



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**DIPARTIMENTO INGEGNERIA INDUSTRIALE E SCIENZE**

**MATEMATICHE**

**Corso di Laurea triennale in ingegneria meccanica (dm. 270/04)**

**Effetto della tipologia di tessuto sulle proprietà meccaniche di laminati  
compositi rinforzati con fibre di carbonio**

**Effect of fabric types on mechanical properties of composite laminates in  
carbon fiber reinforced polymers**

**Relatore: Chiar.mo**

**Tesi di Laurea di:**

**Prof. Archimede Forcellese**

**Andrea Marchionne**

**Correlatore: Chiari.ma**

**Prof.ssa Michela Simoncini**

**A.A. 2020 / 2021**

## INDICE

<b>Introduzione</b>	<b>4</b>
<b>1 Materiali compositi</b>	<b>6</b>
1.1-Proprietà e caratteristiche	7
1.2-Classificazione	9
1.3-Fibre	15
1.4-Matrici	18
1.5-Fibre di carbonio	23
1.6-Tecniche di produzione	29
<b>2 Materiali e procedure sperimentali</b>	<b>35</b>
2.1-Provini	35
2.2-Strumenti	40
2.3-Prova di trazione	42
2.4-Prova di taglio	45
2.5 Estensimetri	47
<b>3 Risultati dei test meccanici</b>	<b>51</b>
3.1-Risultati prova di trazione	51

3.2-Risultati prova di taglio	60
<b>CONCLUSIONI</b>	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA</b>	<b>72</b>

## INTRODUZIONE

La richiesta dei materiali compositi sta crescendo perché sono materiali innovativi che permettono di ottenere proprietà come: leggerezza, resistenza, rigidità, buon comportamento alla fatica, possibilità di progettare il materiale secondo il proprio bisogno e riduzione del peso che non sono state raggiunte con altri materiali come l'acciaio. Queste proprietà risultano molto importanti in settori come quello aeronautico, aerospaziale, automobilistico e sportivo, dove le esigenze sono in crescita costante dove si vogliono raggiungere risultati ancora non ottenuti.

I provini utilizzati per effettuare questi test sono stati forniti dall'azienda HP COMPOSITES, e consistono in laminati in fibra di carbonio con una forma rettangolare.

L'obiettivo principale di questi studi è quello di studiare come cambia la risposta del composito al variare del tessuto con il quale è stato laminato. I provini, infatti, sono stati laminati con differenti tessuti aventi 4 diverse grammature e diversi stili di intrecciatura.

Questi provini poi sono stati sottoposti alle prove meccaniche di trazione e taglio.

In più, con l'utilizzo dello stereo microscopio, sono stati analizzati visivamente i danni e i difetti che si sono verificati su ogni provino testato.

Quindi, dopo una parte introduttiva sull'argomento dei materiali compositi materiali sono stati analizzati i compositi rinforzati con fibre di carbonio e le loro tecniche di produzione

Successivamente, sono stati introdotti i provini forniti dall'azienda HP COMPOSITES e gli strumenti utilizzati per poter studiare e valutare i loro comportamenti.

Insieme a questi sono state mostrate le normative e le procedure sperimentali con le quali poi sono stati fatti i test.

Infine, dopo aver effettuato i test di trazione e taglio su ciascun provino, sono stati raccolti i dati i dati ottenuti che insieme alle formule presenti nella normativa e alle curve sforzo-deformazione che sono state tracciate, è stato possibile ricavare quali fra questi provini presentava una migliore e una peggiore resistenza a trazione e a taglio.

## 1-I MATERIALI COMPOSITI

Negli ultimi anni, a seguito di numerose ricerche e sviluppi, la produzione e l'utilizzo dei materiali compositi sono cresciuti in maniera esponenziale in numerosi settori come quelli aerospaziale, automobilistico e aeronautico, grazie alle loro ottime proprietà meccaniche.

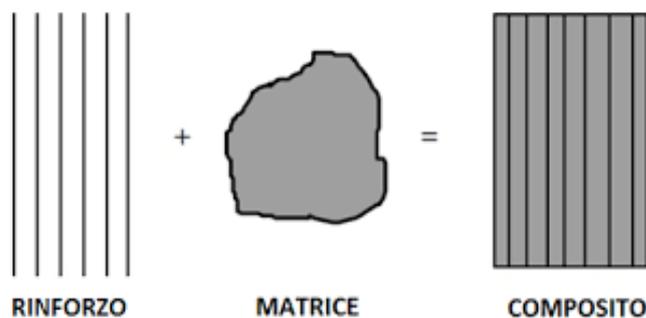


Fig. 1 materiale composito

I materiali compositi sono materiali costituiti dall'unione di due o più fasi o componenti che abbiano caratteristiche fisico-meccaniche differenti, siano chimicamente diversi e nelle quali sia possibile individuarne l'interfaccia.

Il concetto di base dei materiali compositi è quello che, unendo materiali diversi con proprietà e caratteristiche differenti, si riesca a ottenere un materiale avente proprietà migliori dei rispettivi componenti.

Un Esempio di materiale composito presente in natura è il legno, dove fibre di cellulosa sono disperse in una fase di lignina, mentre un materiale composito artificiale molto comune è il calcestruzzo, ottenuto dall'unione di pietrisco e cemento.

## 1.1-PROPRIETÀ E CARATTERISTICHE [2][3]

Nel caso più generale di un composito costituito da due componenti, si distingue un primo componente più resistente chiamato rinforzo, costituito da fibre o particelle e un secondo componente, più fragile, a cui viene applicato il primo, chiamato matrice.

La matrice ha il compito di dare stabilità, geometria al materiale e di trasferire il carico al rinforzo. Il rinforzo applicato andrà a determinare le proprietà finali del materiale.

I compositi permettono di raggiungere proprietà meccaniche non ottenibili con altri materiali, garantendo un rapporto rigidità/peso migliore.

Le caratteristiche finali del materiale dipendono da:

- proprietà fisico meccaniche,
- forma,
- concentrazione,
- dimensione,
- orientamento delle fasi.

La concentrazione espressa come volume o peso in percentuale dei componenti permette di determinare le proprietà del composito, valutate come la media pesata secondo le concentrazioni delle proprietà dei singoli materiali.

L'orientamento e la distribuzione della concentrazione hanno una particolare rilevanza nella qualità finale del materiale.

Una distribuzione uniforme rende omogeneo il composito, al contrario di una distribuzione irregolare che non garantisce le stesse proprietà in tutto il materiale e aumenta la possibilità di rottura delle zone più deboli.

L'orientamento del rinforzo invece va a influire sull'anisotropia del materiale: in particolare un orientamento casuale rende il materiale isotropo, cioè con proprietà indipendenti dalla direzione (del carico), caratteristica tipica dei compositi rinforzati con particelle a orientamento casuale, o dei compositi a fibra corta sempre orientate casualmente.

Al contrario un orientamento preferenziale fisso causa anisotropia, rendendo le proprietà dipendenti dalla direzione dell'orientamento; un esempio sono i compositi a fibra lunga.

I materiali compositi hanno ottime proprietà, migliori di quelle di materiali come alluminio e acciaio, e allo stesso tempo garantiscono un'elevata rigidità.

Alcune proprietà fondamentali dei materiali compositi sono:

- un'elevata rigidità specifica,
- un'elevata resistenza specifica,
- un'ottima resistenza a fatica,
- una buona resistenza a corrosione.

Un altro elemento a favore dello sviluppo dei materiali compositi è che queste elevate proprietà possono essere ottenute mantenendo una maggiore leggerezza rispetto ad altri materiali.

Di contro, il loro utilizzo è ancora limitato a causa dei lunghi e costosi processi di fabbricazione che ne determinano una scarsa disponibilità.

## 1.2-CLASSIFICAZIONE [1] [2][3]

I materiali compositi possono essere classificati in base alla forma e all'orientamento del rinforzo applicato nella matrice.

L'orientamento può essere preferenziale o casuale, mentre il rinforzo in genere può essere costituito da fibre o particelle.

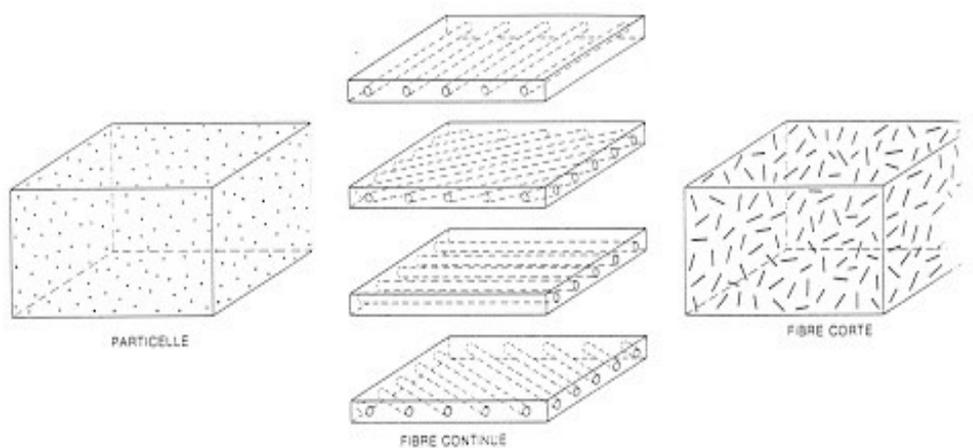


Fig.2 tipologie di composito

### COMPOSITI A PARTICELLE.

L'utilizzo di particelle o microsfele come rinforzo viene applicato quando si vogliono migliorare proprietà come la resistenza ad usura, la durezza superficiale, la lavorabilità, la resistenza alle elevate temperature, la dilatazione termica, ecc.

Al contrario dei compositi fibrosi, hanno una resistenza meccanica e una rigidità inferiore, e nel caso di formazione di una cricca c'è il rischio che quest'ultima si propaghi fino alla rottura completa del materiale.

In questi compositi il carico viene sostenuto quasi esclusivamente dalla matrice al contrario di quello che avviene invece nei compositi fibrosi. Per questo il loro utilizzo nella progettazione di elementi strutturali è limitato.

Inoltre, se si utilizza una matrice fragile, la presenza di particelle dure può portare a fenomeni locali di concentrazione delle tensioni che vanno a compromettere la resistenza meccanica del materiale.

Il vantaggio dei compositi particellari è quello di avere una distribuzione delle particelle e, quindi, del rinforzo casuale; ciò permette di ottenere dei prodotti finali isotropi, dove le proprietà non dipendono da nessuna direzione.

## COMPOSITI FIBROSI

I compositi fibrosi hanno una fase dispersa nella matrice formata da fibre che costituiscono l'elemento resistente del materiale e determinano le proprietà meccaniche del composito finale.

In genere fra matrice e fibre è presente un legante che permette una maggiore aderenza fra le due fasi.

Questi sono i compositi più utilizzati grazie al loro peso specifico estremamente basso e alle loro resistenze meccaniche che risultano essere migliori di altri materiali come l'acciaio.

Le fibre, dunque, hanno il compito di incrementare:

- la rigidità,
- la resistenza,
- la capacità di sostenere il carico,
- la capacità di conduttore o isolante.

Queste proprietà variano da composito a composito a seconda della quantità in percentuale, delle proprietà del materiale di cui sono composte le fibre e dell'orientamento delle fibre stesse.

Questi compositi possono utilizzare due differenti tipi di fibre:

- fibra discontinua ( fibra corta) : sono fibre discontinue che possono essere orientate secondo una direzione preferenziale o disposte casualmente. Sono fibre adatte ad essere applicate come rinforzo anche a pezzi con geometria complessa.

- fibra continua( fibra lunga): sono fibre allineate tra loro, che conferiscono migliori proprietà lungo la direzione delle fibre e permettono di avere una maggiore trasmissione del carico lungo la direzione delle stesse. Queste fibre hanno lunghezze paragonabili a quelle del prodotto finale. Il loro limite però è che hanno una minore adattabilità a superfici di forma irregolari.

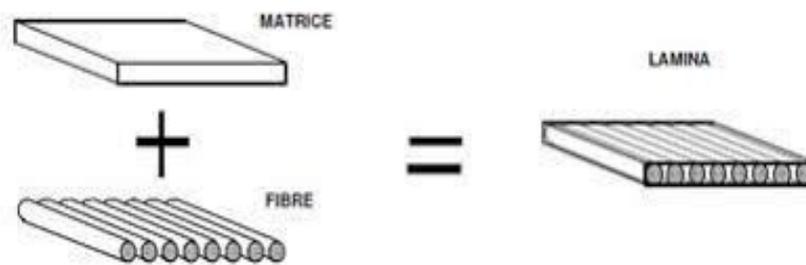


Fig.3 rappresentazione schematica di una lamina

Quando si parla di compositi a fibra lunga in genere si parla di laminati dove il rinforzo è costituito da una sovrapposizione di singole lamine preimpregnate ( prepregs) che, avendo uno spessore molto piccolo, non vengono analizzate singolarmente. Le lamine possono essere orientate tutte nello stesso modo e avere quindi un orientamento unidirezionale, oppure possono avere ognuna un orientamento diverso.

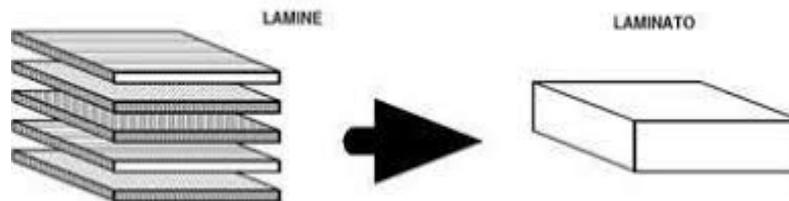


Fig.4 rappresentazione schematica di un laminato

I laminati possono essere costituiti da lamine tutte uguali oppure da lamine diverse o di diverso materiale e, in questo caso, si parla di laminati ibridi.

Un problema frequente di queste strutture è la delaminazione, cioè il distacco di uno o più strati causato da una rottura microscopica che si propaga lungo una direzione. La frattura può avanzare fra due diversi strati, che si separano come fogli di carta, o può avvenire perpendicolarmente alle fibre: il risultato dipende dal comportamento della fibra, che può sfilarsi dalla matrice, o restare intatta e unire le due parti, nel caso in cui la frattura si sia propagata alla superficie di interfaccia fra i due componenti.

La fibre utilizzate nei compositi sono dei filati ottenuti da numerosi e sottili filamenti, difficili da lavorare singolarmente, di diametro variabile, che poi, a seconda dell'utilizzo, si trovano in forma differente.

Commercialmente le fibre possono trovarsi in varie forme:

- Singolo filamento: elemento base avente un diametro di 10 $\mu$ m,
- Tow: prodotto dalla macchina di filatura; consiste in un fascio di numerosi filamenti singoli, che poi vengono arrotolati su bobine,
- Yarn: sono fibre tenute insieme grazie a una torsione.

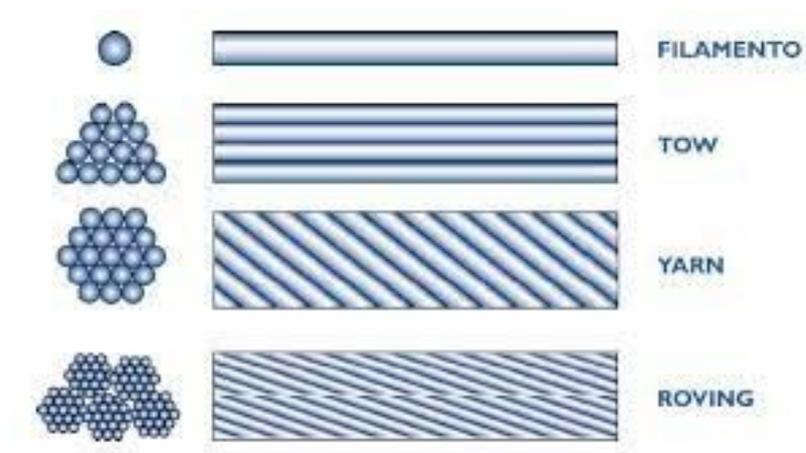


Fig. 5 rinforzi

Mettendo insieme molteplici tow o yarn, semplicemente affiancandoli o cucendoli tra loro, si vengono a formare i tape.

Oppure il rinforzo può presentarsi anche sotto forma di mat: una specie di tessuto dove le fibre sono disposte con orientamento casuale.

In genere però i rinforzi più utilizzati sono i tessuti, dei veri e propri filati, che possono avere proprietà diverse a seconda degli stili utilizzati per intrecciare le fibre.

## TESSUTI

I tessuti sono dei rinforzi ottenuti dall'incrocio più o meno ortogonale di più fili, dove si distinguono la trama e l'ordito. La trama (weft) è la fibra che si sviluppa lungo la larghezza del tessuto e ha il compito di mantenere legati i fili dell'ordito, garantendo delle proprietà migliori lungo la loro direzione. L'ordito (warp), invece, si sviluppa lungo la lunghezza del tessuto.

I tessuti possono essere bilanciati o sbilanciati a seconda che il numero dei fili dell'ordito sia uguale a quello dei fili in trama, oppure no.

I tessuti possono essere classificati in base all'orientamento:

- Tessuti unidirezionali : sono tessuti dove le fibre sono orientate tutte nella stessa direzione. Così facendo si ottengono dei valori di resistenza elevati lungo la direzione delle fibre, ma valori molto bassi lungo la direzione trasversale.
- Tessuti bidirezionali: sono tessuti aventi le fibre orientate in due direzioni preferenziali che vanno a formare una tessitura trama ordito.
- Tessuti multi assiali: sono tessuti dove le fibre sono orientate in diverse direzioni nel piano.

Ogni tessuti è caratterizzato dalla sua grammatura, che rappresenta il rapporto grammi al metro quadro relativa ad un certo spessore. Uno stesso materiale può formare tessuti con stesso spessore e stessa superficie, ma grammatura diversa. A seconda infatti di come vengono tessute le fibre e che percentuale di volume in fibra è presente nel tessuto, avremo proprietà diverse.

Una caratteristica importante è la drappabilità, cioè capacità di assumere la forma desiderata, che varia da tessuto a tessuto. Un tessuto più intrecciato risulterà più rigido e poco adatto a superfici complesse.

Un'altra caratteristica è la permeabilità, indice di quanto facilmente un tessuto si lascia attraversare dalla resina; conoscere questo parametro permette di dedurre in anticipo l'intero processo.

### 1.3-FIBRE [6]

Le fibre più utilizzate sono:

- Fibre di vetro (diametro 8-25  $\mu\text{m}$ ): conferiscono al materiale una elevata resistenza, hanno un buon modulo di elasticità, stabilità dimensionale e hanno una buona facilità di fabbricazione.

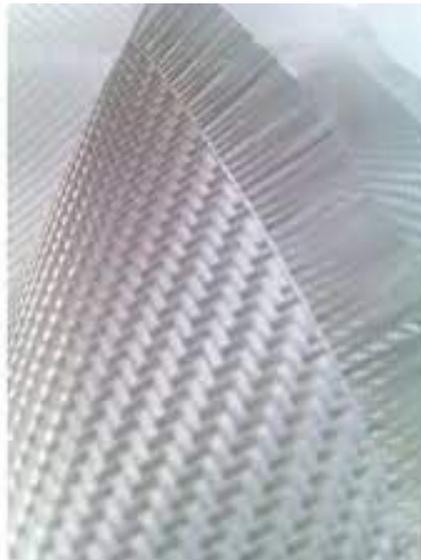


Fig. 6 tessuto in fibra di vetro

Ne esistono di tra diverse tipologie:

- 1) vetro E: è un vetro calcio-allumino-borosilicato. È il più utilizzato, il più economico, e viene utilizzato nell'industria elettrica per la sua scarsa conducibilità,
- 2) vetro S: è il più costoso e ha una elevata resistenza, è costituito da silice, allumina e magnesia. Viene utilizzato per esempio in campo militare,
- 3) vetro R: è il più raro, utilizzato molto poco ma con una ottima resistenza.

Le fibre di vetro vengono molto utilizzate per il loro basso costo, seppur presentano proprietà inferiori rispetto alle fibre aramidiche e di carbonio. In genere vengono prodotte per stiratura ed assemblaggio di monofilamenti di vetro fuso. Successivamente vengono trattate chimicamente.

- Fibre aramidiche (diametro  $12.5\mu\text{m}$ ): sono costituite da catene poliammidiche in cui gran parte di gruppi aramidici sono legati a due anelli aromatici. Sono caratterizzate da un'elevata resistenza a trazione, elevata resistenza ad impatto, ma una bassa resistenza a compressione. Un esempio molto importante è il kevlar. I due tipi principali di kevlar sono due: il kevlar 29, utilizzato per una migliore resistenza agli urti, e il kevlar 49, utilizzato per una maggiore rigidità e resistenza meccanica.



Fig. 7 tessuto in fibra aramidica

Grazie alla sua elevata resistenza il kevlar spesso viene utilizzato come rinforzo superficiale di laminati a fibre di vetro e carbonio.

- Fibre di boro: sono fibre utilizzate per la loro elevata stabilità termica; vengono depositate su filamenti di carbonio o tungsteno. Il procedimento che porta all'utilizzazione delle fibre di boro risulta molto costoso e per questo vengono poco utilizzate.

## 1.4-MATRICI [1][3]

La fase della matrice in un composito fibrorinforzato ha il compito di:

- tenere legate le varie fibre tra loro,
- distribuire il carico da sostenere,
- proteggere la superficie da fenomeni corrosivi.

Le matrici, inoltre, non devono essere suscettibili alle variazioni di temperatura per evitare che queste causino delle tensioni interne.

In genere le fibre vengono immerse nella matrice che solitamente si presenta allo stato liquido, e poi, attraverso un processo di solidificazione, viene conferita la forma voluta

Le matrici si suddividono in:

- Matrici ceramiche: sono matrici che presentano buone proprietà meccaniche. Le migliori sono costituite da ossidi, boruri, nitruri. Sono materiali refrattari, difficilmente fusibili, in grado di mantenere le loro caratteristiche fino a 200°C. Hanno un'elevata rigidità e resistenza meccanica, una buona resistenza allo scorrimento a temperatura elevata e sono poco costose.
- Matrici metalliche: utilizzano metalli come l'alluminio, ma anche magnesio, titanio e rame ai quali, come rinforzo, vengono applicate in particolare fibre di carbonio e boro. Sono le matrici che presentano le proprietà meccaniche migliori, ma comportano costi molto elevati dovuti al loro processo produttivo per questo vengono preferite le matrici polimeriche.
- Matrici polimeriche: sono le matrici più utilizzate, grazie all'ottimo rapporto fra le proprietà meccaniche e il costo di produzione. Inoltre, presentano un buon comportamento anche

ad alte temperature di utilizzo. Si suddividono in matrici termoplastiche e termoindurenti.

#### RESINE TERMOPLASTICHE

Le resine termoplastiche lavorate ad alta temperatura hanno una maggiore fluidità e non perdono le loro proprietà una volta solidificate. Sono costituite da molecole lineari, hanno una buona resistenza all'urto, ma la loro elevata viscosità a basse temperatura e il costo elevato per la loro produzione ne limitano l'utilizzo e portano a preferire le resine termoindurenti.

#### RESINE TERMO INDURENTI.

Le resine termoindurenti hanno proprietà migliori delle termoplastiche, presentano caratteristiche stabili fino ad alte temperature, ma quando si supera la temperatura limite si degradano in maniera irreversibile. Una volta indurite non possono essere rimodellate, caratteristica dovuta alla formazione a seguito della prima fusione, di un reticolo tridimensionale tenuto insieme da legami forti che rende irreversibile il processo.

Sono caratterizzate da:

- stabilità termica e chimica,
- valori elevati di resistenza e moduli specifici,
- bassa densità.

Questo comportamento è giustificato dalla loro struttura e dai legami che si formano dal loro processo produttivo.

Le matrici polimeriche sono costituite da una catena polimerica ottenuta dall'unione di più unità fondamentali, monomeri, che si uniscono per poliaddizione in presenza di un induritore.

Per la loro produzione sono necessari impianti di grandi dimensioni in grado di disperdere l'elevata quantità di calore che viene prodotta durante il processo di polimerizzazione.

Si distinguono tre fasi:

- Gelificazione: qui avviene il 70 % della polimerizzazione e solitamente è una fase che si sviluppa a temperatura ambiente.
- Cura: fase durante la quale il polimero viene riscaldato sotto pressione per far sì che si instauri un buon legame fibra matrice. In questa fase, inoltre, vengono espulsi eventuali gas presenti e minimizzate le tensioni dovute alla fase di gelificazione.
- Post cura: è l'ultima fase della polimerizzazione; avviene a una temperatura ancora maggiore per permettere di completare in maniera efficiente l'indurimento.

La temperatura dell'ultima fase di polimerizzazione influenza la temperatura critica, cioè quella temperatura alla quale il polimero non può più lavorare perché, se superata, si arriva alla rottura dei legami che tengono unita la catena polimerica e dunque la matrice.

Le matrici termoindurenti più utilizzate sono:

- Resina epossidica: è la resina più costosa, la più utilizzata per merito delle sue proprietà: ha una buona resistenza meccanica e alla frattura, una buona compatibilità con i metalli, e basso ritiro e quindi basse tensioni residue e/o distorsioni dei manufatti. Grazie all'ottimo legame fibra matrice ha una buona resistenza alla delaminazione e, inoltre, ha il vantaggio di poter essere trattata a temperature e pressioni non elevate. Caratteristica essenziale è la presenza di gruppi epossidici, anelli a tre termini, uno di ossigeno e due di carbonio. La loro struttura è

particolarmente reattiva, poiché l'anello a tre atomi è soggetto ad un forte stato tensionale e tende ad aprirsi.

Gli svantaggi dell'utilizzo di resine epossidiche sono: viscosità relativamente elevata che rende difficoltoso l'annegamento delle fibre nella matrice, costo elevato, bassa temperatura critica.

- Resine poliestere: sono resine che vengono utilizzate principalmente per le fibre di vetro e in particolare vengono applicate nei settori ferroviario, marino, chimico ed elettrico, grazie alla loro buona resistenza agli agenti ambientali e corrosivi. Sono costituite da un poliestere non saturato disciolto in un monomero reagente. Le caratteristiche principali sono il basso costo, la bassa viscosità e proprietà meccaniche variabili che permettono un facile adattamento alle esigenze di progetto.

Gli aspetti negativi di queste resine sono l'elevato ritiro, che è causa di una scarsa adesione, il debole legame fibre matrice e una temperatura massima di esercizio più bassa delle resine epossidiche.

- Resine fenoliche: presentano proprietà molto simili alle resine epossidiche e possono essere utilizzate a temperature più elevate. Sono ottenute dalla reazione del fenolo con la formaldeide in presenza di un catalizzatore acido o alcalino. La possibilità di essere lavorate ad alte temperature le portano ad essere preferite nei settori dove la resistenza al fuoco è importante: aeronautico, navale, condotte di gas. Gli svantaggi sono l'elevata pressione durante la fase di cura e l'estrema pericolosità per la salute dell'uomo; esse, infatti, hanno effetti cancerogeni a causa della presenza della formaldeide.

- Resine viniliche: sono resine che hanno proprietà molto simili alle resine poliestere. A differenza di quest'ultime hanno un legame fibra matrice più forte che conferisce al materiale una maggiore resistenza a fatica e a rottura. Il loro utilizzo, però, risulta limitato a causa del loro costo elevato e dalla loro poca flessibilità

## 1.5-FIBRA DI CARBONIO [4][10]

La fibra di carbonio è un polimero di atomi di carbonio avente una struttura grafite, ovvero con una struttura planare a simmetria esagonale. Gli atomi su uno stesso piano sono strettamente legati a causa dei legami covalenti che si instaurano, mentre i vari piani sono tenuti insieme da legami deboli: le forze di Van der Waals.

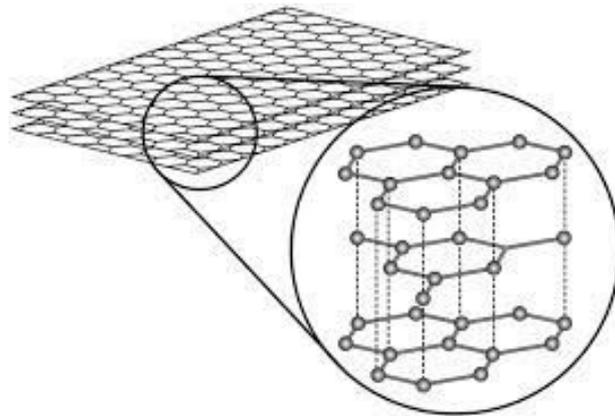


Fig. 8 struttura grafite

Questa differenza di forze è causa di un comportamento anisotropo del carbonio che presenterà un elevato modulo elastico lungo i piani e molto basso lungo le direzioni trasversali. Inoltre, avrà dei moduli di resistenza differente a seconda della direzione.

Le caratteristiche delle fibre di carbonio, che hanno un diametro compreso fra i 5 e 15  $\mu$ , hanno un'ottima resistenza, in particolar modo lungo la direzione di orientamento dei singoli filamenti, ma un basso modulo elastico.

Sono caratterizzate da un alto modulo di elasticità normale che ha un valore variabile dai 150 ai 850 GPa, e un'elevata resistenza con un carico a rottura tra i 1900 e i 3200 MPa.

## COMPOSITI IN FIBRA DI CARBONIO

I compositi in fibra di carbonio hanno avuto un notevole sviluppo negli ultimi anni, grazie alla loro elevata resistenza e rigidità specifica, e in particolare al miglioramento del rapporto prestazioni/costo che ne ha permesso l'accessibilità in più settori come quello sportivo, dei trasporti e nautico.



Fig. 9 tessuto in fibra di carbonio

Le fibre di carbonio vengono prodotte da tre differenti precursori: rayon, pece e il più utilizzato pan.

Il poliacrilonitrile (PAN) è il più importante grazie alla sua elevata resa e alla struttura grafitica relativamente migliore che si realizza dopo il processo di carbonizzazione ad alta temperatura.

Il poliacrilonitrile è un polimero lineare che possiede gruppi di carbonio-azoto(nitrile).

La produzione delle fibre di carbonio prodotte a partire dal PAN avviene attraverso tre fasi principali:

- Ossidazione : le fibre precursori a base di PAN vengono trattate a temperature di 200-300° in ambiente ossidante, alle quali avvengono reazioni veloci e difficili da controllare.

L'ossidazione si ottiene facendo passare le fibre attraverso un forno avente aree riscaldate ad aria con temperature differenti in modo da ottenere un riscaldamento graduale. È necessario mantenere un aumento graduale della temperatura perché un aumento rapido può causare dei difetti all'interno della fibra. Durante l'ossidazione le catene polimeriche vengono convertite in strutture cicliche. Si creano dei polimeri di tipo ladder che hanno una composizione chimica influenzata dalla temperatura a cui avviene l'ossidazione: maggiore è il tasso di ciclizzazione, migliori sono le proprietà. Successivamente vengono effettuati dei trattamenti di stabilizzazione al fine di evitare fenomeni di rilassamento e scissione delle catene molecolari. Durante l'ossidazione il precursore PAN aumenta la sua densità e le fibre contengono circa il 50% in peso di carbonio, il 20-25% di azoto, il 5% di ossigeno e il resto di idrogeno.

- Carbonizzazione: i precursori stabilizzati vengono sottoposti a pirolisi termica ad alte temperature. Durante le prime fasi ci troviamo ancora a temperature relativamente basse, in modo da non avere una velocità di riscaldamento eccessiva. Successivamente la carbonizzazione si completa a 1500/1600 gradi circa. In questa fase abbiamo un'eliminazione dell'idrogeno, mentre l'azoto viene sostituito dal carbonio.

Bassi tassi di carbonizzazione permettono di eliminare grandi quantità di azoto. Il polimero forma collegamenti incrociati nella prima fase a bassa temperatura e, successivamente, si vanno a formare anelli di carbonio con un orientamento ben preciso.

Questa particolare struttura è responsabile dell'elevata resistenza alla trazione dei CF.

- Grafitizzazione: è la fase finale del trattamento termico che arriva fino a 3000°. È in questa fase che hanno luogo l'ordinamento e l'orientamento dei cristalli lungo la fibra e questo comporta un modulo di Young più elevato e una minore resistenza a trazione finale.

Il forno in questa fase utilizza una muffola di grafite e lavora in un'atmosfera inerte tenuta sotto controllo per evitare difetti e rotture premature. In questa fase finale, per una migliore adesione del carbonio ai polimeri, viene effettuato un trattamento applicando solventi o emulsioni con la stessa composizione chimica della resina finale. Le superfici delle fibre di carbonio vengono irruvidite per una maggiore superficie disponibile per l'interazione fibra matrice. Applicando resine sulla superficie, si migliora la lavorabilità e, inoltre, le fibre preimpregnate aumentano la resistenza al taglio interfacciale tra la fibra e la matrice.

Il Pitch, pece o residuo catramoso, altro precursore delle fibre di carbonio, è il residuo della distillazione del catrame o petrolio, e consiste in migliaia di carburi aromatici con un peso molecolare di 200-800 unità di massa atomica.

Per ottenere le fibre di carbonio devono essere effettuati una serie di trattamenti. Come prima fase la materia deve essere pretrattata per ottenere delle fasi più pulite e più facilmente lavorabili in seguito.

Successivamente avviene un trattamento termico tra i 400-450°C che porta alla formazione di una mesofase, cioè cristalli liquidi con un orientamento non ancora definito. Il carbonio risulta disposto sotto forma di anelli aromatici con gruppi alchilici periferici. La pece fusa viene filata, così da orientare le molecole lungo l'asse delle fibre.

Ora avviene prima un termo fissaggio intorno ai 300°C e, infine si ottiene la finale conversione delle fibre precursori in fibre di carbonio, grazie a una fase di stabilizzazione in un'atmosfera ossidante, seguita da una fase di carbonizzazione/grafitizzazione.

Per poter ottenere una buona resistenza a trazione e moduli di Young elevati, le temperature in questa fase raggiungono i 2000-3000°C.

Mettendo a confronto le fibre di carbonio ottenuto da Pitch e PAN, si nota come il PAN permetta di ottenere delle fibre con una tenacità più elevata e un maggiore allungamento a rottura, mentre la pece garantisca un maggior modulo di Young e una minore densità  $\text{gr/cm}^3$ .

Il rayon è una fibra che viene ottenuta partendo dalla cellulosa e prodotta tramite filatura. Per arrivare alla fibra di carbonio il rayon deve subire diversi trattamenti.

Come prima fase avviene una stabilizzazione intorno ai 400°, successivamente una carbonizzazione a 1000-1550° e infine la grafitizzazione intorno ai 2000-2800°C.

Nelle prime fasi di riscaldamento le fibre vengono stirate per far allineare gli strati di grafite lungo l'asse delle fibre in modo da ottenere un'elevata rigidità e resistenza.

La produzione delle fibre di carbonio, dopo essere state trascurate negli ultimi decenni, ora viene ripresa in considerazione per via dei minor costi rispetto all'utilizzo del PAN come precursore.

A partire da questi precursori, a seconda dei vari trattamenti a cui sono sottoposti, si vengono a formare varie categorie di fibre:

- LM (low modulus): utilizzate per aumentare la tenacità della matrice,
- SM (standard modulus): aventi un modulo elastico inferiore ai 250GPa,
- IM (intermediate modulus): con un modulo elastico che può raggiungere i 320 GPa, detto anche high strenght,
- HM ( high modulus): dove il modulo elastico risulta inferiore ai 440 GPa,
- UHM ( ultra high modulus): nel quale il modulo elastico supera i 440 GPa; e queste fibre vengono utilizzate prevalentemente nel campo aeronautico e aerospaziale.

## 1.6-TECNICHE DI PRODUZIONE [1][2]

I materiali compositi rinforzati con fibre di carbonio possono avere, come abbiamo visto, proprietà e caratteristiche fisico meccaniche diverse. Il processo di produzione è un fattore che influenza molto il risultato finale.

Le tecnologie di produzione di un composito variano a seconda della forma, delle dimensioni e delle proprietà richieste del pezzo finito.

Gli obiettivi di ciascun differente processo produttivo sono:

- Ottenere un prodotto finito e compatto,
- Cercare di eliminare i vuoti,
- Ridurre le tensioni interne.

I processi produttivi dei materiali compositi sono molteplici. I più diffusi sono:

- stesura manuale,
- resin transfer molding (RTM),
- filament winding,
- pultrusione,
- vacuum infusion (RIFT);
- produzione in autoclave.

### STESURA MANUALE

È una tecnologia che viene utilizzata là dove bisogna lavorare su superfici di grandi dimensioni e dove la produzione avviene per piccole quantità e per elementi di grandi dimensioni, come ad esempio gli scafi delle navi.

Inizialmente viene applicato un primo strato di fibre su uno stampo nel quale, poi, viene aggiunta la resina catalizzata, e questo processo si applica uno o più volte fino a quando non si raggiungono la forma, lo spessore e le percentuali in volume di fibra previste.

Successivamente, con l'aiuto di strumenti opportuni come rulli in metallo o plastica, viene eliminata la resina in eccesso.

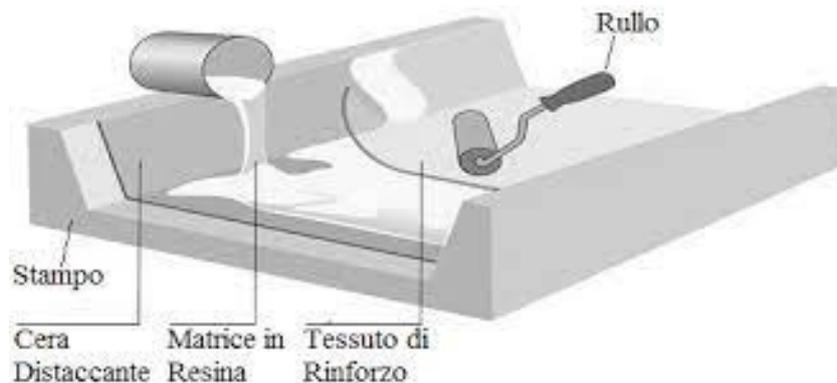


Fig.10 esempio di stesura manuale

La polimerizzazione solitamente avviene a temperatura ambiente.

Laddove si vuole ottenere una migliore qualità del laminato stampato, è possibile utilizzare dei tessuti preimpregnati, cioè l'impregnazione dei tessuti viene effettuata prima della loro deposizione, e ciò permette di dosare la giusta quantità di resina per ogni lamina.

## FILAMENT WINDING

È una tecnica di produzione che solo negli ultimi anni ha avuto uno sviluppo maggiore, grazie all'introduzione di nuovi materiali che hanno permesso di garantire una buona qualità del prodotto mantenendo i costi contenuti.

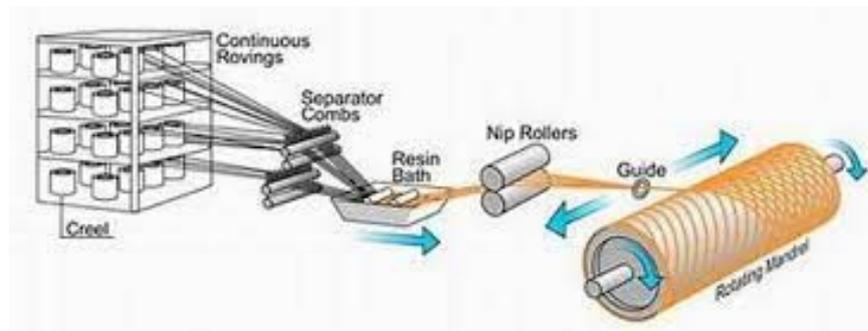


Fig.11 esempio di filament winding

Il filament winding è un processo di produzione utilizzato per pezzi di simmetria cilindrica o aventi una superficie convessa. La fibra di rinforzo viene prima fatta passare in un bagno di resina e, successivamente, viene avvolta su un mandrino avente la forma voluta. Una volta raggiunto il numero di strati richiesto, il prodotto viene curato e trattato a temperatura ambiente o in un forno e, successivamente, staccato dal mandrino. I mandrini devono riuscire a resistere agli sforzi di compressione provati dalle fibre durante l'avvolgimento, mantenere sufficienti proprietà meccaniche ad alte temperature ed essere facilmente rimovibili.

Le proprietà del prodotto finale invece dipendono dal tipo di avvolgimento, dal tipo di impregnazione, dal tipo di mandrino e dalla temperatura a cui avviene la solidificazione della resina.

## PULTRUSIONE

È una tecnica che si basa sul meccanismo opposto dell'estrusione. In questo caso, infatti, invece di applicare una forza di spinta per forzare e costringere il materiale a passare all'interno di uno stampo, viene applicata una forza di tiro che permette il passaggio delle fibre una volta impregnate con la resina nello stampo.

Questa tecnologia ancora non viene largamente utilizzata, anche se l'elevata resistenza a trazione, l'elevata percentuale di rinforzo ottenibile insieme a proprietà come resistenza alla corrosione, hanno ampliato il campo di utilizzo di prodotti ottenuti mediante pultrusione. La pultrusione viene utilizzata principalmente per la produzione di elementi di lunghezza continua e sezione trasversale costante.

I trefoli di fibre continue vengono impregnati in un bagno di resina e fatti passare attraverso una filiera di acciaio riscaldato che determina la forma del profilato.

È un processo facilmente automatizzabile, che permette di ridurre l'intervento umano alle sole fasi di avvio, alle verifiche di eventuali interruzioni nell'alimentazione del rinforzo e del livello di resina nella vaschetta di impregnazione.

### TECNOLOGIA RTM (resin transfer molding)

Con questa tecnologia il rinforzo asciutto viene preinserito all'interno dello stampo avente la forma del pezzo desiderato. Poi i due stampi, stampo e controstampo, vengono chiusi racchiudendo dentro di loro il rinforzo. Attraverso uno o più fori, opportunamente disposti, viene iniettata la resina in pressione, così da assicurare la corretta impregnazione. Successivamente la polimerizzazione avviene a temperatura ambiente o a caldo.

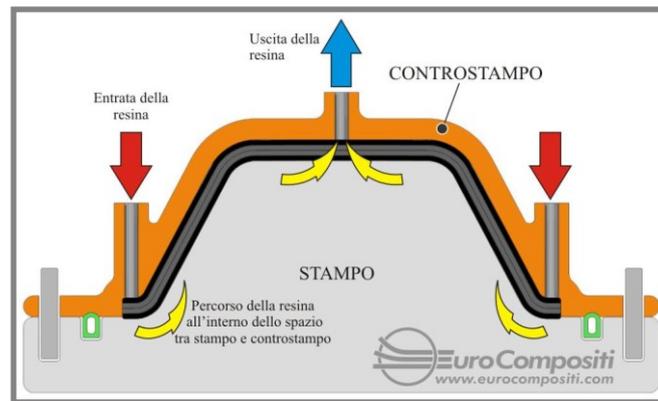


Fig.12 esempio di RTM

È il processo più utilizzato per la produzione di grandi serie di pezzi dove il pregio strutturale non è così importante.

Inoltre, permette di ottenere prodotti con spessori maggiori, e con geometrie complesse, senza ricorrere a un trattamento di finitura finale.

### RIFT (resin infusion flexible tooling)

È una variante delle RTM. In questo caso viene utilizzata una sola faccia dello stampo rigido, dove viene posizionato il rinforzo. La resina invece è appoggiata sopra, su uno strato di supporto e, operando il vuoto, quest'ultima viene spinta all'interno dello stampo, riducendo così i contatti fra operatori e resina liquida. Lo stampo, in questo caso, deve essere progettato per permettere di far entrare la resina e, al contempo, deve essere dotato di opportuni fori per creare il vuoto necessario.

Questa tecnologia presenta dei costi elevati e dei rischi per la salute degli operatori che ne limita l'utilizzo.

## LAMINAZIONE IN AUTOCLAVE.

È la tecnologia di produzione che permette di ottenere laminati con caratteristiche meccaniche più elevate rispetto agli altri metodi di produzione. L'autoclave, infatti, permette di raggiungere pressioni elevate fino a 10 atm, e temperature che raggiungono i 2000°C, così da ottenere un prodotto finito più compatto. Inoltre, l'elevate pressioni, contribuiscono all'eliminazione dei vuoti e permettono di utilizzare una maggiore percentuale di rinforzo.

Questa tecnica viene utilizzata dove si vogliono ottenere delle proprietà meccaniche elevate, come nel campo aeronautico e spaziale.

### 2-MATERIALI E PROCEDURE SPERIMENTALI

In questo lavoro sono state effettuate prove meccaniche su compositi in fibra di carbonio, andando a osservare come cambiano le proprietà meccaniche nei vari provini, al variare della tipologia di tessuto delle lamine e del numero di lamine effettivamente utilizzate per ottenere il provino.

Le prove meccaniche che sono state eseguite sono state:

- prove a trazione seguendo la normativa ASTM D3039,
- prova di taglio nel piano seguendo la normativa ASTM D 3518.

Eseguendo le prove meccaniche, sono stati ricavati i valori relativi di sforzo a cui i provini sono stati sottoposti e di deformazioni che si sono verificate all'aumentare del carico, fino al raggiungimento del punto di rottura.

#### 2.1-PROVINI

I provini utilizzati nei seguenti esperimenti sono dei laminati in fibra di carbonio forniti dall'azienda HP COMPOSITES.

I materiali utilizzati per dare origine ai laminati finali sono dei tessuti preimpreganti in fibra di carbonio con resina epossidica.

I preimpreganti sono tessuti già bagnati con resina catalizzata e permettono di ottenere una distribuzione omogenea della resina, un rapporto resina/fibra costante e una laminazione più facile nel caso di forme complesse.

Questi tessuti sono stati sovrapposti per dare origine al laminato finale, che è composto da un numero di lamine differenti a seconda del tessuto utilizzato e della prova meccanica effettuata.

Ogni provino successivamente è stato identificato con due lettere:

- la prima lettera specifica la grammatura del tessuto utilizzato,
- la seconda va a indicare la prova meccanica che è stata effettuata sul provino.

I provini utilizzati sono:

- PROVINO A: è il tessuto con grammatura minore  $193 \text{ g/m}^2$  ha una tessitura di tipo plain weave con filamenti 12 k e viene laminato con un contenuto di resina pari al 42%.
- PROVINO B: ha una grammatura di  $380 \text{ g/m}^2$  composta da filamenti 12k, con una tessitura di tipo twill 2x2, e il contenuto di resina necessario è pari al 40 %.
- PROVINO C: è il tessuto avente una grammatura di  $630 \text{ g/m}^2$  come il tessuto B presenta una tessitura di tipo twill 2x2 e filamenti 12k, ma viene utilizzata una quantità di resina leggermente inferiore: 37%.
- PROVINO D: presenta la grammatura maggiore pari a  $800 \text{ g/m}^2$ , la tessitura è di tipo twill 2x2 con filamenti 24k e un contenuto di resina pari al 35%.



Fig.13 le 4 differenti tipologie di provini testati

Per ogni provino A, B, C e D sono stati testati 5 campioni dai quali poi sono stati ricavati i dati necessari a confrontare e valutare i diversi comportamenti.

I 5 campioni per tipologia di provino poi sono stati sottoposti a prove di trazione e taglio.

Come abbiamo visto i tessuti utilizzati nei vari materiali compositi si differenziano in base allo stile con cui sono stati filati. Più precisamente si riconoscono i seguenti stili:

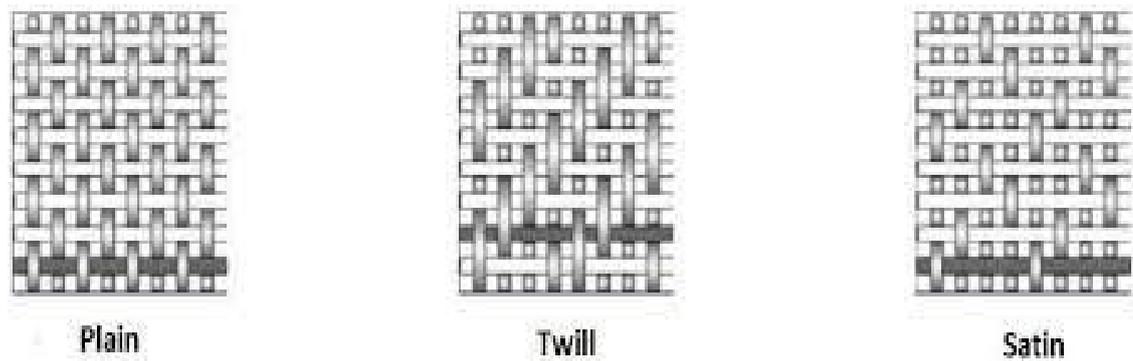


Fig.14 stili di tessuto

### PLAIN WEAVE

In questo tipo di tessuto ogni filo di ordito passa alternativamente sopra e sotto i fili di trama. È un tessuto utilizzato prevalentemente per superfici semplici a causa del suo particolare intreccio, caratterizzato da poco spazio fra i singoli filamenti e da un alto livello di stabilità. Rispetto ad altri tessuti è poco flessibile, e l'alto numero di fibre piegate ne limita le proprietà meccaniche.

### SATIN WEAVE

Nel satin weave ogni filo di trama si intreccia con quattro o più fili di ordito. Presenta un'ottima drappabilità (capacità di assumere la forma desiderata) ma una bassa stabilità.

### TWILL WEAVE

Nel twill ogni filo di trama passa in sequenza sopra e sotto due o più fili di ordito in maniera regolare. Rispetto al tessuto plain ha caratteristiche meccaniche e stabilità leggermente inferiori, risulta però più frappabile.

### TESSUTO UNIDEREZIONALE

Un particolare tessuto è quello unidirezionale dove sono presenti solo le fibre dell'ordito senza quella in trama. Questa tipologia di tessuto garantisce un'ottima resistenza lungo la direzione delle fibre ma una scarsa resistenza nella direzione ortogonale ad esse.

In questi tessuti si può verificare un disallineamento delle fibre fuori dal piano del tessuto che va a peggiorare la resistenza a trazione del tessuto, e favorendo il cedimento interlaminare. Il numero di filamenti influisce sul difetto del disallineamento: più il numero di filamenti è elevato più il difetto si amplia.

Per limitare questo aspetto negativo si utilizzano gli spread tow, aventi una sezione più larga e schiacciata che permette di ottenere lamine più sottili. Essi, inoltre, permettono di limitare sia l'effetto del disallineamento, sia la distanza fra due difetti.

Così facendo si riduce la resina in eccesso e il peso del laminato.



Fig.15 spread tow

### 2.2-STRUMENTI

#### STEREOMICROSCOPIO

Una volta effettuate le prove meccaniche, i provini sono stati osservati utilizzando lo stereo microscopio, più precisamente il modello EZ4D della Leica.

Con questo strumento è stato possibile osservare e fotografare i fenomeni di cricche e de laminazioni che si sono verificati sui provini testati.

Con la possibilità di scattare foto a tutti i provini, inoltre, si è riusciti a confrontare come i provini laminati con tessuti diversi hanno risposto alla stessa prova meccanica, così da osservare visivamente cosa è accaduto, come si sono rotti e deformati.



Fig.16 Stereomicroscopio Leica modello EZ4D

### 810 MATERIAL TEST SYSTEM.

Le prove meccaniche sono state effettuate con il macchinario 810 MTS: Macchina di prova servo idraulica da 250 kN utilizzata per test statici e a fatica (trazione, compressione, flessione) e prove di meccanica della frattura su provini ed elementi meccanici di diversa geometria e materiale. Il sistema è equipaggiato con un'unità di acquisizione dati gestita da PC per monitorare carico, deformazione e spostamento in tempo reale. Per la misura delle deformazioni vengono utilizzati estensimetri MTS con differenti basi di misura ed estensimetri elettrici a resistenza.

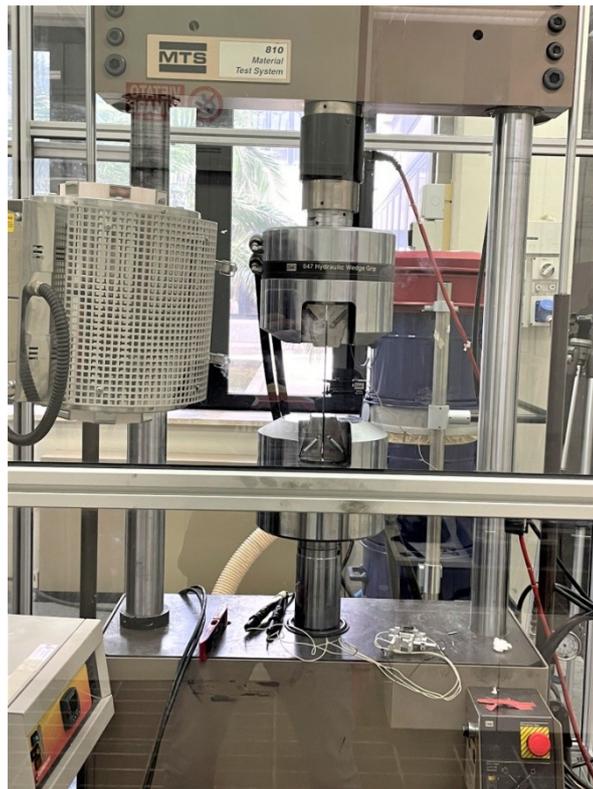


Fig. 17 macchina a trazione MTS 810

### 2.3-PROVA A TRAZIONE ASTDM D3039

La prova a trazione è stata eseguita su provini, che sono stati forniti dall'azienda HP COMPOSITES, aventi tutti la stessa forma rettangolare e dimensione come previsto dalla normativa: una lunghezza di 250mm, una larghezza di 25mm e uno spessore di 2,5mm.

Per poter ottenere un provino con lo spessore di 2,5mm sono stati utilizzati un numero differente di lamine per i vari tessuti, infatti i provini A, B, C e D sono ottenuti rispettivamente dalla sovrapposizione di 12, 6, 4 e 3 lamine.

Ogni provino durante la prova è stato strumentato con un estensimetro elettrico consentendo la misurazione della resistenza e della deformazione a rottura e del modulo di Young.

Il provino, una volta tagliato della forma e dimensione voluta, è stato posizionato nella macchina 810 MTS, dove è stato caricato monoassialmente. Durante la prova, l'estensimetro o strain gage applicato al provino ha permesso di registrare e determinare la risposta sforzo-deformazione. Lo sforzo e la deformazione a rottura vengono misurate a partire dalla forza massima registrata.

I test a trazione sono stati eseguiti su un numero di 5 provini così da poter avere una maggiore affidabilità del test.

Secondo la normativa ASTDM D3039, la velocità di deformazione che è stata applicata è di 2mm/min, così da ottenere la rottura entro un tempo di 10 minuti.

Per questo tipo di prova i dati sono stati raccolti con un campionamento di 1/5 dati al secondo con un minimo di 100 dati per ogni prova.

I procedimenti della prova sono stati:

- Inizialmente una volta tagliato il provino è stato incollato lo strain gage in corrispondenza della mezzeria;
- Successivamente il provino è stato inserito nella macchina e le estremità sono state serrate con opportuni afferraggi;
- Il provino poi è stato collegato alla strumentazione di registrazione di dati
- Infine il provino è stato tirato fino a raggiungere il punto di rottura.

Una volta tirato il provino, applicando le opportune formule presenti nella normativa di riferimento, il sistema ha permesso di riportare tutti i dati registrati dalla macchina.

Per quanto riguarda la sollecitazione a trazione in ciascun punto richiesto è stata utilizzata la seguente equazione:

$$F_{max} = \frac{P_{max}}{A}$$
$$\sigma_i = \frac{P_i}{A}$$

Dove:

- La  $P_{max}$  corrisponde alla forza massima prima della rottura in Newton,
- la  $F_{max}$  è il carico a rottura in Mpa,
- $A$  è l'area della sezione,
- La  $\sigma_i$  è la sollecitazione le punto i-esimo in MPa,
- $P_i$  è il carico in newton nel punto i-esimo.

L'estensimetro applicato permette di ricavare la deformazione dall'equazione:

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_i}{Lg}$$

- $L_g$  è la base di misurazione dell'estensimetro in mm.

$$E^{chord} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$
$$\nu = -\Delta\varepsilon_t / \Delta\varepsilon_l$$

Dove:

- $E^{chord}$  è il modulo elastico in GPa,
- $\Delta\sigma$  è la differenza di tensione tra due punti in MPa,
- $\Delta\varepsilon$  è la differenza di tensione fra due punti,
- $\nu$  è il coefficiente di Poisson,
- $\Delta\varepsilon_l$  è la differenza di deformazione longitudinale fra due punti,
- $\Delta\varepsilon_t$  è la differenza di deformazione trasversale fra due punti.

### 2.4-PROVA MECCANICA DI TAGLIO

La prova meccanica di taglio nel piano è stata eseguita seguendo la normativa ASTM D 3518.

I provini anche in questa prova sono stati tagliati tutti con la stessa forma rettangolare e con le stesse dimensioni lunghezza 250mm, larghezza 25mm e spessore 2,5mm.

In questa prova i laminati sono gli stessi della prova a trazione, ma la differenza è che in questo caso ogni provino è stato tagliato in modo da avere le fibre disposte con un angolo +/- 45° rispetto alla lunghezza e quindi alla direzione lungo la quale è stato applicato il carico a trazione. La normativa prevede infatti di eseguire una prova meccanica a trazione monoassiale in conformità con la normativa ASTM 3039 ma, al contrario del caso precedente, il laminato ha una orientazione delle fibre a +/- 45°. Lo sforzo e la deformazione di taglio nel piano, secondo la normativa vengono calcolati a partire dal carico assiale applicato e dalle relative deformazioni.

La prova è stata effettuata utilizzando lo stesso macchinario utilizzato per la prova a trazione, MTS 810, e la stessa strumentazione per la raccolta dati utilizzati nella prova a trazione, come voluto dalla normativa.

La procedura è stata la stessa, il provino una volta preparato è stato posizionato nella macchina, collegato al sistema di acquisizione dati che ha permesso la misurazione della deformazione longitudinale e trasversale e infine tirato fino a rottura.

Se la rottura finale non si è verificata entro una deformazione del 5% della lunghezza i dati sono stati troncati al raggiungimento di questo valore. Quando sono stati troncati, ai fini del calcolo, il massimo dello

sforzo di taglio doveva essere considerato al 5% della deformazione di taglio come prevede la normativa.

La sollecitazione massima di taglio nel piano è stata calcolata con la seguente formula

$$\tau_{12}^m = \frac{P^{max}}{2A}$$

Mentre la sollecitazione in ogni punto *i*-esimo è data da

$$\tau_{12i} = \frac{P_i}{2A}$$

$\tau_{12}$  = è lo sforzo di taglio massimo in Mpa,

$P^{max}$  = è la forza massima prima della rottura in N,

$\tau_{12i}$  = è lo sforzo di taglio nel punto *i*-esimo in MPa,

$P_i$  = è la forza nel punto *i*-esimo in N,

$A$  = è l'area della sezione trasversale in mm<sup>2</sup>.

La deformazione di taglio in ogni punto e la deformazione di taglio massimo sono state calcolate con le seguenti formule:

$$\gamma_{12i} = \varepsilon_{xi} - \varepsilon_{yi}$$

$$\gamma_{12}^m = (5\% \text{ di } \gamma_{12} \text{ al massimo dello sforzo di taglio})$$

Dove:

$-\gamma_{12}$  = è la deformazione di taglio nel punto *i*-esimo in  $\mu\varepsilon$ ,

$-\varepsilon_{xi}$  = è la deformazione longitudinale nel punto *i*-esimo in  $\mu\varepsilon$ ,

$-\varepsilon_{yi}$  = è la deformazione trasversale nel punto *i*-esimo in  $\mu\varepsilon$ ,

$-\gamma_{12}^m$  = è la deformazione di taglio massima in  $\mu\varepsilon$ .

### 2.5-ESTENSIMETRI [9]

L'estensimetro, o strain gage, è un sensore in cui la deformazione elastica subita da un elemento metallico, oppure da un semiconduttore, si riflette nella variazione della resistenza dell'elemento.

Durante gli esperimenti è stato applicato un estensimetro ad ogni provino che, se posizionato correttamente, partendo dalla variazione della resistenza subita, ha permesso di misurare la deformazione e lo sforzo a cui è stato soggetto il provino durante la prova meccanica.

Più precisamente in questi esperimenti sono stati utilizzati degli estensimetri a foglio con griglia metallica dell'azienda HBM.

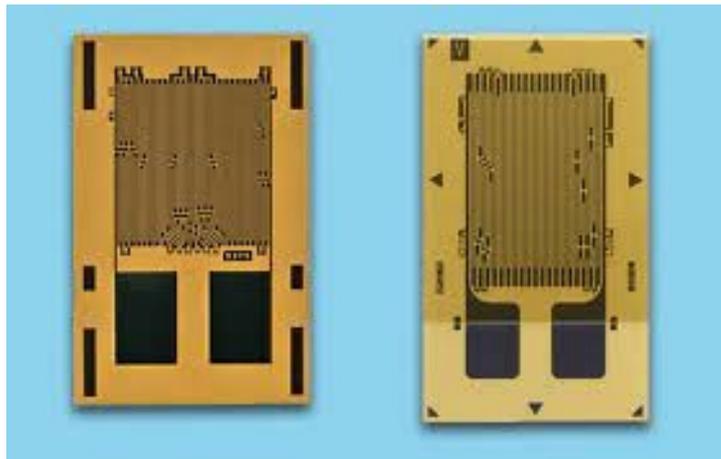


Fig. 18 estensimetri

L'estensimetro a foglio a griglia metallica è costituito da una griglia di filamento (resistenza) di circa 0,025 mm di spessore, applicata direttamente sulla superficie da un sottile strato di resina epossidica. All'estremità della griglia sono ricavate delle piazzole per il collegamento dei reofori di alimentazione e misura.

Quando un carico viene applicato alla superficie, il conseguente cambiamento di lunghezza in superficie viene comunicato alla resistenza e la deformazione corrispondente viene misurata in termini

di resistenza elettrica del filo nel foglio, che varia linearmente con la deformazione stessa. Il diaframma del foglio ed il legante adesivo devono collaborare nella trasmissione della deformazione, mentre l'adesivo deve servire anche come isolante elettrico tra la griglia e la superficie del foglio.

In genere gli estensimetri più comuni hanno una resistenza pari a 120 e 350  $\Omega$  anche se possono avere anche valori di resistenza più elevati.

La minima deformazione rilevabile risulta di  $10^{-6}$  mentre la massima risulta essere di circa  $10^{-2}$ .

Al fine di misurare la deformazione con un estensimetro a foglio, questi devono essere collegati ad un circuito elettrico che è in grado di misurare le minime variazioni nella resistenza corrispondenti alla deformazione.

I trasduttori ad estensimetri generalmente impiegano quattro elementi estensimetrici elettricamente collegati a formare un circuito a ponte di Wheatstone. Un ponte di Wheatstone è un circuito a ponte diviso, utilizzato per la misura statica o dinamica di resistenza elettrica. La tensione di uscita del ponte di Wheatstone è espressa in millivolt in uscita per volt in ingresso. Il circuito di Wheatstone è anche adatto per la compensazione della temperatura. Il numero di estensimetri attivi che dovrebbero essere collegati al ponte dipende dall'applicazione.

Ad esempio, può essere utile collegare gli estensimetri su lati opposti di una trave, uno in compressione e l'altro in trazione. In questa disposizione, si può effettivamente raddoppiare l'uscita di lettura del ponte per la stessa deformazione. Nelle installazioni in cui tutti gli estensimetri sono collegati, la compensazione di temperatura è

automatica, in quanto la variazione di resistenza dovuta a variazioni di temperatura sarà la stessa per tutti gli estensimetri del ponte.

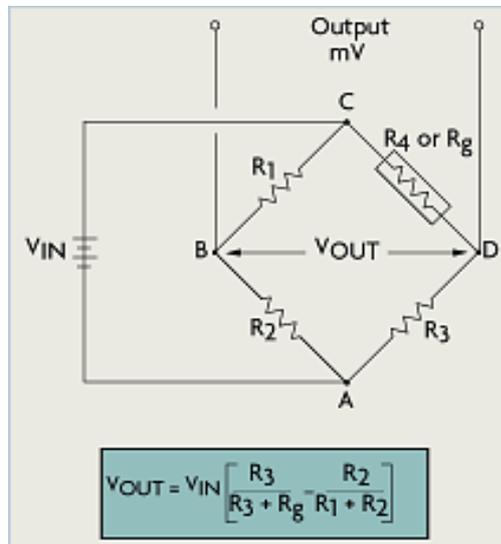


Fig. 19 circuito di misurazione

Per la prova a trazione sono stati utilizzati gli estensimetri HBM , serie Y, mentre per la prova a taglio sono stati utilizzati gli estensimetri sempre della HBM ma serie XY3. Questi ultimi consistono in due estensimetri posizionati ortogonalmente tra loro così da permettere di misurare la deformazione e lo sforzo lungo le direzioni principali, come prevede la normativa.

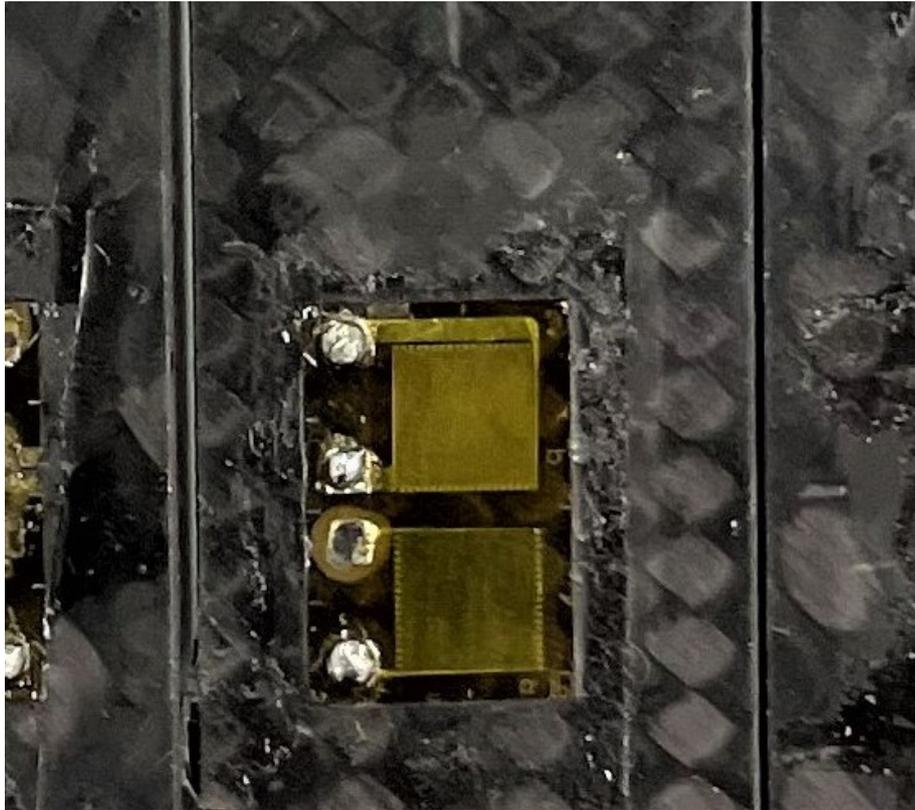


Fig.20 estensimetri applicati ai provini testati a taglio

Per la prova a taglio, come circuito di misura, è stato utilizzato il mezzo ponte di Wheastone. Saldando 6 fili alle piazzole dei due estensimetri e ricreando il circuito voluto, è stato possibile misurare la deformazione e lo sforzo subito dal provino.

### 3-RISULTATI DEI TEST MECCANICI

#### 3.1-PROVA A TRAZIONE

Una volta effettuate le prove di trazione sui provini, l'estensimetro della macchina a trazione ha permesso di ricavare i dati necessari per la costruzione delle curve sforzo-deformazione.

Quest'ultime, infatti, sono state tracciate utilizzando le formule presenti nella normativa D3039.

Quindi, una volta tracciate tutte le curve, sono stati confrontati i diversi comportamenti, sia fra i provini aventi lo stesso tessuto, che poi quelli con tessuto differente.

Per ogni tipologia di tessuto sono stati testati 5 provini, tranne che per la tipologia C che sono stati disponibili solamente 4 provini, e, una volta tracciate le curve sforzo-deformazione per ciascuno, è stata scelta la curva che maggiormente rappresentava il comportamento di quel particolare tessuto.

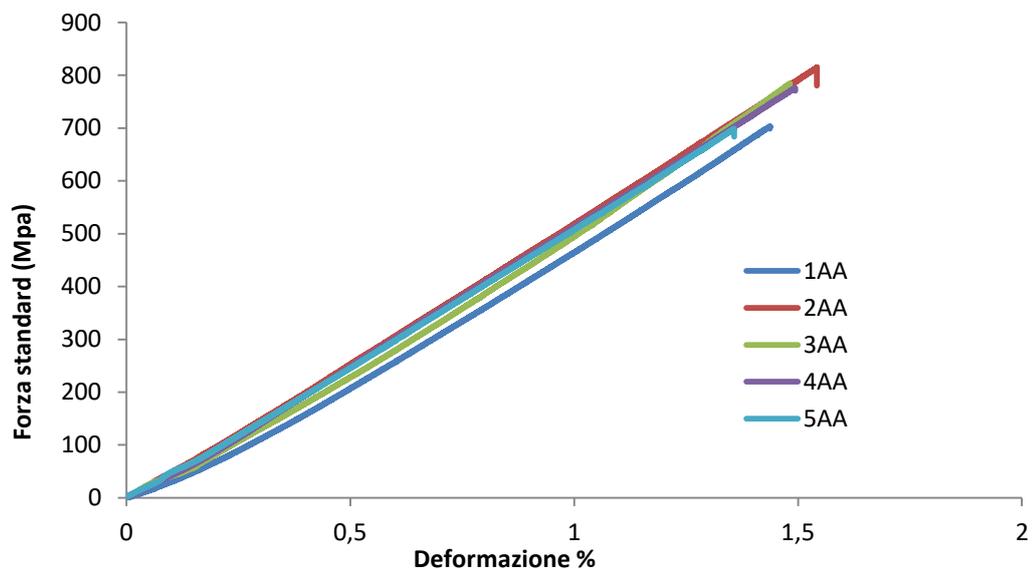


Fig. 21 Grafico sforzo-deformazione della prova a trazione effettuata ai provini con tessuto A

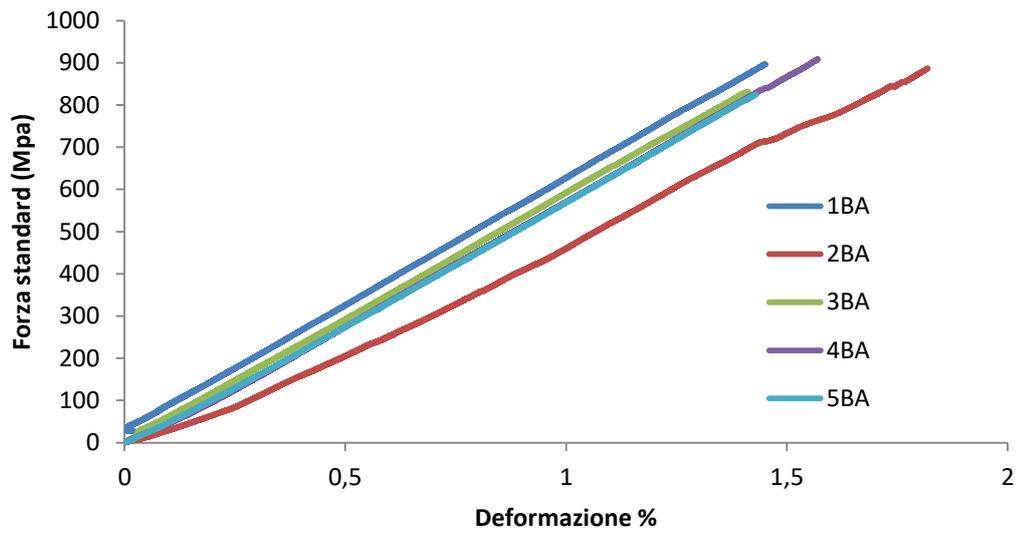


Fig. 22 Grafico sforzo-deformazione della prova a trazione effettuata ai provini con tessuto B

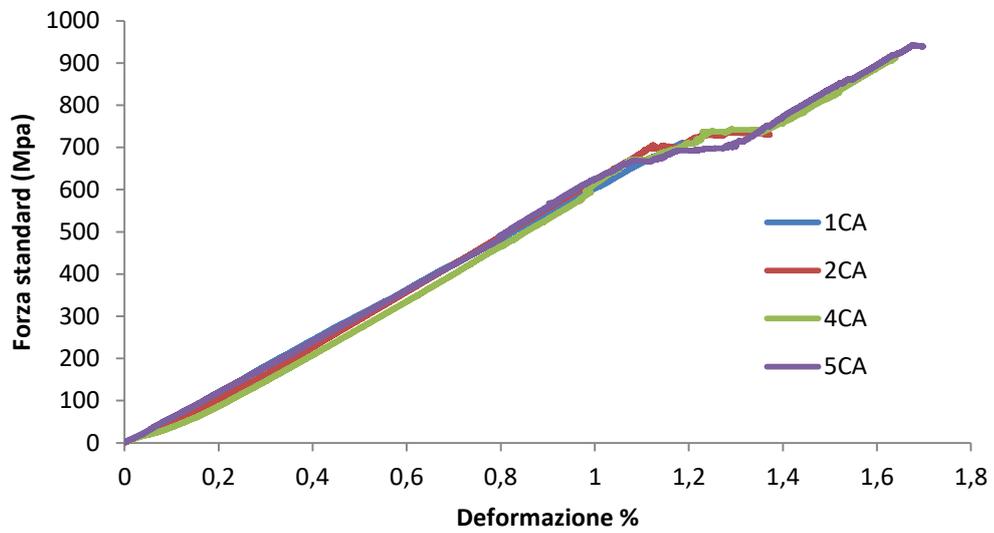


Fig. 23 Grafico sforzo-deformazione della prova a trazione effettuata ai provini con tessuto C

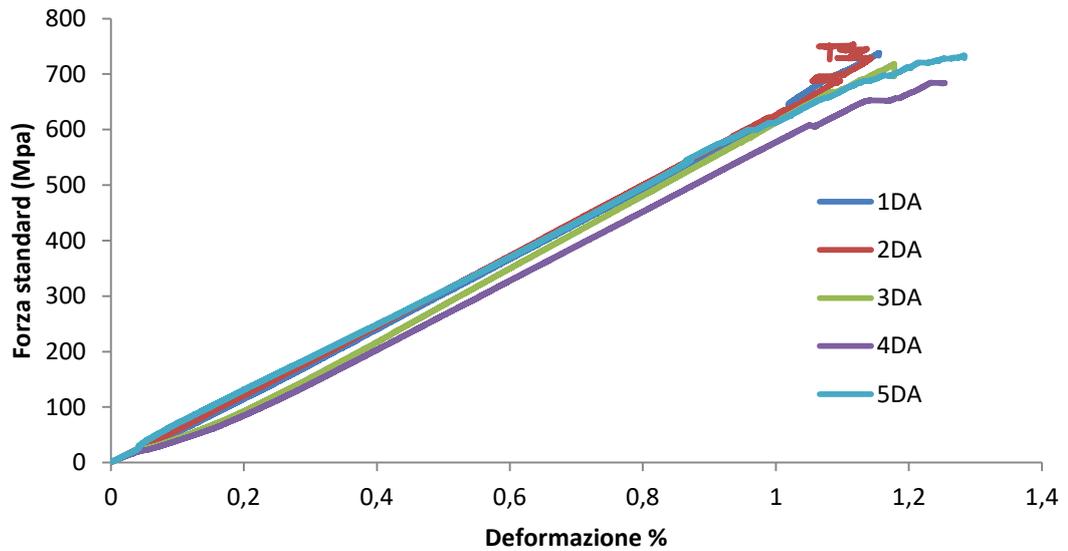


Fig. 24 grafico sforzo-deformazione della prova a trazione effettuata ai provini con tessuto D

Nei grafici in fig.21,22,23 e 24, sono state riportate le curve dei cinque provini laminati con i tessuti A,B,C e D.

Come si vede, le curve, seppur presentino dei piccoli scostamenti, sono molto simili tra loro, e fra queste per ogni tipologia di tessuto è stata scelta una curva di un provino come campione rappresentante la sua tipologia.

Per il tessuto A, è stata scelto il provino 4AA, per il tessuto B il provino 4BA, per il tessuto C il provino 4CA, mentre per il tessuto D il provino 3DA.

Queste curve poi sono state messe a confronto su un unico grafico.

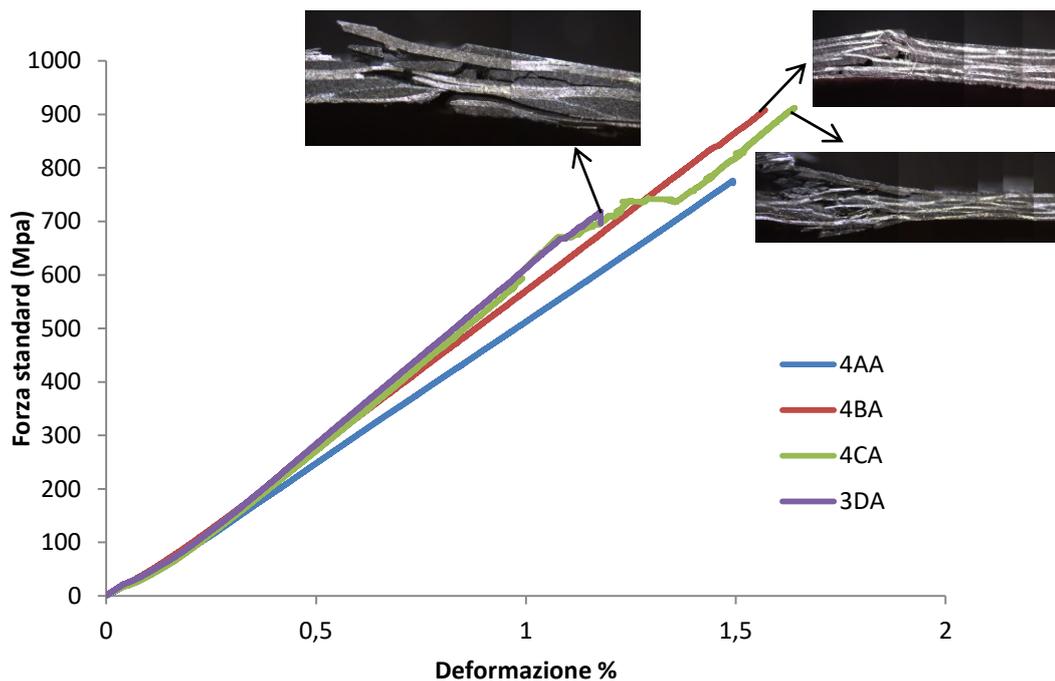


Fig. 25 grafico sforzo-deformazione che confronta i comportamenti dei 4 diversi provini sottoposti a prova di trazione

Per gli altri tessuti i provini scelti come modelli di riferimento sono stati i 4AA, 4BA e 3DA.

Dal grafico finale in fig. 25, dove si osserva il comportamento dei 4 tessuti diversi, si nota che tutti hanno in comune un andamento pressoché lineare che, nella prima parte lungo il tratto elastico coincide, mentre a mano a mano che il carico aumenta, si vengono a evidenziare i differenti comportamenti. Nel grafico sono state anche illustrate le rotture che si sono verificate nei provini B, C e D che poi sono state descritte dettagliatamente più avanti.

In aggiunta ai grafici ottenuti dalla prova meccanica è stato possibile osservare visivamente, con l'aiuto dello stereomicroscopio, quello che realmente è accaduto a ciascun provino a seguito della rottura, così da poter comprendere meglio come mai si siano verificate rotture o delaminazioni differenti in ogni provino.

Dunque, da questi risultati, si può notare e poi capire perché i vari tessuti abbiano un comportamento sotto sforzo e una risposta diversa a seguito della prova a trazione.

I difetti e le rotture che si possono verificare in un provino testato a trazione possono essere:

- Una separazione fibra matrice,
- Una microfrattura della matrice,
- Una separazione di lamine nei laminati o delaminazione.

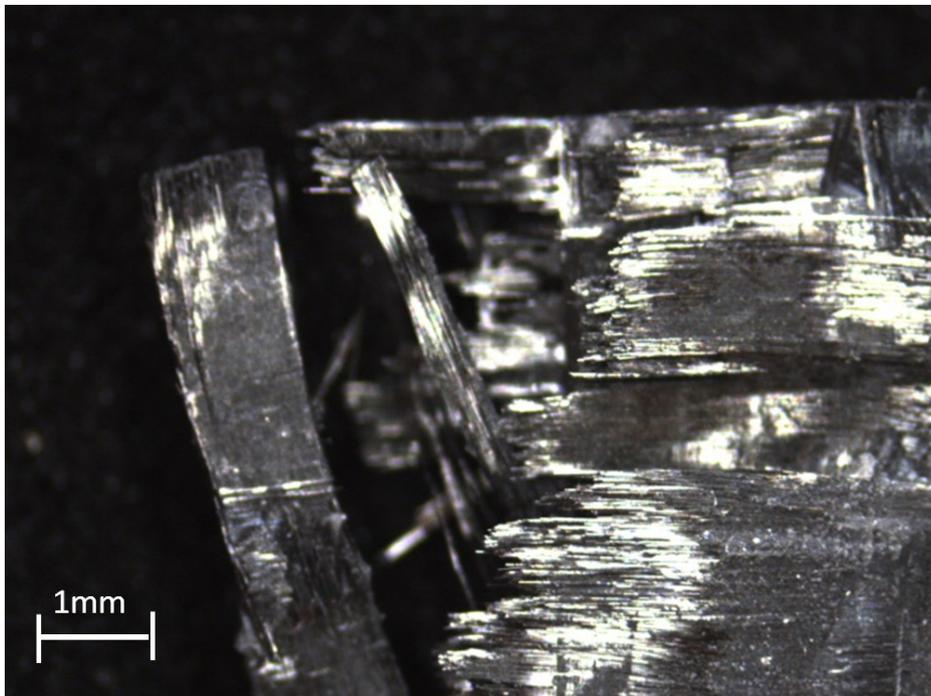


Fig. 26 foto scattata con lo stereomicroscopio rappresentate la rottura di alcune fibre

I primi cedimenti del composito si verificano a carichi relativamente bassi rispetto al punto di rottura, quando cominciano a rompersi le prime fibre del provino. Poi, con l'aumentare del carico, il numero delle fibre che si rompono aumenta, fino a causare la rottura completa del materiale.

In particolare, in fig. 26, si vede come in tutti i provini le fibre che si rompono sono prevalentemente quelle lungo la direzione del carico applicato, ovvero lungo la direzione della lunghezza, mentre le fibre in direzione ortogonale subiscono uno spostamento e una deformazione.

Si può notare come la deformabilità risulta inversamente proporzionale alla grammatura, infatti, a parità di carico, vediamo che il tessuto A ha una maggiore deformabilità, e per ottenere una stessa deformazione nei provini laminati con i tessuti B, C e D è necessario applicare un carico via a via maggiore rispetto a quello applicato al tessuto A.

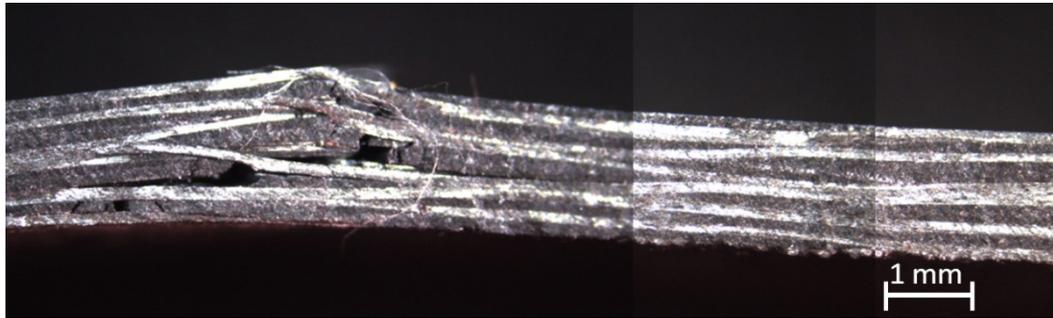


Fig. 27 rottura avvenuta nel provino laminato con tessuto B

Il provino laminato con il tessuto A, con tessitura plain weave e grammatura pari a  $193 \text{ g/m}^2$ , risulta avere un carico di rottura leggermente più elevato al solo tessuto D che presenta filamenti 24 k, tessitura twill 2x2 e una grammatura di  $800 \text{ g/m}^2$ .

PROVINI	CARICO DI ROTTURA	DEFORMAZIONE	MODULO DI ELASTICITÀ
1AA	703,1 MPA	0,0143	40,590 GPa
2AA	814,7MPA	0,0154	49,485 GPa
3AA	783,8MPA	0,0148	45,001GPa
4AA	770,8 MPA	0,01490	49,020 GPa
5AA	698,5 MPA	0,0135	47,185 GPa

Tab.1 Dati relativi alla prova di trazione effettuata nei provini con tessuto A

PROVINI	CARICO DI ROTTURA	DEFORMAZIONE	MODULO DI ELASTICITÀ
1B	897MPA	0,0145	57,780 GPa
2B	886,7MPA	0,0181	39,430 GPa
3B	831,96MPA	0,0141	57,005 GPa
4B	908,5MPA	0,0157	54,505 GPa
5B	824,9MPA	0,0142	54,970 GPa

Tab. 2 Dati relativi alla prova di trazione effettuata nei provini con tessuto B

PROVINI	CARICO DI ROTTURA	DEFORMAZIONE	MODULO DI ELASTICITÀ
1CA	711,8MPA	0,0118	62,415 GPa
2CA	736,47MPA	0,0137	55,055 GPa
4CA	912,3MPA	0,0163	54,545 GPa
5CA	940,9MPA	0,0169	59,735 GPa

Tab.3 Dati relativi alla prova di trazione effettuata nei provini con tessuto C

PROVINI	CARICO DI ROTTURA	DEFORMAZIONE	MODULO DI ELASTICITÀ
1D	738,17MPa	0,015	60,740 GPa
2D	753,61MPa	0,011	61,780 GPa
3D	718,34MPa	0,017	54,375 GPa
4D	684,95MPa	0,012	49,885 GPa
5D	733,69MPa	0,012	58,905 GPa

Tab. 4 Dati relativi alla prova di trazione effettuata nei provini con tessuto D

Infatti come si vede nelle tabelle 1, 2, 3 e 4 possiamo notare come i provini più resistenti sono i provini C e D raggiungendo carichi di rottura di 908,5 MPa e 940,9 MPa.

Il provino che invece ha il carico a rottura peggiore risulta essere quello laminato con il tessuto A.

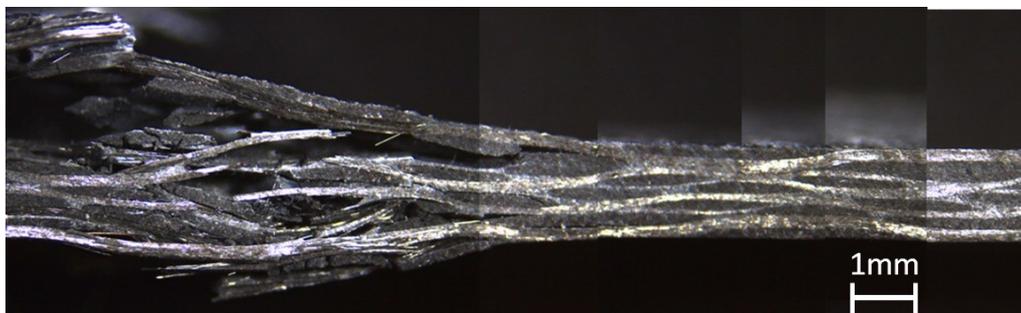


Fig. 28 Rottura e delaminazione avvenuta nel provino laminato con tessuto C

Mettendo a confronto i grafici sopra riportati dei tessuti B e C, e le fig 27 e 28, si può vedere come i due provini, seppure, con carichi di rottura simili, hanno risposto al test meccanico in due modi parecchio differenti.

Entrambi sono laminati con due tessuti con stile twill 2x2, con filamenti 12 k ma con grammature e numero di lamine differenti.

Il tessuto B, composto da 6 lamine con grammatura  $380 \text{ g/m}^2$ , è rimasto molto più compatto e la rottura si è verificata nello stesso punto per tutte 6 le lamine, senza espandersi più di tanto lungo il provino e senza presentare un'evidente delaminazione.

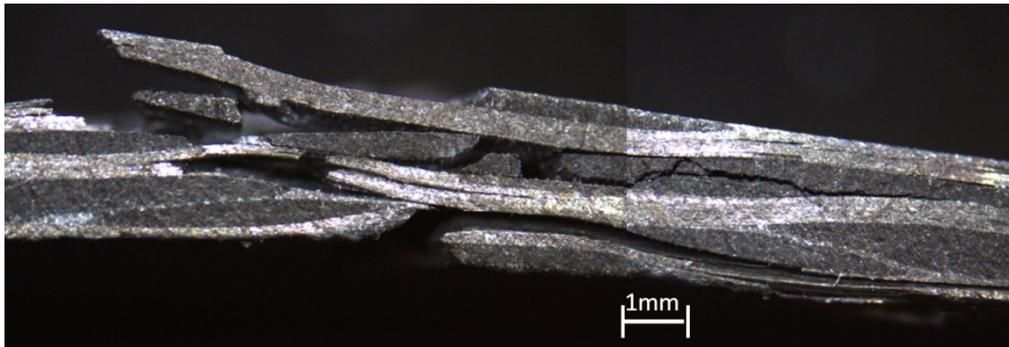


Fig. 29 rottura avvenuta nel provino con tessuto D

Il provino C invece ha mostrato un comportamento diverso in quanto, le 4 lamine si sono visivamente distaccate fra loro.

Infine il provino D, unico ad avere filamenti 24k, ha avuto un comportamento più simile al tessuto B, nonostante laminato con sole 3 lamine di tessuto.

Non ha presenta una delaminazione come il tessuto C, ma una rottura che come si può notare è partita da un punto centrale e poi si è espansa lungo il provino fino a causare una frattura completa come si vede in fig. 29.

#### 3.2-RISULTATI TEST DI TAGLIO

Secondo la normativa D3518, la prova di taglio è stata eseguita come una prova di trazione, usando la stessa macchina utilizzata per i test a trazione. In questo caso però, i provini sono stati tagliati in modo da avere le fibre orientate con un angolo di  $\pm 45^\circ$  rispetto la direzione del carico a cui è sottoposto il provino.

La prova meccanica è stata effettuata utilizzando sia un estensimetro biassiale che monoassiale, e, grazie a questa doppia strumentazione è stato possibile accorgersi che per valori di deformazione inferiori a quelli indicati dalla normativa, la deformazione lungo la direzione trasversale, e quindi la strizione, poteva essere trascurata.

Infatti, secondo la normativa bisogna considerare la prova fino a rottura, oppure, nel caso questa non si verificasse entro una deformazione pari al 5% della lunghezza del provino bisogna prendere in considerazione i dati riguardanti la tensione e la deformazione fino a questo punto.



Fig. 30 deformazione di un provino durante una prova

Infatti, in questo intervallo considerato, la strizione è risultata trascurabile ai fini della prova, al contrario di quello che invece accade se si considerano i dati ottenuti fino al completamento della prova, dove, invece la strizione risulta molto evidente anche visivamente come si vede in fig. 30.

Una volta testati i provini a disposizione, utilizzando le formule previste dalla normativa, è stata ricavata la tensione relativa alla prova di taglio presente su ciascun provino.

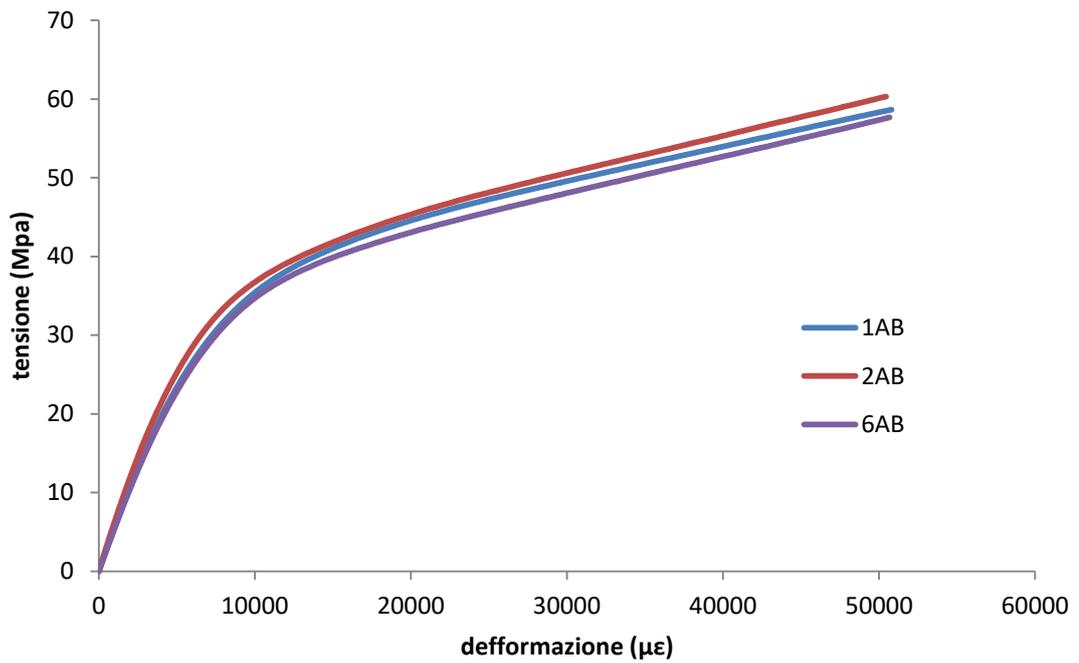


Fig. 31 Grafico sforzo-deformazione dei provini laminati con tessuto A

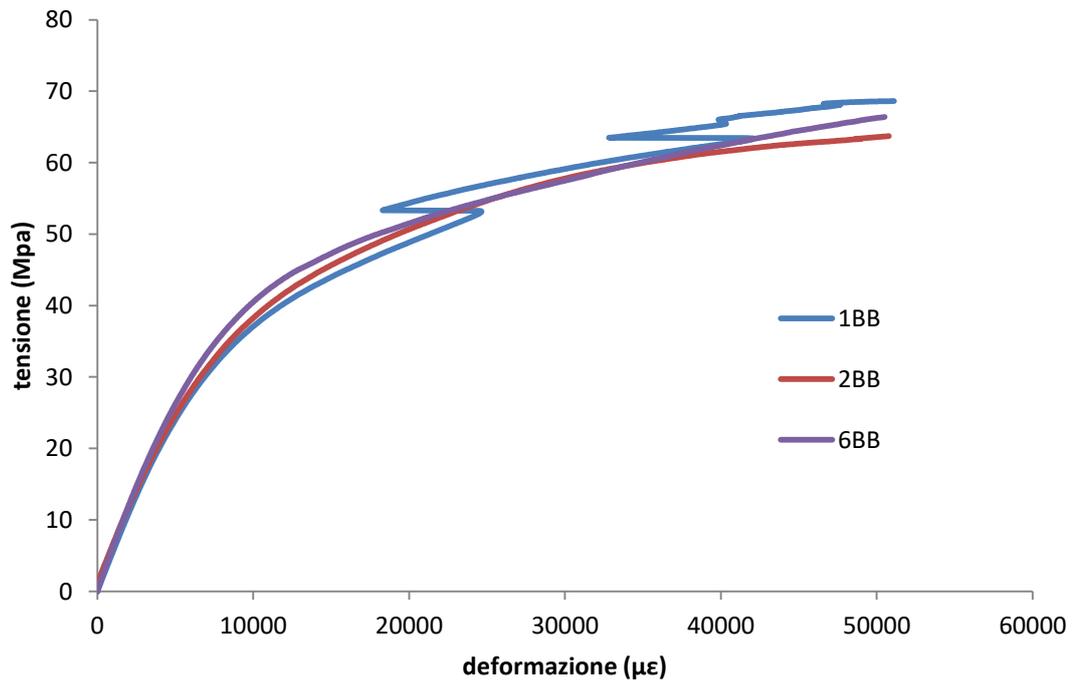


Fig.32 Grafico sforzo-deformazione dei provini laminati con tessuto B

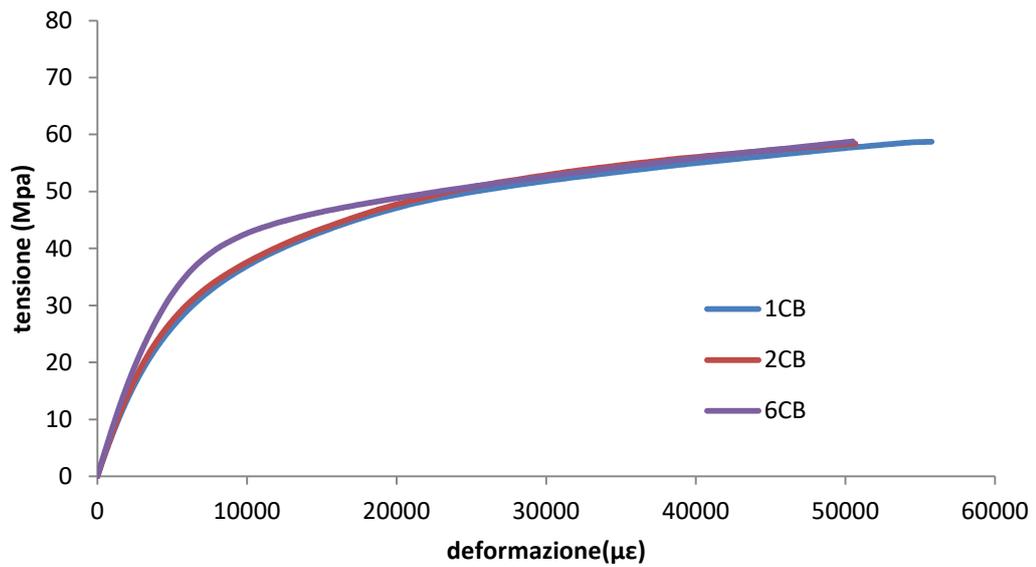


Fig.33 Grafico sforzo-deformazione dei provini laminati con tessuto C

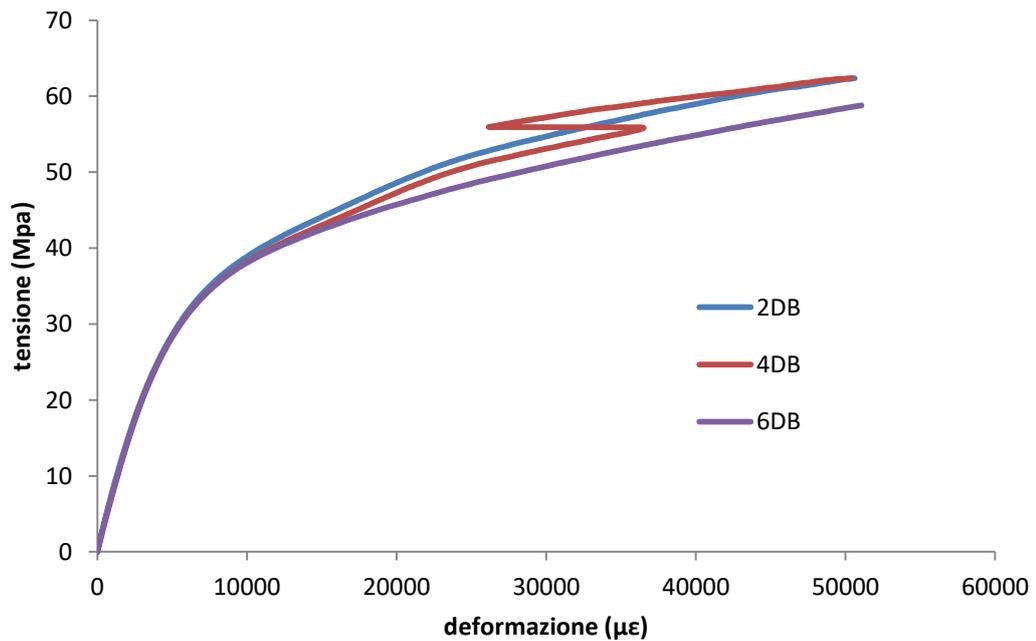


Fig.34 Grafico sforzo-deformazione dei provini laminati con tessuto D

Rielaborati tutti i dati, come per la prova di trazione, sono state tracciate le curve dei provini confrontando quelli con lo stesso tessuto, che sono riportate nei grafici in fig. 31,32,33 e 34, e poi, una volta scelto un

provino con una curva che rappresentasse quel tessuto, sono state messe a confronto le curve dei diversi tessuti.

Così facendo è stato possibile osservare meglio come cambi la risposta del provino variando la grammatura e lo stile del tessuto.

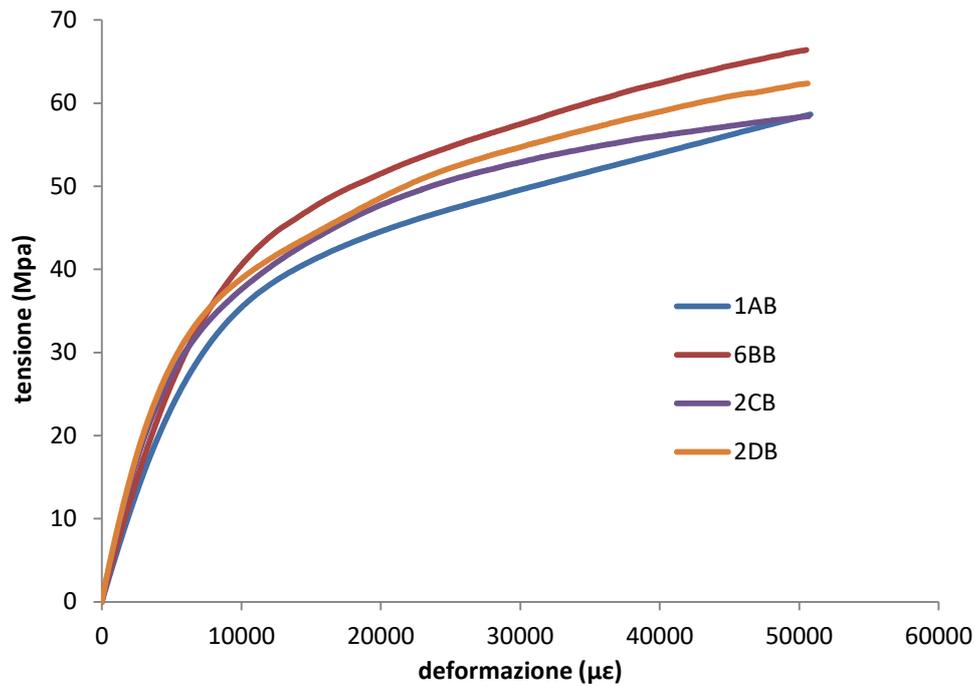


Fig. 35 grafico sforzo-deformazione che confronta il comportamento dei 4 diversi tessuti sottoposti alla prova meccanica

Durante il primo tratto tutti i provini presentano una curva quasi coincidente, mentre, una volta superata la soglia dei 30 MPa, si iniziano a vedere le differenze.

Al termine dell'intervallo considerato i provini hanno raggiunto le tensioni riportate nelle tabelle 5,6,7 e 8.

PROVINI	TENSIONI
1AB	58,65MPa
2AB	60,3MPa
6AB	57,67MPa

Tab. 5 Dati relativi alla prova di trazione effettuata nei provini con tessuto

PROVINI	TENSIONI
1BB	68,63MPa
2BB	63,7MPa
6BB	66,5MPa

Tab. 6 Dati relativi alla prova di trazione effettuata nei provini con tessuto B

PROVINI	TENSIONI
1CB	57,84MPa
2CB	58,4MPa
6CB	58,78MPa

Tab. 7 Dati relativi alla prova di trazione effettuata nei provini con tessuto C

PROVINI	TENSIONI
2DB	62,48MPa
4DB	62,49MPa
6DB	58,64 MPa

Tab. 8 Dati relativi alla prova di trazione effettuata nei provini con tessuto D

Quindi il provino che mostra una maggiore resistenza risulta essere la tipologia B, infatti in tutti e tre i provini ritroviamo una tensione che si aggira intorno ai 65 MPa.

Il peggior provino invece risulta essere il C, che seppur inizialmente risulta avere una maggiore resistenza dei provini A, alla termine della prova presenta un abbassamento maggiore della tensione.

Si può notare come il provino A, quello con la grammatura più piccola e unico provino con tessuto plain weave, risulta avere una curva che inizialmente risulta più bassa rispetto agli altri ma che anche alla fine presenta un andamento crescente.

Se infatti si va a confrontare la tensione che si sviluppa su ciascun provino si può vedere come il tessuto A alla fine presenta una tensione maggiore dei provini laminati con il tessuto C.

Oltre che graficamente è stato possibile osservare questo comportamento durante le prove: i provini con tessuto A hanno raggiunto il punto di rottura con un tempo di prova molto più lungo, una resistenza migliore e hanno avuto un allungamento lungo la direzione principale di un centimetro e più, rispetto agli altri provini .

Anche in fig. 36 dove sono riportati i 4 provini con differente grammatura, si riesce a vedere come il provino A sia molto più allungato rispetto agli altri.



Fig. 36 deformazione ai provini a seguito della prova meccanica che simula il comportamento a flessione

Inoltre, confrontando i provini B e C, si può vedere come aumentando la grammatura ma con lo stesso numero di filamenti e stessa tessitura, la resistenza diminuisce.

Il provino D, seppure abbia una grammatura maggiore rispetto al C, risulta molto più resistente perché sono stati aumentati anche il numero dei filamenti da 12k a 24 k.

Quindi, la resistenza nell'intervallo considerato da normativa, risulta più bassa per il tessuto plain weave rispetto al twill 2x2, mentre nei tessuti twill diminuisce all'aumentare della grammatura e aumenta all'aumentare dei filamenti.

Un altro effetto molto evidente in tutti i provini è stata la modalità di rottura delle fibre di carbonio.

Come si vede nella fig. 37, è possibile notare come le fibre si siano mosse e abbiano subito uno scorrimento lungo loro direzione.

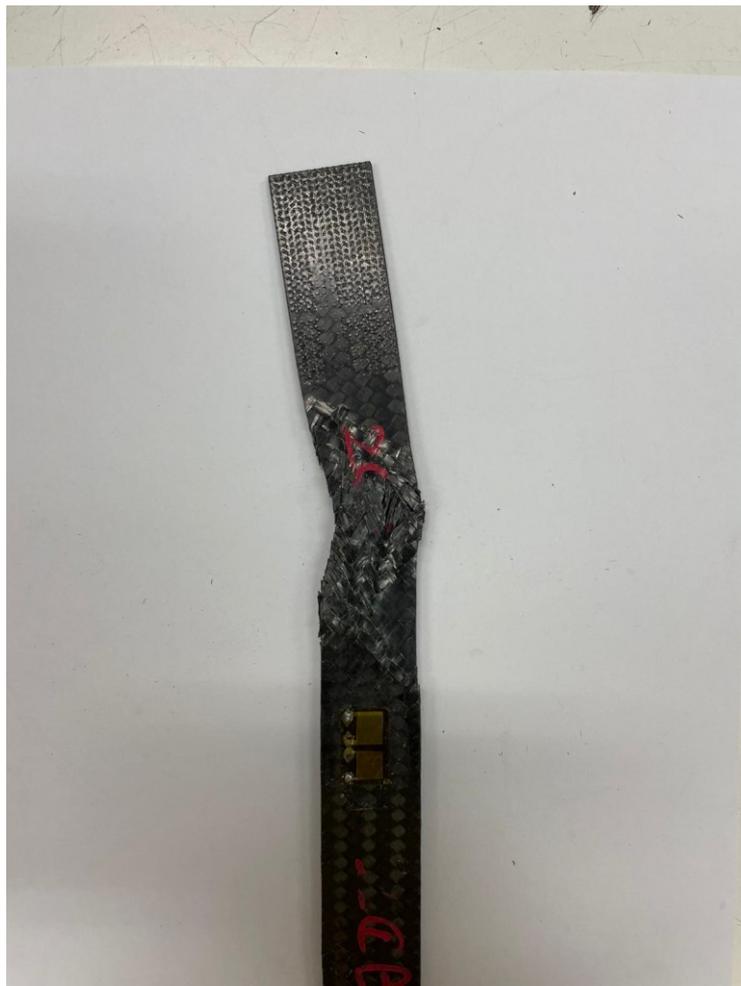


Fig. 37 strizione e scorrimento avvenuta nel provino C

Quindi oltre a un allungamento del provino, abbiamo avuto un notevole scorrimento delle fibre e un'evidente strizione che si è verificata principalmente verso la conclusione della prova meccanica.

Al contrario di quello che è avvenuto nella prova a trazione, in questi provini i difetti, le rotture delle fibre o le delaminazioni, non sono avvenuti solamente in prossimità della rottura principale, ma si sono sviluppati, anche se in quantità minore, lungo tutto il provino ed è stato possibile osservarli anche senza stereo microscopio.



Fig. 38 delaminazione avvenuta nel provino C

Confrontando i risultati ottenuti dalla prova di trazione e dalla prova di taglio si può dedurre che il provino A, cioè quello con tessitura plain weave, è il provino più fragile in quanto presenta carico di rottura a trazione più basso e tensione di taglio più bassa.

Il B e il C, aventi tessitura twill 2x2, invece sono i due tessuti più resistenti sia a trazione che a taglio.

Inoltre, paragonando questi ultimi due si nota come aumentando la grammatura sia nella prova a taglio sia nella prova a trazione si ha un peggioramento della resistenza nel provino.

### CONCLUSIONI

In questo elaborato dunque, a seguito dei test meccanici di trazione e di taglio effettuati su provini di materiale composito in fibre di carbonio laminati con 4 diversi tessuti, sono stati trovati i seguenti risultati.

Il tessuto A con stile di tessitura plain weave, e grammatura pari a  $193 \text{ g/m}^2$  è il provino con le peggiori prestazioni meccaniche in quanto ha la peggiore resistenza a trazione e la peggior resistenza a taglio dopo il tessuto C.

I tessuti aventi un intreccio twill 2x2 presentano una maggiore resistenza rispetto al plain. In particolare, i provini B hanno le migliori resistenze: a trazione il carico di rottura supera i 900MPa mentre a tensione al termine della prova raggiunge una tensione di 65 MPa circa. Mettendo a confronto il tessuto B con il tessuto C, si può concludere che mantendo invariato lo stile e il numero di filamenti, l'aumento della grammatura, da  $380$  a  $630 \text{ g/m}^2$  è causa di un peggioramento nella resistenza. Nel caso della prova trazione il peggioramento non è eccessivo, il carico di rottura si abbassa leggermente, mentre nella prova a taglio il cambiamento risulta evidente. Infatti, il provino B ha il miglior comportamento a flessione, mentre il C il peggiore.

Il numero di filamenti nei provini A, B e C rimane costante di 12K, quello che cambia è la grammatura e lo stile di tessitura, quindi dai risultati ottenuti si deduce che una tessitura twill 2x2 ha delle prestazioni migliori sia a taglio che a trazione.

Se il numero di filamenti aumenta come nel caso del provino D dove i filamenti sono 24k, si ha una risposta diversa nelle due prove.

Nella prova a trazione un maggior numero di filamenti è causa di una maggior fragilità, infatti se confrontando i provini B e C, abbiamo detto

che un aumento della grammatura abbassa di poco la resistenza del materiale, stessa cosa non succede nel provino D dove la grammatura è  $900 \text{ g/m}^2$ , più elevata del tessuto C, ma presenta un numero di filamenti doppio e questo causa un netto peggioramento della resistenza.

Per la prova a taglio invece un aumento del numero di filamenti da 12k a 24 k è causa di un miglioramento delle prestazioni. Il provino D infatti ha una migliore resistenza rispetto al C, ma allo stesso tempo non raggiunge le proprietà ottenute con il provino B.

## BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

1. Vergani, L. "Meccanica dei Materiali", Mc-Graw Hill, Milano, 2002,
2. F. Grasso, C. Calabretta, 'I materiali compositi nei mezzi di trasporto',
3. Zuccarello, B., Dispense di PROGETTAZIONE MECCANICA CON MATERIALI NON CONVENZIONALI, Palermo, 2002.
4. "Carbon Fibers: Precursor Systems, Processing, Structure, and Properties" Erik Frank, Lisa M. Steudle, Denis Ingildeev, Johanna M. Spçrl, and Michael R. Buchmeiser,
5. "Fracture toughness study of epoxy composites reinforced with carbon fibers with various thickness" M.D. Kiran a,† , H.K. Govindaraju a , B.R. Lokesh Yadhav b , B. Suresha c , N. Keerthi Kumar,
6. . Licciulli, A. Maffezzoli, F. Lionetto Scienza e ingegneria dei materiali,
7. "Effects of fiber bundle size and weave density on stiffness degradation and final failure of fabric laminates" Mehdi Saeed Kiasat † , Mohammad Rezai Sangtabi,
8. "Effect of areal weight and chemical treatment on the mechanical properties of bidirectional flax fabrics reinforced composites" G. Di Bella a , V. Fiore b,\* , A. Valenza b,
9. URL: <https://www.hbm.com/it/>
10. Le fibre di carbonio. URL: <http://www.sbai.uniroma1.it/~mauro.pasquali/page2/page9/page10/files/05-00.pdf>