



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE - DIN

CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA MECCANICA

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI COMPOSITI RINFORZATI CON FIBRE DI CANAPA

Tesi di laurea in Tecnologia Meccanica - A

Relatore

Prof. Lorenzo Donati

Presentata da

Alessandro Soglia

Correlatori

Dott. Ing. Maria Rosaria Ricciardi

Prof.ssa Maria Pia Falaschetti

Ing. Francesco Semprucci

Sessione marzo 2026

Anno Accademico 2024/2025

In collaborazione con:

**ISTITUTO PER I POLIMERI
COMPOSITI E BIOMATERIALI**
di Portici (NA)



Indice

Introduzione.....	1
CAPITOLO 1: I materiali compositi.....	2
1.1 Classificazione.....	4
1.1.1 Rinforzi.....	4
1.1.2 Matrici.....	7
1.2 Tecniche di lavorazione.....	10
1.2.1 La laminazione.....	11
1.2.2 Altre tecniche di produzione.....	15
1.3 Applicazioni.....	19
CAPITOLO 2: Fiber Reinforced Polymers (FRP).....	22
2.1 I GFRP.....	22
2.1.1 Origine delle fibre di vetro.....	23
2.1.2 Caratteristiche della fibra di vetro.....	24
2.2 I CFRP.....	26
2.2.1 Origini delle fibre di carbonio.....	26
2.2.2 Caratteristiche della fibra di carbonio.....	29
2.3 Problematiche ambientali.....	32
CAPITOLO 3: Gli NFRP.....	34
3.1 Le fibre vegetali.....	35
3.1.1 Estrazione delle fibre dal fusto.....	36
3.1.2 Composizione delle fibre dal fusto.....	38
3.1.3 Caratteristiche e problematiche.....	40
3.1.4 Trattamenti chimici e fisici.....	46
3.1.5 Applicazioni e sviluppi futuri.....	48
CAPITOLO 4: Preparazione alle prove di caratterizzazione e materiali in analisi.....	52
4.1 Le prove di caratterizzazione.....	52
4.2 Materiali in analisi.....	57
4.2.1 La canapa.....	57
4.2.2 Resina epossidica.....	59
4.3 Processo di produzione dei provini.....	61
CAPITOLO 5: Sperimentazione.....	65
5.1 Preparazione dei provini alle prove.....	65
5.2 Prova di trazione.....	69
5.2.1 Raccolta ed elaborazione dati.....	70
5.3 Prova di compressione.....	77
5.3.1 Raccolta ed elaborazione dati.....	79
5.4 Prova di flessione.....	83
5.4.1 Raccolta ed elaborazione dati.....	85
Conclusioni.....	90
Bibliografia.....	93
Ringraziamenti.....	95

Introduzione

Nel corso degli ultimi anni l'umanità ha vissuto uno sviluppo tecnologico senza precedenti. Diversi sono stati i settori a beneficiarne, tra questi sicuramente il mondo dei materiali per uso tecnico, come i materiali compositi. L'incessante aumento della richiesta da parte del mercato dei compositi, in particolare della famiglia degli FRP (Fiber Reinforced Polymers), per via dell'ottimo compromesso tra proprietà meccaniche e leggerezza, ha portato ad una crescita esponenziale delle produzioni, soprattutto di GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers) e di CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers), i quali la fanno da padroni in settori di punta come l'automotive, l'aerospaziale, il settore nautico e dello sport.

È noto, però, quanto i processi di produzione delle fibre sintetiche (vetro e carbonio), siano altamente inquinanti e dispendiosi a livello energetico. Il forte impatto in termini di emissioni di CO₂, la mancanza di strategie valide e le difficoltà nel riciclo, che accrescono il problema dello smaltimento dei prodotti a fine vita, contribuiscono ad un aumento incontrollato dei gas serra. Tutto ciò, unito all'aumento delle attività umane, come la combustione di combustibili fossili (carbone, petrolio, gas) e delle attività industriali, sta mettendo i consumatori di tutto il mondo di fronte a quesiti di carattere ambientale ed è per questo motivo che nasce nelle aziende l'esigenza di virare verso produzioni sempre più sostenibili.

Una svolta da questo punto di vista è stata la ricerca di materiali alternativi studiando quanto di più perfetto si possa avere a disposizione: la natura. Sono stati così introdotti i materiali compositi in fibra naturale, una soluzione più sostenibile ma che mantiene al contempo un ottimo rapporto proprietà-peso.

La ricerca in questo ambito è relativamente giovane e per questo motivo si fatica a trovare dati sufficienti per incentivare le aziende ad investire su tali materiali, ma la direzione che questo ramo dei compositi sta prendendo è molto promettente e lascia ben sperare che con il tempo si possano raggiungere soluzioni sempre più vicine alle caratteristiche dei classici compositi in fibra di carbonio o vetro, offrendo così una soluzione alternativa alla controparte sintetica.

Questa revisione vuole fornire una panoramica delle sfide tecnologiche, delle tecniche di lavorazione, delle proprietà e delle potenziali applicazioni degli NFRP (Natural Fiber Reinforced Polymers) per applicazioni industriali sostenibili, concentrando in modo particolare, l'attenzione sulla raccolta dati sperimentale delle proprietà meccaniche di compositi in fibra di canapa della Maeko e matrice epossidica PRIME™ 20LV della Gurit, prodotti dal CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche), tramite la caratterizzazione mediante prove statiche di trazione, compressione e flessione a tre punti.

CAPITOLO 1:

I materiali compositi

Parlando di compositi l'abitudine, comune è quella di associare al termine solo una certa classe specifica, il carbonio, ignorando così la vastità di questo mondo.

Con il termine “materiali compositi” si fa riferimento a tutta quella categoria di materiali che rispettano la seguente definizione:

“Un composito è realizzato combinando materiali macroscopicamente differenti, in composizione o forma, con lo scopo di ottenere specifiche caratteristiche e proprietà. I costituenti mantengono la loro identità, in modo da essere fisicamente identificabili e mostrano un'interfaccia tra di essi” [1].

In un composito, quindi, riconosciamo due fasi: i rinforzi e la matrice (Figura 1). I primi, come suggerisce il nome, permettono di rinforzare il composito conferendone le principali proprietà meccaniche, mentre la matrice ha come ruolo quello di fungere da legante, permettendo il mantenimento della forma desiderata ed ha il compito di distribuire i carichi in modo omogeneo.

L'uomo ha sempre avuto a che fare con queste tipologie di materiali sin dall'antichità, traendo ispirazione da strutture già presenti in natura, come ad esempio il legno, un composito costituito da cellulosa come rinforzo, che migliora la resistenza a trazione e la lignina come matrice stabilizzante. Con il passare del tempo e l'evoluzione delle tecnologie dell'uomo, infatti, anche la conoscenza e l'uso di questi materiali è entrato a far parte della quotidianità, basti pensare a quella che risulta essere una delle prime applicazioni a livello “ingegneristico” dei materiali compositi: intorno al 1500 a.C. le popolazioni egizie e mesopotamiche producevano mattoni con miscele di fango e aggiunta di paglia, con lo scopo di rendere le costruzioni più solide.

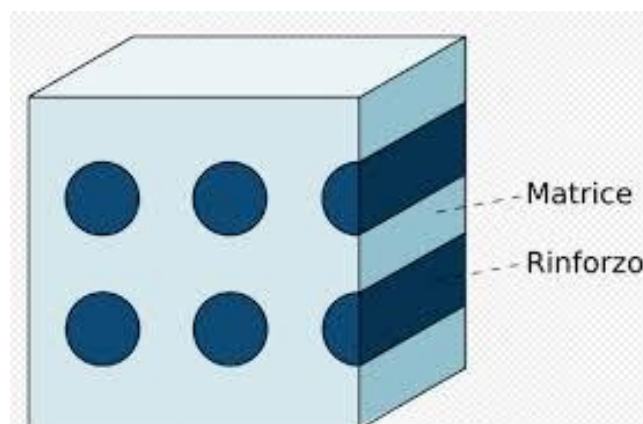


Figura 1: Schema matrice-rinforzo, configurazione tipica dei materiali compositi.

Da lì un continuo aumento dell'utilizzo di materiali di composizione diversa "mescolati" tra loro, ci ha accompagnato fino alle scoperte più moderne.

Ciò che possiamo notare è che la tecnologia nel tempo si è evoluta, ma l'uomo ha da sempre avuto uno sguardo verso la natura e da questa si è ispirato per raggiungere il miglioramento delle proprie conoscenze e l'ideazione delle più grandi innovazioni.

Dal 1870 al 1890 la rivoluzione chimica trasformò lo sviluppo dei materiali compositi, introducendo resine sintetiche a base polimerica che sfruttavano un processo di polimerizzazione, in cui queste nuove resine cambiavano dalla forma liquida a solida, garantendo la possibilità di realizzare forme ben definite e durature nel tempo.

Negli anni '30, riconosciuti come il decennio più importante per l'industria dei compositi, si introdusse la prima fibra di vetro (Figura 2). Essa, combinata con una resina polimerica, creava una struttura incredibilmente forte, ma anche estremamente leggera. Questo segnò l'inizio del settore dei polimeri rinforzati con fibre (FRP).

Seguì poi nel 1961, l'arrivo della prima fibra di carbonio (Figura 3), che migliorava il rapporto rigidità-peso dei componenti e con essa, lo sviluppo di nuove tecniche di produzione [2].



Figura 2: Tessuto non tessuto in fibra di vetro.

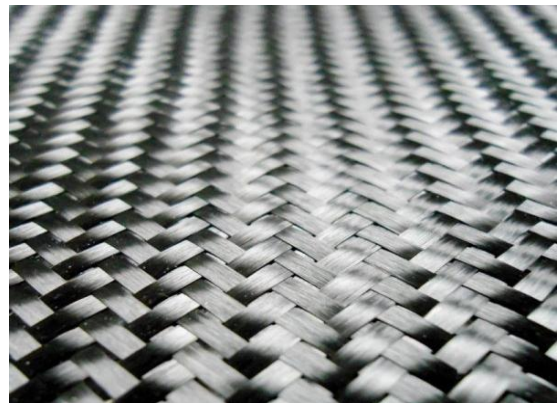


Figura 3: tessuto in fibra di carbonio.

Guardando al futuro, la ricerca attira finanziamenti da governi, produttori ed università, grazie alle ottime prestazioni che i compositi stanno dando in termini di proprietà rispetto ai materiali classici come acciaio e alluminio (Figura 4).

Questo porterà inevitabilmente a uno sviluppo esponenziale del settore seguito da un aumento delle produzioni. Secondo alcuni report recenti, la domanda globale di fibre di carbonio stimata è di circa 126.500 tonnellate annue. La crescita media del periodo 2010–2024 è risultata intorno al +10,07% ogni anno [3], a dimostrazione del fatto che questo settore è ancora in pieno sviluppo e pronto ad occupare una fetta sempre più ampia di mercato.

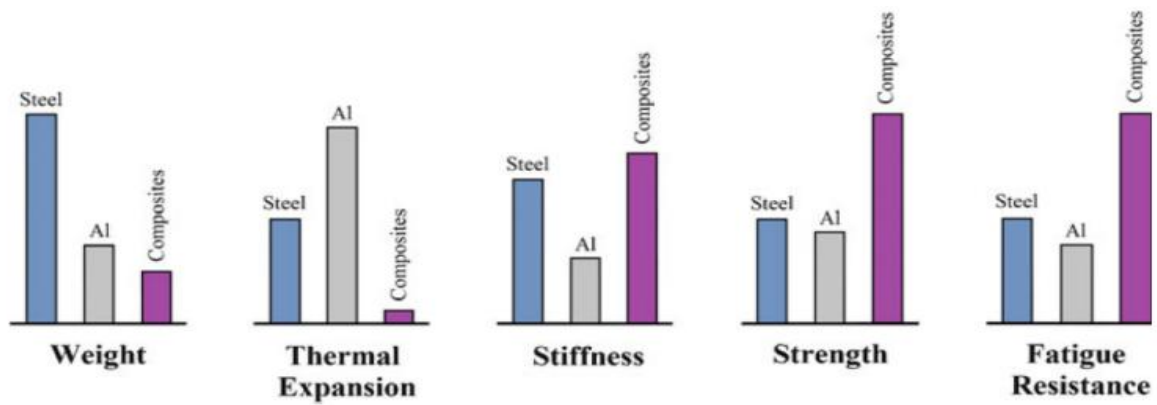


Figura 4: Confronto quantitativo di alcune proprietà tra compositi e altri metalli.

1.1 Classificazione

I materiali compositi possono essere classificati in base al tipo di rinforzo e al tipo di matrice. Intercambiando tra loro queste categorie, si ottengono così possibili combinazioni e configurazioni che danno origine a prodotti differenti con proprietà uniche.

1.1.1 Rinforzi

Come già anticipato, i rinforzi servono a supportare i carichi, o comunque più in generale, ad accrescere le prestazioni resistenziali compressive del composito. A seconda delle tipologie possono anche conferire particolari funzionalità, come resilienza, colore, ritardo di fiamma etc. Vedremo inoltre che nel trasferimento delle proprietà al composito giocano un ruolo fondamentale la dimensione, la distribuzione, la concentrazione e la forma dei rinforzi.

Analizzandoli, dividono compositi in due macro-famiglie (Figura 5):

- particellari;
- fibrosi (a loro volta divisi a seconda del tipo di fibra e del tipo di orientamento).

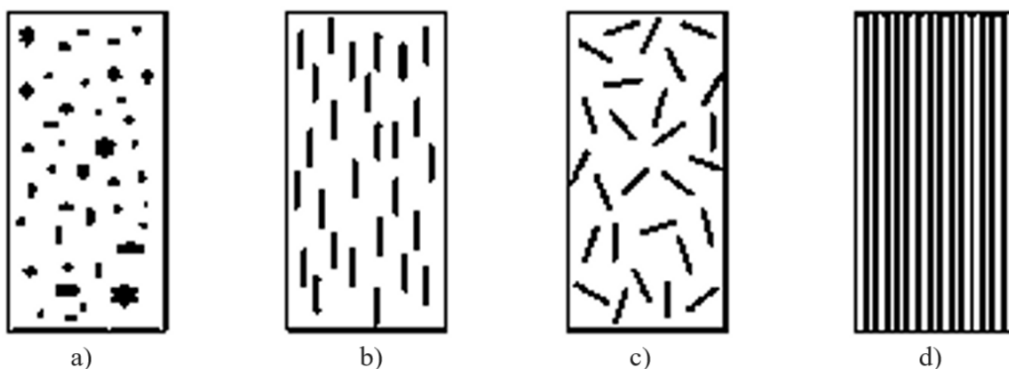


Figura 5: a) Rinforzi particellari; b) Rinforzi in fibra corta orientata; c) Rinforzi in fibra corta casuale; d) Rinforzi in fibra lunga.

Per quanto riguarda i compositi particellari, la fase aggiunta è sotto forma di particelle (che possono essere dell'ordine delle macro-, micro- o nano-unità) disposte in maniera casuale. In generale, il miglioramento ottenuto non è molto elevato, soprattutto in termini di resistenza, ma serve a garantire ai componenti particolari proprietà come quelle citate: colore, conducibilità, resilienza etc.

Il grande vantaggio di questi rinforzi è che, non avendo una dimensione ben definita, le proprietà risultano essere omogenee in tutte le direzioni.

Un esempio potrebbe essere quello del composito usato per gli pneumatici, che unisce gomma naturale e nerofumo (o black carbon), una polvere finissima composta da particelle di carbonio, che migliora la resistenza all'usura e ai raggi UV della gomma, conferendole anche il tipico colore nero. Più articolato, invece, è il discorso sui compositi fibrosi: secondo la definizione ASTM [4], è detto filamento qualsiasi materiale con rapporto minima-lunghezza/massima-dimensione-trasversale di 10:1 e con massima dimensione trasversale inferiore al millimetro, mentre la fibra è uno o più filamenti riuniti insieme in modo ordinato.

Proprio grazie alla struttura allineata e ordinata tipica delle fibre, sono presenti molti meno difetti, a parità di materiale, rispetto alla forma sfusa, e questo la rende la geometria perfetta per ottimizzare le proprietà dei compositi.

Questi ultimi si dividono in due sottocategorie a seconda della lunghezza delle fibre, le quali possono essere lunghe (o continue) oppure corte.

Le fibre corte possono avere diverse dimensioni, ma rimangono sempre inferiori rispetto alla lunghezza del componente. A loro volta si possono disporre in maniera disordinata o allineate. Una configurazione disordinata permette di avere un materiale completamente isotropo, cioè con proprietà distribuite in maniera omogenea in tutte le direzioni, ma al contempo più basse rispetto a quelle delle fibre lunghe, soprattutto in termini di resistenza.

Le fibre si dividono in due configurazioni a seconda della disposizione dei filamenti (Figura 6):

- tow: se i filamenti sono disposti parallelamente tra loro;
- yarn: se i filamenti vengono attorcigliati tra loro.

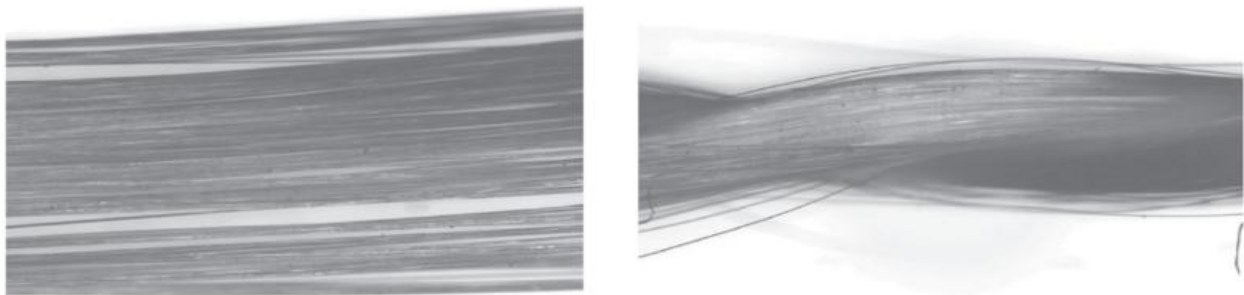


Figura 6: Disposizione tow (a sinistra); disposizione yarn (a destra).

Solitamente ricoprono l'intera lunghezza del componente e vengono orientate in una direzione precisa, in tal caso si parla di configurazione UD (unidirezionale) in cui le fibre sono tutte disposte parallelamente, conferendo un'eccezionale resistenza lungo la direzione principale, proporzionale al numero di fibre per unità di volume.

Un grosso vantaggio per le fibre lunghe è che, essendo continue, possono essere modellate in geometrie complesse senza perdere le proprie proprietà. Rispetto alle fibre corte, oltre alla resistenza, garantiscono maggior durata, migliore resistenza a fatica ed un'eventuale conduttività migliorata. Compositi con fibre lunghe sono però caratterizzati da un'elevata anisotropia (proprietà per cui un determinato oggetto ha caratteristiche che dipendono dalla direzione lungo la quale sono considerate). Per fare fronte a questo problema nella maggior parte delle applicazioni in cui i componenti in composito sono soggetti a carichi multidirezionali, si combinano le fibre lunghe in tessuti, intrecciandole tra di loro (Figura 7), permettendo in questo modo di estendere le proprietà dei rinforzi in più direzioni. Si parla in tal caso di Fabric (non più di UD) e, come si nota dalla Figura 7, ritroviamo diverse tipologie di configurazione di intreccio, tra cui Plain, Twill e Satin, i più diffusi. Ognuno di questi garantisce lo sviluppo delle proprietà in direzioni differenti, per questo motivo, a seconda dell'impiego, viene scelta la tipologia più adatta. Vengono realizzati posizionando le fibre su macchinari che operano in maniera molto simile ai telai dell'industria tessile: l'ordito è teso, viene sollevato a seconda della configurazione che si vuole seguire (Plain, Twill, Satin), poi viene attraversato dalla trama.

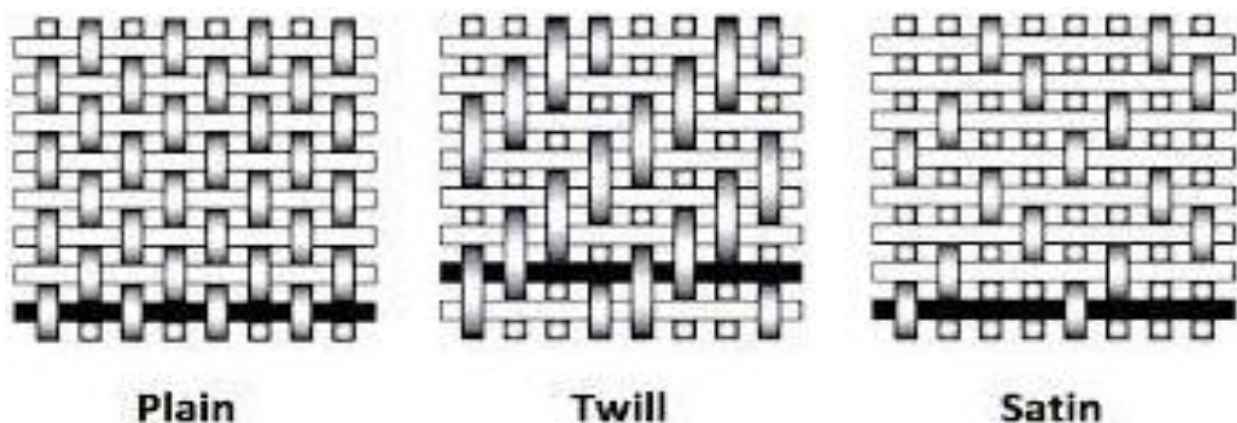


Figura 7: Esempi di diverse configurazioni di tessuti realizzati con fibre lunghe.

Tessuti Plain garantiscono una facile impregnazione, una buona resistenza alla delaminazione e un'elevata facilità di lavorazione, ma hanno proprietà meccaniche inferiori rispetto alle altre configurazioni. I tessuti Twill hanno una migliore drappabilità, migliori proprietà meccaniche ed una migliore finitura rispetto al Plain. I tessuti Satin permettono un'ottima impregnazione delle fibre,

garantiscono proprietà meccaniche elevate e superfici molto lisce, ma sono anche molto più delicati e difficili da lavorare.

Molto spesso questi tessuti si possono trovare già imbevuti in una matrice non ancora polimerizzata ed in tal caso prendono il nome di prepregs (pre-impregnati).

Altro metodo, ma molto meno usato perché non garantisce le stesse resistenze, è il TNT cioè il tessuto non tessuto: una struttura di fibre lunghe non tessute, ma intrecciate tra loro in maniera casuale.

I compositi fibro-rinforzati, specialmente con fibre lunghe intrecciate sotto forma di tessuti, grazie alle loro proprietà, alla versatilità offerta dalle tecniche di lavorazione ed all'enorme varietà, ne fanno sicuramente la tipologia più utilizzata; per questo motivo, nel proseguimento di questo elaborato si farà particolare attenzione a questa categoria di compositi.

È stato detto che le caratteristiche principali di un composito derivano dai rinforzi, possono in alcuni casi essere persino prossime a quelle dei materiali che lo costituiscono, ma in generale, quelle globali del composito saranno minori a causa del coinvolgimento della matrice.

1.1.2 Matrici

La matrice è la fase omogenea del composito, come già visto, il suo compito è quello di legare e tenere insieme i rinforzi, creando un corpo unico, oltre a proteggerli da danni meccanici ed agenti atmosferici. Importante anche, è la sua capacità di trasferire i carichi applicati al materiale in modo uniforme.

Per quanto riguarda le matrici, dividiamo i compositi in:

- a matrice metallica (MMC);
- a matrice ceramica (CMC);
- a matrice polimerica (PMC).

Le prime due sono tipologie di matrice molto meno comuni ed usate solamente in alcuni settori, a causa dei costi e delle difficoltà di produzione dovute all'incompatibilità tra queste e gran parte dei rinforzi più utilizzati, oltre alla difficoltà nel prevedere la variazione delle proprietà durante la lavorazione.

Le matrici metalliche comprendono leghe di titanio, alluminio, acciaio etc. che, grazie alle ottime proprietà di resistenza alle alte temperature e alle radiazioni, alla trazione, la conducibilità elettrica, l'assorbimento quasi nullo di umidità, unite alla loro duttilità, permettono il loro impiego in settori ove tutte queste proprietà vengono maggiormente richieste, come l'aerospaziale e l'aeronautico. Tuttavia, per questa tipologia di matrici è necessaria particolare attenzione, poiché la microstruttura dei metalli può subire trasformazioni in funzione della temperatura e della composizione chimica (trasformazioni di fase, accrescimento dei grani, precipitazioni di fasi secondarie). Possono contenere elementi di lega suddivisibili in base alla loro influenza sulla stabilità delle fasi e sui meccanismi

diffusivi, possono quindi favorire reazioni indesiderate all'interfaccia matrice–rinforzo, dando luogo alla formazione di fasi intermetalliche fragili che compromettono le proprietà complessive del composito. I rinforzi utilizzati tipicamente insieme a matrici di questo tipo, sono rinforzi ceramici particellari o a fibra corta che modificano la dilatazione termica dei metalli. Un esempio classico di componenti appartenenti a questa categoria sono i dischi dei freni di auto sportive, costruiti in alluminio rinforzato con carburo di silicio (Al–SiC).

Le matrici ceramiche presentano anch'esse ottime resistenze alle alte temperature, alle quali abbinano la resistenza alla corrosione ed una bassa densità. A differenza di quelle metalliche, hanno una bassa conducibilità elettrica, ma di base sono molto più fragili; per questo motivo, vengono solitamente rinforzate con fibre inorganiche, alle volte anche metalliche, per rendere i compositi in matrice ceramica più tenaci ed aumentare la resistenza alla propagazione di cricche attraverso meccanismi di deviazione della cricca e dissipazione dell'energia all'interfaccia fibra–matrice, a discapito però di un importante aumento di densità. Per quanto riguarda le applicazioni, anche in questo caso si parla di situazioni in cui si richiedono alte resistenze agli shock termici o ambienti corrosivi, come ad esempio, le camere di combustione e ugelli di scarico nei motori aerospaziali e nei razzi, dove i CMC (SiC/SiC) sono impiegati proprio per resistere a temperature estreme e corrosione da gas ad alta energia.

Molto più comuni sono invece i compositi a matrice polimerica. Un polimero (dal nome poli = molti e mer = unità) è una lunga molecola caratterizzata dall'unione di tante altre piccole unità dette monomeri. Un modo per classificare i polimeri è in base al loro comportamento al variare della temperatura. Da questo punto di vista distinguiamo due gruppi di matrici polimeriche:

- termoplastiche;
- termoindurenti.

I termoplastici sono polimeri che, se riscaldati, si ammorbidiscono fino a fondere poiché vengono indebolite le interazioni fisiche tra le catene molecolari. Un successivo raffreddamento ne provoca la solidificazione senza la formazione di nuovi legami chimici. Non avviene quindi una reticolazione completa durante il processo di formatura, rendendo così il comportamento termico reversibile. Sono tipicamente duttili e tenaci, ma hanno resistenza meccanica e termica inferiore rispetto ai termoindurenti (sebbene esistano termoplastici ad alte prestazioni), per questo tendenzialmente non sono utilizzati ove sono richieste alte temperature, perché al di sopra di certe soglie entrano comunque in una fase di degradazione.

Il loro più grande vantaggio sfrutta la proprietà di essere già dimensionalmente stabili e li rende ottimi per compositi riciclabili. Ne fanno parte, per esempio, il polipropilene, le poliammidi (nylon e PA) e il PEEK.

I termoindurenti invece solidificano mediante un processo di reticolazione chimica (Figura 8) che prevede l'applicazione di fonti di energia esterne come calore e pressione, questo processo è il cosiddetto curing: con questo termine si indicano quell'insieme di fasi che portano la matrice dallo stato semifluido a quello solido.

Grazie agli indurenti miscelati nella resina ed all'apporto di calore, si avvia la reazione dei gruppi chimici di base (epossidici, esteri ecc.) che porta alla formazione di polimeri reticolati. La reazione è esotermica ed è accompagnata da un aumento del peso molecolare della matrice; per questo motivo, deve essere monitorata per evitare che si sviluppi in modo incontrollato.

In una prima fase le temperature vengono alzate e la viscosità scende per effetto termico (si allentano i legami molecolari), nel momento in cui scende a livelli minimi, si applica la pressione in modo da favorire l'evacuazione della resina in eccesso, per poi riaumentare a seguito della formazione delle catene polimeriche. La resina passa dallo stato liquido a quello gommoso nel punto comunemente indicato come "gel point"; questo passaggio si verifica quando il grado di completamento del ciclo di curing è circa ad un terzo e corrisponde alla formazione delle catene polimeriche lineari. Il processo prosegue e si conclude con la reticolazione, ovvero la formazione dei legami di interconnessione tra le catene polimeriche.

In alcuni casi viene previsto anche un ciclo di post-curing, durante il quale il materiale composito, già solidificato e dimensionalmente stabile, viene sottoposto ad un ulteriore ciclo di riscaldamento controllato.

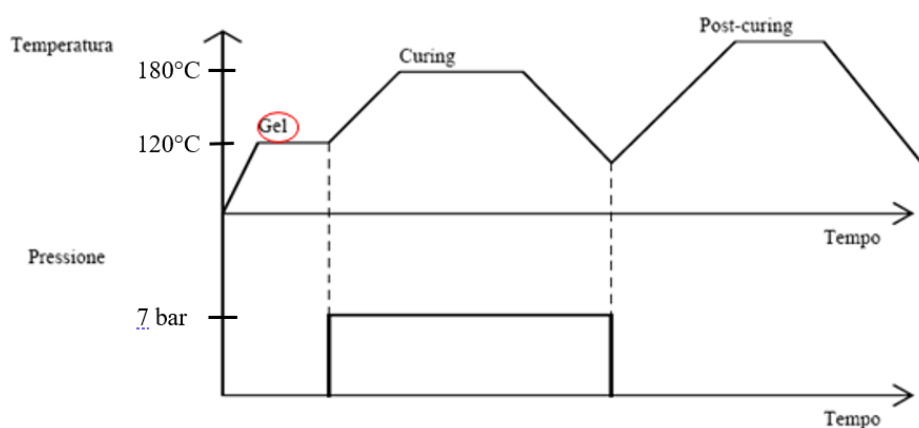


Figura 8: Tipico processo di curing in autoclave.

Lo scopo è quello di favorire il completamento delle reazioni chimiche di reticolazione non terminate durante il curing, incrementando il grado di conversione della resina. Questo processo consente di migliorare le proprietà termiche, meccaniche e chimiche del materiale finale, quali la temperatura di transizione vetrosa (T_g), ovvero la temperatura alla quale un polimero passa da uno stato rigido ad uno stato più morbido. Al di sotto della T_g , le catene polimeriche presentano una mobilità molto

limitata e il materiale manifesta elevata rigidità, al di sopra della T_g , invece, aumenta la mobilità delle catene, con conseguente diminuzione della resistenza meccanica. Nei materiali compositi a matrice termoindurente, la T_g è strettamente correlata al grado di reticolazione della resina e costituisce un parametro critico per definire la temperatura massima di esercizio del materiale, per cui il processo di post-curing, migliorerebbe il comportamento del materiale anche a temperature di esercizio elevate, oltre ad incrementare la rigidità, la resistenza meccanica, la stabilità dimensionale. Una volta terminato il ciclo termico, ed una volta raffreddati, i termoindurenti diventano irreversibilmente duri, cioè se aumentassero nuovamente le temperature, questi non indebolirebbero il proprio reticolo, grazie ai forti legami chimici che si creano tra le molecole, rendendoli difficili da riciclare.

Tipicamente, però, i termoindurenti hanno ottime proprietà meccaniche come resistenza alla trazione e rigidità, hanno anche elevata resistenza chimica e termica, il che li rende ottimi per applicazioni ad alte temperature. Trovandosi inizialmente allo stato liquido, garantiscono, inoltre, una migliore processabilità e bagnabilità dei rinforzi rispetto ai termoplastici, ma al contempo necessitano di una fase di polimerizzazione più lunga. Ne fanno parte le resine epossidiche, fenoliche, vinilestere e poliestere.

Nella tabella che segue (Tabella 1) sono riportati alcuni valori medi di proprietà meccaniche per matrici sia termoindurenti che termoplastiche.

Tabella 1: Proprietà di alcune matrici termoplastiche e termoindurenti.

Termoplastiche	Densità [g/cm ³]	Modulo di trazione [GPa]	Resistenza a trazione [MPa]
Nylon (PA)	1.1	1.3-3.5	55-90
Polyester TP	1.3-1.4	2.2-4.0	55-60
PEEK	1.3-1.35	3.5-4.4	100
Termoindurenti	Densità [g/cm ³]	Modulo di trazione [GPa]	Resistenza a trazione [MPa]
Epossidiche	1.2-1.4	2.5-5.0	50-110
Fenoliche	1.2-1.4	2.7-4.1	40-75
Polyester TI	1.1-1.4	1.6-4.1	35-95

1.2 Tecniche di lavorazione

Tenendo conto di tutti questi aspetti citati fino ad ora: tipo di rinforzo, dimensione, orientamento, natura della matrice, viscosità, impregnabilità etc., possiamo determinare una quantità vastissima di tipologie di compositi ed ognuno di questi può essere realizzato mediante tecnologie differenti.

Si stima che il costo di un componente realizzato in materiale composito, dipenda in larga parte (fino a circa il 70–80%) dal processo di produzione. Quindi, la scelta del processo più adatto deve essere fatta attentamente, analizzando la forma del componente, il materiale e l'uso finale. Prevedere le proprietà e, di conseguenza, scegliere le tecniche di produzione ottimali, diventa allora fondamentale. I compositi termoindurenti vengono attualmente realizzati mediante tecniche di lavorazione quali la laminazione manuale, il sacco a vuoto, l'autoclave, il resin transfer moulding, filament winding, deposizione di fibre, pultrusione e processi di iniezione. I termoplastici, invece, possono essere processati, mediante fiber placement, pultrusione, formatura per compressione, termoformatura e tecniche di stampaggio a iniezione (Tabella 2). Vediamone alcune nello specifico [5].

1.2.1 La laminazione

La laminazione manuale o hand-layup è uno dei processi più semplici ed utilizzati. Consiste nell'andare a sovrapporre una serie di strati di materiale UD o Fabric, a secco o pre-impregnati tagliati delle dimensioni opportune (le lamine). Questi strati vengono disposti su uno stampo che è il negativo della forma del componente, vengono aggiunti tanti strati in base allo spessore desiderato e vengono orientati in maniera alternata seguendo uno schema preciso, in funzione delle sollecitazioni principali a cui il componente sarà sottoposto (Figura 9). Queste strutture prendono il nome di laminati.

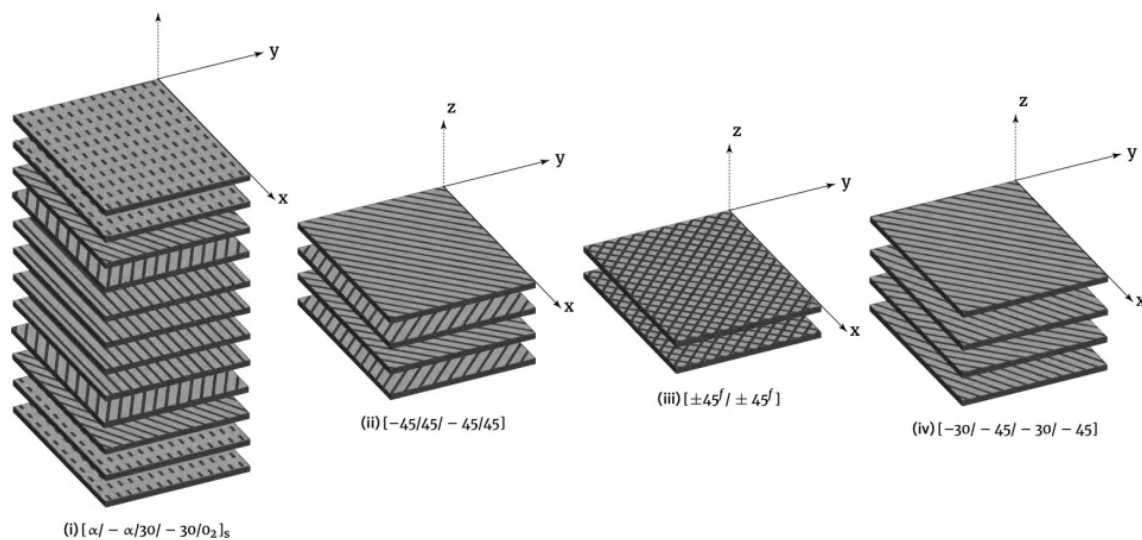


Figura 9: Esempi di orientamento degli strati nella laminazione.

Le configurazioni più comuni per gli UD prevedono l'orientamento delle fibre che costituiscono le lamine, secondo angoli specifici rispetto ad un sistema di riferimento, tipicamente 0° , 90° e $\pm 45^\circ$. Una configurazione $[0^\circ/90^\circ]$ è utilizzata quando il carico principale agisce lungo direzioni ortogonali, garantendo una buona resistenza a trazione e flessione lungo gli assi principali. Le lamine orientate a $[\pm 45^\circ]$ sono invece particolarmente efficaci nel contrastare sollecitazioni di taglio e torsione,

risultando quindi fondamentali in componenti soggetti a carichi multiasse. Spesso, nei laminati strutturali, si adottano configurazioni ibride quali $[0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ]$, che permettono di ottenere un comportamento meccanico più bilanciato.

I laminati possono essere costituiti anche da tessuti bidirezionali come quelli visti in precedenza (ad esempio Twill, Plain o Satin), in questo caso ogni strato presenta fibre già orientate in due direzioni principali, conferendo al laminato un comportamento meccanico più bilanciato. Rispetto ai laminati unidirezionali, i tessuti offrono una migliore drappabilità e quindi una maggiore facilità di lavorazione, a fronte di proprietà meccaniche generalmente inferiori a causa dell'ondulazione delle fibre (fenomeno del "crimp", dovuto al fatto che le fibre non sono perfettamente rettilinee, ma seguono un percorso ondulato dato dall'intreccio tra ordito e trama).

Inoltre, l'ordine di impilamento e la simmetria del laminato influenzano la struttura: laminati simmetrici rispetto al piano medio, riducono l'insorgenza di deformazioni indesiderate. La progettazione dell'orientamento delle lamine rappresenta quindi un elemento cruciale per ottimizzare le prestazioni del composito, consentendo di adattare il materiale alle specifiche condizioni di carico del componente.

Tendenzialmente, tra uno strato e l'altro del laminato, i tessuti, se a secco, vengono legati tra loro mediante aggiunta di resina liquida, in caso di prepregs, invece, sarà sufficiente disporre ogni lamina una sopra l'altra, senza l'aggiunta di ulteriore resina (Figura 10).

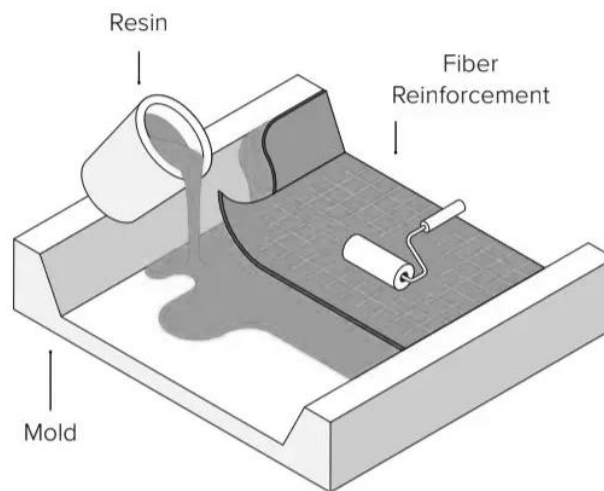


Figura 10: Processo di laminazione manuale.

Infine, terminata la deposizione della matrice, avviene la compattazione per rimuovere eventuali difetti come l'aria tra gli strati e far aderire questi ultimi tra loro in modo uniforme. Anche la compattazione viene eseguita a mano mediante dei rulli di strizzazione.

Il cosiddetto processo di curing, ovvero la fase in cui avviene la polimerizzazione della matrice, si sviluppa a temperatura ambiente o a temperature leggermente più alte (15-30°C).

Una volta terminata la fase di solidificazione della resina, il pezzo è pronto e può essere trattato con lavorazioni post-produzione come la rimozione di parti in eccesso, levigatura, lucidatura ecc.

I vantaggi di questa tecnica sono: il basso costo delle attrezzature, la versatilità ed il controllo diretto sull'intero processo. Di contro, si ha però che si produce molto materiale di scarto, che i tempi di realizzazione diventano piuttosto lunghi e la qualità finale, nel complesso, non risulta ottimale a causa della difficoltà nel rimuovere impurità e anche per questo risulta difficile garantire una finitura superficiale perfetta. Infatti, il metodo di laminazione manuale è utilizzato per la realizzazione di componenti in cui la precisione dimensionale non è un fattore critico.

Lo step successivo è la laminazione con sacco da vuoto o Vacuum bagging (Figura 11a), che sfrutta un passaggio migliorativo rispetto alla precedente, aggiungendo l'utilizzo del vuoto per rimuovere l'aria tra gli strati di tessuto. I passaggi sostanzialmente seguono quelli della laminazione a mano, poi nell'ultimo strato viene posizionato un film antiaderente molto poroso (release film) che fornisce una superficie liscia e rende uniforme la distribuzione della resina, un materiale assorbente (bleeder) che ha la funzione di assorbire l'eccesso di resina, un film traspirante (breather) per favorire la fuoriuscita di aria e un sigillante per chiudere in maniera ermetica il sacco allo stampo, dalla quale viene poi aspirata l'aria creando il vuoto, favorendo la compattazione ed eliminando quei difetti impossibili da eliminare con metodo manuale.

Un'alternativa molto usata di questa tecnica, che porta ad un minore consumo di resina, è il Vacuum infusion process, il VIP (Figura 11b), che consiste nel posizionare i tessuti a secco e poi sfruttare la differenza di pressione generata aspirando l'aria, per permettere alla resina stoccata in un serbatoio, di fluire all'interno dello stampo e impregnare tutti gli strati.

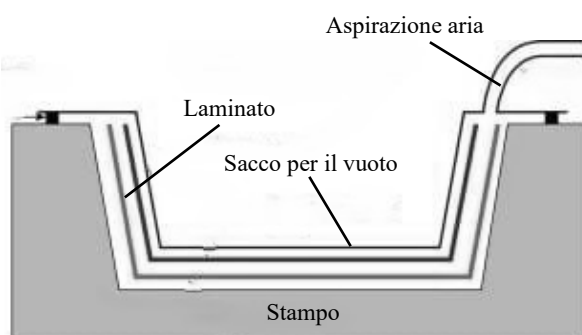


Figura 11a: Vacuum bagging.

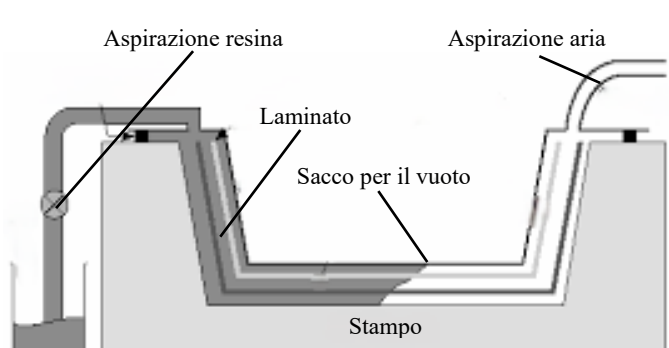


Figura 11b: Vacuum infusion (VIP).

Queste tipologie di laminazione, oltre alla compattazione tra strati rispetto alla laminazione a mano, favoriscono un maggior controllo dei rapporti resina-fibre.

Il VIP è un processo non molto veloce mediante il quale si realizza un'ottima impregnazione e si ha la possibilità di ottenere compositi a maggior contenuto di fibre.

Poiché non si usano grosse pressioni, ma si sfrutta la sola depressione causata dal vuoto, gli stampi possono essere anche in resina epossidica. L'uso di uno stampo in materiale polimerico condiziona le pressioni d'iniezione, che devono rimanere basse, implicando riempimenti lenti. Influenza anche la scelta della resina, la quale deve rimanere a bassa viscosità per tempi di riempimento dello stampo maggiori rispetto al caso di stampi metallici e deve avere una reazione di cura lenta, in modo che il calore sviluppato sia rilasciato lentamente senza surriscaldare e danneggiare lo stampo.

Per la realizzazione di componenti ad alte prestazioni, questo processo viene replicato all'interno di un'autoclave (Figura 12), un serbatoio dotato di sistemi per ottenere il vuoto, dove è possibile riprodurre alte temperature ed alte pressioni.

Il laminato viene posto al suo interno e lì termina il processo di curing in due fasi: in un primo momento la temperatura viene impostata ad un livello intermedio, in modo che il calore riduca la viscosità della resina, consentendole di impregnare efficacemente le fibre e la pressione esterna dell'autoclave unita a quella interna al sacco sottovuoto schiacciano il laminato contro lo stampo compattando gli strati, questo permette di aumentare la densità di fibre e di conseguenza la resistenza dei prodotti. Nella seconda fase la temperatura viene portata al valore finale e tenuta costante per un tempo tale da permettere l'intera polimerizzazione della matrice.

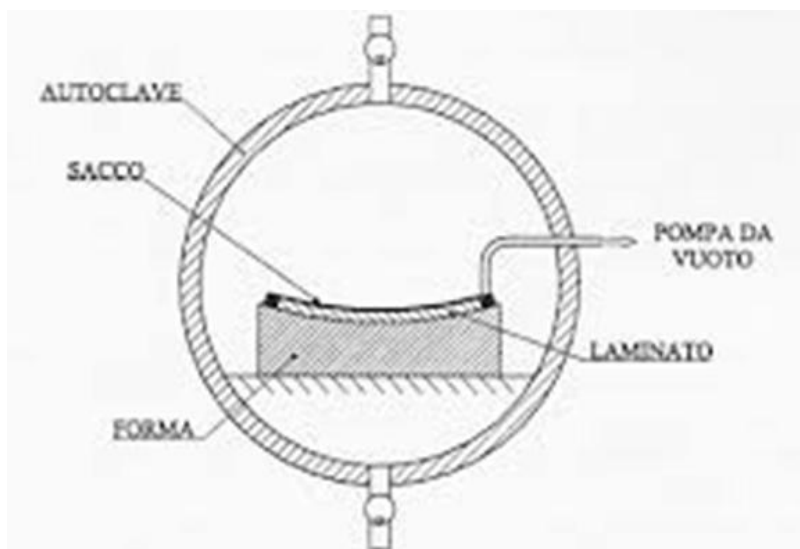


Figura 12: Laminazione in autoclave.

Un aspetto rilevante del processo in autoclave è che esso viene utilizzato quasi esclusivamente in abbinamento ai prepreg. Questi semilavorati, già pre-impregnati con resina in quantità controllata, garantiscono infatti il miglior rapporto fibra-matrice possibile, condizione fondamentale per ottenere le prestazioni meccaniche attese e per sfruttare i vantaggi del ciclo termico ad alta temperatura e pressione. L'uso dei prepreg, combinato con la possibilità di compattazione fornita dall'autoclave, permette di ridurre al minimo la presenza di vuoti e disomogeneità, e di ridurre le tensioni residue, migliorando le proprietà del laminato finale.

Una netta differenza rispetto alle altre tecniche di laminazione è che la possibilità di impostare alte temperature, permette di utilizzare particolari matrici con temperature di esercizio molto più elevate e rende il processo in autoclave versatile nei confronti di ogni tipo di materiale. Limita però le dimensioni del componente ed aumenta notevolmente i consumi di energia, con conseguente aumento dei costi di produzione. È infatti una tecnica molto usata per settori in cui non si hanno limiti di spesa come l'aerospaziale.

1.2.2 Altre tecniche di produzione

Lo stampaggio di compositi liquidi (Figura 13) o Resin Transfer Moulding (RTM), consiste nel posizionare fibre a secco in uno stampo chiuso da controstampo e una resina che viene iniettata ad alta pressione, dopodiché inizia la fase di polimerizzazione. È un processo che facilita la realizzazione di componenti di qualsiasi dimensione, con forme particolarmente complesse e per volumi di produzione medio-grandi. I vantaggi sono dati dalla possibilità di rinforzare i compositi anche nello spessore e non solo sul piano. Inoltre, il controstampo permette di ottenere buone finiture superficiali su entrambi i lati. Per quanto riguarda gli svantaggi, spesso si fa riferimento alla difficoltà nel fare aderire le fibre secche allo stampo, una scarsa aderenza farebbe fluire la resina in tali zone, creandone degli agglomerati che riducono la resistenza complessiva del componente. A tal proposito alle volte, devono essere previsti dei leganti per le fibre, i quali potrebbero però interferire con la matrice.

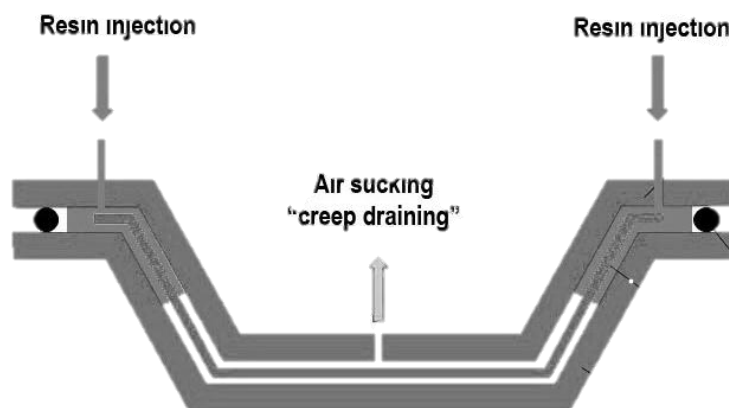


Figura 13: Resin transfer moulding (RTM).

Il Filament Winding, tradotto: avvolgimento delle fibre, è il processo utilizzato per la produzione di strutture assialsimmetriche come serbatoi, bombole o tubi. Vengono lavorate le fibre lunghe avvolgendole su un mandrino rotante con l'inclinazione desiderata in base alla direzione in cui si vuole massimizzare la tenuta (Figura 14). Le fibre possono essere trattate in due modi: con avvolgimento umido, cioè, vengono fatte passare attraverso un serbatoio contenente della resina in modo da impregnarle prima di essere avvolte al mandrino, oppure con l'avvolgimento a secco, dove vengono prima avvolte sul mandrino e poi impregnate per intero in un secondo momento. Il composito viene sottoposto al ciclo di curing e, una volta polimerizzata la matrice, il mandrino viene estratto. È un processo molto conveniente se si parla di produzione di grossi componenti, ma il grande limite riguarda il fatto che il pezzo deve essere cavo e con ulteriori vincoli imposti dalla necessità di rimuovere il mandrino.

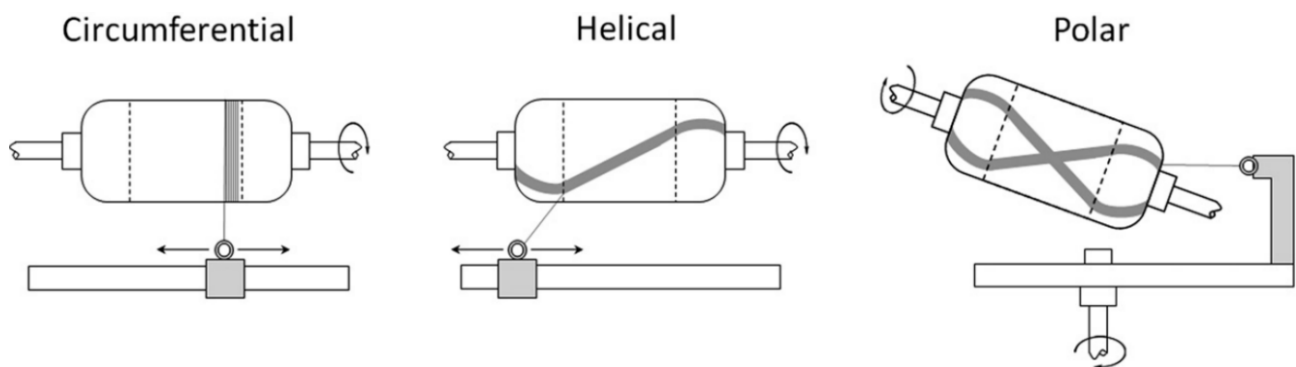


Figura 14: Schema del processo filament winding in diverse angolazioni.

Il Filament Placement Process è l'evoluzione del Filament Winding, ma viene utilizzato per forme del mandrino più complesse, sulle quali vengono posizionati fasci di fibre impregnati nella matrice, che vengono poi compattati sulla superficie in cui sono posizionati e subito riscaldati per avviare la polimerizzazione (Figura 15).

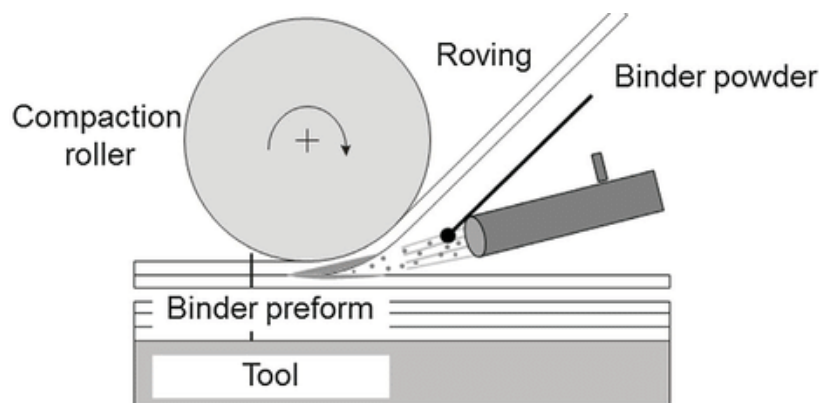


Figura 15: Particolare del sistema di adesione fibre.

Questo è il passaggio che lo differenzia principalmente dalla tecnica di avvolgimento precedente, dando la possibilità di realizzare componenti unici. Sono entrambi del tutto automatizzati, garantiscono velocità e riduzione del lavoro manuale.

La Pultrusione (Figura 16) è un processo adatto alla fabbricazione in serie di componenti a sezione costante e lunghezza indefinita. Le fibre passano attraverso un bagno di resina liquida e si impregnano, vengono tirate poi in modo da fluire attraverso uno stampo riscaldato, che ha il compito di modellarle e polimerizzare la matrice.

Consente di ottenere componenti con elevato contenuto di fibre e superfici lisce che non richiedono lavorazioni successive, permettendo quindi di abbassare i costi. Di fatto, la pultrusione risulta una delle tecniche più economiche per la lavorazione dei compositi. L'unico limite riguarda le tipologie di profilo che devono per forza essere costanti.

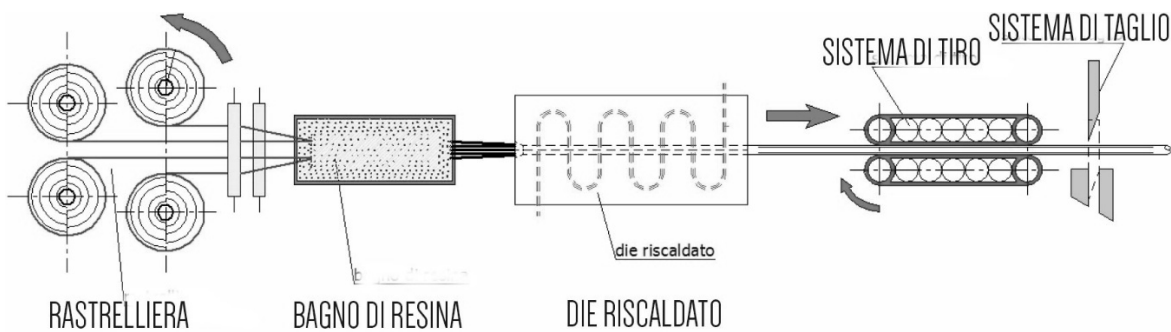


Figura 16: Schema impianto di pultrusione.

Lo Stampaggio a compressione (Figura 17) è molto utilizzato perché permette di lavorare sia matrici termoindurenti che termoplastiche con ottimi risultati in termini di resistenza e complessità delle forme, risultando a sua volta anche piuttosto economico. Il processo consiste nel posizionare il materiale composito in uno stampo fisso riscaldato, dopodiché un controstampo viene abbassato tramite una pressa idraulica, andando a comprimere il composito e facendogli assumere la forma dello stampo, mentre il materiale in eccesso fluisce dai lati.

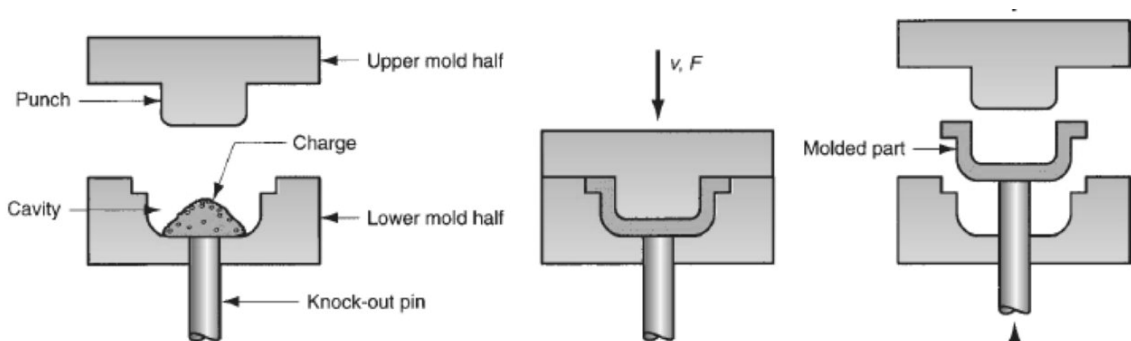


Figura 17: Fasi dello stampaggio a compressione.

Tale pressione viene mantenuta costante per tutto il processo di curing. Una volta terminato, lo stampo viene aperto, il pezzo viene estratto ed infine rifinito.

Questo sistema è molto utilizzato quando si parla di compositi a rinforzo particellare.

Lo stampaggio per iniezione (Figura 18) viene impiegato quando si lavora con matrici termoplastiche perché permette di sfruttare appieno le loro proprietà ed è ottimo per grandi volumi di produzione, in quanto molto veloce e del tutto automatizzato. Consiste nell'iniettare ad alte pressioni il composito all'interno di uno stampo, sfruttando il moto di una vite senza fine, che viene riscaldata per ammorbidire la matrice. Lo stampo viene poi raffreddato in modo da completare la fase di polimerizzazione. Una volta terminata, lo stampo si apre e lascia cadere il componente in un bacino di raccolta. Il processo può essere velocizzato aumentando il numero delle cavità nello stampo.

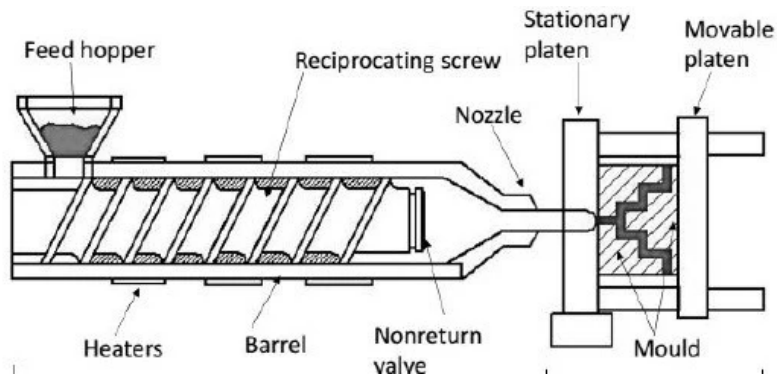


Figura 18: Schema dello stampaggio ad iniezione.

Una nuova frontiera delle tecniche di produzione di componenti in materiali compositi è l'Additive Manufacturing. Si intendono tutte quelle tecniche che, al contrario dei processi sottrattivi, come le lavorazioni alle macchine utensili per asportazione di truciolo, le quali partono da un grezzo e lavorandone il volume, permettono di ottenere la forma finale, creano invece un prodotto per aggregazione di materiale.

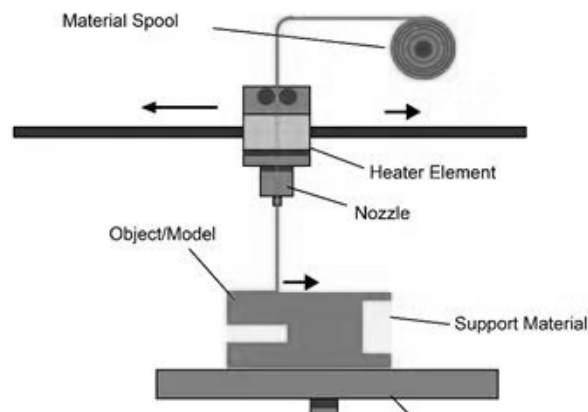


Figura 19: Schema stampa 3D FDM.

Tali tecniche sono alla base della stampa 3D, ampiamente utilizzata per la prototipazione rapida. Tra queste, una delle più comuni è la modellazione con deposizione di fuso (Figura 19), in cui il prodotto è ottenuto da una stratificazione di un sottile filamento di materiale plastico che viene prima riscaldato e ammorbidito, depositato tramite un ugello e poi istantaneamente solidificato. I materiali usati possono essere dei nanocompositi, cioè, costituiti da una matrice caricata con particelle di rinforzo, anche di carbonio.

Tabella 2: Riassunto tecniche di lavorazione in base a tipo di matrice e rinforzo processabili.

Processo	Fibre lunghe	Fibre corte	Particellari	Tipo di matrice
Laminazione	✓	✗	✗	Termoindurente Termoplastica
RTM	✓	✓	✗	Termoindurente
Filament Winding	✓	✗	✗	Termoindurente
Pultrusione	✓	✗	✗	Termoindurente Termoplastica
Stampaggio a compressione	✗	✓	✓	Termoindurente Termoplastica
Stampaggio a iniezione	✗	✓	✓	Termoplastica
Stampa 3D	✗	✓	✓	Termoplastica

1.3 Applicazioni

È stato già ampiamente affermato che i materiali compositi hanno rapporti di resistenza-peso senza eguali: possono raggiungere resistenze superiori a quelle dei più comuni materiali come l'acciaio, ma restando di gran lunga più leggeri. Rimane il fatto che spesso, a causa degli alti costi delle materie prime e dei processi di lavorazione, i materiali compositi rimangono ancora un privilegio per settori d'élite (Figura 20).

Tra i principali destinatari di questa categoria di materiali ritroviamo il mondo aerospaziale e quello aeronautico, come dimostrato dalla fusoliera e dalle ali del Boeing 787 e dell'Airbus A350, dove l'uso massiccio di polimeri rinforzati con fibra di carbonio permette riduzioni di peso drastiche e una gestione ottimale della fatica ciclica. Fusoliera, strutture alari, serbatoi, pannellature interne ed esterne, appendici aerodinamiche, antenne paraboliche, pale, strutture per i satelliti, etc., sono solo alcuni esempi di componenti realizzabili con materiali compositi, esempi in un settore in cui questi,

hanno fatto la storia. Il passaggio dai materiali classici ha permesso uno sviluppo in termini energetici e di prestazioni che si è aggiudicato il titolo di miglior rivoluzione nel settore, al pari dell'avvento dei motori a reazione.

Non è da meno l'impiego nel campo delle competizioni motoristiche: le vetture di Formula 1 hanno un telaio monoscocca realizzato interamente in materiale composito, così come cerchi, volante, dischi dei freni, braccetti delle sospensioni e pneumatici. Anche le moto da competizione montano carenature realizzate completamente in carbonio, leggerezza e resistenza garantiscono velocità e sicurezza, fondamentali nel mondo delle competizioni.

Per quanto riguarda il settore automotive, nelle supercar e nelle autovetture di alto livello, i compositi in fibra di carbonio la fanno da padrone per un buon numero di componenti, oltre che per le loro caratteristiche tecniche, anche dal punto di vista estetico, trovando la loro funzione per interni e rifiniture esterne. Sempre nel mondo automotive, i compositi stanno trovando applicazioni sempre più diffuse e varie, come ad esempio nei veicoli elettrici di serie, dove vengono adoperati per la protezione dei pacchi batteria e la riduzione delle masse non sospese, come negli alberi di trasmissione.



Figura 20: Esempi di applicazione degli FRP in ambito automotive e aeronautico.

Un altro settore dove questi materiali trovano impiego su larga scala è quello nautico, qui gran parte degli scafi viene realizzata in fibra di vetro per resistere meglio alla corrosione.

Molto spesso, nel tempo, sono stati ideati metodi di produzione “ad hoc”, proprio per rispondere alle esigenze di questo ambiente.

Parallelamente, il settore delle energie rinnovabili ne sfrutta le proprietà per la realizzazione di pale eoliche di dimensioni monumentali, superiori ai 100 metri, dove la fibra di vetro e il carbonio garantiscono la necessaria rigidità flessionale per resistere a carichi aerodinamici estremi.

Negli ultimi anni è stato conquistato anche il settore biomedicale, che usa i materiali compositi sia per la rigenerazione di tessuti organici, quali ossa e denti, sia per la realizzazione di protesi e di apparecchiatura medica, sfruttando la capacità di alcuni compositi di isolare i rumori e di assorbire certi livelli di energia radiante.

Ritroviamo applicazioni anche nel campo delle costruzioni: l'impatto dei materiali compositi nell'ingegneria civile è stato sorprendente, polimeri rinforzati con fibre, sono diventati indispensabili per il rinforzo antisismico e il retrofitting di infrastrutture degradate, offrendo una soluzione non invasiva e duratura.

Più vicine all'uso comune sono invece le applicazioni nell'industria sportiva: le attrezzature come racchette, sci, telai di biciclette e attrezzature professionali di ogni tipo, beneficiano di una stratificazione dei tessuti ingegnerizzata per rispondere a specifici stati tensionali. Per rendere queste attrezzature maggiormente commerciabili, come spesso accade in quei contesti di uso comune, materiali come la fibra di carbonio, vengono combinati con fibre di vetro o Kevlar, riducendo i costi ma offrendo comunque prodotti più leggeri e resistenti, aumentandone le prestazioni.

Riconosciamo senza dubbio, che tra tutti i settori che impiegano materiali compositi nelle loro applicazioni, sono gli FRP ad essere maggiormente apprezzati, in particolare i GFRP per il loro costo relativamente contenuto, la buona resistenza a corrosione e le discrete proprietà meccaniche e i CFRP, scelti invece, ove richiesta elevata rigidità e resistenza specifica. Questa combinazione di proprietà e la facilità di lavorazione, rendono gli FRP materiali estremamente versatili e adatti ad un'ampia gamma di applicazioni.

CAPITOLO 2:

Fiber Reinforced Polymers (FRP)

Gli FRP rappresentano una specifica e rilevante sottoclasse dei materiali compositi. La sigla FRP sta per Fiber Reinforced Polymers e racchiude quindi, tutti quei compositi a matrice polimerica, che vengono rinforzati con fibre di ogni genere.

Negli FRP le fibre sono le principali costituenti del composito ed occupano la maggior parte del volume, è per questo motivo che le proprietà finali di resistenza e leggerezza sono ottime. Come visto nel capitolo 1, le fibre che garantiscono proprietà migliori sono le fibre lunghe e pertanto, sono quelle maggiormente impiegate insieme alle matrici termoindurenti, le quali offrono migliori caratteristiche in termini di resistenza rispetto alle termoplastiche.

Per ottenere prodotti che ottimizzino le proprietà in tutte le direzioni, la configurazione tipica nella quale ritroviamo gli FRP è quella dei laminati: prodotti con UD o Fabric, lavorati poi tramite le diverse tecniche di laminazione.

La possibilità di definire il comportamento del composito attraverso la scelta del tipo di fibra, la percentuale in volume di queste ultime, della sequenza di laminazione e la flessibilità di modellazione, rappresentano solo alcune delle principali caratteristiche distintive di questi materiali rispetto altri tipi di compositi ed è per questo, che nel mondo dei materiali tecnici, ricoprono un ruolo da assoluti protagonisti per la maggior parte delle applicazioni.

Tra i più comuni ed utilizzati, come detto, ritroviamo gli FRP in fibra sintetica, come i polimeri rinforzati con fibra di vetro e i polimeri rinforzati con fibra di carbonio, grazie alle loro migliori proprietà meccaniche e termiche rispetto alle altre tipologie.

Il presente capitolo si pone quindi l'obiettivo di analizzare l'origine, le caratteristiche e le problematiche relative a queste due famiglie di compositi, in quanto ritenute di maggior rilevanza.

2.1 I GFRP

L'acronimo GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers) identifica la classe di materiali compositi costituiti da una matrice polimerica rinforzata con fibre di vetro.

La fibra di vetro fu la prima fibra sintetica a prendere piede ed essere utilizzata come rinforzo per materiali polimerici (più raro è il suo impiego in matrici metalliche o ceramiche) e trovare spazio in molte applicazioni in diversi settori.

Una svolta significativa si ebbe nel momento in cui si passò dalla produzione di lana di vetro a fibre discontinue, alla produzione di filamenti continui. Al contrario del vetro monolitico, che è un materiale estremamente fragile, quando questo viene filato perde tale caratteristica e diventa un materiale ad elevata resistenza meccanica e resilienza.

A seconda del tipo di applicazione e della composizione chimica, dividiamo le fibre di vetro in:

- vetro E, che presenta elevata resistività elettrica;
- vetro S, che ha una maggiore resistenza meccanica e miglior comportamento a fatica;
- vetro A, resistente agli alcali;
- vetro C, formulato per offrire maggior resistenza agli agenti chimici;
- vetro D, che ha una bassa costante dielettrica.

Le prime due categorie sono quelle maggiormente impiegate negli FRP.

Prima di analizzare le proprietà dei compositi GFRP, è opportuno approfondire le caratteristiche del rinforzo, le fibre di vetro, comprendendone l'origine e il processo produttivo.

2.1.1 Origine delle fibre di vetro

Le fibre di vetro derivano dalla sabbia di silice; questa viene scaldata a più di 1700°C in forno e poi raffreddata rapidamente, impedendo la cristallizzazione e favorendo la formazione di una struttura amorfa tipica del vetro (Figura 21), cioè un reticolo disordinato basato su tetraedri di silicio uniti tramite atomi di ossigeno.

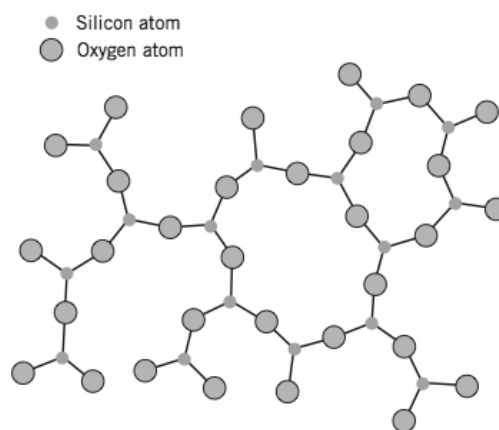


Figura 21: struttura molecolare amorfa del vetro

A seconda della tipologia di fibra che si vuole ottenere, quindi vetro E, vetro S, etc., viene fatta un'aggiunta accurata di altri elementi, per conferire ulteriori proprietà utili in applicazioni specifiche. La miscela fusa viene trasferita nell'apparecchiatura di formazione dei filamenti, qui è estrusa attraverso una boccia con una serie di fori sottilissimi, che viene riscaldata in modo da mantenere costante la viscosità del fuso. Getti d'acqua raffreddano poi istantaneamente i filamenti in uscita.

Il processo produttivo si conclude con la fase di rivestimento, che prevede l'aggiunta di lubrificanti che aiutano a proteggere i filamenti da rottura durante l'avvolgimento e di agenti leganti che ne migliorano la bagnabilità, rafforzando il legame all'interfaccia tra fibra e matrice.

I filamenti vengono successivamente raggruppati in configurazioni di tipo tow o yarn e avvolti in bobine, queste vengono sottoposte ad un processo di essiccazione controllata per eliminare l'umidità residua prima dell'impiego finale.

L'ultima innovazione che anticipa il futuro della fibra di vetro è il tessuto di vetro, che presenta un miglioramento in termini di resistenza complessiva, per cui, molte delle fibre prodotte saranno destinate alla produzione di questi ultimi, mentre il restante, solitamente tagliate per la realizzazione di fibre corte [6].

2.1.2 Caratteristiche della fibra di vetro

Il motivo per il quale le fibre di vetro hanno sin da subito attirato l'attenzione dell'industria, è perché ad un basso costo uniscono un buon rapporto tra resistenza meccanica e densità, dovuto dal fatto che la struttura amorfa del vetro a differenza dei materiali cristallini, non presenta piani di scorrimento, dunque, non potendo deformarsi, sopporta grandi tensioni elastiche fino alla rottura. Inoltre, i legami tra silicio ed ossigeno sono tra i più forti in natura e conferiscono un'alta resistenza intrinseca alla trazione. Pur presentando moduli elastici inferiori rispetto alle fibre di carbonio, offrono un'ottima resistenza alla corrosione e una buona stabilità termica.

Vediamo le proprietà principali delle singole fibre maggiormente impiegate negli FRP (Tabella 3).

Tabella 3: Caratteristiche delle singole fibre di vetro maggiormente impiegate negli FRP.

Caratteristiche	Vetro-E	Vetro-S
Diametro [μm]	5-20	5-10
Densità [g/cm^3]	2,55-2,60	2,46-2,49
Resistenza a trazione [MPa]	2000-3500	4500-5500
Resistenza a flessione [MPa]	3000-4500	4500-6000
Modulo elastico [GPa]	70-80	85-95
Allungamento a rottura [%]	4,5-5,0	5,0-5,5
Conduttività termica (W/mK)	1,0-1,2	1,3-1,5

Oltre alle proprietà del rinforzo, quelle del composito GFRP dipendono fortemente dalla frazione volumetrica di fibre, dall'orientamento, dai trattamenti ai quali sono sottoposte, dalle specie chimiche aggiunte e dal tipo di matrice.

In generale, i GFRP presentano densità contenuta, resistenza a trazione moderata, buona duttilità e resistenza ad ambienti corrosivi, caratteristiche che li rendono idonei a numerose applicazioni soprattutto per il settore nautico e delle infrastrutture.

Vediamo allora una serie di range di valori relativi alle proprietà dei GFRP (Tabella 4).

Tabella 4: Range delle principali proprietà dei GFRP.

Proprietà	Valore
Densità [g/cm 3]	1,8-2,1
Modulo di trazione [GPa]	30-70
Resistenza alla trazione [MPa]	500-1200
Modulo di flessione [GPa]	25-45
Resistenza alla flessione [MPa]	600-1000
Coefficiente di dilatazione termica [$10^{-6}/K$]	5-12
Conduttività termica [W/mK]	0,3-1,4

Le numerose applicazioni dei GFRP li portano spesso a essere a contatto con ambienti ostili, ricchi di umidità, soggetti ad alte temperature, ad agenti chimici o a raggi UV. L'esposizione più o meno prolungata può compromettere in modo significativo le proprietà meccaniche e la durabilità dei componenti.

Il tallone d'Achille per i GFRP è proprio l'umidità. Essa provoca il cosiddetto invecchiamento igrometrico: l'acqua si inserisce nelle catene polimeriche della matrice riducendo le forze intermolecolari, con conseguente indebolimento di queste ultime ed un drastico calo del modulo elastico. Influisce in modo ancora più marcato rispetto ad altri FRP (a causa della conformazione molecolare) sulla zona di interfaccia tra fibra e matrice, causandone il degradamento ed una conseguente riduzione della resistenza interlaminare ed un incremento delle probabilità di delaminazione.

In ambienti umidi prolungati, inoltre, può verificarsi un vero e proprio attacco idrolitico alle fibre, con possibile sottrazione di ioni e indebolimento dei legami tra silicio e ossigeno, riducendo così, la resistenza intrinseca delle stesse. In sintesi, i GFRP mostrano una particolare vulnerabilità all'umidità, a causa sia della sensibilità della matrice polimerica sia della natura chimica delle fibre di vetro, aspetto che non coinvolge, per esempio, le fibre di carbonio.

Le alte temperature agiscono come fattore accelerante per questi fenomeni.

2.2 I CFRP

L'acronimo CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymers) identifica la classe di materiali compositi costituiti da una matrice polimerica rinforzata con fibre di carbonio.

Negli ultimi decenni, i CFRP hanno assunto un ruolo di primaria importanza nel panorama ingegneristico, superando in termini di applicazioni critiche, anche i cugini GFRP.

Solitamente i CFRP si dividono in base alle caratteristiche delle fibre di carbonio:

- carbonio ad alta resistenza (HS);
- carbonio ad alto modulo (HM);
- carbonio ad ultra-alto modulo (UHM).

Queste diverse tipologie di fibre di carbonio hanno tutte la stessa origine, ma le loro proprietà meccaniche finali sono strettamente dipendenti dall'evoluzione del processo di produzione. In particolare, il controllo accurato dei gradienti di temperatura durante le fasi di trattamento termico, permette di modulare la microstruttura del materiale e controllare le proprietà da conferire alla fibra.

2.2.1 Origine delle fibre di carbonio

Sono fibre sintetiche che di base nascono da derivanti catene polimeriche o petrolio. Si distinguono in base alle materie prime di partenza ed ai successivi processi che le trasformano in strutture carboniose a base grafitica con organizzazione stratificata, dalle dimensioni comprese tra 5 e 12 μm , con proprietà uniche.

In sintesi, le fibre di carbonio possono essere prodotte a partire dalla modifica di catene organiche (PAN) o da residui della distillazione del petrolio o del catrame (PITCH).

Il PAN, per intero poliacrilonitrile, è un polimero che si sviluppa dalla polimerizzazione dell'acrilonitrile ed è il precursore della maggior parte delle fibre di carbonio in commercio. Esse da qui, si ottengono con un processo che si divide in tre fasi consecutive.

La prima fase è quella di riscaldamento fino a 300-400°C di filamenti continui di PAN, ottenuti estrudendolo attraverso una filiera e poi sottoposti a stiramento, in modo da allineare le catene polimeriche. Qui si verifica la rottura dei legami trivalententi tra gli atomi di carbonio e quelli di azoto che ne costituiscono la molecola (Figura 22).

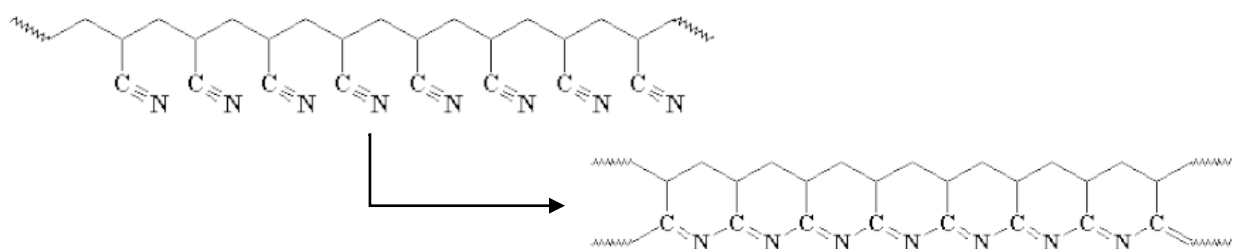


Figura 22: Fase di riscaldamento.

La fase successiva è detta di ossidazione, qui la temperatura aumenta fino ad arrivare a 700°C. A queste temperature si rompono i legami tra carbonio ed idrogeno e quest'ultimo si libera in forma gassosa, creando una struttura a catena come quella in figura (Figura 23).

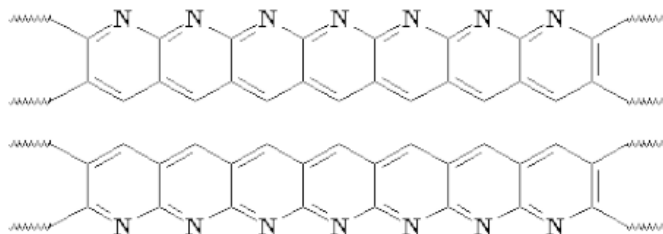


Figura 23: Fase di ossidazione.

La terza ed ultima fase, quella di carbonizzazione (Figura 24), inizia in ambiente inerte già a temperature comprese tra i 400-600°C, quando gli atomi di idrogeno iniziano ad essere rilasciati, le catene formatesi nella fase due, si fondono letteralmente tra di loro, creando una struttura a nastro costituita da anelli aromatici di carbonio a struttura esagonale, legati tra loro tramite legami covalenti (responsabili dell'ottima resistenza a trazione), con alle estremità atomi di azoto.

Per vedere comparire la struttura vera e propria delle fibre interessate, bisogna però alzare ulteriormente la temperatura fino ad oltre 1300°C, a queste temperature gli atomi di azoto tendono pian piano ad essere espulsi in forma gassosa, permettendo ai nastri di unirsi tra loro, dando vita a strutture sempre più grandi. Ne risulta la formazione di piani grafittici che si aggregano a loro volta in strutture stratificate (Figura 25). Mentre lungo il piano il legame è covalente, tra uno strato e l'altro agiscono solo le forze di Van der Waals, molto più deboli. Questo spiega perché la fibra sia estremamente resistente lungo l'asse ma fragile se sollecitata trasversalmente (anisotropia).

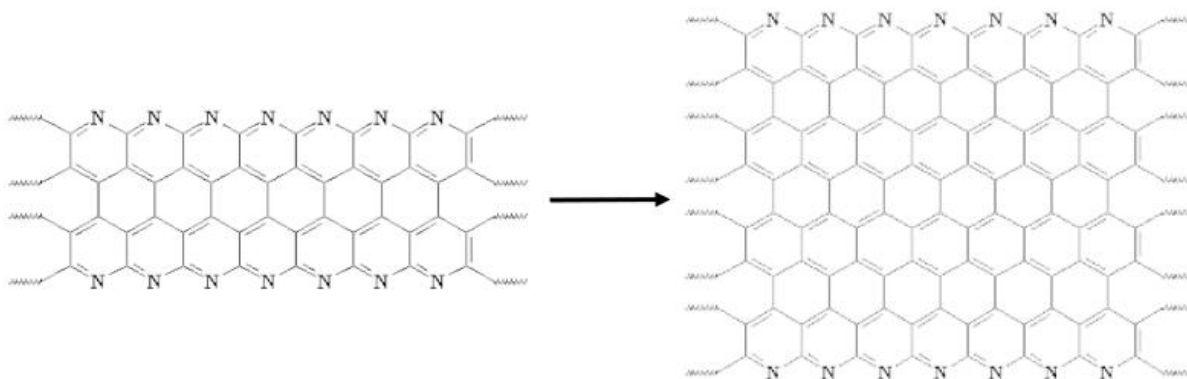


Figura 24: fase di carbonizzazione.

In questa fase la temperatura regola l'indice di cristallinità delle fibre: si parte dal carbonio ad alta resistenza, continuando ad aumentare la temperatura fino a 1800°C si ottiene una struttura sempre più cristallina, nasce così il carbonio ad alto modulo, il quale diventa ad ultra-alto modulo se si raggiungono soglie di 2500°C.

L'intero processo è eseguito mantenendo le fibre in tensione per evitarne il restringimento [7].

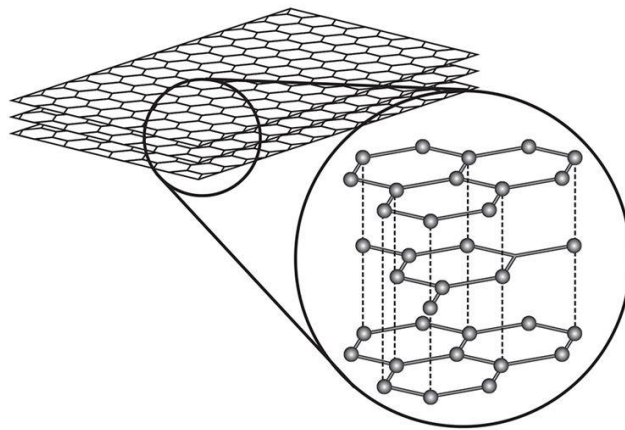


Figura 25: Struttura stratificata della fibra di carbonio.

Il PITCH è una sostanza ricca di carbonio, che può derivare da residui petroliferi, catrame o fonti naturali come la pece, dalla quale è possibile ricavarne delle fibre che, se sottoposte a corretti cicli di carbonizzazione, portano ad una struttura grafittica simile a quella ricavata a partire dal PAN e possono raggiungere un grado di grafitizzazione persino superiore rispetto a queste ultime, soprattutto dopo grafitizzazione ad alte temperature.

Il vantaggio di utilizzare queste materie prime è che i tempi delle fasi sono molto più brevi e non è generalmente richiesta alcuna tensione dei filamenti durante il processo di carbonizzazione, che anche in questo caso si sviluppa in una sequenza di lavorazioni successive.

La prima fase inizia a temperature intorno ai 400-410°C a seguito di una purificazione del PITCH grezzo (solitamente contenente residui ed impurità). È una fase di polimerizzazione termica controllata, che rende il materiale mesofasico, cioè in forma liquido-cristallina, conferendogli anisotropia strutturale che favorisce l'allineamento molecolare durante la filatura, nonostante l'aumento della viscosità.

Il materiale ottenuto ha un'origine termoplastica per cui deve essere stabilizzato. Nella seconda fase avviene la reticolazione dei filamenti ad una temperatura di esposizione che va dai 250 ai 300°C, in modo da limitare la perdita di elementi carboniosi. Se questa temperatura è troppo alta, la struttura delle fibre può iniziare a decomporsi, se è troppo bassa, si verifica una reticolazione insufficiente, che compromette significativamente le proprietà meccaniche delle fibre di carbonio risultanti. Anche il

tempo ha un'importante influenza, se il tempo di ossidazione è troppo breve (meno di 30 minuti), le fibre potrebbero non essere completamente stabilizzate, con conseguente scarsa integrità strutturale durante la successiva carbonizzazione. Al contrario, se il tempo di ossidazione è troppo lungo (superiore a 5 ore), le fibre potrebbero ossidarsi eccessivamente, con conseguente aumento della fragilità e una marcata riduzione della resistenza alla trazione.

Durante la stabilizzazione la concentrazione di ossigeno è in genere regolata entro un intervallo compreso tra il 5 e il 21%. Livelli di ossigeno più elevati possono accelerare il tasso di ossidazione, ma devono essere gestiti con attenzione per evitare reazioni esotermiche eccessive che potrebbero danneggiare la morfologia delle fibre.

Inoltre, occorre garantire una diffusione uniforme dell'ossigeno in tutto il filamento di fibre. Una distribuzione non uniforme dell'ossigeno può portare a una riduzione localizzata o a un surriscaldamento, compromettendo l'uniformità dell'ossidazione.

Infine, l'ultima fase è quella di carbonizzazione. Portando il tutto a temperature comprese tra i 1500 e 3000°C, gli elementi non carboniosi vengono volatilizzati. In questa fase, rispetto alla procedura partendo dal PAN, si ha una perdita di massa inferiore, ma i filamenti risultano più grossi (maggiore sezione è dovuta anche alla mancanza di stiramento) [8].

Al termine del processo di filatura (per entrambe le tipologie di fibre), i filamenti presentano una superficie estremamente liscia e chimicamente inerte, condizioni che ostacolano una corretta bagnabilità e l'adesione con la matrice polimerica. Per garantire un efficiente trasferimento degli sforzi all'interfaccia, le fibre vengono sottoposte a specifici trattamenti superficiali. Tali interventi si distinguono in: metodi chimici, volti all'introduzione di gruppi funzionali reattivi che promuovono legami chimici stabili con la resina, oppure metodi fisici (o meccanici), finalizzati a incrementare la rugosità superficiale per favorire l'ancoraggio meccanico e l'attrito interfacciale.

A questo punto, come per i GFRP, i filamenti sono raccolti in fibre che vengono avvolti in bobine a secco o impregnate in un bagno di resina se si intende produrre dei prepregs e la maggior parte di queste è riservata al mondo della tessitura. I laminati vengono nuovamente raccolti in bobine che possono essere conservate in celle frigorifere per impedire alla resina di indurire. Ovviamente il resto delle fibre verrà destinato anche agli altri processi come il filament winding, pultrusione, ecc. oppure tagliate per ottenere fibre corte ed essere lavorate con le varie tecniche di stampaggio.

2.2.2 Caratteristiche della fibra di carbonio

I valori delle temperature che sono stati forniti nel processo di carbonizzazione comprendono volutamente dei range piuttosto grandi, perché come visto, lo sviluppo delle proprietà varia drasticamente a seconda delle temperature alla quale viene sottoposta la materia nelle varie fasi. Questo può influenzare sulla natura della struttura molecolare dei singoli filamenti e cambiarne le

caratteristiche, portando alle diverse tipologie di carbonio elencate sopra, HS, HM e UHM (Figura 26).

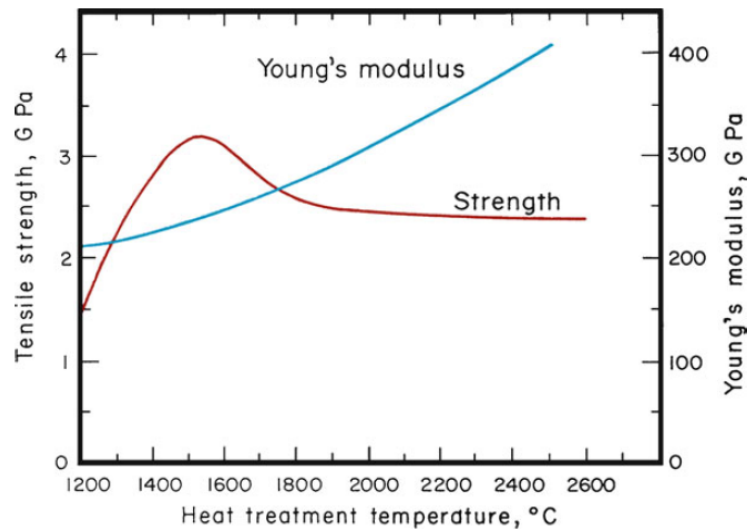


Figura 26: Influenza della temperatura sulle proprietà, nella fase di carbonizzazione.

Di base la fibra di carbonio rispetto alla fibra di vetro ha energie di legame tra le molecole più elevate e questo porta ad avere proprietà meccaniche migliori, insieme al fatto che i piani grafittici sono orientati l'ungo l'asse della fibra, a differenza del vetro in cui non vi è alcuna direzione preferenziale di allineamento, il che, offre sicuramente una buona resistenza ma comunque minore rispetto al carbonio. Le catene carboniose si trovano quindi disposte parallelamente alla direzione di trazione offrendo un'alta resistenza assiale.

Esiste anche una differenza di proprietà tra le fibre di carbonio stesse, a seconda della provenienza. Quelle che derivano dal PAN hanno una struttura finale con cristalli più piccoli e una disposizione disordinata, distorta e questo conferisce migliori proprietà di resistenza a trazione, resistenza a fatica e buona adesione con la matrice, a differenza delle fibre derivanti dal PITCH, che invece sono caratterizzate da cristallini più grossolani e orientati, i quali conferiscono moduli molto elevati, ma resistenze molto basse e maggior fragilità oltre ad una scarsa adesione alla matrice (Tabella 5).

Attualmente, circa il 90% della fibra di carbonio viene prodotto utilizzando il PAN come precursore, un materiale però molto costoso (rappresenta circa il 53% del costo di produzione totale) che ne limita l'utilizzo nei mercati di fascia medio-bassa. Al contrario gli scarti di raffinazione del petrolio poco costosi hanno un potenziale significativo per la produzione di fibre di carbonio. Sviluppare e fabbricare CF da residui petroliferi potrebbe rappresentare una valida alternativa per ridurre i costi e soddisfare la crescente domanda, ma si avrebbero caratteristiche inferiori ed una difficoltà maggiore nel reperimento delle materie prime [9]. Vediamo ora una serie di dati medi delle singole fibre, confrontate in base alla loro materia prima di origine.

Tabella 5: Confronto tra alcune proprietà delle fibre di Carbonio ottenute con metodi diversi.

Caratteristiche	Fibre da PAN	Fibre da PITCH
Diametro [μm]	5-10	8-18
Densità [g/cm^3]	1,75-1,95	1,65-2,2
Resistenza a trazione [MPa]	2700-5690	600-3830
Resistenza a flessione [MPa]	3900-5200	2100-3000
Modulo elastico [GPa]	221-521	41-940
Allungamento a rottura [%]	0,4-2,4	0,2-1,3
Conduttività termica (W/mK)	900	200

Le fibre di carbonio sono inoltre chimicamente inerti, resistenti alla corrosione, con bassa dilatazione termica e ottima stabilità dimensionale.

La combinazione di queste caratteristiche, unite alla possibilità di orientare e strutturare le fibre all'interno della maggior parte delle matrici sia termoindurenti che termoplastiche, rende i materiali compositi a base di fibra di carbonio (CFRP) tra le soluzioni più avanzate nel settore aerospaziale, automobilistico, sportivo e delle strutture ingegneristiche ad alte prestazioni.

I CFRP tendenzialmente vengono riconosciuti per l'elevatissimo rapporto resistenza/peso ed un'elevata resistenza all'usura e rigidità, che li rendono un vantaggio rispetto a tutti gli altri materiali.

I CFRP più comuni sono quelli che combinano fibre derivanti dal PAN e una resina epossidica come matrice, dunque, nella seguente tabella vediamo riportati gli intervalli tipici delle proprietà dei polimeri rinforzati con fibra di carbonio che combinano questi materiali di base (Tabella 6).

Tabella 6: Range indicativi delle principali proprietà dei CFRP.

Proprietà	Valore
Densità [g/cm^3]	1,5-1,7
Modulo di trazione [GPa]	70-600
Resistenza alla trazione [MPa]	500-6.000
Modulo di flessione [GPa]	70-250
Resistenza alla flessione [MPa]	500-1.500
Coefficiente di dilatazione termica [$10^{-6}/\text{K}$]	-0,8-2,5
Conduttività termica [W/mK]	5-25

Anche i CFRP sono inclini a peggioramenti di proprietà se sottoposti ad ambienti con caratteristiche estreme. Uno dei principali svantaggi è la diminuzione delle prestazioni meccaniche con l'aumento della temperatura che, combinata con la bassa conduttività termica, li rende molto più sensibili rispetto ad altri materiali.

Fino a temperature di 400°C la degradazione delle proprietà delle fibre si può considerare trascurabile, è però già a temperature che vanno dai 150 ai 300°C (temperature di transizione vetrosa) che si iniziano ad avere cali notevoli di prestazione dei CFRP a causa della matrice. L'invecchiamento termico può causare un forte calo del modulo, diminuzione della resistenza meccanica e integrità interlaminare.

Così come l'invecchiamento igrotermico dovuto all'umidità, anche se meno influente nei CFRP rispetto ai GFRP, può causare cali di proprietà della matrice, ma non colpisce direttamente le fibre di carbonio [10].

2.3 Problematiche ambientali

Nonostante i numerosissimi vantaggi dati dall'utilizzo degli FRP, sono da tempo state sollevate delle preoccupazioni a livello ambientale, soprattutto su temi legati agli studi sull'economia circolare dei prodotti (LCA) e il calcolo del costo del ciclo di vita (LCC).

Sulla base di questi indici si è individuato che le problematiche principali sono legate alla produzione delle fibre ed alla gestione dei prodotti a fine vita: il 90% degli FRP ad alte prestazioni si basa su materiali termoindurenti e quindi risulta quasi impossibili da riciclare.

Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, negli ultimi anni si sono comunque sviluppate tecniche di riciclo, anche molto avanzate, con sistemi di cogenerazione per il recupero di energia, ma pur sempre molto dispendiose, sia a livello economico che energetico, oltre al fatto che le fibre di carbonio riciclate presentano proprietà inferiori rispetto alle stesse fibre vergini. Per queste ragioni la discarica e l'incenerimento sono rimaste tutt'ora le vie di gestione più diffuse per i rifiuti di compositi FRP [11].

Siccome la domanda di materiali leggeri e ad alte prestazioni ha subito un aumento significativo negli ultimi anni, presto si dovranno fare i conti anche con l'aumento dei prodotti a fine vita e l'incenerimento potrebbe non essere più una scelta conveniente se si volesse preservare l'ambiente. La domanda di energia primaria (PED), ovvero l'energia totale prelevata dall'ambiente e il potenziale di riscaldamento globale (GWP), che indica quanto un gas serra contribuisce al riscaldamento globale rispetto alla stessa quantità di CO₂, sono i due principali indici utilizzati per analizzare il ciclo vita di

un prodotto e tengono conto di voci come: estrazione delle materie prime, produzione dei materiali, lavorazioni industriali, trasporto, uso e fine vita.

Ecco una tabella (Tabella 7) che racchiude una serie di valori del PED e del GWP per diverse soluzioni al fine vita di componenti in CFRP, calcolati sulla base di dati medi stimati.

Tabella 7: Dati stimati di PED e GWP dei sistemi di gestione rifiuti di CFRP [12].

	PED, MJ/kg CFRP					GWP, kg CO ₂ eq/kg CFRP				
	Landfill	Incineration	Recycling	Transport	Total	Landfill	Incineration	Recycling	Transport	Total
Landfill	0.97	–	–	0.14	1.11	0.13	–	–	0.01	0.14
Incineration	–	1.17	–	0.54	1.71	–	3.09	–	0.03	3.12
Mechanical+ landfill	0.16	–	0.69	0.35	1.20	0.05	–	0.03	0.02	0.11
Mechanical+ incineration	–	–	0.69	0.43	1.12	–	1.74	0.03	0.03	1.80
Pyrolysis	–	–	37.09	0.27	37.36	–	–	2.88	0.02	2.90
Fluidised bed	–	–	9.98	0.27	10.25	–	–	1.54	0.02	1.56
Chemical	–	–	38.12	0.27	38.39	–	–	1.51	0.02	1.53

Si può osservare che, per quanto riguarda la domanda di energia per le varie tecniche di riciclo, si hanno valori piuttosto elevati, meno dispendioso è l'incenerimento che però a sua volta presenta il dato più alto di GWP: 3,12 significa che un kg di CFRP produce un effetto che è circa tre volte più dannoso di un kg di CO₂.

Si prendano come riferimento i CFRP, in quanto la crescita esponenziale ci ha messo di fronte a queste riflessioni. Alla base della filiera di un componente in carbonio, c'è la produzione delle fibre, la quale risulta essere la fase più critica in termini di consumo energetico e di emissioni. Le varie fasi di lavorazione del PAN e del PITCH avvengono a temperature relativamente alte e per tempi di mantenimento piuttosto lunghi, inoltre, per produrre 1 kg di fibre di carbonio occorre circa il doppio di materia prima.

Il mercato europeo e quello internazionale sono regolati da stringenti direttive ambientali che evolvono regolarmente nel tempo. Attualmente per la produzione di fibre si stimano valori di PED tra i 200 e 900 MJ/kg di fibra prodotta, mentre il GWP medio è tra i 20 e 35 kg CO₂eq/kg, motivo per cui è necessario un netto cambio di rotta [13].

Il forte interesse delle aziende verso lo sviluppo di prodotti efficienti, ma sostenibili, ha quindi portato la ricerca a studiare delle alternative con investimenti di energia ed emissioni più basse rispetto agli FRP in fibra sintetica e che seguissero un modello di economia circolare. Tra le soluzioni migliori troviamo l'impiego delle fibre di origine naturale.

CAPITOLO 3:

Gli NFRP

La sigla NFRP (Figura 27) sta per Natural Fiber Composites Polymer e fa riferimento, come per i CFRP e i GFRP, a materiali polimerici rinforzati con fibre, che però questa volta sono di origine naturale e non più sintetica come invece lo erano le fibre precedenti. Le fibre naturali sono tutte quelle che possono essere ricavate tramite processi sia meccanici che chimici da materie già presenti in natura.

In base alla loro origine si possono dividere in tre gruppi:

- vegetali (esempio lino e canapa);
- animali (esempio lana e seta);
- minerali (esempio basalto).



Figura 27: Componenti realizzati in NFRP.

Potrebbe sembrare sorprendente, ma i primi impieghi di questi materiali risalgono a più di cento anni fa, quando sedili di aerei e serbatoi di carburante erano creati con fibre naturali e legante polimerico, il che permetteva di recuperare in termini di peso e contribuiva alla diminuzione dei consumi. Tuttavia, questi tentativi furono poi abbandonati a causa dell'avvento delle fibre sintetiche e della mancanza di tecnologie avanzate. Una rinascita si ebbe successivamente negli anni '90, con la reintegrazione di compositi naturali in settori come quello automobilistico, in particolare, Ford nel 1942 sviluppò il primo prototipo di automobile realizzato con fibre di canapa.

Oggi i materiali compositi in fibra naturale stanno sempre più attirando l'interesse dell'industria: buone proprietà meccaniche associate ad una continua ricerca di nuovi materiali ecosostenibili, rendono questa categoria di compositi molto appetibile per tutte quelle applicazioni che richiedono un basso peso specifico, rapportato a buone caratteristiche meccaniche, un basso costo ed un occhio proiettato sull'ecologia del pianeta. Alla luce delle recenti problematiche ambientali, potrebbero quindi ben presto rivelarsi un valido sostituto delle fibre tradizionali come vetro e carbonio e trovare spazio in vari settori industriali tuttora inesplorati.

Gran parte dei processi di lavorazione utilizzati per compositi classici (discussi nel capitolo 1), può essere utilizzata anche per produrre componenti in fibra naturale, il che renderebbe un'eventuale transizione da compositi sintetici a compositi naturali rapida ed efficiente; rimarrebbe, dunque, solo la sensibilizzazione delle aziende a temi ambientali ed il coraggio di queste ad entrare in un mondo che nasconde non poche insidie.

Alcuni dei problemi legati allo sviluppo delle fibre naturali sono la scarsa raccolta di informazioni e le differenze nelle proprietà meccaniche. Inoltre, la mancanza di standard, sia per i produttori che per gli utilizzatori di questi materiali, riguardo ai metodi di raccolta, trattamento, lavorazione e post-lavorazione delle fibre naturali, contribuisce ad aumentare la complessità di tale tipologia di fibre. Questi problemi rappresentano infatti un deterrente per l'uso generalizzato delle fibre naturali in diverse applicazioni.

Nelle seguenti pagine verrà quindi trattata una serie di aspetti legati a proprietà, fattori che le influenzano, tecniche di estrazione e trattamenti delle fibre di origine vegetale.

3.1 Le fibre vegetali

La maggior parte dei compositi a base naturale è di origine vegetale, difficilmente le altre tipologie di fibre vengono utilizzate negli FRP. Quelle di origine animale derivanti da peli, pelle, bozzoli o altre parti dell'animale, nonostante le migliori proprietà di resistenza al calore, hanno scarse proprietà meccaniche, ad eccezione della seta, che però risulta molto costosa e viene destinata principalmente all'industria tessile, oltre al fatto che risulterebbero, per molti, poco etiche. Quelle di origine minerale, offrono eccellenti proprietà isolanti sia dal punto di vista acustico che termico. Inoltre, presentano un'elevata resistenza meccanica e proprietà ignifughe. Nonostante le ottime proprietà, il motivo per cui difficilmente vengono impiegate negli NFRP, è perché la loro produzione risulta comunque dispendiosa a livello energetico, pur essendo di origine naturale vengono infatti lavorate tramite fusione ed estrusione ad alta temperatura, pertanto, vengono considerate più vicine alle fibre sintetiche e non in linea con gli obiettivi "green" di questa categoria.

In questo contesto, va sottolineato che l'origine naturale di un materiale non implica necessariamente la sua biodegradabilità, così come l'essere biodegradabile non presuppone automaticamente una provenienza biologica. Per questo motivo, la scelta dei rinforzi deve considerare non solo l'origine della fibra, ma anche le prestazioni richieste e l'intero ciclo di vita del composito.

Le fibre vegetali rappresentano il perfetto equilibrio tra prestazione e sostenibilità, vengono estratte da diverse parti della pianta e possono essere classificate in:

- fibre estratte dal fusto (esempio lino, canapa, bambù);
- fibre estratte da foglie (esempio da ananas, sisal, fico, banana);
- fibre estratte da semi (esempio da cotone).

I principali costituenti che ritroviamo in tutte le fibre vegetali sono: cellulosa, emicellulosa, lignina e pectina. I legami, la disposizione e l'orientamento tra le molecole di queste catene polimeriche conferiscono le principali proprietà meccaniche.

Questa suddivisione permette di avere un'ampia gamma di scelta tra fibre di origine e natura differenti. In ambito pratico, però, quelle che possono avere un maggiore impiego, avendo possibilità di ottenere da esse una fibra continua, sono quelle provenienti dal fusto della pianta, dunque, per il resto dell'elaborato ci si concentrerà maggiormente su tale categoria.

3.1.1 Estrazione delle fibre dal fusto

Esistono diverse fasi per la produzione di fibre ricavate dal fusto delle piante e tendenzialmente non prevedono l'uso di trattamenti chimici aggressivi, soprattutto nei processi più tradizionali.

All'interno di ciascuna fase diversi fattori possono influenzare la qualità della fibra e le sue proprietà: nella fase di crescita della pianta, la qualità della fibra è influenzata dalla specie vegetale, dai metodi di coltivazione, dalla posizione e dal clima. È stato dimostrato che persino le temperature a cui le piante vengono coltivate, così come la posizione delle fibre all'interno della pianta, influenzano significativamente il diametro, il contenuto di cellulosa e le proprietà meccaniche.

Anche la raccolta svolge un ruolo non trascurabile, in questa fase la tempistica è importante perché man mano che le fibre maturano, la parete cellulare occupa una parte sempre maggiore del fusto della pianta e ne aumenta la resistenza meccanica. Tuttavia, contemporaneamente le fibre diventano più grossolane e aderiscono più saldamente tra loro ed alla struttura della pianta circostante, rendendo l'estrazione più complessa [14].

Una volta raccolte vengono essiccate ed introdotte in un processo fisico di macerazione con rugiada o in acqua oppure in un processo meccanico come la decorticazione, nel quale le fibre e la biomassa non utile vengono separate.

Nel metodo della macerazione con rugiada, gli steli delle piante dopo essere stati tagliati vengono distribuiti nei campi, dove la presenza di batteri, luce solare, aria e rugiada, provoca la degradazione

dei tessuti cellulari e delle sostanze adesive che circondano le fibre. Questo processo è economico ed ampiamente utilizzato per la produzione industriale di fibre tessili e tecniche (in particolare per lino e canapa). Usato per la sua sostenibilità e il basso costo di manodopera, presenta però alcuni svantaggi notevoli: l'efficienza della macerazione per rugiada può essere compromessa da condizioni climatiche imprevedibili, a causa della sua forte dipendenza dalle condizioni meteorologiche deve essere attentamente monitorata per impedire che venga compromessa la struttura delle fibre.

La macerazione in acqua è uno dei metodi tradizionali più diffusi per l'estrazione delle fibre naturali da piante a fusto. Il processo consiste nell'immersione degli steli in acqua in bacini artificiali, stagni, corsi d'acqua o vasche controllate per un periodo generalmente compreso tra 3 e 35 giorni, a seconda della specie vegetale, della temperatura dell'acqua e della qualità desiderata della fibra. Durante questa fase, la struttura dello stelo si degrada e si distaccano le sostanze che legano le fibre tra loro. Rispetto alla macerazione con rugiada, la macerazione in acqua offre tempi di processo più brevi e una maggiore uniformità, consentendo di ottenere fibre generalmente più fini e con una migliore continuità.

La qualità della macerazione influisce in modo significativo sulle proprietà finali della fibra: una macerazione insufficiente si traduce in fibre grossolane con un elevato contenuto di tessuti residui, mentre una macerazione eccessiva può compromettere la resistenza delle fibre in quanto può modificare in maniera sensibile la composizione chimica.

Nonostante i vantaggi in termini di qualità delle fibre rispetto alla macerazione con rugiada, la macerazione in acqua presenta criticità ambientali, come acque reflue organiche e gas di fermentazione. Per questo motivo, l'utilizzo di sistemi di macerazione in acqua è oggi limitato, però sono in fase di sviluppo impianti per processi di macerazione controllata, che mirano a ridurre l'impatto ambientale mantenendo elevate prestazioni delle fibre estratte ed un miglior controllo delle specie chimiche presenti al loro interno.

Un'alternativa ai processi di macerazione è la decorticazione meccanica, un metodo di estrazione puramente meccanico che non ricorre a processi di degradazione biologica o chimica.

Il suo vantaggio è dato dai tempi di lavorazione ridotti, elevata produttività e un maggiore controllo del processo, il che rende questo metodo particolarmente interessante dal punto di vista ambientale e industriale, adattandosi alle richieste di produzioni di serie.

Prevede il passaggio degli steli, precedentemente essiccati nel campo per 3-5 giorni o in un forno di essiccazione per 24 ore a 70°C, attraverso macchinari dotati di rulli e lame, detti decorticatori (Figura 28), che liberano progressivamente le fibre.

L'applicazione di sollecitazioni meccaniche elevate può comportare danni alle fibre, in particolare, se i parametri di processo come la distanza tra i rulli e la velocità di lavorazione non sono

opportunamente ottimizzati. Per questo motivo, la qualità delle fibre ottenute mediante decorticazione meccanica risulta fortemente dipendente dalla progettazione e dalla regolazione delle macchine impiegate e generalmente risulta più bassa rispetto ai vari metodi di macerazione.

Nonostante queste criticità, se correttamente controllata, la decorticazione meccanica permette di ottenere fibre con una superficie più irregolare e una maggiore area superficiale, caratteristiche che favoriscono una migliore adesione con le matrici polimeriche nei materiali compositi, permettendo di risparmiare su successivi trattamenti superficiali [15].

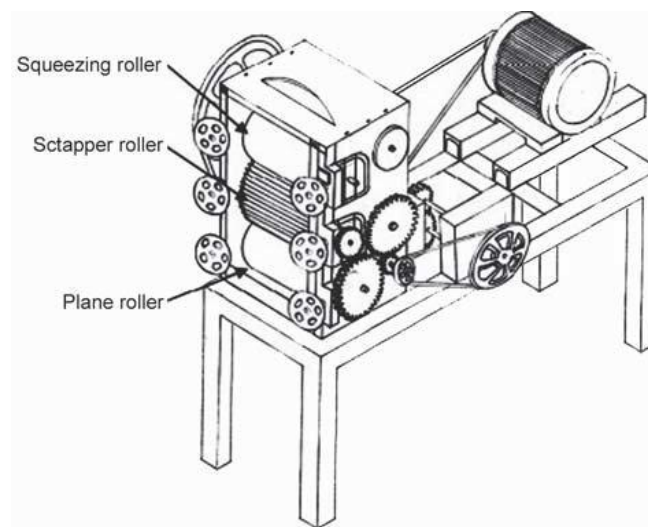


Figura 28: Schema decorticatore meccanico.

A seguito del processo di estrazione (sia che avvenga per decorticazione o per macerazione) c'è la fase di pettinatura, che permette la rimozione delle fibre corte ed impurità varie, creando un fascio di fibre continue e parallele pronte per essere filate e raccolte, prima in fasci e poi in bobine. Solitamente, prima di essere destinate alle varie lavorazioni, vengono trattate per ridurre una serie di problematiche legate principalmente alla conformazione molecolare, che verrà approfondita nel paragrafo seguente.

3.1.2 Composizione delle fibre dal fusto

Le fibre tecniche, così definite le fibre destinate all'impiego nell'industria per la tessitura e la realizzazione degli NFRP, sono costituite da fibre elementari di cellulosa, con diametri generalmente compresi tra 5 e 30 μm a seconda delle specie vegetali. Esse sono incollate insieme da una matrice interfibrillare costituita prevalentemente da pectine ed emicellulose. Sono le fibre che si ottengono con le lavorazioni di macerazione e decorticazione, le quali hanno proprio lo scopo di dissolvere i leganti che le tengono unite.

A scala microscopica, ogni fibra elementare è costituita da pareti cellulari concentriche (Figura 29). La parete primaria, sottile, ricca di pectine ed emicellulose e la parete secondaria, composta

solitamente da tre sottolivelli (S1, S2, S3). In particolare, l'S2 è lo strato più spesso, il che lo rende determinante nel conferire le proprietà meccaniche della fibra.

La maggior parte delle pareti della fibra elementare è costituita da fibrille (macro e micro) di cellulosa altamente cristallina, immerse in una matrice amorfa composta principalmente da emicellulosa amorfa e lignina. Le microfibrille di cellulosa cristallina hanno un certo orientamento rispetto all'asse della fibra, comunemente chiamato angolo di microfibrilla (MFA), il quale è responsabile della peculiare elevata resistenza alla trazione delle fibre vegetali.

In sintesi, le fibre vegetali (come lino, canapa, juta) sono costituite da cellule allungate le cui pareti contengono fasci di microfibrille di cellulosa orientate a spirale attorno all'asse longitudinale. L'inclinazione di questa spirale è proprio l'MFA, il quale determina due situazioni limite: per valori di MFA bassi, significa che le microfibrille sono quasi parallele alla fibra e questo si traduce in una fibra rigida, molto resistente e con alto modulo elastico. Al contrario, per valori di MFA alti, significa che le microfibrille sono molto inclinate, quindi si ottengono fibre meno rigide e più capaci di deformarsi meglio sotto carico.

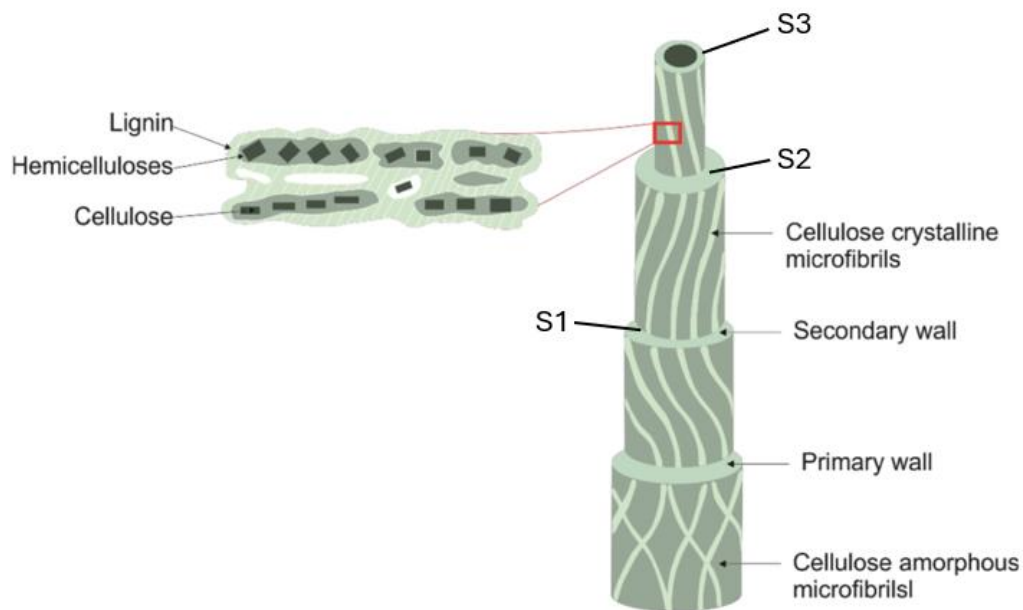


Figura 29: Schema della struttura delle microfibrille.

La cellulosa, come illustrato in Figura 29, è il principale costituente delle fibre vegetali ed è un polimero glucano lineare e idrofilo, in cui la presenza di numerosi gruppi OH determina un'estesa formazione di legami a idrogeno (Figura 30). Alcune molecole di cellulosa si allineano in modo altamente strutturato, formando regioni cristalline stabilizzate da legami a idrogeno e interazioni di Van der Waals, mentre le regioni amorphe sono costituite da molecole meno organizzate.

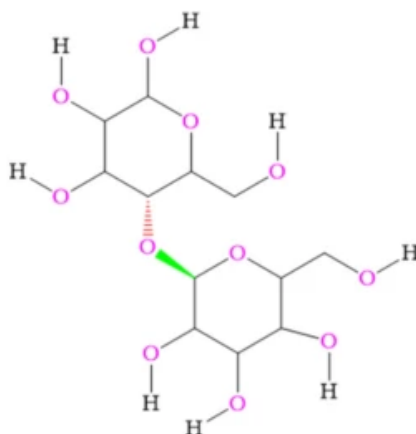


Figura 30: Struttura chimica della cellulosa.

L'indice di cristallinità (CI) è un altro parametro chiave per la valutazione delle caratteristiche strutturali dei polimeri e può essere utilizzato per fornire informazioni sul grado di cristallinità all'interno della fibra, che influisce anch'esso in modo significativo sia sulle caratteristiche sia meccaniche che termiche dei bio-compositi. La struttura molecolare delle fibre vegetali, come appena visto, varia tra aree cristalline strettamente organizzate e zone amorfe meno ordinate. Questa differenza di organizzazione influisce sulla reattività chimica. In particolare, dove si ha una concentrazione più densa di regioni cristalline, l'accesso degli agenti chimici è ridotto, al contrario, le zone dove prevale una struttura amorfa consentono una maggiore interazione chimica. Queste ultime sono quindi la causa di assorbimento di acqua presente nell'aria, rendendo così la superficie delle fibre estremamente sensibile all'umidità [16].

3.1.3 Caratteristiche e problematiche

Gli NFRP in fibra vegetale rappresentano una delle alternative più studiate come sostituti delle fibre sintetiche, per via del loro ciclo di vita caratterizzato da un basso consumo energetico, le buone proprietà, la biodegradabilità ed il costo decisamente inferiore rispetto alle altre tipologie di fibre.

Dal punto di vista prestazionale, è già stato accennato che mostrano una buona resistenza specifica grazie alla loro conformazione: uniscono discreti valori di resistenza a trazione e modulo elastico ad una densità molto bassa e questo si traduce in un notevole vantaggio in termini di leggerezza a parità di volume, di conseguenza, mantengono un rapporto peso/prestazioni competitivo con tutte le altre fibre sintetiche.

Nella seguente tabella verrà riportata una serie di proprietà meccaniche delle fibre vegetali più comuni (Tabella 8):

Tabella 8: Proprietà meccaniche e fisiche delle principali fibre vegetali [17].

Fiber name	Tensile strength (MPa)	Specific strength (S/ ρ)	Tensile modulus (GPa)	Specific modulus (E/ ρ)	Elongation at break (%)	Diameter (μ m)	Density (g/cm ³)
Abaca	400–813	266.7–967.9	12–33.6	8–40	2.9–12	10–30	0.84–1.5
Alfa	35–350	25–393.3	8.5–22	6.1–24.7	1.96–5.8	–	0.89–1.4
Bagasse	20–290	16–241.7	11–27	8.8–22.5	1.1	200–400	1.2–1.25
Bamboo	140–503	111.1–838.3	11–36	8.7–60	1.3–8	88–330	0.6–1.26
Banana	529–914	391.9–677	7.7–32	5.7–23.7	1–5.9	50–280	1.35
Coir	106–252	73.1–219.1	1.27–6	0.88–5.2	15–59.9	40–460	1.15–1.45
Cotton	287–800	179.4–533.3	1.1–12.6	0.69–8.4	0.3–10	11–21	1.5–1.6
Curaua	87–1150	62.1–821.4	11.8–96	8.4–69.6	1.3–5	7–170	1.38–1.4
Date palm	170–309	151.8–335.9	5–12	4.5–13	2–10	100–1000	0.92–1.12
Flax	345–1500	224–1071.4	27.6–80	17.9–57.1	1.2–3.2	25	1.4–1.54
Hemp	285–1735	192.6–1172.3	9.93–70	6.7–47.3	1.6–4.7	10–600	1.48
Henequen	430–570	307.1–475	10–16.3	7.1–13.6	3.7–5.9	180	1.2–1.4
Isora	500–600	384.6–500	–	–	5–6	10–17	1.2–1.3
Jute	393–938	218.3–721.5	0.13–30	0.07–23.1	1–2	15–350	1.3–1.8
Kapok	45–93	34.6–71.5	1.7–4.0	1.3–3.1	1.2–4.0	23.6	1.3
Kenaf	223–930	153.8–1240	4.3–60	3–80	1.6–5.7	14–250	0.75–1.45
Nettle	650–1594	408.8–1002.5	38–87	23.9–54.7	1–6	10–63	1.59
Okra	68–282	48.6–245.2	5.74–16.55	4.1–14.4	2	40–180	1.15–1.40
Oil palm	80–400	51.6–571.4	0.5–9	0.32–12.9	8–25	150–500	0.7–1.55
Palmyrah	180–281	110.4–257.8	8.9–22.9	5.5–21	7–15	707–1300	1.09–1.63
Piassava	109–147	77.9–105	1.07–4.6	0.76–3.3	6.4–21.9	–	1.4
Pina	413–1627	286.8–1129.9	34.5–82.5	24–57.3	0.8–14.5	20–80	1.44
Ramie	220–1000	141.9–1000	24.5–128	15.8–128	1.2–4	20–280	1–1.55
Rice Straw	150–200	312.5–555.6	3.3–12.5	6.9–34.7	3.2–4.6	–	0.36–0.48
Roselle	147–184	98.7–123.5	2.76	1.9	11–15	–	1.49
Sea grass	453–692	302–461.3	3.1–3.7	2.1–2.5	13–26.6	5	1.5
Sisal	80–640	53.3–492.3	1.46–41	0.97–31.5	2–15	50–300	1.3–1.5
Wheat straw	59–140	39.6–93.9	3.7–4.8	2.5–3.2	–	84–94	1.49

A causa dell'elevato grado di variabilità insito nelle fibre naturali, molti valori elencati hanno ampi intervalli. Si può supporre che la maggior parte dei valori effettivi cadrà circa a metà di ogni intervallo. Dal confronto con le tabelle relative alle fibre sintetiche emerge come, dal punto di vista strettamente meccanico, le fibre di carbonio e di vetro risultino complessivamente superiori alla maggior parte delle fibre vegetali. In particolare, la fibra di carbonio mantiene un ruolo dominante in tutte quelle applicazioni in cui il requisito principale è il raggiungimento delle massime prestazioni meccaniche o della massima rigidità strutturale.

Tuttavia, le fibre naturali presentano una serie di vantaggi specifici rispetto alle controparti sintetiche, tra cui la bassa densità, l'elevata capacità di assorbimento delle vibrazioni, migliori proprietà di isolamento termico e acustico, un coefficiente di dilatazione termica (CTE) prossimo allo zero e trasparenza alle onde radio. Il beneficio più rilevante delle fibre naturali, risiede però nell'impatto ambientale significativamente ridotto che esse garantiscono: la possibilità di ottenere le fibre direttamente da risorse rinnovabili consente infatti di evitare numerosi passaggi tipici dei processi produttivi delle fibre sintetiche, notoriamente ad alta intensità energetica e caratterizzati da elevate

emissioni. Ciò si traduce in valori sensibilmente inferiori di Global Warming Potential (GWP) e di Primary Energy Demand (PED), di fatto, è possibile ottenere una riduzione delle emissioni di carbonio fino ad oltre l'80% e le tecniche di estrazione delle fibre naturali risultano molto meno dispendiose in termini di energia (Figura 31) [18].

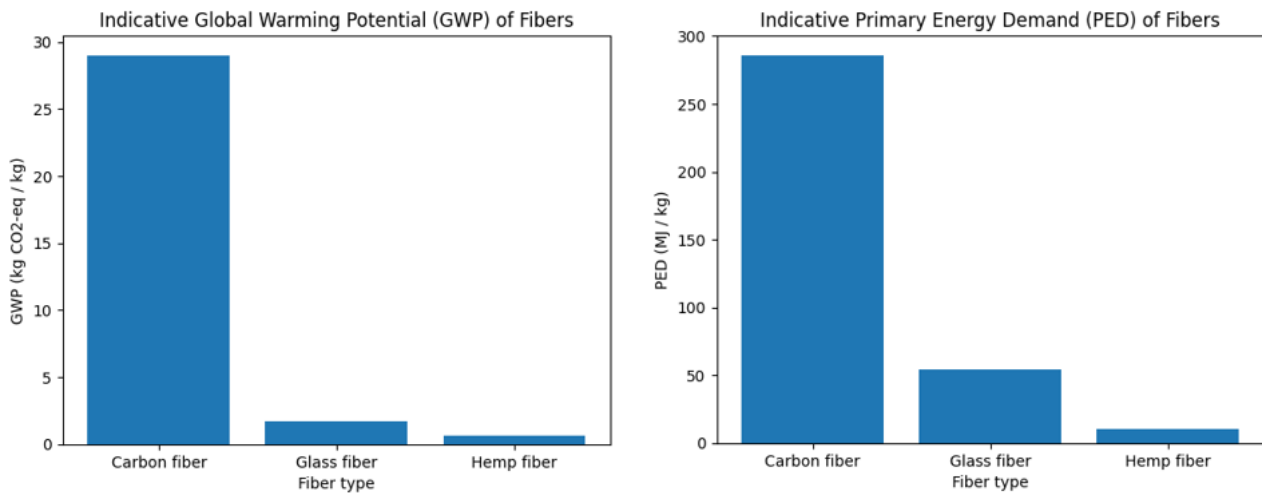


Figura 31: Grafici sulla differenza tra GWP e PED tra fibre di carbonio, di vetro e di canapa.

Ovviamente anche questi valori, riportati sul grafico precedente, sono medie indicative comunemente riportate in studi LCA e possono variare in funzione del processo produttivo e di molti altri aspetti, ma in linea generale mostrano la notevole differenza di impatto ambientale tra fibre sintetiche e fibre naturali.

La possibilità di destinare ampie aree agricole alla coltivazione di specie vegetali impiegate per la produzione di fibre, permette inoltre, durante la fase di crescita, a tali coltivazioni di contribuire attivamente alla riduzione della CO₂ in atmosfera attraverso il processo di fotosintesi, riducendo ulteriormente l'impronta di carbonio complessiva del materiale lungo il suo ciclo di vita.

Oltre al beneficio ambientale diretto, la produzione di fibre naturali si basa su risorse rinnovabili e potenzialmente inesauribili, a differenza delle fibre sintetiche, che dipendono in larga misura da materie prime di origine fossile o da composti chimici soggetti a progressivo esaurimento, la possibilità di rinnovare annualmente le piantagioni, ne fa un ulteriore vantaggio rispetto alle altre tipologie di fibre.

Un confronto lo si può avere anche in termini di costo delle sole fibre. Proprio per la complessità del processo di produzione, dell'energia richiesta e della reperibilità delle fibre sintetiche, in particolare rispetto alla fibra di carbonio, come si può vedere nella seguente tabella (Tabella 9), le fibre naturali risultano ampiamente più economiche, aspetto da non sottovalutare in sede di progettazione.

Tabella 9: Confronto del prezzo per kg di alcune tipologie di fibra [19].

Fiber	Price (US\$/kg)
Wood	0.3–0.6
Flax	2.1–4.2
Hemp	1.0–2.1
Jute	0.4–1.5
Coir	0.3–0.5
Cotton	2.1–4.2
Sisal	0.6–0.7
Kenaf	0.3–0.5
Bamboo	0.5
Wool	1.6–2.4
Feather	1.1–2.0
Silk	2.6–40.0
Glass	2.0
Carbon	22.0–27.0

Va fatta però una precisazione sugli NFRP e sulle affermazioni fatte in precedenza: sulla base del tipo di materiale utilizzato come rinforzo e del tipo di materiale polimerico utilizzato come matrice, questi materiali si dividono in due gruppi distinti:

- compositi totalmente rinnovabili detti compositi green o bio-compositi, in cui matrice e rinforzo sono ottenuti entrambi da risorse rinnovabili;
- compositi parzialmente rinnovabili, in cui la matrice polimerica sintetica è rinforzata con fibre naturali.

La ricerca scientifica si sta concentrando sull'identificazione di nuove forme di matrici polimeriche bio-based, sia in forma termoplastica che in forma termoindurente, con proprietà molto simili ai polimeri a base di petrolio, ma che derivino da oli, proteine, amidi ecc. (Figura 32).

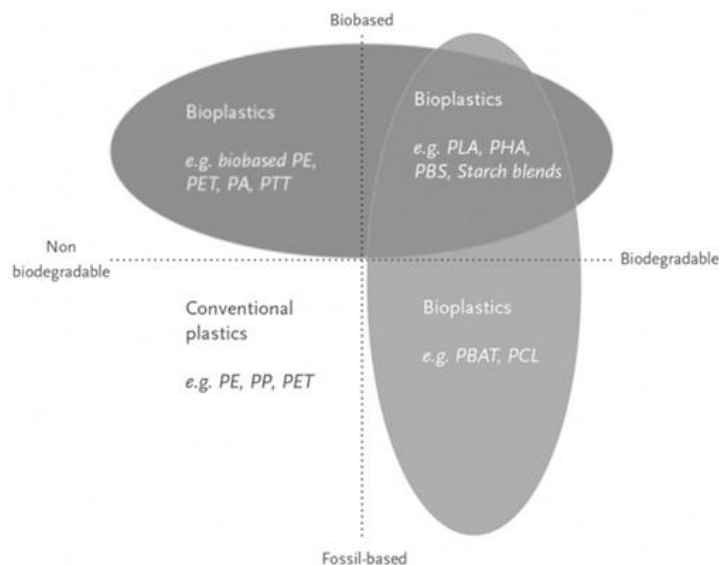


Figura 32: Esempi di classificazione di alcuni polimeri in commercio.

In parallelo allo sviluppo di nuovi processi produttivi e trattamenti delle fibre, si stanno aprendo prospettive concrete verso la realizzazione di componenti compositi completamente riciclabili, rafforzando uno dei principali punti di forza degli NFRP in termini di sostenibilità ambientale. Qualora il riciclo non rappresenti una soluzione tecnicamente o economicamente praticabile, la natura biodegradabile dei cosiddetti compositi “green” consentirebbe comunque, modalità di fine vita significativamente meno impattanti rispetto ai tradizionali FRP rinforzati con fibre sintetiche. In tali casi, lo smaltimento potrebbe avvenire senza ricorrere necessariamente alla discarica o all'incenerimento, riducendo così l'impatto ambientale complessivo del materiale lungo l'intero ciclo di vita.

L'altra faccia della medaglia è che esistono delle problematiche ancora aperte legate allo sviluppo di questi materiali, come l'assorbimento di umidità, che influenza le loro proprietà meccaniche. In generale, le molecole d'acqua riducono la resistenza della fibra, ma questo non è sempre vero, per le fibre di lino, per esempio, la resistenza aumenta con l'aumento del contenuto di umidità. Il problema, quindi, è legato soprattutto ad un aumento di difficoltà nell'adesione all'interfaccia tra fibre e matrice, dovuto alla natura idrofilica di tutte le fibre vegetali, di cui, come visto, la composizione cellulosica ne è la principale responsabile. Il contatto con l'umidità, porta alla rottura del legame con l'idrogeno nei gruppi OH presenti nella struttura della cellulosa e fa formare dei nuovi legami idrogeno con le molecole d'acqua. Al contrario le matrici polimeriche più utilizzate presentano comportamenti idrofobici, ciò si traduce nel rigonfiamento della fibra all'interno della matrice, causando così, problematiche di delaminazione tra i vari strati di un laminato o distaccamenti tra fibra e matrice, indebolendo la resistenza complessiva del composito e riducendo la sua durata di vita. Pertanto, la rimozione dell'umidità dalle fibre è un passaggio essenziale per la preparazione dei compositi.

In quanto a quest'ultimo aspetto, una serie di lavorazioni fisiche o chimiche, è stata studiata per migliorare l'aderenza fibra-matrice con conseguente innalzamento delle caratteristiche meccaniche. Le modifiche fisiche migliorano l'adesione tra fibra e matrice senza modificare la struttura chimica ma alterano solo la superficie delle fibre. Variando la rugosità di queste, aumenta la superficie di contatto e di conseguenza migliora la bagnabilità e il legame con la matrice.

Le modifiche chimiche, invece, migliorano l'adesione all'interfaccia, sfruttando delle reazioni chimiche tra matrice e superficie della fibra, andando ad asportare i gruppi idrofilici che caratterizzano le fibre vegetali. Nel paragrafo successivo verranno affrontate brevemente alcune delle tecniche più utilizzate.

Un'altra problematica, invece, riguarda i vincoli di temperatura, nello specifico l'impossibilità di lavorare ad alte gradazioni; questo perché le fibre vegetali non presentano un'ottima resistenza termica e tendono a degradare. Una prima fase di degradazione si ha già tra i 60-100°C a causa

dell'espulsione di acqua assorbita, la seconda fase avviene attorno ai 285°C alla quale si decompone l'emicellulosa, tra i 340-350°C si decompone invece la cellulosa, infine l'ultima fase è quella di decomposizione della lignina a temperature prossime ai 450-470°C e così devono essere escluse tutte quelle matrici che hanno temperature di polimerizzazione al di sopra di una certa soglia, solitamente si raccomanda di fabbricare NFRP a temperature inferiori ai 250°C. Per questo motivo le matrici più impiegate con fibre vegetali sono solitamente matrici anch'esse di origine naturale o PP e PE, le quali temperature di lavorazione rimangono entro i vincoli, imponendo in questo modo un importante limite nell'impiego di resine che tuttora vengono utilizzate insieme alle fibre sintetiche.

Anche la stabilità termica degli NFRP può però essere migliorata modificando la superficie della fibra, attraverso trattamenti fisici o chimici.

In sostanza, le proprietà di una fibra vegetale possono essere compromesse da molteplici fattori, a partire dalle condizioni di crescita delle piante, fino alla natura intrinseca della loro composizione, passando per le tecniche di lavorazione utilizzate (Tabella 10). Questo aspetto, come anticipato, lo si considera come la principale causa di rallentamento nello sviluppo degli NFRP.

Con il passare degli anni e lo sviluppo di nuove tecnologie e conoscenze, ricercatori ed ingegneri stanno continuando a collaborare per trovare le soluzioni sempre più adatte in risposta a queste problematiche. In particolare, la ricerca verso strategie di miglioramento delle prestazioni attraverso la modifica della superficie delle fibre è diventata argomento di numerosi studi.

Tabella 10: Tutti i fattori che influenzano le proprietà delle fibre vegetali.

Crescita delle piante	Esemplari di piante, coltivazione delle colture, origine geografica delle colture, posizione delle fibre nella pianta, clima locale, ad esempio precipitazioni e temperatura durante la crescita
Fase di raccolta	Maturazione delle fibre, che influenza spessore della parete cellulare, grossolanità delle fibre, adesione tra fibre e struttura circostante, dimensione e forma del lume, porosità, angolo delle microfibrille
Fase di estrazione delle fibre	Processo di decorticazione, tipo di metodo di macerazione, condizioni di separazione
Fase di fornitura	Condizioni di trasporto, condizioni di stoccaggio, età delle fibre
Condizioni di lavoro	Velocità di trazione, lunghezza iniziale del calibro, umidità, temperatura, diversa sezione trasversale delle fibre in punti diversi
Trattamento superficiale	Trattamento chimico, trattamento di miglioramento, trattamento dell'acqua, trattamento di essiccazione, ecc.

3.1.4 trattamenti chimici e fisici

Trattamenti chimici e fisici, come visto, sono le soluzioni maggiormente impiegate per il ripristino di proprietà delle fibre vegetali. Tra i più comuni trattamenti fisici troviamo: trattamento al plasma, ad ultravioletti, aggiunta di additivi e vari cicli termici, mentre i trattamenti chimici più utilizzati sono: il trattamento alcalino, trattamento con silani e trattamento con acetilazione. Il trattamento più adatto verrà scelto in base ai materiali in gioco (matrice e fibre) ed in base alle proprietà finali desiderate. Di seguito un breve approfondimento su questi trattamenti.

Il plasma è un gas ionizzato, cioè in cui ritroviamo una parte significativa di particelle che è caricata elettricamente, come ioni ed elettroni, ma che nel suo complesso risulta neutro. Si ottiene fornendo energia ad un gas (ossigeno, azoto, argon) tramite campi elettrici, radiofrequenze, microonde ecc. I metodi al plasma sono ampiamente riconosciuti come una tecnica ecologica e priva di umidità per il trattamento delle fibre. Può servire come mezzo per rimuovere difetti superficiali come cere e grassi vari, aumentare la rugosità della superficie migliorando l'adesione con la matrice e per portare ad un processo di attivazione chimica, che introduce o modifica gruppi funzionali sulla superficie delle fibre rendendola più reattiva (cioè che permette una migliore interazione chimica e fisica con ciò con cui la fibra viene a contatto), il tutto senza andare ad alterare la struttura interna della fibra. Di contro il trattamento al plasma ha il costo dell'impianto.

I trattamenti termici consistono nel riscaldamento controllato delle fibre a temperature generalmente comprese tra 150 e 300°C con una velocità di riscaldamento controllata, ad esempio 1–5 °C/min, in aria o in atmosfera controllata (aria, atmosfera inerte o vuoto), con l'obiettivo di modificare la composizione chimica e la morfologia superficiale delle fibre. Queste temperature sono mantenute per un tempo definito, che va da 30 minuti alle diverse ore ed infine raffreddate fino a temperatura ambiente, solitamente mantenendole in forno. In particolare, il trattamento termico favorisce la parziale rimozione di componenti amorfe e termicamente instabili come emicellulosa, lignina, cere e umidità residua, riducendo l'idrofilia delle fibre. Inoltre, la variazione della rugosità superficiale migliora la bagnabilità e l'adesione interfaccia fibra–matrice, limitando fenomeni di delaminazione. Tuttavia, parametri di processo non adeguatamente controllati possono indurre degradazione termica della cellulosa, con conseguente riduzione delle proprietà meccaniche delle fibre, pertanto, l'ottimizzazione delle condizioni di trattamento risulta fondamentale. I trattamenti termici sono spesso utilizzati in combinazione con trattamenti chimici, come quello alcalino, al fine di massimizzare i benefici sull'interfaccia del composito.

Il trattamento alcalino è il trattamento chimico più diffuso e prevede l'immersione delle fibre in un bagno acquoso con concentrazioni definite di idrossido di sodio (NaOH), per tempi controllati. Questo trattamento cambia la concentrazione cristallina, favorendo la formazione di regioni amorfe.

In queste zone gli spazi tra le molecole sono più grandi e questo favorisce l'ingresso di molecole d'acqua. I gruppi OH di cui è costituita la cellulosa sono sensibili agli alcali presenti nell'ambiente di immersione, dunque, vengono scomposti e vanno a reagire con le molecole d'acqua, spostandosi al di fuori della fibra. Per questo motivo i gruppi idrofili vengono ridotti e aumentano le proprietà della fibra di resistere all'umidità. Aumenta anche la rugosità permettendo una maggiore interazione con la matrice, rimuove varie impurità e riduce i vuoti sulla superficie, favorendo così la trasmissione dei carichi in modo uniforme lungo tutta la fibra.

È un trattamento molto diffuso per via della semplicità e dei buoni risultati e miglioramenti significativi che apporta alle proprietà meccaniche delle fibre, oltre a migliorarne la stabilità termica. Il processo con alcali deve però essere ampiamente controllato perché la variazione di concentrazione di NaOH oltre il valore ottimale e il prolungamento del tempo di esposizione possono provocare una degradazione e indebolimento delle fibre.

Il trattamento con silani è uno dei metodi chimici più utilizzati per migliorare l'adesione tra fibre e matrice. Prevede l'utilizzo di agenti silanici disciolti in acqua, ovvero molecole multifunzionali utilizzate come agenti di accoppiamento per modificare le superfici delle fibre. Queste molecole sono in grado di legarsi, tramite dei legami covalenti, da una parte con la fibra, attraverso la cellulosa ed i suoi gruppi OH, mentre dall'altra parte si legano alla matrice polimerica creando una sorta di "ponte chimico", formando anche una rete di reazioni tra silani stessi sulla superficie della fibra. In questo modo viene conferita una certa continuità molecolare all'interfaccia del composito, che porta a un miglioramento della bagnabilità e dell'adesione con la matrice. Le fibre vegetali, inoltre, presentano dei pori su tutta la superficie e gli agenti silanici fungono da rivestimento, andando a penetrare nelle cavità chiudendole.

Tale trattamento ha registrato un miglioramento delle caratteristiche meccaniche e della durabilità dei compositi persino maggiore rispetto al trattamento con alcali.

L'acetilazione è noto in particolare come metodo per migliorare la natura idrofila, avviene applicando anidride acetica e acido acetico alle fibre tramite il metodo di esterificazione, in cui il gruppo OH presente nella cellulosa della fibra naturale viene sostituito da un gruppo acetile CH_3CO , in questo modo viene eliminata gran parte dell'umidità intrappolata nella fibra, con conseguenti miglioramenti delle varie proprietà meccaniche, di adesione con la matrice, di durabilità e di stabilità termica. Inoltre, questo trattamento fornisce una finitura superficiale ruvida con un minor numero di vuoti che garantiscono un ulteriore miglioramento del legame fisico con la matrice.

Tale trattamento viene solitamente effettuato successivamente ad un trattamento con alcali. Non è raro, infatti, trovare la combinazione di due o più trattamenti eseguiti sulle stesse fibre, in modo da raggiungere più efficientemente le caratteristiche desiderate [20].

Tutti gli aspetti citati fino ad ora implicano che, per applicazioni dove il peso è critico, un NFRP ben progettato può offrire un buon compromesso tra prestazioni, leggerezza, basso costo e sostenibilità ed in parte sostituire i compositi in fibra sintetica.

3.1.5 Applicazioni e sviluppi futuri

Circa 43.000 tonnellate di biofibre sono state utilizzate come rinforzo nei compositi nell'Unione Europea nel 2003. La quantità è aumentata a circa 315.000 tonnellate nel 2010, e rappresentavano il 13% del totale dei materiali di rinforzo negli FRP. 830.000 tonnellate di biofibre sono state consumate nel 2020 e la quota è salita al 28% del totale dei materiali di rinforzo [21]. Per il futuro, si prevedono tassi di crescita dell'industria delle fibre naturali oltre al 20% annui, a dimostrazione di un settore in costante crescita.

Vi è un certo disaccordo su come il futuro mercato degli FRP naturali si confronterà con il mercato degli FRP sintetici. Alcuni non prevedono la sostituzione delle fibre sintetiche con fibre di origine vegetale, ma ritengono invece che queste ultime avranno una propria nicchia di mercato per applicazioni non critiche. Al contrario, altri ritengono che la continua ricerca sui compositi naturali, in particolare lo sviluppo dei trattamenti sulle fibre, porterà alla fine alla sostituzione dei materiali sintetici in molte applicazioni.

Sicuramente allo stato dei fatti, come già accennato, per applicazioni in cui non si richiedono elevate prestazioni a livello di resistenza meccanica, ma dove piuttosto si prediligono bassi costi e sostenibilità, l'utilizzo degli NFRP potrebbe risultare una soluzione estremamente valida.

Le caratteristiche versatili degli NFRP li rendono ideali per numerose applicazioni, che spaziano dai prodotti per la casa a usi finali più avanzati e specifici; infatti, sono già commercializzati per diverse applicazioni, tra cui imballaggio, automotive, prodotti medicali, aerospaziale e sport.

È però il settore automotive (Figura 33) ad essere stato maggiormente influenzato dall'utilizzo degli NFRP. Sono comunemente utilizzati per componenti interni ed esterni di veicoli come cruscotti, rivestimenti del padiglione, pannelli delle portiere, schienali dei sedili, rivestimenti, pannelli fonoassorbenti, rivestimenti del bagagliaio, ecc. Trovano ampio impiego nell'industria automobilistica rispetto alle loro controparti sintetiche poiché l'uso di fibre naturali nei compositi è in grado di soddisfare le prestazioni richieste in termini di resistenza e durata, sono inoltre più leggeri, il che può ridurre il 25% del peso del veicolo con conseguente diminuzione dei consumi, hanno costi di produzione inferiori, un minore consumo energetico e sono riciclabili, punto a favore anche in ottica della Direttiva dell'Unione Europea sui veicoli fuori uso (entrata in vigore nel 2020), in base alla quale l'80% di un veicolo deve essere riciclabile, recuperato o riutilizzato [22].

BMW, per esempio, utilizza gli NFRP già dall'inizio degli anni '90. Nel 2001, sempre BMW ha compiuto un passo significativo utilizzando 4000 tonnellate di fibre naturali: utilizza fibre di kenaf

per i pannelli interni delle portiere e per il cruscotto. Questo permette di ridurre il peso del componente del 30% rispetto alle plastiche tradizionali.

Questo esempio ha ispirato ed incentivato all'uso di compositi in fibre naturali, gran parte delle case automobilistiche di tutto il mondo come Mercedes, che impiega fibre di cocco e lattice nei sedili e lino/sisal per i rivestimenti interni dei montanti, o come Porche, che ha realizzato una delle prime auto da corsa ad utilizzare un kit carrozzeria (portiere e alettone posteriore) realizzato interamente con un composito di fibre di lino e canapa, con proprietà di rigidità e sicurezza simili alla fibra di carbonio, ma con una produzione molto meno energivora. Insieme a questi esempi, anche tante altre, hanno iniziato a virare anch'esse, negli ultimi anni, verso un utilizzo sempre più marcato di questi materiali, sbarcando persino in Formula 1, dove la vettura della McLaren, dal 2020 ha montato sedili interamente in NFRP di origine vegetale.



Figura 33: Esempi di applicazione di NFRP in ambito automotive e motorsport.

Un largo impiego lo si ritrova anche nel settore nautico per la realizzazione di scafi per barche a vela, canoe, surf e quello sportivo, dove da sempre, poiché la maggior parte degli sport richiede movimento, l'attrezzatura sportiva deve essere dunque realizzata con materiali leggeri. Grazie alle proprietà di smorzamento superiori rispetto alla fibra di carbonio e di vetro, ritroviamo esempi di NFRP usati per la produzione di snowboard e sci. Aziende come Salomon e Rossignol, utilizzano inserti in fibra di lino nel core degli sci per assorbire i colpi e rendere la sciata più fluida, rispetto ai compositi sintetici che tendono ad essere spesso troppo rigidi. Babolat che produce racchette da tennis, nella serie Pure Drive integra fibre di lino nel manico per migliorare il feeling dell'impatto con la pallina e ridurre il rischio di infortuni al gomito. Anche biciclette, mazze da hockey e archi utilizzano spesso questi materiali, sostituendo i "grandi classici" come legno, alluminio e acciaio, per migliorare la qualità dei prodotti.

Trovano spazio anche nel settore edile dove, ad esempio, l'impatto ambientale di questi materiali è particolarmente significativo. Possono essere utilizzati per la produzione di telai, porte e finestre, grazie alla migliore resistenza agli agenti atmosferici rispetto al legno puro e per oggetti d'arredamento come tavoli, sedie e mobili, grazie alla loro estetica e facilità di modellazione; inoltre, le ottime proprietà fonoassorbenti e di isolamento termico permettono il loro impiego per strutture di protezione e pannelli isolanti. Interessante sempre in ambito edile è l'iniziativa di un gruppo di studenti e ricercatori della Eindhoven University of Technology che ha realizzato un ponte pedonale sperimentale utilizzando una combinazione di fibre di lino e resina bio-based, con sensori che monitorano in tempo reale la degradazione per testarne la durata strutturale nel tempo [23], ad indicare come molte realtà di studio, credano fortemente nello sviluppo di questi materiali.

L'applicazione degli NFRP in campo biomedico è una delle frontiere più interessanti poiché le fibre naturali offrono un vantaggio unico rispetto al carbonio: la loro accettabilità e compatibilità con il corpo umano, essendo di origine naturale, non risultano essere tossiche, dettaglio da non sottovalutare quando si parla di ambito sanitario. La loro biodegradabilità potrebbe essere un altro vantaggio da approfondire per questo settore, potrebbe infatti permettere, in alcuni casi, di eliminare interventi di rimozione di placche ossee o tutori, se realizzati proprio in NFRP.

Una soluzione che potrebbe mettere d'accordo tutti e che per il momento sta riscontrando grande successo, è l'ibridazione, cioè la combinazione di fibre di origine sintetica con fibre di origine naturale in un'unica matrice polimerica o bio-polimerica, con lo scopo di combinare le proprietà benefiche di ciascun tipo di rinforzo: di aumentare le caratteristiche meccaniche delle fibre vegetali e limitarne il problema di assorbimento di umidità, ridurre il peso delle fibre sintetiche e risparmio energetico nella produzione di queste. Come soluzione, permetterebbe di estendere l'applicazione di fibre vegetali ad applicazioni più tecniche come componenti strutturali automobilistici e strutture aerospaziali.

Proprio in quest'ultimo settore che sembra del tutto distante dall'utilizzo di materiali "green", vi è stato uno sviluppo attento e mirato nell'utilizzo di compositi in fibra naturale. In collaborazione con l'Agenzia Spaziale Europea (ESA), Bcomp Ltd ha sviluppato il primo pannello satellitare rinforzato con fibre naturali, con l'obiettivo di rendere le esplorazioni spaziali più pulite. Infatti, spesso, ci si trova davanti a problemi di inquinamento dello spazio, dovuti al rilascio di detriti provenienti da missioni spaziali proprio al di sopra dell'atmosfera. L'utilizzo di eventuali NFRP, porterebbe all'incenerimento completo dei componenti al rientro al termine della missione, rendendo il tutto più sicuro per gli esseri umani e per l'ambiente.

Il pannello satellitare biocomposito che è stato progettato (Figura 34), soddisfa i requisiti tecnici (proprietà, resistenza ecc.), in un'ampia gamma di temperature. Inoltre, l'assorbimento delle vibrazioni è significativamente migliorato rispetto a un pannello standard interamente in alluminio,

grazie al comportamento viscoelastico delle fibre naturali. Una lunga campagna di test ha verificato un'elevata resistenza alle intense radiazioni UV e alla fatica ciclica meccanica e termica. La dilatazione termica notevolmente bassa delle fibre naturali le rende altamente compatibili con le strutture polimeriche rinforzate con fibra di carbonio, garantendo una maggiore resistenza [24].



Figura 34: Esempi di applicazioni NFRP in ambito sportivo e aerospaziale.

CAPITOLO 4:

Preparazione alle prove di caratterizzazione e materiali in analisi

In questo capitolo saranno affrontate brevemente, attraverso dei cenni teorici, le tipologie di prove che verranno svolte, verrà data una descrizione dei materiali utilizzati e di tutto ciò che non rientra nelle competenze di questo elaborato, come ad esempio, la produzione dei provini, a partire dalla fase di estrazione delle fibre, i trattamenti, la tessitura, il processo realizzativo ed il taglio degli stessi.

4.1 Le prove di caratterizzazione

Progettisti ed ingegneri non cercano un materiale nello specifico, ma una combinazione di proprietà; scelgono quindi i materiali per le loro applicazioni tenendo conto di:

- proprietà meccaniche e fisiche, per permettere al componente finale di poter resistere a sollecitazioni meccaniche e all'azione di agenti fisici. Tra le proprietà meccaniche troviamo la rigidità, la resistenza meccanica, l'allungamento a rottura, la durezza e la resilienza, mentre tra le proprietà fisiche ci sono: peso specifico, punto di fusione, dilatazione termica, calore specifico, viscosità, conducibilità termica, caratteristiche ottiche, conducibilità elettrica e caratteristiche acustiche;
- proprietà chimiche, riguardano la composizione chimica del materiale e la sua struttura interna. Tra queste troviamo: la resistenza all'ossidazione e alla corrosione;
- proprietà tecnologiche, rappresentano l'attitudine di un materiale ad essere trasformato mediante lavorazione, in modo da scegliere il tipo di processo più adatto. Comprendono: duttilità, deformabilità, tenacità, truciolabilità, saldabilità, temprabilità, colabilità e verniciabilità;
- costi, relativi alle materie prime ed alle lavorazioni da svolgere, i quali devono essere minimizzati.

In particolare, le prove di caratterizzazione vengono utilizzate per determinare tutte quelle proprietà critiche per un componente sotto sforzo. Le più diffuse sono: prove di trazione, durezza, compressione, usura, flessione, impatto, torsione, fatica, taglio e scorrimento. Vengono tutte e quante eseguite su provini unificati, portandoli fino alle condizioni limite di resistenza, applicando diversi carichi a seconda del tipo di analisi che si vuole svolgere. Per questo motivo vengono definite come

prove distruttive, il provino non è mai un componente reale e non potrà essere utilizzato in applicazioni pratiche.

Le prove di caratterizzazione si dividono in base al rapporto sollecitazione/tempo, secondo questa classificazione dividiamo le prove in:

- prove statiche, quando l'applicazione del carico è costante nel tempo o la velocità di applicazione è molto bassa;
- prove dinamiche, quando il carico è applicato con alte velocità;
- prove cicliche, quando il carico è applicato in maniera alternata (usate anche per studiare il comportamento a fatica).

I fattori che influenzano le prove sui compositi, oltre alla velocità, includono: materiale, metodi di preparazione e disposizione delle lamine, condizioni di stoccaggio dei provini, condizioni dell'ambiente di prova, allineamento e presa dei provini, contenuto di vuoti o imperfezioni e percentuale di rinforzo in volume. Ognuno di questi aspetti deve essere curato ed ottimizzato al fine di eseguire una corretta prova.

Le prove che verranno svolte in questo elaborato sono prove di tipo statico che mirano allo studio del comportamento degli NFRP realizzati con fibre lunghe di canapa, alla risposta a carichi di trazione, compressione e flessione, eseguite nei laboratori dell'università di Bologna, presso la sede a Forlì.

Secondo le normative, le prove devono essere eseguite con una macchina universale per prove sui materiali (Figura 35), un macchinario costituito essenzialmente da un basamento rigido, al quale è fissata una pressa oleodinamica, una traversa mobile per la regolazione dell'altezza e dei morsetti di serraggio per il provino, è dotato di una cella di carico per misurare la forza applicata e di un sensore LVDT per rilevare lo spostamento del pistone.

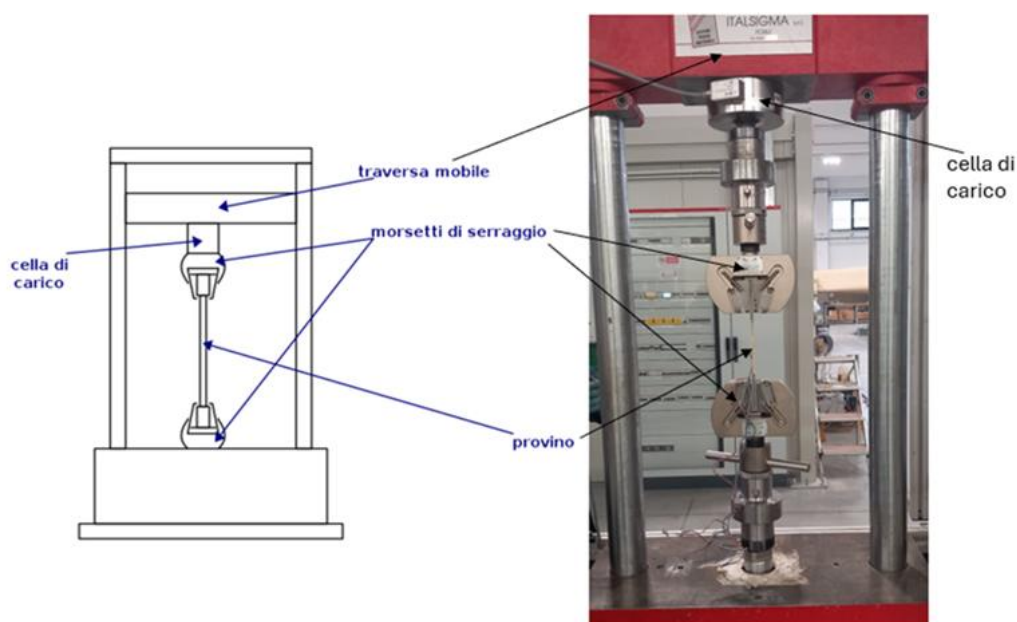


Figura 35: Schema macchina universale per prove di caratterizzazione.

Le prove che verranno svolte seguono le rispettive norme ASTM nella quale sono compresi i laminati compositi unidirezionali e multidirezionali rinforzati con fibre continue, dove i laminati multidirezionali possono essere costituiti da singoli strati di unidirezionale o tessuto. Secondo tali norme, sarebbero possibili anche prove su compositi rinforzati con fibre corte distribuite in modo casuale.

Questi tipi di analisi misurano stati di sollecitazione semplificati, dunque, la risposta del materiale è facilmente rilevabile e rappresenta dei valori di riferimento che possono essere rielaborati nel caso di stati di sollecitazione più complessi.

La prova di trazione segue la norma ASTM D3039 [25], la quale prevede di sottoporre il provino di materiale in esame, ad uno stato di tensione monoassiale controllato e misurarne la deformazione corrispondente.

Il risultato della prova è il diagramma carico–spostamento, che rappresenta l’andamento dell’allungamento del provino in funzione del carico applicato. Sull’asse delle ascisse è riportato lo spostamento, espresso in millimetri (mm), mentre sull’asse delle ordinate è riportato il carico, espresso in Newton (N). Tale diagramma (per tutte le prove), costituisce uno degli strumenti fondamentali per la caratterizzazione meccanica dei materiali, in quanto consente di analizzare il comportamento del materiale lungo l’intero processo di sollecitazione fino alla rottura.

Il diagramma della risposta a trazione può essere schematizzato in tre fasi principali, sebbene nel caso dei materiali compositi la transizione tra esse non sia sempre nettamente definita, come lo è invece nei materiali metallici, in cui la comparsa della strizione provoca un chiaro calo della forza applicata, che conferisce al grafico la tipica forma “ad ombrello”. I grafici che ci si aspetterà dalle prove sperimentali sono grafici con un andamento quasi lineare della forza fino alla rottura, senza cali evidenti, segnale di un comportamento prettamente fragile.

La prima parte del diagramma è il tratto lineare e corrisponde al comportamento elastico del materiale. In questa regione vale la relazione di proporzionalità diretta tra carico applicato e allungamento del provino, in accordo con la legge di Hooke. Durante questa fase, se il carico viene rimosso, il materiale ritorna allo stato iniziale senza deformazioni permanenti. Nei compositi, la risposta elastica è governata principalmente dalle proprietà elastiche delle fibre e dall’adesione fibra–matrice.

Superata la regione elastica, il materiale entra in una fase di comportamento non lineare, dovuta ad una fase di danneggiamento progressivo. A differenza dei materiali duttili, come detto, nei compositi non si osserva uno snervamento netto ed una strizione, la non linearità del diagramma è associata piuttosto all’insorgere di fenomeni di danneggiamento interno, quali delaminazione, microfratture nella matrice, distaccamenti all’interfaccia fibra-matrice e, in alcuni casi, rottura parziale delle fibre. Qui, anche se il carico venisse rilasciato, il materiale presenterebbe deformazioni residue e

risulterebbe permanentemente alterato con una conseguente riduzione delle proprietà meccaniche. In questa fase si raggiunge il carico massimo che il materiale riesce a sopportare, dopodiché, l'ultima parte del diagramma è quella che conduce alla rottura del provino. Nei materiali compositi la rottura avviene generalmente in modo fragile, con limitata capacità di deformazione plastica ed è dovuta alla frattura delle fibre portanti.

I dati "grezzi" che escono direttamente dalla macchina non sono utilizzabili ai fini di una corretta caratterizzazione del materiale, poiché dipendono implicitamente dalle dimensioni del provino e non garantirebbero un confronto diretto tra materiali diversi o tra provini con forme diverse. Per questo motivo è necessario eludere tali vincoli utilizzando le tensioni e le deformazioni, le quali rendono i dati indipendenti dalle dimensioni del provino dividendo forza e allungamento, rispettivamente per sezione iniziale e lunghezza iniziale del provino, dando come risultato il rispettivo grafico tensione-deformazione (σ - ϵ). Per i materiali compositi, che non presentano importanti variazioni di sezione, alle volte i grafici forza-spostamento sono sufficientemente esaustivi per descrivere le proprietà del materiale.

Anche la prova di compressione è una prova fondamentale ai fini della caratterizzazione di un materiale e, seppur basandosi su principi sperimentali analoghi alla prova di trazione, mette in evidenza comportamenti spesso molto differenti.

Secondo la norma ASTM D3410 [26], il provino deve essere sottoposto a un carico monoassiale crescente di compressione, i dati sperimentali acquisiti consentono di ricavare le curve carico-spostamento e rielaborandoli, anche le curve tensione-deformazione.

La similitudine principale con la prova di trazione risiede dunque nell'impostazione della prova, che si svolge nella stessa macchina universale e nelle grandezze fisiche misurate che, per molti materiali (soprattutto quelli isotropi), risultano comparabili in trazione e in compressione, mentre nei materiali fragili come i compositi, la resistenza a compressione risulta spesso molto diversa rispetto a quella a trazione, in quanto per la trazione lavorano soprattutto le fibre, mentre per la compressione influisce molto di più la presenza della matrice.

Anche i grafici che risultano dalle prove di compressione mostrano un andamento lineare crescente all'aumentare del carico (tratto elastico iniziale), questa condizione tende a mantenersi costante fino al raggiungimento del carico massimo, solo dopo inizia la fase di danneggiamento e risulta osservabile un calo del carico, dovuto ad un collasso progressivo del provino. Essendo i materiali compositi dei materiali altamente anisotropi, è spesso necessario adottare configurazioni di prova specifiche per evitare il fenomeno di buckling globale (quando un corpo snello viene sottoposto a compressione, ad un certo punto non riesce a mantenere la configurazione rettilinea ed inizia a cedere lateralmente) e garantire una corretta interpretazione dei dati. Tali differenze rendono la prova di

compressione uno strumento particolarmente delicato ma imprescindibile per la progettazione strutturale con materiali compositi.

Per quanto riguarda la prova di flessione, è ampiamente utilizzata per la caratterizzazione meccanica dei materiali compositi, poiché consente di valutare il comportamento del materiale sotto uno stato di sollecitazione complesso che interessa la trazione e la compressione. La norma che regola tale prova è la ASTM D7264 [27]. Tale normativa di riferimento non richiede esplicitamente la costruzione del diagramma tensione-deformazione, poiché il campo di deformazione nel provino non è uniforme e dipende fortemente dalla geometria e dallo schema di carico. In particolare, la deformazione varia lungo lo spessore: si avrà una deformazione massima per compressione sulla superficie rivolta verso l'alto, una deformazione massima per trazione sulla superficie rivolta verso il basso ed una deformazione neutra sul piano medio. Nei materiali compositi, i meccanismi di danneggiamento a trazione e a compressione sono differenti, inoltre, la deformazione massima si avrebbe solo nella sezione centrale dove viene applicato il carico. Per questi motivi, non è possibile rilevare tramite la prova, una deformazione univoca e rappresentativa del provino. La norma privilegia l'analisi del diagramma forza-spostamento, per ricavare il grafico tensione-deformazione, il calcolo delle deformazioni è effettuato, quando necessario, tramite relazioni teoriche basate sulla teoria della trave, piuttosto che su misure dirette di deformazione.

Con i dati di output dalle varie prove, si possono ricavare i seguenti valori caratteristici, fondamentali per la caratterizzazione di un materiale:

- Modulo elastico (E): pendenza del tratto rettilineo del diagramma tensione-deformazione, si ottiene come rapporto tra la tensione e la deformazione considerate in un certo intervallo del tratto proporzionale. Viene chiamato anche modulo di Young, dipende molto dall'orientamento delle fibre (0° , 90° , $\pm 45^\circ$) ed esprime la rigidità (resistenza alla deformazione elastica) del materiale, un materiale più rigido presenta una pendenza maggiore del tratto lineare.
- Resistenza ultima o carico unitario a rottura (R_m , σ_u o σ_{max}): è la tensione massima che il materiale può sopportare, se si supera tale valore, il materiale si rompe e questo può essere associato alla rottura delle fibre, al cedimento della matrice o a delaminazione. Esprime la resistenza meccanica del materiale;
- Deformazione a rottura (ϵ_u o ϵ_{max}): è il valore di deformazione che un materiale raggiunge nel momento in cui si rompe durante la prova ed è un valore che esprime la duttilità del materiale, più questo valore è alto, più il materiale risulta essere duttile;
- Coefficiente di Poisson (ν): rapporto tra deformazione trasversale e deformazione longitudinale, esprime come un materiale si deforma lateralmente quando viene sottoposto a

una sollecitazione longitudinale (non è determinabile tramite una prova di flessione). Un valore alto indica che un materiale, quando allungato o compresso, subisce una significativa deformazione trasversale.

4.2 Materiali in analisi

Il focus principale di questo elaborato è lo studio delle proprietà meccaniche di campioni ottenuti da prove sperimentali svolte su provini ricavati da laminati in fibra di canapa della Maeko e matrice epossidica PRIME™ 20LV della Gurit con il processo di infusione (Vacuum Infusion Process). È stata scelta questa pianta perché nel panorama industriale, risulta aver attirato maggiormente l'attenzione insieme al lino, ma anche perché l'Italia è un Paese dal clima favorevole per la crescita di questo vegetale. Infatti, insieme alla Francia e ai Paesi Bassi, è tra i leader nella produzione di fibre di canapa in Europa, in modo particolare proprio in Emilia-Romagna.

4.2.1 La canapa

La canapa, insieme al lino e alla iuta, è tra le fibre naturali più utilizzate per rinforzare i compositi polimerici. Tra queste, il crescente interesse per la canapa ha portato negli anni a superare in popolarità le altre fibre.



Figura 36: Piantazione di canapa.

La canapa viene ampiamente coltivata in Europa (Figura 36), è la Cina, però, a detenerne il primato, rimanendo il principale fornitore con circa il 50% della produzione della canapa nel mondo. È infatti una pianta originaria dell'Asia Centrale che cresce spontanea in una vasta zona che va dal Danubio

alla Cina. In passato anche in Europa aveva trovato ampia diffusione, per esempio, in Italia il maggior livello di produzione della canapa si ebbe dai primi anni del Novecento fino alla metà del secolo, quando venne sostituita poi dalle fibre sintetiche.

È una pianta annuale, il cui ciclo vegetativo può ripetersi ogni 2-3 anni senza che il terreno venga danneggiato. Raggiunge in un breve periodo altezze che vanno dai 2 ai 6 m e diametri di 5-16 mm, e non necessita di particolari fertilizzanti o irrigazione intensiva, il che la rende una risorsa altamente sostenibile. Questo perché ha una crescita rapida ed abbondante che non permette la nascita di erbe infestanti. Inoltre, la mancanza di proteine al suo interno la porta a non essere attaccata da roditori o insetti e quindi non necessita di additivi di protezione.

Le condizioni ideali per la crescita comprendono un intervallo di temperatura tra 13 e 22°C, terreni generalmente non acidi (pH intorno a 6) e una buona ritenzione di umidità.

La fibra di canapa è composta principalmente da cellulosa, emicellulosa, lignina e pectina, come tutte le altre fibre vegetali. Le caratteristiche fisiche della fibra dipendono dal contenuto di cellulosa.

Al fine di ottenere una struttura che garantisca le proprietà migliori, la canapa deve essere raccolta subito dopo la fioritura.

Essendo la fibra di canapa una fibra proveniente dal fusto della pianta, la struttura interna e molecolare di quest'ultimo è molto simile a quella delle altre piante appartenenti alla stessa categoria, di conseguenza, anche i processi utilizzati per l'estrazione possono seguire le linee guida di quelli descritti nel capitolo 3. Il fusto è costituito da uno strato più interno cavo, circondato da materiale legnoso denominato canapo e uno strato esterno che è l'epidermide. Lo strato intermedio invece è quello che contiene le fibre primarie, tenute saldamente legate dalla lignina, in fasci paralleli tra loro. Il processo di macerazione è essenziale per allentare queste fibre legate, consentendone il distacco dal fusto. Gli steli di canapa grezzi contengono circa il 50-55% di nucleo di canapa, il 30-35% di fibre primarie e il 10-15% di materiale di scarto. Della canapa si utilizza quasi tutto: dai semi è possibile ottenere l'olio adatto ad un uso alimentare, cosmetico, farmaceutico, olio per usi industriali, ma anche vernici naturali per l'edilizia, mentre la parte più legnosa, il canapo è usata per fabbricare carta di alta qualità. Oltretutto, per la sua alta resa in massa vegetale (quattro volte la biomassa di un bosco in un anno), è ideale per la produzione di combustibili da biomassa [28].

Le fibre utilizzate in questo studio sono state prodotte e lavorate dalla Maeko, partendo da coltivazioni selezionate (varietà Futura75) in piantagioni biologiche nella zona di San Mauro Pascoli, in provincia di Forlì-Cesena.

Sono state successivamente trattate con un trattamento di sbiancamento. Tale trattamento ha lo scopo principale di rimuovere o ridurre significativamente le sostanze colorate naturali presenti nella canapa, quali lignina, emicellulose, pectine e cere, responsabili della colorazione brunastra tipica

della fibra grezza. Lo sbiancamento viene generalmente effettuato mediante processi chimici controllati, tra cui l'impiego di agenti ossidanti come il perossido di idrogeno, preferito per il suo minore impatto ambientale rispetto ai tradizionali composti a base di cloro. Un trattamento di sbiancamento correttamente ottimizzato consente di ottenere fibre più uniformi, maggiormente idonee alle successive fasi di tintura, preservando al contempo la resistenza e la struttura della cellulosa, elemento chiave per l'impiego della canapa in applicazioni tecniche. Di fatto però è un trattamento puramente estetico, che non va ad incidere sul miglioramento delle proprietà delle fibre.

4.2.2 Resina epossidica

Le resine epossidiche sono matrici termoindurenti ampiamente impiegate nei materiali compositi grazie alla loro elevata densità di reticolazione, alle eccellenti proprietà meccaniche e alla notevole stabilità chimico-termica.

Chimicamente, esse sono caratterizzate dalla presenza di gruppi epossidici, che reagiscono con agenti indurenti attraverso meccanismi di apertura dell'anello epossidico, dando origine a una rete polimerica tridimensionale altamente reticolata. Il grado di reticolazione, fortemente influenzato dal tipo di indurente, dal rapporto resina-indurente e dal ciclo di curing, determina in modo critico le proprietà finali del materiale, quali modulo elastico e temperatura di transizione vetrosa (T_g).

Le resine epossidiche presentano generalmente elevata adesione interfacciale ai rinforzi fibrosi, bassa contrazione volumetrica in fase di polimerizzazione e buona resistenza alla fatica e agli agenti chimici, rendendole particolarmente idonee per applicazioni strutturali ad alte prestazioni. Tuttavia, la loro natura vetrosa e l'elevata rigidità comportano una spiccata fragilità, che può essere migliorata mediante modifica della matrice con elastomeri, termoplastici o nanorinforzi.

Nei compositi rinforzati con fibre naturali, la resina epossidica favorisce interazioni intermolecolari con i gruppi ossidrilici della cellulosa, ma la natura idrofila delle fibre può compromettere l'adesione interfacciale e la durabilità del composito, per tale motivo, l'impiego di trattamenti di modifica superficiale delle fibre risulta essenziale per ottimizzare il trasferimento di carico e le prestazioni meccaniche a lungo termine.

La resina epossidica utilizzata in questo studio è la PRIME™ 20LV della Gurit. È specificamente progettata per l'utilizzo in una varietà di processi di infusione di resina, tra cui RTM. È una resina con viscosità notevolmente ridotta e un tempo di lavorazione abbastanza lungo, il che la rende ideale per l'infusione di componenti molto grandi con rinforzi complessi da produrre in un'unica operazione. Mantiene una caratteristica esotermica eccezionalmente bassa, che consente la produzione di sezioni spesse senza il rischio di solidificazione prematura, aspetto che contribuisce a prolungare la durata di vita degli stampi. Questa resina è stata utilizzata con successo per lo stampaggio in un'unica operazione di componenti come alberi per yacht, scafi di yacht e pale eoliche.

Per generare proprietà meccaniche ottimali è necessaria una polimerizzazione a temperatura elevata. Il programma di polimerizzazione minimo è di 7 ore a 65 °C o 16 ore a 50 °C (Figura 37). La polimerizzazione a temperatura ambiente (15-25 °C) di questo sistema non genererà proprietà adeguate e pertanto non è consigliata. I pezzi prodotti con l'utilizzo di questa matrice possono essere pre-polimerizzati nello stampo a temperature appena superiori a quella ambiente (ad esempio 35-45 °C) per conferire al pezzo resistenza e rigidità sufficienti a consentire una sformatura anticipata. Tali pezzi devono comunque essere post-polimerizzati al tempo/temperatura minimi raccomandati.

Table 4. Cured System Mechanical Properties				
Hardener used	Fast	Slow	Extra Slow	High Tg
Cure Schedule	16hrs 50°C	16hrs 50°C	16hrs 50°C	16hrs 50°C
Tensile Strength (MPa)	75	73	69	69.7
Tensile Modulus (GPa)	3.2	3.5	3.5	3.2
Strain to failure (%)	4.1	3.5	3.1	3
Moisture Absorption (%)	tba	tba	tba	tba
Cured density (g/cm³)	1.153	1.144	1.132	1.13
Linear Shrinkage (%)	1.830	1.765	1.541	1.747
Barcol Hardness	21	27	25	34.1

Figura 37: Proprietà meccaniche della resina epossidica utilizzata, dopo il processo di polimerizzazione (curing).

Gli indurenti possono offrire una gamma di tempi di lavorazione e velocità di polimerizzazione differenti tra loro a seconda della tipologia, questo consente di adattare meglio il tempo di polimerizzazione della resina, al tempo di infusione richiesto per qualsiasi dimensione del pezzo stampato. Per essere resa utilizzabile, è quindi necessario miscelare la resina con l'indurente rispettando i seguenti rapporti (Figura 38):

PRIME™ 20LV resin: PRIME™ hardener (Fast, Slow or Extra Slow)
100 : 26 (by weight)
100 : 31.4 (by volume)
PRIME™ 20LV resin: PRIME™ High Tg Hardener
100 : 24 (by weight)
100 : 29.1 (by volume)

Figura 38: Rapporti in peso e in volume tra resina ed indurente.

Una miscelazione accurata è essenziale e una qualsiasi deviazione dai rapporti di miscelazione prescritti degraderà le proprietà fisiche del sistema polimerizzato. La resina e l'indurente devono essere mescolati bene per due minuti o più. Non appena il materiale viene miscelato, la reazione inizia. Questa reazione produce calore (reazione esotermica), che a sua volta accelera la fase di polimerizzazione. È quindi necessario garantire la dispersione del calore già dalla fase di miscelazione, perché, in caso contrario, la reazione di polimerizzazione diventerebbe incontrollabile e potrebbe compromettere il processo produttivo, portando all'incompleta impregnazione delle fibre. Un altro parametro da tenere in considerazione, il quale influisce anche la scelta degli indurenti, è la temperatura di transizione vetrosa, perché ha effetti diretti su proprietà meccaniche, stabilità dimensionale e durabilità del composito. La Tg definisce spesso la temperatura limite di utilizzo del composito: al di sotto di essa, la resina è rigida, si ha alta resistenza meccanica, alto modulo; al di sopra di essa, invece, si rammolisce, il trasferimento del carico alle fibre diventa meno efficace e resistenza meccanica e modulo scendono. A seconda dell'impiego del componente, quindi, è necessario prevedere il mix tra la scelta degli indurenti e il ciclo di curing che permetta il raggiungimento della Tg più congrua (Figura 39).

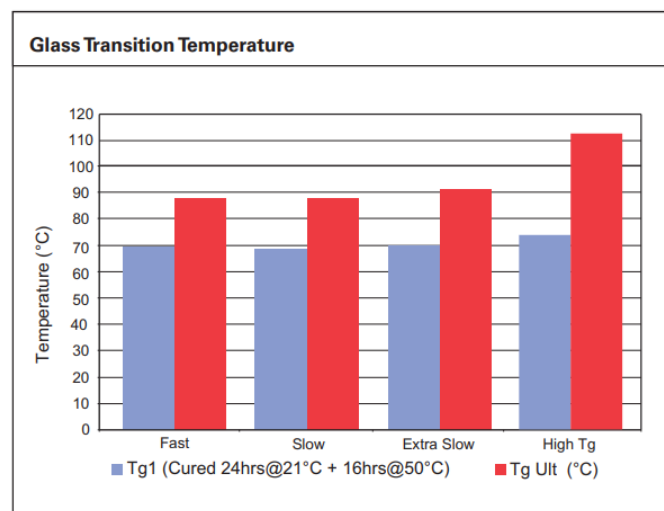


Figura 39: Vari valori di Tg a seconda del tipo di indurente e del processo di curing.

4.3 Processo di produzione dei provini

La realizzazione dei provini a partire dal processo di produzione fino al taglio è stata seguita e curata dall'IPCB (Istituto per i Polimeri Compositi e Biomateriali) del CNR di Portici (NA).

Per la produzione è stato utilizzato il processo di Vacuum Infusion (VIP), già trattato nei capitoli precedenti. In particolare, è stato utilizzato questo processo perché insieme al RTM ed a tutti gli altri

processi ad infusione liquida, negli ultimi anni stanno accrescendo il loro interesse, in particolare proprio il VIP è molto utilizzato in quanto tecnica più economica rispetto anche al RTM tradizionale, poiché si utilizza solo uno stampo, risparmiando così sulla costruzione del controstampo.

Il primo passaggio è il posizionamento dei tessuti realizzati con le fibre di canapa a secco nello stampo, dopo aver cosperso quest'ultimo con uno spray antiaderente. Sono stati sovrapposti 10 plies di fibre (Figura 40) in modo da ottenere lo spessore dichiarato nelle norme che regolamentano le prove di caratterizzazione. Le plies sono gli strati di tessuto, che in questo caso sono stati realizzati con una trama di tipo Plain Weave.

Le fibre non sono facilmente permeabili alla resina, perciò, è stato applicato uno strato particolare, detto "resin distribution fabric" (Figura 41), costituito da una pellicola distaccante e da una rete. Questo tessuto è molto poroso ed è progettato per ridurre i tempi di infusione della resina in tutto lo stampo e facilitare la rimozione del sacco dalla superficie del componente dopo la polimerizzazione. Predisposto il tutto, quindi, si copre con il sacco da vuoto e si sigilla con apposito sigillante. Infine, si applica il vuoto (Figura 42) che estrae l'aria e contemporaneamente fornisce la "driving force" per il pompaggio della resina. Il rapporto scelto tra resina e catalizzatore è stato 100:26. Una volta iniettata la miscela, lo stampo è stato messo in forno a 60°C per 16 ore, per il completamento della polimerizzazione.

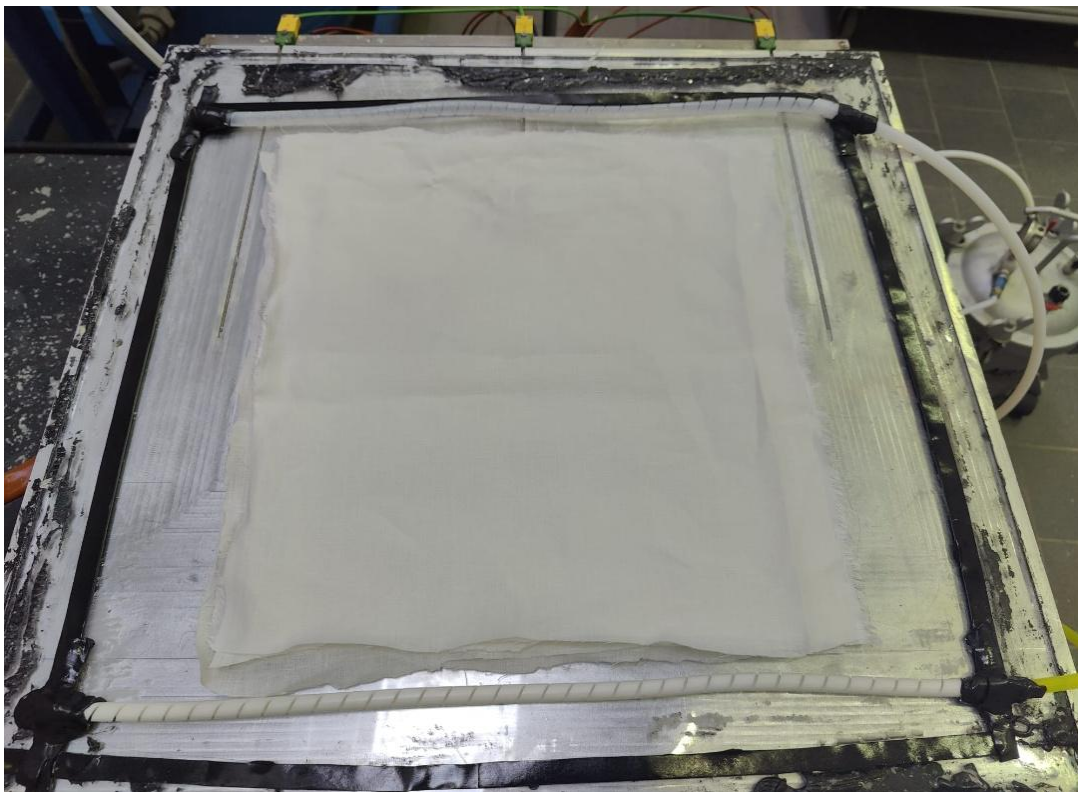


Figura 40: Disposizione dei tessuti.

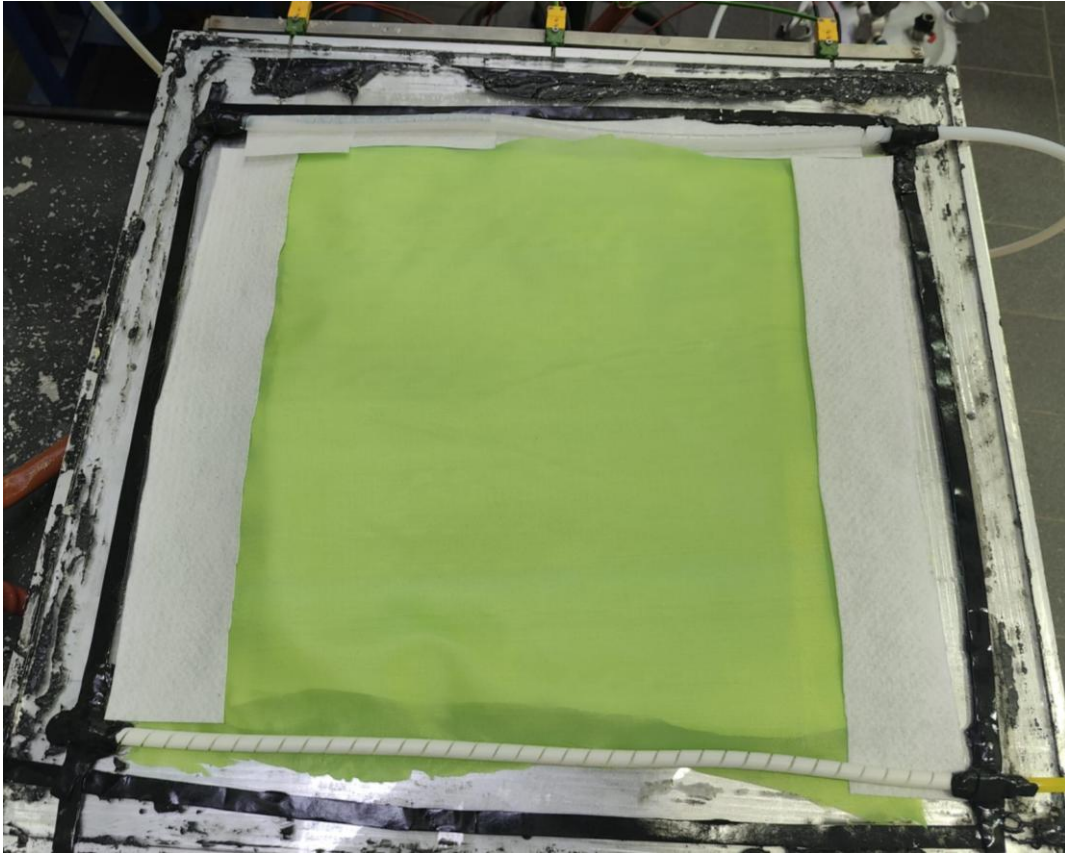


Figura 41: Posizionamento del resin distribution fabric.

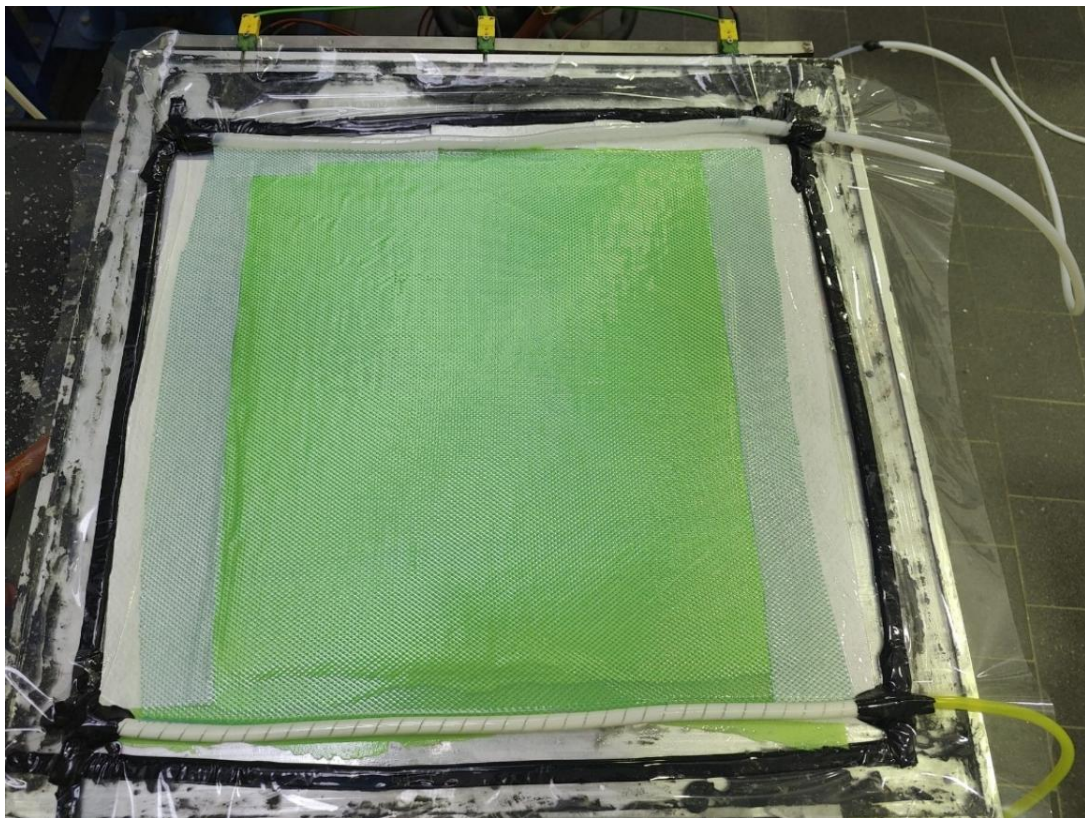


Figura 42: Posizionamento del sacco e aspirazione dell'aria.



Figura 43: Laminato dopo la fase di polimerizzazione.

La lastra che si vede in figura (Figura 43) è ciò che risulta dopo la polimerizzazione della resina, da qui, sono stati ritagliati su misura cinque provini, a forma prismatica e sezione rettangolare per le prove di flessione e dieci provini per le prove di trazione e compressione, secondo le misure che si trovano nelle varie norme: 250x25x3 mm per la trazione, 150x25x3 mm per la compressione e 100x12x3 mm per la flessione (Figura 44). Vengono tagliati attraverso l'impiego di una sega circolare, che viene cambiata spesso per evitare che le alte temperature sviluppatesi durante la lavorazione, possano portare ad una deposizione di materiale sul bordo della lama.



Figura 44: Provini per prove di trazione, compressione e flessione.

CAPITOLO 5:

Sperimentazione

Nel seguente capitolo verrà trattata tutta la parte di sperimentazione eseguita nei laboratori dell'università, prestando attenzione alla raccolta e all'elaborazione dei dati ottenuti nelle prove.

Dopo essersi ricavati i provini, prima dello svolgimento dei vari test, occorre sottoporre questi ultimi alle fasi di catalogazione, misurazione, incollaggio tab ed estensimetri.

Per garantire la corretta esecuzione delle prove, tutto quanto è stato svolto facendo riferimento alle norme che regolamentano ciascuna prova.

5.1 Preparazione dei provini alle prove

La catalogazione è una fase fondamentale per garantire la tracciabilità delle prove e la loro ripetibilità e consiste nel collegare ogni risultato alle condizioni di prova. In primis, si assegna un codice univoco ad ogni provino: per questa sperimentazione è stato scelto di nominarli attraverso una lettera, T, C o F, a seconda della rispettiva prova, quindi T per la trazione, C per la compressione ed F per la flessione, seguita poi da una numerazione progressiva per distinguere ogni singolo provino.

Dopodiché si registra una scheda tecnica nella quale vengono descritte voci come materiale della matrice, tipo di fibra, trattamento superficiale, metodo di fabbricazione, orientamento delle fibre, frazione volumica, data e lotto di produzione. Di solito si annotano anche eventuali difetti visibili come bordi irregolari, presenza di bolle o delaminazioni. In questo caso, per esempio, è stato segnalato che la direzione del taglio dei provini, non era perfettamente parallela rispetto alla direzione di disposizione delle fibre.

Senza una corretta catalogazione, i risultati sperimentali ricavati non sarebbero ritenuti validi perché non rintracciabili e quindi non ripetibili.

La misurazione, invece, serve per definire le effettive misure dei provini. Sono stati fatti rilievi con strumenti come calibro e micrometro sulle dimensioni utili ai fini della prova da svolgere. Le dimensioni da misurare vengono definite nella norma che regola la prova specifica, in particolare, per le prove di trazione, compressione e flessione, occorre determinare lunghezza complessiva, larghezza e spessore. Tali misurazioni solitamente vengono fatte su 3-5 punti differenti e poi si considera il valore medio (per la lunghezza è stato utilizzato un righello ed è quindi bastata una sola misurazione).

Di seguito i valori riscontrati attraverso le misurazioni svolte in laboratorio (Tabella 11):

Tabella 11: valori medi ricavati nella fase di misurazione dei provini.

Provino	Lungh. media [mm]	Largh. Media [mm]	Spess. medio [mm]
Trazione			
T1	250	25,23	3,215
T2	250	24,47	3,228
T3	250	24,92	3,199
T4	250	24,82	3,217
T5	250	24,37	3,183
T6	250	24,98	3,159
T7	250	24,39	3,182
T8	250	25,57	3,142
T9	250	25,11	3,135
T10	250	24,95	3,208
Compressione			
C1	145	25,36	3,248
C2	140	24,68	3,224
C3	140	24,99	3,206
C4	145	24,76	3,169
C5	150	24,75	3,196
C6	139	24,90	3,196
C7	140	24,82	3,154
C8	140	25,52	3,145
C9	140	24,92	3,183
C10	150	24,87	3,172
Flessione			
F1	101	12,70	3,224
F2	101	12,79	3,198
F3	102	12,69	3,182
F4	101	12,63	3,167
F5	102	12,71	3,172

Prima di sottoporre i provini ai vari test, sono stati incollati i tab (Figura 45). Essi sono delle piastrine di rinforzo solitamente in alluminio che, incollate alle estremità dei provini, li proteggono dalla schiacciatura delle ganasce della macchina di prova e minimizzano lo slittamento. Sono dimensionate in base alle misure del provino e progettate con uno smusso per limitare la concentrazione di tensioni. L'incollaggio dei tab per questa sperimentazione è stato effettuato solo sui provini destinati alle prove di trazione e compressione, non per quelli destinati alla prova di flessione, in quanto su quest'ultima, per la dinamica della prova, non vi è un vero e proprio afferraggio, dunque, la normativa non prevede l'utilizzo di alcun tab. Per le prove di compressione sono stati utilizzati dei tab in alluminio per tutti e dieci i provini, mentre per le prove di trazione, a seguito dei risultati e di alcune osservazioni fatte nel corso della prova, è stato scelto di tabbare cinque provini con tab in alluminio e cinque provini con dei tab diversi in carta vetrata, in modo da studiare anche l'influenza sulla prova dei tab in materiali con diverse rigidzze.

Per la fase di incollaggio occorre scartavetrare le estremità dei provini su entrambi i lati, facendo attenzione a non danneggiare le fibre, per una lunghezza utile definita dalla dimensione del tab (se i tab sono in alluminio, si fa lo stesso anche per la superficie del tab che andrà a contatto con il provino). In questo modo si predispongono le superfici all'incollaggio, aumentando la superficie di contatto. In seguito ad un'accurata pulizia con alcol, sia dei tab che dei provini, così da eliminare impurità e sporco, viene cosparso un sottile strato di adesivo epossidico bicomponente su tutte le estremità levigate del provino. Vengono posizionati i tab a contatto con il materiale e fatti aderire stringendo con dei morsetti. Infine, per fare curare la resina nel caso dei tab in alluminio e ottenere le proprietà desiderate, viene posto il tutto all'interno di un forno a 40°C per circa 4 ore, mentre la colla utilizzata per i tab in carta vetrata era ad effetto istantaneo.



Figura 45: Fase di incollaggio tab.

Per ottenere i massimi livelli di precisione nelle misurazioni, è consigliabile incorporare un estensimetro (Figura 46) ed un estensometro nel sistema di prova, ovvero degli strumenti in grado di determinare in modo preciso le deformazioni del provino sottoposto ad un carico.

L'estensimetro a doppia griglia trasforma la deformazione meccanica in un segnale elettrico provocando una variazione della resistenza elettrica del sensore ed è utilizzato per il rilevamento della deformazione sia trasversale che longitudinale, mentre l'estensometro è uno strumento che misura l'allungamento tra due punti noti in maniera meccanica ed è stato applicato in modo da confrontare i risultati sulle deformazioni longitudinali ottenuti con l'estensimetro. Le misure fornite da questi sensori sono state utilizzate per il calcolo della deformazione a rottura, del modulo di Young e del coefficiente di Poisson.

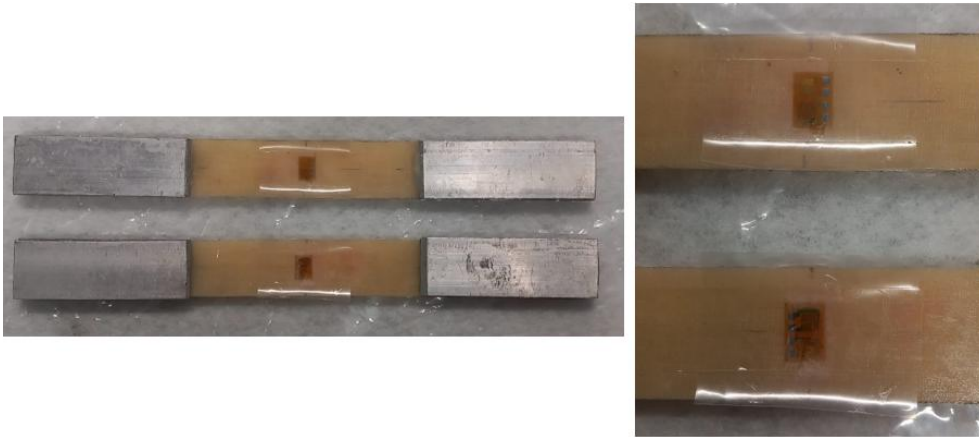


Figura 46: Provini con estensimetri incollati.

Per quanto riguarda l'applicazione dell'estensimetro (solitamente per materiali compositi si usano estensimetri con resistenza massima di 350Ω), è necessario che si proceda con grande attenzione e precisione, in modo da non danneggiare la griglia: si passa la cartavetrata nella zona di interesse, si pulisce accuratamente e si incolla l'estensimetro con una goccia di colla acrilica, cercando di mantenerlo centrato e parallelo il più possibile con i bordi del provino.

In questa sperimentazione è stato scelto di applicare gli estensimetri sui provini T1, T5 per la prova di trazione, e sui provini C4, C10 per la prova di compressione.

Al momento della prova, si vanno a stagnare i collegamenti elettrici sull'estensimetro: questo permette di collegarlo ad un ponte di Wheatstone. Esso costituisce così un ramo del ponte e permette di trasformare la variazione di resistenza in una variazione di tensione misurabile. Il ponte di Wheatstone, infatti, non è altro che una serie di quattro resistenze disposte a rombo, caratterizzate da una certa tensione in entrata ed una tensione in uscita. Quando il ponte è bilanciato ($R_2/R_1=R_4/R_3$), la tensione di uscita è 0, se una resistenza cambia, per esempio quando l'estensimetro misura la

deformazione, il ponte si sbilancia e compare una tensione in uscita proporzionale proprio alla variazione di resistenza, che sarà visibile attraverso il sistema di acquisizione.

5.2 Prova di trazione

Per lo svolgimento della prova, dopo aver fissato il provino sulla macchina tramite gli appositi sistemi di aggancio (Figura 47), se il provino in analisi è strumentato, il segnale analogico in uscita dal ponte di Wheatstone collegato con l'estensimetro è molto piccolo, diventa quindi necessario collegarlo ad un amplificatore di segnale in modo da renderlo leggibile e ridurre il rumore. Questo segnale in uscita verrà poi inviato ad un sistema di acquisizione dati sul computer.

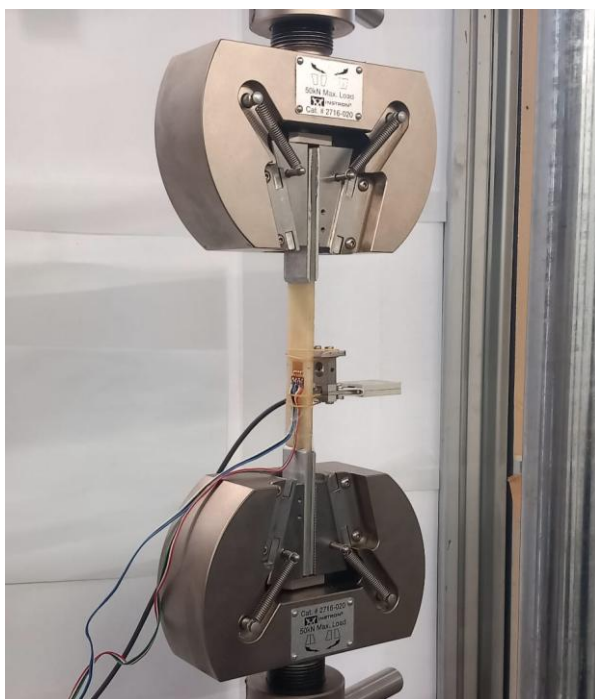


Figura 47: Preparazione prova di trazione con estensimetri collegati ed estensometro.

Una volta collegato l'estensimetro ed applicato anche l'estensometro, viene settata la macchina impostando i parametri di prova: è stata effettuata in controllo di spostamento con una velocità di 0,033 mm/s e una frequenza di campionamento pari a 1 Hz.

A questo punto la predisposizione della macchina è pronta e si può procedere con il test: la macchina mantiene una velocità di spostamento costante e registra la forza che deve applicare per mantenerla tale, viene misurata tramite le celle di carico, istante per istante, e contemporaneamente il sensore LVDT ne misura lo spostamento.

Una volta portato a rottura il provino, si libera la macchina e tutti i dati di carico-spostamento vengono raccolti nel software di comando. Questo generalmente rimarrà il “modus operandi” anche per le altre prove.

5.2.1 Raccolta ed elaborazione dati

Un’osservazione che si può fare, prima di procedere con l’elaborazione dei dati, riguarda la rottura: per tutti e cinque i provini con tab in alluminio, è avvenuta nello stesso punto, in prossimità dei tab (Figura 48). Secondo la norma, questa tipologia di rottura viene definita tramite una descrizione standard, con la sigla LAT (Lateral-At grip/tab-Top).



Figura 48: Provini per prova trazione con tab in alluminio, dopo la rottura.

L’influenza dei tab porta alla concentrazione di tensioni dovute alla variazione di sezione che essi apportano sul provino, oltre ad altri fattori influenzanti quali l’allineamento dei tab, l’allineamento e la pressione della presa, il tipo di incollaggio ed il materiale di cui sono fatti, quindi la differenza di rigidità. Proprio per questo motivo è stato scelto di testare i restanti cinque provini, con tab differenti, più sottili e con rigidità diversa, in modo da poter studiare una possibile relazione tra questi fattori.

Un’altra spiegazione possibile potrebbe arrivare dal tipo di processo di produzione, utilizzando l’infusione di resina e iniettando quest’ultima solo da un lato, si ottengono infatti diversi gradi di reticolazione lungo tutto il laminato, perciò, seguendo l’immagine 48, si può intuire come la resina possa essere stata iniettata da destra verso sinistra, lasciando la parte di provino sulla quale è avvenuta la rottura, scoperta per più tempo e di conseguenza con un grado di reticolazione più basso o zone con scarso contenuto di resina. Nonostante ciò, le prove per norma possono essere considerate valide siccome non presentano rotture all’interno dei morsetti.

I provini sui quali sono stati incollati tab ricavati da fogli di carta vetrata, hanno invece presentato rotture più variabili (Figura 49), a confermare come l'influenza di tab realizzati in materiali con rigidzze molto diverse dai materiali sotto esame, può accentuare la concentrazione di tensioni. Si sono verificate però rotture avvenute mediamente nella stessa porzione di provino, a dimostrazione del fatto che l'ipotesi sulla direzione di infusione può essere vera ed avere un certo grado di influenza sulla resistenza del provino.

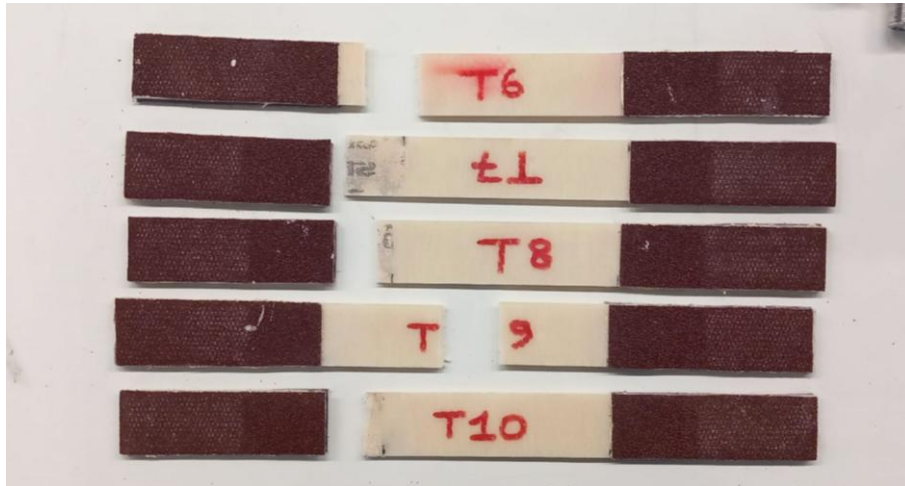


Figura 49: Provini per prova di trazione con tab in carta vetrata, dopo la rottura.

Tutti i dati ricavati dalla macchina istante per istante (i valori della forza esercitata dalla pressa oleodinamica ed i valori di spostamento) sono stati poi riportati su un file Excel e rielaborati.

I dati acquisiti direttamente dalla macchina di prova includono una fase iniziale in cui il provino e il sistema di misura sono soggetti a fenomeni di assestamento, quali il gioco delle ganasce e allineamento del provino. In tale fase, pur essendo registrati valori non nulli di carico e di spostamento, il materiale non risulta ancora effettivamente sollecitato dal punto di vista meccanico. Per questo motivo, al fine di ottenere una rappresentazione fisicamente significativa del comportamento del materiale, i valori di carico e di spostamento sono stati “azzerati” a partire dall'istante in cui si osserva l'inizio effettivo della risposta elastica del provino. L'azzeramento (sia sui valori di forza che di spostamento) viene effettuato sottraendo, a tutti i dati successivi, il valore di carico e di spostamento corrispondente al primo punto in cui il segnale risulta stabile e crescente in modo monotono.

A partire da questi dati è stato ricavato il diagramma carico–spostamento (Figura 50), riportando punto per punto il carico in funzione dello spostamento.

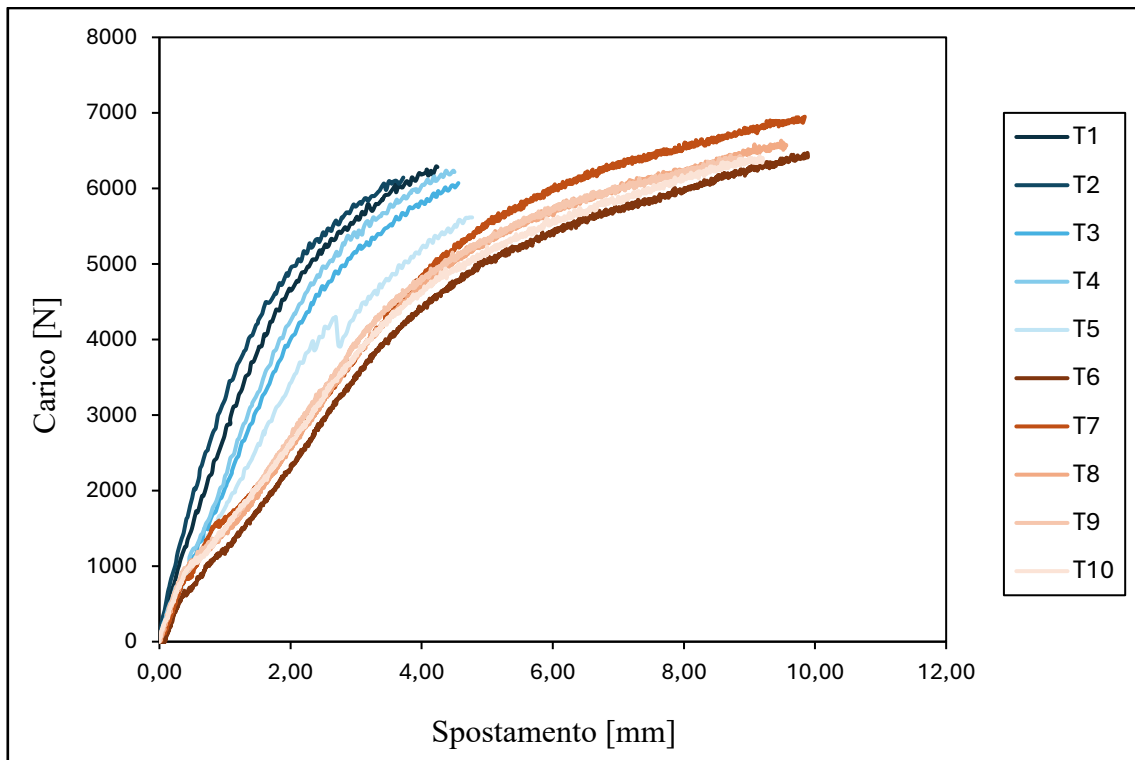


Figura 50: Curve carico-spostamento prova di trazione, relative ad ogni singolo provino.

Il risultato segue quanto previsto: è un andamento monotono crescente del carico all'aumentare dello spostamento, senza evidenza di fenomeni di snervamento o di riduzione della forza prima della rottura. Si nota solamente un leggero "addolcimento" della curva all'aumentare del carico, dovuto ai fenomeni di danneggiamento diffusi lungo l'intero provino, i quali ne diminuiscono la rigidità. Questi fenomeni sono derivanti, in particolare, da scorrimenti tra fibra e matrice, in quanto l'interfaccia risulta di base meno ottimizzata rispetto a quella delle fibre sintetiche. Si evidenzia così un comportamento pseudo-duttile dovuto alla natura cellulare delle fibre vegetali, a discapito però della resistenza complessiva. Un CFRP o un GFRP mostrerebbe invece un andamento lineare fino a rottura (comportamento elastico fino a rottura) ed una concentrazione più localizzata ed improvvisa degli effetti del danno, a definire un comportamento prettamente fragile, ma che porta a resistenze maggiori rispetto agli NFRP.

Le curve si mantengono tuttavia regolari, senza bruschi collassi, suggerendo uno sviluppo graduale del danno, l'unica eccezione è la curva relativa al provino T5, che presenta una lieve discontinuità, interpretabile come scivolamento del sistema di aggancio sul provino, ma che tuttavia non compromette la validità della prova.

Si distinguono due serie di curve: non è un caso, perché una serie è rappresentativa dei risultati ottenuti da provini con tab in alluminio (T1-T5) e l'altra dai provini con tab in carta vetrata (T6-T10). Le differenze sono nette e determinate dal fatto che nella misura di spostamento, vengono inclusi lo

scorrimento o la deformazione dei tab all'interno dei morsetti ed il recupero dei giochi meccanici della macchina. Dai grafici si denota un maggior spostamento a parità di carico, nei provini con tab in carta vetrata, possibilmente perché la carta vetrata non garantisce lo stesso afferraggio che garantisce un tab in alluminio, per cui aumentano gli slittamenti, in particolare dopo una certa soglia di carico (circa 1000 N), rendendo il materiale apparentemente meno rigido facendo abbassare la pendenza del grafico.

Un'altra osservazione che salta all'occhio è il carico massimo: era stata giustificata la scelta di cambiare tab rispetto a quelle in alluminio, proprio perché le rotture sono avvenute in modo "anomalo", tutte nello stesso punto in prossimità del cambio di sezione tra tab e provino. Come detto, i tab influiscono generando picchi di tensione in prossimità di essi, i quali evidentemente possono causare rotture premature e portare ad una sottostima della vera resistenza del materiale. È ciò che viene confermato dai risultati ottenuti. La serie di dati ricavati dai provini con tab in alluminio, presenta, di fatto per tutti i campioni, carichi massimi decisamente inferiori rispetto ai carichi raggiunti sui provini con tab ricavati da carta vetrata, i quali, essendo più flessibili, permettono una miglior distribuzione delle tensioni, consentendo di rilevare un valore di carico massimo più veritiero. Come già anticipato, ai fini della determinazione delle proprietà del materiale, il diagramma carico-spostamento rappresenta una descrizione globale del comportamento del sistema di prova, tuttavia, non valida per una caratterizzazione meccanica, in quanto contiene implicitamente una relazione con le dimensioni nominali del provino. Per cui è necessario ricorrere al diagramma tensione-deformazione, ottenuto normalizzando il carico rispetto alla sezione resistente (Eq.1):

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_0} \quad (\text{Eq.1})$$

dove:

- σ_i è la tensione a trazione i-esima [MPa];
- F_i è la forza i-esima misurata istante per istante tramite la cella di carico [N];
- A_0 è la sezione iniziale del provino (calcolata come larghezza per spessore) [mm²].

ed utilizzando la deformazione, misurata direttamente sul provino tramite estensimetri o ricavata nel seguente modo (Eq.2):

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{L_0} \quad (\text{Eq.2})$$

dove:

- ε_i è la deformazione a trazione i-esima [mm/mm];
- δ_i è lo spostamento i-esimo misurato istante per istante tramite il sensore LVDT [mm];
- L_0 è la lunghezza iniziale del tratto utile del provino [mm].

Si prendono dunque tutti i valori di carico e spostamento, ottenuti istante per istante, tramite i sensori della macchina e si dividono, uno per uno, per le dimensioni misurate di ciascun provino. In questo modo, ricavandosi la tensione e la deformazione corrispondenti punto per punto, è possibile tradurre il grafico carico-spostamento, nel grafico tensione-deformazione (Figura 51), utilizzato per confrontare in maniera assoluta i vari materiali.

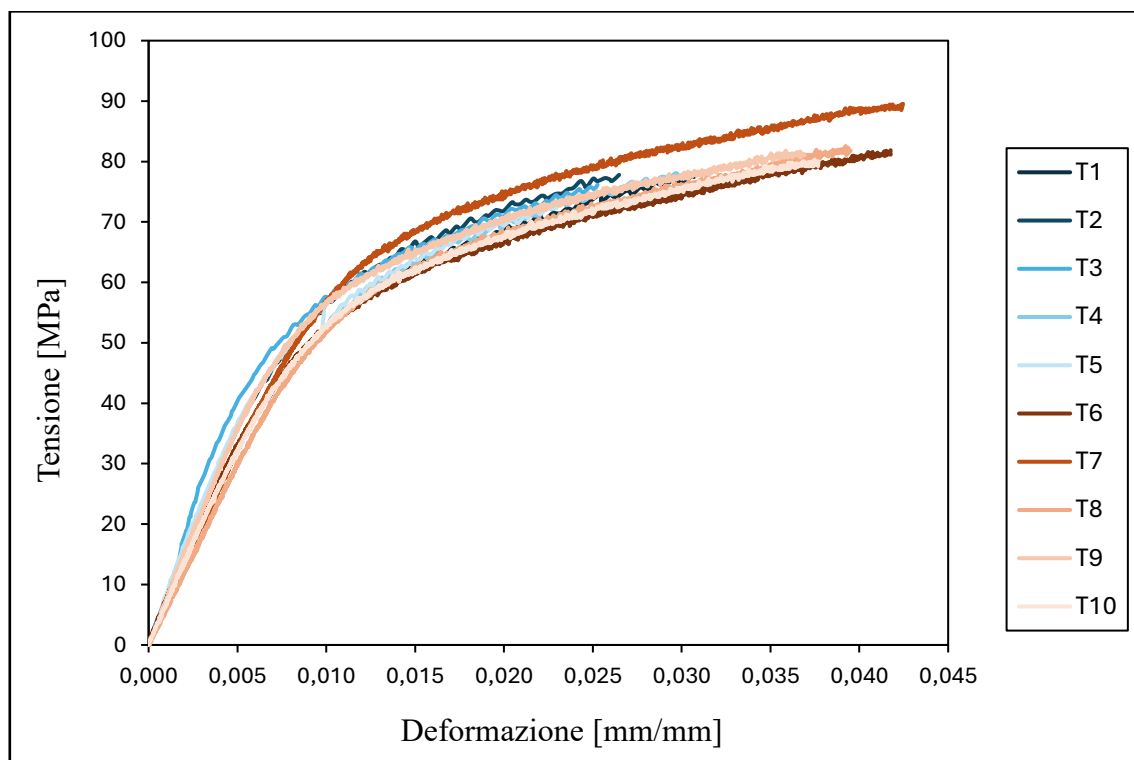


Figura 51: Curve tensione-deformazione prova di trazione, relative ad ogni singolo provino.

Si nota sin da subito come questo grafico rappresenti una descrizione più univoca ed intrinseca del comportamento del materiale, in quanto viene eliminata l'influenza diretta della geometria del provino. Le curve risultano avere tutte e quante circa la stessa pendenza, descrivendo così proprietà molto simili. Le differenze che si osservano nei diagrammi carico-spostamento risultano quindi in larga parte attribuibili agli effetti geometrici/dimensionali dei provini e all'effetto di afferraggio dei tab, piuttosto che a reali variazioni delle proprietà meccaniche del materiale.

Da tale diagramma, seguendo la normativa che regola la prova, è possibile ricavare dati utili ai fini della descrizione del comportamento in risposta a carichi di trazione, come la resistenza a trazione o tensione ultima a trazione (σ_{max}), che rappresenta la massima tensione sopportabile dal materiale prima della rottura, calcolata utilizzando il valore di carico massimo raggiunto. Dal valore di deformazione corrispondente alla rottura si ottiene invece la deformazione ultima (ϵ_{max}), parametro indicativo della capacità del materiale di deformarsi prima del collasso.

Più articolato è il metodo per individuare il modulo elastico a trazione, definito come la pendenza del tratto iniziale lineare della curva, nonché rapporto tra la variazione di tensione e la corrispondente variazione di deformazione nel tratto lineare. Secondo la norma si ricava nel seguente modo (Eq.3):

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (\text{Eq.3})$$

dove:

- E è il modulo elastico a trazione [GPa];
- $\Delta\sigma$ è la variazione di tensione tra due punti selezionati in base alla normativa all'interno del tratto elastico lineare del diagramma tensione–deformazione (calcolata come: $\sigma_2 - \sigma_1$) [MPa];
- $\Delta\varepsilon$ è la variazione di deformazione longitudinale tra gli stessi due punti utilizzati per la tensione (calcolata come: $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ e per normativa vale sempre circa 0,002) [mm/mm].

L'intervallo appropriato è tra valori di ε che vanno da 0,001 ε (1000 $\mu\varepsilon$) a 0,003 ε (3000 $\mu\varepsilon$). Se i dati non sono disponibili, in corrispondenza dei punti esatti di inizio e fine intervallo di deformazione (come spesso accade con i dati digitali e come successo anche per questo caso di studio), è necessario utilizzare il punto dati disponibile più vicino.

Il coefficiente di Poisson è stato calcolato solamente per i provini strumentati, in quanto esso mostra il rapporto tra la deformazione trasversale e la deformazione longitudinale, dati ottenibili solo grazie al lavoro degli estensimetri. Per il calcolo si segue la seguente formula (Eq.4):

$$\nu = - \frac{\Delta\varepsilon_t}{\Delta\varepsilon_l} \quad (\text{Eq.4})$$

dove:

- ν è il coefficiente di Poisson;
- $\Delta\varepsilon_t$ è la variazione di deformazione trasversale tra due punti selezionati in base alla normativa (calcolata come: $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$ e per normativa vale circa 0,002) [mm/mm];
- $\Delta\varepsilon_l$ è la variazione di deformazione longitudinale tra i due punti che si trovano in corrispondenza dello stesso intervallo (calcolata sempre come: $\varepsilon_2 - \varepsilon_1$) [mm/mm].

Come per il modulo elastico, l'intervallo suggerito dalla normativa è tra valori di ε che vanno da 0,001 ε (1000 $\mu\varepsilon$) a 0,003 ε (3000 $\mu\varepsilon$) e se i dati non sono disponibili in corrispondenza dei punti esatti di inizio e fine intervallo di deformazione, è necessario utilizzare il punto dati disponibile più vicino.

Nel complesso, i risultati sperimentali ottenuti risultano coerenti con il comportamento atteso per materiali compositi a matrice polimerica rinforzata con fibre naturali e confermano la validità della prova eseguita e della strumentazione impiegata. Tutti i risultati ottenuti, sono stati riportati in tabella (Tabella 12).

Tabella 12: Raccolta di dati elaborati dalle prove di trazione.

Provino	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	E [GPa]	ν [-]
T1	77,5	0,0307	6,97	0,321
T2	77,8	0,0265	7,46	-
T3	76,2	0,0253	10,20	-
T4	78,1	0,0306	6,79	-
T5	72,3	0,0230	7,70	0,244
T6	81,9	0,0418	6,88	-
T7	89,5	0,0425	6,73	-
T8	82,6	0,0395	5,93	-
T9	81,8	0,0369	7,37	-
T10	80,3	0,0377	6,57	-

Sulla base dei dati sperimentali raccolti, è stata condotta un'analisi statistica volta a definire le proprietà caratteristiche del materiale (Tabella 13). La dispersione dei risultati e la loro affidabilità sono state quantificate mediante il calcolo del valore medio (Eq. 5), della deviazione standard (Eq. 6) e del coefficiente di variazione percentuale (Eq. 7), applicando rispettivamente le seguenti equazioni:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (\text{Eq.5})$$

$$S_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2}{n-1}} \quad (\text{Eq.6})$$

$$CV = 100 \frac{S_{n-1}}{\bar{x}} \quad (\text{Eq.7})$$

dove:

- \bar{x} è la media semplice;
- x_i è il valore i-esimo della proprietà misurata;
- n è il numero di valori presi in esame,
- S_{n-1} è la deviazione standard;
- CV è coefficiente di variazione percentuale.

Tabella 13: Analisi statistica delle grandezze fondamentali ricavate dalla prova di trazione.

	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	E [GPa]	ν [-]
\bar{x}	79,8	0,0335	7,26	0,283
S_{n-1}	4,62	0,00713	1,15	0,0544
CV	5,79	21,32	15,81	19,27

Al fine di fornire una panoramica comparativa esaustiva, sono stati calcolati anche i valori medi delle proprietà meccaniche per ciascuna tipologia di afferraggio (tab in alluminio e tab in carta vetrata). Successivamente, è stata condotta un'analisi degli scostamenti percentuali tra i due gruppi, i cui risultati sono sintetizzati in tabella (Tabella 14).

Tabella 14: Confronto delle proprietà medie tra gruppi di provini con tab differenti.

	tab in alluminio	tab in carta vetrata	% di differenza
σ_{\max} [MPa]	76,38	83,22	+8,96
ϵ_{\max} [mm/mm]	0,0272	0,0397	+45,96
E [GPa]	7,82	6,70	-14,32

Ciò che si osserva dalle percentuali di differenza tra valori numerici conferma quanto si può osservare dai grafici: i provini con tab in carta vetrata, presentano allungamenti e resistenze maggiori, ma evidenziano un comportamento meno rigido, con moduli elastici più bassi.

5.3 Prova di compressione

La procedura di preparazione alla prova ricalca quella di trazione: il provino viene posizionato su un sistema di fissaggio specifico (Figura 52), progettato con un sistema che trasmette la forza al campione tramite morsetti a cuneo rettangolari conici, in modo da eliminare gli effetti del fenomeno di instabilità a carico di punta (buckling). In fase di preparazione è fondamentale garantire che la lunghezza di afferraggio, sia simmetrica per ogni coppia di morsetti; per permettere ciò, ci si serve dell'aiuto di appositi squadri.

Se il provino è strumentato, gli estensimetri vengono collegati con il sistema di acquisizione, per gli stessi criteri tecnici citati nella prova di trazione. Viene poi settata la macchina, impostando i vari parametri operativi: anche in questo caso la prova è stata eseguita in controllo di spostamento, con una velocità di 0,033 mm/s e una frequenza di campionamento pari a 2 Hz. All'avvio del test, la

macchina inizia ad applicare un carico uniforme di compressione fino alla rottura del provino. Nel frattempo, il sistema di acquisizione raccoglie in tempo reale i dati relativi alla forza applicata e allo spostamento della pressa idraulica.



Figura 52: Prova di compressione.

La criticità nel prevenire l'instabilità a carico di punta (buckling) rende la prova di compressione una delle più complesse nell'ambito della caratterizzazione meccanica. Durante il corso della prova, il provino C5, testato con una lunghezza libera di inflessione nominale di 20 mm, ha presentato un cedimento a buckling, fenomeno tipico delle geometrie snelle. Di conseguenza, si è reso necessario ridurre la snellezza dei campioni successivi: al provino C1, sono stati rimossi 5 mm dalla lunghezza, lasciando così una lunghezza di inflessione pari a 15 mm, ma anche in questo caso si sono verificate le stesse problematiche. La soluzione ottimale è stata accorciare di ulteriori 5 mm i provini C2, C3, C6, C7, C8, C9, lasciando così una lunghezza di inflessione pari a 10 mm. In questo caso, la modalità di rottura è risultata conforme alla normativa, rispettando i criteri di rottura per compressione (Figura 53). Ai fini di garantire una corretta strumentazione e valutare le proprietà elastiche, per provini C4 e C10 (gli unici strumentati) sono state mantenute lunghezze di inflessione rispettivamente di 15 mm e 20 mm.

Oltre alla geometria del provino, l'insorgenza di fenomeni flessionali potrebbe essere ricondotta a disallineamenti dei sistemi di afferraggio, a un'imprecisa preparazione del campione o ad un'insufficiente rigidità del materiale in analisi.



Figura 53: Differenza tra un provino ritenuto non accettabile (provino in basso) ed uno accettabile (provino in alto)

5.3.1 Raccolta ed elaborazione dati

Per una analisi dati corretta è necessario prendere in considerazione solo ed esclusivamente le prove che hanno presentato una rottura ritenuta accettabile con quanto riportato nella norma.

I dati rilevati dalla macchina (carico e spostamento) sono stati riportati su una griglia Excel e rielaborati. Anche in questo caso sono stati “azzerati” in modo da eliminare l’offset iniziale, dopodiché è stato tracciato il grafico carico-spostamento (Figura 54) riportando punto per punto, i valori grezzi acquisiti dalla macchina.

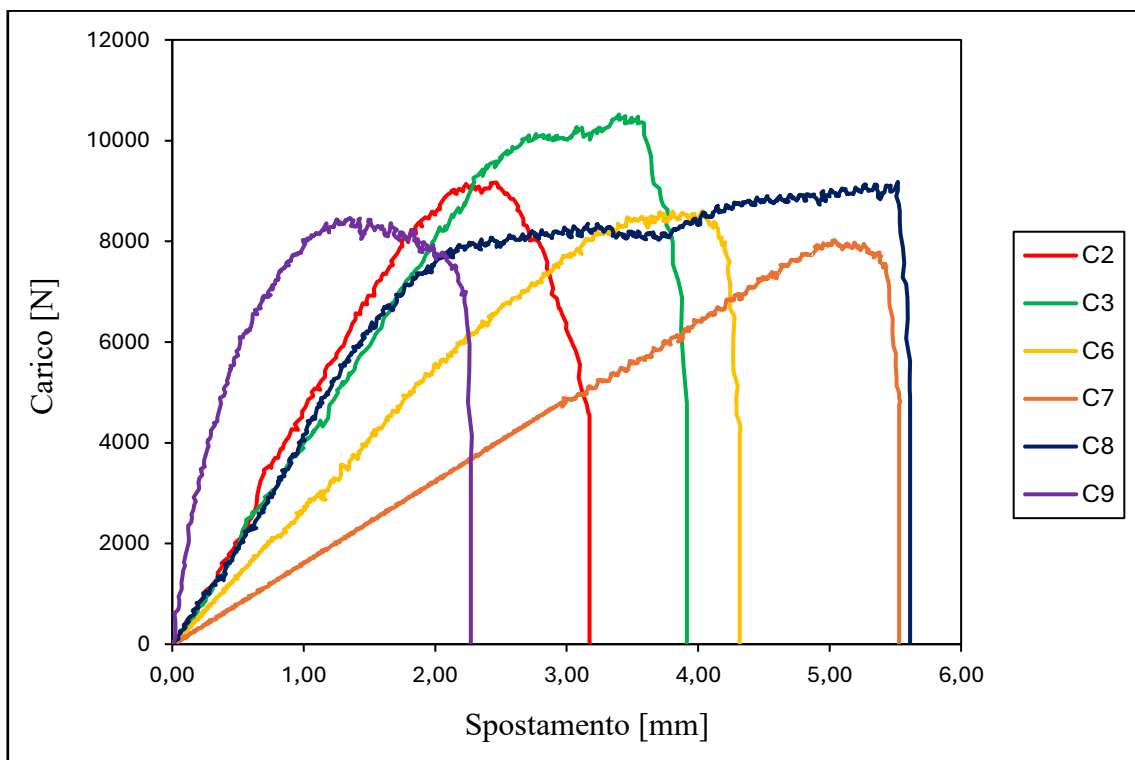


Figura 54: Curve carico-spostamento prova di compressione, relative ad ogni singolo provino.

Il risultato, per tutte le prove, è un andamento che rispecchia quanto atteso: nella prima fase la curva assume un andamento lineare crescente senza importanti cali, fino al raggiungimento del valore massimo. Questo punto rappresenta il picco del carico sostenuto dal provino durante la prova, poi il provino si rompe ed il carico crolla, senza mostrare alti gradi di plasticizzazione. Questo evidenzia un comportamento prevalentemente elastico fino alla rottura, a dimostrazione di una risposta fragile da parte del materiale. Solo in alcuni provini si osserva un ammorbidimento progressivo pre-collasso (molto evidente, per esempio, per il C8), indicativo di un comportamento pseudo-duttile, legato alla propagazione graduale del danno.

Dall'analisi delle curve carico–spostamento ottenute, emerge un'evidente dispersione dei dati, le pendenze ed i carichi massimi raggiunti, risultano sensibilmente diversi gli uni dagli altri, evidenziando un comportamento tipico dei compositi naturali, i quali, a differenza del carbonio o del vetro presentano, come già ampiamente detto, irregolarità intrinseche nel diametro delle fibre, nella purezza e nell'adesione con la matrice epossidica, portando a proprietà meccaniche meno costanti. A differenza della trazione, dove grazie al carico applicato, se una fibra è leggermente disallineata, essa tende ad essere raddrizzata, per cui la resistenza dipende quasi esclusivamente dalle proprietà intrinseche della fibra stessa, per la compressione invece, come si evince dallo studio dei grafici, le fibre, sottili e flessibili, per la dinamica del carico vengono portate a deformarsi lateralmente e se queste presentano già piccole irregolarità, tendono ad accentuare il fenomeno di instabilità. Inoltre, essendo fibre non trattate, se l'adesione con la matrice non è perfetta, in compressione si ha una più alta probabilità di distaccamento rispetto alla trazione (era già stata accennata l'influenza maggiore della matrice in compressione rispetto alla trazione, in quanto questa lavora per mantenere parallele le fibre) e questo distacco avviene in modo casuale nel volume del materiale, contribuendo alla dispersione dei dati.

Durante il corso della prova, è stata marcata l'influenza della lunghezza di inflessione sulla modalità di collasso dei provini, più questa aumenta, maggiori saranno le possibilità che si sviluppino fenomeni di instabilità ed i risultati ottenuti, hanno confermato come all'aumentare della lunghezza libera, il comportamento meccanico sia governato prevalentemente da effetti geometrici, piuttosto che dalle proprietà del materiale: tutti i provini rotti in modo non accettabile, hanno mostrato resistenze a carichi minori, ma maggiori allungamenti anche dopo il raggiungimento del carico massimo. Ciò non indica un comportamento più duttile, ma piuttosto evidenzia come nei casi di buckling si sviluppi un carico di flessione, il quale genera sforzi diversi nelle superfici opposte del provino. La macchina continua comunque ad applicare carico anche dopo l'innescò dell'instabilità; a questo punto una parte del provino sarà soggetta a trazione, per cui si rilevano valori di carico residui. I valori di carico

massimo ottenuti dai provini soggetti a buckling non possono, per questo motivo, essere considerati rappresentativi della resistenza a compressione.

I dati di carico e spostamento sono stati elaborati per definire il grafico tensione-deformazione, che svincola le proprietà del materiale dalla geometria. Sono stati così calcolati i valori di tensione corrispondenti, punto per punto, in maniera analoga alla prova di trazione (Eq.1) ed il rispettivo valore di tensione massima ammessa (σ_{max}), nonché la resistenza del materiale a compressione. Così come per i provini strumentati (C4 e C10), è stata determinata la deformazione (Eq.2). È solo per questi ultimi, quindi, che è stato possibile tracciare il grafico tensione-deformazione (Figura 55). Attenzione, però, perché essendo i provini C4 e C10 rotti per effetto buckling, non è stata determinata la deformazione massima (come invece fatto per la trazione), in quanto non rappresentativa del materiale ma solo del comportamento del provino.

Anche in questo grafico si denota una spiccata variabilità. Il provino C4 presenta una pendenza molto più elevata; questo si traduce in una maggiore rigidità, mentre il C10 risulta maggiormente deformabile. Infatti, dall'analisi teorica dei dati, emerge chiaramente una deformazione massima maggiore.

Il fatto che le curve si interrompano bruscamente suggerisce che l'estensimetro ha raggiunto il suo fondo scala fisico (saturazione) o si è scollato a causa della deformazione superficiale del provino. Tuttavia, il tratto ottenuto è sufficiente per definire il comportamento del materiale.

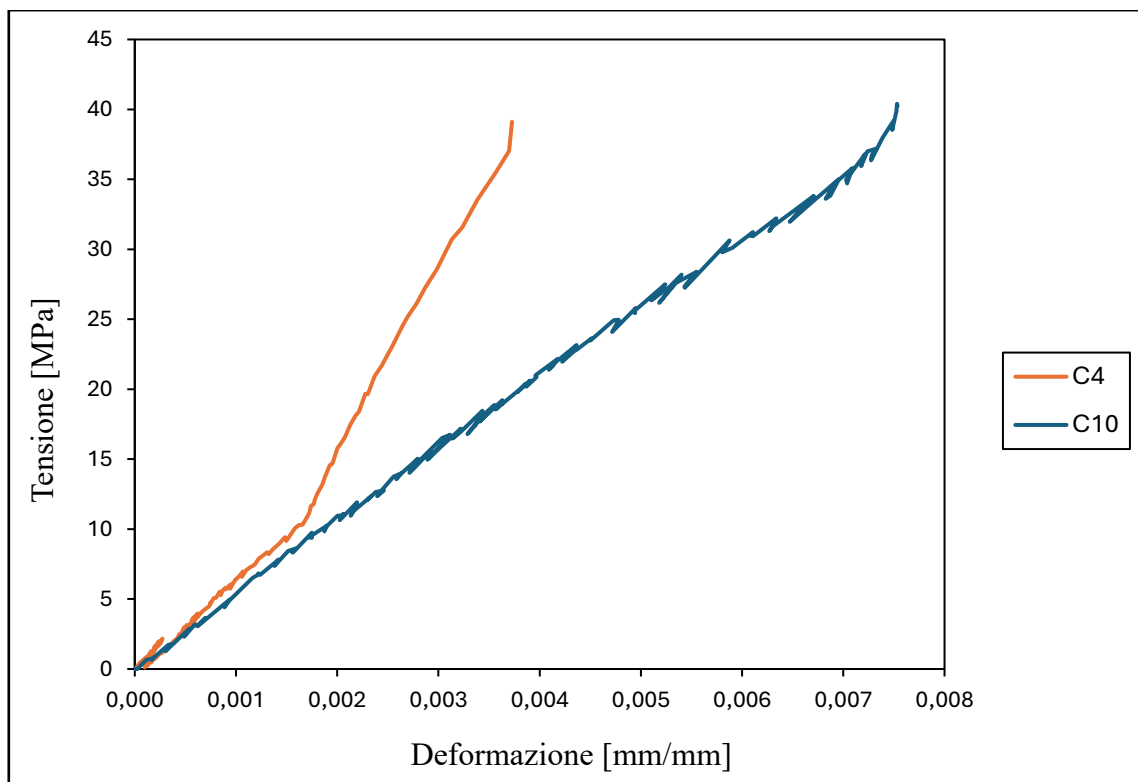


Figura 55: Curve tensione-deformazione prova di compressione, relative ad ogni singolo provino.

Sulla base dei dati riportati nel grafico tensione-deformazione, è stato calcolato il modulo elastico (E) seguendo la metodologia della prova di trazione (Eq.3). Poiché il grafico relativo al provino C4 presenta due tratti lineari distinti, si è proceduto alla determinazione di due differenti valori di modulo all'interno dei rispettivi intervalli. L'analisi ha confermato la maggiore rigidità del provino C4 rispetto al C10: la pendenza superiore del tratto lineare si traduce, infatti, in un modulo elastico significativamente più elevato.

È stato determinato anche il coefficiente di Poisson, per la prova di compressione (Eq.8). Rispetto alla prova di trazione, gli intervalli interessati rimangono invariati, la differenza risiede nella direzione di applicazione del carico, per cui, rispetto ad essa, l'equazione cambia di segno:

$$\nu = \frac{\Delta \varepsilon_t}{\Delta \varepsilon_l} \quad (\text{Eq.8})$$

Come per il modulo elastico, sul grafico del provino C4, sono stati individuati due valori del coefficiente di Poisson, uno per ciascun tratto lineare distinguibile.

Nella seguente tabella sono riportati i valori calcolati per ciascun provino in analisi (Tabella 15).

Per i valori di modulo elastico e coefficiente di Poisson, per il provino C4, sono stati forniti entrambi i risultati numerici ottenuti, tuttavia, ai fini di una corretta analisi delle proprietà del materiale, sarebbe opportuno considerare i valori, solo ed esclusivamente riferiti al primo tratto, in quanto esso presenta una pendenza comparabile con quella del provino C10, quindi, idealmente più rappresentativa delle proprietà del materiale. Un'altra soluzione potrebbe essere quella di considerare il valore medio.

Tabella 15: Raccolta di dati elaborati dalle prove di compressione.

Provino	σ_{\max} [MPa]	E [GPa]	ν [-]
C1	102,00	-	-
C2	116,79	-	-
C3	134,00	-	-
C4	95,94	6,19 – 12,84	0,193 – 0,607
C5	101,55	-	-
C6	111,05	-	-
C7	105,42	-	-
C8	116,80	-	-
C9	111,12	-	-
C10	95,52	5,07	0,213

I dati ottenuti devono essere anche in questo caso rielaborati attraverso metodi statistici (Eq.5), (Eq.6), (Eq.7), per ricavare i valori medi delle proprietà di interesse del materiale. Si ricorda che in questi calcoli non sono stati considerati i dati ottenuti da provini non ritenuti accettabili. Tutti i risultati sono stati riportati nella seguente tabella (Tabella 16).

Tabella 16: Analisi statistica delle grandezze fondamentali ricavate dalla prova di compressione.

	σ_{\max} [MPa]	E [GPa]	ν [-]
\bar{x}	115,86	7,29	0,346
S_{n-1}	11,67	3,14	0,187
CV	10,07	43,07	54,24

5.4 Prova di flessione

La configurazione per la prova di flessione su tre punti prevede l'installazione di un'apposita attrezzatura sulla macchina universale. Il provino viene appoggiato su due cilindretti di supporto, il cui compito è quello di sorreggerlo durante l'applicazione del carico (Figura 56). Questi cilindretti vengono posti ad una distanza definita, detta span, regolata in base alle dimensioni del provino stesso.



Figura 56: Preparazione prova di flessione a tre punti.

Nel caso di studio lo span è fissato a 51,2 mm; tale valore non è un numero casuale o fisso per tutti i materiali, ma deriva dall'applicazione di un rapporto standard imposto dalla norma, tra la lunghezza dell'appoggio e lo spessore del provino. Tipicamente nelle norme è previsto un rapporto 16:1 tra la distanza tra gli appoggi e lo spessore; se lo span fosse troppo corto, il provino cederebbe per sforzo di taglio prima di raggiungere il limite di flessione. Il rapporto 16:1 è considerato il punto di equilibrio che assicura la rottura per sollecitazioni di flessione e minimizza l'influenza del taglio.

Nessun provino per la prova di flessione è stato strumentato, per cui, analogamente ai test precedenti, è stata prestata particolare attenzione al settaggio della velocità di prova, impostata in questo caso a 0,022 mm/s, con una frequenza di campionamento pari a 1 Hz. All'avvio del test, il pistone oleodinamico scorre lentamente verso l'alto, mandando in contatto il provino sul cuneo, nella sezione centrale; in questo modo viene applicato con continuità un carico concentrato con direzione perpendicolare ad esso, che flette il provino fino a portarlo a rottura (Figura 57).

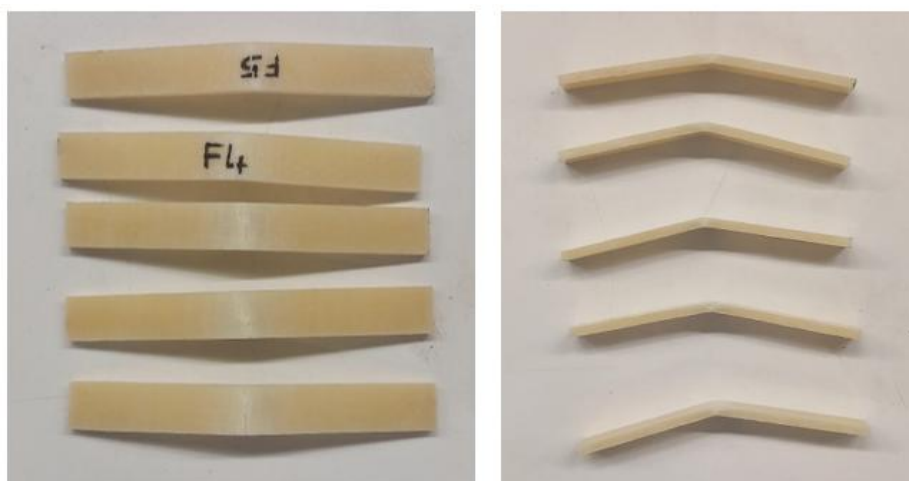


Figura 57: Provini a flessione dopo la prova.

Si noti che i provini ricavati tramite VIP, presentano una superficie più liscia e ricca di resina (parte a contatto con lo stampo) ed una più ruvida e irregolare (parte a contatto con il sacco da vuoto), motivo per il quale, è stato deciso di svolgere le prove sui provini F1, F2 ed F3 rivolgendo la faccia liscia verso il basso, al contrario i provini F4 ed F5 sono stati posizionati con la faccia liscia verso l'alto. In questo modo è stato possibile studiare anche un'eventuale influenza dell'orientamento di infusione sulle proprietà del materiale.

Si può osservare anche a occhio, sui provini rotti a seguito della prova, una deformazione leggermente maggiore sui provini orientati con la faccia liscia verso l'alto (in particolare dal provino F4). Dunque, sull'orientamento delle facce ruvide o lisce si può ipotizzare che generi delle differenze, anche se piccole, sulle proprietà del materiale. Queste osservazioni sono state approfondite tramite

l'elaborazione dei dati e si osserverà che risulteranno visibili sia attraverso i grafici che in piccole differenze nei valori numerici.

5.4.1 Raccolta ed elaborazione dati

I dati rilevati dalla macchina sono stati rielaborati su Excel e, come per le altre prove, sono stati sottoposti al processo di azzeramento, dopodiché è stato tracciato il grafico carico-spostamento (Figura 58).

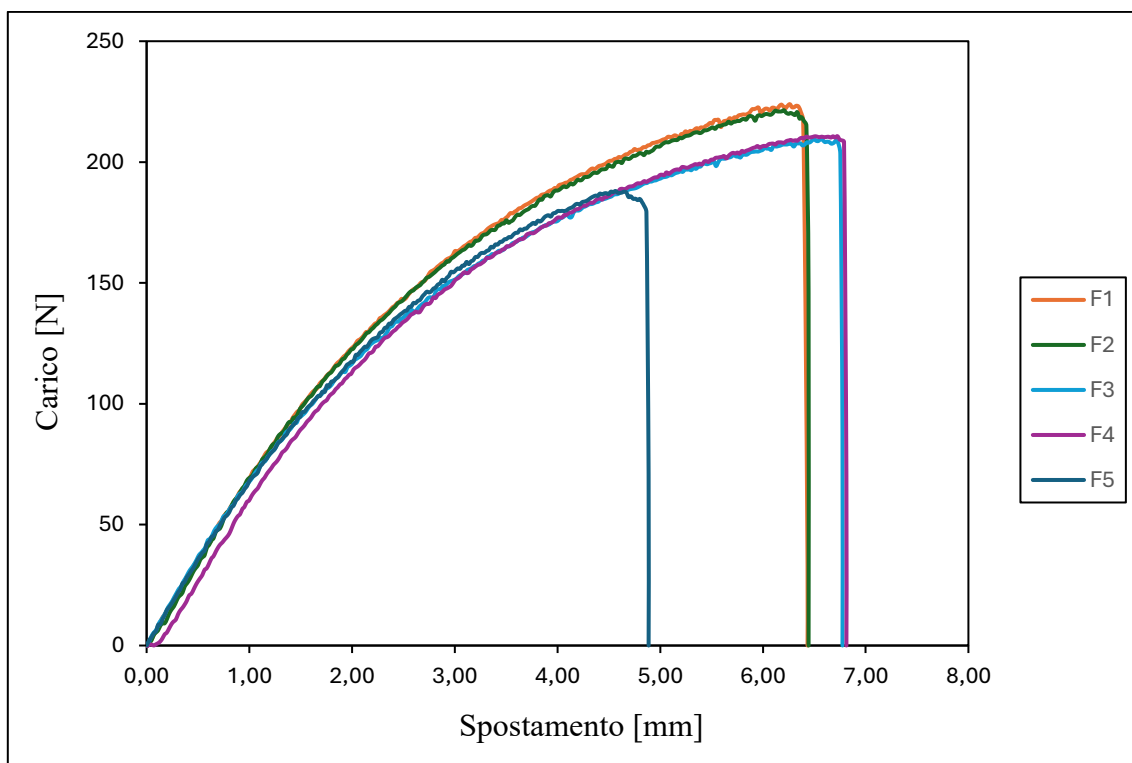


Figura 58: Curve carico-spostamento prova di flessione, relative ad ogni singolo provino.

In generale, il materiale mostra un comportamento iniziale elastico-lineare, seguito da una fase di danneggiamento progressivo (la non perfetta linearità del tratto iniziale è dovuta sempre alla natura pseudo-duttile delle fibre naturali e alla loro struttura cellulare), poi la caduta netta del carico dopo il raggiungimento del picco massimo mette in evidenza la risposta fragile del materiale anche a sforzi di flessione.

Da questo grafico si possono studiare in maniera più accurata le differenze legate all'orientamento della disposizione del provino sopra i cilindretti di appoggio. Il presupposto da cui si può partire è che prendendo in considerazione una faccia, l'orientamento del provino determina quando questa è soggetta a trazione (se rivolta verso il basso) o a compressione (se rivolta verso l'alto). Dal grafico si osserva che generalmente nel tratto iniziale tutte quante mostrano una discreta omogeneità, determinando una rigidezza a flessione comparabile; per cui si deduce che la finitura superficiale non

altera la risposta elastica iniziale. All'aumentare del carico, nascono le prime divergenze: in particolare i provini con la parte liscia sotto, mostrano mediamente carichi massimi più elevati e allungamenti inferiori, al contrario, i provini con la parte liscia rivolta verso l'alto, mostrano mediamente carichi massimi leggermente inferiori e allungamenti maggiori (confermando l'osservazione che era stata fatta osservando i provini rotti), inoltre, la curva del provino F5 presenta un comportamento anomalo rispetto a tutte le altre, con un collasso anticipato. Tutto ciò può essere interpretato come una maggiore resistenza a flessione quando la superficie liscia è sottoposta a trazione, mentre quando è la parte più ruvida ad essere sottoposta a trazione, il materiale potrebbe essere più sensibile a difetti superficiali, mostrando resistenze a flessione minori e maggiori rischi di innesco di cricche.

Come per le altre prove, è stato poi calcolato il valore di tensione (Eq.9) punto per punto rispettando la norma, in modo da poter descrivere le proprietà intrinseche del materiale in risposta alla flessione:

$$\sigma_i = \frac{3F_i L}{2bh^2} \quad (\text{Eq.9})$$

dove:

- σ_i è la tensione a flessione i-esima [MPa];
- F_i è la forza i-esima misurata istante per istante tramite la cella di carico [N];
- L è lo span [mm];
- b è la larghezza del provino [mm];
- h è lo spessore del provino [mm];

Tramite l'equazione che segue (Eq.10), sono stati determinati per via teorica anche i valori di deformazione istante per istante:

$$\varepsilon_i = \frac{6\delta_i h}{L^2} \quad (\text{Eq.10})$$

dove:

- ε_i è la deformazione a flessione i-esima [mm/mm]
- δ_i è la flessione che si ha a metà del provino (coincide con lo spostamento rilevato della pressa idraulica) [mm]
- h è lo spessore del provino [mm]
- L è lo span [mm]

Selezionando il carico massimo applicato, è possibile determinare la tensione ultima a flessione (σ_{\max}) nonché la resistenza del materiale a flessione ed in corrispondenza di quest'ultima si ricava il valore di deformazione che il materiale sopporta prima di rompersi, ovvero la deformazione massima (ε_{\max}).

Con questa rielaborazione dei dati, è stato possibile tracciare i rispettivi grafici tensione-deformazione delle varie prove di flessione (Figura 59).

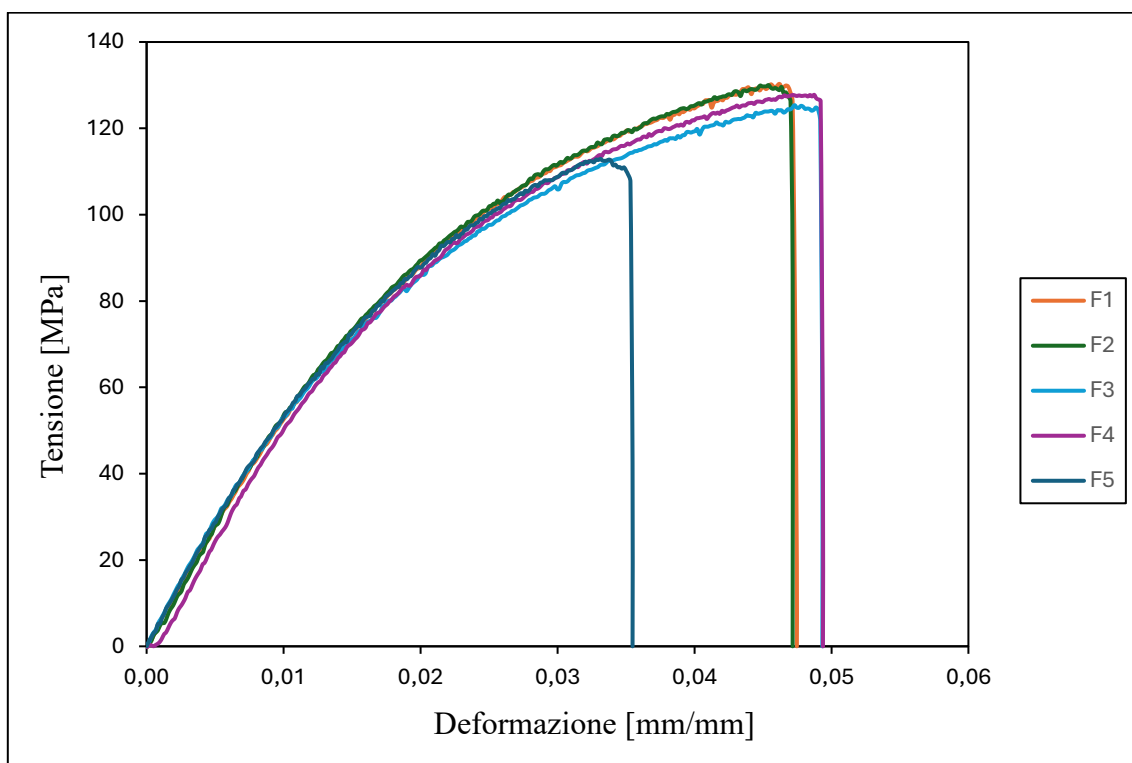


Figura 59: Curve tensione-deformazione prova di flessione, relative ad ogni singolo provino.

L'analisi delle curve evidenzia una pendenza iniziale pressoché identica per tutti i provini testati; tale linearità suggerisce un valore del modulo elastico a flessione costante e coerente tra le diverse prove. Partendo dai dati sperimentali di tensione e deformazione, è stato quindi possibile calcolare il modulo elastico per ogni campione, come fatto per le prove precedenti (Eq.3).

Nella seguente tabella si trovano i valori utili ricavati per ciascun provino (Tabella 17).

Tabella 17: Raccolta di dati elaborati dalle prove di flessione.

Provino	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	E [GPa]
F1	146,79	0,0475	5,59
F2	142,32	0,0472	5,57
F3	131,35	0,0493	6,05
F4	143,06	0,0494	5,71
F5	117,28	0,0355	5,95

Sulla base dei dati raccolti, si è proceduto all'analisi statistica volta a definire le proprietà meccaniche medie del materiale in esame. Applicando il formalismo matematico già impiegato per le prove precedenti (Eq.5), (Eq.6), (Eq.7), si ottengono i seguenti valori, caratteristici del materiale in risposta a carichi di flessione (Tabella 18):

Tabella 18: Valori medi delle grandezze fondamentali ricavate dalla prova di flessione.

	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	E [GPa]
\bar{x}	125,28	0,0459	5,77
S_{n-1}	7,18	0,00583	0,216
CV [%]	5,73	12,74	3,74

Per avere una visione più completa sulle differenze tra le proprietà dei provini, in base alla disposizione della superficie liscia rispetto all'applicazione del carico, sono stati determinati in maniera analoga le proprietà medie dei gruppi di provini con lo stesso orientamento (Tabella 19).

Tabella 19: Valori medi delle proprietà, differenziando in base all'orientamento del provino.

Provini con superficie liscia orientata verso il basso			
	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	E [GPa]
\bar{x}	128,56	0,048	5,74
S_{n-1}	2,77	0,00114	0,271
CV [%]	2,15	2,37	4,73
Provini con superficie liscia orientata verso l'alto			
	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [mm/mm]	E [GPa]
\bar{x}	120,35	0,0423	5,83
S_{n-1}	10,49	0,00983	0,17
CV [%]	8,71	23,15	2,91

Le differenze tra le due configurazioni sono minime, ma ci sono, ciò che si può dedurre dai valori numerici conferma quanto osservato, in parte ad occhio e poi sui grafici: quando la superficie liscia è orientata verso l'alto, quindi sottoposta a compressione, il carico massimo raggiunto risulta essere mediamente più basso, questo perché una tale disposizione implica che la superficie rugosa sia sottoposta a trazione, tale aspetto potrebbe risultare meccanicamente più critico, facilitando l'innesco di rotture premature, a differenza di quando è la superficie liscia ad essere soggetta a trazione, che

presenta meno irregolarità. Ciò porta inevitabilmente anche ad una maggiore dispersione di dati; di fatto, il CV segna una variazione percentuale dell'8,71% contro il 2,15% per l'altra configurazione, rendendo più complicato "prevedere" un comportamento costante. Ovviamente questa dispersione di dati è riscontrabile anche per i valori di deformazione massima corrispondenti, mentre il modulo elastico confrontandolo con il valore medio complessivo, risulta essere in linea con gli altri valori; di fatto, presenta un valore di CV piuttosto basso. Il fatto che il modulo sia quasi identico suggerisce che la frazione volumetrica di fibra e resina sia omogenea in tutto lo spessore: l'orientamento delle superfici del provino influenza la rottura ma non la rigidità globale del pezzo.

Conclusioni

In questo elaborato sono state raccontate le origini dei compositi ed è stata fornita una descrizione riassuntiva delle diverse categorie e dei metodi di produzione generali, concentrando poi l'attenzione sulla famiglia degli FRP (Fiber Reinforced Polymers), in particolare in fibra sintetica, della quale sono stati messi in evidenza i vari vantaggi a livello tecnico rispetto ad altri comuni materiali per uso strutturale e i diversi quesiti di carattere ambientale che le produzioni inquinanti e dispendiose di tali tipologie di fibre stanno sollevando. È stata poi presentata una delle soluzioni più promettenti in risposta a queste problematiche: l'utilizzo di fibre naturali di origine vegetale, delle quali sono stati elencati i vantaggi in termini ambientali e le loro caratteristiche meccaniche, ma anche gli svantaggi e le difficoltà ad esse legate.

L'elaborato si è concluso concentrando l'attenzione su uno studio di caratterizzazione meccanica di specifici materiali compositi in fibre naturali (NFRP - Natural Fiber Reinforced Polymers): laminati in fibra di canapa della Maeko e matrice epossidica PRIME™ 20LV della Gurit, prodotti dal CNR (Consiglio Nazionale delle Ricerche) con tecnica VIP (Vacuum Infusion Process).

Oltre alle proprietà intrinseche del materiale in analisi, è stato possibile fare considerazioni sulla modalità di produzione: si è appurato che la direzione di infusione potrebbe essere un parametro critico in fase di progettazione, così come la diversa finitura di superfici opposte che questa tecnica genera, determinante in modo particolare quando la sollecitazione è di flessione. Per quanto riguarda quest'ultimo aspetto, è stato affermato che per applicazioni strutturali, è fondamentale che la superficie prodotta a contatto con lo stampo (lato liscio) sia quella sollecitata a trazione, per massimizzare sia le prestazioni che la sicurezza del componente. È stata studiata, inoltre, l'influenza dei tab nella prova di trazione, ottenendo risultati diversi utilizzando due tipologie di tab, ad indicare come la differenza di rigidità tra tab e provino, possa generare maggiori accumuli di tensione ed è stato confermato anche l'impatto della geometria nella prova di compressione, strutture troppo snelle possono causare fenomeni di buckling.

Le prove sono state svolte nel rispetto delle normative ASTM presso i laboratori dell'Università di Bologna e i dati ottenuti sono stati rielaborati sfruttando le funzioni di Excel, ai fini di trovare i valori necessari per la caratterizzazione di un materiale.

Nonostante piccole irregolarità nel taglio dei provini rispetto all'orientamento delle fibre e la mancanza di trattamenti superficiali che permettessero di ridurre gli effetti negativi di assorbimento dell'umidità da parte delle fibre naturali, lo studio di questo materiale ha comunque portato a risultati interessanti, che potrebbero essere tenuti in considerazione in un contesto di progettazione per applicazioni semi-strutturali.

I valori ottenuti possono essere considerati attendibili confrontandoli con quanto riportato in letteratura. In particolare, le prove di trazione e flessione, presentano valori di coefficiente di variabilità (CV) relativamente bassi, indice di una buona esecuzione e ripetibilità delle prove. Valori di questo ordine di grandezza sono da ritenersi accettabili, data la difficoltà nel rilevare le proprietà ad esse legate, a causa della variabilità intrinseca alle fibre naturali. Inoltre, se il campione è piccolo (come in questo caso), è normale ritrovarsi dei coefficienti di variazione percentuale piuttosto elevati. La compressione è stata la prova con una dispersione dei dati maggiore; non a caso, la difficoltà di esecuzione la rende una prova molto sensibile e di conseguenza risulta più complicato ottenere valori univoci.

Sulla base delle proprietà meccaniche ottenute, è stato evidenziato un comportamento distante dai compositi strutturali sintetici tradizionali. Mentre i CFRP e i GFRP mostrano una risposta puramente elasto-fragile con carichi di rottura e moduli di rigidità superiori di ordini di grandezza, gli NFRP analizzati hanno manifestato una marcata non-linearità, definibile come comportamento pseudo-duttile. Nelle prove di trazione e flessione, in particolare, il progressivo aumento della curvatura ha segnalato un accumulo diffuso di danneggiamento su tutto il provino, attribuibile, come in parte già accennato, all'interfaccia non ottimizzata tra fibra e matrice (per via della natura cellulare delle fibre), la quale porta a "scivolamenti" tra i vari protagonisti del composito, diminuendone progressivamente la resistenza. Sebbene si riduca la resistenza complessiva rispetto ai compositi in fibre sintetiche, la canapa conferisce al materiale una maggiore capacità di assorbimento dell'energia prima del cedimento, quindi una maggior tenacità. Nei CFRP o nei GFRP, l'energia viene accumulata senza possibilità di essere dissipata; dunque, la rottura in questo caso avviene in maniera improvvisa e, rilascia un'energia elastica enorme, riducendo spesso le fibre in polvere o frammenti minutissimi, cosa che non si è verificata nel caso della canapa.

In definitiva, sebbene le prestazioni assolute non siano comparabili con quelle del carbonio o del vetro e la mancanza di trattamenti per migliorare l'igrofobicità delle fibre o migliorare l'interfaccia fibra-matrice, non ne facciano l'NFRP con le caratteristiche migliori, il composito in esame si conferma come una valida alternativa sostenibile, anche per applicazioni tecniche, dove il bilanciamento tra proprietà specifiche, leggerezza e basso impatto ambientale, rappresentano il requisito progettuale primario. È importante sottolineare come la scelta della canapa risponda a criteri di sostenibilità ambientale, essendo una risorsa rinnovabile, particolarmente adatta al contesto agricolo italiano ed europeo.

Alcuni esempi di impiego di questo composito, potrebbero essere nel settore automotive, settore dove gli NFRP, come già visto nel capitolo 3, sono maggiormente diffusi, con produzioni di pannelli per portiere e cruscotti, si sfrutterebbe così la bassa densità della canapa per ridurre il peso totale del

veicolo, oppure per la produzione di cappelliere e schienali dei sedili, qui è fondamentale la modalità di rottura che è stata osservata: in caso di incidente, questi componenti non creerebbero schegge taglienti (come farebbe il carbonio), migliorando la sicurezza dei passeggeri. Queste fibre naturali assorbono le vibrazioni molto meglio delle fibre sintetiche grazie alla loro struttura cellulare e ai meccanismi di dissipazione energetica che sono stati analizzati, per cui questo composito sarebbe perfetto per attrezzature sportive come sci e snowboard, riducendo le vibrazioni trasmesse alle gambe dell'atleta, o per racchette da tennis. Si potrebbe poi sfruttare la maggiore duttilità rispetto agli FRP in fibra sintetica, per realizzare componenti curvi o con forme complesse, come bici o canoe.

Bibliografia

- [1] Gianni Caligiana, Francesco Cesari. I materiali compositi. 2002.
- [2] <https://it.dinuofrp.com/info/history-of-composite-materials-74696303.html> n.d.
- [3] Michael Sauer. THE GLOBAL MARKET FOR CARBON FIBERS AND CARBON COMPOSITES. n.d.
- [4] ASTM D3878 – 07 (2013): Standard Terminology for Composite Materials n.d.
- [5] I MATERIALI COMPOSITI | FORESIGHT | 2015 – 2020 n.d.
- [6] Ginger Gardiner. The making of glass fiber: CompositesWorld n.d.
- [7] Newcomb BA. Processing, structure, and properties of carbon fibers. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2016;91:262–82. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.018>.
- [8] Wang M, Ullah S, Rizwan M, Zhou X. Preparation process of mesophase pitch-based carbon fiber: a review. *RSC Adv* 2025;15:39514–38. <https://doi.org/10.1039/D5RA05325K>.
- [9] Sharma A, Amin MM, Bari MA Al, Hossain MM, Siddiquee MN. Carbon fiber from petroleum pitch: Current advances and potential applications. *Energy Nexus* 2025;17. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2024.100355>.
- [10] Zavatta N, Rondina F, Falaschetti MP, Donati L. Effect of thermal ageing on the mechanical strength of carbon fibre reinforced epoxy composites. *Polymers (Basel)* 2021;13. <https://doi.org/10.3390/polym13122006>.
- [11] Abbate E, Mirpourian M, Brondi C, Ballarino A, Copani G. Environmental and Economic Assessment of Repairable Carbon-Fiber-Reinforced Polymers in Circular Economy Perspective. *Materials* 2022;15. <https://doi.org/10.3390/ma15092986>.
- [12] Meng F, Olivetti EA, Zhao Y, Chang JC, Pickering SJ, McKechnie J. Comparing Life Cycle Energy and Global Warming Potential of Carbon Fiber Composite Recycling Technologies and Waste Management Options. *ACS Sustain Chem Eng* 2018;6:9854–65. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b01026>.
- [13] Kawajiri K, Sakamoto K. Environmental impact of carbon fibers fabricated by an innovative manufacturing process on life cycle greenhouse gas emissions. *Sustainable Materials and Technologies* 2022;31. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00365>.
- [14] Dittenber DB, Gangarao HVS. Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 2012;43:1419–29. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.11.019>.

- [15] Sathish S, Karthi N, Prabhu L, Gokulkumar S, Balaji D, Vigneshkumar N, et al. A review of natural fiber composites: Extraction methods, chemical treatments and applications. *Mater. Today Proc.*, vol. 45, Elsevier Ltd; 2021, p. 8017–23. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1105>.
- [16] Sweygers N, Depuydt DEC, Eyley S, Thielemans W, Mosleh Y, Ivens J, et al. Prediction of the equilibrium moisture content based on the chemical composition and crystallinity of natural fibres. *Ind Crops Prod* 2022;186. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115187>.
- [17] Rolon BG, Cruz JN. Reinforced Polymers with Natural Fiber 2024. <https://doi.org/10.20944/preprints202405.0757.v1>.
- [18] Ahmed R, Manik KH, Nath A, Shohag JR, Mim JJ, Hossain N. Recent advances in sustainable natural fiber composites: Environmental benefits, applications, and future prospects. *Materials Today Sustainability* 2025;32. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2025.101220>.
- [19] Ead AS, Appel R, Alex N, Ayranci C, Carey JP. Life cycle analysis for green composites: A review of literature including considerations for local and global agricultural use. *J Eng Fiber Fabr* 2021;16. <https://doi.org/10.1177/15589250211026940>.
- [20] Kabir MM, Wang H, Lau KT, Cardona F. Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview. *Compos B Eng* 2012;43:2883–92. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.053>.
- [21] Yan L, Chouw N, Jayaraman K. Flax fibre and its composites - A review. *Compos B Eng* 2014;56:296–317. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.014>.
- [22] Kamarudin SH, Mohd Basri MS, Rayung M, Abu F, Ahmad S, Norizan MN, et al. A Review on Natural Fiber Reinforced Polymer Composites (NFRPC) for Sustainable Industrial Applications. *Polymers (Basel)* 2022;14. <https://doi.org/10.3390/polym14173698>.
- [23] Joris Smits, Patrick Teuffel. Passerella in composito bio-based: progettazione, produzione e In situ Monitoragg. n.d.
- [24] <https://www.bcomp.com/news/natural-fibre-reinforced-satellite-panel/> n.d.
- [25] Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials 2025. https://doi.org/10.1520/D3039_D3039M-17R25.
- [26] Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading 2024. https://doi.org/10.1520/D3410_D3410M-16R24.
- [27] Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials 2021. https://doi.org/10.1520/D7264_D7264M-21.
- [28] Shelly D, Lee S, Park S. Hemp fiber and its bio-composites: a short review part II—applications and life cycle assessment. *Adv Compos Hybrid Mater* 2025;8. <https://doi.org/10.1007/s42114-025-01414-x>.

Ringraziamenti

Voglio ringraziare prima di tutto il professor Donati, la professoressa Falaschetti e l'ingegner Semprucci per la loro disponibilità e per avermi seguito con attenzione, concedendomi la possibilità di svolgere questo elaborato che mi ha permesso di implementare le mie conoscenze in ambito tecnico.

Ringrazio la dottoressa Ricciardi, ricercatrice del IPCB-CNR, per aver accolto la mia richiesta ed essersi impegnata a fornire i materiali per la parte sperimentale.

Ringrazio Stiv, Nico, Fede e Leo, i compagni di corso che mi hanno aiutato ad andare avanti, con sessioni di studio intense, matte e disperate (soprattutto disperate).

Ringrazio, anzi chiedo scusa, a Nico, Alpaz, Matti, Sbarza, Massi e Dallox per tutte le serate che ho saltato perché “dovevo studiare”, amici da una vita che mi hanno sempre spalleggiato nella scelta di continuare con l'università.

Ringrazio Anita perché è l'unica persona che è stata realmente in grado di capire i miei momenti non solo dallo sguardo, mi è stata vicina quando tutte le certezze sembravano vacillare, facendomi sentire compreso ed amato, dandomi la spinta per rialzarmi e continuare.

Infine, volevo ringraziare tutta quanta la mia famiglia, per avermi accompagnato giorno dopo giorno in questo percorso (un po' più lungo del previsto). Ringrazio in particolare nonno Enzo e nonna Colombina, i miei più grandi sostenitori.

Volevo poi riservare un grazie speciale a mamma, babbo e dada Marghe, fonti di ispirazione che mi hanno spronato a capire quale fosse la mia strada. Non posso dire di averla già trovata, ma so che questo traguardo non è l'arrivo, è un punto di partenza, e ciò che ho raccolto fino a questo momento è anche merito loro, che mi hanno sempre dato la possibilità di scegliere e di sbagliare, senza mai farmi mancare nulla e senza avermi mai fatto sentire il peso della pressione.

Grazie a tutti.