*”, in *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, n. 9, pp. 1083 – 1108.
- [9] D. G. Hepworth, R. N. Hobson, D. M. Bruce e J.W. Farrent (2000), “*The use of unretted hemp fibre in composite manufacture*”, in *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, n. 31, pp. 1279 - 1283.
- [10] Paul Wambua, Jan Ivens e Ignaas Verpoest (2003), “*Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?*”, in *Composites Science and Technology*, n. 63, pp. 1259 - 1264.