

# POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale  
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica



## Struttura Bionica in Materiale Composito

Relatori: Prof. Laura Vergani

Co-relatori: Prof. Gherard Ziegmann  
Ing. Chiara Colombo

Tesi di Laurea di:  
Alessandro Panizio Matr. 739654

Anno Accademico 2011-2012





## INDICE GENERALE:

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPITOLO 1: LA BIONICA.....</b>	<b>9</b>
INTRODUZIONE AL CAPITOLO:.....	9
1.1 DEFINIZIONE/I E OBIETTIVI.....	10
1.2 STORIA, EVOLUZIONE E PROSPETTIVE FUTURE.....	11
1.3 IL METODO, IL PRINCIPIO E GLI ATTORI DELLA BIONICA.....	13
1.4 LA BIONICA E LE STRUTTURE DEI MATERIALI COMPOSITI.....	17
<b>CAPITOLO 2: I COMPOSITI E LA STRUTTURA DELL'OSSO .....</b>	<b>20</b>
INTRODUZIONE AL CAPITOLO:.....	20
2.1 INTRODUZIONE: I MATERIALI COMPOSITI.....	21
2.1.1 <i>Le Fibre</i> .....	22
2.1.2 <i>La matrice</i> .....	24
2.2 TECNICHE DI PRODUZIONE.....	26
2.2.1 <i>V.I.P. - Vacuum Infusion Process</i> .....	27
2.3 CAMPI DI APPLICAZIONE.....	32
2.3.1 <i>L'industria aeronautica</i> .....	32
2.3.2 <i>Applicazioni nel settore automobilistico</i> .....	35
2.4 L'OSSO: INTRODUZIONE E GENERALITÀ.....	37
2.4.1 <i>Lo scheletro</i> .....	37
2.4.2 <i>Il femore</i> .....	39
2.4.3 <i>La Composizione del tessuto osseo</i> .....	41
2.5 LA STRUTTURA GERARCHICA.....	42
2.5.1 <i>Livello 0: Le macro-strutture</i> .....	42
2.5.2 <i>Livello 1: L'osso compatto</i> .....	43
2.5.3 <i>Livello 2: L'osteone</i> .....	45
2.5.4 <i>Livelli 3-4-5: Le fibre di collagene, le fibrille, il trobocollagene</i> .....	46
2.6 LE CARATTERISTICHE MECCANICHE E PROPRIETÀ STRUTTURALI.....	48

<b>CAPITOLO 3: LA STRUTTURA BIO-ISPIRATA.....</b>	<b>49</b>
INTRODUZIONE AL CAPITOLO:.....	49
3.1 IL MODELLO CONCETTUALE: “LA STRUTTURA OSTEONICA” .....	50
3.2 DAL MODELLO CONCETTUALE AL LAMINATO OSTEONICO .....	52
3.3 DEFINIZIONE DEI MATERIALI:.....	56
3.3.1 <i>Materiale per l’osteone</i> .....	56
3.3.2 <i>Materiale di riempimento</i> .....	58
3.3.3 <i>Materiale delle pelli esterne</i> .....	59
3.3.4 <i>Materiale laminato comparativo</i> .....	61
3.3.6 <i>Materiale per la matrice</i> .....	62
<b>CAPITOLO 4: PRODUZIONE DEI LAMINATI.....</b>	<b>64</b>
INTRODUZIONE AL CAPITOLO:.....	64
4.1 PRODUZIONE DELLA STRUTTURA OSTEONICA .....	65
4.1.1 <i>Dimensionamento di massima</i> .....	67
4.1.2 <i>Metodo 1: “Single osteon attachment”</i> .....	69
4.1.3 <i>Metodo 2: “Long tube – frame sewing”</i> .....	73
4.1.4 <i>Confronto dei metodi</i> .....	76
4.2 L’IMPREGNAZIONE: TEST PRELIMINARI.....	78
4.2.1 <i>VARI a singolo vuoto</i> .....	79
4.2.2 <i>VARI a doppio vuoto (vetro interposto)</i> .....	81
4.2.3 <i>VARI a doppio vuoto (plexiglass interposto)</i> .....	84
4.2.3 <i>Conclusioni test preliminari</i> .....	86
4.3 SVILUPPO DEL SISTEMA D’INIEZIONE .....	88
4.3.1 <i>Il sistema d’iniezione a doppio plexiglass</i> .....	89
4.3.2 <i>Le evoluzioni del sistema</i> .....	95
4.4 PRODUZIONE DEI LAMINATI .....	97
4.4.1 <i>Laminato osteonico 1</i> .....	98
4.4.2 <i>Laminato osteonico 2</i> .....	101
4.4.3 <i>Laminato osteonico 3</i> .....	104
4.4.5 <i>Laminato comparativo</i> .....	107
4.5 CONSIDERAZIONI FINALI E POSSIBILI MIGLIORAMENTI.....	111

<b>CAPITOLO 5: TEST E ANALISI DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE .....</b>	<b>113</b>
INTRODUZIONE AL CAPITOLO:.....	113
5.1 LA CAMPAGNA SPERIMENTALE .....	114
5.2 DEFINIZIONE E PREPARAZIONE DEI PROVINI .....	116
5.2.1 <i>Definizione delle dimensioni:</i> .....	116
5.3 PROVA DI FLESSIONE.....	124
5.3.1 <i>Descrizione della prova</i> .....	124
5.3.2 <i>Macchine di prova e strumenti di misura</i> .....	125
5.4 PROVA DI TRAZIONE.....	126
5.4.1 <i>Descrizione della prova</i> .....	126
5.4.2 <i>Macchine di prova e strumenti di misura</i> .....	127
5.5 PROVA DI COMPRESSIONE.....	128
5.5.1 <i>Descrizione della prova</i> .....	128
5.6 ANALISI DEI RISULTATI: FLESSIONE A TRE PUNTI.....	129
5.6.1 <i>Flessione longitudinale struttura osteonica</i> .....	129
5.6.2 <i>Flessione trasversale struttura osteonica</i> .....	133
5.6.3 <i>Flessione longitudinale struttura comparativa</i> .....	135
5.6.4 <i>Flessione trasversale struttura comparativa</i> .....	137
5.6.5 <i>Confronto dei risultati</i> .....	140
5.7 ANALISI DEI RISULTATI: TRAZIONE .....	142
5.7.1 <i>Trazione longitudinale struttura osteonica</i> .....	142
5.7.2 <i>Trazione trasversale struttura osteonica</i> .....	145
5.7.3 <i>Trazione longitudinale struttura comparativa</i> .....	147
5.7.4 <i>Trazione trasversale struttura comparativa</i> .....	149
5.7.5 <i>Confronto dei risultati</i> .....	151
5.8 ANALISI DEI RISULTATI: COMPRESSIONE.....	153
5.8.1 <i>Direzione longitudinale, struttura osteonica</i> .....	153
5.8.2 <i>Compressione trasversale struttura osteonica</i> .....	155
5.8.3 <i>Compressione longitudinale struttura comparativa</i> .....	157
5.8.4 <i>Compressione trasversale struttura comparativa</i> .....	159
5.8.5 <i>Confronto dei risultati</i> .....	161

<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>163</b>
<b>BIBLIOGRAFIA:.....</b>	<b>166</b>

## Introduzione

Il presente lavoro di tesi si inserisce nel contesto di ricerca e sviluppo dei materiali compositi con applicazioni strutturali.

Il progetto è stato svolto in collaborazione con il dipartimento di *Polimeri fibrorinforzati* della Technical University of Clausthal, in Germania. La prima fase della ricerca, riguardante la progettazione del materiale e la sua realizzazione, è stata svolta presso i laboratori dell'Università Tedesca, dove ho trascorso un periodo di cinque mesi in cui ho concretizzato tutte le fasi del progetto che hanno portato alla realizzazione dei laminati. Dopo questa fase è seguito il lavoro di analisi del materiale che è stato svolto presso il dipartimento di *Meccanica* del Politecnico di Milano.

La ricerca si basa su un nuovo approccio progettuale che è quello della bionica, scienza creativistica e inter-disciplinare non convenzionale, per la risoluzione di problemi ingegneristici.

Lo scopo del lavoro è di identificare un'organizzazione innovativa del rinforzo, bio-ispirata appunto, con la funzione di replicare i meccanismi di rottura osservati nel materiale biologico di riferimento, l'osso corticale del femore umano. Le fasi del progetto possono essere sinteticamente raggruppate nelle seguenti sezioni: la ricerca bionica, la progettazione della struttura bio-ispirata, la produzione del materiale e la caratterizzazione statica del composito innovativo.

Il materiale biologico oggetto di questa ricerca bionica è l'osso umano, che per le sue caratteristiche meccaniche e funzionali è stato preso come fonte d'ispirazione. In particolare, la struttura osteonica, presente tra il livello dimensionale della micro e macro scala, costituisce il modello concettuale cardine del composito bio-ispirato, che ripresenta internamente, su un livello dimensionale maggiore, una versione semplificata della struttura.

Studi affermano che l'osteone, elemento fondamentale della struttura dell'osso, gioca un ruolo chiave nei confronti della deflessione della frattura. L'obiettivo di questo lavoro di tesi è, quindi, trasportare tale proprietà in un materiale artificiale allo scopo di migliorarne le caratteristiche meccaniche finali.

La fase di progettazione consiste nella determinazione: della forma strutturale semplificata, delle sue dimensioni caratteristiche, delle fibre del rinforzo e nella scelta della resina. Le problematiche affrontate in questa sezione sono di carattere pratico e sono legate a questioni di fattibilità quali: reperibilità delle fibre, economicità del prodotto e in particolare la fattibilità tecnologica.

La produzione del materiale è una delle fasi cardine del progetto di tesi e si articola a sua volta in tre macro attività: la produzione del tessuto osteonico, lo sviluppo del sistema d'iniezione e la produzione dei laminati.

Il nuovo tessuto è costituito, da una struttura tubolare fibre miste di vetro e carbonio che necessita dell'assemblaggio manuale delle parti. È stato sviluppato in tal senso un procedimento che consentisse di svolgere le operazioni, nel modo più rapido e preciso possibile. A seguire, è stata condotta una vasta campagna sperimentale con lo scopo di definire le caratteristiche d'impregnazione della struttura e di determinare le soluzioni ottimali di processo. In tal senso, e sotto richiesta del Dipartimento di *Polimeri fibro-rinforzati*, è stato sviluppato un nuovo sistema d'iniezione basato sulla tecnica del Vacuum Infusion Process.

Il nuovo apparato, che sfrutta il vuoto generato in uno stampo di materiale plastico per indurre il flusso di resina tra le fibre asciutte del composito, si propone come un'alternativa al metodo tipico d'iniezione usato per la produzione di laminati per uso sperimentale. Lo sviluppo è stato eseguito considerando come obiettivi: l'economicità del sistema, la semplicità di utilizzo, la riutilizzabilità e la qualità del prodotto ottenibile.

Il sistema è stato quindi impiegato per la produzione di quattro laminati, tre dei quali a struttura osteonica e uno con organizzazione tradizionale a strati di tessuto sovrapposti.

La fase finale del progetto consiste nella determinazione delle proprietà statiche del composito innovativo. La campagna sperimentale consta di ben quarantasei campioni ripartiti su test per la caratterizzazione delle proprietà tensili, flessionali e a compressione.

Considerata la particolare geometria della struttura sperimentale tali analisi sono eseguite sia in direzione longitudinale sia in direzione trasversale, rispetto all'orientamento della struttura tubolare interna.

La definizione delle proprietà statiche del solo composito bio ispirato non è però sufficiente per comprendere gli effetti che la struttura osteonica ha sulle caratteristiche meccaniche. Per tale motivo, parallelamente sono stati eseguiti test sul laminato a struttura tradizionale che, per coerenza e confrontabilità, è caratterizzato dallo stesso tipo di fibre, stessa percentuale di rinforzo in volume e dal medesimo processo produttivo.

Variazioni dei risultati sono dunque da imputare alla differente organizzazione interna delle fibre di rinforzo. Il lavoro termina riportando: risultati, commenti e considerazioni sui modi di rottura del materiale.

## Capitolo 1: La Bionica

*“Look deep, deep into nature, and then  
you will understand everything better”*

**Albert Einstein**

### Introduzione al capitolo:

Che cosa è la bionica? Di che cosa si occupa? Quali sono le applicazioni e i benefici ottenibili da un tale approccio progettuale?

Queste sono alcune delle domande alle quali s'intende dare risposta nel presente capitolo.

La Natura ha sviluppato in milioni di anni di evoluzione sistemi biologici estremamente complessi ed efficienti. Il processo evolutivo, lento ma costante, ha permesso di ottenere “macchine” biologiche ottimizzate, adatte alle differenti condizioni di esercizio. Il risultato è rappresentato da innumerevoli esempi di sistemi viventi come animali, piante e pesci tutti selezionati attraverso una legge dura ma sempre imparziale che è quella della selezione naturale.

L'idea fondamentale della bionica o bio-mimetica è quella quindi, di progettare e innovare attraverso l'osservazione e analisi di ciò che già esiste.

Nel capitolo che segue, sarà dapprima definita la bionica come scienza interdisciplinare e attraverso una serie esempi si cercherà di definirne scopi e obiettivi. In seguito, si farà un breve cenno alla sua evoluzione nel tempo, dalla nascita ufficiale, fino ad arrivare ai giorni nostri nonché il trend futuro.

A seguire si presenterà uno schema semplificato del procedimento metodologico di tale approccio, descrivendo principi, metodi e soggetti che ve ne prendono parte.

Nella fase conclusiva sarà messo in evidenza il contesto ingegneristico del presente lavoro e anche quello biologico che si intende analizzare prima e trasportare poi in una soluzione progettuale innovativa.



## 1.1 Definizione/i e Obiettivi

Il termine bionica deriva dal greco ed è composto dall'unione di "bion" che significa "unità di vita" e il suffisso "ic" che significa "come, simile a" da cui quindi si deduce il significato complessivo "come la vita" [1].

Per quanto la bionica sia nata ufficialmente da pochi anni, molti autori si sono occupati dell'argomento spiegando questa nuova disciplina con parole diverse e soprattutto da punti di vista differenti a seconda della loro provenienza professionale, vediamo alcune delle principali:

*"La bionica si propone di comprendere le strutture, i meccanismi, le funzioni delle piante, degli animali, dell'uomo allo scopo di ideare e realizzare nuove applicazioni per complessi meccanici e dispositivi vari." (Maraldi, 1963)*

*"La bionica studia il meccanismo delle "unità vitali" per trarne applicazioni pratiche." (I. Mironov, 1970)*

*"E' lo studio dei sistemi e organizzazioni naturali, con il proposito di analizzare e recuperare soluzioni di tipo funzionale, strutturale e formale, per applicarli alla risoluzione di problemi umani, attraverso la creazione di tecnologie e la creazione d'oggetti o di sistemi d'oggetti." (F. Vanden Broeck, 1982)*

Indipendentemente dal contesto storico e quello applicativo la bionica o biomimetica (biomimetics o biomimicry in inglese) è lo studio consapevole dei processi biologici e biomeccanici della natura, come fonte di ispirazione per il miglioramento delle attività e tecnologie umane. La natura viene vista come Modello (Model), Misura (Measure) e come Guida (Mentor) della progettazione degli artefatti tecnici. A volte il processo porta alla replicazione del soggetto, si parla in questo caso di "copia omologica", in altre diventa necessaria una semplificazione e si sintetizzano parametri essenziali in quello che si definisce "modello simulato", in altre ancora quello che si trasporta è solo il principio.

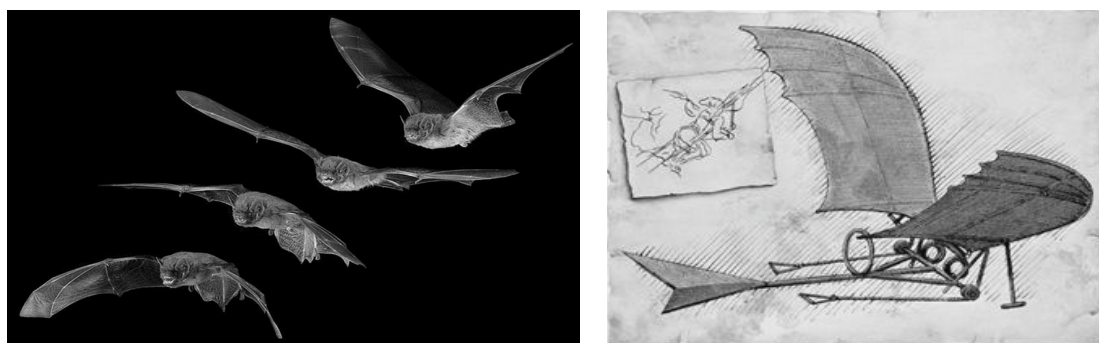
La bionica quindi si inserisce in un contesto interdisciplinare, tra Biologia e Ingegneria in cui alla prima è affidato l'obiettivo di comprendere metodi e sistemi biologici, mentre alla seconda è affidato l'arduo compito di modellare e progettare sistemi ingegneristici basati su di essi.

## 1.2 Storia, Evoluzione e Prospettive future

La prima definizione concreta di bionica fu data dal maggiore Jack E. Steel, della Forza Aerea Americana, nel 1960, durante il primo congresso di quest'area di conoscenza, realizzato nella città d'Ohio, negli USA. [1] Egli si riferiva alla bionica come la scienza dei sistemi artificiali che presentano caratteristiche comuni agli esseri viventi, oppure, che hanno il funzionamento basato su sistemi naturali.

Se la bionica, come disciplina formale, non è molto antica, la tendenza umana nell'imitare la natura è semplicemente immemorabile. Da sempre, infatti, l'uomo ha tratto ispirazione dalla natura per scoperte o invenzioni, a testimoniarlo ci sono migliaia di esempi possibili.

Il genio rinascimentale Leonardo Da Vinci già nel lontano 1511 faceva la bionica, quando ispirandosi al volo dei pipistrelli progettò la prima macchina volante, che ora trova una valida applicazione nelle ali di deltaplano.

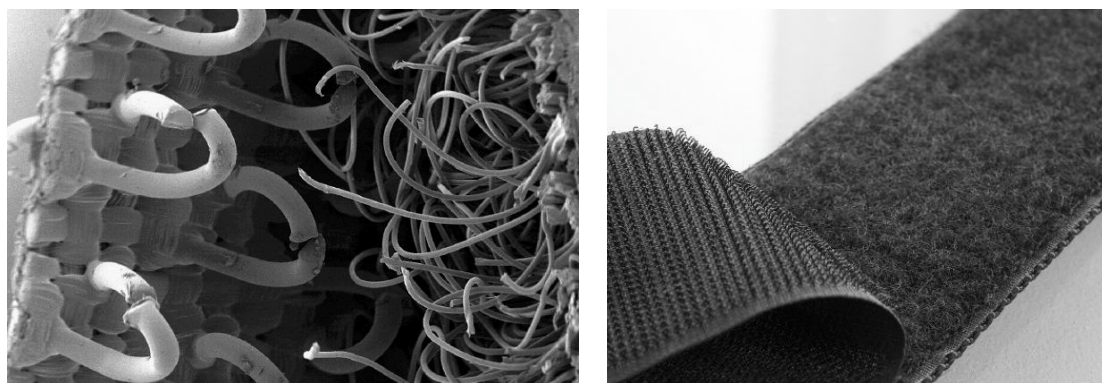


**Figura 1-1:** Fasi di volo del pipistrello. Schizzo della macchina volante di Leonardo da Vinci

Un esempio più recente di scoperta bionica è quello del sistema di chiusura a velcro inventato nel 1950 da parte dello svizzero George de Mestral. Tornando a casa da attività di caccia egli notò alcuni acheni attaccati alle sue calze di lana. L'osservazione a microscopio mostrò che all'estremità delle spine vi erano dei minuscoli uncini che consentivano attraverso i quali si otteneva l'aggancio saldo ma allo stesso tempo rimuovibile con altri tessuti fibrosi.

Ispirandosi a questa forma particolare, Mestral brevettò nel 1955 il famosissimo e utilizzatissimo sistema di collegamento a velcro. Tale sistema si compone di 2 parti, una striscia di tessuto peloso simile al velluto e una altra dotata di uncini flessibili di materiale più duro.

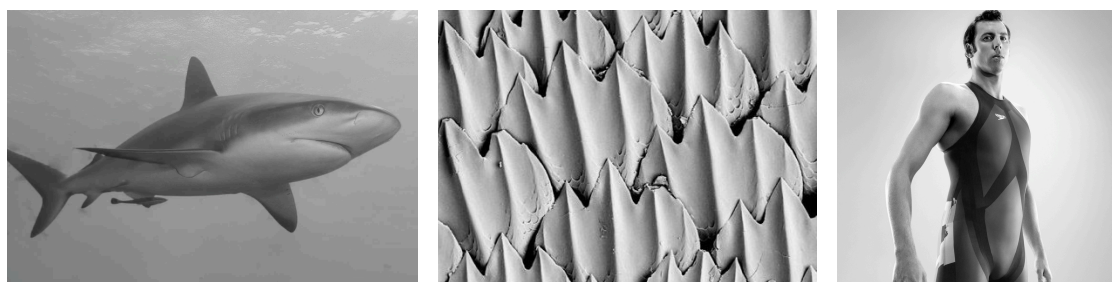
Il vantaggio di questo tipo di collegamento è rappresentato dall'estrema resistenza del collegamento (144 cm<sup>2</sup> reggono fino a 1 tonnellata di peso) unita ad una facilità di apertura che lo rende adatto a moltissime applicazioni.



**Figura 1-2:** Immagine al microscopio delle superfici del velcro. Attacco a velcro. Da sinistra a destra si notano le due superfici una dotata di uncini e l'altra di materiale peloso

Ai giorni nostri, possibilità tecnologiche superiori, permettono ai ricercatori di avere gli strumenti adatti per studiare in modo più approfondito e dettagliato ciò che è presente in natura. Ai miglioramenti tecnologici nel campo dell'osservazione sono inoltre coincisi anche altrettanti passi avanti per quanto riguarda la capacità di calcolo e per le tecnologie di processo e di produzione.

Un esempio piuttosto recente di progettazione bionica è quella del costume sviluppato nel 2004, nei laboratori Speedo Aqualab. Questa nuova generazione di costumi è stata costruita copiando la struttura della pelle dello squalo osservata a microscopio. Il tessuto ricavato consente di aumentare il flusso dell'acqua sul corpo e di ridurre l'attrito, queste caratteristiche lo rendono adatto a massimizzare le performance nelle competizioni agonistiche.



**Figura 1-3:** Lo squalo, capace di raggiungere velocità di addirittura 50 km/h. Struttura della pelle dello squalo a microscopio. Il costume FASTSKIN FS II di nuova generazione

I tempi di ricerca molto lunghi, l'enorme complessità di quello che la natura ha assemblato, sono la spiegazione al fatto che la bio-mimetica non si sia ancora sviluppata al meglio delle proprie potenzialità. Il crescente sviluppo delle nanotecnologie, ha aperto le porte a una nuova frontiera per quando riguarda il livello dimensionale su cui è possibile indagare e operare. Queste interessanti e inesplorate possibilità, trovano negli ultimi anni sempre maggiore interesse sia da parte di ricercatori che dei loro sostenitori economici.

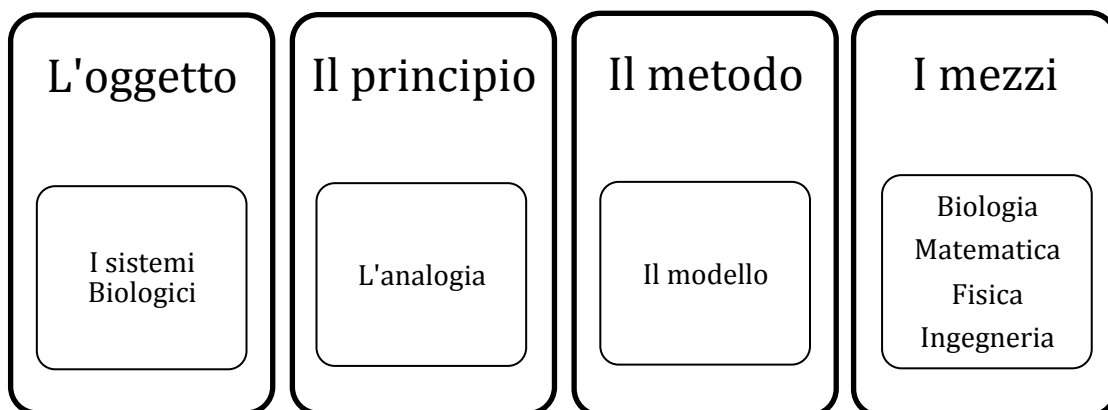
### 1.3 Il Metodo, il principio e gli attori della Bionica

La bionica è una scienza creativistica e inter-disciplinare molto complessa, essenzialmente rappresenta un approccio progettuale non convenzionale alla risoluzione di problemi ingegneristici. La sua natura innovativa e l'estrema multidisciplinarietà richieste rendono complesso tracciare delle linee guida e identificare un metodo rigoroso che sia applicabile sistematicamente. A tale scopo è utile identificare preliminarmente quelli che sono gli "ingredienti" principali e le loro funzioni nel contesto della progettazione.

L'oggetto primario della Bionica sono i sistemi biologici, è infatti sulla base della loro comprensione che ci si propone di studiare soluzioni tecniche innovative.

Il principio cardine che sta alla base della bionica è quindi l'analogia ossia la capacità di un concetto di applicarsi a diversi enti indentificandone contenuti in parti diversi e in parte uguali, in altre parole nel concetto di analogo sia gli elementi comuni che quelli differenti degli enti a cui esso si riferisce sono unificati logicamente dal medesimo modello. [1]

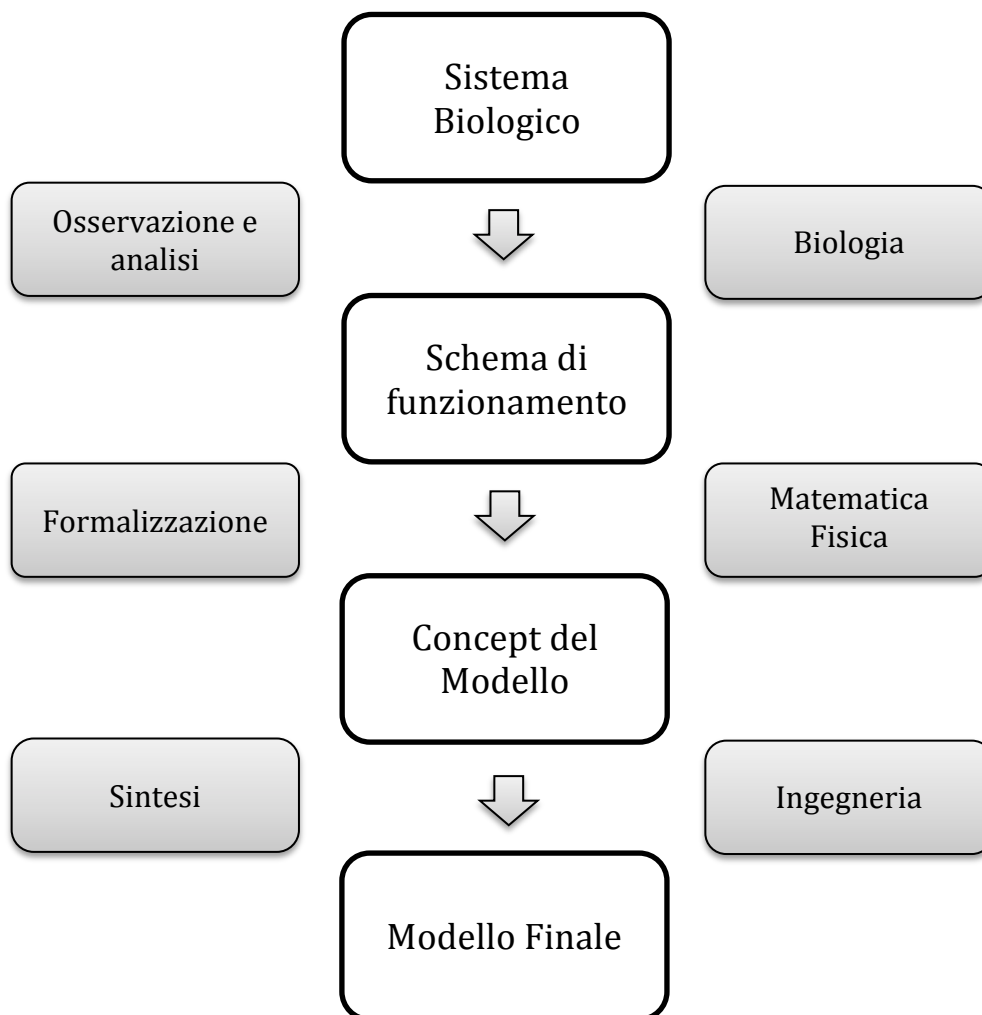
Il metodo fondamentale utilizzato dalla ricerca bionica è sempre la modellazione, che permette la formazione di una struttura "veramente bionica", nel senso di interpretare il modello naturale. Questa modellazione può essere manifestata in vari modi: sulla Matematica, la Geometria, la Fisica, modo Verbale, ecc.



Una volta definiti questi concetti chiave è possibile identificare e tracciare le linee guida tipiche delle ricerche di bionica, che possono essere riassunte come segue:

1. La biologia svolge la prima fase con il suo lavoro di osservazione, studio e analisi degli esseri viventi, con la conseguente redazione di uno schema di funzionamento.
2. La matematica formalizza un modello a partire dallo schema funzionale.
3. La fisica o l'ingegneria sintetizzano quanto sopra in un modello riprodotto la funzione d'interesse.

Per semplicità, si riporta di seguito lo schema concettuale proposto, indicando per ciascuno degli "step" azioni logiche e mezzi scientifici da utilizzare.



Definiti gli ingredienti e le linee guida, per un corretto approccio progettuale, è necessario definire nel dettaglio un procedimento sistematico che consideri le problematiche reali che un ingegnere si trova ad affrontare nel processo creativistico della bionica. A tale scopo è stato elaborato il seguente schema ricorsivo, in cui l'attività progettuale è stata divisa in due macro-sezioni.

La prima, chiamata "Analisi preliminare" ha lo scopo di definire delle esigenze ovvero degli obiettivi funzionali richiesti al prodotto. La seconda denominata "Progetto" ha lo scopo di tradurre le richieste preliminari in un prodotto funzionale e bio-ispirato.

Di seguito si riportano i passi da seguire: dalla definizione del problema alla sua ingegnerizzazione e messa in produzione.

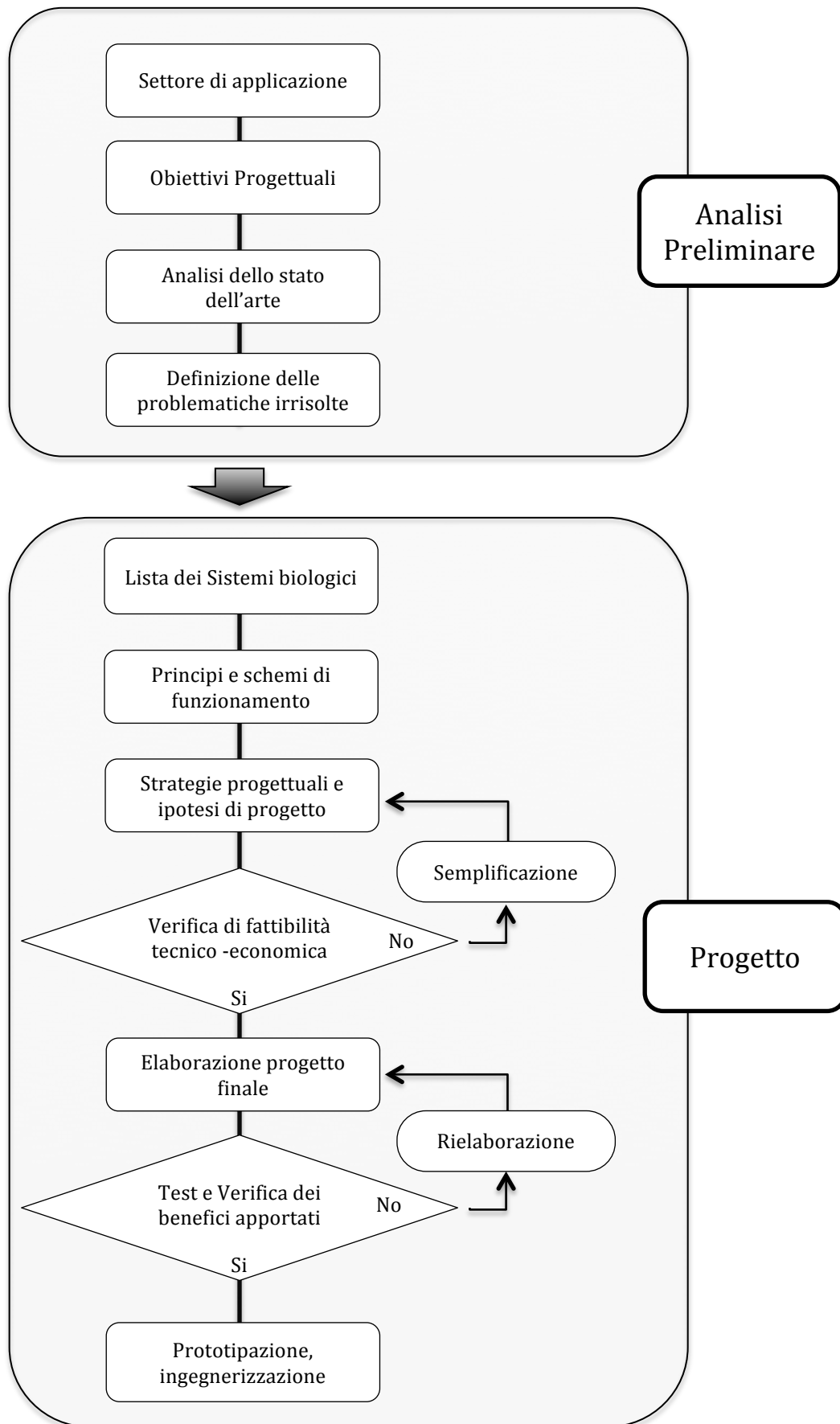
### **Procedimento sistematico:**

#### ***Analisi preliminare.***

1. Analisi dell'ambito di riferimento e del settore di applicazione.
2. Interpretazione del "brief" di progetto come lista di "problemi progettuali" da confrontare con i riferimenti biologici.
3. Analisi delle risposte a tali problemi, disponibili nell'ambito degli artefatti e identificazione dei limiti di tali soluzioni.
4. Definizione di uno scenario di esigenze non risolte di riferimento.

#### ***Progetto:***

5. Elaborazione di una lista dei sistemi biologici che, in base a una metafora biologico-progettuale, sembrano aver affrontato le esigenze irrisolte e individuazione delle possibili analogie.
6. Selezione del riferimento biologico, o dei riferimenti biologici, ritenuti maggiormente aderenti alle esigenze e in grado di superare i limiti degli artefatti esistenti.
7. Traduzione dei principi, delle strutture, delle logiche, dei codici e delle strategie tratte dai riferimenti biologici selezionati in strategie progettuali, concept, ipotesi di design.
8. Verifica della fattibilità tecnico-economica con particolare attenzione alle opportunità offerte dalle nuove tecnologie e dai nuovi materiali.
9. Elaborazione della soluzione progettuale finale. Integrazione di soluzioni di origine tecnologica e soluzioni di origine biologica. In questa fase acquista particolare importanza il trasferimento tecnologico
10. Verifica del contributo di miglioramento apportato rispetto ai limiti e alle esigenze rilevati nella fase meta progettuale.
11. Prototipazione, ingegnerizzazione, brevetto e messa in produzione.



## 1.4 La Bionica e le strutture dei materiali compositi

I materiali compositi nell'ingegneria, sono materiali innovativi ottenuti attraverso l'unione di due o più costituenti tra loro chimicamente differenti, che mantengono la propria identità nel composto finale senza dissolversi o fondersi. Tale unione consente di ottenere un nuovo materiale il cui comportamento differisce da quello dei materiali che lo costituiscono.

Rispetto ai materiali tradizionali, come le leghe metalliche, i ceramici e i polimeri, nei compositi è possibile agire direttamente sulle caratteristiche meccaniche. Agendo ad esempio sul tipo di costituenti, sulle loro quantità relative e sulla geometria delle fasi disperse è possibile esaltare le qualità desiderate e attenuare quelle ritenute più critiche.

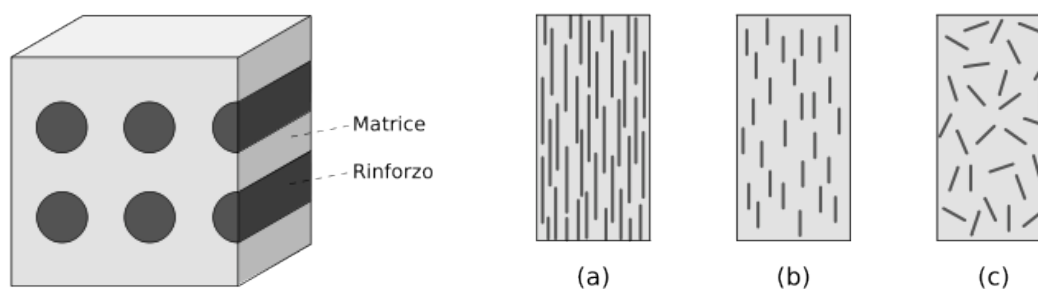
La gran parte dei materiali compositi nell'ingegneria è costituita da sole due fasi: la matrice e il rinforzo. Alla matrice compete il ruolo fondamentale di tenere in posizione le fibre di rinforzo, nonché di trasferirvi le sollecitazioni. Le fibre invece sono le principali responsabili delle caratteristiche meccaniche del materiale in quanto a loro è affidato il compito di resistere ai carichi applicati.

Il vantaggio di poter "costruire" il materiale è però accompagnato da svantaggi sostanziali. Rispetto ai materiali classici, quelli compositi sono "non omogenei" e soprattutto "non isotropi", ciò oltre ad influenzare il comportamento meccanico del materiale ha come effetto negativo quello di complicare considerevolmente la trattazione analitica necessaria all'analisi e alla previsione del comportamento meccanico dei componenti meccanici.

La possibilità di agire sulla geometria macroscopica con cui arrangiare il rinforzo all'interno della matrice, introduce un ulteriore parametro di interesse con potenzialità benefiche ancora inesplorate e da definire.

È possibile ottenere un componente che resista a torsione o ad impatto o a una qualsiasi altra caratteristica meccanica di interesse meglio di un altro, variando esclusivamente l'organizzazione geometrica con cui si organizzano le fibre?

È in questo contesto, che si ambienta la ricerca bionica di questa tesi.

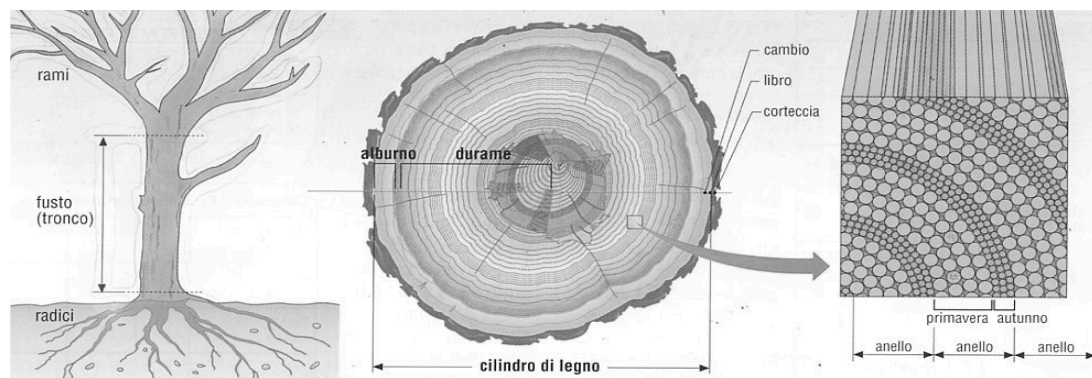


**Figure 1-4:** Schema semplificato dei materiali compositi, matrice e rinforzo. A destra si osservano tre possibili disposizioni delle fibre all'interno della matrice [3]

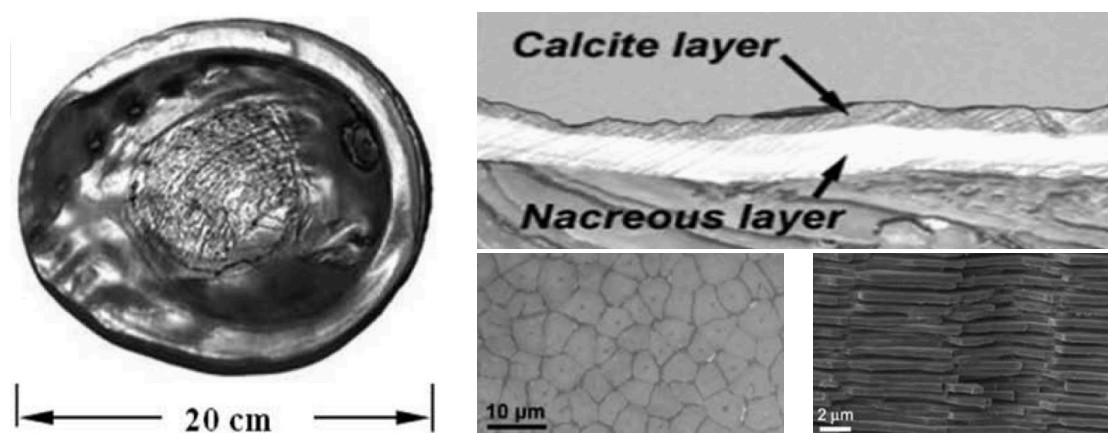


Considerando dunque l'approccio bionico, il campo d'indagine si focalizza su quei materiali naturali che presentano applicazioni strutturali, sulla loro analisi morfologica e strutturale e sugli effetti che tali strutture hanno o possono avere in riferimento al comportamento meccanico del materiale, considerando livelli di dettaglio che variano dall'ordine dei m a quello dei nm.

In natura la quasi totalità dei materiali che costituiscono i sistemi biologici sono di tipo composito, e l'organizzazione dei costituenti sembra giocare un ruolo chiave in funzione delle caratteristiche meccaniche offerte. Ovviamente la molteplicità delle funzioni a cui deve assolvere una struttura biologica non sono paragonabili a quelle richieste in ambito tecnico scientifico e neanche è pensabile di poter replicare o ciò che è presente in natura. L'ingegnere deve infatti considerare i limiti tecnologici ed economici che caratterizzano il mondo tecnico. I sistemi biologici da cui attingere informazioni utili sono innumerevoli. Si possono considerare ad esempio i molteplici sistemi vegetali come alberi e piante, o ancora le strutture di protezione come quella della madre perla e la corazzina protettiva delle tartarughe o ancora la struttura gerarchica presente nelle ossa dello scheletro.



**Figura 1-5:** Da sinistra a destra troviamo, struttura esterna dell'albero, sezione del tronco, modello semplificato della struttura interna.



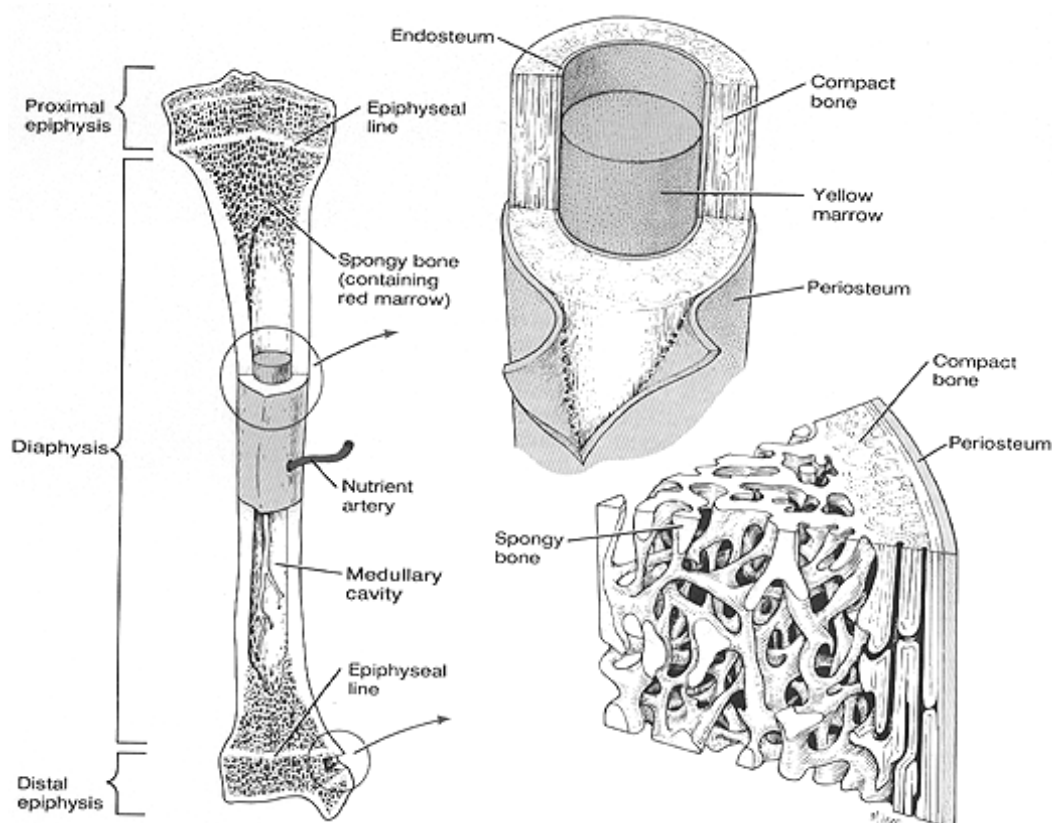
**Figure 1-6:** La struttura della madreperla consente di ottenere delle ottime caratteristiche ad impatto. A sinistra le immagini a microscopio mostrano una disposizione lamellare particolare. [4]

Tra questa moltitudine di sistemi biologici, nella trattazione che segue ci si concentrerà sull'analisi della struttura delle ossa umane. Un materiale che da sempre ha destato interesse per la sua estrema complessità.

Alcuni ricercatori hanno rilevato attraverso delle prove sperimentali le basilari caratteristiche meccaniche delle ossa. Ad esempio test condotti sul femore umano hanno stabilito che sebbene le caratteristiche meccaniche non siano eccezionali questo materiale composito presenta un migliore comportamento a compressione rispetto a quello di trazione, ciò in accordo con quelli che sono i carichi dominanti a cui è sottoposto. Si è rilevato infatti che la struttura dell'osso, in continua evoluzione durante la crescita del soggetto si organizza secondo i carichi dominanti.

Quali sono gli effetti del tipo di organizzazione microstrutturale delle ossa? È possibile riportare un modello semplificato che possa simulare e riprodurre il comportamento basilare?

Queste sono le domande a cui si cercherà di dare risposta durante il presente lavoro di tesi.



**Figura1-7:** Sezione di un femore umano. In evidenza le due macro tipologie di osso, quello spugnoso (alle estremità) e quello compatto (zona centrale). [5]

## Capitolo 2: I Compositi e la struttura dell'osso

### Introduzione al capitolo:

Secondo lo schema logico sviluppato nel capitolo precedente, la prima fase di progettazione bionica consiste nello svolgere una ricerca preliminare. Tale ricerca si articola dapprima sull'osservazione dello stato dell'arte nel settore di applicazione e successivamente sullo studio e analisi del sistema biologico preso come riferimento. Nel capitolo presente si tratteranno due argomenti fondamentali, il primo riguarda i materiali compositi strutturali e il secondo riguarda l'osso come materiale biologico per la ricerca.

I compositi sono sede, in questi anni, di estremo interesse e per le loro caratteristiche stanno sostituendo via via i materiali tradizionali. In questo capitolo s'intende dare una panoramica generale della situazione attuale.

Nei paragrafi successivi si farà una breve carrellata delle tipologie di rinforzo presenti sul mercato, dedicando particolare attenzione alle fibre lunghe. Allo stesso modo si presenteranno i più comuni materiali impiegati come matrice riportandone caratteristiche, proprietà e differenze. La sezione dedicata ai materiali composti verrà conclusa presentando alcuni tra i più comuni processi tecnologici di fabbricazione.

Il secondo macro-argomento del capitolo riguarda l'osso. La comprensione della sua struttura è alla base del processo bionico di progettazione e del presente lavoro di tesi.

Nei paragrafi che seguono si introdurrà l'osso in relazione alla sua funzione nel corpo umano, dopo questa breve e generale introduzione, si descriverà nei dettagli la struttura gerarchica, considerando come riferimento per l'esposizione il femore che tra tutte le ossa dello scheletro è quello più voluminoso e resistente. È, infatti, al livello dimensionale tra macro-micro scala che si osservano le forme strutturali osteoniche dalle quali si trarrà ispirazione per la creazione della struttura bio-ispirata. Definita la struttura gerarchica, si considereranno le proprietà meccaniche statiche del femore come la resistenza a trazione, a compressione, a torsione ecc.

In conclusione, si cercherà di sintetizzare e catalogare le informazioni in uno schema funzionale propedeutico alla successiva fase di redazione di un modello ingegneristico bio-ispirato.

## **2.1 Introduzione: i materiali compositi**

Si definisce composito ogni materiale costituito da due o più fasi che rimangono tra loro chimicamente e fisicamente distinte, separate da una superficie a spessore nullo detta interfaccia. Un composito è quindi per definizione un materiale non omogeneo e non isotropo in considerazione del fatto che le proprietà meccaniche sono fortemente influenzate dalla posizione e dalla direzione con cui il rinforzo è disperso nella matrice. Gli elementi principali che costituiscono un composito sono: il rinforzo, la matrice e l'interfaccia.

Il rinforzo è il principale costituente di un composito ed è l'elemento a cui compete il ruolo di resistere ai carichi applicati. Le proprietà meccaniche finali del materiale, come la resistenza e la rigidità, dipendono in modo rilevante da quelle del rinforzo, motivo per il quale esso varia a seconda dell'applicazione per cui il materiale viene progettato.

La matrice ha la funzione principale di tenere insieme il rinforzo e di trasmettere ad esso lo stato di sforzo, inoltre funge da barriera di protezione dall'ambiente esterno sia in termini chimici che fisici. Tipicamente la matrice è di tipo polimerico, termindurente o termoplastico anche se recentemente sempre più sperimentazioni sono condotte su matrici metalliche e ceramiche che permettono di estendere le applicazioni anche a settori in cui è richiesta buona resistenza ad elevate temperature.

La superficie tra la matrice e il rinforzo prende il nome d'interfaccia e rappresenta una delle zone più deboli del materiale. Lo scopo principale di questo elemento è quello di trasmettere le tensioni senza che si verifichino slittamenti tra i costituenti. Solo un buon accoppiamento interfacciale può permettere alle tensioni di trasmettersi da un costituente all'altro e per questo motivo le caratteristiche dell'interfaccia vengono rigorosamente controllate.

L'obiettivo dei materiali compositi sta quindi nell'ottenere, attraverso l'unione di due o più materiali, uno con caratteristiche meccaniche superiori alla somma dei due, cercando di esaltare i vantaggi dei costituenti e cercando di ridurre gli svantaggi degli stessi.

L'aspetto più affascinante di questi materiali è senza dubbio la possibilità di poter "progettare" il materiale in modo tale che si adatti all'applicazione specifica. In tal senso esistono molti gradi di libertà quali, il tipo di rinforzo, i rapporti quantitativi reciproci tra i componenti, le direzioni delle fibre, la geometria delle stesse e il tipo di matrice.

Queste nuove possibilità determinano un nuovo approccio progettuale, che invece di partire dalle caratteristiche meccaniche dei materiali per identificarne l'applicazione più idonea, parte dai requisiti prestazionali richiesti per giungere alla realizzazione di un materiale che meglio li soddisfi. [6]

### 2.1.1 Le Fibre

La funzione del rinforzo è stata già discussa nel paragrafo precedente, ma è bene notare che in un composito i rinforzi possono essere molteplici; essi differiscono tra loro essenzialmente per: tipo di materiale, geometria e dimensione.

Di seguito si riporta una classificazione dei compositi in base alle configurazioni più comuni presenti allo stato dell'arte.

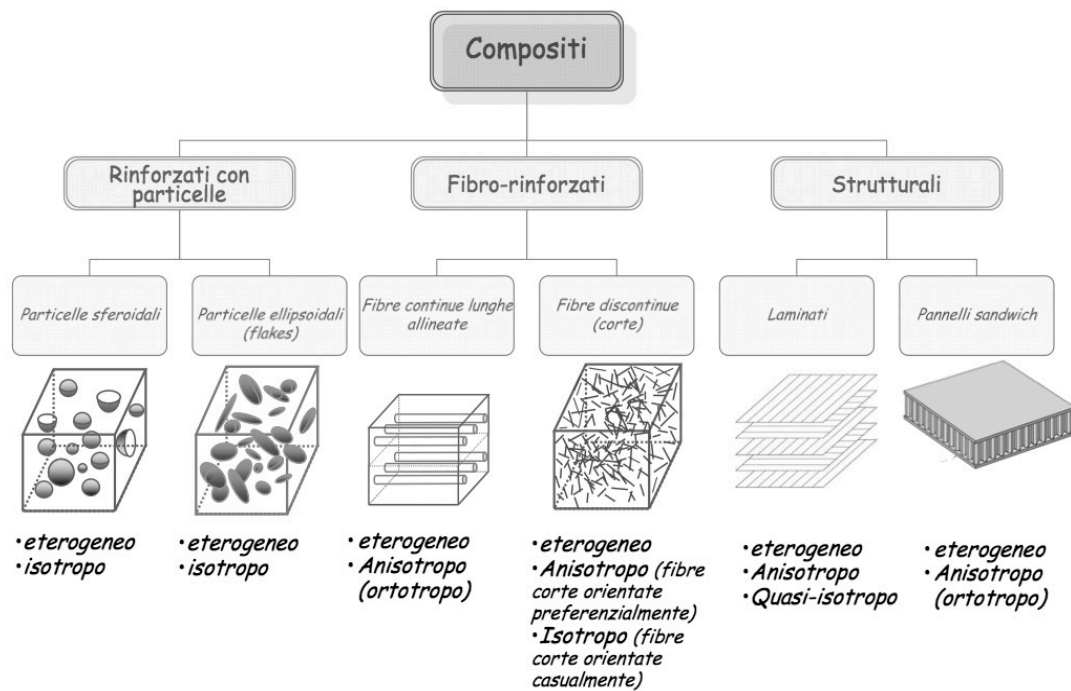


Figure 2-1: Classificazione dei materiali compositi in base a: geometria, dimensione e disposizione del rinforzo

Nel seguente lavoro di tesi si prenderanno in considerazione compositi fibro-rinforzati con fibre lunghe e continue. Tali materiali, generalmente indicati con la sigla FRP, acronimo di Fiber Reinforced Polymer, sono particolarmente indicati per le applicazioni strutturali.

In commercio sono presenti numerosi tipi di fibra, ciascuna adatta a specifiche esigenze progettuali; quelle maggiormente utilizzate sono le fibre di vetro, di carbonio, di kevlar. Le caratteristiche meccaniche di queste fibre sono: alta resistenza a trazione, basso rilassamento meccanico, stabilità chimico-fisica a temperatura ambiente; esse inoltre a differenza dell'acciaio non mostrano nessun fenomeno di snervamento, avendo un comportamento elastico fino a rottura.

In alcuni casi, come nel caso di questo progetto di tesi, è possibile usare un rinforzo con fibre miste (es. vetro e carbonio) al fine di esaltare ancor di più le proprietà meccaniche dei singoli costituenti.

Di seguito si riportano le principali proprietà meccaniche dei rinforzi citati e per confronto anche quelle dei materiali strutturali tradizionali.

Tabella 2-1: Proprietà meccaniche dei rinforzi strutturali più impiegati [7]

	Modulo E [GPa]	R. trazione [GPa]	Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	A%	Poisson	Vantaggi	Svantaggi
<b>Vetro E</b>	72.4	3.45	2.54	4.8	0.2	Resistenza	Rigidezza
<b>Vetro S</b>	86.9	4.3	2.49	5	0.22	Costo	Fatica
<b>Carbonio PAN T-300</b>	231	3.65	1.76	1.4	0.2	Resistenza Rigidezza	Costo
<b>Kevlar</b>	131	3.62	1.45	2.8	0.35	Res. Traz.	Res. Comp
<b>Acciaio</b>	210	0.5	7.8	18	0.3	-	-
<b>Alluminio</b>	70	0.2	2.7	22	0.34	-	-
<b>Polimeri</b>	1-4	0.04-0.1	1.2	-	-	Fatica	Resistenza

Altre fibre inorganiche utilizzate per la fabbricazione dei materiali compositi sono ad esempio quelle di boro, di basalto e di carburo di silicio, mentre tra le fibre di natura sintetica sono particolarmente impiegate quelle a base di alcool polivinilico (PVA), polietilene (PE) ad alto modulo e polipropilene (PP). Si deve evidenziare che crescente interesse stanno destando la sperimentazione di fibre naturali come il lino e la canapa e fibre riciclate di carbonio.

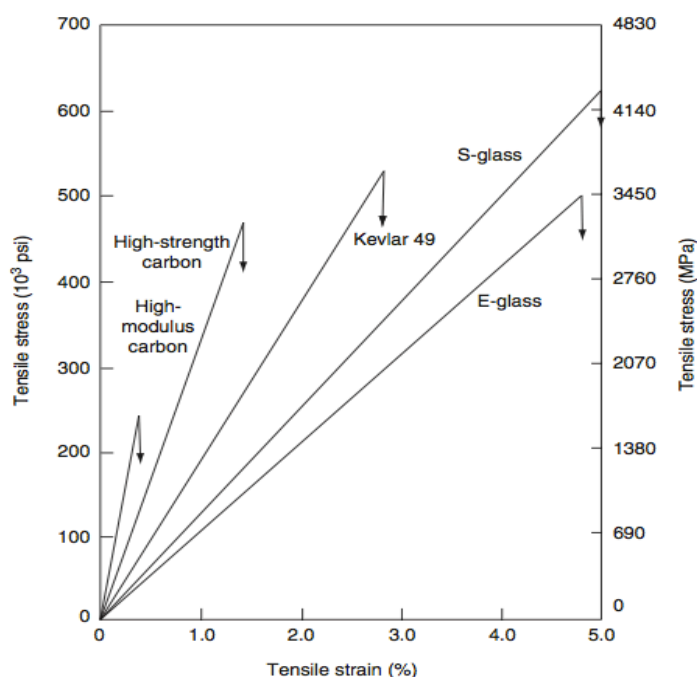


Figura 2.2: Curve sforzo deformazione per alcuni rinforzi [7]

### 2.1.2 La matrice

La matrice, come detto, ha la funzione di proteggere le fibre, di trasmettere ad esse lo stato tensionale sotto carico e non ultimo di costare e pesare poco. I materiali che più si prestano a questi scopi sono i polimeri.

Tra i polimeri si distinguono quelli termoplastici e quelli termoindurenti.

I polimeri termoindurenti sono formati da molecole a catena lunga con una struttura che può essere o totalmente amorfa (disordinata) o semi-cristallina (parte amorfa e parte cristallina). La particolare configurazione strutturale fa sì che questi materiali abbiano un comportamento “reversibile”; possono cioè passare dallo stato liquido a quello solido e viceversa senza per questo perdere le proprietà che lo caratterizzano. Alcuni esempi di polimeri termoplastici sono: polietilene (PE), polistirene (PS), polipropilene (PP), policarbonato (PC), tutti caratterizzati da una struttura semi-cristallina.

**Tabella 2-2: Vantaggi e svantaggi dei polimeri termoplastici**

<b>Polimeri termoplastici</b>	
<b>Vantaggi</b>	<b>Svantaggi</b>
Riciclabilità	Elevata viscosità
Resistente a temperature elevate	Difficile processo di impregnazione
Possibilità riparazione dei manufatti	
Migliore resistenza a impatto	
Tempi di solidificazione minori	

I polimeri termoindurenti hanno invece una struttura amorfa costituita da catene molecolari tridimensionali reticolate, che una volta generate nel processo chimico di reticolazione diventano irreversibili, ossia non possono essere rotte e ricostruite nuovamente, di conseguenza i termoindurenti non possono passare dallo stato solido (reticolato) a quello liquido senza perdere le caratteristiche che lo contraddistinguono. Il polimero termoindurente è ottenuto miscelando a una resina, che è a basso peso molecolare e con bassa viscosità, un catalizzatore che attiva la reazione di reticolazione che eleva il peso molecolare della resina fino alla solidificazione. Tale processo chimico è di tipo esotermico ed è tanto più veloce quanto più la temperatura della miscela viene scaldata. I più comuni polimeri termoindurenti sono le resine epossidiche, resine poliesteri e resine fenoliche, tutte caratterizzate da una struttura di tipo amorfo.

Tabella 2-3: Vantaggi e svantaggi dei polimeri termoindurenti

Polimeri termoindurenti	
Vantaggi	Svantaggi
Lavorazioni a basse temperature	Non riciclabili
Bassa viscosità	Minori temperature massime di esercizio
Migliore impregnazione delle fibre	Bassa tenacità
	Assorbimento di umidità

Di seguito si riportano le proprietà meccaniche dei più comuni polimeri termoplastici e termoindurenti.

Tabella 2-4: Proprietà meccaniche dei principali polimeri termoplastici e termoindurenti a confronto [7]

	Densità (g/cm <sup>3</sup> )	Carico di rottura (Kg/cm <sup>2</sup> )	Allungamento a rottura %	Modulo (Kg/cm <sup>2</sup> 10 <sup>-2</sup> )	Resilienza (Kg/cm)
<b>Termoplastici</b>					
Policarbonato	1,2	620\670	80\100	220\250	15\25
Polietilene(PEA)	0,96	220\230	10\100	30\110	8
Polipropilene	0,9	300\370	500\600	120\180	8\12
<b>Termoindurenti</b>					
Epossidica	1,11	140	2\6	200	1\4
Fenolica (carica:cellulosa)	1,45	450\600	0,6\1,0	600\850	6
Poliestere (UP) (carica: fib. di vetro)	1,5\2,0	550\1800	05\1,5	350\1100	40\80

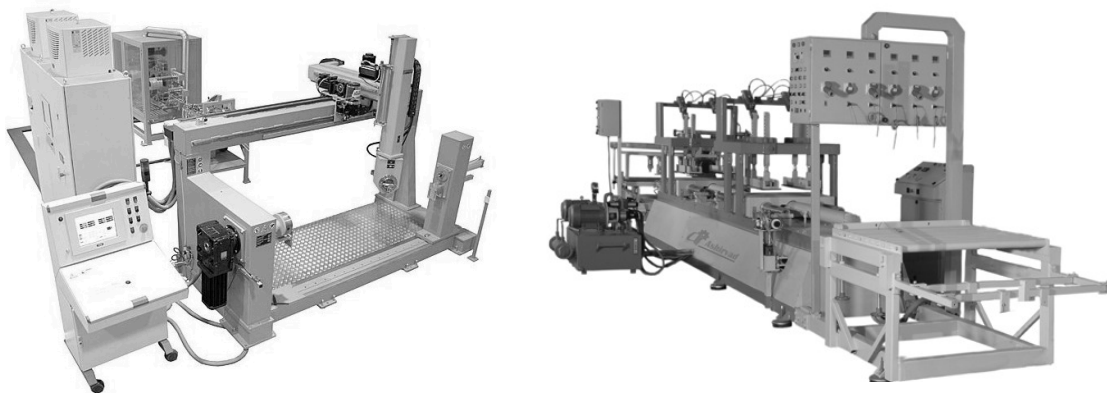


## 2.2 Tecniche di produzione

I processi produttivi dei materiali compositi sono molteplici e la scelta di quello più adatto è funzione di fattori quali: la forma del manufatto, l'orientamento delle fibre, il tipo di matrice (termoplastica o termoindurente), le dimensioni del componente e i volumi produttivi.

Senza dilungarsi troppo nella descrizione dei singoli processi, si elencano di seguito i principali metodi di fabbricazione attualmente in commercio, soffermandosi più nel dettaglio sul VARI (Vacuum Assisted Resin Infusion), processo utilizzato nel presente lavoro.

- Vacuum Infusion
- Filament Winding
- Manual Drafting
- Resin Transfer Molding (RTM)
- Pultrusion
- Bulk Casting
- Centrifugal Casting
- Continuous Molding
- Continuous Profile



**Figure 2-3:** A sinistra una macchina per "filament winding" per la ricerca e sviluppo di prototipi, a destra invece una macchina operativa per la pultrusione.

### 2.2.1 V.I.P. - Vacuum Infusion Process

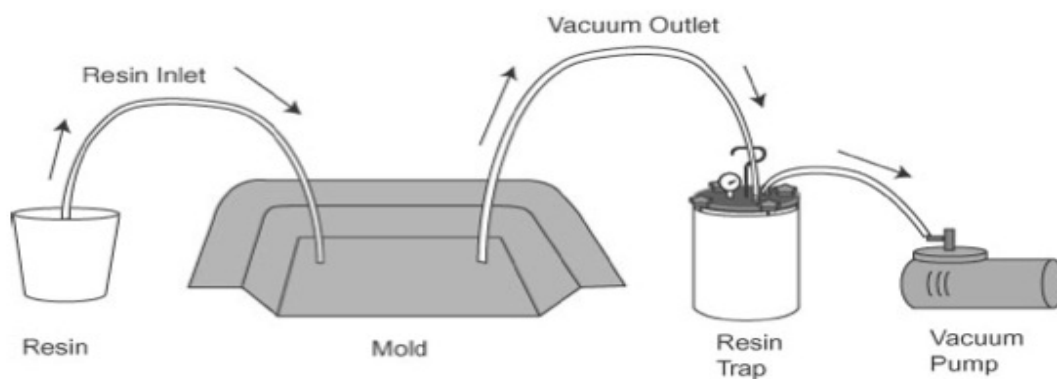
Il V.I.P, vacuum infusion process, è una tecnica che usa il vuoto come spinta motrice per guidare la resina all'interno di un laminato. Il rinforzo è posato a secco all'interno dello stampo e il vuoto viene applicato precedentemente all'iniezione della resina. Una volta che il vuoto è stato raggiunto, aprendo la valvola di mandata la resina scorre attraverso il tubo e viene letteralmente aspirata all'interno della zona depressurizzata, dove per effetto del gradiente di pressione è obbligata ad attraversare per il rinforzo che viene quindi impregnato.

Una volta che la resina ha completato il percorso, quella in eccesso viene evacuata attraverso il tubo di aspirazione in un apposito contenitore.

Fino al termine del processo di solidificazione (curing) all'interno dello stampo è mantenuto il vuoto o una pressione ben determinata in modo tale che le microbolle di aria intrappolate all'interno del laminato possano essere espulse verso l'esterno.

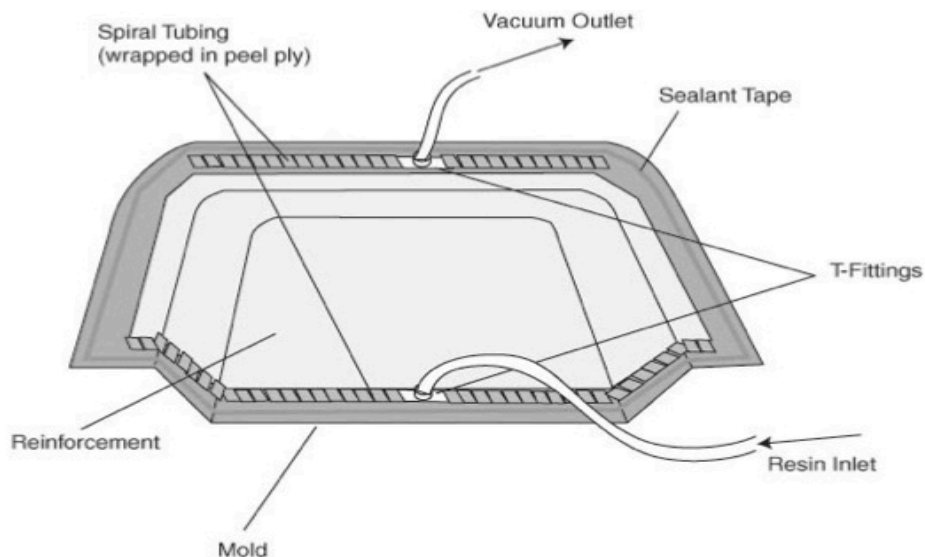
L'intero apparato è costituito da un numero limitato di elementi, i principali sono:

- La pompa per la generazione del vuoto
- Vaso a tenuta stagna ove raccogliere la resina in eccesso
- Tubi di collegamento lato resina e lato pompa
- Rubinetti per la gestione delle operazioni di apertura e chiusura
- Contenitore per la resina (lato iniezione)
- Stampo o foglio plastico
- Materiale sigillante



**Figure 2-4:** Schema semplificato del "Vacuum Process Sistem", in evidenza: la pompa, lo stampo, i barattoli per la resina in ingresso e in uscita e i relativi tubi di collegamento [9]

Se la forma del manufatto è complessa, lo stampo viene realizzato in alluminio per mezzo di macchine operatrici come frese, torni, trapani a colonna ecc. Nel caso invece di laminati piani, che sono tipicamente usati per lo studio e la caratterizzazione di un materiale, il processo prevede l'impiego di una semplice "busta" in materiale plastico, che viene disposta al di sopra del rinforzo e successivamente sigillata con materiali opportuni.



**Figure 2-5:** Dettaglio dello stampo: nella parte centrale viene disposto il rinforzo asciutto. Si fanno notare i tubi a spirale lato resina che permettono di meglio distribuire il flusso di resina. [9]

Il VIP fornisce una serie di miglioramenti rispetto ai classici metodi d'infusione manuali in "sacco" tra cui:

- Maggior contenuto in volume del rinforzo (60% contro 45%)
- Basso contenuto di micro-vuoti (meno dell'1%)
- Minor spreco di resina
- Sistema poco costoso
- Processo pulito

Come ogni metodo di fabbricazione anche il VIP non è esente da inconvenienti.

- Set-up complicato
- Set-up dipendente dal manufatto
- Rapporto in volume fibra resina non costante
- Facile rovinare una parte
- Processo di miglioramento basato sugli errori

Sebbene il metodo sia caratterizzato da una certa ripetibilità, per ottenere dei buoni risultati è necessaria esperienza e soprattutto la conoscenza dei parametri che influenzano tale processo; infatti se il fenomeno fisico che sta alla base di questo processo è estremamente semplice da comprendere, i parametri che lo influenzano sono molteplici e interconnessi tra loro.

Di seguito si riporta una breve trattazione qualitativa di tali fattori, utile a comprendere la fase successiva del lavoro svolto. Per una più approfondita trattazione analitica si rimanda a testi specifici in quanto tale livello esula dallo scopo di questo lavoro. [8]

I principali parametri che governano il processo sono:

- Pressione d'iniezione
- Permeabilità
- Tempo di cristallizzazione della resina
- Forma della zona d'iniezione

#### **La pressione d'iniezione:**

Il livello di depressione generata durante l'infusione influenza la velocità con cui la resina percorre il rinforzo in quanto modifica il livello di compattezza delle fibre, producendo un differente rapporto tra matrice e rinforzo.

Questo parametro influenza fortemente il tipo di flusso (macroscopico) in quanto più la compattezza aumenta e minori saranno i vuoti tra le fibre.

Di seguito si riporta un grafico sperimentale in cui si nota come al variare della pressione corrispondano rapporti fibre matrice differenti.

#### **La permeabilità delle fibre:**

La permeabilità è la capacità di un corpo di farsi attraversare da un fluido. Durante il processo d'impregnazione delle fibre si possono distinguere due flussi, uno macroscopico, che interessa le regioni tra le fibre, ed uno microscopico, che viceversa interessa la parte interna delle stesse.

Il micro-flusso che interessa le fibre è di tipo capillare e dipende dalla porosità della fibra, ne consegue che fibre di materiale differente avranno permeabilità differenti.

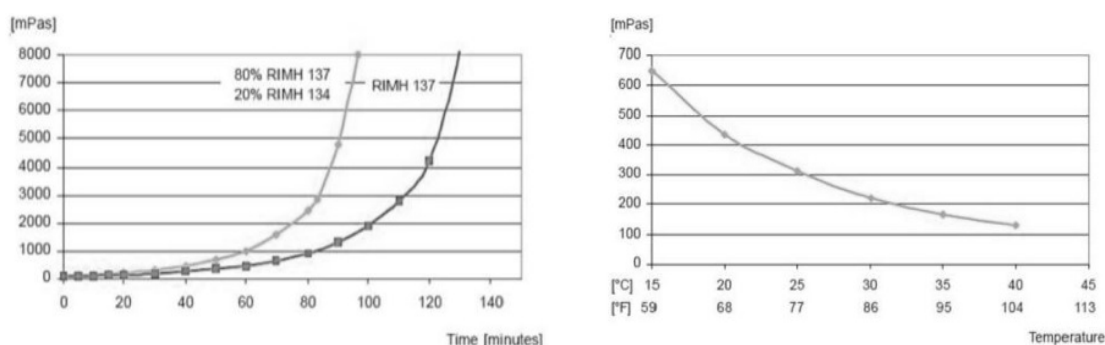
Il macro-flusso è invece quello che interessa le aree vuote tra le singole fibre ed è legato alla sequenza di laminazione e all'orientamento relativo tra direzione d'iniezione e direzione delle fibre. [8]

### Curing Time:

Nel caso in cui la matrice nel composito sia un polimero termoplastico, occorre tenere presente il tempo massimo a disposizione prima che la resina indurisca. Come spiegato nel paragrafo 2.1.2 le resine termoindurenti sono liquide a temperatura ambiente e il processo di ramificazione avviene miscelando la resina ad un reagente. Dal momento in cui il mix è stato amalgamato, la reazione si avvia aumentando la viscosità della resina fino alla solidificazione. Il tempo che la resina impiega a indurire è detto "curing time" e rappresenta il tempo massimo a disposizione per completare l'impregnazione del manufatto; infatti superato un certo livello di viscosità, risulta impossibile sia impregnare il tessuto fibroso sia espellere eventuali presenze di aria all'interno del componente. È importante notare come il tempo di cura sia influenzato principalmente da due fattori, il tipo di catalizzatore e la temperatura del crogiolo.

Come noto anche la viscosità è legata alla temperatura, infatti a temperature maggiori corrispondono viscosità del fluido minori e viceversa.

Tenendo conto di questi vincoli è necessario scegliere il catalizzatore e la temperatura che permettono di completare correttamente l'impregnazione del componente. Di seguito si riportano alcuni grafici utili a comprendere i concetti sopra esposti. I dati sono relativi alla resina Epossidica RIM-R-135 e ai catalizzatori RIMH 134-137.

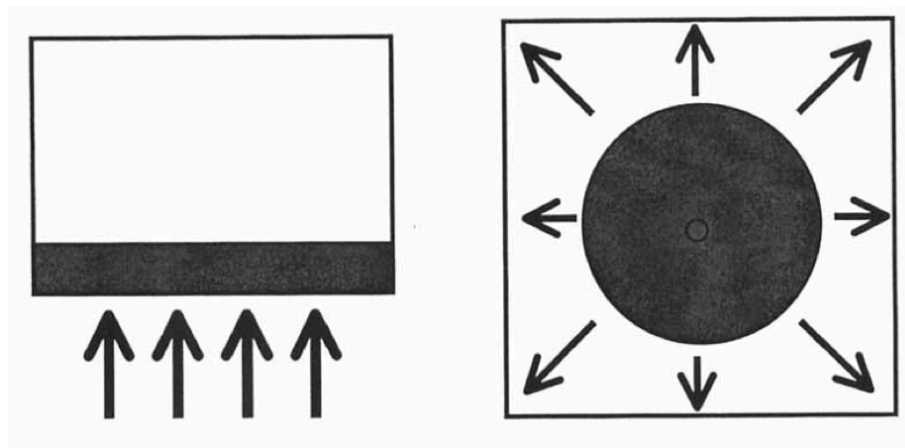


**Figura 2-6:** Andamento della viscosità in funzione del tempo. Temperatura di riferimento 40°C. Viscosità della resina a differente temperatura del crogiolo [Technical datasheet]

**Strategie d'iniezione:**

L'infusione in un manufatto può essere condotta essenzialmente in due modi, sfruttando una lato della lamina o un singolo punto. Nel primo caso il flusso che si instaura è di tipo lineare, ossia il fronte di iniezione si presenta sotto forma di una linea; nel secondo caso il flusso è radiale e la linea del fronte è descritta da una circonferenza.

Indipendentemente dal tipo di strategia scelta, la linea del fronte d'iniezione deve essere il più costante e regolare possibile per evitare la formazione di micro bolle, inoltre il processo deve avanzare evitando la formazione di macro aree non completate isolate dal fronte libero. Aree di questo tipo sono infatti molto difficili da impregnare e la macro bolla di aria risulta essere un danno anche per la parte circostante. [8]



**Figura 2.7:** Strategie di infusione.: "Linea di infusione" (sinistra), "Punto di infusione" (destra) [8]

Tutti i parametri evidenziati collaborano tra loro e influenzano il risultato finale. Nel proseguo di questo lavoro si porrà particolare attenzione alle metodologie sperimentali che hanno permesso di costruire il materiale bio-ispirato oggetto della ricerca di tesi.

## 2.3 Campi di applicazione

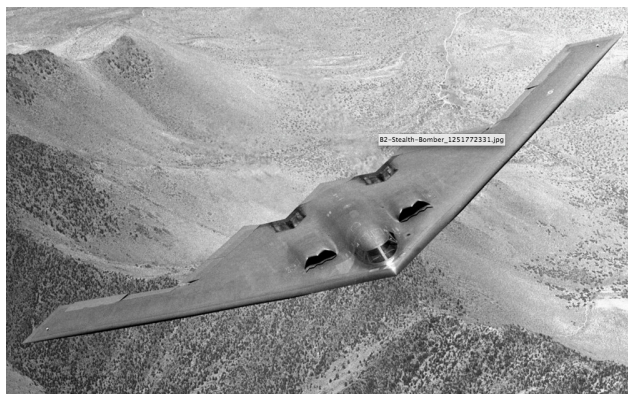
Il potenziale utilizzo di compositi fibrorinforzati esiste in molti campi dell'ingegneria. Il loro effettivo impiego richiede però un'attenta progettazione e uno sviluppo adeguato del processo produttivo, basato sulla comprensione delle caratteristiche meccaniche, fisiche e termiche.

Le applicazioni commerciali e industriali dei materiali compositi con matrice a base polimerica sono così varie che è impossibile elencarle tutte, tuttavia le principali aree per applicazioni strutturali sono: settore aeronautico militare e commerciale, veicoli e strutture per lo spazio, automotive, articoli sportivi, mezzi marini e infrastrutture. In tempi più recenti, un particolare sviluppo ha interessato anche il settore elettronico (es. circuiti stampati) e l'industria medica (es. placche ossee per la fissazione delle fratture e le protesi). [7]

### 2.3.1 L'industria aeronautica

Le maggiori applicazioni dei compositi rinforzati da fibre si osservano nel campo aeronautico militare e commerciale, in cui la riduzione di peso è un aspetto particolarmente critico, al fine di massimizzare prestazioni e ridurre il consumo di carburante.

Con l'introduzione delle fibre di carbonio negli anni 1970, il composito a base di resina epossidica è diventato il materiale primario per la struttura delle ali, della fusoliera e dei componenti d'impennaggio. L'integrità strutturale e la durata di questi componenti hanno spinto a ulteriori sviluppi determinandone un crescente impiego. Alcuni esempi rilevanti nel settore militare sono: la cellula introdotta nel 1982 sul velivolo a decollo vertical "AV-8B" costituito per circa il 25% in peso di materiale composito o anche la "pelle esterna" del "B-2" che conferisce al bombardiere americano le famosissime doti di aereo invisibile ai radar. [7]



**Figure 2-8:** B-2 Bombardiere americano, la cui superficie alare è interamente ricoperta di fibra di carbonio che conferisce al velivolo l'invisibilità ai radar.

Nel settore aeronautico commerciale i primi componenti fibro-rinforzati furono sviluppati dalla Aircraft NASA (ACEE) e nel 1987 tali elementi sono stati messi in servizio su diversi aerei commerciali accumulando milioni di ore di volo e mostrando un ottimo comportamento a fatica e un eccellente adattamento all'esposizione ambientale. [10]

Airbus è stato il primo produttore di aerei commerciali a fare ampio uso di materiali compositi. Nei loro aerei A310, una serie vastissima di elementi furono concepiti in composito e costituivano circa il 10% del peso totale dell'aereo.

Per rendersi conto del sostanziale vantaggio in termini di peso, introdotto dall'impiego di questi materiali si pensi che lo stabilizzatore verticale, che è 8.3 m di altezza per 7.8 m di larghezza alla base, prodotto in materiale composito è di circa 400 kg più leggero dello stabilizzatore verticale in alluminio utilizzato in precedenza. [11]

L'Airbus A320, introdotto nel 1988, fu il primo aereo commerciale a usare una coda interamente in composito. La coda comprendeva: il cono, lo stabilizzatore verticale e quello orizzontale.

L'Airbus A380 introdotto nel 2006 è costituito per circa il 25% del suo peso di materiali fibro-rinforzati. Tra i principali componenti in composito si ricordano: la scatola di torsione centrale (che collega le alette sinistra e destra sotto la fusoliera), la coda, e le superfici di controllo del volo, come i lembi, spoiler, e alettoni.

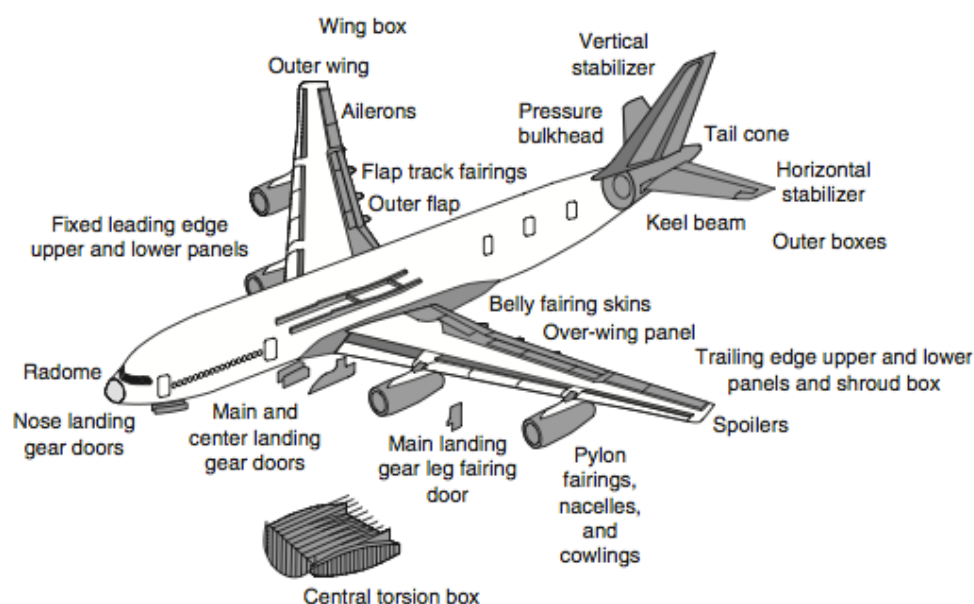


Figure 2-9: Uso di polimeri fibro-rinforzati nell'Airbus A380 [7]



Il crescente utilizzo dei compositi ha interessato non solo aerei di linea di grandi dimensioni, ma anche macchine di dimensioni più contenute, come ad esempio la Lear Fan 2100, un aereo commerciale costruito nel 1983, in cui fibra di carbonio-epossidica e fibra di Kevlar 49-epossidica rappresentavano circa il 70% del peso della cellula dell'aereo. [12]

Un altro esempio pioneristico in tale campo è il “Voyager Rutan”, concepito quasi interamente in materiali compositi e che nel 1986 grazie alla sua leggerezza ha viaggiato per ben 25.000 miglia compiendo il primo giro del mondo senza rifornimento di carburante.

I materiali compositi trovano un'ulteriore applicazione nelle pale del rotore degli elicotteri, costituite da fibre di carbonio e di vetro in una matrice epossidica. Oltre alla riduzione di peso rispetto all'alluminio, i compositi forniscono un migliore controllo delle caratteristiche di vibrazione delle lame, infatti se con l'alluminio le frequenze di torsione delle lame sono controllate principalmente con il metodo classico di distribuzione di massa [13], con i polimeri rinforzati, esse possono anche essere controllate variando il tipo, la concentrazione, la distribuzione e l'orientamento delle fibre lungo la lunghezza della corda della lama. Un altro vantaggio per l'impiego dei compositi nelle lame del rotore è la flessibilità di produzione di questi materiali.

Il motivo principale che ha portato questi materiali ad affermarsi sempre più è sicuramente il risparmio di peso che permette di ridurre consumi di carburante e allo stesso tempo consente un aumento significativo del carico utile.

Il risparmio di peso non è tuttavia l'unico vantaggio dei polimeri rinforzati.

Rispetto alle leghe di alluminio e di titanio il loro utilizzo permette di ridurre il numero di componenti e di dispositivi di fissaggio, il che si traduce in una riduzione dei costi di fabbricazione e di assemblaggio.

La loro maggiore resistenza alla fatica e alla corrosione, determinano una riduzione di costi di manutenzione e di riparazione.

I fattori chiave che ne limitano l'uso è rappresentato dal costo elevato, e dalla relativamente bassa tolleranza al danno da impatto con uccelli nonché dalla suscettibilità al danno da fulmine, inoltre quando vengono utilizzati in contatto con alluminio o titanio, possono indurre la corrosione galvanica nei componenti metallici ciò richiede ulteriori trattamenti anticorrosivi e conseguenti incrementi dei costi.

### 2.3.2 Applicazioni nel settore automobilistico

La politica ecologica dei giorni nostri è stata determinante per l'affermazione dei materiali compositi nel settore automobilistico. Infatti sebbene le emissioni inquinanti siano trattate e abbattute attraverso sistemi dedicati, la riduzione del peso vettura riveste un ruolo predominante sui consumi e quindi sulle emissioni inquinanti.

Il tipo di materiale composito usato nel settore automobilistico commerciale differisce da quello aeronautico essenzialmente per due ragioni: costi e volumi produttivi. Il primo fattore influenza il tipo di rinforzo usato, vetro al posto del carbonio. Infatti se nel settore aeronautico le fibre di carbonio rappresentano il materiale per eccellenza, in quello automobilistico è la meno costosa fibra di vetro ad essersi maggiormente affermata. Infatti se per volumi produttivi ridotti come quelli del settore aeronautico la resina epossidica rappresenta il materiale più usato, nel settore automobilistico i ritmi di produzione non consentono di impiegare questo tipo di materiale che necessita di lunghi tempi di indurimento. Altre resine come poliestere e vinilestere che offrono tempi di indurimento minori vengono quindi preferite.

Le applicazioni nel settore automobilistico possono essere classificate in tre gruppi: corpo macchina, telaio, motore.

Nella categoria degli elementi del corpo macchina lo scopo fondamentale è la riduzione di peso congiunta al contenimento dei costi, per questo motivo la fibra di vetro ha soppiantato nelle applicazioni commerciali quella di carbonio che sebbene sia più resistente e leggera è anche decisamente più costosa. I compositi usati in questi elementi sono a matrice di poliestere o di resina di vinilestere rinforzata con fibre di vetro discontinue (tipicamente 25 mm di lunghezza).



**Figure 2-10:** Vano di carico tutto in un pezzo realizzato in materiale composito (sinistra). A destra il telaio monoscocca in fibra di carbonio della McLaren Mp4 12C

Alcuni esempi di elementi del corpo macchina sono: cofano, pannelli portiere, supporti radiatore, paraurti, travi del tetto, cornici, telai di porte, coperchi valvole del motore, copri catena di distribuzione, coppe dell'olio, e così via.

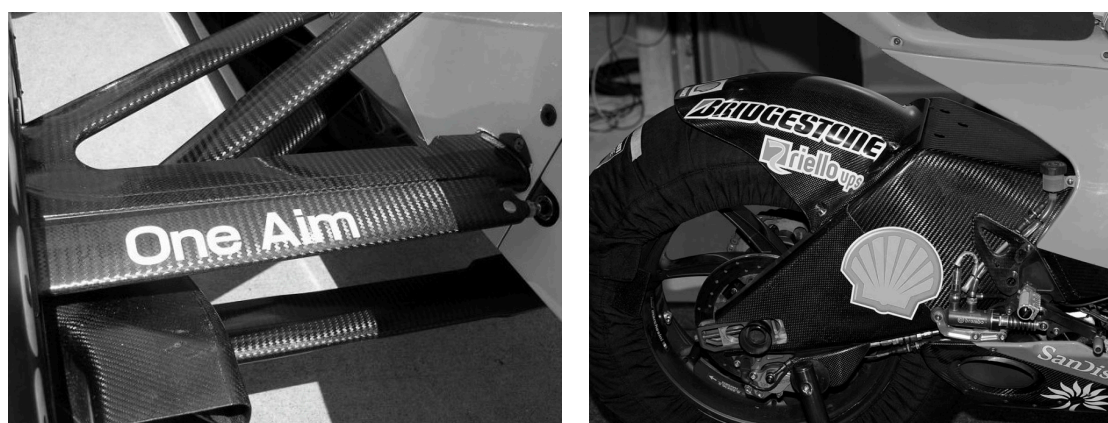
Tra i componenti del telaio, si ricordano le sospensioni posteriori a balestra realizzate con matrice epossidica e rinforzate con fibre di vetro per sostituire le molle in acciaio multi-lamellari (80% di riduzione del peso). [14]

Altri componenti strutturali del telaio, come alberi di trasmissione e ruote stradali, sono stati testati con successo, ma finora non hanno dimostrato di essere costo-efficaci a sufficienza rispetto alle controparti in acciaio.

L'applicazione per elementi del motore non è stato un successo come per il corpo o il telaio. I carichi di fatica a temperature molto elevate rappresentano la sfida più grande in queste applicazioni. Tuttavia lo sviluppo di polimeri resistenti ad alta temperatura, nonché di compositi a matrici metalliche e ceramiche apre nuove frontiere in possibili applicazioni nel settore.

Nelle competizioni motoristiche in cui il costo non rappresenta un limite per la scelta del materiale, i compositi si sono affermati come il materiale per antonomasia. La prima applicazione importante in auto da corsa è stata nel 1950 quando il fibra di vetro e poliestere è stato introdotto in sostituzione di pannelli di carrozzeria in alluminio.

Oggi il composito maggiormente utilizzato in competizioni sportive come la F1 e la Moto Gp, è la fibra di carbonio in resina epossidica, che viene usata per la quasi totalità dei componenti del corpo macchina come braccetti delle sospensioni, prese d'aria per il raffreddamento dei dischi, ma anche la scatola del cambio e più importante di tutte, cellula di sopravvivenza, che protegge il conducente in caso di incidente. [15]



*Figure 2-11: A sinistra il sistema di sospensioni di una formula 1 interamente realizzato con materiali in fibra di carbonio. A destra il forcellone posteriore della Ducati Moto GP*

## 2.4 L'osso: introduzione e generalità

Le ossa umane rappresentano uno dei materiali biologici più studiati. Le ragioni di tale interesse sono molteplici, prima tra tutte è la ricerca medica per la cura di patologie come l'osteoporosi o anche la ricerca per protesi interne ed esterne in pazienti che hanno perso l'uso degli arti. Da un punto di vista prettamente ingegneristico, l'osso rappresenta un modello di perfezione inarrivabile. Infatti, nonostante le proprietà meccaniche non eccezionali se paragonate a quelle di materiali ingegneristici ad alta resistenza, l'osso provvede contemporaneamente ad assolvere numerose altre funzioni. La leggerezza è richiesta per facilitare i movimenti, da qui si osserva la struttura porosa trabecolare. La resistenza è indispensabile per sostenere la struttura e resistere a eventuali impatti, da qui si osserva la struttura compatta lamellare. L'autoriparazione è necessaria per rigenerare fratture, da qui la necessità di una struttura viva e alimentabile e non ultima, l'esigenza di una struttura in evoluzione di forma atta a seguire la crescita dell'organismo. Per rispondere a queste molteplici richieste l'osso si è dotato di una struttura incredibilmente complessa ed efficiente.

### 2.4.1 Lo scheletro

L'insieme delle ossa costituisce lo scheletro di cui sono dotati tutti gli organismi viventi vertebrati tra i quali l'uomo. Lo scheletro, insieme alle cartilagini e alle articolazioni, sorregge e protegge le parti molli e vitali. Unito ai muscoli, lo scheletro, costituisce l'apparato locomotore che consente agli organismi di muoversi, è infatti attraverso di esso che camminiamo, lavoriamo, eseguiamo gli sport e le attività fisiche più complesse.

Le funzioni principali dello scheletro sono quindi le seguenti:

1. *Sostegno* del peso della struttura
2. *Protezione* degli organi interni
3. *Movimentazione* per mezzo di articolazioni cartilagini e muscoli
4. *Produzione di globuli rossi*, bianchi e piastrine tramite il midollo
5. *Deposito di sali minerali* come calcio e fosforo
6. *Riserva energetica*

Nello scheletro umano sono presenti alla nascita circa 270 ossa, con la crescita alcune di esse si fondono tra loro fino a che nella fase adulta si contano circa 206 ossa totali. La forma e le dimensioni varia da osso ad osso ed è essenzialmente legata alla funzione particolare.

In base alla loro forma è possibile classificarle nelle sei categorie che seguono:

1. *Ossa lunghe*  
Una dimensione prevale sulle altre. Alcuni di ossa lunghe sono: il femore, la tibia e l'omero
2. *Ossa corte o brevi*  
Le tre dimensioni sono pressochè uguali. Esempi di ossa corte sono: l'astragalo, il calcagno e le vertebre
3. *Ossa piatte*  
La larghezza e la lunghezza prevalgono sullo spessore. Un esempio di osso piatto è la scapola
4. *Ossa irregolari*  
La loro forma è complessa e caratterizzata da superfici incavate, spigolose, corte o appiattite. Sono ossa irregolari la vertebra e alcune ossa facciali
5. *Ossa sesamoidi*  
Sono generalmente di piccole dimensioni, di forma tondeggiante e appiattita. Si sviluppano vicino ai tendini e hanno la funzione di favorire il movimento. Un esempio tipico è la rotula
6. *Ossa wormiane o suturali*  
Sono di forma appiattita e non ben definita, si trovano nelle linee di sutura delle ossa del cranio

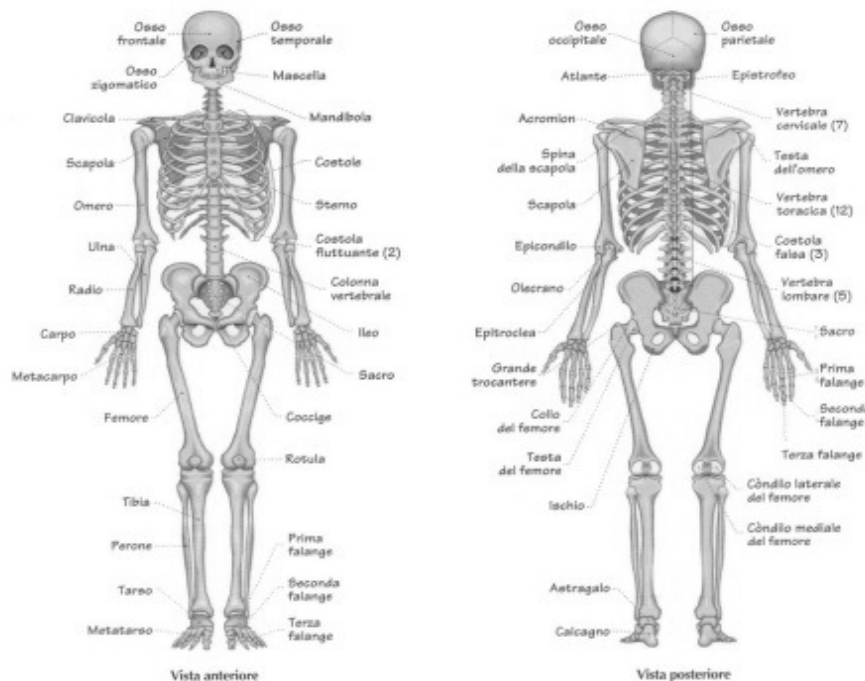


Figura 2-12: Descrizione dello scheletro umano, vista frontale e vista posteriore [16]

## 2.4.2 Il femore

Il femore, è tra tutte le ossa dello scheletro, quella maggiormente sollecitata e per tale motivo rappresenta l'oggetto più interessante da studiare dal punto di vista meccanico. Sia la forma esterna che la struttura al suo interno sono ottimizzate in funzione della trasmissione dei carichi. Per questi motivi la struttura compatta presente nel femore è l'oggetto preso come riferimento per la ricerca bionica che si svilupperà in questo lavoro di tesi.

Il femore fa parte della categoria delle ossa lunghe ed è quello più voluminoso e resistente. Situato nell'arto inferiore, si collega attraverso l'estremità superiore all'anca formando l'articolazione coxofemorale e nella parte inferiore si articola con tibia e rotula formando l'articolazione del ginocchio.

Il femore si divide in un corpo centrale chiamato *diafisi* e in due estremità dette rispettivamente *epifisi prossimale* (in alto) e *epifisi distale* (in basso).

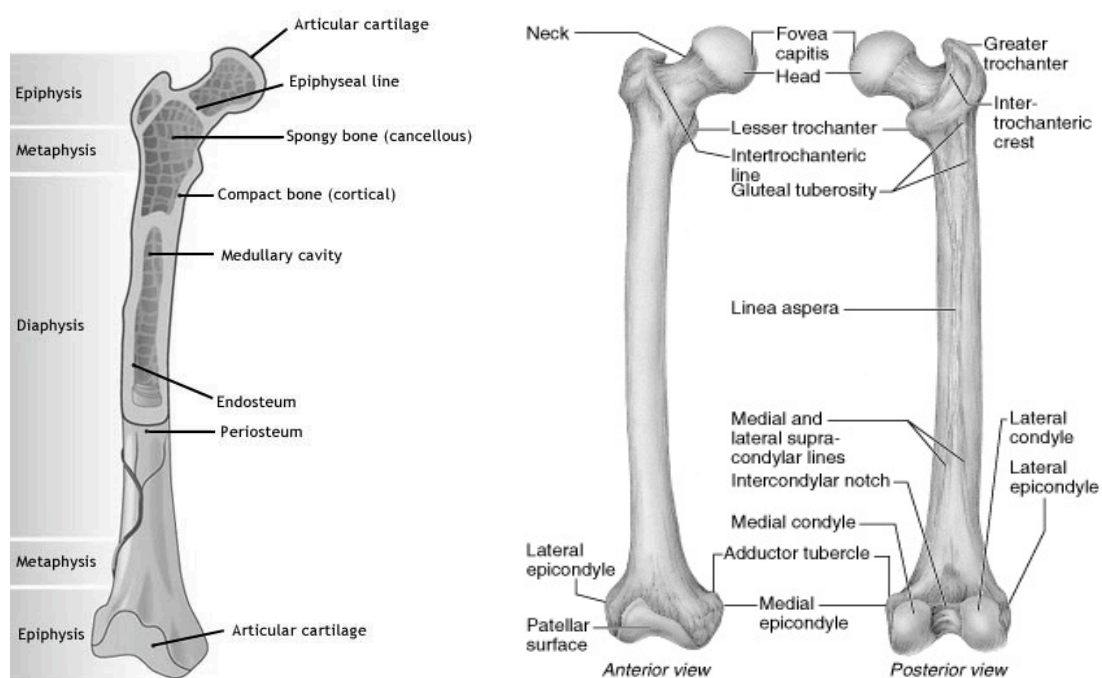


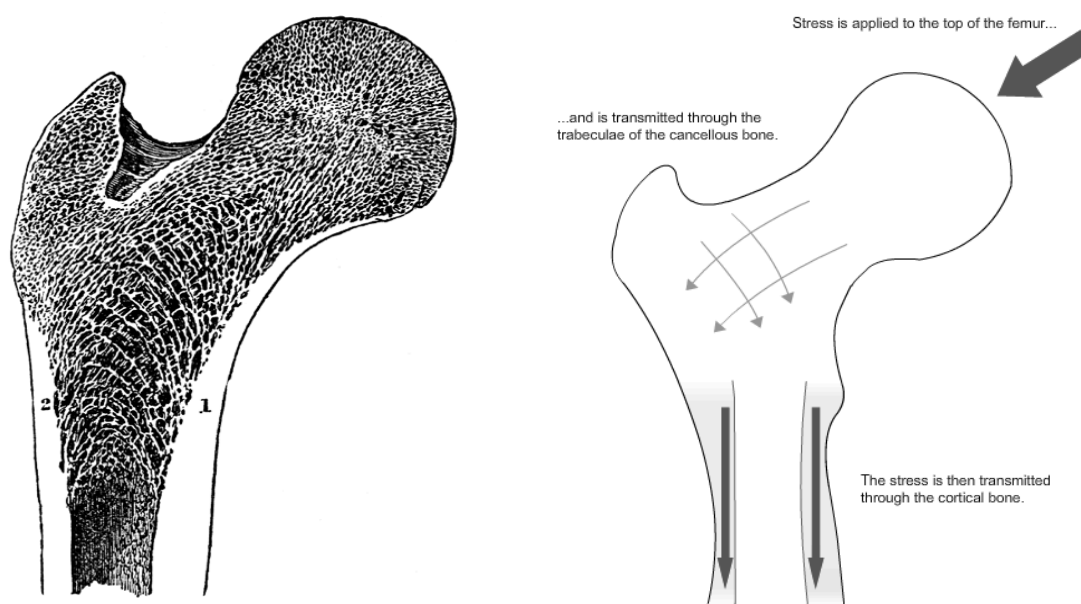
Figura 2-13: Femore umano, vista anteriore, posteriore e sezione [17]

L'*epifisi prossimale* del femore è costituita da una grossa testa a forma circolare e rivestita quasi interamente da cartilagine articolare. La testa poggia sul collo anatomico del femore. In posizione latero-inferiore e latero-superiore rispetto all'inizio del collo si trovano rispettivamente il piccolo trocantere e il grande trocantere, sporgenze ossee sulle quali prendono inserzione dei muscoli.

L'epifisi distale del femore presenta, posteriormente, due grosse superfici ossee convesse, i condili femorali rivestiti di cartilagine articolare, che fanno parte della complessa articolazione del ginocchio. Sui condili prendono inserzione i due legamenti crociati (anteriore e posteriore), e due menischi (mediale e laterale).

La diafisi, o corpo del femore, risulta caratterizzata da tre facce: una faccia anteriore, una postero-mediale e una postero-laterale. È in questa zona centrale che si collegano i muscoli del gluteo.

La funzione primaria delle estremità del femore è quella di collegare ossa diverse e permettere il movimento attraverso le articolazioni, allo stesso tempo è richiesta una struttura che sia anche resistente e leggera. Sezionando il femore nelle epifisi si nota una formazione di osso lamellare e spugnoso in cui le trabecole sono orientate essenzialmente nella direzione dello stato di sforzo interno. Tale formazione altamente porosa che conferisce leggerezza alla struttura è circondata da un sottile strato di osso lamellare compatto che, invece, provvede a dare durezza e resistenza alla parte.



**Figura 2-14:** Osso spugnoso dell'epifisi femorale superiore, si fa notare come l'orientamento dell'osso spugnoso [27]

La diafisi ha invece il compito di conferire rigidità al femore e ovviamente di resistere alle condizioni di carico cui il femore è soggetto durante le varie condizioni di esercizio. Sezionando si osserva una figura cilindrica caratterizzata da una struttura densa e compatta di osso lamellare, con una cavità interna in cui si trova il liquido midollare. A ridosso della cavità midollare l'osso passa da compatto a trabecolare. Per i dettagli su tale tipo di struttura si rimanda al paragrafo 2.4.

### 2.4.3 La Composizione del tessuto osseo

L'osso può essere considerato in prima approssimazione come un materiale composito costituito essenzialmente da una matrice organica di collagene (tipo I) e da una parte inorganica costituita da cristalli minerali di idrossiapatite. Il collagene conferisce elasticità mentre l'idrossiapatite dona alle ossa la caratteristica durezza, a tutti ben nota.

Nella realtà l'osso è costituito da numerosi altri tipi di sostanze, tra le componenti inorganiche riconosciamo minerali come il calcio, il fosforo, il fluoro ed il magnesio, fra quelle organiche ricordiamo, oltre al collagene, i proteoglicani, alcune proteine non collageniche, le citochine ed i fattori di crescita.

Particolare importanza per quanto concerne il processo di evoluzione dimensionale dell'osso, nonché di autorigenerazione e riparazione è rivestita dalle cellule osteo-pregenitrici. Esse attraverso un processo di distruzione prima e ricostruzione poi, permettono all'osso di rigenerarsi continuamente. Le tre tipologie di cellule che partecipano a questo processo sono: gli osteoblasti, gli osteociti e gli osteoclasti che sono rispettivamente responsabili della generazione, distruzione e rigenerazione dell'osso.

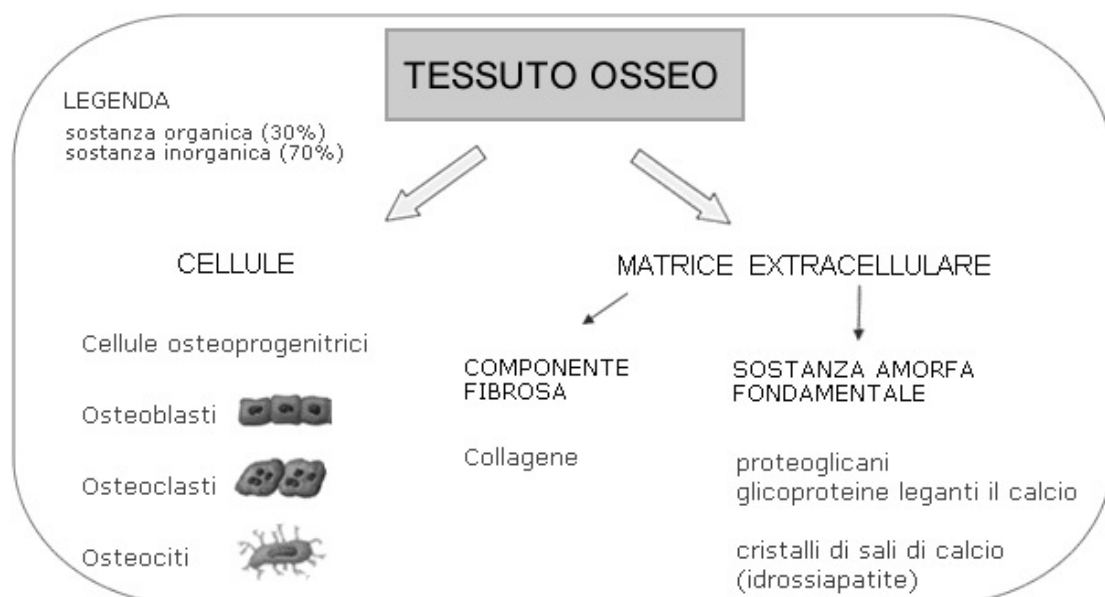


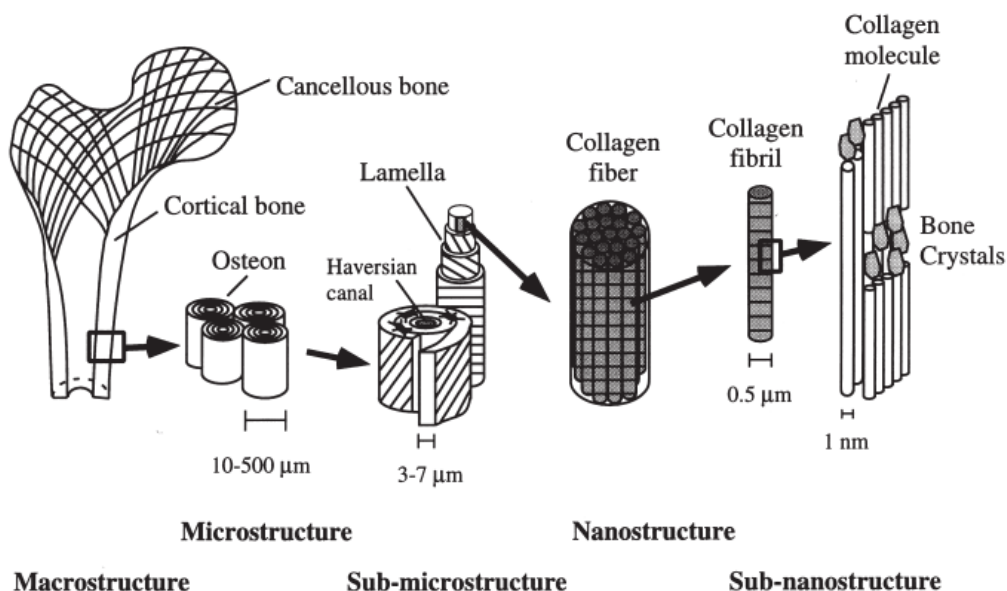
Figure 2-15: Schematizzazione dei principali costituenti principali del tessuto osseo



## 2.5 La struttura gerarchica

Come la maggior parte dei materiali biologici anche nell'osso si nota una configurazione gerarchica. Con tale definizione s'intende una struttura organizzata su più livelli dimensionali, nei quali si ripetono ordinatamente sotto-strutture elementari. Come accennato nei paragrafi precedenti, l'osso è in continua evoluzione di forma e durante tale processo oltre a variare in dimensioni esso si organizza con strutture interne via via più ordinate.

Nel seguito, per motivi già chiariti, si analizzerà la struttura del femore in un soggetto di età adulta. La descrizione consisterà in una serie di ingrandimenti successivi attraverso i quali partendo dalla macrostruttura si arriverà a definire a livello nanometrico le unità elementari che costituiscono l'osso.



**Figura 2-16:** Sintesi della struttura gerarchica del femore umano, dalle macrostrutture alle nano-strutture [22]

### 2.5.1 Livello 0: Le macro-strutture

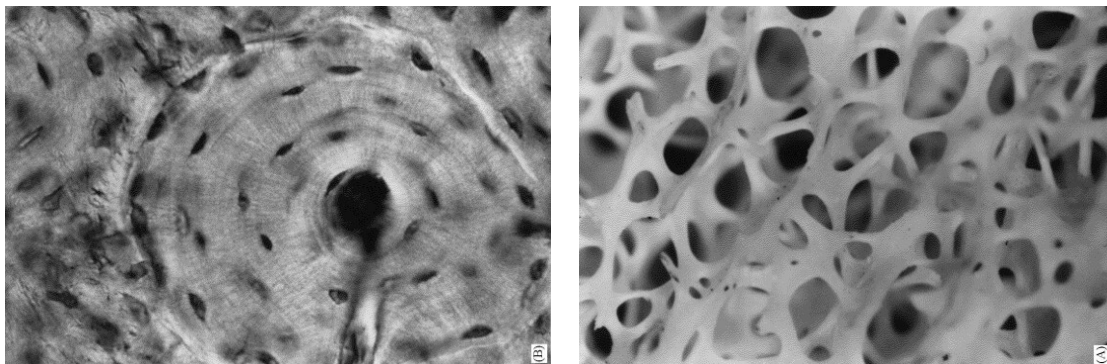
Il primo livello di analisi è quello macroscopico, in cui la dimensione caratteristica è dell'ordine dei cm. A tale livello si possono distinguere due tipologie differenti di osso, quello spugnoso "trabecular bone" e quello compatto "cortical bone".

L'osso compatto forma la porzione esterna (più superficiale) del femore e costituisce inoltre le diafisi di quest'ultimo. Si tratta di un osso duro, solido, compatto appunto, perché privo di cavità macroscopiche.

L'osso compatto conferisce rigidità, durezza e resistenza alle sollecitazioni meccaniche.

L'osso spugnoso costituisce la parte interna del femore e si concentra in particolare nelle epifisi, al di sotto dello strato compatto, mentre nella diafisi esso costituisce un sottile strato a ridosso della cavità midollare. La sua struttura trabecolare e spugnosa conferisce all'osso elasticità e leggerezza. Come si può notare osservando la sezione dell'epifisi superiore in [figura 2.10](#) le trabecole si orientano secondo la direzione dello stato di sforzo.

Mentre l'osso compatto ha una porosità che va dal 5% al 10% quello spugnoso è caratterizzato da una conformazione altamente porosa che varia tra il 50% e il 90%.



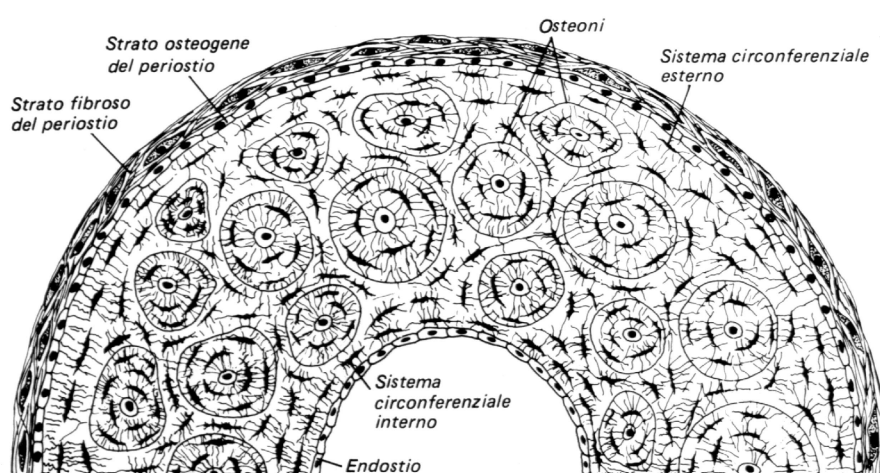
**Figura 2-17:** Confronto delle differenti strutture dell'osso corticale (sinistra) e dell'osso spugnoso (destra) [19]

### 2.5.2 Livello 1: L'osso compatto

Analizzando in sezione l'osso compatto della diafisi del femore a un livello dimensionale dell'ordine dei  $500\mu\text{m}$ , è possibile osservare una struttura lamellare estremamente complessa ed ordinata. Riferendosi alla schematizzazione della [figura 2.11](#), si notano due elementi periferici detti rispettivamente lamella circonferenziale interna ed esterna, in cui le fibre di collagene sono disposte longitudinalmente seguendo la lunghezza dell'osso e la direzione del carico dominante.

Impacchettate tra le *lamelle circonferenziali* vi è una struttura lamellare molto densa costituita da elementi cilindrici a lamelle concentriche detti *osteoni* o *sistemi di Haversian* dotati di un condotto centrale per il passaggio dei vasi sanguigni detto appunto condotto di Haversian. Negli spazi tra osteoni adiacenti si trovano le lamelle interstiziali, resti del processo di dissoluzione dei vecchi osteoni.

Sebbene la struttura dell'osso compatto risulti all'occhio umano priva di porosità, è possibile distinguere a questo livello dimensionale una serie di canali, canaletti e cavità. Oltre al condotto centrale che permette ai vasi sanguigni di scorrere longitudinalmente, vi sono dei canali trasversali detti di Volkmann che permettono ai vasi sanguigni di osteoni adiacenti di comunicare tra loro. Una serie di canali più piccoli detti *canaliculi* o *canaletti* si trovano all'interno dell'osteone e consentono alle lacune di comunicare. Questa fittissima rete di collegamenti ha lo scopo di permettere all'osso di essere alimentato in tutto il suo volume.

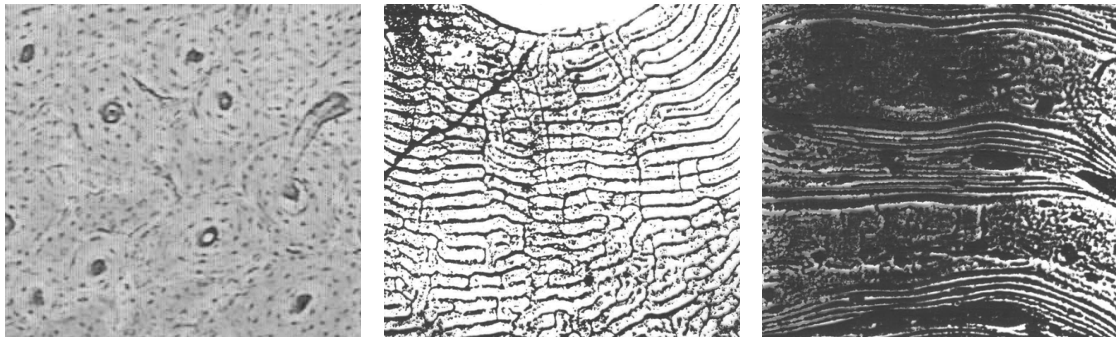


**Figura 2-18:** Schema della struttura complessiva dell'osso corticale in evidenza i sistemi circolferenziali interno ed esterno e gli osteoni [20]

In realtà, la struttura lamellare descritta è solo l'ultima fase del processo di rimodellamento del tessuto osseo e rappresenta anche la più organizzata ed resistente. Altre forme, meno organizzate sono: *“Woven Bone”* e *“Plexiform Bone”* che sono tipiche di un osso giovane e ancora in evoluzione.

La struttura di tipo Woven è la più rapida a formarsi e per questo è anche quella più disorganizzata. In essa non si distinguono strutture primarie come gli osteoni o i bricks (tipici del Plexiform), ma le fibre di collagene si dispongono nelle tre dimensioni in modo del tutto casuale. Questa formazione ossea è tipica della risposta dell'osso a traumi interni e rotture. Non molto si conosce sulle proprietà meccaniche di questo tessuto, ma è stato ipotizzato essere il meno denso e resistente.

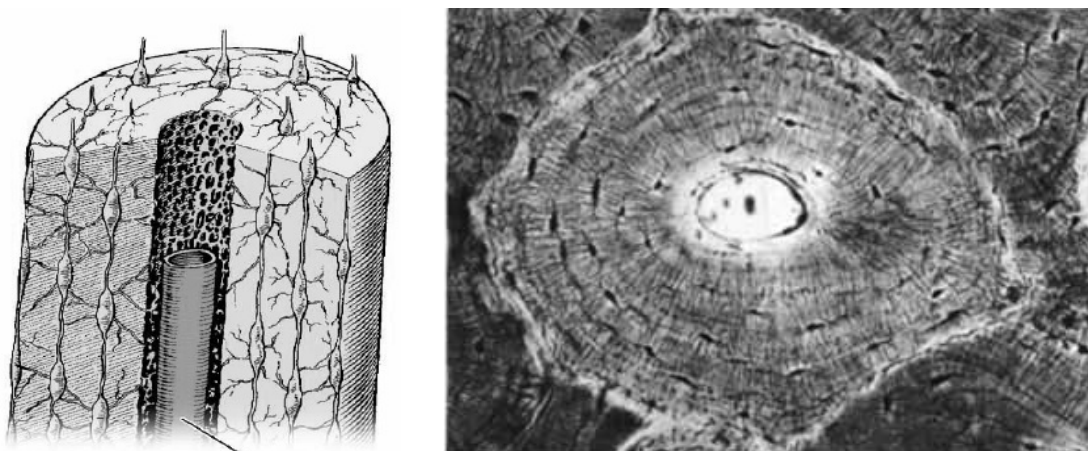
Il Plexiform Bone è invece un tessuto più organizzato rispetto al precedente, e raramente si trova nel tessuto osseo umano. L'unità strutturale primaria del Plexiform è il brick che si genera per effetto del tipo di crescita dapprima perpendicolare e poi parallela alla superficie dell'osso. Questo tessuto risulta essere più rigido e resistente rispetto agli altri, ma manca delle proprietà di arresto della cricca insite nella struttura osteonica. [18]



**Figura 2-19:** Da Sinistra verso destra: a) Struttura primaria ad osteoni, in scuro si osservano le tracce dei canali di Haversian. b) Woven Bone. c) Plexiform Bone [18]

### 2.5.3 Livello 2: L'osteone

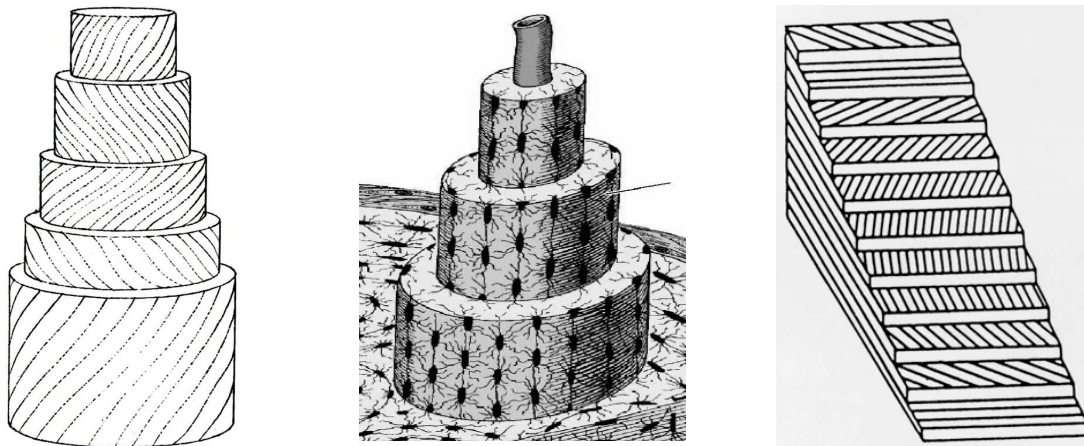
L'osteone è la sotto-microstruttura più importante del tessuto osseo e rappresenta un elemento interessantissimo per la presente ricerca bionica. Secondo la schematizzazione in [figura 2.9](#), l'osteone può essere approssimato come un cilindro cavo a lamelle concentriche che si dispone longitudinalmente rispetto all'osso. Il diametro esterno massimo varia tra 200-300 $\mu\text{m}$  mentre quello interno oscilla tra 50-90 $\mu\text{m}$ . Lo spessore della singola lamella varia tra i 3-7 $\mu\text{m}$  di spessore e il loro numero è compreso tra un minimo di 10 e un massimo di 20. Nella zona centrale dell'osteone si trova il canale di Haversian la cui funzione è quella di contenere i vasi sanguigni principali. Altre zone cavitose sono le lacune che contengono gli osteociti, cellule responsabili del processo di dissoluzione dell'osso. Le lacune sono messe in comunicazione tra di loro per mezzo di canaletti trasversali molto piccoli che creano una fitta rete di collegamenti. La regione intorno alle lamelle più esterne è un area decalcificata particolarmente debole la cui traccia in sezione è detta linea di cementificazione.



**Figura 2-20:** A sinistra la sezione trasversale di un osteone. Si possono notare la fitta rete di canali che provvede ad alimentare il tessuto osseo. A destra una vista al microscopio in cui si nota la struttura concentrica

Come detto, l'osteone è in prima approssimazione il risultato di una struttura cilindrica composta di lamelle concentriche. Le lamelle sono costituite al loro interno da fibre di collagene che all'interno della singola lamella si dispongono parallelamente tra loro seguendo una direzione fissa.

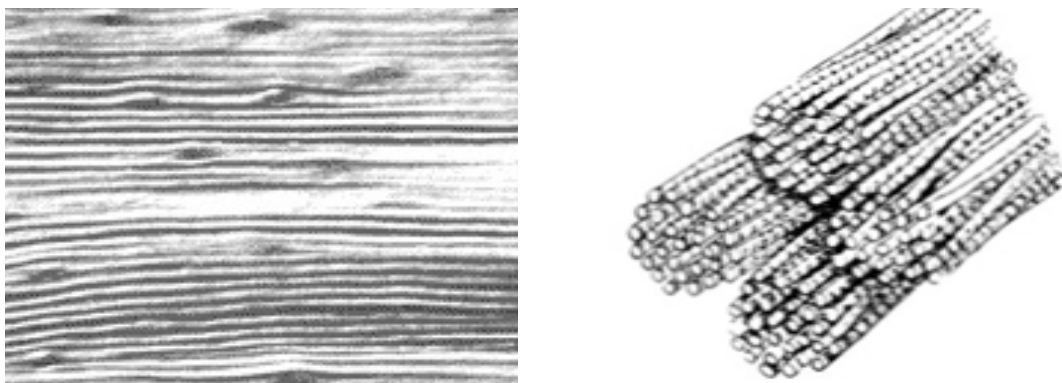
Osservando la schematizzazione in [figura 2.10](#) in cui sono messe in evidenza le fibre di collagene è però possibile notare che l'orientamento varia tra una lamella e la successiva. Il risultato finale è rappresentato da una serie di strati fibrosi con angolazioni differenti. Questo particolare orientamento conferisce all'osteone una maggiore rigidità e migliora sensibilmente il comportamento a torsione.



**Figure 2-21:** Schema della struttura lamellare concentrica dell'osteone. [18]

#### 2.5.4 Livelli 3-4-5: Le fibre di collagene, le fibrille, il trobocollagene

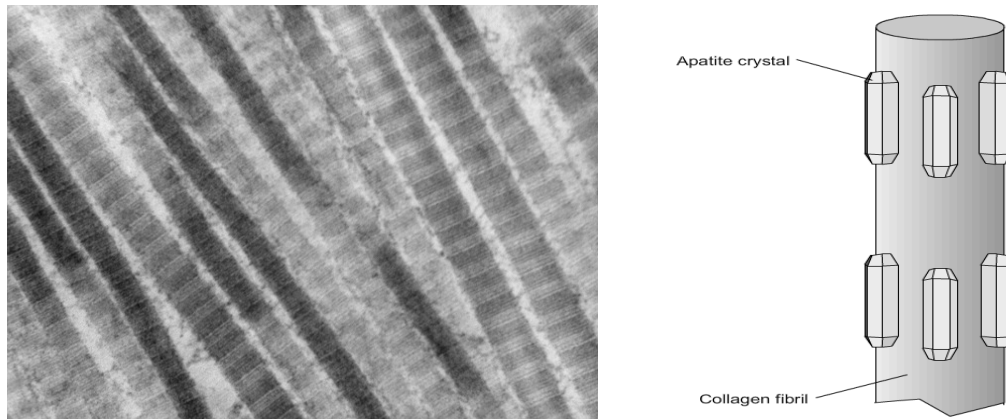
Ai livelli successivi, la struttura gerarchica entra nel livello dimensionale della nano-scala. All'interno delle lamelle dunque si trovano le fibre di collagene disposte parallelamente tra loro. Le fibre, osservate a microscopio, appaiono come dei fasci fibrosi formati da numerose fibrille di collagene tutte allineate. Il diametro caratteristico della singola fibra è compreso tra 0,5-3 micron.



**Figure 2-22:** A sinistra la vista a microscopio di una porzione di lamella in cui sono visibili in nero le fibre di collagene. A destra lo schema semplificato della fibra, come fascio di fibrille allineate



Ogni fibrilla ha invece un diametro caratteristico di circa 10 -300 nm e può essere descritta come un fascio di molecole di tropocollagene, legate le une alle altre attraverso cristalli di idrossiapatite di circa 10 nm di spessore e 225 nm di lunghezza.

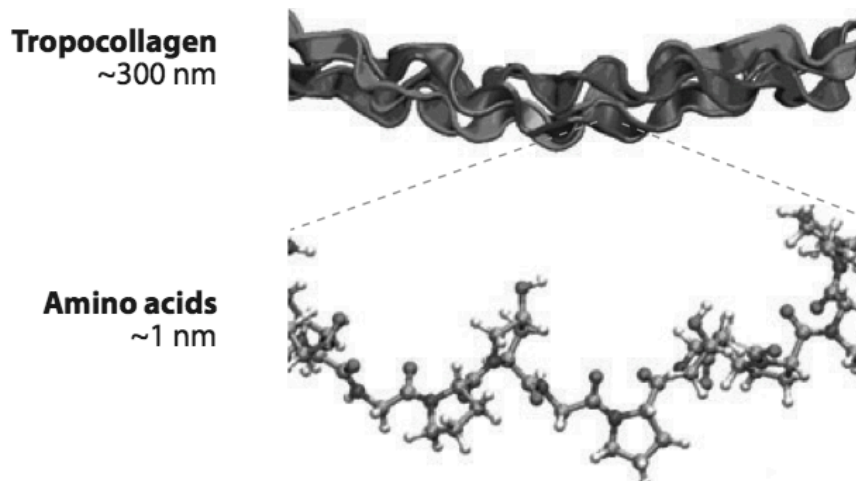


**Figura 2-23:** A destra una fibra di collagene ingrandita a microscopio, si notano chiaramente le fibrille che la compongono. A sinistra uno schema semplificato della fibrilla. [27, 21]

Le molecole di tropocollagene non sono altro che un avvolgimento a tripla-elica di catene di polipeptide tenute unite da collegamenti ad idrogeno.

La molecola di tropocollagene ha diametro di 2 nm mentre la singola catena che compone l'elica è di circa 1nm di diametro.

La particolare struttura a tripla-elica conferisce caratteristiche di elasticità all'osso; per effetto del carico infatti il tropocollagene si srotola con allungamenti percentuali rilevanti, mentre i legami ad idrogeno hanno la possibilità di essere ripristinati e dunque consentono il recupero delle proprietà meccaniche.



**Figura 2.24:** Il tropocollagene e le catene di aminoacidi, elementi base e costitutivi dell'osso [23]

## 2.6 Le caratteristiche meccaniche e proprietà strutturali

Nonostante i costituenti e i legami molecolari siano deboli, le proprietà meccaniche misurate nell'osso sono consistenti.

Secondo lo schema classico dei materiali ingegneristici, l'osso umano può essere approssimato come un materiale composito a matrice organica (30%) rappresentata principalmente dal collagene di tipo I, con particelle minerali disperse che fungono da rinforzo (70%).

Di seguito si riportano le caratteristiche meccaniche dei costituenti principali dell'osso umano.

	Modulo E [GPa]	Sforzo a rottura [MPa]	Allungamento a rottura %
<b>Collagene (Tipo I)</b>	1	50-100	10
<b>Mineral (Idrossiapatite)</b>	40-117	150	-

Sperimentazioni mostrano che le caratteristiche meccaniche dell'osso sono dipendenti da una serie di fattori quali: umidità, età, genere, posizione nel corpo, temperatura e direzione di carico.

Di seguito si riportano alcuni risultati sperimentali condotti sull'osso del femore umano.

Modalità di carico	Resistenza ultima
longitudinale	
<i>Trazione</i>	133 MPa
<i>Compressione</i>	193 MPa
<i>Taglio</i>	68 MPa
trasversale	
<i>Trazione</i>	51 MPa
<i>Compressione</i>	133 MPa
	Modulo elastico
longitudinale	17.0 GPa
trasversale	11.5 GPa
	Modulo di Taglio
	3.3 GPa

Figura 2.25: Caratteristiche meccaniche dell'osso umano

## Capitolo 3: La struttura bio-ispirata

### Introduzione al capitolo:

Nel capitolo precedente, è stata trattata la struttura gerarchica dell'osso umano. Recentemente nel settore dei materiali, la ricerca scientifica si sta concentrando sulla comprensione degli effetti che tale struttura ha sulle proprietà meccaniche dell'osso. Tale ricerca è condotta affiancando ad analisi sperimentali modelli di calcolo che cercano di spiegare, partendo dalla nano-scala e quindi dalle caratteristiche meccaniche dei nano-elementi, le proprietà meccaniche dell'osso [*Buehler Markus, Massachusetts Institute of Technology*].

Di particolare importanza, ai fini di questa ricerca, sono le analisi condotte sull'influenza che la struttura ha nei confronti della propagazione della cricca.

In questo capitolo, sulla base di tali ricerche, si intende concepire una nuova forma strutturale del rinforzo con l'obiettivo di trasferire i meccanismi di propagazione osservati in natura al composito ingegneristico bio-ispirato. Con forma strutturale s'intende il modo con cui le fibre sono disposte all'interno del materiale composito.

L'approccio usato per raggiungere gli scopi proposti è quello descritto nel capitolo 1 e consta di tre fasi: la prima è la definizione del modello concettuale, la seconda consiste nel passare da tale modello a quello semplificato mentre la terza e ultima fase consiste nell'ingegnerizzazione del modello.

La successiva fase, rappresenta il passaggio dall'oggetto osservato a quello che si intende produrre; tale percorso è caratterizzato da inevitabili semplificazioni legate principalmente alle possibilità tecniche di cui si è a disposizione. Il risultato è la forma strutturale bio-ispirata al centro della ricerca scientifica di questo lavoro.

Nell'ultima parte si definiranno, sulla base delle limitazioni imposte dal mercato, i materiali usati per la produzione della struttura, definendo: tipi di fibre, tipo di matrice e dimensioni parametriche della struttura.



### 3.1 Il modello concettuale: “la struttura osteonica”

Le caratteristiche meccaniche dell'osso dipendono essenzialmente da quelle dei suoi costituenti, ma studi effettuati sulla propagazione della frattura hanno dimostrato che anche la struttura gerarchica dell'osso ha un forte impatto sulle proprietà meccaniche finali. In particolare, la tenacità dell'osso è il risultato di una competizione reciproca tra meccanismi di tenacizzazione estrinseci (schermatura alla frattura), che predominano a scale di lunghezza maggiori di  $1\mu\text{m}$  e quelli intrinseci (deformazione plastica), che sono attivi a scale di lunghezza minori di  $1\mu\text{m}$ . [23] Meccanismi di tenacizzazione distinti si verificano ad ogni livello della gerarchia. Ai livelli inferiori, è stato osservato il meccanismo dello *svolgimento molecolare* e dello scorrimento intermolecolare tra molecole di tropocollagene e le fibrille di collagene mineralizzate. Il fenomeno della *microfessurazione fibrillare* è stato osservato al livello delle fibrille. A scale maggiori, la rottura dei legami sacrificali all'interfaccia tra gli array delle fibrille contribuisce ad aumentare la capacità di dissipazione dell'energia. A scala di lunghezza maggiore, nel range di  $10\text{-}100\mu\text{m}$ , le fonti primarie di tenacizzazione sono due, il meccanismo di *deflessione della cricca* e il “*crack bridging*” per mezzo delle aree non fessurate (figura 3.1). [24]

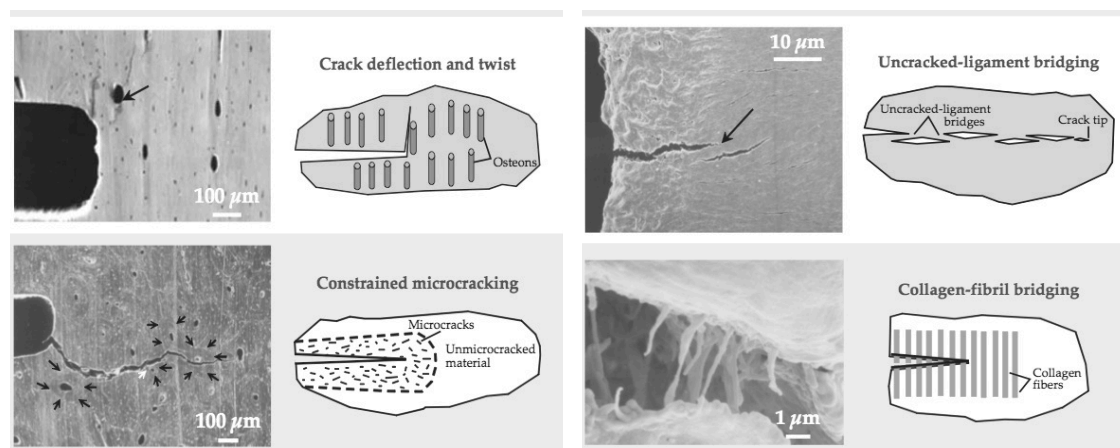


Figura 3.1: Meccanismi di tenacizzazione ai differenti livelli gerarchici [24]

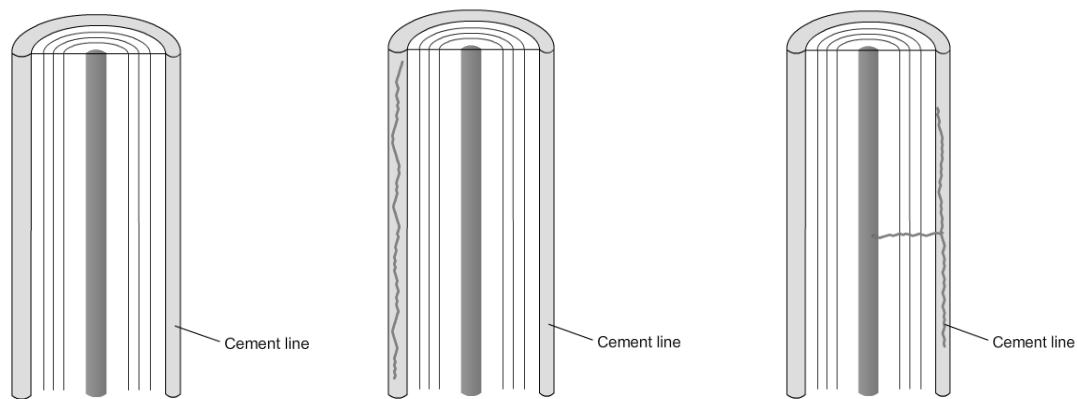
Come in molti materiali biologici, tali meccanismi di rafforzamento agiscono nella fase di crescita e propagazione della cricca, piuttosto che in quella iniziale di generazione della stessa. La tenacità dell'osso, in particolare quella dell'osso corticale, dipende dal percorso che segue la fessura attraverso il tessuto.

Sorprendentemente, il principale elemento strutturale che sembra controllare il percorso della cricca è l'osteone, elemento di dimensione relativamente grande (diametro esterno di circa  $150\mu\text{m}$ ). [25]

Uno studio condotto sulla tenacità alla frattura ha infatti evidenziato come le linee di cementazione tra una lamella e l'altra influenzino l'evoluzione della frattura determinando un comportamento a tenacità migliore nella direzione trasversale rispetto a quello evidenziato in direzione longitudinale. L'osso risulta infatti molto più difficile da rompere che da dividere.

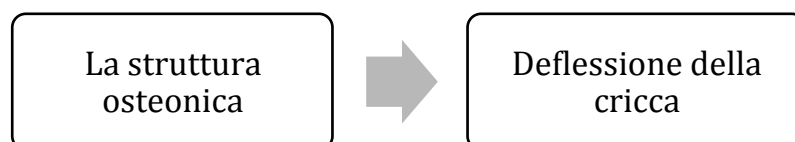
Recenti studi indicano che, dopo soli 500 micron di rottura, la resistenza alla propagazione, è cinque volte maggiore in senso trasversale (rottura) rispetto alla direzione longitudinale ("splitting"). [26]

Osservando la [figura 3-2](#) si vede come la cricca che si sviluppa in direzione trasversale rispetto all'asse dell'osteone, venga deviata lungo la direzione longitudinale nel momento in cui essa incontra la linea di cementazione. Ciò promuove superfici di frattura estremamente tortuose e contorte migliorando la tenacità del materiale.



**Figura 3-2:** Evoluzione della cricca. A destra si vede come il percorso della frattura trasversale venga deviato dalle linee di cementazione [27]

Il fenomeno di deviazione della cricca per mezzo dell'osteone è al centro del modello concettuale di questa tesi.



È possibile trasportare il fenomeno osservato su un materiale composito ingegneristico? È possibile costruire un materiale semplificato ma con struttura simile? Quali sono i reali benefici ottenibili da un'applicazione di questo tipo? Queste le domande alle quali s'intende dare risposta in questo lavoro.

### 3.2 Dal modello concettuale al laminato osteonico

La struttura osteonica, in ragione della molteplicità funzionale a cui essa deve provvedere, è molto complessa ed articolata. In questa fase si opera una razionalizzazione selettiva degli elementi che la compongono allo scopo di estrapolare solo quelli più significativi, utili ai fini proposti.

Si analizzerà nel seguito, da un punto di vista funzionale, la struttura dell'osso corticale del femore umano di un soggetto in età matura, ad un livello di scala dell'ordine delle centinaia di micron, in quanto, secondo considerazioni precedenti rappresenta il livello di maggiore interesse.

**Tabella 3.1:** Analisi funzionale degli elementi strutturali dell'osso compatto (livelli dimensionali 1 e 2)

Elementi strutturali		Funzione	Estrapolazione
Livello 1	Livello 2		
<b>Sistema circonferenziale</b>	Anello esterno	Impacchettamento	si
	Anello interno	Resistenza a flessione	si
<b>Osteone</b>	Canale di Haversian	Alimentazione primaria	no
	Canaletti secondari	Alimentazione secondaria	no
	Lacune	Rigenerazione	no
	Lamelle	Rigidità	Parzialmente
		Resistenza a torsione	
		Accrescimento	
Linee di cementazione	Deflessione della frattura	si	
<b>Sistema interstiziale</b>	Lamelle interstiziali	Processo di sostituzione Compattezza	si

Sulla base delle informazioni riassunte nella [Tabella 3.1](#) si possono evidenziare gli elementi chiave da trasportare dalla struttura biologica a quella del laminato ingegneristico. Le figure scelte sono: il sistema circonferenziale (interno ed esterno), l'osteone inteso come figura ripetuta e caratteristica del laminato e il sistema intra-osteonico. Come si può notare gli elementi di alimentazione quali canali principali e secondari saranno trascurati per una duplice ragione; in primo luogo essi non giocano un ruolo chiave nel fenomeno di deviazione della frattura e in secondo luogo le tecnologie a disposizione non rendono possibile la loro realizzazione pratica.

Si vuole precisare che tali elementi, sono comunque oggetto di estremo interesse, infatti una certa attenzione nel campo della ricerca dei materiali si sta focalizzando sullo sviluppo di sistemi che permettano, emulando quanto succede nell'osso, la possibilità del trasporto di fluidi.

Il trasferimento concettuale e la definizione di una nuova struttura, non possono essere condotti senza sottoporre gli stessi elementi considerati a semplificazioni, anche considerevoli. Le ragioni che stanno alla base di tale necessità sono principalmente di carattere pratico. Di seguito si riportano in modo schematico i principali aspetti considerati in questa fase progettuale:

- Economico
- Tempistiche
- Producibilità
- Materiali
- Dimensionale

L'aspetto economico è un parametro chiave nella ricerca applicata. Lo sforzo economico investito in un progetto è solitamente proporzionale al beneficio (almeno teorico) che da esso se ne può trarre. Inoltre, il fattore costo ricade direttamente sul prodotto sia in termini di materiali sia in termini di processo. Anche nel caso oggetto di studio, tali considerazioni hanno influenzato in modo rilevante sia la scelta delle fibre, sia quella del processo usato per impregarle.

Le tempistiche per lo sviluppo del progetto, sono state di circa quattro mesi, in un intervallo temporale così limitato, è indispensabile pianificare con accuratezza ogni fase del lavoro, dall'analisi alla progettazione, dalla sperimentazione alla produzione.

La producibilità è invece l'aspetto chiave per quanto riguarda la definizione della struttura e determina, insieme ai materiali commerciali a disposizione, la maggior parte dei limiti di progetto.

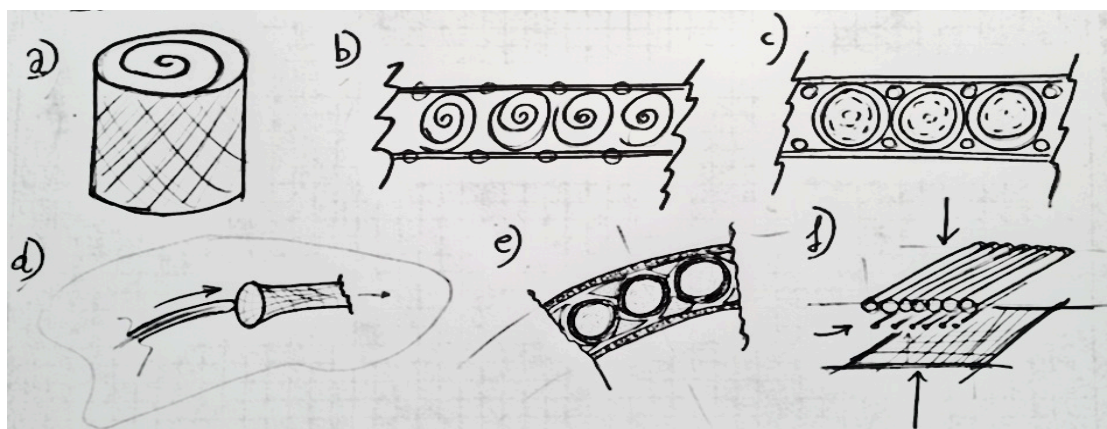
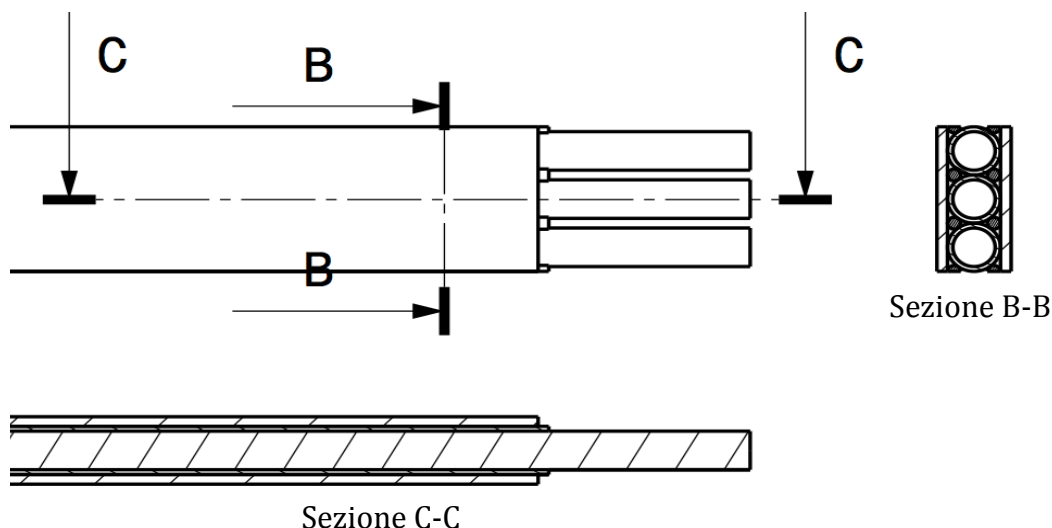


Figura 3.3: Schizzi della fase di concepimento della struttura bio-ispirata

Considerando questi aspetti e procedendo per steps successivi (vedi [Figura 3.3](#)) si è giunti a definire la struttura bio-ispirata, che per ragioni di similitudine è stata denominata “*laminato osteonico*”.



**Figura 3-4:** Vista superiore, sezione trasversale e sezione longitudinale del laminato osteonico

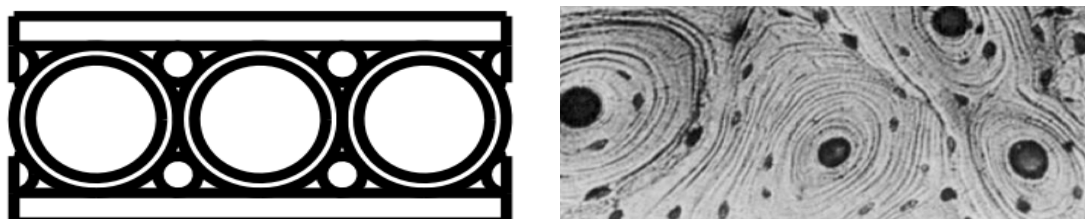
Il laminato bio-ispirato, rappresentato in [Figura 3.4](#) è composto di tre parti fondamentali: le due pelli esterne, i tubicini osteonici e gli elementi di riempimento.

Le pelli esterne, equivalenti ai sistemi circolari, hanno la funzione di contenere e compattare la struttura cilindrica interna. Essi hanno inoltre la funzione di offrire all'esterno una superficie piana più regolare di quella ondulata caratteristica della struttura racchiusa all'interno.

I tubicini, sono la versione analoga ma semplificata dell'osteone e come tali la loro funzione primaria è legata alla deflessione della frattura.

Le zone all'interno dei cilindretti e quelle tra le pelli e i tubicini stessi, sono invece occupate da elementi di riempimento a forma cilindrica, che conferiscono alla struttura rigidità e compattezza.

Tutti gli elementi, fanno parte della struttura del rinforzo del composito e sono quindi costituiti da tessuti fibrosi. La descrizione dei materiali scelti è rimandata ai paragrafi successivi.



**Figura 3-5:** A confronto le due strutture: vista frontale del laminato osteonico a sinistra, gli osteoni dell'osso a destra.

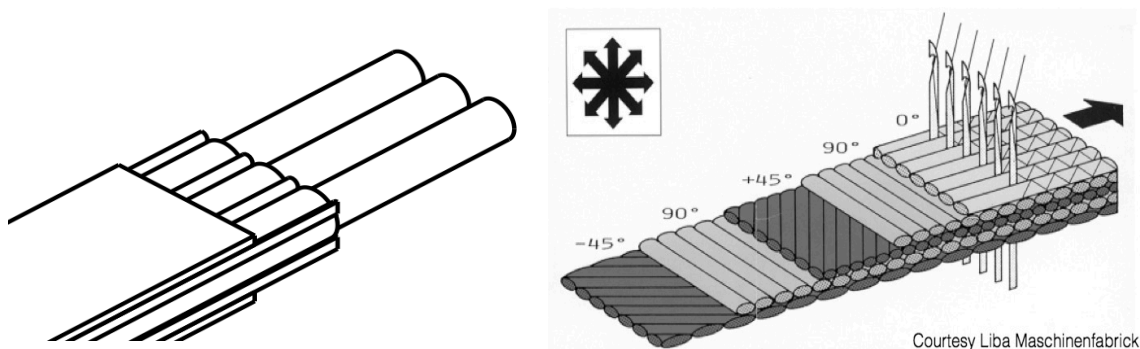
La struttura così concepita, pur mantenendo le caratteristiche indispensabili come la presenza degli elementi cilindrici e quella delle pelli, è il risultato numerose semplificazioni. Nella [Tabella 3.2](#) si mettono a confronto le due strutture, quella realmente presente nell'osso e quella oggetto di questo lavoro.

**Tabella 3.2:** Sintesi delle semplificazioni riportate, confronto tra struttura reale e laminato osteonico

Elementi trasmessi	Osso	Laminato	Semplificazioni
<b>Sistemi circolferenziali</b>	- Gusci esterni - Multi strato - Orient. fibre multiplo	- Pelli esterne - Singolo strato - Orient. fibre singolo	- N° di strati - Orientamento fibre
<b>Osteone</b>	- Elemento cilindrico - $D \cong 100-200\mu\text{m}$ - Multi lamella 7-20 - Multi fila	- Elemento cilindrico - $D \cong 4-5 \text{ mm}$ - Singola lamella - Singola linea	- Dimensionale (diametri) - N° lamelle - N° di elementi totali
<b>Sistema interstiziale</b>	- Forme nn ben definite - Multi fila - Orient. fibre multiplo	- Geometria fissa - Doppia fila - Orient. fibre singolo	- Geometria - N° elementi - Orientamento fibre

L'osteone è stato quindi schematizzato come un elemento cilindrico a singolo strato che racchiude al suo interno fibre di riempimento, mentre le pelli esterne sono state approssimate da due sottili strati fibrosi, uno superiore e uno inferiore, che racchiudono la struttura.

La maggiore approssimazione è stata fatta a livello dimensionale, infatti se l'osteone nell'osso ha un diametro medio compreso tra 100-200 $\mu\text{m}$  nel laminato osteonico esso è stato schematizzato da tubicini di diametro molto maggiore (circa 5mm). La scelta è esclusivamente dovuta all'irreperibilità sul mercato di manicotti a fibre intrecciate di minore dimensioni. L'effetto dimensionale ricade direttamente anche sul numero totale delle file e degli elementi che compongono la struttura.



**Figura 3-6:** A sinistra, in assonometria la struttura bio-ispirata, a destra la disposizione classica dei laminati

### 3.3 Definizione dei materiali:

Definiti gli elementi strutturali del nuovo laminato, si elencano nel seguito i materiali attribuiti ad ogni componente della struttura.

La scelta dei materiali è fortemente influenzata da parametri quali: la disponibilità di fibre adatte alla simulazione della struttura sul mercato, la fattibilità tecnologica del processo di fabbricazione e assemblaggio degli elementi e non ultima l'economicità del prodotto finale.

#### 3.3.1 Materiale per l'osteone

Il materiale scelto per l'osteone è il manicotto intrecciato a fibre di carbonio, tale elemento, grazie alla forma tubolare è particolarmente indicato per la simulazione della singola lamella e dell'osteone. Inoltre l'intreccio, conferisce all'elemento caratteristiche torsionali eccellenti, come del resto succede per gli osteoni.

La ragione per cui è stato scelto il carbonio e non il vetro è legata esclusivamente alla necessità di ridurre al minimo la dimensione dell'elemento, dalla quale dipende lo spessore del laminato. Rispetto a tale considerazione, i tubicini di carbonio scelti rappresentano con 5 mm di diametro l'elemento tubolare più piccolo a disposizione.

Si riportano nel seguito immagini e caratteristiche tecniche del prodotto.



**Figura 3-7:** Manicotto di fibre di carbonio, usato per riprodurre l'osteone nella struttura bio-ispirata. A sinistra si può notare come il tipo d'intreccio permetta alle fibre di variare angolo e conseguentemente diametro del tubo.

**Caratteristiche tecniche:**

Tipo-Forma:	Manicotto intrecciato di fibre di carbonio, Ø 5mm
Tipo-Fibra:	Torayaca T300 67 tex (1k)
Diametro:	2,5-11mm
Spessore:	0,18mm
Larghezza in piano:	5mm
N° Filamenti:	40
Peso:	2,75 g/m
Costo:	2,3 €/m

**Applicazioni tipiche:**

Questo tipo di struttura tubolare è adatta a sopportare carichi torsionali. Le applicazioni tipiche si trovano nel settore dell'ingegneria ortopedica per la costruzione di protesi e per equipaggiamento sportivo.

**Descrizione del tessuto:**

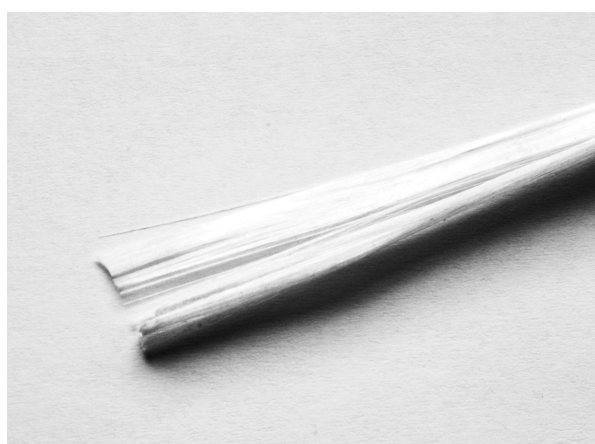
La struttura a manicotto è prodotta intrecciando i filamenti in una sorta di spirale fino a formare un tessuto tubolare. Il diametro del tubo è variabile e dipende dal numero di fibre intrecciate, dall'angolo dei fili nella spirale, dal numero delle intersezioni per unità di lunghezza e dalla dimensione dei filamenti. Come per il caso dei tessuti classici il tipo d'intreccio può variare nello stile (normale, a maglia diritta, ecc). Il diametro nominale del tubo viene normalmente dato per un angolo delle fibre pari a  $\pm 45^\circ$ , ma il processo di trecciatura permette alle fibre di muoversi tra angoli compresi tra  $25-75^\circ$  permettendo quindi anche variazioni di diametro.



### 3.3.2 Materiale di riempimento

L'elemento di riempimento ha lo scopo di rendere la struttura del rinforzo più compatta e rigida. Operativamente esso deve essere inserito con processi manuali all'interno del manicotto di carbonio e tra gli spazi vuoti tra i tubicini e le pelli. Le fibre che meglio si prestano a queste esigenze sono i filamenti di vetro, tipicamente usati per il processo tecnologico del filament winding. In questo caso si è scelto di usare fibre di vetro meno costose di quelle di carbonio.

Si riportano nel seguito alcune immagini e caratteristiche tecniche della fibra.



**Figura 3-8:** Fibre di vetro a filo usate come elemento di riempimento della struttura.

#### Caratteristiche tecniche:

Categoria:	Rovings (stoppino)
Fibra:	E Glass
Sigla:	Glass roving 2400 tex (silane)
Peso:	2,4 g/m
Densità:	2,54 g/cm <sup>3</sup>
Resistenza a trazione:	3952 MPa
Modulo di Young E:	73 GPa
Deformazione a rottura:	3.5-4%
Costo:	0,1 €/m

#### Applicazioni tipiche:

Questo è materiale universale, è dotato di eccellenti caratteristiche meccaniche e chimiche ed è adatto a lavorazioni a mano, filament winding e poltrusione.

L'impregnazione è veloce e di qualità, sia con resine epossidiche che con quelle di poliestere o vinilestere.

### 3.3.3 Materiale delle pelli esterne

Lo strato esterno che racchiude la struttura tubolare bio-ispirata, ha lo scopo di offrire una superficie piana e uniforme.

Le pelli favoriscono inoltre il processo d'impregnazione riducendo il macroflusso e favorendo un'impregnazione più omogenea e distribuita.

Il materiale scelto per questo elemento è la fibra di vetro longitudinale di cui si riportano nel seguito immagini e proprietà.

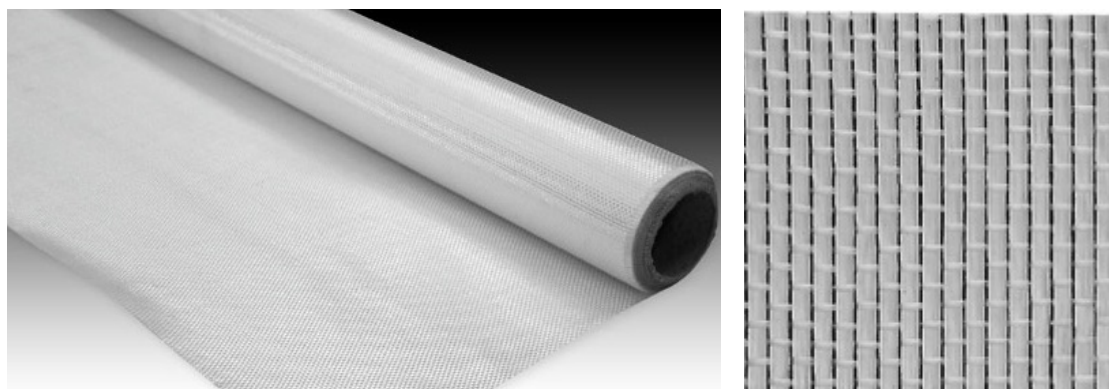


Figura 3-9: A sinistra in dettaglio la mesh del tessuto superficiale

#### Caratteristiche tecniche:

Categoria:	Non crimp fabric (NCF)
Tipo:	Interglas 92145, plain wave, E Glass
Fibra:	Finish FK 144 (Interglas 92145)
Sigla:	Glass fabric 220 g/m <sup>2</sup> (Aero) Unidirectional
Peso:	220 g/m <sup>2</sup>
Costo:	6,73 €/m <sup>2</sup>
*Consumo di resina:	173 g/m <sup>2</sup>
*Spessore laminato:	0,242 mm
*Peso laminato:	393 g/m <sup>2</sup>

\* I dati si riferiscono a un laminato con 35% in volume di fibra

#### Applicazioni tipiche:

Questo tessuto è adatto a tutte le applicazioni in cui è richiesta una particolare rigidità e resistenza in una direzione specifica. Alcune applicazioni tipiche si trovano nel settore aeronautico (es. longheroni e braccetti).

**Descrizione del tessuto:**

La tecnica di produzione di questo tessuto è detta a maglia dritta, in inglese “*plain*”. Con questo metodo, le fibre dell'ordito passano alternativamente prima sopra e poi sotto quelle di trama e viceversa. Il tessuto che si ottiene è simmetrico, caratterizzato da una buona stabilità e ragionevole porosità. Tuttavia è tra i vari tipi di trame quella che meno si adatta a superfici complesse, inoltre a causa del livello elevato di fibre increspate le proprietà meccaniche sono relativamente basse rispetto agli altri stili tessitura. Questo metodo è adatto esclusivamente alla tessitura di filamenti molto sottili, in quanto per dimensioni dei fili elevate l'effetto di increspatura diventa eccessivamente marcato e deleterio per le proprietà finali del laminato.

### 3.3.4 Materiale laminato comparativo

Nello svolgimento del lavoro si produrrà in parallelo anche un laminato classico con lo scopo di avere un termine di paragone rispetto al quale confrontare le proprietà meccaniche del nuovo laminato osteonico. In questo caso la scelta del materiale è stata fatta considerando il materiale scelto per i tubicini osteonici. Per questa ragione è stata scelta la fibra di carbonio intrecciata di cui si riportano nel seguito alcune proprietà.

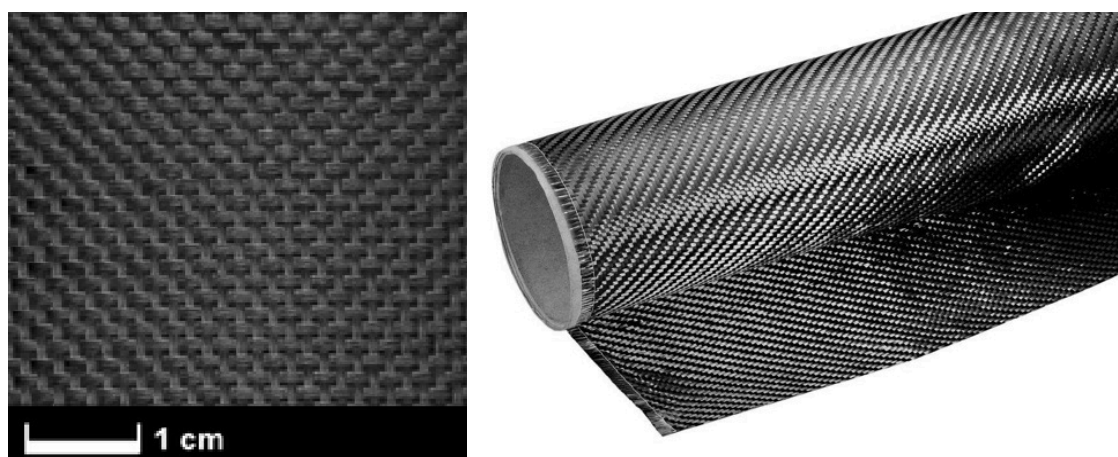


Figura 3-10: Dettaglio della mesh del tessuto in fibra di carbonio rinforzo del laminato comparativo

#### Caratteristiche tecniche:

Categoria:	Non crimp fabric (NCF)
Tipo:	Style 469, plain wave
Fibra:	Torayaca T 300 J 67 tex (1k)
Sigla:	Carbon fabric 93 g/m <sup>2</sup>
Peso:	93 g/m <sup>2</sup>
Costo:	70,24 €/m <sup>2</sup>
*Consumo di resina:	107 g/m <sup>2</sup>
*Spessore laminato:	0,149 mm
*Peso laminato:	200 g/m <sup>2</sup>

\* I dati si riferiscono a un laminato con 35% in volume di fibra

#### Applicazioni tipiche:

Il tessuto è solitamente usato per la realizzazione di laminati sottili. L'orditura a maglia stretta grazie all'uso di filati fini e alto numero di orditure. Usato per la costruzione di modelli e prototipi e per la realizzazione di eliche.

### 3.3.6 Materiale per la matrice

La scelta della matrice è legata al processo con cui il materiale composito viene impregnato. Il metodo usato per svolgere tale operazione è il VARI (vacuum assisted resin injection). Si è scelta come matrice la resina Epossidica di cui si riportano nel seguito proprietà fisiche e meccaniche.



Figura 3-11: Resina e reagente

#### Caratteristiche tecniche:

##### Resina: RIM 135

Densità:	1,13-1,17	[g/cm <sup>3</sup> ]
Viscosità:	700-1100	[mPas]
Equivalente Epoxy:	166-185	[g/equivalente]
Valore Epoxy	0,54-0,60	[equivalente/100g]
Indice di refrattarietà	1,548-1,552	
Costo	11,2	[€/Kg]

##### Hardner: RIMH 134

Densità:	0,93-1	[g/cm <sup>3</sup> ]
Viscosità:	10-80	[mPas]
Indice di refrattarietà	1,49-1,5	
Valore di ammina	550-700	[mg KOH/g]
Costo	14,2	[€/Kg]

##### Hardner: RIMH 137

Densità:	0,93-0,98	[g/cm <sup>3</sup> ]
Viscosità:	10-50	[mPas]
Indice di refrattarietà	1,46-1,463	
Valore di ammina	400-600	[mg KOH/g]

\* Tutti i dati sono riferiti a una temperatura di 25 °C

**Caratteristiche meccaniche:**

Resistenza a flessione	90-120	[MPa]
Modulo di elasticità	2,7-3,2	[GPa]
Resistenza a trazione	60-75	[MPa]
Resistenza a compressione	80-90	[MPa]
Resistenza ad impatto	70-80	[KJ/m <sup>2</sup> ]
Elongazione a rottura	8-16	

\* Le proprietà meccaniche si riferiscono a un laminato di resina RIMR 135 e reagente RIMH 137 solidificato 24h a 23°C + 15h a 60°C

**Applicazioni tipiche:**

Progettata specificamente per il processo d'infusione (RMT, SCRIMP/VARI), I componenti tipici prodotti con questa resina sono: pale per rotori, turbine eoliche, nel settore navale per scafi ed equipaggiamento sportivo

## Capitolo 4: Produzione dei laminati

### Introduzione al capitolo:

Nel capitolo precedente è stata definita la struttura del laminato osteonico sia in termini di forma sia in fatto di materiali.

Concepito il nuovo lay-out è prerogativa del presente lavoro di tesi quella di testare e analizzare gli effetti che tale struttura bio-ispirata ha rispetto alle caratteristiche meccaniche del composito. L'analisi per essere completa sarà condotta confrontando il nuovo laminato ad uno equivalente dal punto di vista dei costituenti, ma con una struttura di tipo classico (strati di tessuto sovrapposti).

A tale scopo è necessario produrre una serie di laminati, quattro per esattezza, da cui ricavare i provini per la caratterizzazione meccanica del materiale.

In questo capitolo si esporrà il processo di produzione usato per fabbricare i laminati in questione, di cui tre piatti osteonici e un laminato classico di confronto.

La fase di produzione può essere schematizzata come la sequenza di tre sotto-attività: la produzione della struttura del rinforzo, lo sviluppo del sistema d'impregnazione e le iniezioni finali.

Nella prima fase, l'obiettivo è quello di unire tra loro gli elementi del rinforzo, quali manicotti, fibre di riempimento e pelli in modo tale da ottenere un tessuto stabile. I metodi usati per svolgere questa attività sono di tipo manuale, ossia le fibre vengono disposte e unite tra loro dall'operatore con l'ausilio di attrezzature semplici e senza ricorrere a processi automatizzati.

Nella seconda fase, quella relativa all'impregnazione, si mostreranno i passaggi e le evoluzioni che hanno portato allo sviluppo di un nuovo sistema d'iniezione dedicato alla produzione del composito bio-ispirato. Tale fase rappresenta uno dei cardini di questo lavoro.

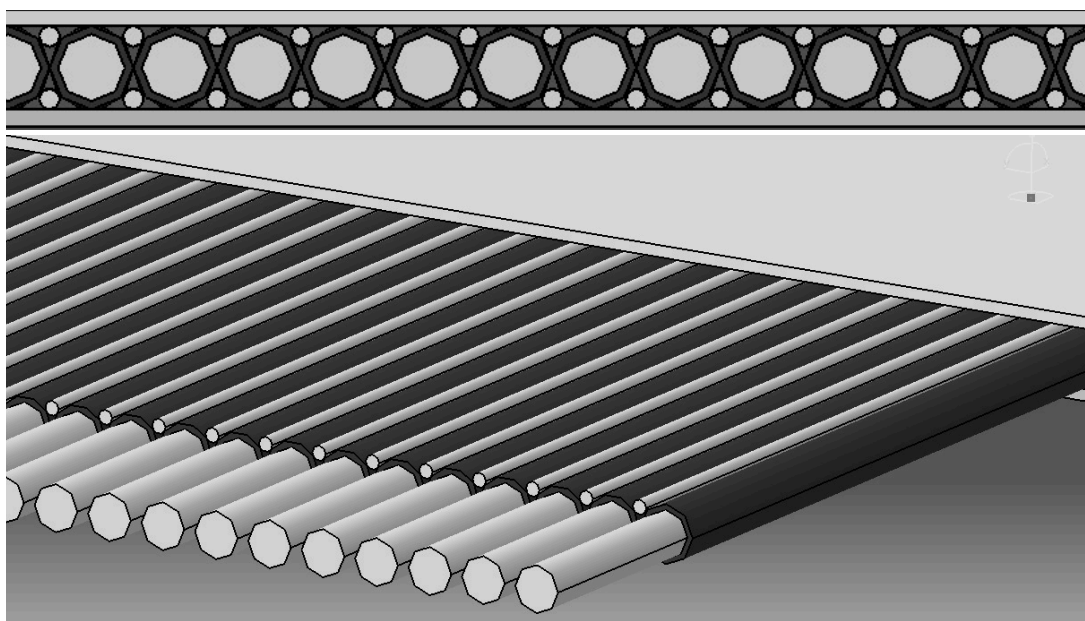
Nell'ultima fase, quella di produzione dei quattro laminati, si analizzeranno le condizioni d'impregnazione per ogni manufatto, riportando inoltre nel dettaglio le proprietà di ognuno.

## 4.1 Produzione della struttura osteonica

Il laminato osteonico, come descritto ampiamente nel capitolo precedente, è caratterizzato da una struttura composta di manicotti in fibre di carbonio riempiti con filamenti di vetro. I manicotti sono disposti uno adiacente all'altro e sono racchiusi da due strati di tessuto in fibra di vetro longitudinale. Il risultato è un laminato con rinforzo misto di vetro e carbonio. Le fibre di vetro sono disposte parallele all'asse dei manicotti che invece presentano una trama di fili orientati con angoli di  $\pm 45^\circ$  rispetto alla lunghezza dell'osteon.

La forma strutturale del composito fa sì che non vi sia una vera e propria continuità tra gli strati dei diversi tessuti fibrosi. Tale caratteristica, come si vedrà nel capitolo 5, influenza le modalità di rottura e conseguentemente anche le proprietà meccaniche del materiale.

Come noto, è di particolare importanza, per massimizzare le proprietà di un composito, che il rinforzo sia in condizioni ottimali sia dal punto di vista della qualità dei filamenti che dell'allineamento dei costituenti. Piccoli disallineamenti o danneggiamenti delle fibre (cosa comune nei processi manuali) si ripercuotono sulle proprietà meccaniche, riducendole.



**Figura 4-1:** Modello CAD della struttura tubolare osteonica. In evidenza in nero i tubi di carbonio e in grigio le fibre di vetro di riempimento e le pelli esterne



Gli elementi di partenza scelti per fabbricare la struttura sono:

- Matassa di filamenti in fibra di vetro (filament winding)
- Manicotto di fibre di carbonio
- Tessuto di fibra di vetro longitudinale (larghezza di 1m)

Se nei laminati classici è sufficiente sovrapporre gli strati di tessuto secondo la sequenza di laminazione opportunamente scelta, per la struttura osteonica il processo di assemblaggio dei costituenti è decisamente più laborioso. Le maggiori complicazioni derivano dalla fase d'inserimento delle fibre di vetro all'interno dei tubi osteonici e dall'ulteriore necessità di rendere tra loro solidali gli elementi della struttura. Lo scopo è costruire un tessuto stabile, semplice da maneggiare ed adattabile a superfici anche complesse.

Il metodo di assemblaggio riveste dunque un ruolo molto importante. Nel seguito si descriveranno i due metodi messi a punto per eseguire questa fase del lavoro.

#### 4.1.1 Dimensionamento di massima

La fase preliminare consiste nel dimensionamento di massima, cioè nel definire il diametro del manicotto e la proporzione tra l'ammontare delle fibre interne ai tubi e quella da interporre all'esterno tra le pelli e manicotti stessi.

##### Definizione del diametro:

La tecnica d'intreccio usata per produrre il tubo di carbonio consente allo stesso variazioni di diametro in un range compreso tra 2,5-11mm (dati del fornitore). A diversi diametri corrispondono però differenti configurazioni angolari delle fibre che si modificano in un range compreso tra 25-75°.

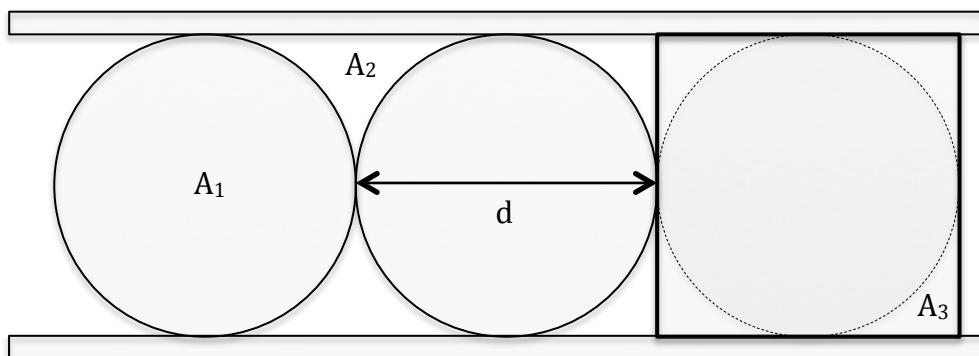
Fissando l'angolo a 45° si ottiene il valore di diametro del manicotto che corrisponde a circa 4,5 mm.

$d = 4,5\text{mm}$                       diametro esterno manicotto  
 $\alpha = 45^\circ$                       angolo delle fibre di carbonio rispetto all'asse

##### Definizione del rapporto di fibre $r_f$

La determinazione della quantità di fibre da inserire all'interno dei manicotti e di quella da interporre esternamente tra le pelli si basa su considerazioni di tipo geometrico.

Analizzando la sezione del laminato in [Figura 4.2](#) è possibile evidenziare le due aree  $A_1$  e  $A_2$  che sono rispettivamente l'area interna al manicotto e quella esterna delimitata da due tubi adiacenti e lo strato esterno. L'area  $A_2$  è calcolata come la differenza tra le aree  $A_3$  e  $A_1$ , in cui  $A_3$  è l'area del quadrato circoscritto al cerchio.



**Figura 4-2:** Schema semplificato della traccia in sezione del laminato osteonico, in evidenza le aree  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ , usate per calcolare la quantità di fibre di riempimento da inserire all'interno.

$$A_1 = \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{Area interna al manicotto}$$

$$A_3 = d^2 \quad \text{Area del quadrato circoscritto al cerchio}$$

$$A_2 = \frac{A_3 - A_1}{2} \quad \text{Area inter-osteonica}$$

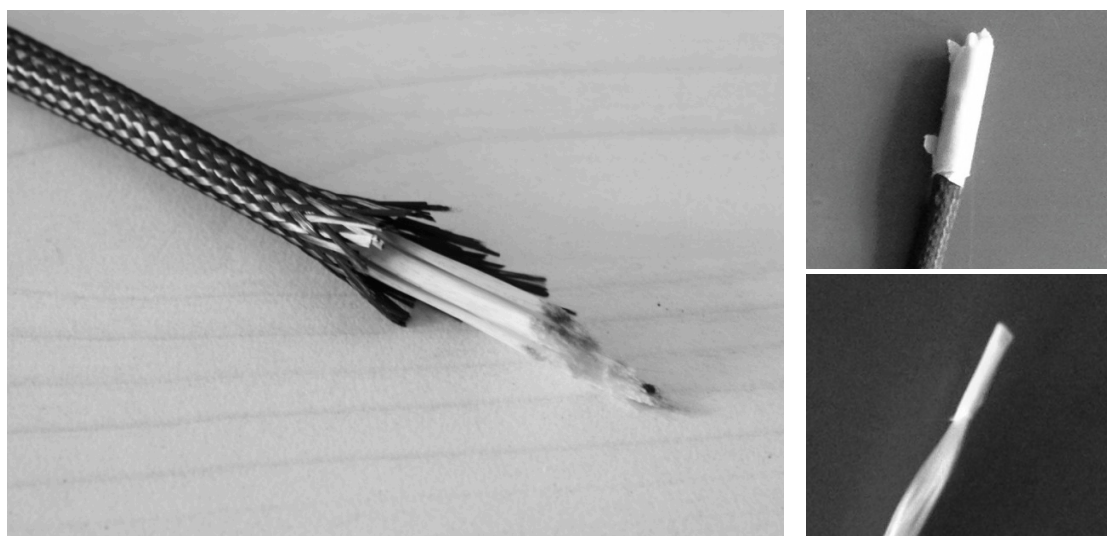
Considerando che le fibre usate sono le stesse, si deduce che il riempimento omogeneo della struttura si ha inserendo un ammontare di fibre che sta in rapporto 7:1 a favore della zona interna al manicotto.

$$r_f = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\pi}{(4-\pi)} = 7,3 \quad \text{Rapporto di fibre}$$

#### 4.1.2 Metodo 1: “Single osteon attachment”

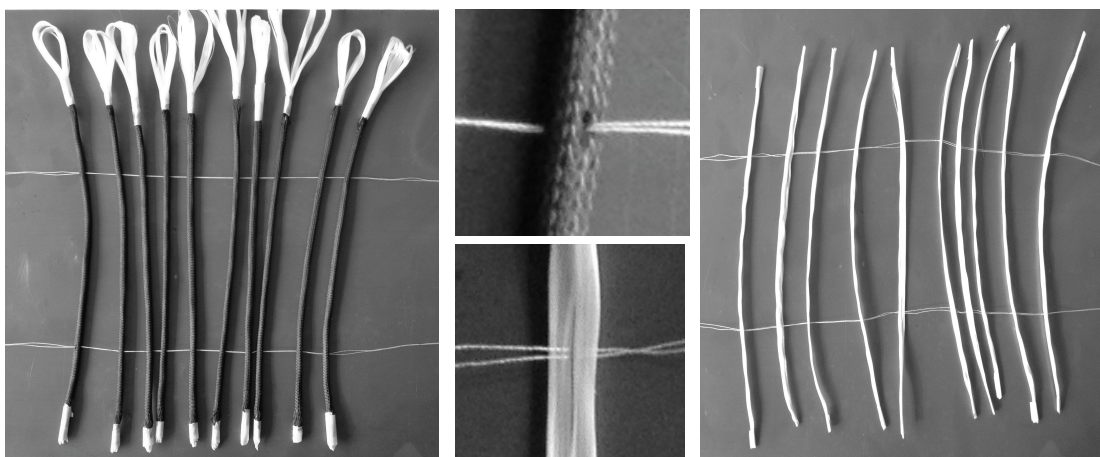
Il primo metodo di fabbricazione proposto è totalmente manuale e non richiede l'impiego di attrezzature speciali. La caratteristica peculiare sta nel modo attraverso il quale gli osteoni e le fibre esterne di riempimento vengono accostati gli uni alle altre. Tale operazione viene realizzata per mezzo di guide parallele realizzate alle estremità delle parti.

Gli osteoni, tagliati preventivamente della lunghezza desiderata, vengono riempiti uno alla volta con le fibre di vetro. Per compattare l'accoppiamento è necessario stirare il tubo di carbonio, in modo tale che esso aderisca alle fibre interne che lo riempiono eliminando così arricciature e spazi vuoti. Le estremità devono poi essere fissate con del nastro adesivo in modo tale da evitare scorrimenti indesiderati durante le successive operazioni. Completata l'operazione si procede alla preparazione delle fibre esterne da posizionare tra gli osteoni le quali vengono tagliate e assicurate sulle estremità per evitare sfibramenti.



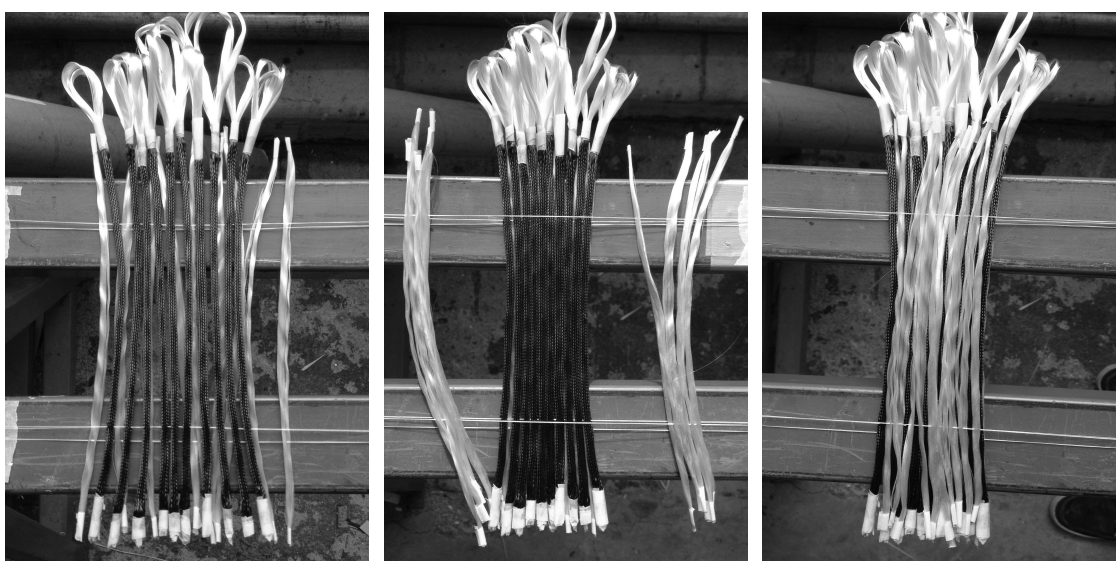
*Figura 4-3: La preparazione dell'osteone. A sinistra il manicotto di fibre di carbonio al cui interno si vedono le fibre di vetro. A destra, in dettaglio, le parti terminali “dell'osteone” e della fibra di riempimento. Si nota che in entrambi i casi si fissano le estremità con del nastro adesivo.*

A questo punto, si realizzano le guide dei tre strati fibrosi (osteoni, fibre di riempimento superiori e inferiori) che vengono in seguito disposti uno sopra l'altro a formare la struttura. Le guide o binari sono realizzate per mezzo di ago e filo facendo scorrere quest'ultimo attraverso ogni elemento che compone lo strato. Il risultato dell'operazione è mostrato in [Figura 4.4](#).



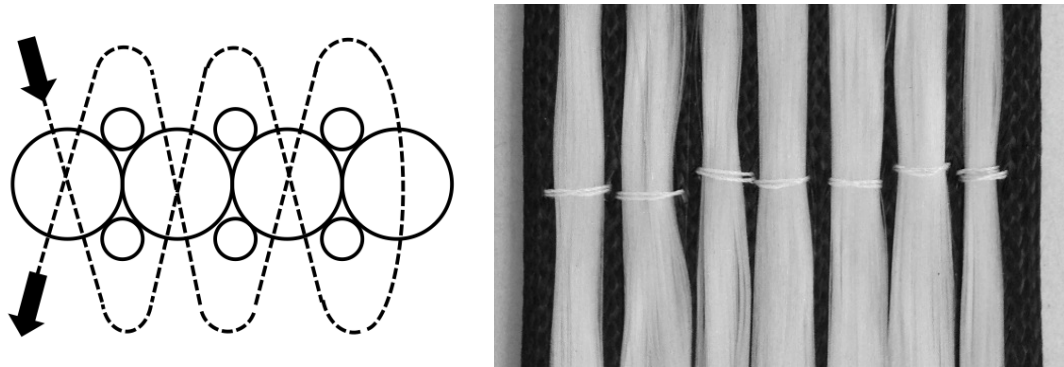
**Figura 4-4:** A destra lo strato di fibre di vetro per il riempimento esterno, a sinistra il set di osteoni riempiti. In evidenza le guide realizzate per la fase successiva di sovrapposizione. Nelle immagini centrali è visibile la guida che scorre tra i filamenti.

A questo punto, si dispongono in sequenza gli strati. Conclusa questa operazione, vengono messe in tensione le guide e fissate alla base di lavoro per mezzo del nastro adesivo.



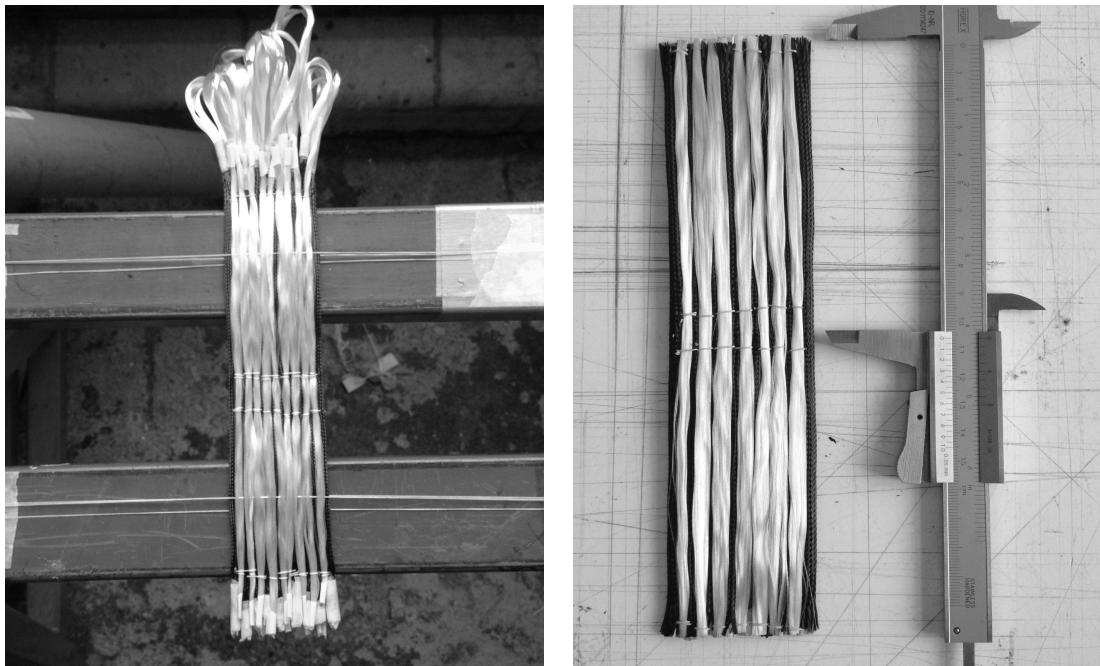
**Figura 4-5:** Fasi di posizionamento e compattazione degli strati. A sinistra si notano lo strato di riempimento inferiore e quello degli osteoni. Nell'immagine centrale è stato aggiunto la sequenza dei riempimenti superiori. A destra il risultato finale pronto per la cucitura a mano.

Sfruttando il sistema a binari si procede quindi manualmente all'accostamento degli elementi che una volta compattati vengono cuciti tra loro secondo la tecnica riportata in [Figura 4.6](#).



**Figura 4-6:** Tecnica di cucitura (a sinistra). Dettaglio della cucitura realizzata (destra). La cucitura rappresenta una delle parti più complicate e laboriose del processo.

Terminata questa delicata operazione, si rimuovono le guide e si procede al taglio delle estremità superflue ottenendo così il tessuto finale, stabile e maneggiabile.



**Figure 4-7:** A sinistra, la struttura completa al termine della fase di cucitura; a destra il tessuto finale al termine del processo di rimozione delle estremità.

Di seguito, per maggiore chiarezza, si riporta uno schema semplificato delle operazioni che compongono il processo:

**Tabella 4-1:** Schema semplificato del processo di costruzione della struttura tessile (Metodo 1)

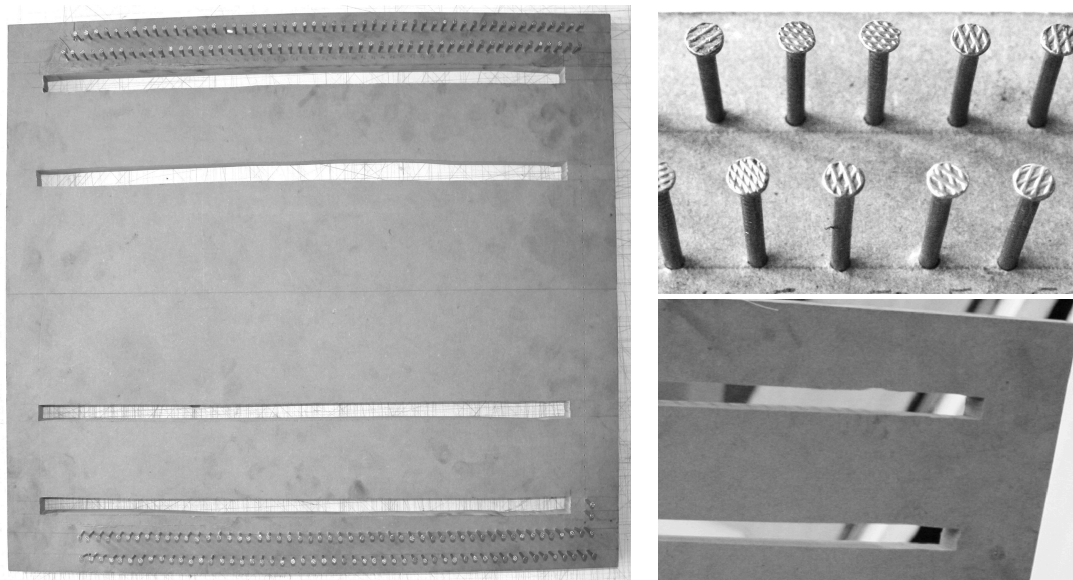
<b>Preparazione degli osteoni</b>	<p><i>Taglio del singolo manicotto di carbonio</i></p> <p><i>Inserimento manuale delle fibre di vetro</i></p> <p><i>Stiramento e fissaggio delle estremità</i></p>
<b>Preparazione del riempimento esterno</b>	<p><i>Taglio del singolo filo</i></p> <p><i>Fissaggio delle estremità</i></p>
<b>Compattazione degli strati</b>	<p><i>Cucitura delle guide</i></p> <p><i>Fissaggio e messa in tensione delle guide</i></p> <p><i>Disposizione degli strati e compattazione</i></p>
<b>Cucitura e taglio</b>	<p><i>Cucitura</i></p> <p><i>Rimozione delle guide</i></p> <p><i>Rimozione delle estremità (taglio)</i></p>



#### 4.1.3 Metodo 2: “Long tube – frame sewing”

Il secondo metodo di fabbricazione è anch'esso di tipo manuale ma in questo caso le operazioni di compattazione della struttura sono eseguite per mezzo di un telaio appositamente progettato e costruito.

L'utensile di legno, è provvisto di quattro scanalature e di quattro file di chiodi disposte in coppia su lati opposti del telaio. Le scanalature consentono di cucire la struttura compattata direttamente sull'utensile, mentre i chiodi permettono lo svolgimento delle fibre e la loro messa in tensione. Sulla fila più esterna si impegnano le fibre di vetro, mentre la fila interna è dedicata alla disposizione del cavo osteonico.

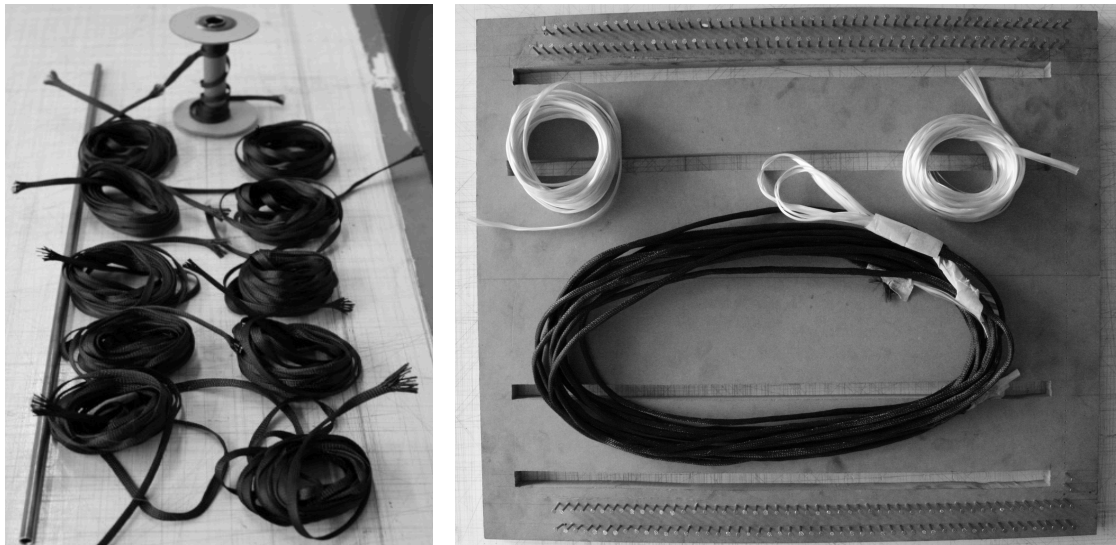


**Figura 4-8:** Telaio per la fabbricazione della struttura tessile. In evidenza le chiodature e le scanalature per la cucitura. Si fa notare che le due file di chiodi sono sfalsate con lo scopo di permettere alle fibre di riempimento di posizionarsi negli spazi intraosteonici.

In contrapposizione al caso precedente, gli osteoni non sono più tagliati singolarmente ma si producono cavi di circa 5 m di lunghezza. L'introduzione delle fibre di vetro nel manicotto di carbonio è praticata per mezzo di una guaina di rame su cui è fatto scorrere e arricciare il manicotto di carbonio. Le fibre di vetro vengono quindi fatte scorrere internamente alla guaina e inserite all'interno evitando il contatto diretto.

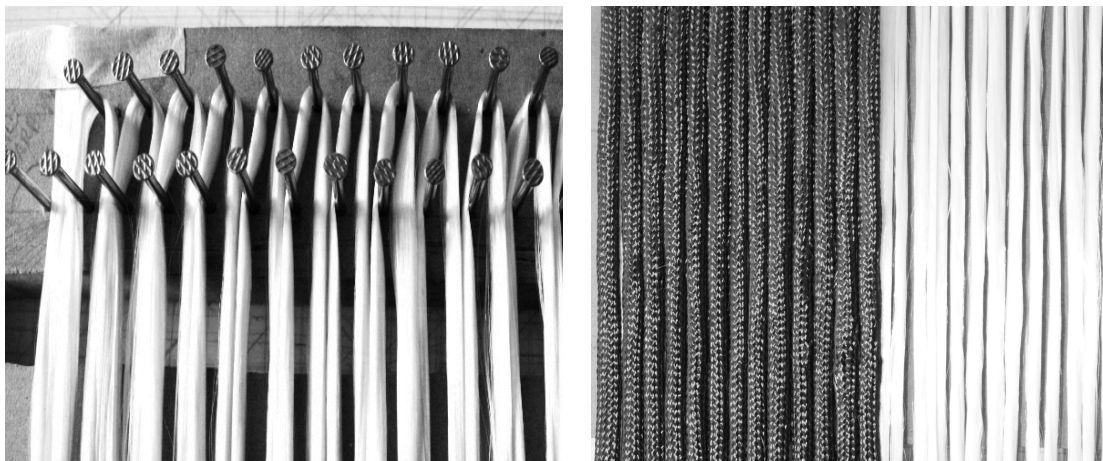
Anche le fibre di riempimento esterno non sono più tagliate singolarmente, ma si usano lunghe matasse di filo.





**Figura 4-9:** Rotoli di cavi lunghi usati per l'avvolgimento. A sinistra i manicotti non ancora riempiti, a destra i due bandoli di riempimento esterno e la corda osteonica, pronti per la fase di intelaiatura

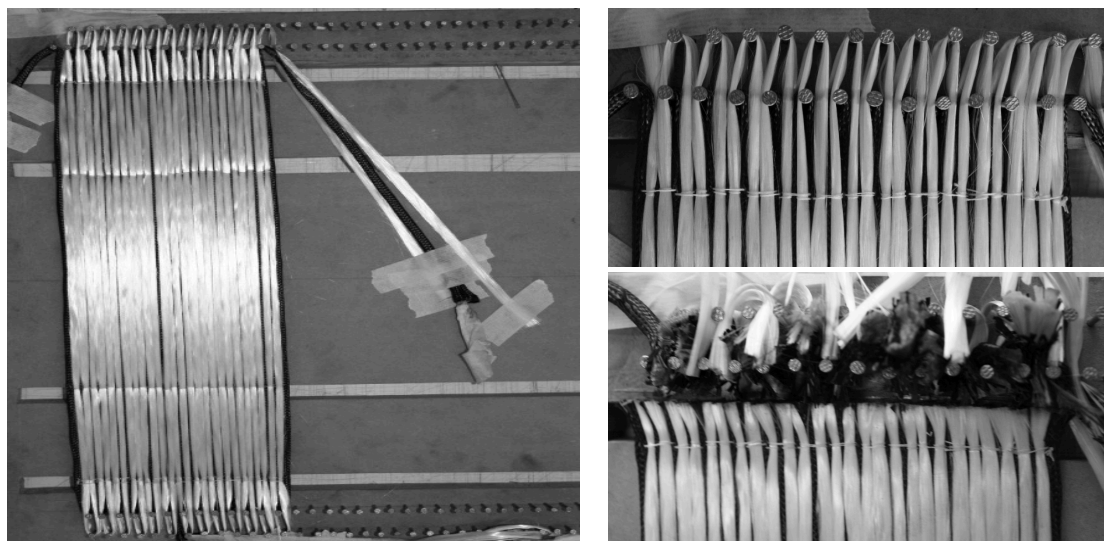
Una volta preparati, i cavi vengono avvolti sul telaio rispettando una sequenza prestabilita. Si dispongono dapprima le fibre di vetro che costituiscono il riempimento esterno inferiore, in seguito viene avvolto il cavo osteonico e in conclusione il rinforzo esterno superiore. Durante le operazioni di avvolgimento, le fibre vengono messe in tensione, così facendo la struttura risulta essere più compatta e allineata.



**Figura 4-10:** Fasi di avvolgimento. In evidenza la sovrapposizione dei primi due strati fibre (destra)

Conclusa questa fase, si procede alla cucitura delle parti per mezzo della stessa tecnica vista in precedenza. In questo caso, infatti, l'operazione risulta più agevole in quanto, posizionando il telaio in verticale l'operatore può svolgere il lavoro stando seduto. Inoltre le scanalature, usate come guide permettono una qualità della cucitura superiore.

Conclusa la cucitura, l'ultima operazione è il taglio del laminato, che viene effettuato tra la fila chiodata interna e la scanalatura.



**Figura 4-11:** La struttura tessile al termine della cucitura (destra). Dettagli di cucitura e taglio (sinistra)

Di seguito, per maggiore chiarezza, si riporta uno schema semplificato in cui sono riassunte le operazioni del processo:

**Tabella 4-2:** Schema semplificato del processo di produzione della struttura tessile (Metodo 2)

**Preparazione della "corda" osteonica**

Taglio del lungo tubo di carbonio (5m)  
Inserimento delle fibre di vetro con "canna"  
Stiramento e fissaggio delle estremità

**Preparazione della "corda" di riempimento**

Taglio del lungo cavo di vetro (5m)  
Fissaggio delle estremità

**Disposizione delle corde**

Disposizione del primo cavo di fibra di vetro  
Messa in tensione e fissaggio  
Sovrapposizione della "corda" osteonica  
Messa in tensione e fissaggio  
Disposizione dell'ultimo strato di riempimento  
Messa in tensione e fissaggio

**Cucitura e taglio**

Cucitura  
Taglio delle estremità e rimozione dal telaio

#### 4.1.4 Confronto dei metodi

Nel seguito si riportano i principali vantaggi e svantaggi dei due metodi a confronto:

*Tabella 4-3: I due metodi di assemblaggio a confronto. Vantaggi e svantaggi*

	Vantaggi	Svantaggi
<b>“Single osteon attachment”</b>	Nessun utensile richiesto	Tempi di produzione elevati (4h per 10 osteoni)
	Lunghezza del laminato indipendente dal sistema	Spreco di materiale (fibre di vetro)
		Allineamenti non precisi
		Scomodo processo di cucitura
<b>“Long tube frame sewing”</b>	Riduzione dei tempi di produzione (2h per 50 osteoni)	Necessità di un utensile specifico
	Migliore allineamento degli elementi	Lunghezza del laminato fissata
	Minore danneggiamento delle fibre	Lento processo di cucitura
	Minore spreco di materiale	

La Tabella 4.3 mostra come il metodo 2, rappresenti la soluzione migliore. La struttura finale è infatti più stabile, gli allineamenti delle fibre sono più precisi e il tempo di lavorazione totale è più che dimezzato. L'impiego del telaio permette di ridurre il numero delle operazioni, specialmente nella fase di produzione dell'osteone. Infatti, se con il primo metodo il numero di osteoni incide su quello delle attività da svolgere, nel secondo a quantità crescenti corrisponde una variazione della lunghezza del cavo osteonico, ma il numero delle operazioni del processo rimane invariato.

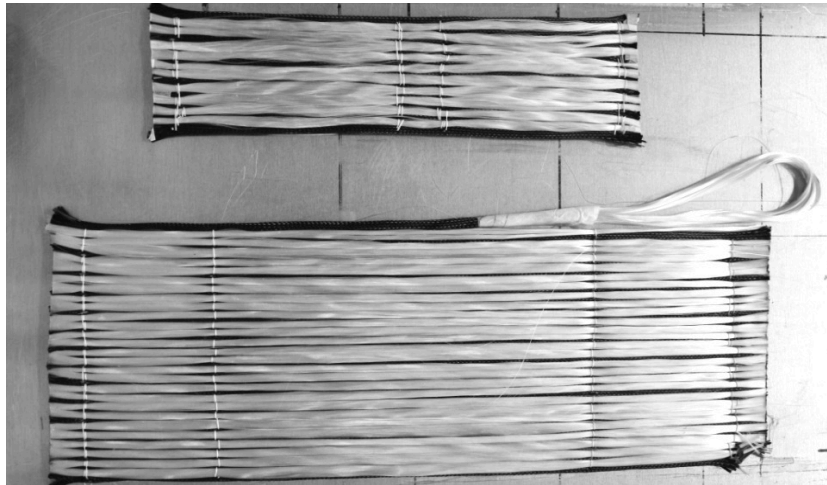
Un ulteriore miglioramento è rappresentato dalla possibilità di mettere in tensione le fibre durante lo svolgimento dei cavi, così facendo gli allineamenti risultano essere più semplici e anche più precisi.

L'operazione di cucitura, che con il primo metodo deve essere svolta in orizzontale, dall'alto in basso, può essere svolta dall'operatore in posizione seduta, semplicemente fissando il telaio in verticale.

L'ultimo sostanziale vantaggio è rappresentato dal minor spreco di materiale, che si traduce nella riduzione dei costi associati al manufatto.

Di contro, il metodo richiede la costruzione di un utensile specifico le cui dimensioni rappresentano un limite per la struttura tessile fabbricabile. La distanza tra le chiodature contrapposte rappresenta un limite per la lunghezza massima del laminato, mentre il numero di chiodi ne determina la larghezza massima.

Di seguito, in [Figura 4.12](#) si riportano le strutture tessili, risultato finale dei due processi descritti.



**Figura 4-12:** Strutture osteoniche al termine del processo. In alto quella ottenuta con il metodo 1, in basso quella finale del metodo 2.

### Considerazioni finali sul processo

Il metodo usato per produrre la struttura osteonica è manuale e quindi la qualità del risultato non è costante ma dipende dalle abilità dell'operatore e dall'esperienza maturata sul processo. Danneggiamenti delle fibre possono essere causati durante l'operazione di avvolgimento delle fibre sul telaio, per interazione indesiderata con i chiodi, o nella fase iniziale d'inserimento delle fibre intra-osteoniche.

L'operazione di cucitura rappresenta la fase critica del processo, essa incide con un peso del 60% sul tempo totale di lavorazione e rimane l'attività manuale più complicata dell'intero metodo.

Ulteriori sviluppi sono possibili, ma miglioramenti significativi possono essere raggiunti solo introducendo automazione al processo. Tale problematica esula dallo scopo di questo lavoro.

## 4.2 L'impregnazione: Test preliminari

Prima di procedere alla fabbricazione dei laminati da testare meccanicamente si conduce una campagna sperimentale per analizzare il comportamento della struttura tessile durante la fase d'impregnazione.

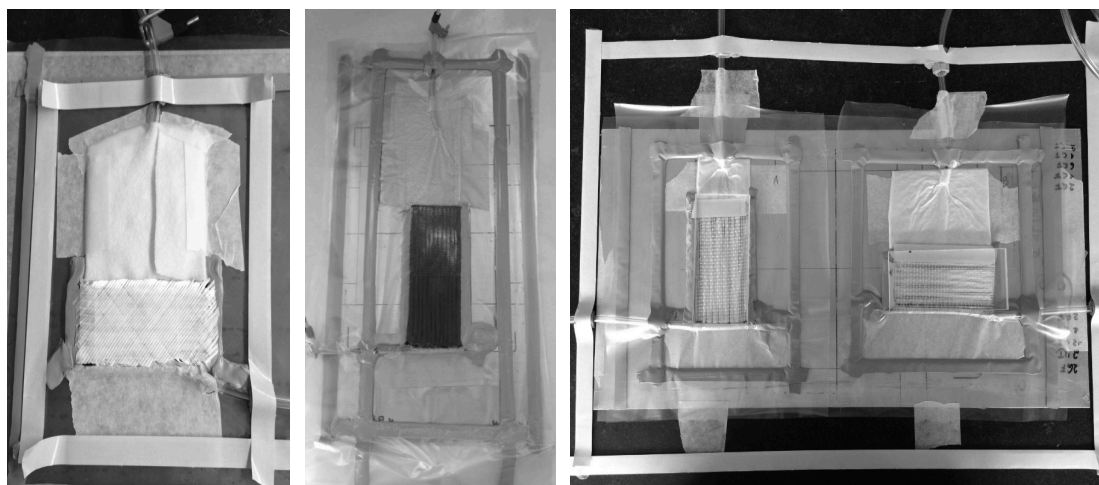
Il processo usato è il VARI, Vacuum Assisted Resin Injection, già ampiamente descritto nel paragrafo 2.2.1.

L'obiettivo dei test è di determinare i parametri di processo, quali: tipo di reagente, tempo di evacuazione aria, orientamento relativo tra direzione di iniezione e fibre ecc.

La campagna prevede l'impregnazione di quattro provini con dimensioni approssimative di 110x50 mm rispettivamente in direzione longitudinale e trasversale alle fibre.

Tutti i laminati vengono fatti solidificare a temperatura ambiente per un tempo di 48h, trascorso il quale vengono rimossi ed analizzati.

Di seguito si riportano schematicamente i tre test preliminari, evidenziando fenomeni e problematiche osservate in ciascun tentativo.



**Figura 4-13:** I tre test. Da sinistra a destra, singolo vuoto fibre trasversali, doppio vuoto con vetro interposto e fibre longitudinali, doppio vuoto comparativo trasversale e longitudinale con plexiglass frapposto

### 4.2.1 VARI a singolo vuoto

Il primo test è stato condotto usando il processo d'iniezione a singolo vuoto con la struttura a tubi orientata trasversalmente rispetto alla direzione di avanzamento della resina. La strategia d'impregnazione è a linea d'infusione ed è realizzata per mezzo di un tubo a spirale. Nella parte superiore è disposto un tessuto di assorbimento caratterizzato da bassa permeabilità con lo scopo di rallentare il flusso in uscita favorendo la corretta impregnazione dell'intero provino.

Lo scopo di questa prova è di valutare la bontà del processo a singolo vuoto e il comportamento della struttura durante la fase d'impregnazione.

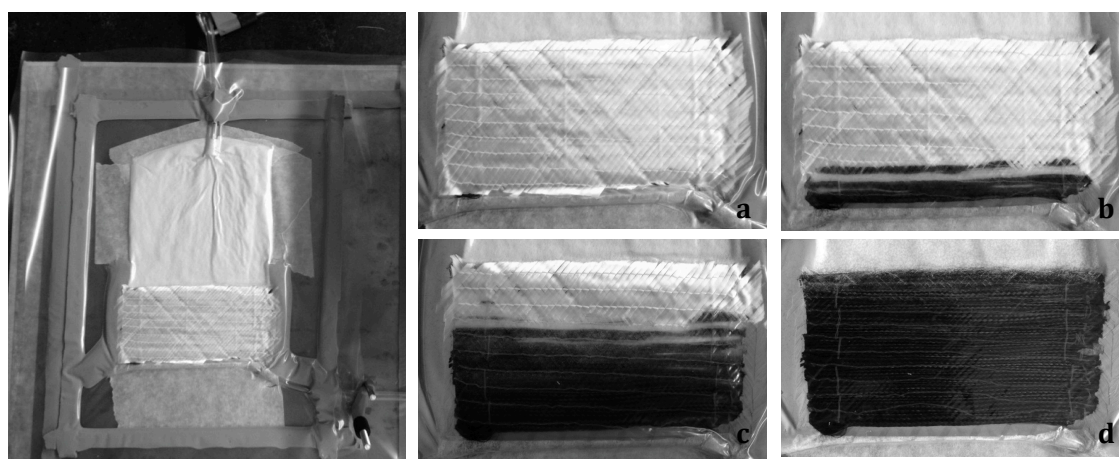
Di seguito si riportano dati e immagini esemplificative.

**Tabella 4-4:** Dati sulla struttura tessile

	Provino
Dimensioni [mm]	106 x 50
Peso [g]	36,4
N° Osteoni	10
Peso fibre carbonio [g]	3,2
Peso fibre di vetro (riempimento) [g]	30,2
Peso fibre di vetro (layer esterni) [g]	3

**Tabella 4-5:** Resina e reagente

	Resina
Tipo	Epikote RIM-R 135
Peso [g]	50
	Reagente
Tipo	RIM-H 134-137 (20:80)
Peso [g]	15
Rapporto di miscelazione	10:3



**Figura 4-14:** A sinistra, il sistema a singolo vuoto. A destra le fasi d'impregnazione. a) istante iniziale. b) 3min. c) 13min. d) 22min



Tabella 4-6: Parametri di calcolo

Parametri	
Densità fibre di vetro [g/cm <sup>3</sup> ]	2,4
Densità fibre di carbonio [g/cm <sup>3</sup> ]	1,7
Densità resina [g/cm <sup>3</sup> ]	1,2
Peso lineare fibre di carbonio [g/m]	2,75
Peso lineare fibra di vetro [g/m]	4,52

Tabella 4-7: Dati relativi al laminato impregnato

Laminato	
Spessore iniziale [mm]	5,1
Spessore finale [mm]	4,3
Peso [g]	54
Volume fibre [cm <sup>3</sup> ]	1,8+13,8
Volume resina [cm <sup>3</sup> ]	14,5
% di fibre in volume	~50%

L'impregnazione del provino è stata portata a termine nonostante una serie di fenomeni indesiderati. L'elevata permeabilità della struttura in direzione trasversale determina un decadimento rapido della pressione causando un ristagno di resina nella parte inferiore del provino con conseguente variazione di spessore lungo la direzione del flusso.

Lo schiacciamento, indotto dalla depressione per mezzo del film, produce una dilatazione della struttura impossibile da controllare. L'interazione tra struttura tubolare del tessuto e deformabilità del film plastico genera una superficie finale del laminato ondulata, mantenendo però una buona struttura degli osteoni che in sezione hanno tracce prossime a quelle di un cerchio.

Di seguito si riportano in modo schematico fenomeni positivi e negativi osservati nel test:

#### Considerazioni sul test

<i>Aspetti Positivi</i>	<i>Aspetti negativi</i>
Buona qualità d'impregnazione superficiale	Superficie ondulata
Struttura tubolare accettabile	Gradiente di pressione troppo elevato
Fronte di avanzamento regolare	Rilassamento trasversale della struttura
Metodo semplice	Lenta impregnazione (22min- 6cm)
	Variazione di spessore del laminato (0,8 mm in 6 cm di larghezza)

#### 4.2.2 VARI a doppio vuoto (vetro interposto)

Sulla base dell'esperienza maturata, si decide di cambiare la modalità del test. Il nuovo lay up sfrutta ancora la logica del VARI, ma a differenza del caso precedente esso prevede due camere depressurizzate concentriche. La camera interna ha lo scopo di indurre il flusso di resina attraverso la struttura fibrosa, mentre la seconda per mezzo di una lastra di vetro (1cm di spessore) ha la funzione di appianare la superficie del laminato e risolvere il fenomeno di risacca. La prova è condotta con la struttura osteonica parallela alla direzione del flusso di resina, in modo tale da analizzare le caratteristiche d'impregnazione in differenti configurazioni.

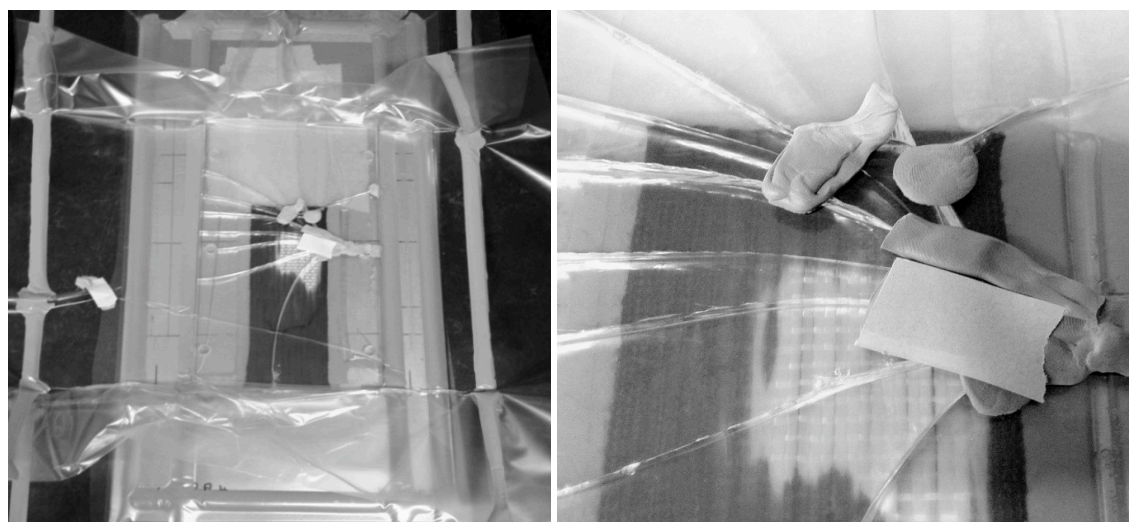
Di seguito si riportano i dati relativi alla prova e alcune immagini esemplificative.

**Tabella 4-4:** Dati sulla struttura tessile

Provino	
Dimensioni [mm]	209 x 55
Peso [g]	72,2
N° Osteoni	12
Peso fibre carbonio [g]	6,2
Peso fibre di vetro (riempimento) [g]	60
Peso fibre di vetro (layer esterni) [g]	6

**Tabella 4-5:** Resina e reagente

Resina	
Tipo	Epikote RIM-R 135
Peso [g]	100
Reagente	
Tipo	RIM-H 134-137 (20:80)
Peso [g]	30
Rapporto di miscelazione	10:3



**Figura 4-15:** In evidenza la macro area vuota che si forma durante l'iniezione e le cricche sulla lastra di vetro



Tabella 4-6: Parametri di calcolo

Parametri	
Densità fibre di vetro [g/cm <sup>3</sup> ]	2,4
Densità fibre di carbonio [g/cm <sup>3</sup> ]	1,7
Densità resina [g/cm <sup>3</sup> ]	1,2
Peso lineare fibre di carbonio [g/m]	2,75
Peso lineare fibra di vetro [g/m]	4,52

Tabella 4-7: Dati relativi al laminato impregnato

Laminato	
Spessore iniziale [mm]	5,1
Spessore finale [mm]	4
Peso [g]	106
Volume fibre [cm <sup>3</sup> ]	3,5+27,4
Volume resina [cm <sup>3</sup> ]	28,8
% di fibre in volume	~50%

Durante il test si sono verificati nuovi fenomeni indesiderati, nonostante i quali è stata portata a termine l'impregnazione del provino. Per effetto della pressione del film di plastica più esterno, la lastra di vetro si è rotta. La frattura, che si è generata in corrispondenza dei fori sui lati della lastra, propagando ha causato lacerazioni del film plastico con conseguente perdita di pressione nella camera esterna.

L'impregnazione, più rapida del caso precedente (20min-20cm), è caratterizzata da un fronte di avanzamento irregolare, causato probabilmente da una compattazione non uniforme delle fibre. Gli spazi vuoti tra osteoni adiacenti rappresentano, infatti, corsie preferenziali attraverso le quali si instaurano macro-flussi a velocità differenti. Tale fenomeno permane costante e limitato e non rappresenta un problema eccessivamente dannoso per l'impregnazione.

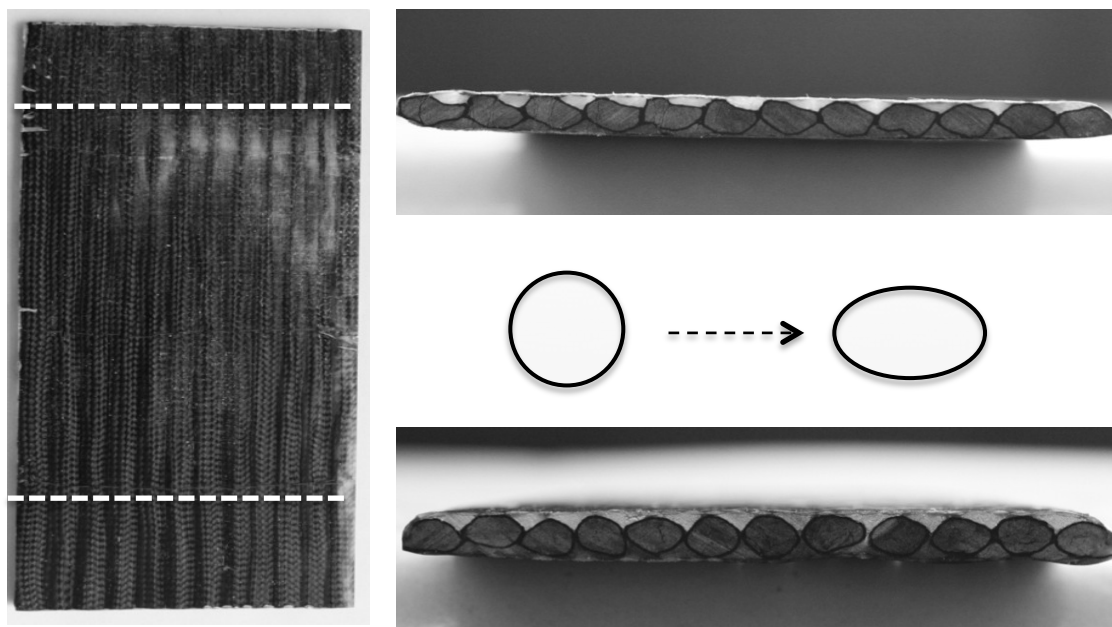
In corrispondenza delle estremità laterali invece, si osservano due macro flussi particolarmente indesiderati. Tali flussi, che nel gergo inglese si dicono "runners", sono la conseguenza di una incompleta adesione tra la parte tessile e il nastro appiccicoso disposto sui fianchi. I runners una volta sfociati nella parte superiore del provino lo iniziano a impregnare. Per effetto della doppia direzione del flusso si produce una macro area vuota lontana dal flusso libero del fronte. Questo fenomeno è particolarmente dannoso in quanto l'aria intrappolata nella zona isolata è evacuata con maggiore difficoltà determinando un decadimento qualitativo d'impregnazione.

Il minor tempo impiegato per completare l'iniezione (20min-20cm contro 22-6cm) indica che la permeabilità in direzione longitudinale è di molto superiore a quella trasversale. Questa considerazione, insieme ai tempi limite imposti dal processo di cristallizzazione saranno richiamati nel seguito per la scelta dei parametri di iniezione dei laminati da testare meccanicamente.

Di seguito si riportano in modo schematico fenomeni positivi e negativi osservati nel test:

<b>Considerazioni sul test</b>	
<i>Aspetti Positivi</i>	<i>Aspetti negativi</i>
Veloce impregnazione (20min -20cm)	Variazione di spessore del laminato (1,1mm in 20 cm di lunghezza)
Metodo semplice	Avanzamento del fronte non regolare
Ottima struttura a cerchi (5mm di spessore)	Presenza di runners esterni, macro area incompleta
	Schiacciamento della struttura (da cerchi a ellissi)
	Rottura della lastra di vetro per inflessione
	Qualità dell'impregnazione decrescente lungo la direzione del flusso

Il gradiente di pressione, tipico ed inevitabile del processo d'iniezione VARI genera una distorsione dei tubi interni di carbonio, le cui tracce in sezione passano da circolari ad ellittiche, come mostrato nella [Figura 4.16](#).



**Figura 4-16:** A sinistra il provino impregnato. Si nota come la zona isolata ultima ad essere impregnata sia caratterizzata da una qualità minore rispetto al resto del provino. A destra la distorsione della struttura per effetto di differenti spessori (sezione a 4mm di spessore in alto – sezione a 5mm di spessore in basso)

### 4.2.3 VARI a doppio vuoto (plexiglass interposto)

Sulla base dei fenomeni osservati nel test precedente, si effettua un secondo tentativo con doppia camera depressurizzata. Rispetto al caso precedente, alla lastra di vetro si sostituisce un plexiglass di 1cm di spessore. Tale materiale, sebbene più cedevole, consente di evitare rotture indesiderate. Il test vuole inoltre stabilire un confronto diretto tra l'impregnazione con struttura tubolare in senso trasversale e longitudinale.

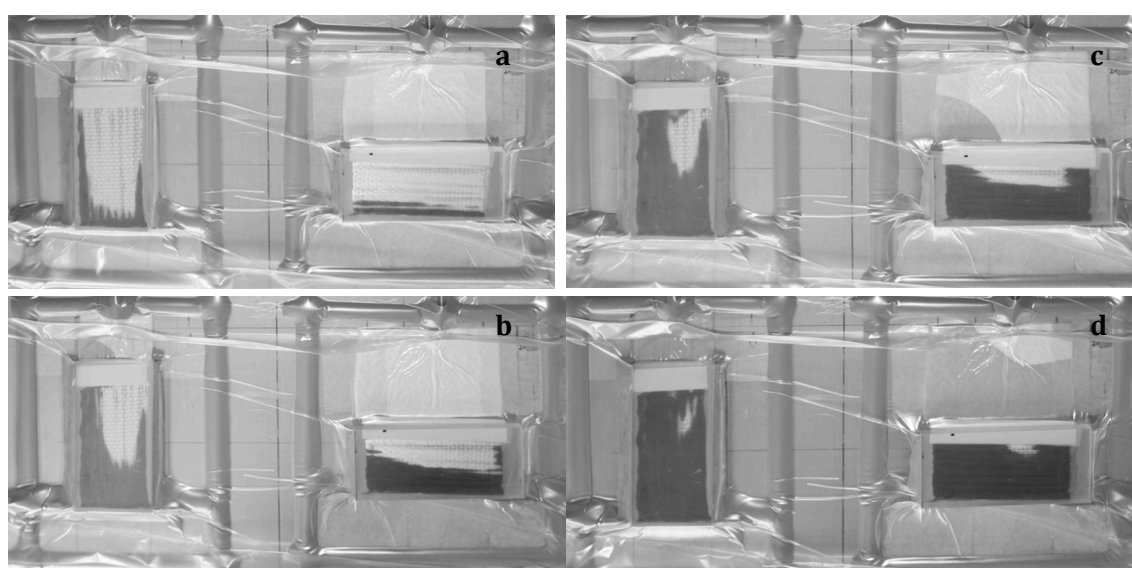
Di seguito si riportano i dati relativi alla prova e alcune immagini esemplificative.

*Tabella 4-4: Dati sulla struttura tessile*

	Provino	
	Longi.	Trasv.
Dimensioni [mm]	106x50	107x50
Peso [g]	27,48	27,52
N° Osteoni	8	8
Peso [g] carbonio	2,58	2,62
Peso [g] vetro (intra)	21,8	21,8
Peso [g] vetro (layers)	3,1	3,1

*Tabella 4-5: Resina e reagente usati*

	Resina	
	Longi.	Trasv.
Tipo	Epikote RIM-R 135	
Peso [g]	50	50
	Reagente	
	Longi.	Trasv.
Tipo	RIMH 134-137 (20:80)	
Peso [g]	15	15
Rapporto miscelazione	10:3	



**Figura 4-17:** Evoluzione del fronte libero. Comparazione tra orientamento longitudinale (a sinistra) e trasversale (a destra). a) 1 min. b) 6 min c) 12 min d) 18 min

Tabella 4-6: Parametri di calcolo

Parametri	
Densità fibre di vetro [g/cm <sup>3</sup> ]	2,4
Densità fibre di carbonio [g/cm <sup>3</sup> ]	1,7
Densità resina [g/cm <sup>3</sup> ]	1,2
Peso lineare fibre di carbonio [g/m]	2,75
Peso lineare fibra di vetro [g/m]	4,52

Tabella 4-7: Dati relativi al laminato impregnato

	Laminato	
	Longi.	Trasv.
Spessore iniziale [mm]	4,9	4,3
Spessore finale [mm]	4	3,8
Peso [g]	41,8	41,9
Volume fibre [cm <sup>3</sup> ]	1,5+10,3	1,5+10,4
Volume resina [cm <sup>3</sup> ]	12	12
% di fibre in volume	~50%	~50%

Il test è stato portato a termine senza particolari inconvenienti. Sia il provino trasversale che quello longitudinale sono stati completati e le caratteristiche dei flussi sono allineate a quelle dei test precedenti.

Con gli osteoni orientati parallelamente alla direzione del flusso, la velocità misurata vale circa 1 cm/min e risulta essere doppia rispetto a quella rilevata nel caso di struttura trasversale che invece vale circa 0,5 cm/min.

La presenza dei runners laterali permane nel caso longitudinale ma è stata attenuata disponendo il materiale di riempimento con maggior cura.

Al termine del processo di solidificazione, avvenuto a temperatura ambiente per una durata di 48 ore, gli spessori misurati risultano essere differenti. Infatti, il provino orientato perpendicolarmente alla direzione d'iniezione non presenta impedimenti trasversali e per effetto della pressione tende a distribuirsi su una superficie maggiore riducendo il proprio spessore. L'effetto finale è quello di una struttura distorta su tutta la lunghezza degli osteoni.

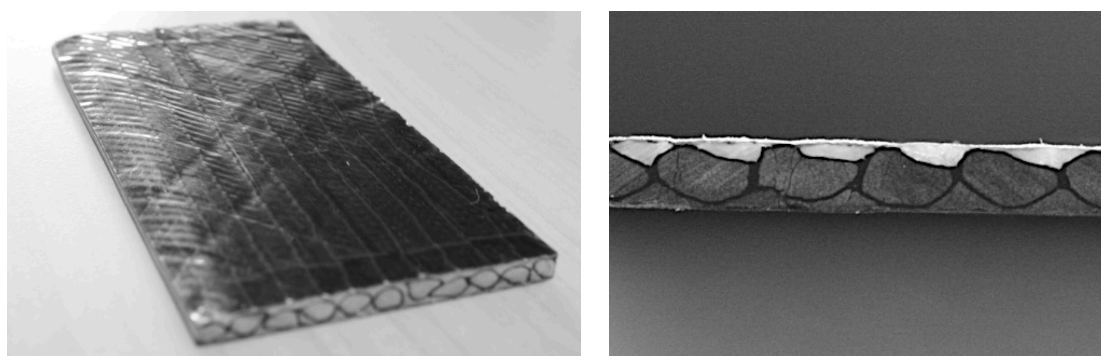
#### Considerazioni sul test

<i>Provino Trasversale</i>	<i>Provino Longitudinale</i>
Tempo di riempimento 19min (6cm)	Tempo di riempimento 20min (11cm)
Spessore minore a causa della dilatazione trasversale della struttura tessile	Variazione di spessore lungo la direzione del flusso
Fronte libero regolare	Fronte libero irregolare
Struttura distorta su tutta la lunghezza	Presenza di runners laterali
	Superficie esterna meno imprecisa ma non perfetta
	Qualità dell'impregnazione decrescente lungo la direzione del flusso

### 4.2.3 Conclusioni test preliminari

I test preliminari hanno messo in evidenza una forte correlazione tra le caratteristiche del flusso libero e l'orientamento della struttura fibrosa. In particolare, se nel caso trasversale il flusso è omogeneo, in quello longitudinale esso si presenta frastagliato e caratterizzato da runners laterali. In contrapposizione, le velocità di avanzamento stanno in rapporto tra loro 2:1 in favore della disposizione longitudinale, che con 1cm/min (valore medio) si conferma la soluzione più rapida.

Fenomeni indesiderati, come la distorsione dell'elemento osteonico e l'irregolarità superficiale, sono stati rilevati ad ogni prova. Le ragioni sono legate al processo e non possono essere risolte se non cambiando il metodo d'iniezione.



**Figura 4-18:** A sinistra, in evidenza la superficie irregolare (provino test 1), a destra la ovalizzazione della struttura (provino test 2)

La variazione di pressione, indotta tra monte e valle dal gradiente di pressione, causa variazioni di spessore dell'ordine di 1 mm ogni 100 mm in lunghezza. Se nel caso di normali laminati tale differenza non determina cambiamenti della forma strutturale, nel laminato osteonico essa è invece responsabile della distorsione degli elementi tubolari. L'analisi condotta sezionando il provino a differenti valori dello spessore ha evidenziato che a uno spessore di 5 mm corrispondono sezioni circolari degli osteoni, tale valore è stato quindi preso come riferimento per lo sviluppo successivo.

Il film plastico è invece responsabile dell'irregolarità superficiale. La depressione indotta dal sistema agisce direttamente sul film plastico che comprime la struttura fibrosa. Il sottile strato di copertura deformandosi, si atteggia secondo una superficie ondulata. Il fenomeno, molto evidente nel test a camera singola, è stato ridotto ma non risolto attraverso l'interposizione di lastre rigide come il vetro e il plexiglass.

Nel seguito si sintetizzano le considerazioni sui test fin ora condotti.

#### Considerazioni sui test

<i>Aspetti Positivi</i>	<i>Aspetti negativi</i>
Buona qualità dell'impregnazione	Distorsione e ovalizzazione dei tubi
Metodo semplice	Superfici ondulate
Ottima circolarità per uno spessore di 5 mm	Runners laterali
Processo d'impregnazione veloce in direzione longitudinale	Qualità dell'impregnazione decrescente lungo la direzione del flusso

### 4.3 Sviluppo del sistema d'iniezione

Il processo VARI con film plastico è usato comunemente per la produzione di laminati per la caratterizzazione meccanica del materiale. Tale sistema si è dimostrato inadatto alla produzione della struttura bio-ispirata. Distorsione della struttura e superfici irregolari sono le cause principali. Tali problematiche sono state affrontate sviluppando un nuovo sistema d'iniezione, che attraverso uno stampo più rigido consenta la fabbricazione del composito con superfici piane e struttura tubolare indeformata.

La logica dello sviluppo ha però come ulteriore scopo quello di fornire un sistema più preciso in termini dimensionali che possa essere impiegato non solo per il caso specifico ma più in generale per la produzione dei laminati di studio. La ricerca è stata eseguita senza trascurare aspetti pratici quali la semplicità di utilizzo, la riutilizzabilità del sistema e non ultimo il fattore economico.

Gli scopi e i fattori che hanno influenzato la progettazione sono sintetizzati nella Tabella 4.6, riportata di seguito.

**Tabella 4-6:** Obiettivi del sistema, fattori considerati nella progettazione

<b>Scopi</b>	<b>Fattori</b>
Realizzazione di superfici piane	Costi
Migliorare la finitura superficiale	Semplicità di realizzazione
Laminati a spessore costante	Semplicità di utilizzo
Laminati di medie dimensioni 300x250x5 [mm]	Riutilizzabilità
Realizzazione di struttura non distorta	

Il principio del processo è invariato, ossia il flusso di resina è indotto dalla depressione generata da una pompa, ma l'iniezione avviene attraverso una sorta di stampo all'interno del quale viene preventivamente introdotta la struttura preformata.

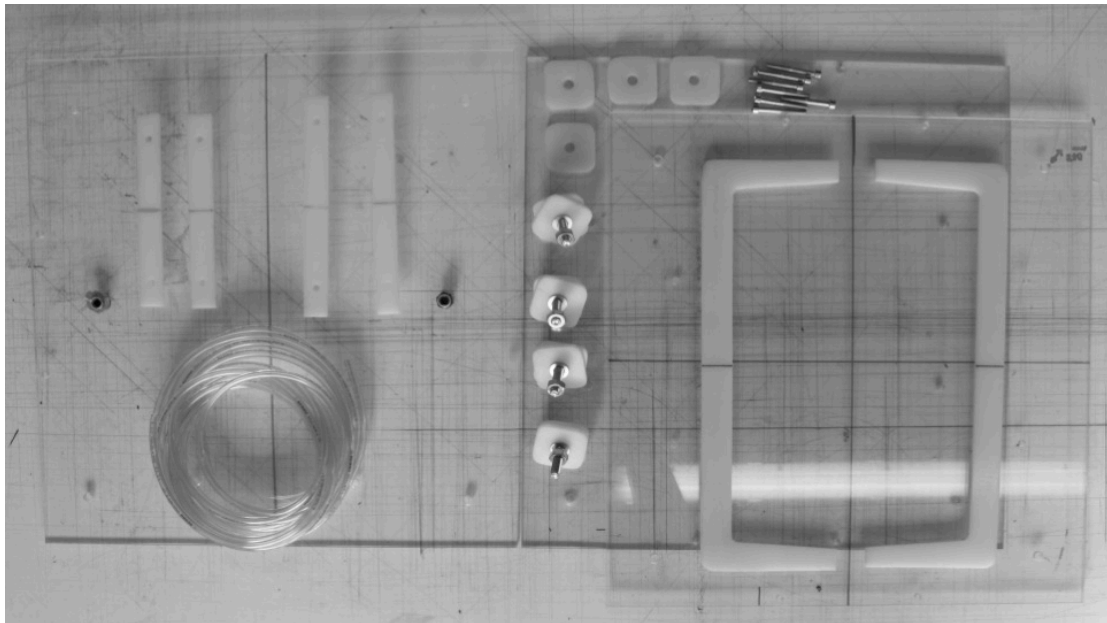
Il nuovo metodo produttivo si configura quindi, come una via di mezzo tra la logica del VARI e quella del RTM (Resin Trasfer Molding).



### 4.3.1 Il sistema d'iniezione a doppio plexiglass

Il sistema complessivo può essere scomposto in quattro macro parti:

- Lo stampo
- Il sistema di centraggio e chiusura
- Il sistema di collegamento con l'esterno
- Il sistema di tenuta



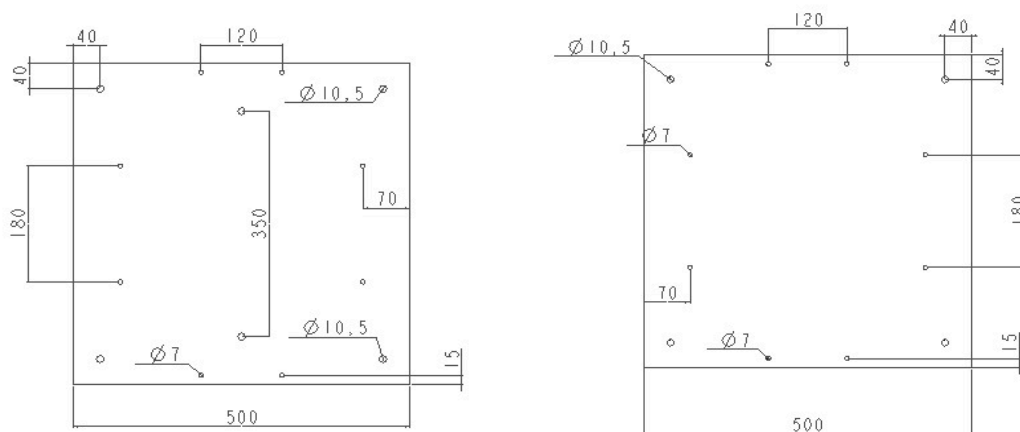
*Figura 4-19: Elementi del sistema d'iniezione a doppio plexiglass*

#### **Lo stampo:**

Lo stampo è l'elemento centrale del sistema. Esso è costituito di due lastre, una superiore e una inferiore e di due elementi sagomati interposti. Le lastre, ognuna di 8 mm di spessore, hanno la funzione di delimitare superiormente e inferiormente la struttura tessile e sono direttamente a contatto con essa determinando sia la finitura superficiale che la planarità del laminato. Lo spessore delle lastre è stato definito in fase sperimentale e rappresenta un compromesso tra flessibilità e rigidità necessarie rispettivamente per favorire la fase di distacco dallo stampo e per ridurre la flessione delle lastre indotta dalla depressione interna.

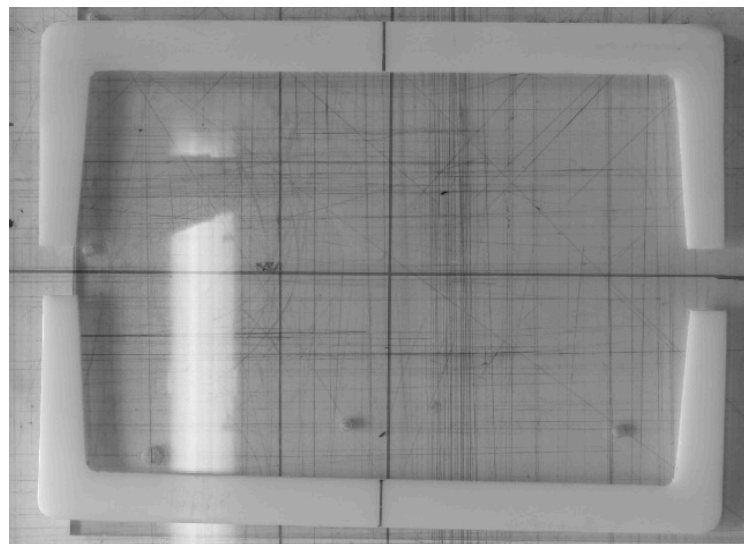
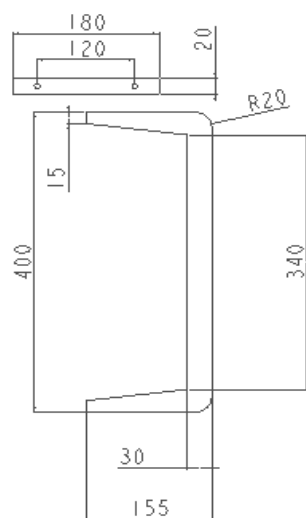
Sulle lastre sono ricavati quattordici fori passanti che sono distribuiti simmetricamente a due a due sui lati delle lastre. Sulla lastra superiore sono realizzati due ulteriori fori filettati, sedi dei connettori.





**Figura 4-20:** Disegni tecnici. Lastra superiore (a sinistra), lastra inferiore (a destra)

Tra le due lastre si trovano i profili sagomati che delimitano il volume interno dello stampo, determinando la forma e la dimensione del manufatto. Essi sono a contatto con la parte laterale della struttura fibrosa da impregnare. Per semplicità di realizzazione questo elemento è realizzato in due parti simmetriche ma può anche essere prodotto in un solo pezzo. Lo spessore degli elementi sagomati è di 5mm, valore per cui si è osservata una struttura ottimale del laminato osteonico.



**Figura 4-21:** Disegno tecnico del profilo sagomato (sinistra). Gli elementi reali (destra)

I materiali scelti per lo stampo sono il plexiglass e il PVA, rispettivamente usati per le lastre e per i profili sagomati. Finitura superficiale elevata e buon comportamento a estrazione del modello sono alcune delle ragioni alla base della scelta effettuata. Lavorabilità alle macchine utensili e costi contenuti consentono la fabbricazione autonoma del sistema con costi complessivi contenuti.

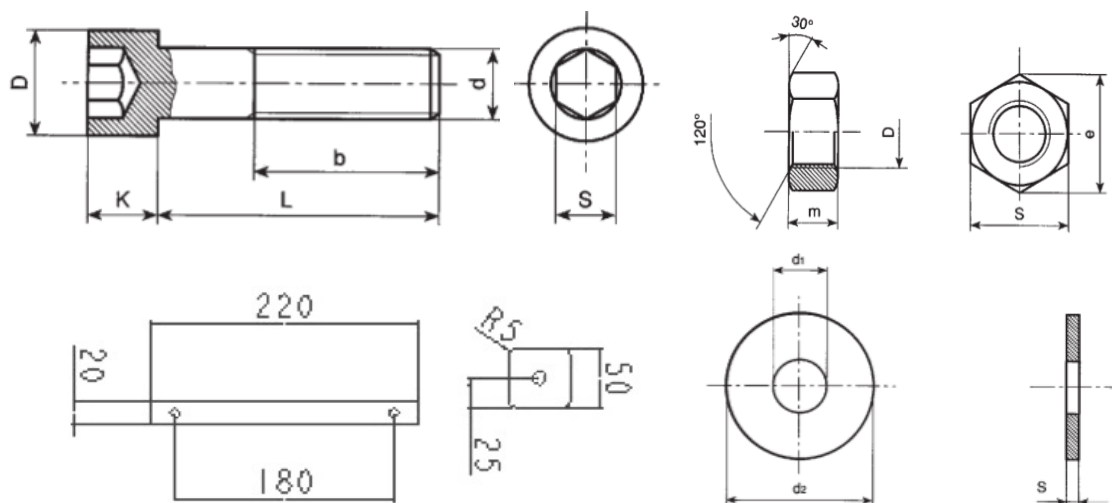
Di seguito si riportano in Tabella 4.7 gli elementi dello stampo e alcune informazioni caratteristiche.

**Tabella 4-7:** Costi e lavorazioni dei sotto elementi dello stampo

Componenti	Materiale	Prezzo [€/m <sup>2</sup> ]	Lavorazioni
Lastra superiore	Plexiglass	97	Taglio, foratura, filettatura
Lastra inferiore	Plexiglass	97	Taglio, foratura
Profili sagomati	PVC	19	Taglio

#### Il sistema di centraggio e chiusura:

Gli elementi dello stampo vengono uniti tra loro per mezzo di un complesso di viti, bulloni e rondelle. L'insieme di questi elementi costituisce il sistema di centraggio e chiusura dello stampo. Le viti, inserite negli appositi fori ricavati sulle lastre, permettono il posizionamento reciproco delle stesse. Una volta disposta la struttura tessile nell'area delimitata dai profili sagomati il sistema può essere serrato semplicemente avvitando i dadi.



**Figura 4-22:** I Disegni tecnici di viti, dadi, rosette e profili sagomati.

Tra una lastra e l'altra, in corrispondenza dei fori, si trovano gli spessori supplementari di PVA. Tali elementi, a prima vista di scarsa importanza, sono parte essenziale del sistema di chiusura.

In prima considerazione essi consentono la battuta in fase di avvitaamento. Serrando il sistema privo di tali elementi si potrebbe indurre l'inflessione delle lastre con il rischio di compromettere la planarità delle stesse.

La seconda funzione, non meno importante della prima, è quella di irrigidire la struttura vincolandola ad assumere distanze uguali in ben 14 aree, ciò si traduce in una migliore planarità delle superfici del laminato.

Dalle misurazioni, effettuate sui compositi finali, è stato osservato uno scostamento tra spessore massimo e minimo dell'ordine dello 0,5 mm su una superficie complessiva del laminato di dimensioni 330x250mm.

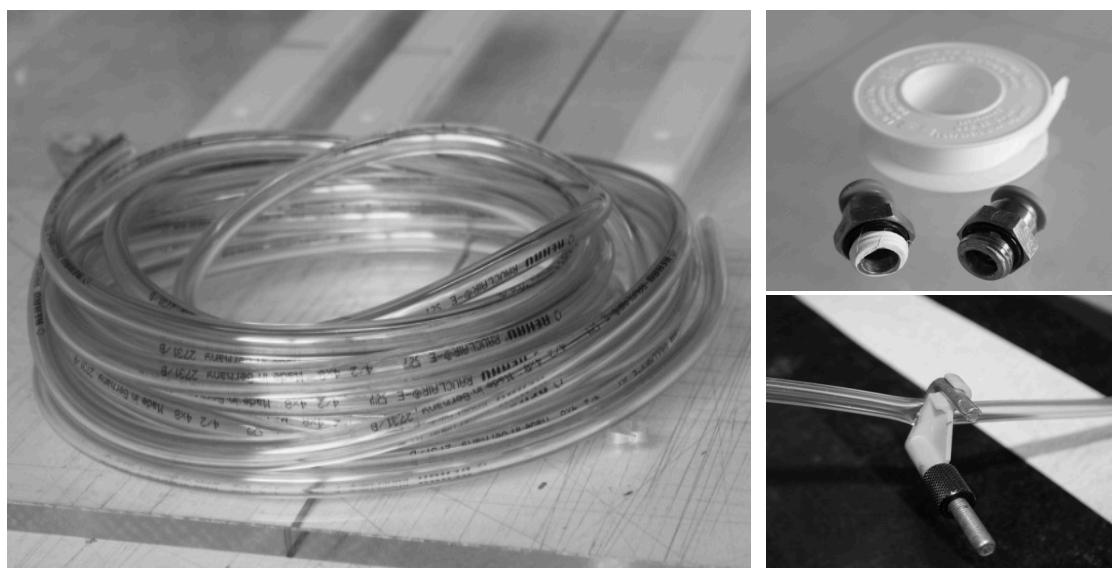
La terza ragione è legata all'isolamento dello stampo, e sarà discussa dettagliatamente nella sezione dedicata al sistema di tenuta.

**Tabella 4-8:** Dati tecnici relativi agli elementi del sistema di chiusura

Componenti	Tipo	Materiale	Dim. Caratt. [mm]	Peso [g/pz] Costo (€/pz)
Viti M6 (x8)	Viti testa cilindrica con cava esagonale	Acciaio 8.8 640 MPa	D=10	15,4
			K=6	
			S=5	0,6
			B=24	
			L=60	
			D=16	
Viti M10 (x4)	Viti testa cilindrica con cava esagonale	Acciaio 8.8 640 MPa	K=10	52,1
			S=8	
			B=32	
			L=70	
Rosette M6 (x8)	Larghe per appoggio su materiali teneri	Acciaio (100 HV)	d1=6,4	2,79
			d2=18	
			s=1,6	0,20
			d1=10,5	
			d2=30	
Rosette M10 (x4)	Larghe per appoggio su materiali teneri	Acciaio (100 HV)	s=2,5	12,2
Dadi M6 (x8)	Esagonale Normale Filettatura metrica ISO grado medio 6H	Acciaio 8 (UNI 3740/4) (89 HRB) Categoria A	Passo=1	2,96
			s=10	
Dadi M10 (x4)	Esagonale Normale Filettatura metrica ISO grado medio 6H	Acciaio 8 (UNI 3740/4) (89 HRB) Categoria A	m=6	0,4
			Passo=1,5	
			s=17	
Dadi M10 (x4)			m=10	14,3
Spessori sagomati (x4 x 12)	Tagliati e forati	PVC	s=5	-

**Il sistema di collegamento esterno:**

Lo stampo deve essere collegato con la resina da un lato e con la pompa del vuoto dall'altro. La connessione è gestita per mezzo di tubi di plastica, connettori e morsette.



**Figura 4-23:** Gli elementi del sistema di collegamento. Il tubo (sinistra), i due connettori e la morsetta (destra)

I tubi di diametro pari a 8 mm sono tagliati della lunghezza opportuna e s'inseriscono all'interno dei connettori, dotati di un sistema interno di aggancio e tenuta. Le morsette hanno lo scopo di permettere all'operatore di aprire e chiudere i collegamenti con l'esterno.

I connettori sono avvitati sulla faccia esterna della lastra superiore e completano il collegamento. Il vantaggio di questo tipo di connessione risiede nella possibilità di smontaggio, molto apprezzata nel caso di revisione del sistema.

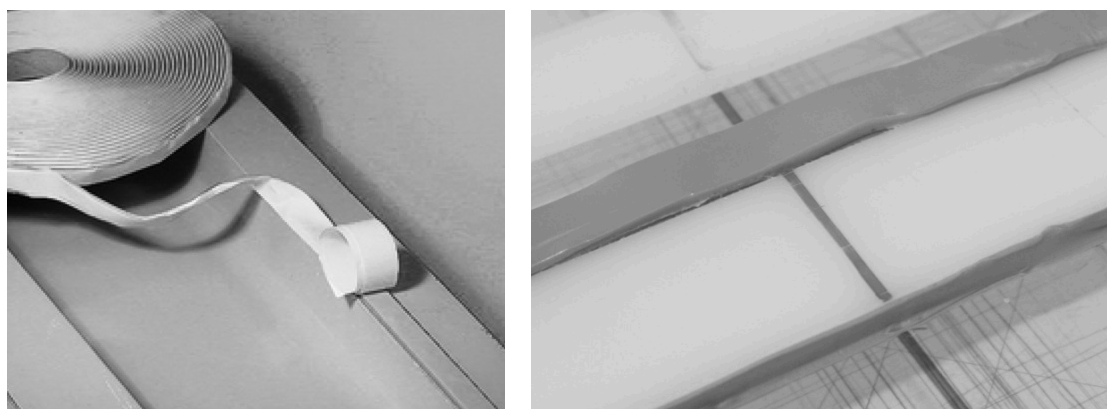
**Tabella 4-8:** Funzioni e costi degli elementi del sistema di collegamento

Componenti	Funzione	Costo
Tubi di plastica	Collegamento	1,8 €/m
Connettori	Collegamento Tenuta	11 €/pz
Morsette	Gestione dei flussi Chiusura e apertura	0,5 €/pz

**Il sistema per sigillare:**

Il sistema di produzione sfrutta la depressione generata nello stampo come forza motrice per impregnare le fibre. Dunque, scopo essenziale del sistema è di garantire la tenuta durante l'intero processo. La semplicità del metodo usato per sigillare lo stampo rappresenta uno dei punti di forza del sistema.

Il materiale usato come sigillante è un semplice nastro adesivo gommato, in inglese *"tacky tape"*. Il nastro, di spessore superiore a quello dei profilati, viene svolto intorno a questi lungo tutta la loro periferia. La tenuta è garantita in due fasi. Nella prima, attraverso il sistema di chiusura e spessori supplementari, è imposto al nastro sigillante di comprimersi in direzione trasversale ed espandendo sul piano aderisce perfettamente alle lastre. Nella seconda fase, generando il vuoto, il sigillante è invitato a scorrere sugli smussi dei profili riempiendo eventuali imperfezioni superficiali possibili cause di perdite di pressione.



**Figura 4-23:** Il tacky tape. A destra in dettaglio una parte del profilo contornato dal materiale sigillante. Si nota come lo spessore del nastro sia maggiore di quello del profilo

Altre aree che richiedono una certa cura sono quelle dei connettori. Le filettature possono essere sede d'infiltrazioni di aria e sono sigillate per mezzo di un sottile strato di teflon disposto sulla filettatura stessa. I connettori contengono al loro interno un sistema di chiusura ermetica che impedisce all'aria di entrare o uscire.

**Tabella 4-9:** Funzioni e costi del sistema di tenuta

Componenti	Funzione	Costo
Tacky tape	Tenuta	1,1 €/m
Teflon	Tenuta	2 €/pz

### 4.3.2 Le evoluzioni del sistema

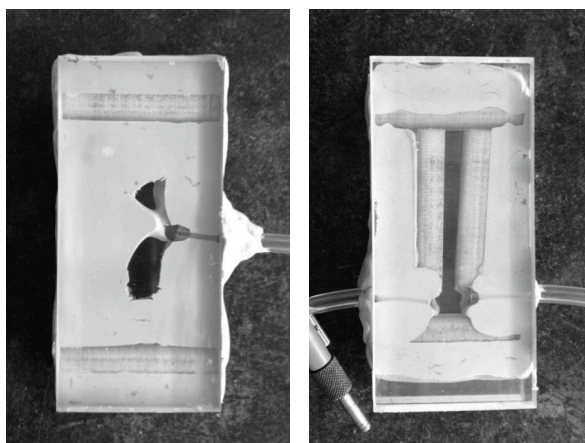
Il processo di sviluppo e collaudo del sistema è stato eseguito conducendo una serie di test sperimentali, ognuno dei quali ha evidenziato problematiche sempre nuove.

Nel seguito si riportano schematicamente le principali evoluzioni attraverso cui si è giunti al sistema descritto nel paragrafo precedente.

#### Test 1: "Sealing tape arrangement"

##### Fenomeni:

- Scorrimento del tacky tape
- Instabilità dei profili



##### Soluzioni:

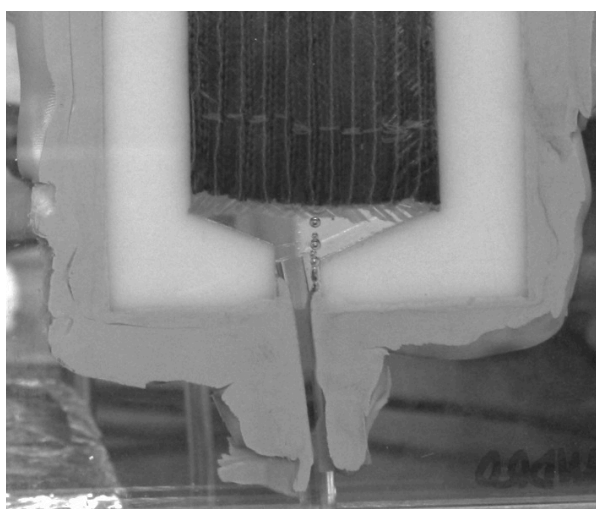
- Sigillante disposto esternamente
- Profili simmetrici contrapposti

**Figura 4-24:** Prove di tenuta sulla disposizione esterna e interna del materiale sigillante. A sinistra è evidente il fenomeno di scorrimento del tacky tape che tende a espandersi nella direzione del vacuum. A destra l'instabilità dei profili per effetto della spinta generata dal vuoto

#### Test 2: "Tube between plexiglass plates, longitudinal"

##### Fenomeni:

- Infiltrazioni di aria, lato resina



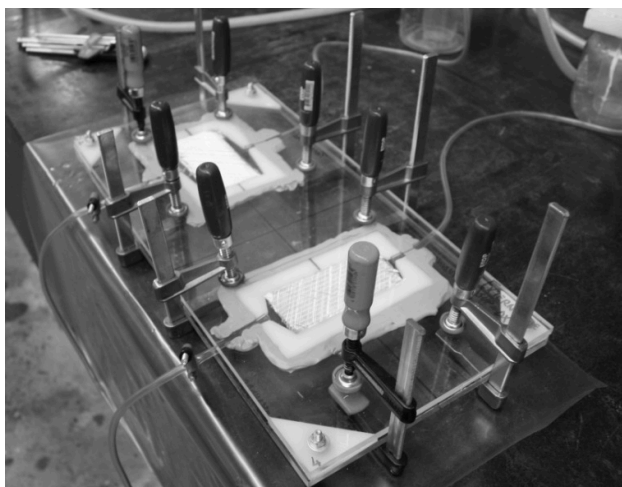
##### Soluzioni:

- Connettori avvitabili

**Figura 4-25:** La prova longitudinale con tubo d'introduzione resina inserito tra le lastre. In evidenza le infiltrazioni di aria dovute al non perfetto isolamento del volume d'iniezione

**Test 3: “Big plates, longitudinal and transversal disposition”****Fenomeni:**

- Effetto d'inflexione
- Difficile chiusura

**Soluzioni:**

- Profili sagomati supplementari al contorno

**Figura 4-26:** L'inflexione dei piatti rende complicata la chiusura e la tenuta del sistema. In evidenza il sistema di morse necessario per mandare a contatto il nastro sigillante e i piatti di plexiglass

Si vuole precisare, che il sistema d'iniezione fin ora descritto rappresenta il punto di partenza usato per le iniezioni dei laminati finali. Ulteriori sviluppi si sono susseguiti laminato dopo laminato. Tali evoluzioni saranno citate e descritte sinteticamente nei paragrafi successivi.

Di seguito si riporta una tabella in cui sono elencate le parti del sistema e i costi ad esse associati.

**Tabella 4-10:** Caratteristiche del sistema a doppia lastra di plexiglass

Elementi principali	Sotto elementi	Costi [€]
<b>Stampo</b>	Lastre	49,8
	Profili sagomati	10
<b>Sistema di chiusura e centraggio</b>	Spessori in PVC	10
	Viti, dadi, rosette	16,2
<b>Sistema di collegamento con l'esterno</b>	Tubi	3,6
	Connettori	22
	Morsetti	1,5
<b>Sistema di tenuta</b>	Nastro sigillante	2
	Nastro di teflon	2
		<b>117,1</b>



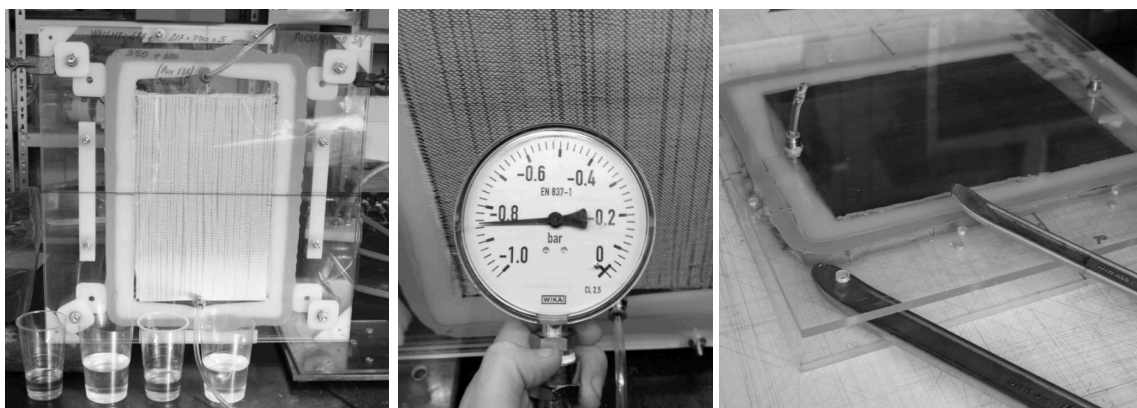
## 4.4 Produzione dei laminati

Concluse le fasi relative alla fabbricazione del tessuto osteonico, all'analisi del processo del processo d'impregnazione e allo sviluppo del sistema d'iniezione si procede alla produzione dei laminati sperimentali, dai quali saranno ricavati i provini per la caratterizzazione meccanica del materiale.

La produzione è realizzata per mezzo del sistema a lastre di plexiglass in configurazione verticale, con il lato di immissione resina collocato nella parte inferiore. Questa tecnica favorisce una più efficiente evacuazione dell'aria di cui beneficia la qualità finale del composito. La strategia d'iniezione è a linea d'infusione ed è realizzata per mezzo di un opportuna sagoma dei profili intermedi dello stampo.

La sequenza delle operazioni eseguite nelle iniezioni è il seguente:

- Preparazione del tessuto osteonico
- Preparazione del sistema d'iniezione
- Introduzione e chiusura del rinforzo nello stampo
- Depressurizzazione dello stampo
- Verifica della tenuta del sistema (depressione max -0,85 bar)
- Evacuazione dell'aria nel mix resina e reagente (10 min)
- Avvio dell'iniezione con controllo del flusso
- Full vacuum fino a riempimento totale
- Tempo di cura del processo 48h a temperatura ambiente (18-25°C)
- Rimozione del manufatto
- Taglio delle parti in esubero



**Figura 4-27:** Alcune delle fasi di produzione. In ordine da sinistra a destra. Preparazione del sistema e del mix resina e reagente, test di tenuta, estrazione del manufatto



#### 4.4.1 Laminato osteonico 1

La produzione del primo laminato rappresenta anche il primo collaudo del sistema d'iniezione. Il laminato è disposto con la struttura tubolare parallela al flusso di resina che è regolato per mezzo della morsetta a non superare nella fase iniziale una velocità del fronte di 0,5 cm/min.

L'iniezione è effettuata a temperatura ambiente per aumentare i tempi di cura della resina.

Di seguito si riportano i dati riguardanti la prova e alcune immagini esemplificative.

*Tabella 4-11: Dati sulla struttura tessile*

Provino	
Dimensioni [mm]	330x260
Peso [g]	545,8
N° Osteoni	52
Peso fibre carbonio [g]	47,6
Peso fibre di vetro (riempimento) [g]	462,3
Peso fibre di vetro (layer esterni) [g]	35,8

*Tabella 4-12: Resina e Hardner usati*

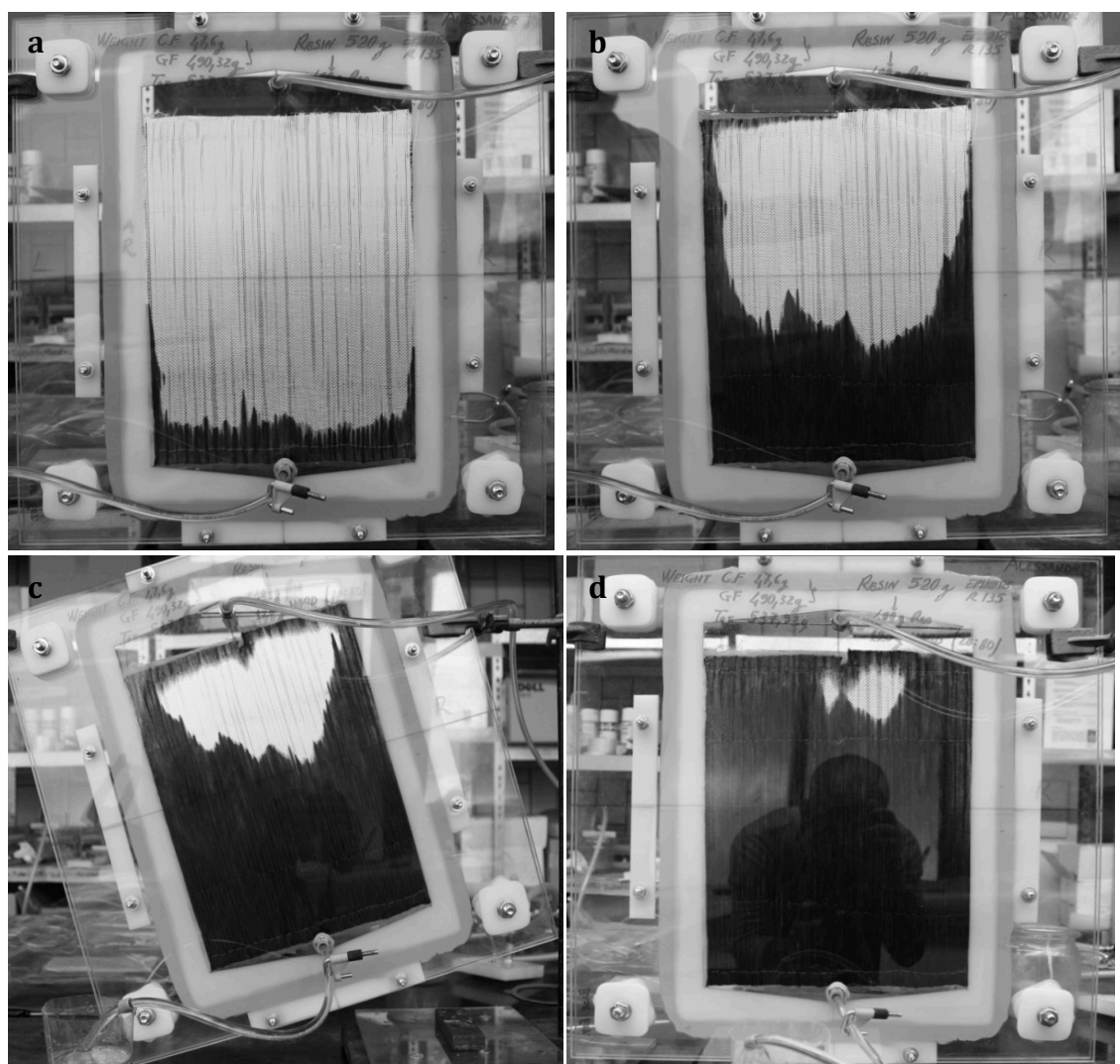
Resina	
Tipo	Epikote RIM-R 135
Peso [g]	400
Reagente	
Tipo	RIM-H 134-137 (20:80)
Peso [g]	120
Rapporto di miscelazione	10:3

*Tabella 4-13: Costi associati al laminato*

Costi [€]	
Fibre di vetro (riempimento)	19,25
Fibre di vetro (layer)	1
Fibre di Carbonio	39,8
Resina + Reagente	4,5+1,7
Costo tot. laminato	64,55

*Tabella 4-14: Dati riferiti al laminato impregnato*

Laminato	
Spessore nominale [mm]	5
Delta spessore massimo [mm]	0,45
Peso [g]	778,2
Volume fibre [cm <sup>3</sup> ]	28+207
Volume resina [cm <sup>3</sup> ]	194
% di fibre in volume	~54%



**Figura 4-28:** L'iniezione del laminato osteonico n°1. Sin dalle prime fasi si notano i runners laterali che raggiungono la parte alta del laminato in 20min. Nelle immagini successive è evidente la vasta area isolata dal fronte libero. a) 5min b) 25min c) 50min d) 90min

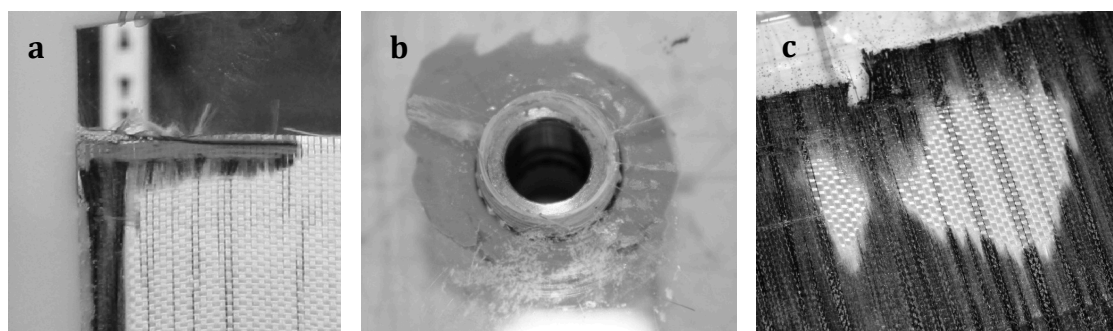
Il processo d'impregnazione, come visibile dalla [Figura 4.28 d](#), non è stato portato a termine completamente. La causa principale è la presenza dei due flussi laterali che, procedendo rapidamente verso la testa del laminato generano una vasta area isolata dal fronte. Per cercare di ridurre il problema, lo stampo è stato ruotato di circa  $20^\circ$  ([Figura 4.28 c](#)) ma con scarsi benefici. La qualità dell'impregnazione inoltre subisce un degrado durante il processo di solidificazione, la motivazione probabilmente è legata alle differenti permeabilità delle fibre nella struttura che producono per capillarità micro vuoti difficili da evacuare. In tal senso la presenza dei runners può essere considerata benefica, poiché l'aria intrappolata può essere evacuata più semplicemente attraverso le due corsie laterali.

La fase di rimozione del laminato dallo stampo, si è dimostrata particolarmente difficoltosa.

La forza necessaria per distaccare il laminato è stata elevata a tal punto da produrre il danneggiamento delle lastre in plexiglass. In particolare, piccole cricche sono apparse in corrispondenza della filettatura dei connettori. Gli effetti di questi difetti saranno discussi nel paragrafo successivo.

L'ultimo fenomeno indesiderato è lo svergolamento in corrispondenza dell'angolo inferiore sinistro dello stampo. Tale fenomeno, dovuto probabilmente a una asimmetria nella struttura del rinforzo produce come effetto negativo la non perfetta complanarità del laminato osteonico.

Ciò nonostante, la qualità dell'impregnazione è elevata (soprattutto nella prima metà inferiore del laminato), la struttura a tubicini non ha subito particolari distorsioni, la finitura superficiale è elevata e il sistema di tenuta del vuoto si è dimostrato impeccabile durante l'intero processo di impregnazione.



**Figura 4-29** Difetti e problemi riscontrati durante la prova. a) Flusso laterale sinistro affiorato in superficie. b) cricche sulla filettatura della sede del connettore. c) Zona incompleta al termine del processo

Di seguito si riportano in modo schematico fenomeni positivi e negativi osservati nel test, nonché le soluzioni previste per il laminato successivo.

**Tabella 4-15:** Considerazioni sul test

<b>Aspetti positivi</b>	<b>Problematiche emerse</b>	<b>Soluzioni ipotizzate</b>
Ottima resa sistema di tenuta (stabile 20min)	Fronte di impregnazione irregolare	Nastro sigillante sui fianchi
Buona impregnazione (area inferiore)	Runners laterali	Reagente più lento
Buona struttura tubolare	Impregnazione non completata	Lastra supplementare
Ottima finitura superficiale	Problemi di estrazione del laminato (danneggiamento)	
	Svergolamento sull'angolo	

#### 4.4.2 Laminato osteonico 2

Sulla base delle problematiche osservate nell'iniezione del laminato precedente, sono state apportate alcune modifiche al sistema.

Sui fianchi dei profili sagomati che delimitano la struttura tessile è stato disposto uno sottile strato di nastro appiccicoso con lo scopo di ridurre i flussi laterali di resina. Una lastra aggiuntiva di plexiglass è stata inserita in corrispondenza della parte inferiore dello stampo, con lo scopo di irrigidire la struttura ed evitare svergolamenti durante la fase di cura del provino. Il reagente, che determina la velocità della reazione di cristallizzazione, è stato sostituito con uno che garantisca tempi di indurimento maggiori.

Di seguito si riportano i dati relativi al test e alcune immagini esemplificative del processo.

**Tabella 4-16:** Dati sulla struttura tessile

Provino	
Dimensioni [mm]	330x215
Peso [g]	458
N° Osteoni	45
Peso fibre carbonio [g]	40,3
Peso fibre di vetro (riempimento) [g]	402,1
Peso fibre di vetro (layer esterni) [g]	32,9

**Tabella 4-17:** Resina e reagente

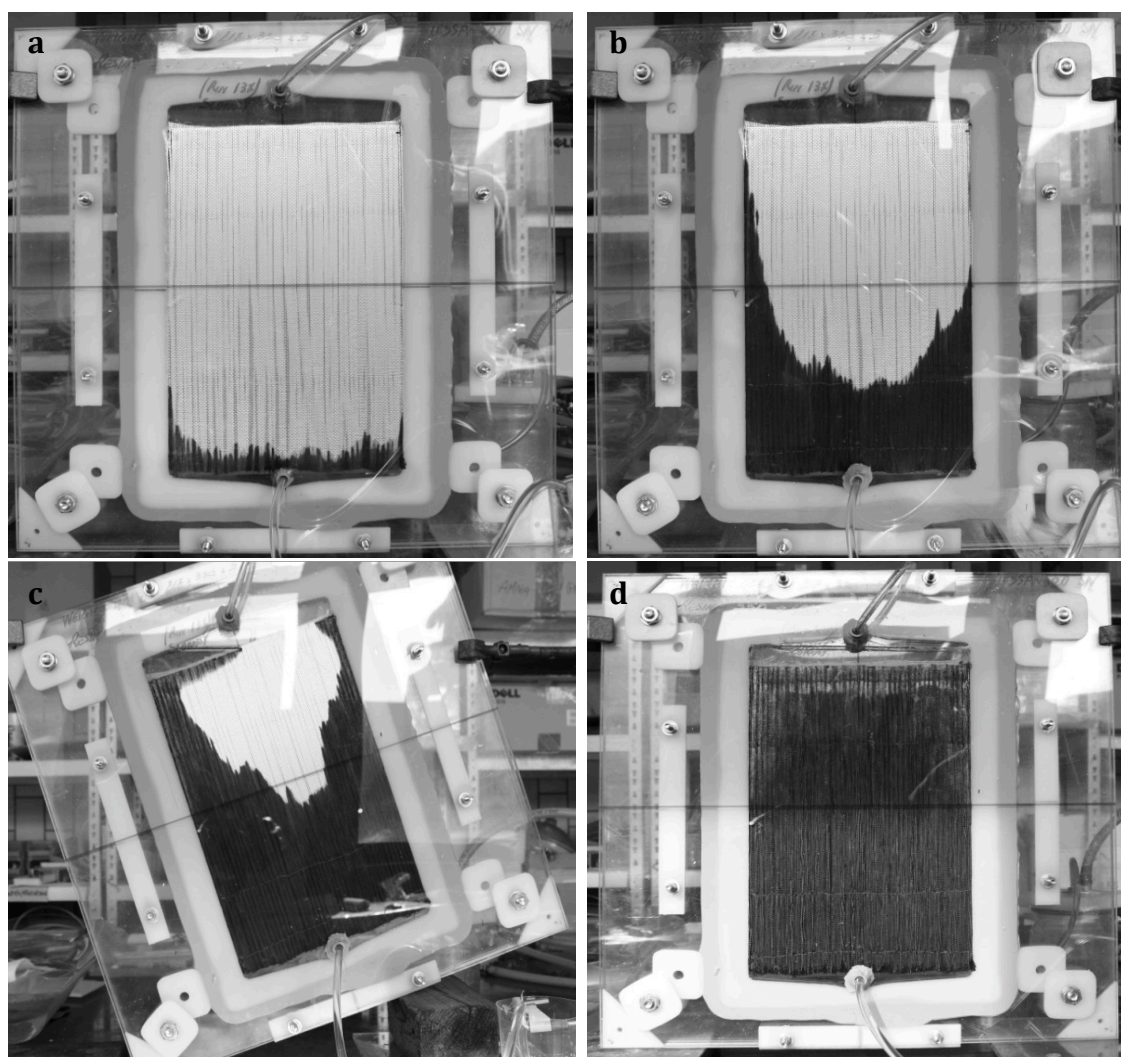
Resina	
Tipo	Epikote RIM-R 135
Peso [g]	300
Reagente	
Tipo	RIM-H 137
Peso [g]	90
Rapporto di miscelazione	10:3

**Tabella 4-18:** Costi associati al laminato

Costo	
Fibre di vetro (riempimento)	16,8
Fibre di vetro (layer)	1
Fibre di Carbonio	33,7
Resina + Reagente	3,4+1,3
Costo tot. laminato	56,2

**Tabella 4-19:** Dati riferiti al laminato impregnato

Laminato	
Spessore nominale [mm]	5
Delta spessore massimo [mm]	0,41
Peso [g]	626
Volume fibre [cm <sup>3</sup> ]	23+170
Volume resina [cm <sup>3</sup> ]	168,1
% di fibre in volume	~53%



**Figura 4-30:** Le fasi di impregnazione del laminato n°2. Si notano ancora i runners laterali, che però sono stati ridotti rispetto al caso precedente. Essi impiegano 40min per affiorare nella parte superiore del laminato. a) 5 min b) 25min c) 50min d) 100min

Le soluzioni adottate si sono dimostrate efficaci. I runners permangono ma la loro intensità è stata ridotta del 50%. Il tempo impiegato dalla resina per affiorare in superficie è passato da 20min (test precedente) a 40min con una relativa riduzione dell'area della zona isolata. Anche la scelta del reagente si è rivelata corretta ed ha consentito di completare l'impregnazione in un tempo totale di 100min.

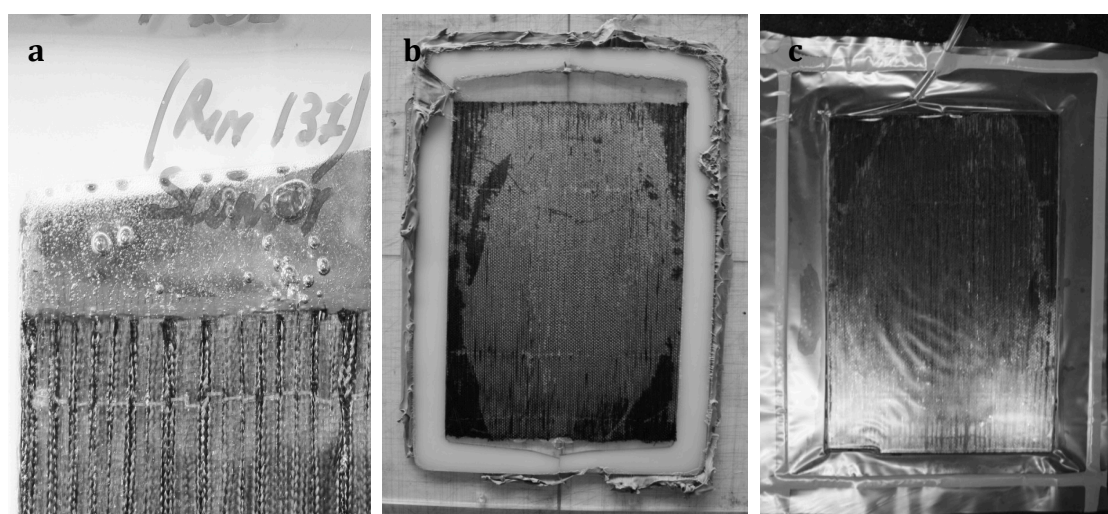
Nuove problematiche sono però emerse durante il test. In corrispondenza delle piccole cricche, generate durante l'estrazione del precedente del laminato, si sono verificate infiltrazioni di aria particolarmente dannose. Tale fenomeno, localizzato nella zona del connettore inferiore, è avvenuto dopo un tempo di circa 60 minuti dall'inizio dell'iniezione ed è stato bloccato per mezzo del nastro sigillante. L'aria introdotta è stata evacuata, almeno in parte, aumentando la velocità del flusso di resina così da attuare una sorta di lavaggio della struttura.



La maggiore problematica è emersa nel processo di estrazione del laminato, durante il quale, lo strato superficiale aderito alle lastre di plexiglass è stato rimosso dal laminato con il risultato visibile in [Figura 4.31 b](#). Per ovviare a questo inconveniente e ripristinare le superfici è stato necessario post-impregnare il composito. Tale attività consta di due fasi. Nella prima si distribuisce la resina con un pennello, nella seconda si riduce lo spessore dello strato depositato per mezzo del VARI.

Durante l'estrazione si è inoltre verificata la rottura della lastra superiore di plexiglass che dovrà quindi essere ricostruita ex novo.

Nonostante tali problematiche, il laminato sarà preso in considerazione per la caratterizzazione meccanica del materiale.



**Figura 4-31:** Problematiche emerse durante l'iniezione. a) Infiltrazione ed evacuazione dell'aria b)degrado superficiale per distacco dello strato esterno di resina c) Irregolarità superficiale al termine del processo di post impregnazione.

Di seguito si riportano in modo schematico, fenomeni positivi e negativi osservati nel test, nonché le soluzioni previste per il laminato successivo.

**Tabella 4-20:** Considerazioni sul test

<b>Aspetti positivi</b>	<b>Problematiche emerse</b>	<b>Soluzioni ipotizzate</b>
Completa impregnazione (100min)	Infiltrazioni di aria	Nastro sigillante sui fianchi (nuovo metodo)
Risolti problemi si inflessione	Runners laterali	Materiale di assorbimento (lato superiore)
Riduzione dei runners	Rottura del sistema nella fase di estrazione	Sistema di lastre ex novo
	Superficie ondulata al termine della post impregnazione	Smussi sui fori

### 4.4.3 Laminato osteonico 3

Il test precedente ha mostrato i limiti legati alla riutilizzabilità del sistema d'iniezione. Il problema principale è legato all'impossibilità di rimuovere meccanicamente la resina residua dalle superfici delle lastre senza danneggiarle. Le forze in gioco per rimuovere il laminato sono eccessivamente elevate e il processo produce cricche che nelle successive iniezioni sono sedi di infiltrazioni dannose al processo. È quindi di fondamentale importanza studiare un metodo che permetta di semplificare il distacco del materiale. In questo test, in tal senso, sono stati stesi ben tre strati di cera prima di depositare la struttura fibrosa all'interno dello stampo. Inoltre, sono stati realizzati degli smussi di 45° sui fori in modo tale da ridurre lo stato di sforzo in queste delicate aree.

*Tabella 4-21: Dati sulla struttura tessile*

Provino	
Dimensioni [mm]	330x250
Peso [g]	544,9
N° Osteoni	52
Peso fibre carbonio [g]	47,6
Peso fibre di vetro (riempimento) [g]	462,3
Peso fibre di vetro (layer esterni) [g]	34,9

*Tabella 4-22: Resina e reagente*

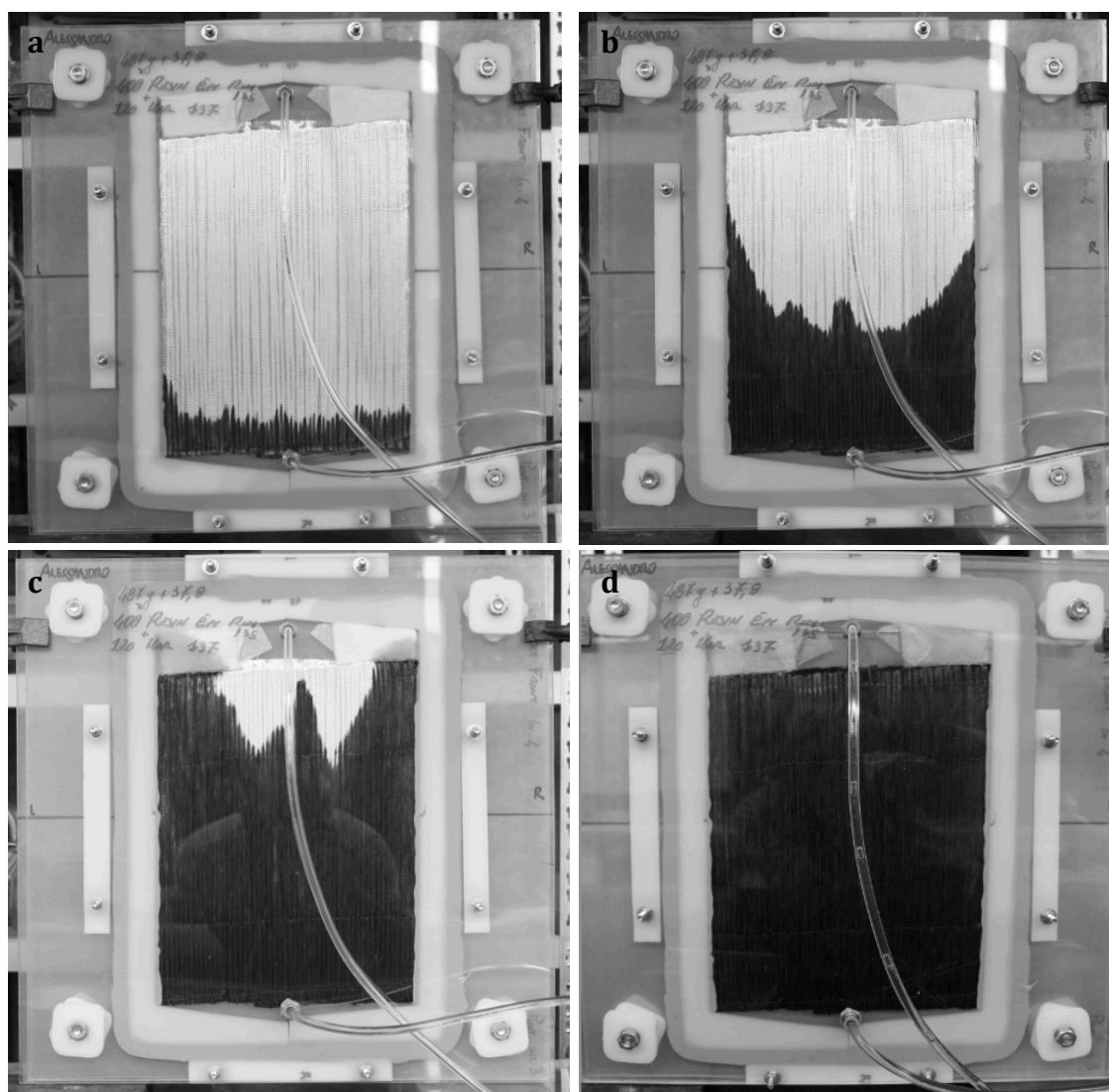
Resina	
Tipo	Epikote RIM-R 135
Peso [g]	400
Reagente	
Tipo	RIM-H 137
Peso [g]	120
Rapporto di miscelazione	10:3

*Tabella 4-23: Costi associati al laminato*

Costo [€]	
Fibre di vetro (riempimento)	19,3
Fibre di vetro (layer)	1
Fibre di Carbonio	39,8
Resina + Reagente	4,5+1,7
Costo tot. laminato	66,3

*Tabella 4-24: Dati riferiti al laminato impregnato*

Laminato	
Spessore nominale [mm]	5
Delta spessore massimo [mm]	0,47
Peso [g]	777,6
Volume fibre [cm <sup>3</sup> ]	28+207
Volume resina [cm <sup>3</sup> ]	193
% di fibre in volume	~55%



**Figura 4-32:** Le fasi di impregnazione del laminato n°3. I runners sono stati ulteriormente ridotti e una volta affiorati in superficie ( $t=60$  min) vengono assorbiti per mezzo del tessuto appositamente inserito sulla testa del laminato. a) 5min b) 30min c) 70min d) 90min

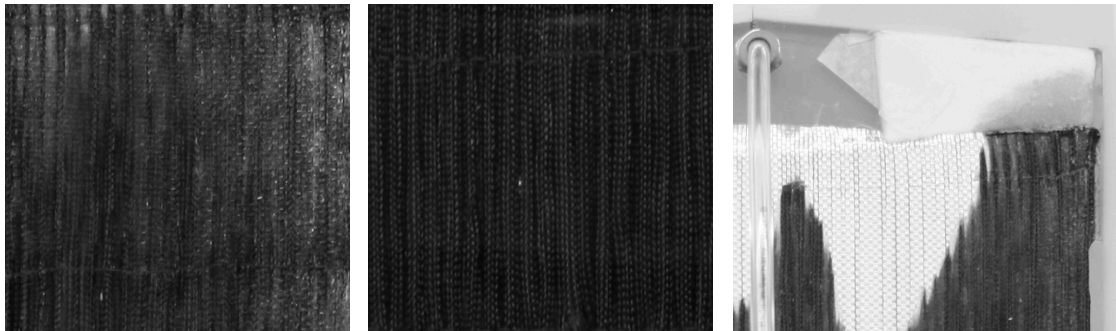
La prova è stata portata a termine con successo in un tempo totale di 90min, durante il quale non si sono riscontrati problemi di alcun tipo. I runners, caratteristica comune a tutti i test, sono stati ridotti ulteriormente in intensità e hanno raggiunto la superficie in un tempo di 60min, tre volte superiore rispetto a quello misurato nel primo test.

Particolarmente vantaggioso è stato l'effetto dei tessuti di assorbimento posti in cima alla struttura del rinforzo, che assorbendo la resina trafilata dai lati permettono al fronte di avanzare libero. Il risultato è un'impregnazione chiara e pulita sull'80% del laminato.

Durante il processo di solidificazione si è riscontrato un degrado qualitativo della zona superiore del laminato (20%), che nonostante ciò è comunque di buona qualità.



Le operazioni di estrazione sono state agevolate rispetto ai casi precedenti, ma il problema legato alla rimozione dei residui e pulitura dei plexiglass permane.



**Figura 4-33:** A sinistra una foto in dettaglio della zona superiore del laminato. Si nota come tale area sia caratterizzata da una minore qualità rispetto a quella inferiore mostrata nella foto centrale. A destra è visibile l'effetto di assorbimento dei tessuti disposti in cima.

**Tabella 4-25:** Considerazioni sul test

<b>Aspetti positivi</b>	<b>Problematiche emerse</b>	<b>Soluzioni ipotizzate</b>
Ottima impregnazione (80% del totale)	Runners non eliminati completamente	Interposizione di una pellicola adesiva
Ottima finitura superficiale	Persistenza di problemi durante l'estrazione	
Riduzione dei runners (60min per affiorare)	Impossibilità di riusare la stessa superficie della lastra	
Processo di estrazione del laminato agevolato		
Riduzione dell'area isolata dal fronte libero		

#### 4.4.5 Laminato comparativo

L'ultimo laminato prodotto rappresenta il termine di paragone rispetto al quale saranno confrontati i risultati sperimentali della struttura osteonica. Il laminato comparativo è costruito usando gli stessi tipi di fibre, lo stesso rapporto in volume tra fibre e matrice e il medesimo sistema di produzione. L'unica differenza tra i due manufatti risiede nella forma del rinforzo, che per questo laminato è la classica a strati di tessuto sovrapposti. La sequenza di laminazione scelta è la seguente:

$$[G_{0,1} G_R C_{45,2} G_R C_{45,2} G_R C_{45,2} G_R G_{0,1}]$$

- $G_{0,1}$ : Singolo strato di fibre di vetro longitudinali  
 $G_R$ : Strato avvolto di filamenti di fibra di vetro  
 $C_{45,2}$ : Doppio strato di fibre di carbonio con fibre a  $\pm 45^\circ$

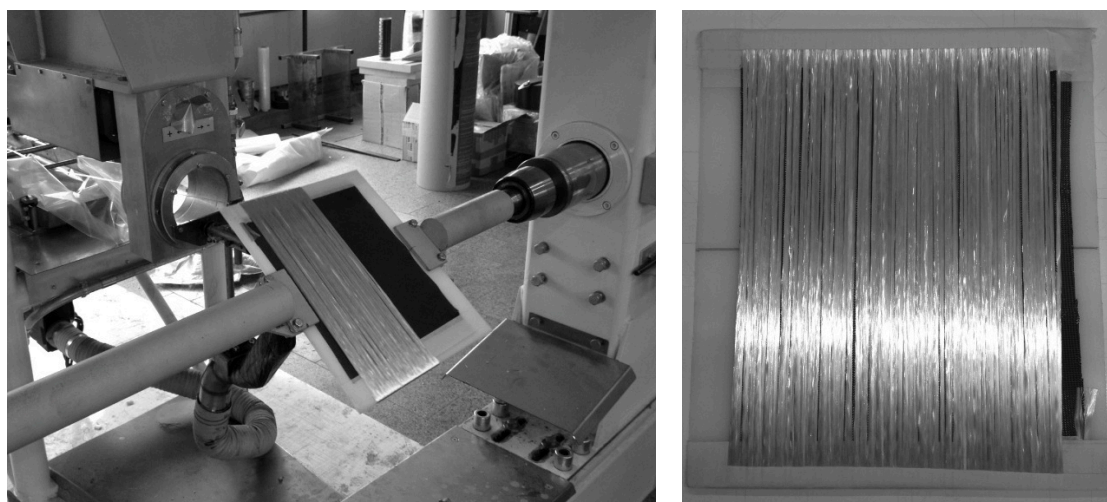
Come si può notare il laminato è simmetrico ed è costituito da strati in fibra di carbonio con fibre orientate a  $\pm 45^\circ$  a cui si alternano strati di fibre di vetro longitudinali, le stesse usate per il riempimento della struttura osteonica. La struttura è poi racchiusa da due strati esterni di fibra di vetro longitudinale.

#### Tecnica di produzione usata

Per un confronto attendibile è stato necessario usare i filamenti fibrosi usati come riempimento della struttura tubolare. Tali fibre devono essere disposte una adiacente all'altra fino a formare uno strato compatto e ben distribuito. La tecnica usata per ottenere questo risultato è quella del filament winding, rivisitata appositamente per la costruzione del laminato piano.

Di seguito si riportano i passaggi del processo:

- Preparazione delle matasse di fibra di vetro (filamenti)
- Preparazione degli strati di carbonio (fibre a  $\pm 45^\circ$ )
- Preparazione degli strati dei layer di fibra di vetro (fibre longitudinali)
- Disposizione degli strati centrali di carbonio (sui lati opposti del piatto)
- Avvolgimento dei filamenti di vetro (tecnica del filament winding)
- Fissaggio delle estremità (nastro adesivo)
- Disposizione dei 4 strati di carbonio (a due a due sui lati opposti)
- Avvolgimento dei filamenti di vetro (tecnica del filament winding)
- Fissaggio delle estremità (nastro adesivo)
- Estrazione del piatto e taglio delle estremità
- Disposizione degli strati esterni in fibra di vetro



**Figura 4-34:** In evidenza la fase di avvolgimento della fibra di vetro attraverso la tecnica del filament windig. In nero lo strato di fibra di carbonio disposto e fissato sul piatto guida. A destra il risultato finale del processo prima della fase di estrazione del piatto e taglio delle estremità

Sulla base delle considerazioni del test precedente si introduce in quest'ultimo tentativo uno sottile film adesivo che applicato sulle superfici delle lastre ha lo scopo di favorire il distacco del laminato e preservare l'integrità del sistema.

Si fa notare che per irreperibilità del reagente RIMH-137, si è dovuto usare nel mix resina reagente il catalizzatore intermedio RIMH-134-137.

Di seguito si riportano i dati relativi alla prova e alcune immagini esemplificative.

**Tabella 4-26:** Dati sulla struttura tessile

Provino	
Dimensioni [mm]	310x240
Peso [g]	491
Sequenza di laminazione	[G <sub>L1</sub> G <sub>R</sub> C <sub>L2</sub> G <sub>R</sub> C <sub>L2</sub> G <sub>R</sub> C <sub>L2</sub> G <sub>R</sub> G <sub>L1</sub> ]
Peso fibre carbonio [g]	45,9
Peso fibre di vetro (filament) [g]	411,6
Peso fibre di vetro (layer) [g]	31,5

**Tabella 4-27:** Resina e reagente

Resina	
Tipo	Epikote RIM-R 135
Peso [g]	400
Reagente	
Tipo	RIM-H 134-137 (20:80)
Peso [g]	120
Rapporto di miscelazione	10:3

Tabella 4-28: Costi associati al laminato

	Costo
Fibre di vetro (filament)	17,3
Fibre di vetro (layer)	1
Fibre di Carbonio	31,3
Resina + Reagente	4,5+1,7
Costo tot. laminato	55,9

Tabella 4-29: Dati riferiti al laminato impregnato

	Laminato
Spessore nominale [mm]	5
Delta spessore massimo [mm]	0,49
Peso [g]	692
Volume fibre [cm <sup>3</sup> ]	23+180
Volume resina [cm <sup>3</sup> ]	168
% di fibre in volume	~54%

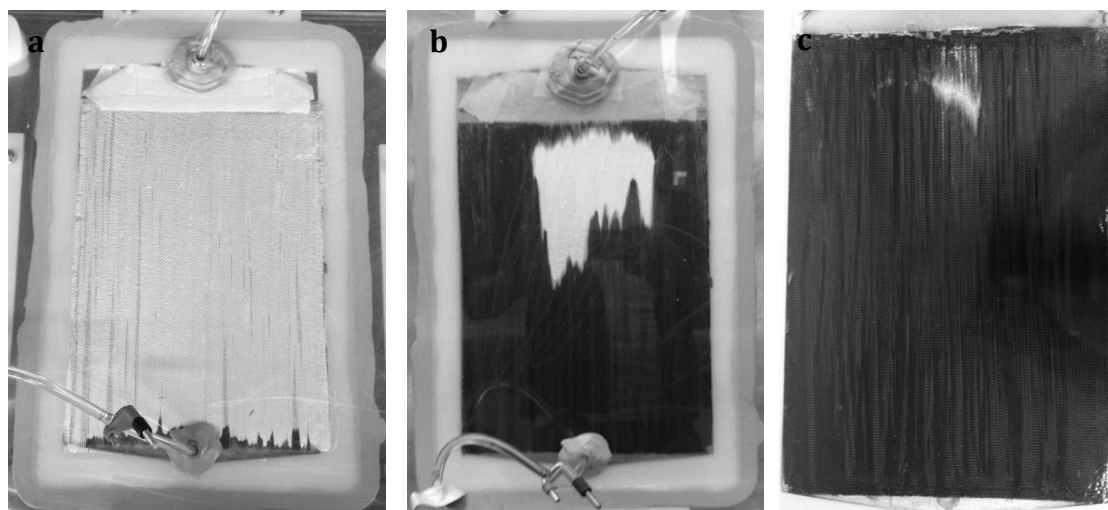


Figura 4-35: Fasi del processo di impregnazione e il laminato finale

A causa del reagente usato, l'impregnazione non è stata completata, come si può notare osservando l'area bianca in [Figura 4.35c](#).

Il fronte libero del flusso di resina è frastagliato e non omogeneo, per effetto della tecnica di fabbricazione della struttura del rinforzo.

Il film adesivo usato per facilitare il processo di estrazione del laminato ha funzionato perfettamente e il manufatto è stato distaccato con semplicità senza dover forzare il sistema che inoltre non essendo a contatto diretto con la resina può essere riutilizzato indefinite volte.

La qualità dell'impregnazione è stata eccellente, tranne che per la piccola area non completamente impregnata. Sia finitura sia planarità delle superfici sono in linea con i risultati ottenuti per i laminati precedenti.

**Tabella 4-26:** Considerazioni sul test

<b>Aspetti positivi</b>	<b>Problematiche emerse</b>
Ottima qualità dell'impregnazione (90%)	Persistenza dei runners laterali
Ottima finitura superficiale	Impregnazione non completata
Estrazione semplice e veloce	

### 4.5 Considerazioni finali e possibili miglioramenti

Una volta estratti dal sistema di iniezione i laminati vengono tagliati sui quattro lati ottenendo il prodotto finale dal quale ricavare i provini da testare nella fase di analisi del comportamento meccanico che sarà svolta nel capitolo successivo.

Di seguito si riportano dati ed osservazioni relativi ad ogni laminato prodotto:

*Tabella 4-27: Dati e considerazioni sui laminati finali*

	<b>Piatto Osteonico 1</b>	<b>Piatto osteonico 2</b>	<b>Piatto osteonico 3</b>	<b>Piatto Comparativo</b>
<b>Dimensioni</b>				
Lunghezza [mm]	310	300	305	300
Larghezza [mm]	245	210	240	230
Spessore [mm]	5	5	5	5
Area [mm <sup>2</sup> ]	75768	63210	73810	69000
Volume [mm <sup>3</sup> ]	378840	316050	369050	345000
Peso [g]	662	550	651,86	600
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,75	1,82	1,77	1,74
% Vol di Fibra	54	51	53	54
<b>Matrice</b>				
Resina	Epikote RIM- R135	Epikote RIM- R135	Epikote RIM- R135	Epikote RIM- R135
Reagente	RIM-H 134-137 (20:80)	RIM-H 137	RIM-H 137	RIM-H 134-137 (20:80)
<b>Rinforzo</b>				
% Fibre di vetro [0°]	48,2	47	48,3	48,3
% Fibre di carbonio [±45°]	6,4	6,4	6,5	6,3
Resina	45,4	46,6	45,2	45,4
<b>Considerazioni</b>				
	Buona impregnazione Superficie piana Finitura elevata Impregnazione non completa	Buona impregnazione Superficie irregolare Finitura Bassa (post. imp) Impregnazione completata	Ottima impregnazione Superficie piana Finitura elevata Impregnazione completata	Eccellente impregnazione Superficie piana Finitura elevata Impregnazione non completata
<b>Costi [€]</b>				
	64,5	56,2	66,3	55,9

Di seguito si riportano le caratteristiche del sistema d'iniezione al termine dello sviluppo. Si evidenziano caratteristiche positive, problemi irrisolti e possibili miglioramenti.

**Tabella 4-25:** Caratteristiche del sistema di iniezione a tra lastre di plexiglass

<b>Aspetti positivi</b>	<b>Problematiche non risolte</b>	<b>Possibili sviluppi</b>
Sistema facile da produrre (materiali usati)	Runners laterali	Profilo sagomato in un sol pezzo
Superfici ottenibili più regolari		Profilo sagomato esterno in un sol pezzo
Finitura elevata della superficie		Sistema di gel laterale contro i runners
Riutilizzabile		Base del sistema a spessore maggiorato
Poco costoso (140 € 3 lastre)		

## Capitolo 5: Test e Analisi delle proprietà meccaniche

### Introduzione al capitolo:

Lo scopo di questo capitolo è quello di definire le proprietà statiche del materiale composito bio ispirato e di valutare l'effetto della struttura osteonica innovativa.

Il femore, osso lungo dello scheletro umano, è soggetto essenzialmente a sollecitazioni di compressione e flessione, in relazione a ciò esso ha organizzato la sua struttura composita interna.

Sulla base di tale considerazione, si definirà e analizzerà il comportamento statico a trazione, compressione e flessione. Tali analisi saranno condotte sia in direzione longitudinale sia in direzione trasversale rispetto all'orientamento dei tubi interni della struttura.

La definizione delle proprietà statiche del solo composito bio ispirato non è però sufficiente per comprendere gli effetti che la struttura osteonica ha sulle caratteristiche meccaniche finali del materiale. Per tale motivo saranno condotti parallelamente gli stessi test su un laminato composito a struttura classica.

Il laminato di confronto è caratterizzato dallo stesso tipo di rinforzo, stessa percentuale di rinforzo in volume e dal medesimo processo produttivo.

Variazioni dei risultati sono dunque da imputare alla differente organizzazione interna delle fibre.

Il presente capitolo è strutturato in quattro fasi: la campagna sperimentale, la definizione dei provini, la descrizione dei test e l'analisi dei risultati.

Nella prima fase, si riportano schematicamente i tipi di test e il numero di provini della campagna.

In seguito, si discuteranno nel dettaglio i provini sperimentali, descrivendo le dimensioni scelte e il metodo di produzione usato.

I test saranno presentati, definendo: il tipo di macchine prova, gli strumenti di misura e i parametri del test.

Nell'ultima parte del capitolo, si analizzano i risultati sperimentali, mettendo a confronto le due strutture.



## **5.1 La campagna sperimentale**

La campagna sperimentale è volta alla caratterizzazione statica del materiale osteonico e alla definizione dell'effetto che tale struttura ha sulle proprietà meccaniche finali. Essa consta in totale di 46 provini, ripartiti considerando i seguenti fattori:

- Tipo di prova
- Tipo di struttura interna
- Direzione relativa tra carico e fibre

### **Tipo di prova:**

Considerando che la struttura del laminato osteonico trae ispirazione da quella del femore umano, che è soggetto principalmente a sollecitazioni di compressione e flessione è interessante condurre una sperimentazione in cui oltre al comportamento a classico di trazione si definiscono anche quello a compressione e a flessione.

### **Tipo di struttura interna:**

Nella campagna sperimentale saranno prese in considerazione due forme strutturali differenti del rinforzo, una è quella osteonica e l'altra è la classica a strati di tessuto sovrapposti. Tale scelta è dovuta all'esigenza di avere un termine di paragone rispetto al quale confrontare i risultati sperimentali.

Si ripete, per ulteriore chiarezza, che l'unica differenza tra il laminato comparativo e quello osteonico è rappresentata dalla disposizione con cui le fibre di rinforzo sono organizzate all'interno del laminato. Differenti comportamenti meccanici sono quindi da imputare solitamente all'effetto della configurazione del rinforzo.

### **Direzione relativa tra carico e fibre:**

Un altro parametro che sarà preso in considerazione è l'orientamento relativo tra carico e struttura del rinforzo, poiché il materiale composito per come è stato concepito presenta una forte anisotropia e la sola analisi longitudinale sarebbe insufficiente.

Di seguito si riportano in Tabella 5.1 il numero di provini totali della campagna sperimentale e la ripartizione degli stessi in relazione ai fattori presi in considerazione.

*Tabella 5-1: La campagna sperimentale per la caratterizzazione statica del materiale: numero di provini*

<b>Tipo Struttura</b>	<b>Direzione</b>	<b>Trazione</b>	<b>Compressione</b>	<b>Flessione</b>
<b>Osteonica</b>	<b>Longitudinale</b>	5	5	5
	<b>Trasversale</b>	5	5	5
<b>Classica</b>	<b>Longitudinale</b>	3	3	3
	<b>Trasversale</b>	2	2	3
<b>Totale provini</b>		15	15	16

Dove possibile, sono state ricavate cinque provette secondo quanto prescritto dalle normative vigenti. I provini in materiale composito classico risultano essere inferiori a tale valore a causa del ridotto quantitativo di materiale a disposizione.

## 5.2 Definizione e preparazione dei provini

Il materiale di partenza, da cui si ricavano i provini, è costituito dai piatti laminati che sono stati prodotti e descritti nel capitolo precedente. In particolare, si hanno tre laminati con struttura osteonica e un comparativo di confronto con struttura di laminazione classica.

Le fasi del processo di determinazione e preparazione dei provini sono le seguenti:

- Definizione delle dimensioni
- Massimizzazione dei provini ottenibili
- Tecnica di preparazione

### 5.2.1 Definizione delle dimensioni:

Le dimensioni caratteristiche dei provini sono normate e variano in funzione del tipo di test e della direzione relativa tra carico e fibre interne.

#### Provini di trazione:

Con riferimento alle indicazioni prescritte dalla normativa ASTM D 3039/D 3039M-08 sono state definite le dimensioni dei provini per le prove di trazione sia longitudinali che trasversali (Tabella 5.2)

**Tabella 5-2:** Dimensioni dei provini di trazione

Trazione	Longitudinale	Trasversale
Lunghezza totale	250	175
Lunghezza utile	90	105
Spessore	5	5
Larghezza	20	25
Lunghezza talloni	80	35
Spessore Talloni	6	4
Area resistente	100	125

\* Tutte le misure sono espresse in mm

Alcune dimensioni, come lo spessore e la larghezza sono state modificate rispetto a quelle raccomandate dalla normativa. Tale scelta è inevitabile per lo spessore, che è vincolato dal diametro del manicotto di carbonio. La larghezza invece è stata aumentata (20 mm anziché 15 mm) in modo tale da includere nel provino almeno tre osteoni completi.

Larghezza e spessore del provino influenzano la lunghezza minima del tallone necessaria affinché non avvengano degli slittamenti durante la prova.

Tale valore è stato calcolato facendo riferimento alla Formula 5.1, nella quale si è ipotizzato un valore di resistenza del provino pari a 700 MPa e un valore di taglio trasmissibile dalla colla (Araldite) di 20 MPa.

$$L_{min} = \frac{F^{tu}h}{2F^{su}} \quad (5.1)$$

dove:

$L_{min}$	è la lunghezza minima del tallone in	[mm]
$F^{tu}$	è la resistenza a trazione stimata in	[MPa]
$F^{su}$	è il taglio massimo trasmissibile dalla colla in	[MPa]
$h$	è lo spessore del provino in	[mm]

### Provini di compressione:

Considerazioni analoghe a quelle già fatte per i provini a trazione possono essere ripresentate per alcune delle dimensioni dei provini per la compressione, che sono state definite sulla base delle indicazioni prescritte dalla normativa ASTM D 3410/D 3410M-03 (Tabella 5.3).

**Tabella 5-3:** Dimensioni dei provini di compressione

Compressione	Longitudinale	Trasversale
Lunghezza totale	155	150
Lunghezza utile	20	20
Spessore	5	5
Larghezza	15	25
Lunghezza talloni	67,5	65
Spessore talloni	6	6
Area resistente	75	125

\* Tutte le misure sono espresse in mm

**Provini di flessione:**

Con riferimento alla normativa UNI-EN ISO 14125 sono state definite le dimensioni dei provini per le prove di flessione longitudinali e trasversali (Tabella 5.4). Le dimensioni si riferiscono a quelle prescritte dalla norma per una configurazione di prova a tre punti e un materiale composito di classe III.

*Tabella 5-4: Dimensioni dei provini di flessione a tre punti*

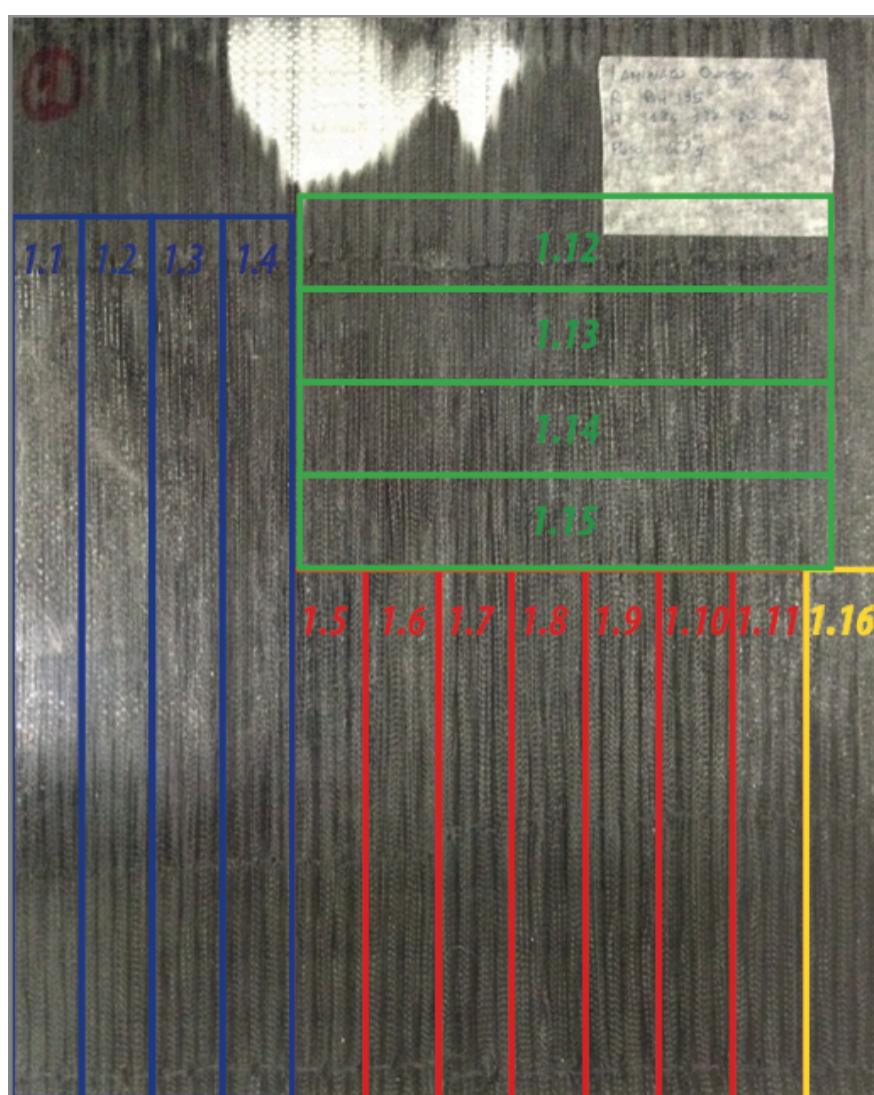
<b>Flessione</b>	<b>Longitudinale</b>	<b>Trasversale</b>
Lunghezza totale	150	150
Larghezza	20	15
Spessore	5	5
Area resistente	100	100
Luce appoggi	100	100
Diametro rullini R1- R2	5-5	5-5

*\* Tutte le misure sono espresse in mm*

### 5.2.2 Massimizzazione dei provini ottenibili

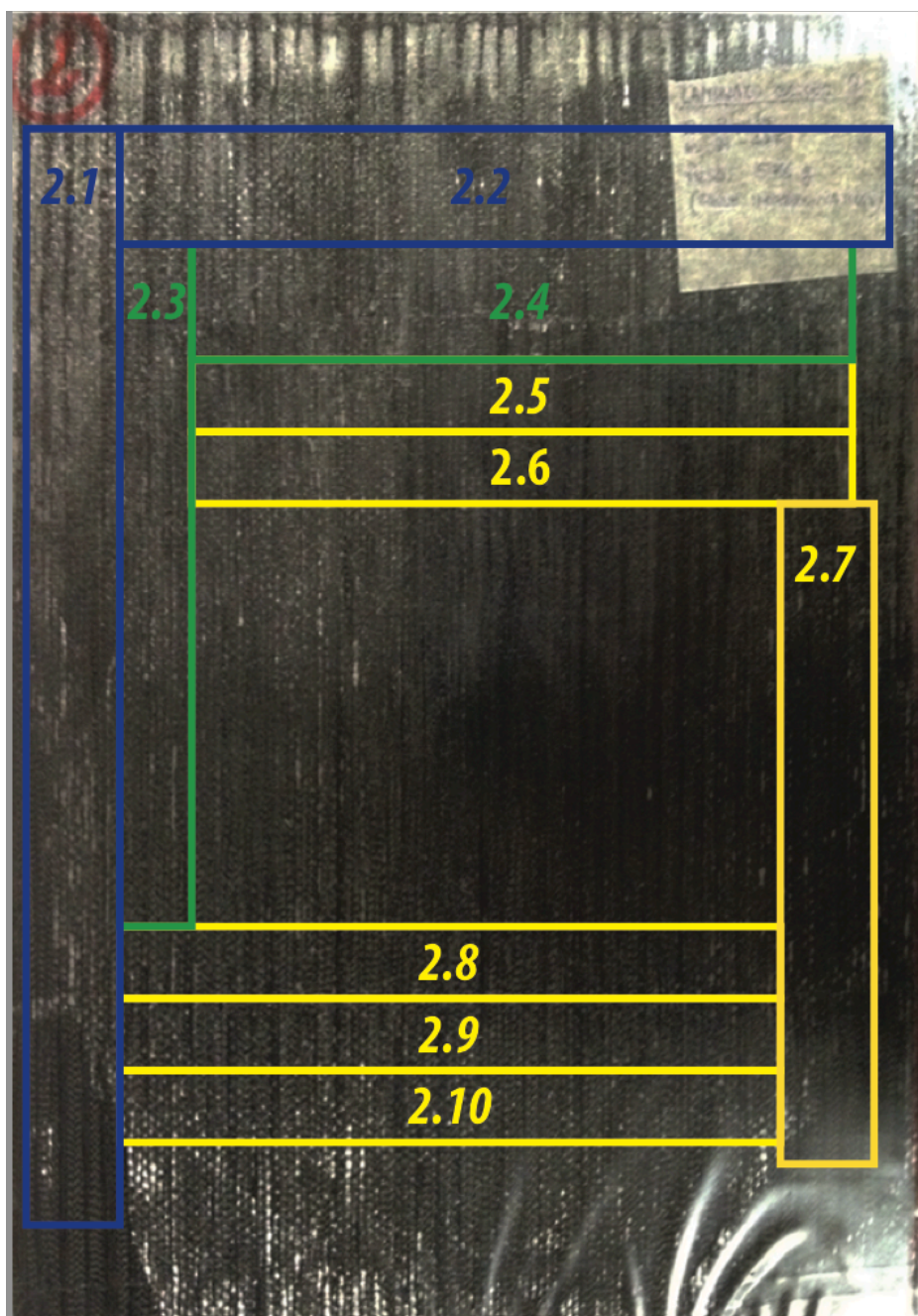
Definite le dimensioni, si procede alla fase di massimizzazione dei provini ottenibili. In tale attività si è cercata la disposizione che permettesse di ridurre al minimo lo spreco di materiale a disposizione, inoltre, note le caratteristiche d'impregnazione di ogni laminato, è stata valutata la composizione in modo tale da concentrare i provini nelle zone del materiale a migliore qualità. I provini sono stati etichettati e numerati in modo tale che fosse nota la loro provenienza fisica.

Nel seguito si riportano le immagini riguardanti la disposizione dei campioni per ogni piatto laminato a disposizione.

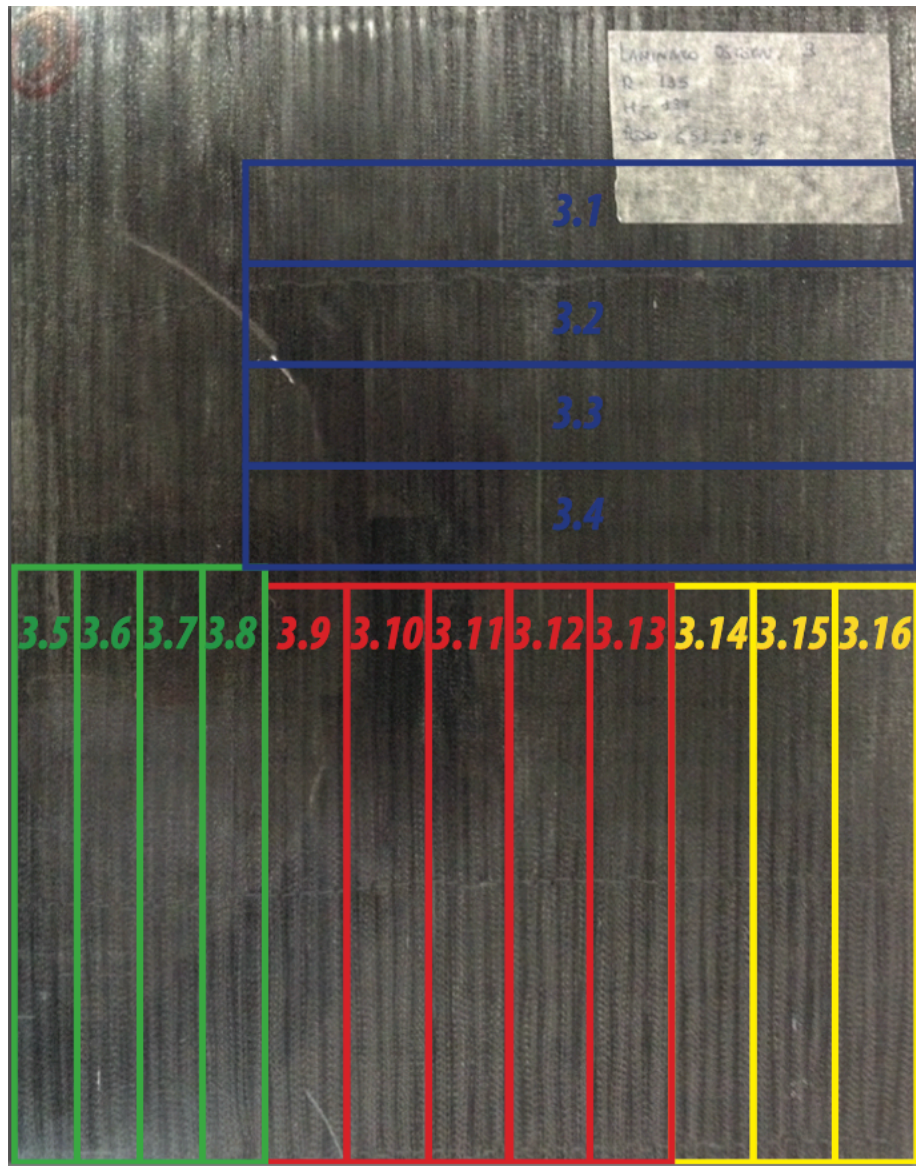


**Figura 5-1:** Distribuzione dei campioni nel laminato osteonico 1. In blu i provini per la trazione longitudinale. In verde i provini per compressione trasversali. In giallo il provino per la flessione longitudinale. In rosso, il set di provette utili alla futura compressione del comportamento a fatica del materiale. Come si può notare i provini sono stati ricavati in modo tale che il tratto utile sia locato in corrispondenza di una zona del materiale ben impregnata.



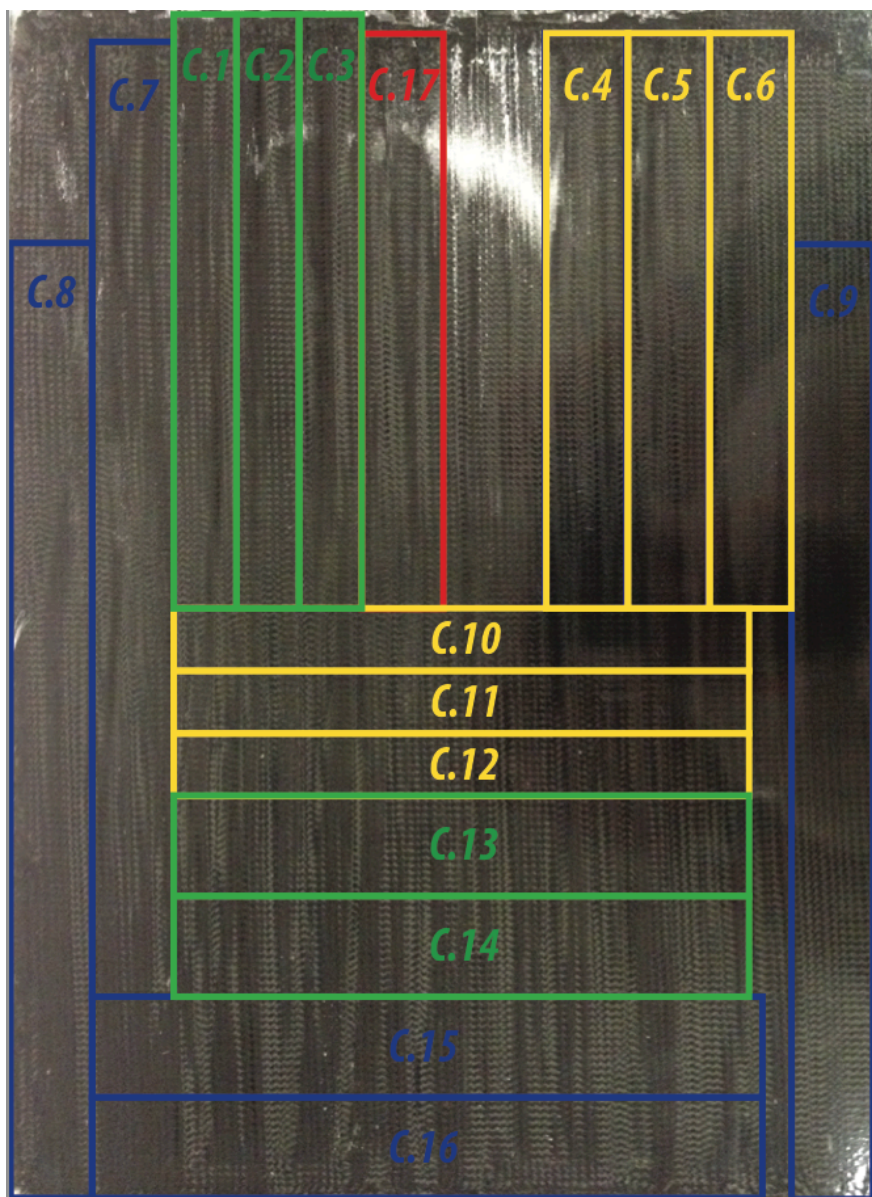


**Figura 5-2:** Distribuzione dei campioni nel laminato osteonico 2. In blu i provini per la trazione sia longitudinale che trasversale. In verde i provini per compressione longitudinali e trasversali. In giallo le provette per la flessione longitudinale e trasversale. La distribuzione è condizionata dalle zone del materiale in cui la superficie è particolarmente irregolare, come la zona inferiore o dove l'impregnazione è scadente come la zona superiore. Si è scelto di concentrare su questo laminato la maggior parte dei provini trasversali meno interessanti per lo scopo di questa tesi.



**Figura 5-3:** Disposizione dei campioni nel laminato osteonico 3. In blu i provini per la trazione trasversale. In verde i provini per la compressione longitudinale. In giallo i provini per la flessione longitudinale e in rosso il set supplementare di provini per l'analisi del comportamento a fatica flessionale





**Figura 5-4:** Configurazione dei campioni nel laminato comparativo. Essendo l'unico piatto con struttura classica a disposizione sono concentrate tutte le tipologie di provino necessarie per i test. Trazioni in blu, compressioni in verde, flessioni in giallo, fatica flessionale in rosso. La zona non completamente impregnata è stata considerata nella disposizione

Si fa notare che durante la fase di disposizione dei laminati è stato considerato un set supplementare di tredici provini per un'ulteriore caratterizzazione a fatica del composito. Tale argomento non è parte del presente lavoro di tesi, ma sarà oggetto di future analisi.

### 5.2.3 Modalità di preparazione

La preparazione dei provini consta di quattro macro fasi:

- Taglio dal piatto
- Taglio dei talloni
- Incollaggio
- Misurazioni

I provini, etichettati e numerati, sono stati ricavati tagliando i piatti laminati per mezzo di una sega a nastro. Lo stesso procedimento è stato eseguito per la preparazione dei talloni di alluminio.

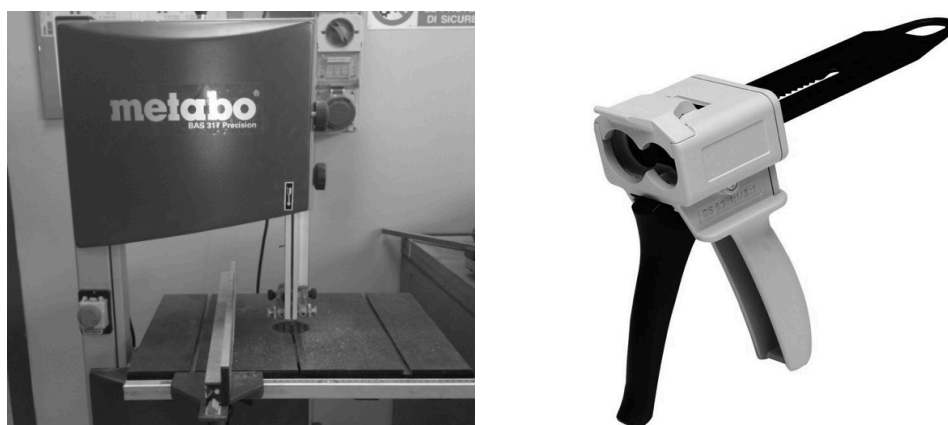


Figura 5-5: Sega a nastro usata per le operazioni di taglio e pistola per la miscelazione della colla

La fase conclusiva del processo è l'incollaggio dei talloni sulle estremità delle provette, le quali vengono preventivamente raschiate e in fine pulite per favorire l'adesione. Al termine del processo di preparazione, si misurano lo spessore e la larghezza del provino in tre punti del tratto utile e si determina la sezione resistente come il prodotto delle medie.



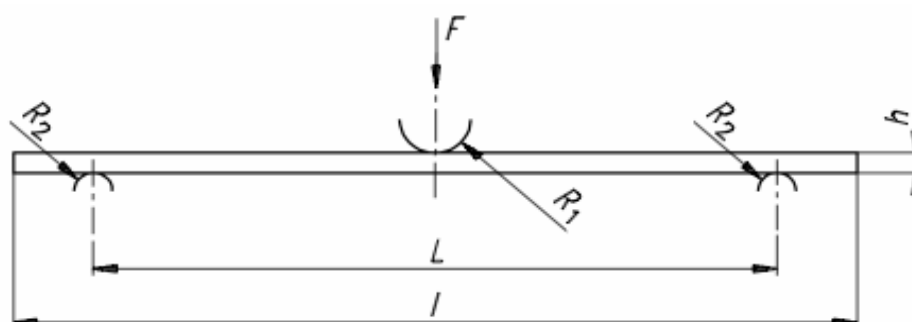
Figura 5-6: I provini pronti ad essere testati. A sinistra le provette per il test di trazione trasversale, a destra quelle di compressione trasversale

## 5.3 Prova di Flessione

### 5.3.1 Descrizione della prova

La direttiva standard usata per la caratterizzazione flessionale del materiale è l'UNI-EN ISO-14125. Il metodo è applicabile ai materiali compositi rinforzati con fibre a matrice termoplastica e termoindurente aventi sezione rettangolare di dimensioni opportune. La norma prevede la possibilità di usare due metodi alternativi, carico su tre punti o su quattro punti.

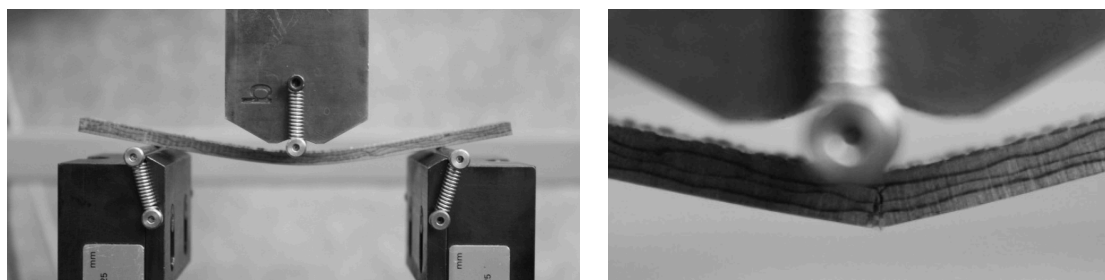
Nel presente lavoro si è scelto di testare il materiale secondo il metodo a tre punti di appoggio. In tale configurazione, la provetta, appoggiata liberamente, è sostenuta da due appoggi (rullini) come fosse una trave ed è sottoposta a flessione a velocità costante per mezzo dello spostamento della traversa superiore. La velocità di prova permane costante fino alla rottura della provetta o fino a quando la deformazione non abbia raggiunto un valore predeterminato. La forza applicata e la freccia vengono acquisite durante l'intera prova attraverso rispettivamente la cella di carico e il deflettometro.



**Figura 5-7:** Disposizione del carico per la prova a tre punti. Essendo il sistema simmetrico, l'andamento del momento flettente è a capanna con massimo sforzo in mezzeria

**Tabella 5-5:** Parametri dei test

Tipo prova	Flessione a 3 punti
Modalità di prova	Controllo di spostamento
Velocità test	1,5 mm/min
Frequenza di acquisizione	5 Hz
Luce: L	100mm
Diametro rullini: R1,R2	5mm
Temperatura	Ambiente
Umidità	Standard

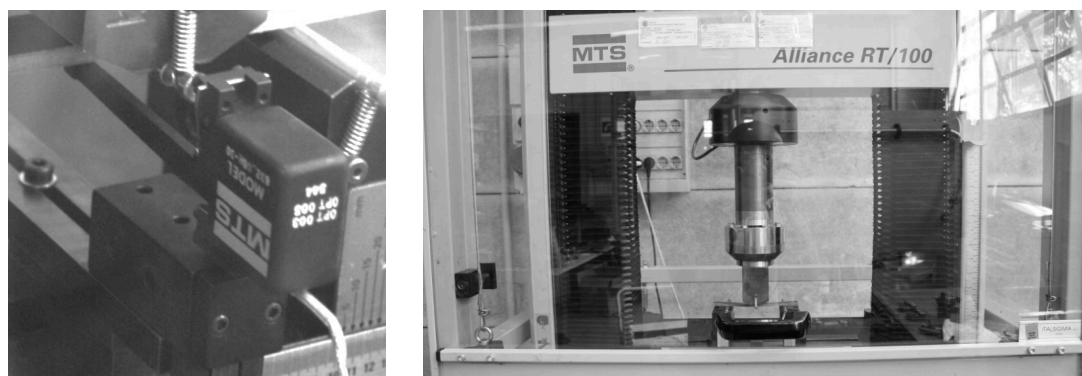


**Figura 5-8:** Test di flessione a tre punti. Un provino a struttura classica inflesso (sinistra). Il momento della rottura (destra)

### 5.3.2 Macchine di prova e strumenti di misura

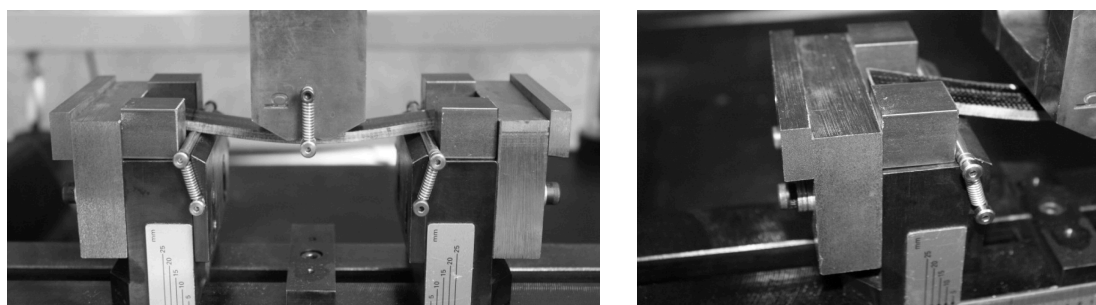
Tutti i test a flessione, sia per le provette longitudinali che per quelle trasversali, sono stati eseguiti con la macchina di prova elettromeccanica MTS ALLIANCE RT/100 attrezzata con la cella di carico HBM U10M con capacità massima 25KN e sensibilità 2,0625 mV/V.

La prova è stata equipaggiata con il deflettometro MTS 632-06H-30 con range di misura  $\pm 6$ mm nel caso di leva corta e  $\pm 12,5$ mm nel caso di leva maggiorata.



**Figura 5-9:** Deflettometro MTS 632-06H-30 (sinistra) e macchina di prova ALLIANCE RT/100 (destra)

Durante l'esecuzione dei test a causa della freccia elevata è stato necessario attrezzare il sistema con un set di elementi supplementari che vincolasse i rullini di appoggio in direzione trasversale.



**Figura 5-10:** Prova eseguita con il sistema di fissaggio dei rullini inferiori

## 5.4 Prova di Trazione

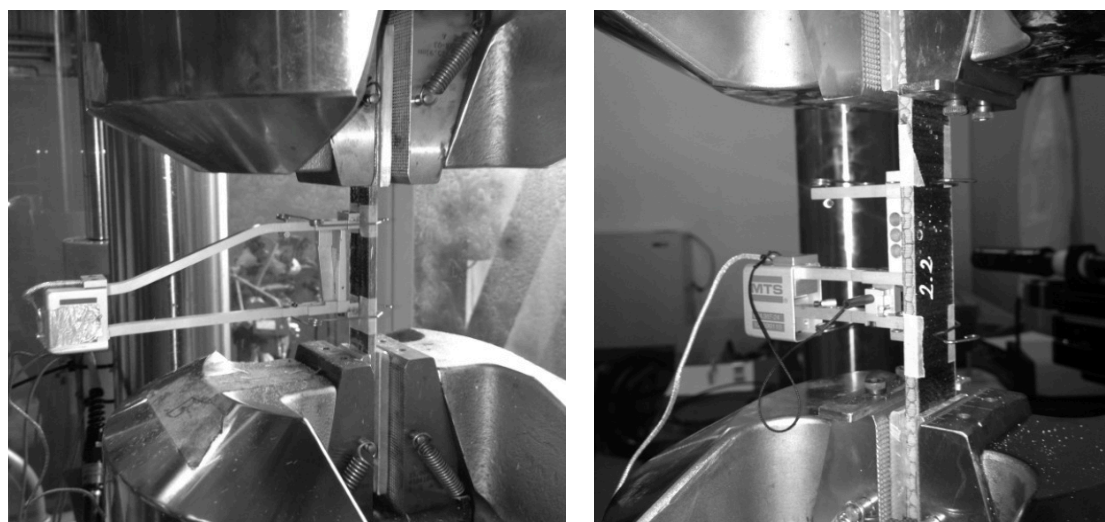
### 5.4.1 Descrizione della prova

La direttiva standard seguita per le prove di trazione è ASTM D 3039/D 3039M-08. Il metodo permette di determinare le proprietà a trazione di materiali a matrice polimerica rinforzati da fibre continue ad alta resistenza disposte simmetricamente rispetto al piano neutro del laminato.

La provetta, opportunamente dimensionata, viene stretta in corrispondenza dei talloni per mezzo dei morsetti della macchina di prova che attraverso il movimento della traversa superiore sollecita a trazione la provetta fino alla rottura. La forza, impressa in modo costante, è registrata attraverso una cella di carico mentre un estensometro posto in corrispondenza del tratto utile del provino registra la deformazione. È dunque possibile tracciare la curva sforzo deformazione dalla quale si ottengono informazioni quali: il carico di rottura, il modulo elastico e la deformazione a rottura.

*Tabella 5-6: Parametri del test*

Tipo prova	Trazione
Modalità di prova	Controllo di spostamento
Velocità test	2 [mm/min]
Frequenza di acquisizione	5 [Hz]
Pressione di afferraggio	20 [MPa]
Temperatura	Ambiente
Umidità	Standard



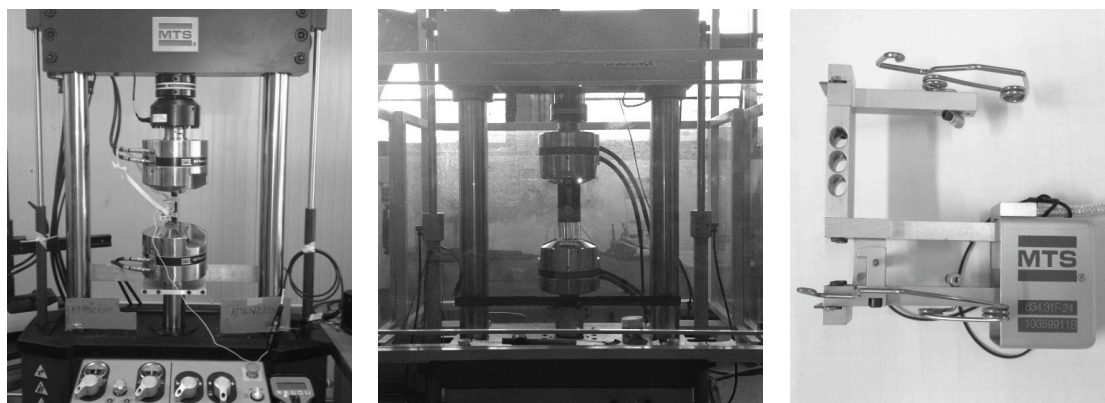
*Figura 5-11: Provino osteonico longitudinale di trazione (sinistra). Provetta trasversale (destra)*



### 5.4.2 Macchine di prova e strumenti di misura

Le prove di trazione sono state effettuate su due macchine di prova differenti. Per i provini longitudinali sia a struttura osteonica che classica, si è impiegata la macchina di prova idraulica Schenck attrezzata con cella di carico di capacità massima pari a 250 KN. Le prove sono state eseguite con l'estensometro MTS 634.06H con base di misura di 50 mm ed estensione massima di 25mm.

Per i provini trasversali si è impiegata la macchina di prova idraulica MTS Landmark ServoHydraulic attrezzata con la cella di carico 661.20H-03 di capacità massima 100 KN. La deformazione delle provette trasversali è stata misurata con l'estensometro MTS 634.31F-24 dotato di una base di misura di 50 mm ed un escursione di  $\pm 4$ mm.



**Figura 5-12:** Macchine di prova per i test di trazione, MTS Landmark ServoHydraulic (sinistra), Schenck (centro). Estensometro MTS 634.31F-24 (destra) usato per misurare le deformazioni delle provette in configurazione trasversale

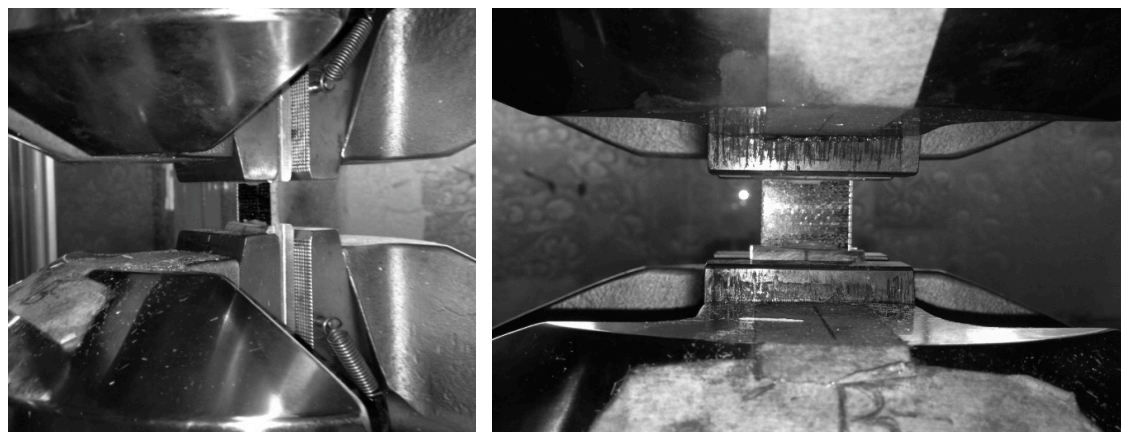
## 5.5 Prova di compressione

### 5.5.1 Descrizione della prova

La direttiva standard seguita per le prove di compressione è ASTM D 3410/D 3410M-03. Il metodo permette di caratterizzare il comportamento a compressione per materiali polimerici rinforzati con fibre lunghe o discontinue per i quali si ha un comportamento elastico ortotropo rispetto alla direzione del test. Al provino, afferrato sui talloni attraverso le ganasce della macchina di prova, è impresso il carico in modo costante controllando lo spostamento della traversa superiore. La prova procede fino a che la provetta non arriva a rottura. A causa della ristretta area del tratto utile i test non sono stati attrezzati né con estensometro né con estensimetro, è quindi impossibile tracciare le curve sforzo deformazione. Lo scopo di questi test è ricavare il valore di resistenza a compressione e definire il meccanismo di rottura. Per questo tipo di prove, la normativa prevede un sistema di guida laterale al provino che ha la funzione di migliorare gli allineamenti e di evitare rotture per instabilità delle fibre. I test sono stati eseguiti con la stessa macchina di prova usata nei test a trazione longitudinale, per la descrizione si rimanda al paragrafo precedente.

*Tabella 5-7: Parametri del test*

Tipo prova	Compressione
Modalità di prova	Controllo di spostamento
Velocità test	1,5 [mm/min]
Frequenza di acquisizione	5 [Hz]
Pressione di afferraggio	20 [MPa]
Temperatura	Ambiente
Umidità	Standard



*Figura 5-13: Prova di compressione. In evidenza la dimensione ridotta del tratto utile*

## 5.6 Analisi dei risultati: Flessione a tre punti

Il primo dei tre set di test ha lo scopo di determinare le proprietà flessionali del composito osteonico evidenziandone, attraverso la comparazione con la struttura classica, peculiarità e differenze. Le prove, condotte su un totale di sedici provette, sono state eseguite misurando la forza impressa dalla traversa e la freccia in mezzeria. Nella prova, si ricavano: lo sforzo flessionale massimo e la rigidezza.

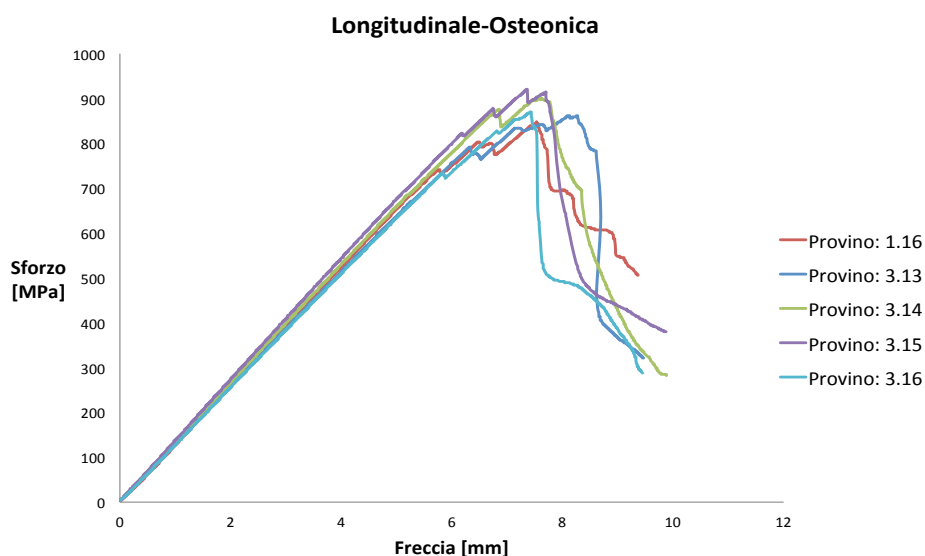
### 5.6.1 Flessione longitudinale struttura osteonica

Il primo campione analizzato è rappresentato dai cinque provini quattro dei quali ricavati dal laminato 3 e il restante dal piatto 1, entrambi a struttura osteonica. Lo sforzo è stato calcolato come prevede la normativa per mezzo della formula 5.2 riportata di seguito:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (5.2)$$

dove:

- $\sigma_f$  è lo sforzo di flessione in [MPa]
- F è il carico in [N]
- L è la luce in [mm]
- h è lo spessore del provino in [mm]
- b è la larghezza del provino in [mm]



**Figura 5-14:** Curve sforzo-freccia. Si nota che prima del cedimento definitivo il materiale si danneggia determinando un andamento a denti di sega



Il grafico in [figura 5.14](#) evidenzia la linearità del legame tra sforzo e freccia. La condizione di carico del test che concentra lo stato massimo dello sforzo nella zona centrale permette di ottenere un'ottima ripetibilità delle prove sperimentali.

Tutti i provini evidenziano la tendenza del materiale a danneggiarsi progressivamente prima del cedimento finale. L'andamento a dente di sega, come si vedrà nel seguito, è una caratteristica della struttura bionica in esame ed è legato al meccanismo di danneggiamento della struttura stessa.

La provetta ricavata dal piatto laminato numero 1 è caratterizzata da un valore inferiore dello sforzo a rottura, probabilmente dovuto alla differente composizione della resina usata, ma comunque resta confrontabile con le restanti provette.

Lo sforzo flessionale massimo registrato durante il test è di 920 MPa mentre il valore di freccia a rottura è stato misurato pari a 8,12mm per un rapporto percentuale freccia-luce di circa l'8%. Per ulteriori risultati si rimanda alla consultazione della [Tabella 5.8](#)

La rigidezza è stata calcolata consultando la norma UNI-EN ISO-14125. Fissati i due valori di deformazione  $\varepsilon' = 0,0005$  e  $\varepsilon'' = 0,0025$ , è possibile calcolare le frecce  $f'$  e  $f''$  attraverso la [formula 5.3](#) che lega la freccia alla deformazione. Note le frecce è possibile ricavare gli sforzi  $\sigma'$  e  $\sigma''$  che inseriti nella [formula 5.4](#) permettono di definire la rigidezza flessionale.

$$f' = \frac{\varepsilon' L^2}{6h} \quad (5.3)$$

$$E_f = 500(\sigma_f'' - \sigma_f') \quad (5.4)$$

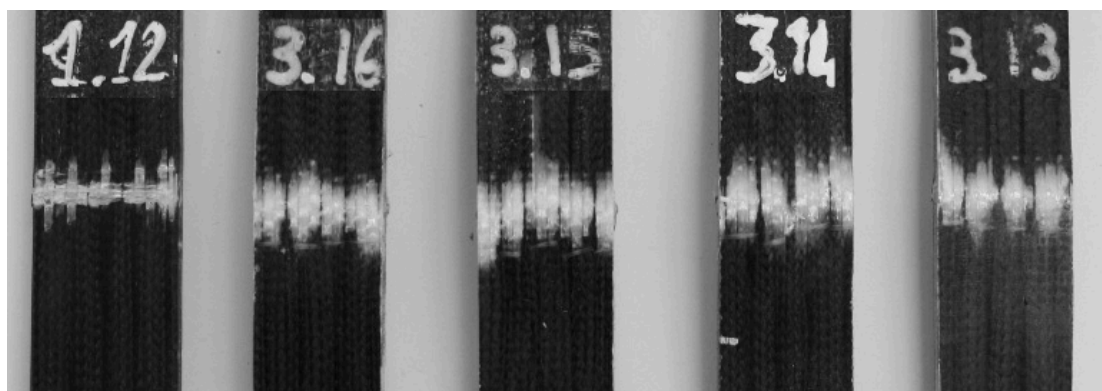
dove:

$\sigma_f'$  è lo sforzo misurato in corrispondenza della deformazione  $\varepsilon'$ , in [MPa]

$\sigma_f''$  è lo sforzo misurato in corrispondenza della deformazione  $\varepsilon''$ , in [MPa]

Un'analisi interessante è stata fatta nel range di cedimento del materiale ([figura 5.16](#)). È singolare notare come il primo danno, rappresentato dal massimo locale sulla destra è seguito da un recupero di resistenza del materiale testimoniato dalla tendenza del carico a crescere nuovamente. Prima della rottura definitiva del provino il fenomeno si ripete un numero di volte paragonabile a quello degli osteoni interni ([Figura 5.16](#)). Tracciando i grafici sovrapposti di "sforzo vs freccia" e "derivata della rigidezza vs freccia" si può ipotizzare la sequenza del danno subita dal materiale durante la prova. Analizzando l'andamento della derivata della rigidezza si notano una serie di picchi che si associano ad eventi di danneggiamento interno.

Dopo i primi danneggiamenti, il valore della derivata si riporta sempre sullo zero fino a che, a seguito della sequenza di deterioramento, essa permane negativa.

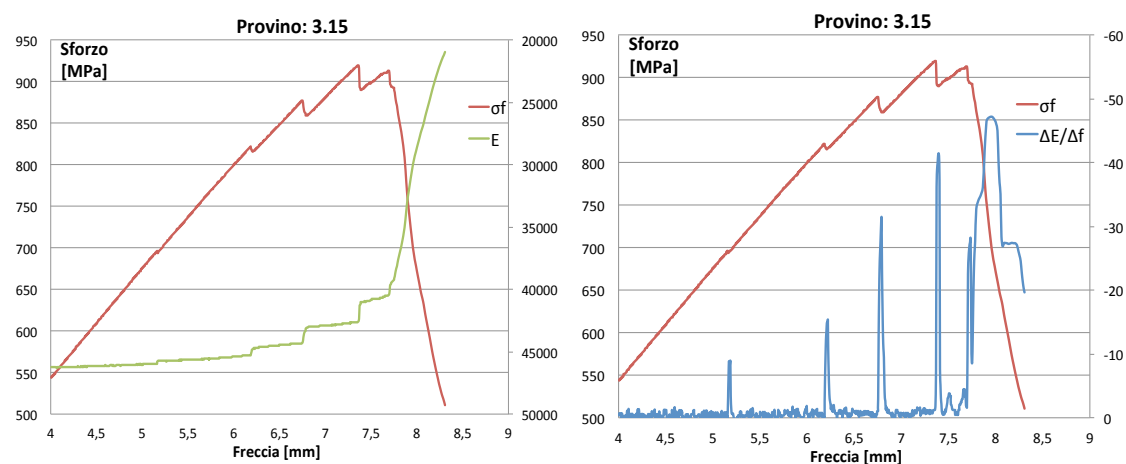


**Figura 5-15:** Provette osteoniche al termine della flessione. In figura la superficie inferiore sollecitata a trazione. Sono visibili i tubi di carbonio danneggiati

Combinando le informazioni delle due curve, si ritiene che tale comportamento sia la conseguenza di cedimenti che interessano dapprima i tubicini osteonici, in seguito gli strati esterni e infine le fibre di riempimento interno.

I manicotti di carbonio, rompendosi uno per volta, producono dei rilassamenti progressivi del materiale che tende a distribuire il carico sulla parte del rinforzo ancora integra e a ridurre la sua rigidità. Tale meccanismo, che sulla curva di sforzo si traduce nell'andamento a denti di sega, sulla rigidità si denota con un andamento a gradini fino al collasso finale tale per cui la rigidità crolla senza recuperi.

Una volta che tutti gli osteoni sono deteriorati, si presume che il cedimento interessi lo strato longitudinale esterno e le fibre di vetro di riempimento che arrivando a rottura, determinano l'incapacità del materiale di recuperare la resistenza iniziale.



**Figura 5-16:** Andamento dello sforzo e della derivata della rigidità in funzione della freccia (destra). Si notano i picchi negativi che si suppone siano generati nel momento della rottura del singolo tubo osteonico. L'ultimo apice rappresenta il cedimento finale oltre il quale la derivata di  $E$  permane negativa. Andamento a scalini della rigidità (a destra)

**Tabella 5-8:** Risultati dei test sperimentali per il set di provini longitudinali a struttura osteonica

	Codice provino				
	1.16	3.13	3.14	3.15	3.16
<b>Spessore [mm]</b>	5	4,72	4,81	4,89	5,04
<b>Larghezza [mm]</b>	20,85	19,4	19,17	19,55	18,5
<b>Area Res [mm<sup>2</sup>]</b>	104,27	91,65	92,13	95,66	93,2
<b>N° Osteoni</b>	4	3	3	3	3
<b>F<sub>f</sub> max [N]</b>	2944	2485	2656	2871	2724
<b>M<sub>f</sub> max [Nmm]</b>	73600	62125	66400	71775	68100
<b>Freccia rott [mm]</b>	7,53	8,12	7,6	7,36	7,43
<b>σ<sub>f</sub> [MPa]</b>	847,1	861,1	899,7	920	870,5
<b>E<sub>f</sub> [MPa]</b>	41777	45960	46067	45655	42020
<b>N°picchi</b>	4	4	2	4	3
<b>σ<sub>pr</sub>[MPa]</b>	741	791	875	822	734
<b>ε<sub>pr</sub> []</b>	0,0177	0,0172	0,0189	0,0180	0,0174
<b>Δσ [MPa]</b>	106	70,1	24,7	98	136,5
<b>Tipo rottura</b>	Varia	Varia	Varia	Varia	Varia

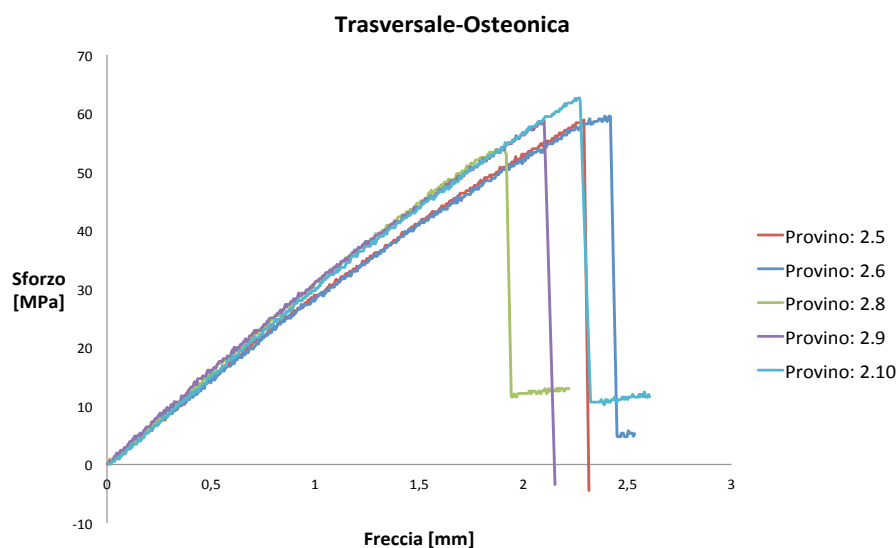
La tendenza del materiale a subire il danno in modo progressivo rappresenta un vantaggio considerevole della struttura. È possibile determinare la distanza, in termini di sforzo, che intercorre tra il primo cedimento  $\sigma_{pr}$  e quello definitivo  $\sigma_f$ . Tale intervallo si traduce in una sorta di preavviso che il materiale fornisce prima di arrivare allo schianto catastrofico. Tali valori sono stati ottenuti mediando quelli calcolati per i singoli test e sono stati riportati nella [Tabella 5.9](#).

**Tabella 5-9:** Caratterizzazione del tratto di danneggiamento

σ <sub>pr</sub> [MPa]			ε <sub>pr</sub> []			Δσ [MPa]		
Media	Dev. Stan.	C.V	Media	Dev. Stan.	C.V	Media	Dev. Stan.	C.V
792,6	58,6	7,4%	0,017883	0,000688	3,8%	87,1	42,1	48%

### 5.6.2 Flessione trasversale struttura osteonica

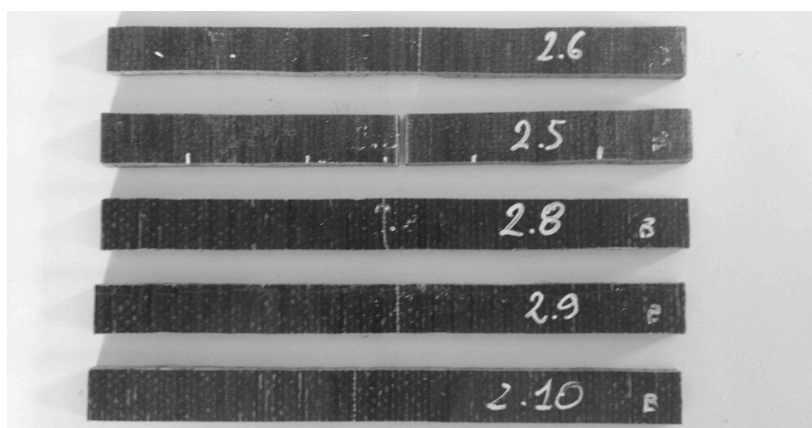
Il secondo campione analizzato consta di cinque provini con struttura del rinforzo orientata trasversalmente. Si fa notare che le provette sono state ricavate dal piatto laminato 2 caratterizzato da una ridotta qualità superficiale, motivo per il quale i valori sono da ritenersi come una sottostima della reale caratteristica trasversale a flessione del composito.



**Figura 5-17:** Curve di sforzo in funzione della freccia. La struttura osteonica non partecipa in alcun modo alla resistenza in questa direzione e la rottura avviene di schianto.

Anche in questo caso le curve di sforzo presentano un chiaro andamento lineare fino a rottura, che avviene di schianto e senza preavvisi. Il massimo sforzo a flessione raggiunto nei test è prossimo ai 60 MPa, mentre la freccia oscilla tra 2 e 2,5mm. La rigidità flessionale, calcolata come prescritto dalla normativa (vedi paragrafo 5.4.2), è stata stimata a circa 10000 MPa, circa un quinto di quella calcolata nella direzione longitudinale.

Per ulteriori risultati si rimanda alla consultazione della [Tabella 5.10](#)



**Figura 5-18:** Provette trasversali al termine della prova. Si notano nella parte centrale le linee di frattura

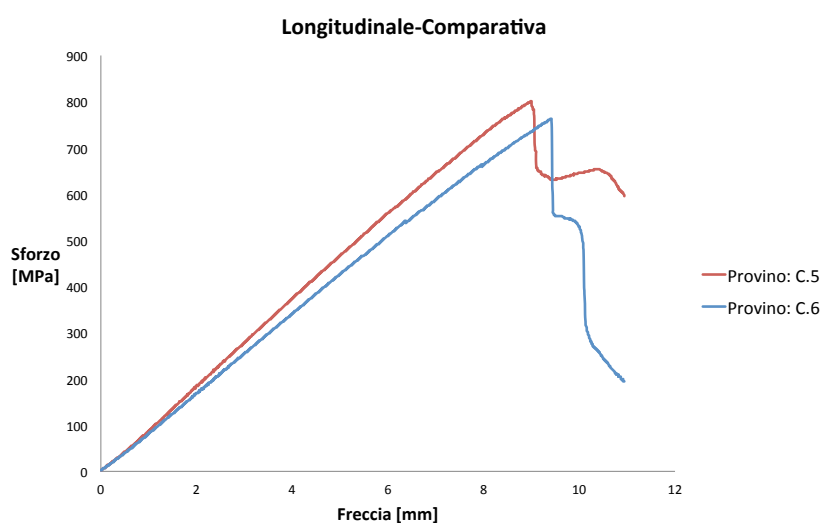
**Tabella 5-10:** Risultati dei test sperimentali per il set di provini trasversali a struttura osteonica

	Codice provino				
	2.5	2.6	2.8	2.9	2.10
<b>Spessore [mm]</b>	4,86	4,82	4,72	4,71	4,86
<b>Larghezza [mm]</b>	14,27	13,47	14,53	13,84	4,86
<b>Area Res [mm<sup>2</sup>]</b>	69,26	64,86	68,52	65,19	69,58
<b>F<sub>f</sub> max [N]</b>	142	127	118	129	144
<b>M<sub>f</sub>max [Nmm]</b>	3550	3175	2950	3225	3600
<b>Freccia rott [mm]</b>	2,29	2,41	7,6	7,36	7,43
<b>σ<sub>f</sub> [MPa]</b>	58,4	59,5	53,8	58,6	62,1
<b>E<sub>f</sub> [MPa]</b>	10030	9880	10910	11235	10870
<b>Tipo rottura</b>	Frattura a compressione	Frattura a compressione	Frattura a compressione	Frattura a compressione	Frattura a compressione

### 5.6.3 Flessione longitudinale struttura comparativa

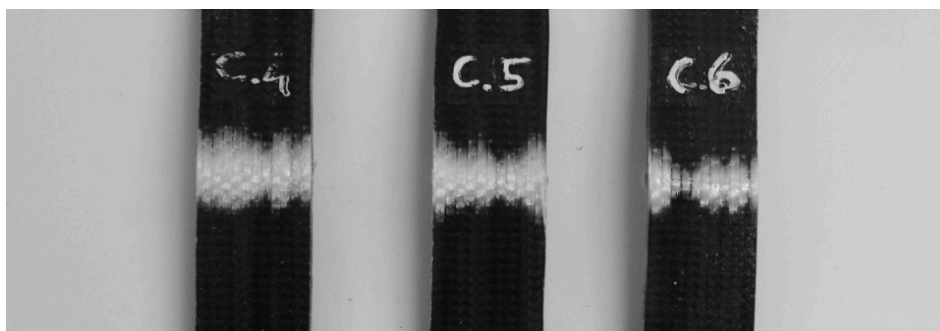
Il numero di provette a disposizione per la caratterizzazione a flessione della struttura di confronto consta in un totale di sei provini, ripartiti equamente per l'analisi delle due direzioni di interesse.

A causa dell'eccessiva inflessione, durante il test del provino C.4 si sono riscontrati slittamenti dei rullini di appoggio. Tale prova è da ritenersi inattendibile e non sarà quindi presa in considerazione. Il totale del campione per il test longitudinale consta quindi di sole due provette.



**Figura 5-19:** Andamento dello sforzo in funzione della freccia in mezzeria. Si può notare come in questo caso il comportamento sia lineare fino alla rottura finale che avviene di schianto senza particolari preavvisi

La [Figura 5.19](#) mostra l'andamento dello sforzo flessionale massimo in funzione della freccia. Come per i test precedenti, si osserva un legame lineare. Lo sforzo cresce quindi sino al punto di rottura che avviene di schianto ad un valore pari circa a 800 MPa, ben al di sotto di quello misurato per il composito osteonico. La freccia a rottura vale circa 10 mm, (il 10% della luce) mentre la rigidezza si assesta sul valore approssimativo di 30000 MPa.



**Figura 5-20:** Le superfici inferiori dei provini a struttura classica terminata la prova. L'area in bianco rappresenta la parte danneggiata

L'analisi della zona di rottura, riportata in [Figura 5.20](#) mostra come lo strato esterno di fibre di vetro longitudinali sia particolarmente danneggiato, tuttavia non sono presenti fratture evidenti sulla superficie.

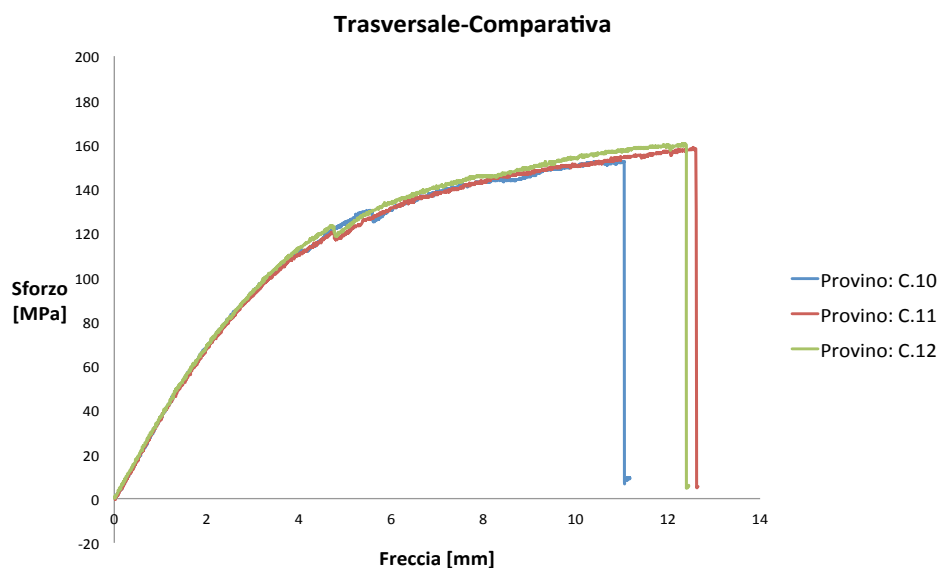
Per ulteriori risultati si rimanda alla consultazione della [Tabella 5.11](#)

**Tabella 5-11:** Risultati dei test sperimentali per il set di provini longitudinali a struttura classica

	Codice provino		
	C.4	C.5	C.6
Spessore [mm]	4,22	4,44	4,53
Larghezza [mm]	19,25	19,39	18,64
Area Res [mm <sup>2</sup> ]	81,31	86,11	84,38
F <sub>f</sub> max [N]	-	2041	1944
M <sub>f</sub> max [Nmm]	-	51025	48600
Freccia rott [mm]	-	8,99	9,41
$\sigma_f$ [MPa]	-	800,8	763,5
E <sub>f</sub> [MPa]	-	32565	29650
Tipo rottura	-	Varia	Varia

### 5.6.4 Flessione trasversale struttura comparativa

L'ultimo set di provini è usato per la caratterizzazione flessionale della struttura di confronto in direzione trasversale. Il campione consta di tre provini a struttura classica con orientamento del rinforzo in direzione trasversale. Tutte le prove effettuate sono andate a termine senza aver evidenziato problematiche di alcun tipo.



**Figura 5-21:** Curve sforzo in funzione della freccia per i tre provini trasversali. Il comportamento è bilineare con una transizione intermedia. Da notare che lo spostamento del punto di mezzzeria supera il 10% della luce

L'andamento dello sforzo in funzione dell'abbassamento del punto di mezzo non è in questo caso puramente lineare. La curva, infatti, può essere scomposta in tre parti distinte.

La prima e la terza, rispettivamente nel range tra 0-2 mm e 7-11 mm sono caratterizzate da un andamento lineare dello sforzo. La seconda, di transizione, raccorda i due tratti lineari.

Di seguito si mostrano i risultati ottenuti elaborando i dati con Excel e calcolando i valori di termine noto e coefficiente angolare delle rette di regressione che approssimano i due tratti lineari.

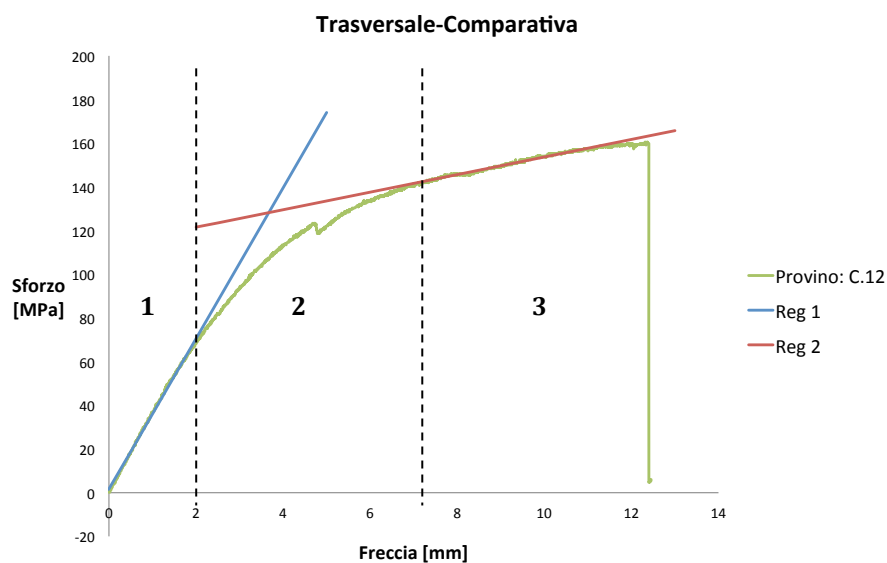
$$\begin{aligned} \text{Regressione 1:} & \quad \sigma_f = 34,52f \\ \text{Regressione 3:} & \quad \sigma_f = 4,02f + 113,46 \end{aligned}$$

dove:

$f$  è la freccia, in [mm]

$\sigma_f$  è lo sforzo, in [MPa]



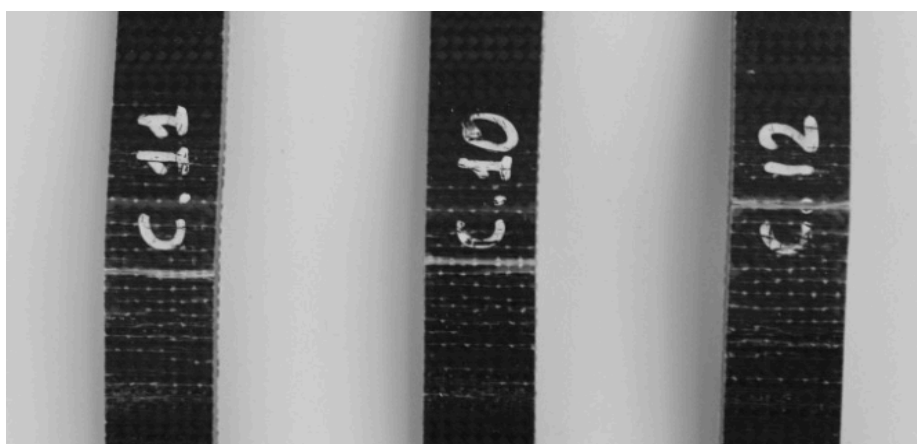


**Figura 5-22:** Andamento bilineare a flessione per il provino C.12. In evidenza le tre zone. 1) lineare. 2) zona di transizione. 3) lineare

Analizzando il grafico precedente è possibile ipotizzare il meccanismo attraverso il quale il laminato a struttura classica arriva a rottura.

Nella prima zona si suppone che il rinforzo ancora integro collabori integralmente. In particolare si ipotizza che né lo strato intermedio di carbonio né le fibre longitudinali contribuiscano alla resistenza in quanto il primo è sull'asse neutro e le seconde sono trasversali alla direzione di sollecitazione. Dunque, i soli elementi utili sono i due strati simmetrici di carbonio con fibre orientate a  $\pm 45^\circ$  e la matrice di resina epossidica.

Nel tratto centrale, si ipotizza che sia la matrice polimerica a dominare in effetto. Superato un certo valore di deformazione lo strato di carbonio sollecitato a trazione, si danneggia, evidenziando un'irregolarità marcata sulla curva di sforzo.



**Figura 5-23:** Superfici inferiori dei provini al termine della prova. Da notare la riga bianca presente circa a metà di ogni provetta, traccia della frattura che in questo caso propaga tra lo spessore

In questa nuova configurazione l'unica parte del rinforzo che partecipa è lo strato di carbonio sollecitato a compressione, mentre la matrice inizia a lacerarsi. Una volta che anche lo strato compresso arriva a rottura, avviene lo schianto e il provino si rompe.

La frattura dunque si genera per trazione sulla superficie inferiore e propaga in direzione ortogonale attraversando lo spessore della provetta.

Il valore di sforzo flessionale massimo misurato durante i test è di circa 160 MPa a cui corrisponde un abbassamento del punto di mezzeria pari a circa 12.5 mm (12,5% della luce).

La normativa prevede che per frecce superiori al 10% della distanza tra gli appoggi si debba tenere conto dell'effetto della curvatura sullo stato di sforzo.

Sono stati dunque calcolati i valori di sforzo corretti usando la formula 5.5.

Dati e risultati dei test sono stati riportati nel dettaglio nella Tabella 5.12.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \left\{ 1 + 6 \left( \frac{s}{L} \right)^2 - 3 \left( \frac{sh}{L^2} \right) \right\} \quad (5.5)$$

dove:

s è la freccia in mezzeria, in [mm]

$\sigma_f$  è lo sforzo a flessione, in [MPa]

F è il carico, in [N]

L è la luce, in [mm]

h è lo spessore, in [mm]

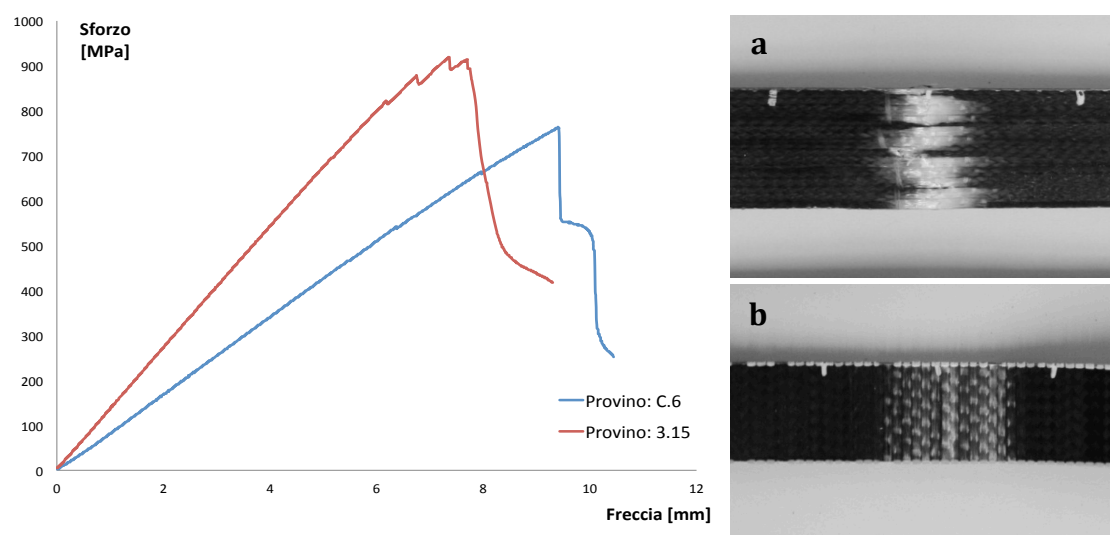
b è la larghezza, in [mm]

**Tabella 5-12:** Risultati dei test sperimentali per il set di provini trasversali a struttura classica

	Codice provino		
	C.10	C.11	C.12
Spessore [mm]	4,13	4,15	4,14
Larghezza [mm]	14,18	14,12	14,88
Area Res [mm <sup>2</sup> ]	58,6	58,55	61,65
F <sub>f</sub> max [N]	250	261	275
M <sub>f</sub> max [Nmm]	6250	6525	6875
Freccia rottu [mm]	11,1	12,48	12,4
$\sigma_f$ [MPa]	152,4	157,5	159,7
$\sigma_f$ Corretto [MPa]	161,47	170,8	172,6
E <sub>f</sub> [MPa]	14550	14500	14700
Tipo rottura	Frattura a trazione lungo lo spessore	Frattura a trazione lungo lo spessore	Frattura a trazione Lungo lo spessore

### 5.6.5 Confronto dei risultati

I test hanno evidenziato un differente comportamento flessionale tra le due strutture in esame. In particolare, in configurazione longitudinale del rinforzo la struttura bio-ispirata è il 15% più resistente del laminato di confronto. Anche in termini di rigidità, la struttura osteonica si afferma, con un modulo elastico di 44296 MPa, dunque più rigida del 42%. Tali differenze sono legate ai differenti tipi di cedimento. Un altro vantaggio è rappresentato dalla capacità del materiale osteonico di informare, senza cedimenti catastrofici, l'inizio della fase di danneggiamento. Ciò è testimoniato dall'andamento a denti di sega (Figura 2.24). Gli elementi osteonici, uniti tra loro solo per mezzo di una cucitura esterna, contribuiscono alla resistenza in modo indipendente, come una serie di elementi in parallelo quindi il danneggiamento di uno non determina il cedimento totale della struttura.

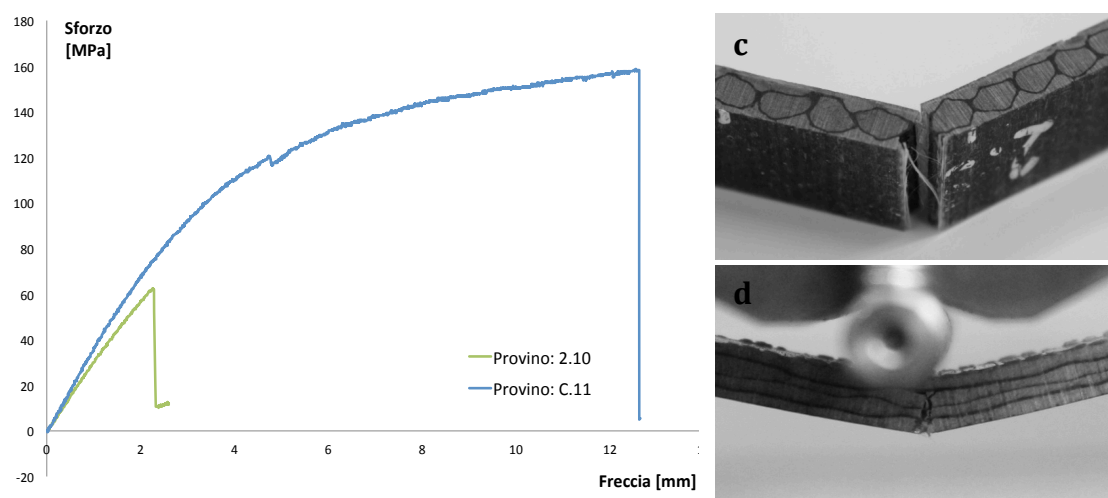


**Figura 5-24:** Confronto grafico del comportamento a flessione tra la struttura classica (blu) e quella osteonica (rosso), entrambe in configurazione longitudinale. A destra le zone di rottura. a) struttura osteonica b) struttura classica

Ai vantaggi osservati nella direzione longitudinale, si contrappongono evidenti limiti in configurazione trasversale delle fibre. Infatti, in questo caso, la struttura tubolare, priva di continuità, ha come effetto quello di ridurre le prestazioni del materiale che in questa configurazione risulta, con circa 60 MPa di  $\sigma_f$ , tre volte meno resistente della struttura di confronto. Anche la rigidità del laminato classico con 14583 MPa è il 37% maggiore rispetto a quella del laminato composito bio ispirato.

Bisogna evidenziare però, che i provini osteonici usati nei test, provengono dal laminato numero 2 le cui caratteristiche di impregnazione, (descritte nel capitolo 4) sono qualitativamente inferiori rispetto a quelle del laminato di confronto.

Sulla base di tale considerazione, si ritiene che la differenza analizzata sia una stima esaltata ma comunque indicativa.



**Figura 5-25:** Confronto grafico tra il comportamento a flessione tra la struttura classica (blu) e quella osteonica (rosso), entrambe in configurazione trasversale. A destra le zone di rottura. a) struttura osteonica b) struttura classica

Nel seguito, sono riportati in dettaglio, nella [Tabella 5.13](#) i valori medi di sforzo, freccia e rigidezza flessionale con le relative deviazioni standard.

**Tabella 5-13:** Confronto dei risultati ottenuti

		Longitudinale		Trasversale	
		Osteonica (n=5)	Comparativa (n=2)	Osteonica (n=5)	Comparativa (n=3)
<b>Freccia a rottura [mm]</b>	Media	7,6	9,2	2,2	11,99
	Dev. Standard	0,3	0,3	0,2	0,77
	Coef. Variazione	4%	3,2%	9%	6,5%
<b><math>\sigma_f</math> [MPa]</b>	Media	879,7	782,1	58,5	156,5
	Dev. Standard	29,7	26,4	3,0	3,7
	Coef. Variazione	3,4%	3,4%	5,1%	2,4%
<b><math>E_f</math> [MPa]</b>	Media	44296	31108	10585	14583
	Dev. Standard	2195,5	594,6	2061,2	104,1
	Coef. Variazione	5,0%	1,9%	19,5%	0,7%
<b>Tipo rottura</b>		Multipla	Delaminazione	Compressione tra spessore	Trazione tra lo spessore

## 5.7 Analisi dei risultati: Trazione

Il secondo dei tre set di campioni analizzati consta di un totale di quindici provette, che sono state testate a trazione con lo scopo di identificare le caratteristiche tensili delle due strutture a confronto.

Nella prova, si ricavano: il carico di rottura, la deformazione massima e il modulo di elasticità, sia nella configurazione longitudinale sia in quella trasversale.

Lo sforzo è stato calcolato per mezzo della [formula 5.6](#) secondo quanto prescritto dalla normativa, mentre il modulo elastico è stato ottenuto attraverso due differenti procedimenti.

Il primo, noto come metodo della corda, consiste nel ricavare lo stato di sforzo associato a due deformazioni stabilite,  $\varepsilon'=0,001$  [mm/mm] e  $\varepsilon''=0,003$  [mm/mm]. Il modulo si ottiene sfruttando la definizione calcolando il rapporto tra la differenza dei valori di sforzo trovati e le deformazioni  $\varepsilon'$  e  $\varepsilon''$ .

Il secondo metodo, consiste nel calcolare la rigidezza come il coefficiente angolare della retta di regressione che approssima il tratto lineare della curva sforzo deformazione. I risultati ottenuti sono confrontabili tra loro e sono riportati nella [Tabella 5.14](#).

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (5.6)$$

dove:

$\sigma_t$  è lo sforzo assiale, in [MPa]

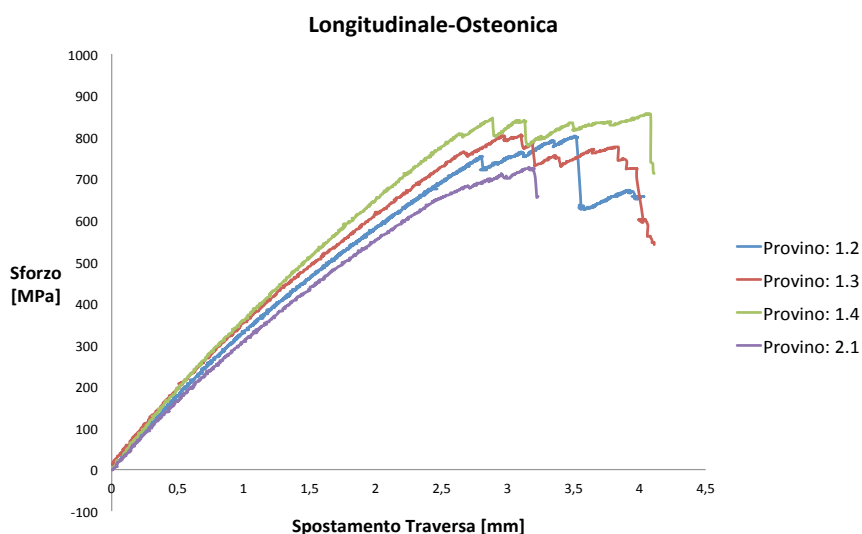
A è l'area della sezione resistente della provetta, in [mm<sup>2</sup>]

F è il carico imposto al provino, in [N]

### 5.7.1 Trazione longitudinale struttura osteonica

Il primo gruppo di provini, provenienti dal laminato osteonico, è stato testato a trazione con fibre orientate nella direzione del carico. La serie di cinque campioni è stata testata con successo fatta eccezione per il provino 1.1 in cui, a causa di un errato afferraggio, si è verificata prima la rottura del tallone e poi lo scorrimento dello strato di colla. Si deve precisare che non tutte le prove longitudinali sono state predisposte per la misura delle deformazioni.

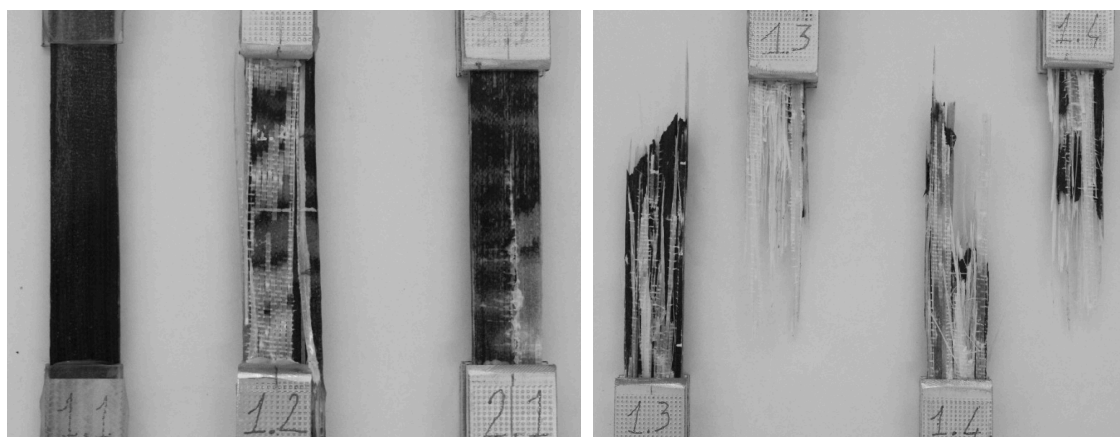
Si riportano nella [figura 2.26](#) gli andamenti dello sforzo in funzione dello spostamento della traversa.



**Figura 5.26:** Andamento dello sforzo in funzione dello spostamento della traversa. Tutto il set sperimentale mostra la tendenza a danneggiare in modo costante e progressivo prima della rottura definitiva

Il comportamento, a meno delle deformazioni introdotte dal sistema di carico e dai talloni di alluminio, può essere considerato lineare. Si nota, come già evidenziato nei test di flessione, che il danneggiamento della struttura è progressivo e la curva di sforzo presenta una serie di creste in prossimità del cedimento. Rispetto al caso precedente tale andamento si allinea su un valore di che permane circa costante fino alla rottura della provetta. Per non appesantire la trattazione, si rimanda al paragrafo 5.6.1 per una più completa descrizione del modo di rottura.

Il valore di sforzo massimo misurato è stato di 808 MPa con un modulo di elasticità pari circa a 50000 MPa, valori confrontabili con quelli ricavati nella prova di flessione. Lo schianto finale avviene a un valore di deformazione pari a circa 0,0178 [mm/mm]. Per una consultazione completa dei dati si rimanda alla [Tabella 5.14](#).



**Figura 5-27:** Provette al termine della prova di trazione. In evidenza il provino 1.1 ancora integro dopo la prova. Il fallimento è avvenuto in corrispondenza del tallone. A destra le provette 1.3 e 1.4 portate alla rottura completa. Si nota come la frattura propaghi a 45° lungo la larghezza del provino

Tabella 5-14: Risultati dei test sperimentali per il set di provini longitudinali a struttura osteonica

	Codice provino				
	1.1	1.2	1.3	1.4	2.1
Spessore [mm]	5,07	5,03	4,66	4,56	5,11
Larghezza [mm]	19,93	20,4	20,53	20,47	20,36
Area Res [mm <sup>2</sup> ]	101,06	102,68	95,83	93,41	104,07
N°osteoni	4	4	4	4	4
$F_T$ [N]	-	82276	77100	79959	75653
$R_T$ [MPa]	-	801,3	804,4	856	726,9
$\epsilon_T$ [mm/mm]	-	0,017744	-	-	0,017864
$E_l$ [MPa] (Corda)	-	531534	-	-	45744
$E_l$ [MPa] (Regres) (q=0)	-	55090	-	-	45467
$F_{pr}$ [N]	-	77392	73241	75454	67427
$\sigma_{pr}$ [MPa]	-	753,7	764,2	807,8	647,9
$\epsilon_{pr}$ [mm/mm]	-	0,01361	0,01532	0,01619	0,01440
$\Delta\epsilon$ [mm/mm]	-	0,004134	-	-	0,003462
$\Delta\sigma$ [MPa]	-	47,5	40,3	48,2	79
Tipo di rottura		SMV*	AGM**	OGM***	SMV*

\*SMV: long Splitting, Multiple areas, Various

\*\*AGM: Angled, Gage, Middle

\*\*\*OGM: Other, Gage, Middle

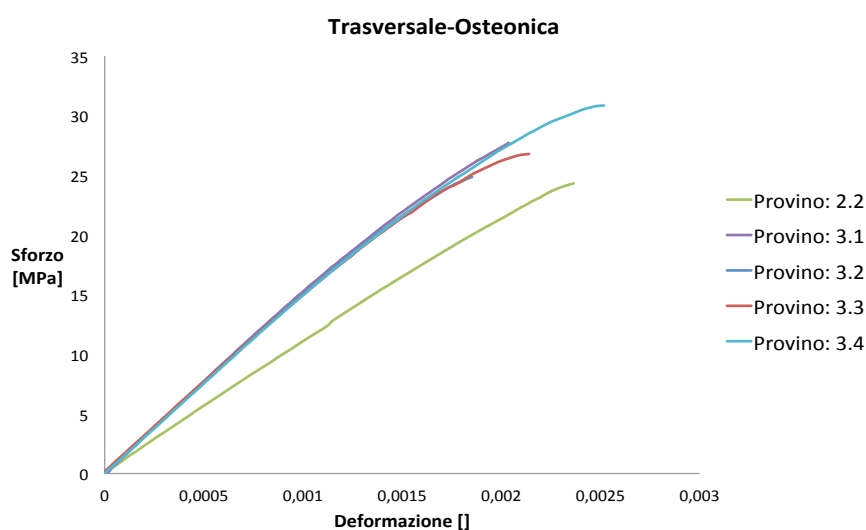
Nella figura 5.27, sono riportate le provette al termine della prova. Osservando in particolare i provini 1.3 e 1.4, portati al cedimento completo, si può notare come la frattura in corrispondenza dei manicotti osteonici sia inclinata di 45°, secondo l'orientamento delle fibre di carbonio nel manicotto. Il riempimento interno, invece, si lacera in direzione ortogonale e in posizioni che variano di volta in volta rispetto alla direzione del provino.

Tabella 5-15: Caratterizzazione del tratto di danneggiamento

	$\sigma_{pr}$ [MPa]	$\epsilon_{pr}$ [mm/mm]	$\Delta\sigma$ [MPa]	$\Delta\epsilon$ [mm/mm]
Media	743	0,0149	54	0,0038
Dev. Standard	67,8	0,001123	17,2	0,000475
Coef. Variazione	9,1%	7,5%	32%	12,5%
Dim. Campione	4	4	4	2

### 5.7.2 Trazione trasversale struttura osteonica

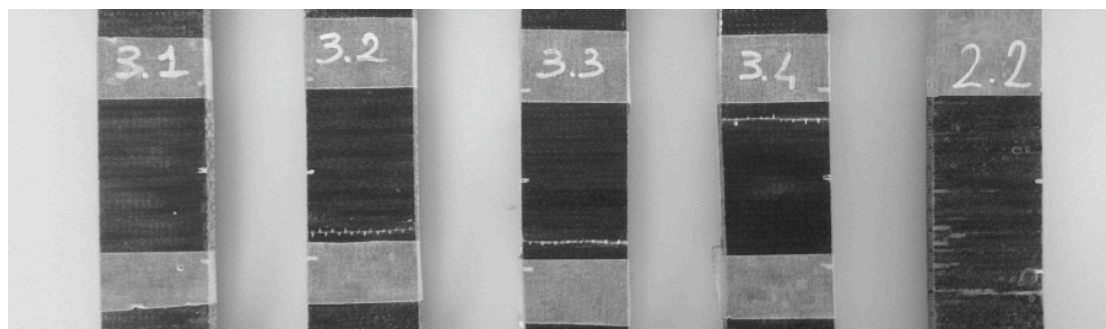
Il secondo gruppo di provette ha la struttura orientata trasversalmente rispetto alla direzione del test. Il set è composto in totale da cinque provette, quattro delle quali ricavate dal laminato 3 e una ottenuta dal laminato 2. Tutti i test sono stati portati a termine senza riscontrare anomalie o problemi. Le prove, sono state eseguite attrezzando i test con un estensometro, è stato quindi possibile ricavare le curve di sforzo in funzione della deformazione.



**Figura 5-28:** Curve di sforzo deformazione per le provette trasversali. Il set è perfettamente ripetuto tranne che per il provino 2.2 che si atteggia su valori minori sia di  $E$  che di  $R_m$

Analizzando la [figura 5.28](#) si nota che anche in questa configurazione il legame tra sforzo deformazione è lineare. La sollecitazione cresce all'aumentare della deformazione fino alla rottura del materiale che avviene in modo fragile.

Si fa notare che la ripetibilità dei test è stata eccellente ad eccezione della provetta proveniente dal laminato 2, che si assesta su valori minori sia di resistenza che di rigidezza. Il test sarà trascurato, poiché la riduzione delle caratteristiche meccaniche non è da imputare alla variabilità dei risultati ma piuttosto alla qualità del laminato di provenienza.



**Figura 5.29:** Provette trasversali al termine della prova. Le linee bianche sono le zone di frattura, che in questa direzione propagano tra lo spessore



L'analisi visiva delle aree danneggiate mostra come la frattura si estenda tra lo spessore attraverso i bordi esterni delle superfici infra-osteoneiche. Tale meccanismo di danneggiamento non è ostacolato in alcun modo dal rinforzo e le caratteristiche meccaniche misurate sono notevolmente ridotte. Il valore di resistenza nella direzione trasversale è, infatti, di quasi trenta volte inferiore rispetto a quello misurato nella direzione longitudinale, mentre il modulo elastico si riduce di circa tre volte. I risultati ricavati dalle prove sono riassunti in Tabella 5.16.

**Tabella 5-16:** Risultati dei test sperimentali per il set di provini trasversali a struttura osteonica

	Codice provino				
	2.2	3.1	3.2	3.3	3.4
<b>Spessore [mm]</b>	4,64	4,29	4,33	4,35	4,45
<b>Larghezza[mm]</b>	24,8	24,8	24,52	24,35	24,64
<b>Area Res [mm<sup>2</sup>]</b>	115,07	103,22	106,10	105,99	109,57
<b>F<sub>T</sub> [N]</b>	2802	2861	2636	2841	3380
<b>R<sub>T</sub> [MPa]</b>	24	28	25	27	31
<b>ε<sub>T</sub> [mm/mm]</b>	0,002364	0,002036	0,001852	0,002139	0,002517
<b>E<sub>i</sub> [MPa]</b>	10979	13111	15204	14930	14986
<b>Tipo di rottura</b>	LGB*	LAT**	LGM***	LGM***	LGM***

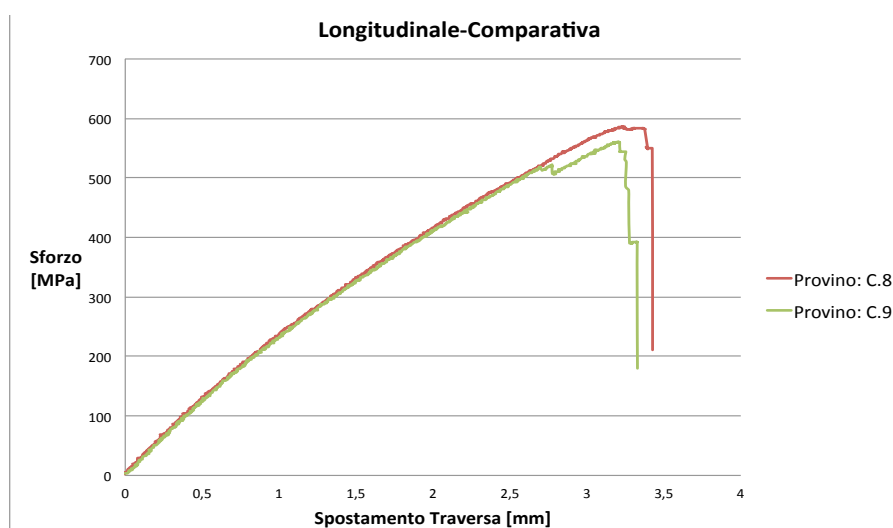
\*LGB: Lateral, Gage, Bottom

\*\*LAT: Lateral, At grip/tab, Top

\*\*\*LGM: Lateral, Gage, Middle

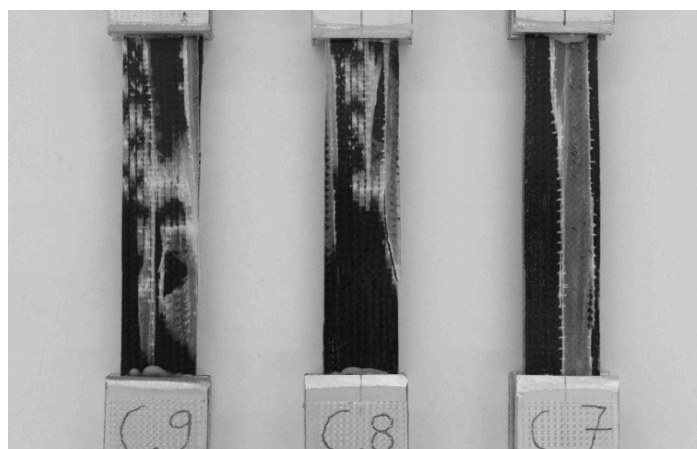
### 5.7.3 Trazione longitudinale struttura comparativa

La definizione delle proprietà tensili della struttura classica con orientamento delle fibre parallelo al carico è stata condotta attraverso un set di tre provette. Le prove sono state eseguite in parte con un estensometro per la misura della deformazione e in parte con sensori speciali per captare le emissioni a ultrasuoni. Lo scollamento del tallone ha condizionato il test del provino C.7 che per tale motivo sarà ignorato nell'analisi.



**Figura 5.30:** Curva sforzo spostamento per le provette a struttura classica in configurazione longitudinale. Il comportamento è evidentemente lineare fino alla rottura che avviene di schianto

L'andamento dello sforzo in funzione dello spostamento è lineare e analizzando le curve in [figura 3.30](#) si costata una buona ripetibilità dei risultati. La rottura è fragile e avviene a un valore dello sforzo a trazione prossimo ai 600MPa con un modulo elastico di circa 30000 MPa e una deformazione a rottura pari a 0,02414 [mm/mm]. I risultati dei test sono riportati nella [Tabella 5.17](#).



**Figura 5.31:** Provette al termine della prova. Il cedimento avviene per delaminazione. Il provino C.7 è arrivato a rottura ma la prova è stata falsata dallo scorrimento del tallone inferiore

L'analisi dell'area di danneggiamento mostra che il cedimento del materiale avviene per effetto della delaminazione degli strati in fibra di carbonio. Danneggiamenti evidenti si osservano anche negli strati esterni in fibra di vetro (vedi figura 5.31).

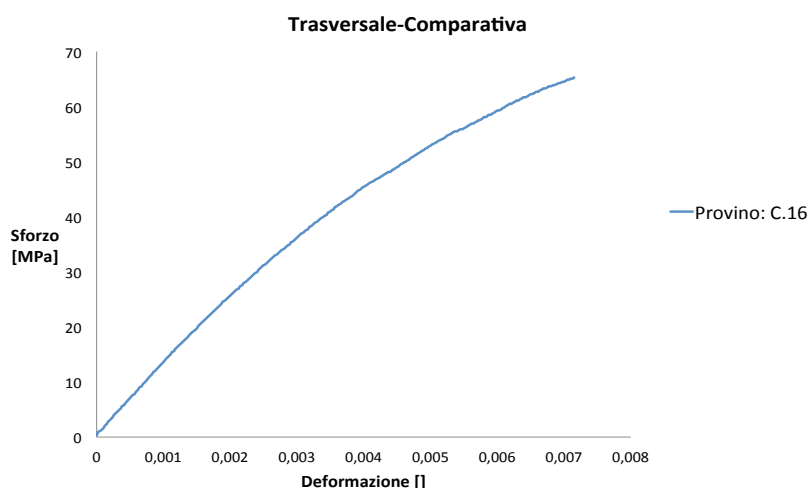
**Tabella 5-17:** Risultati dei test sperimentali per il set di provini longitudinali a struttura classica

	Codice provino		
	C.7	C.8	C.9
<b>Spessore [mm]</b>	4,82	5,01	4,89
<b>Larghezza[mm]</b>	19,29	18,80	19,97
<b>Area Res [mm<sup>2</sup>]</b>	92,96	94,77	92,68
<b>F<sub>T</sub> max [N]</b>	-	54508	51985
<b>R<sub>T</sub>[MPa]</b>	-	575,2	560,9
<b>ε<sub>T</sub> [mm/mm]</b>	-	0,02414	-
<b>E [MPa] (Corda)</b>	-	30200	-
<b>E [MPa] (Regres)</b>	-	29982	-
<b>Tipo rottura</b>	Prova fallita	DGV*	DGV*

\*DGV: Delamination, Gage, Various

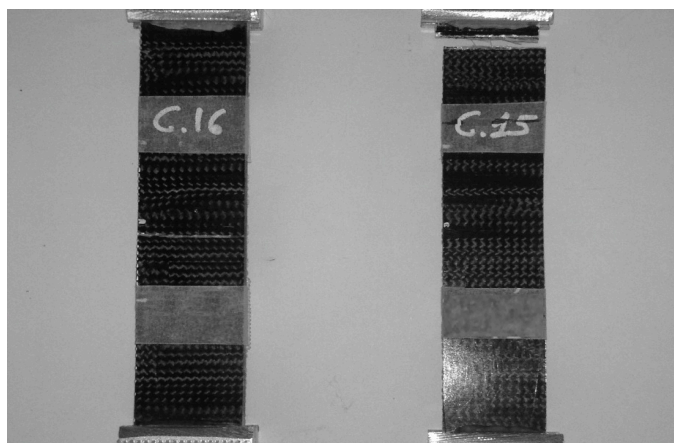
### 5.7.4 Trazione trasversale struttura comparativa

Il comportamento a trazione, in direzione trasversale, è stato definito attraverso l'analisi di due provette. Entrambe le prove sono state eseguite con un estensometro per la misura della deformazione. Per problemi verificatisi sulla ganascia superiore, il test del provino C.15 è stato caratterizzato da una rottura prematura in corrispondenza della parte terminale del tallone superiore (figura C.15) e per tale motivo non sarà preso in considerazione nell'analisi dei dati.



**Figura 5.32:** Andamento sforzo deformazione per il provino C.16. L'andamento è lineare nelle fase iniziale, poi si riconosce una leggera curvatura verso il basso

La sola curva a disposizione è quella che si riferisce al provino C.16 in cui si nota un iniziale andamento lineare dello sforzo che assume per valori di deformazione superiori a 0,002 [mm/mm] una lieve curvatura verso il basso. La rottura delle provette è fragile e avviene a uno sforzo di 65 MPa e a una deformazione di 0,0071 [mm/mm]. Il modulo di elasticità è stato calcolato usando il solo metodo della corda e vale 12366 MPa.



**Figura 5.33:** Provini al termine della prova di trazione. Si nota la frattura centrale della provetta C.16 e quella in corrispondenza del tallone per il provino C.15

L'analisi della zona di frattura mostra che il cedimento è ortogonale al piano di carico e si estende tra lo spessore del provino.

**Tabella 5-18:** Risultati dei test sperimentali per il set di provini trasversali a struttura classica

	Codice provino	
	C.15	C.16
<b>Spessore [mm]</b>	4,39	4,73
<b>Larghezza [mm]</b>	23,7	24,92
<b>Area Res [mm<sup>2</sup>]</b>	104,11	117,89
<b>F<sub>T</sub> [N]</b>	-	7688
<b>R<sub>T</sub> [MPa]</b>	-	65
<b>ε<sub>T</sub> [mm/mm]</b>	-	0,007153
<b>E<sub>t</sub> [MPa]</b>	-	12366
<b>Tipo di rottura</b>	Prova Fallita	LGM*

\*LGM: *Lateral, Gage, Middle*

### 5.7.5 Confronto dei risultati

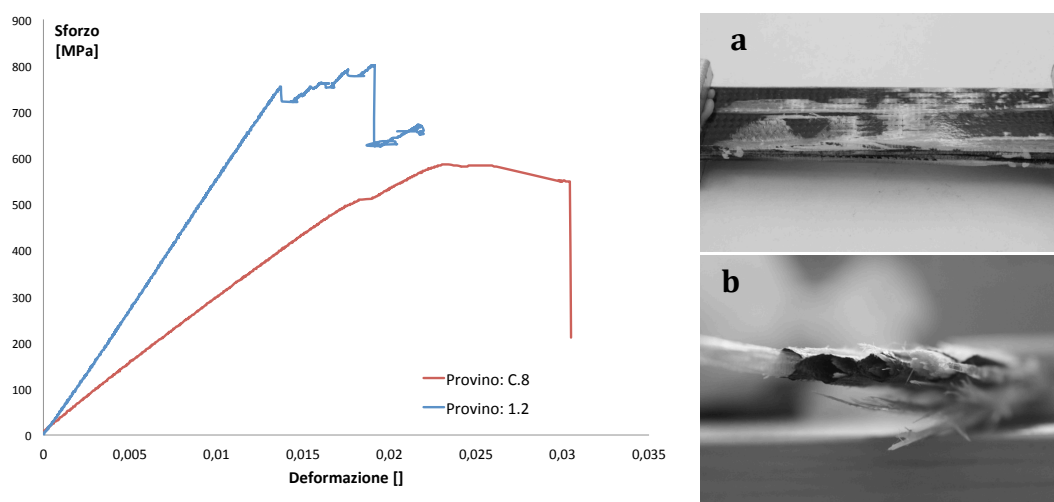
I test di trazione hanno confermato le considerazioni fatte in precedenza. L'effetto della struttura osteonica, sulle proprietà meccaniche, è positivo in direzione longitudinale, al contrario esso è deleterio nel caso trasversale.

In [figura 5.34](#) sono messe a confronto le curve sforzo-deformazione delle due configurazioni strutturali in esame.

Il composito osteonico presenta un carico a rottura medio pari a 797MPa, il 40% superiore rispetto allo sforzo medio misurato per il laminato a struttura classica che vale 568MPa.

Anche le rigidità sono differenti, in particolare, si è calcolato un modulo di elasticità medio pari a 46864MPa per il composito osteonico contro i 33245MPa medi misurati per la struttura comparativa.

Anche in questo caso i tubi osteonici, che non presentano una vera e propria continuità, partecipano separatamente alla resistenza del materiale. I cedimenti, che avvengono in sequenza, sono indipendenti gli uni dagli altri. Tale peculiarità, permette di ricevere informazioni circa la condizione fisica delle fibre all'interno del laminato e rappresenta senza dubbio una caratteristica molto interessante.

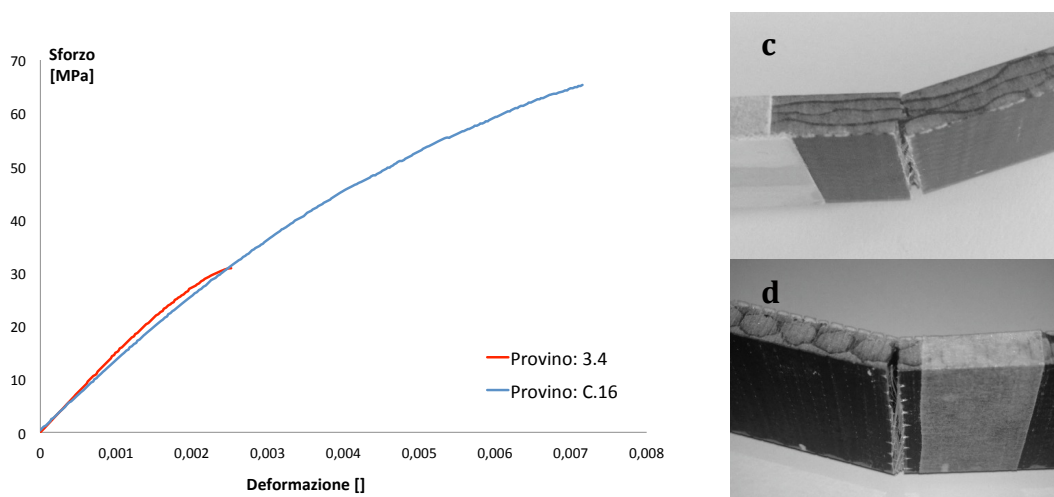


**Figura 5.34:** Confronto grafico del comportamento a trazione tra la struttura classica (rosso) e quella osteonica (blu), entrambe in configurazione longitudinale. A destra le zone di rottura. a) struttura osteonica b) struttura classica

L'analisi del comportamento a trazione in direzione trasversale evidenzia un comportamento marcatamente anisotropo della struttura osteonica che vede ridurre le proprietà statiche in modo considerevole.

In questa configurazione è stato calcolato un valore medio dello sforzo a trazione di soli 28 MPa contro i 65 MPa medi misurati per il laminato classico.

Il modulo di elasticità, al contrario di quanto era stato evidenziato nei test a flessione, permane superiore in configurazione osteonica. I valori di  $E$  medi calcolati sono 14558 MPa per il composito osteonico e 12366 MPa per il laminato classico.



**Figura 5.35:** Confronto grafico del comportamento a flessione tra la struttura classica (blu) e quella osteonica (rosso), entrambe in configurazione trasversale. A destra le zone di rottura. c) struttura osteonica d) struttura classica

Nella **Tabella 5.19**, si riportano in dettaglio le proprietà tensili dei due materiali a confronto.

**Tabella 5-19:** Confronto dei risultati ottenuti

		Longitudinale		Trasversale	
		Osteonica	Comparativa	Osteonica	Comparativa
$\sigma_f$ [MPa]	Media	797	568	28	65
	Dev. Standard	53	10	3	-
	Coef. Variazione	6,7%	1,8%	9%	-
	Dim. Campione	4	2	4	1
$\epsilon_T$ [mm/mm]	Media	0,0178	0,0203	0,002136	0,007153
	Dev. Standard	$8 \cdot 10^{-5}$	-	$2,8 \cdot 10^{-4}$	-
	Coef. Variazione	0,48%	-	13,12%	-
	Dim. Campione	2	1	4	1
$E_T$ [MPa]	Media	46864	33245	14558	12366
	Dev. Standard	4981	-	972	-
	Coef. Variazione	10%	-	7%	-
	Dim. Campione	4	1	4	1
<b>Tipo rottura</b>		Varia	DGV	LGM	LGM

## 5.8 Analisi dei risultati: Compressione

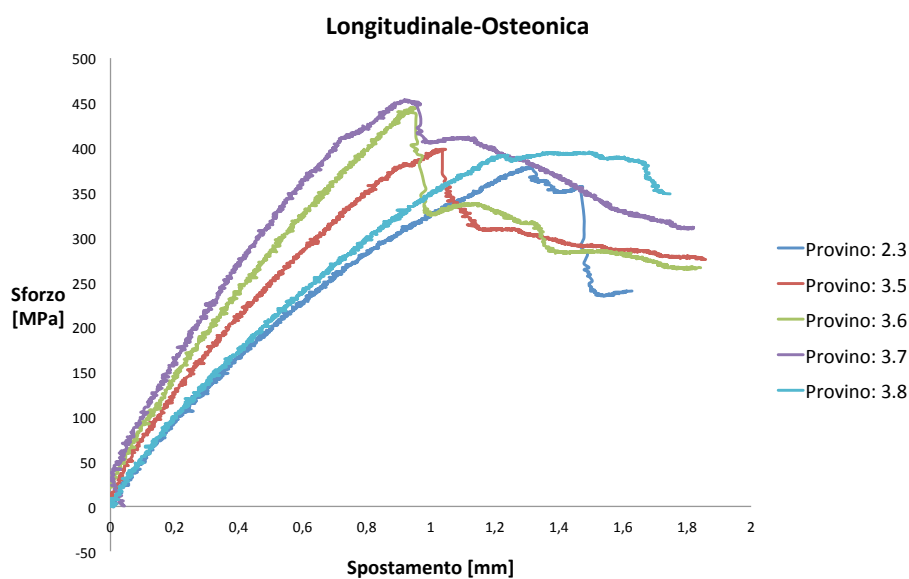
I test a compressione sono stati eseguiti su un totale di quindici provette di cui dieci a struttura osteonica e cinque a organizzazione classica del rinforzo. Le prove, eseguite registrando la forza nel tempo, non sono state attrezzate per la misura della deformazione.

L'obiettivo dei test è di identificare il comportamento a compressione delle due strutture a confronto, evidenziando e comparando il carico massimo a rottura e i modi di cedimento.

La prova è stata eseguita senza un sistema di allineamento e per tale ragione i risultati sono da prendere come un'indicazione di massima.

### 5.8.1 Direzione longitudinale, struttura osteonica

Il primo campione analizzato è rappresentato da cinque provini con struttura osteonica orientata parallelamente alla direzione del test. Di seguito si riportano, le curve sforzo-spostamento registrate durante il test ed elaborate con Excel.



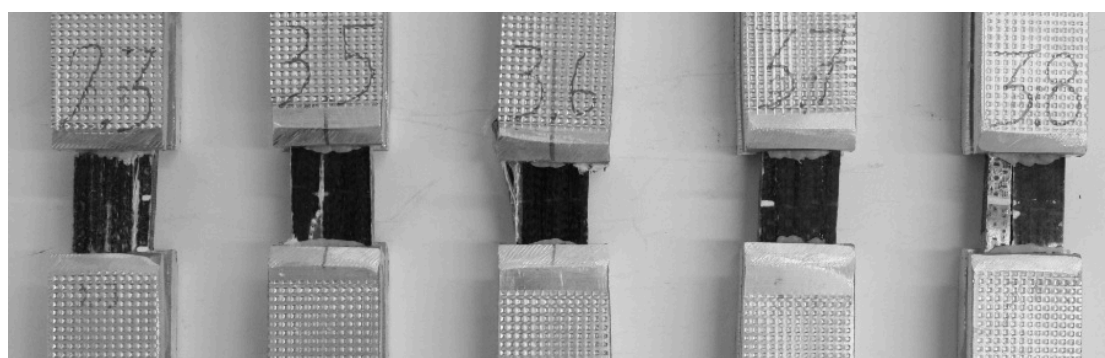
**Figura 5-36:** Curve di sforzo in funzione dello spostamento per il set di provini longitudinali testati a compressione. I risultati della prova sono piuttosto dispersi se paragonati ai test precedenti.

La ripetibilità dei test non è paragonabile a quella osservata nelle precedenti sperimentazioni. La causa principale è da ricondursi a problemi di allineamento. I test essendo stati effettuati senza l'ausilio di guide laterali non possono essere eseguiti controllando questo parametro.



Durante l'esecuzione dei test è stata rilevata una deformazione marcata in corrispondenza dei talloni (specialmente nei provini 2.3 e 3.8) che influenza la forma della curva sforzo-spostamento, da ritenersi quindi solo puramente indicativa. Come nei casi precedenti, la provetta proveniente dal piatto laminato 2 esibisce un comportamento meccanico inferiore rispetto al resto del campione. Tuttavia considerata la variabilità dei risultati, esso sarà comunque preso in considerazione nelle analisi che seguono.

Il valore massimo di resistenza a compressione vale circa 450 MPa, per una più completa analisi dei risultati si rimanda alla Tabella 5.20.



**Figura 5-37:** Provini al termine della prova. Il cedimento è avvenuto per scorrimento dei tubicini osteonici e le zone danneggiate appaiono come delle linee verticali bianche. Come si nota nei provini 3.5 e 3.7 l'afferraggio, talvolta, non è stato eseguito sull'intera lunghezza del tallone. Tale inconveniente ha sicuramente influenzato negativamente la ripetibilità delle prove

Osservando i provini al termine della prova si nota come la rottura avvenga in questo caso lungo l'asse dei tubi di carbonio. Come accade per l'osso umano la struttura è più facile da dividere che da rompere. Il fenomeno, che in inglese si indica con "splitting", in alcuni provini si è verificato tra osteoni interni mentre in altri su quelli esterni.

**Tabella 5-20:** Risultati dei test sperimentali per il set di provini longitudinali a struttura osteonica

Codice Provino	Spessore [mm]	Larghezza [mm]	Area Res [mm <sup>2</sup> ]	N° osteoni	Fc [N]	Rc [MPa]	Tipo rottura
2.3	4,99	14,52	72,52	2	27822	384	SGM*
3.5	4,91	15,22	74,70	2	29811	399	SGM*
3.6	4,80	14,49	69,52	2	31181	449	SGL**
3.7	4,72	15,06	71,02	3	32206	453	SGR***
3.8	4,66	14,97	69,79	3	27572	395	SGM*

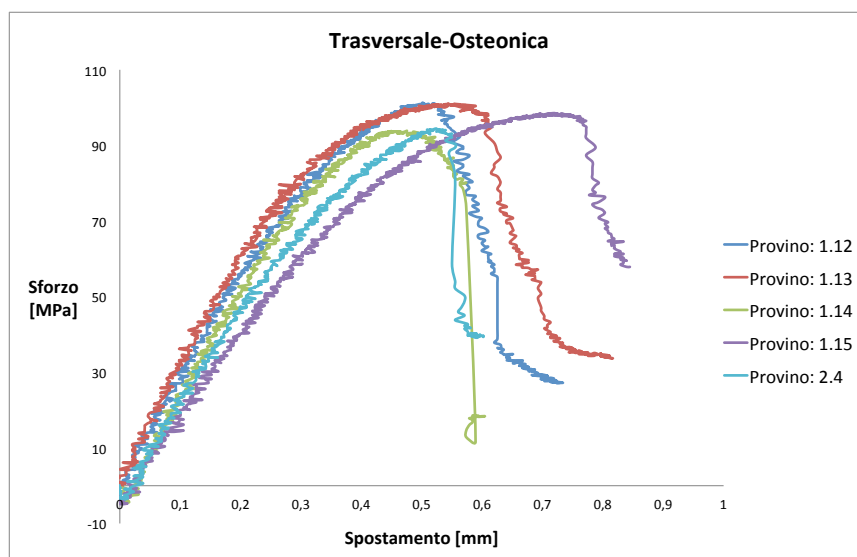
\*SGM: long Splitting, Gage, Middle

\*\*SGL: long Splitting, Gage, Left

\*\*\*SGR: long Splitting, Gage, Right

### 5.8.2 Compressione trasversale struttura osteonica

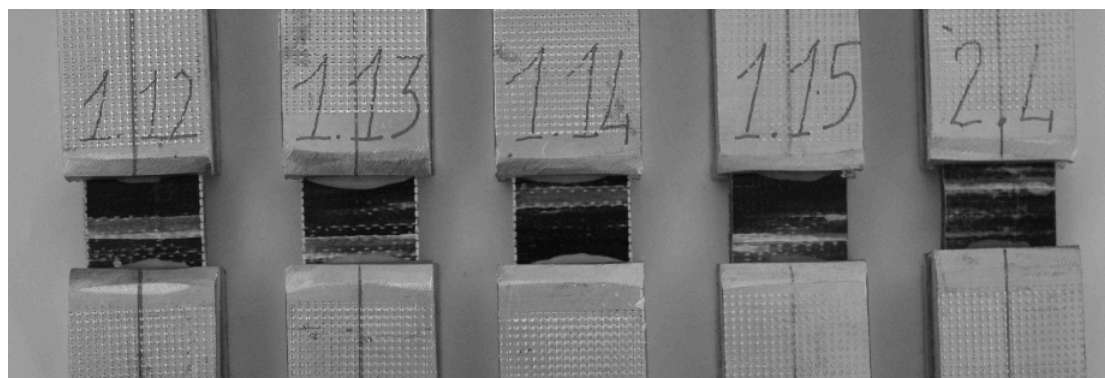
L'analisi delle proprietà a compressione in senso trasversale è stata eseguita su un campione di cinque provini, quattro provenienti dal laminato osteonico 1 e uno ricavato dal laminato 2 che anche in questo caso è stato preso in considerazione nelle analisi.



**Figura 5-38:** Curve di sforzo per il set di provini trasversali. Sono evidenti i fenomeni di instabilità legati alla modalità di carico. La prova è caratterizzata dalla deformazione dei talloni come si evince osservando il tratto finale delle curve

Lo sforzo massimo di compressione, misurato nei test, vale circa 104MPa ed è circa quattro volte inferiore rispetto a quello determinato in configurazione longitudinale. Dunque, il comportamento della struttura a compressione, è meno anisotropo di quanto invece osservato per flessione e trazione. I dati dell'intero campione possono essere consultati nella [Tabella 5.21](#).

Osservando le curve di sforzo in funzione dello spostamento in [figura 5.38](#) è evidente il fenomeno di instabilità che interessa l'intera campagna sperimentale a compressione.



**Figura 5-39:** Provini al termine della prova. Evidenti le tracce delle rotture infra-osteoniche

L'analisi delle aree danneggiate permette di identificare il tipo di rottura che avviene sulla superficie esterna tra osteoni adiacenti e propaga in direzione parallela all'asse dell'osteone attraverso lo spessore. La frattura si localizza talvolta in basso talvolta in alto o al centro ma comunque sempre all'interno del tratto utile.

**Tabella 5-21:** Risultati dei test sperimentali per il set di provini trasversali a struttura osteonica

Codice Provino	Spessore [mm]	Larghezza [mm]	Area Res [mm <sup>2</sup> ]	Fc [N]	Rc [MPa]	Tipo rottura
1.12	4,3	24,35	104,61	10656	102	TGM
1.13	4,31	24	103,45	10648	103	TAB
1.14	4,29	24,31	104,36	10251	98	TAT
1.15	4,33	24,37	105,46	10915	104	TAB
2.4	4,82	23,42	112,82	11087	98	TAT

\*TGM: Transverse shear, Gage, Middle

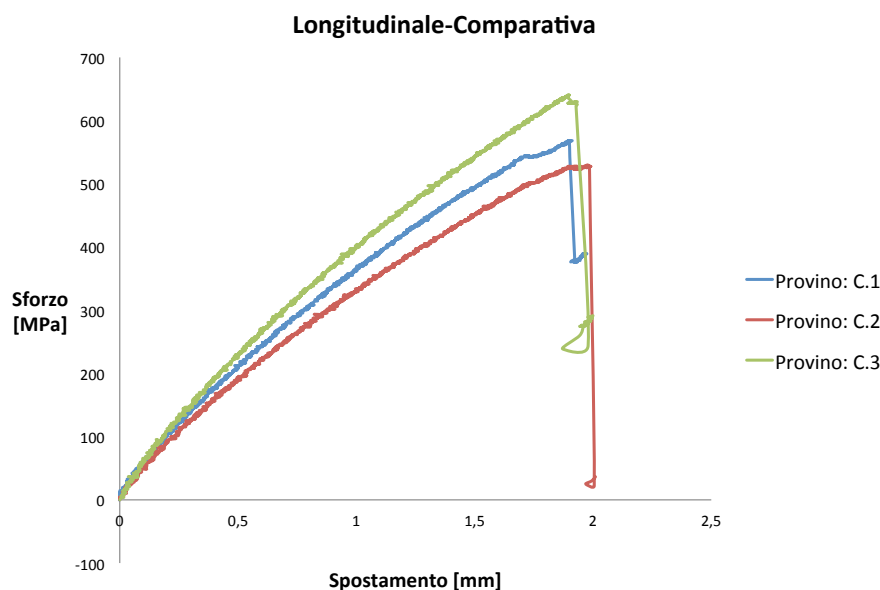
\*\*TAB: Transverse shear, At grip/tab, Bottom

\*\*\*TAT: Transverse shear, At grip/tab, Top

### 5.8.3 Compressione longitudinale struttura comparativa

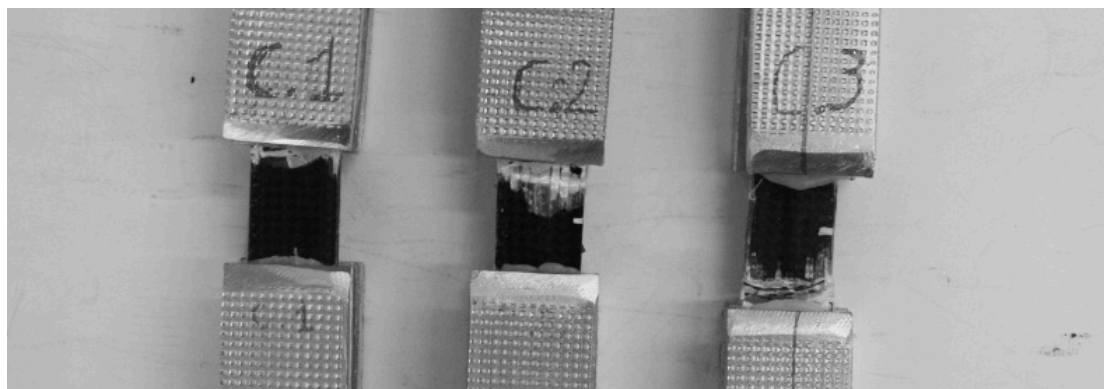
Il set di provini usati per i test di compressione longitudinale della struttura comparativa consta di tre provette.

Sulla base dell'esperienza maturata, è stato risolto il problema legato alla deformazione del tallone. Tutte le prove sono quindi state portate a termine senza problematiche particolari.



**Figura 5-40:** Curve di sforzo in funzione dello spostamento della traversa per i provini longitudinali del laminato classico. Il comportamento è circa lineare fino alla rottura

L'andamento dello sforzo in funzione dello spostamento è all'incirca lineare sino alla rottura che avviene in modo fragile per spostamento della traversa prossimo ai 2mm e valore dello sforzo di circa 600 MPa. I risultati dell'intero campione sono consultabili nella [Tabella 5.22](#).



**Figura 5-41:** I provini rotti al termine dei test. Come si può notare tutte le prove hanno prodotto rotture in prossimità del tallone

Le zone di rottura sono localizzate sempre alle estremità del tratto utile del provino in corrispondenza della parte terminale dei talloni. La frattura propaga tra lo spessore ed è orizzontale rispetto alla larghezza della provetta.

**Tabella 5-22:** Risultati dei test sperimentali per il set di provini longitudinali a struttura classica

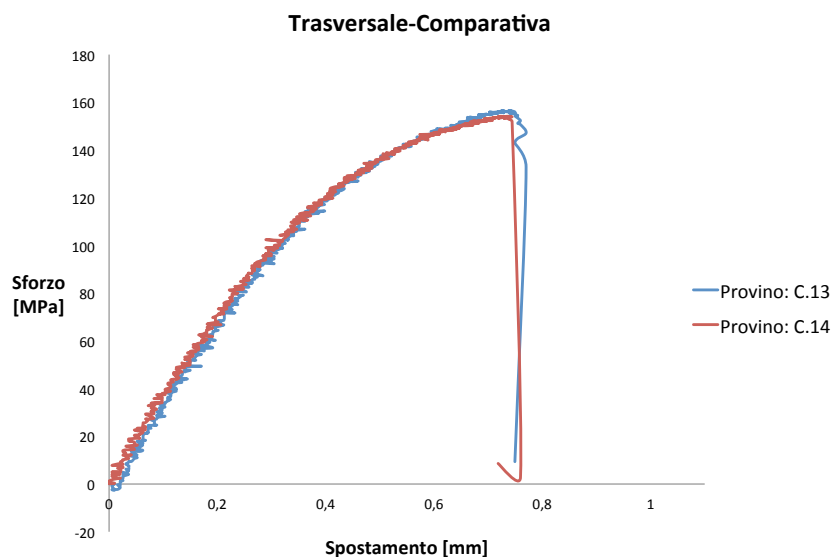
Codice Provino	Spessore [mm]	Larghezza [mm]	Area Res [mm <sup>2</sup> ]	Fc [N]	Rc [MPa]	Tipo rottura
C.1	4,62	14,8	68,44	38906	568	DAT*
C.2	4,45	14,53	64,6	34195	529	DAT*
C.3	4,59	14,76	67,8	43704	645	BAB**

\*DAT: Delamination, At grip/tab, Top

\*\*BAB: Brooming, At grip/tab, Bottom

### 5.8.4 Compressione trasversale struttura comparativa

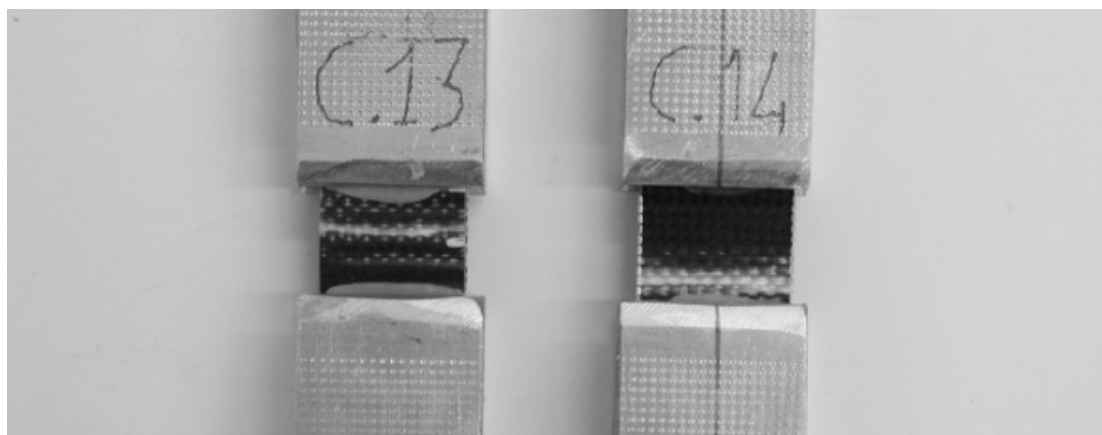
L'ultimo set di provini è impiegato per definire il comportamento a compressione del laminato a struttura classica disposto trasversalmente rispetto alla direzione del test. Anche in questa configurazione si ripresentano i fenomeni d'instabilità già evidenziati nei precedenti test.



**Figura 5-42:** Andamento dello sforzo in funzione dello spostamento della traversa per il set di provini trasversali. Anche in questo caso sono evidenti i fenomeni di instabilità legati alla modalità di prova

Lo sforzo massimo misurato vale 159 MPa corrispondente ad uno spostamento della traversa di circa 0,78 mm. L'andamento dello sforzo in funzione dello spostamento è lineare solo nelle fasi iniziali.

I test effettuati denotano un ottima ripetibilità della prova anche se il campione consta solo di due unità.



**Figura 5-43:** Provette al termine della prova. Evidenti le aree danneggiate

Analizzando le aree danneggiate al termine della prova si nota che la frattura orizzontale si estende tra lo spessore della provetta ed è localizzata nel tratto utile del provino (Figura 5.43).

*Tabella 5-23: Risultati dei test sperimentali per il set di provini trasversali a struttura classica*

Codice Provino	Spessore [mm]	Larghezza [mm]	Area Res [mm <sup>2</sup> ]	F <sub>c</sub> [N]	R <sub>c</sub> [MPa]	Tipo rottura
C.13	4,06	23,84	96,87	15419	159	HAM*
C.14	4,17	24,94	103,93	16048	154	HAB**

\*HAM: *t*Hrough thickness, At grip/tab, Middle

\*\*HAB: *t*Hrough thickness, At grip/tab, Bottom

### 5.8.5 Confronto dei risultati

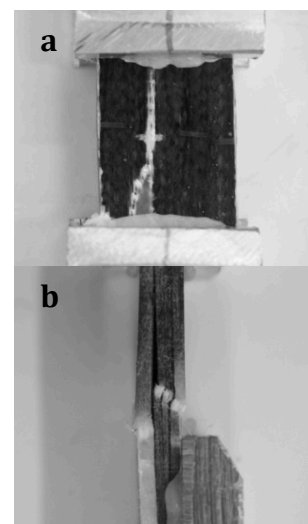
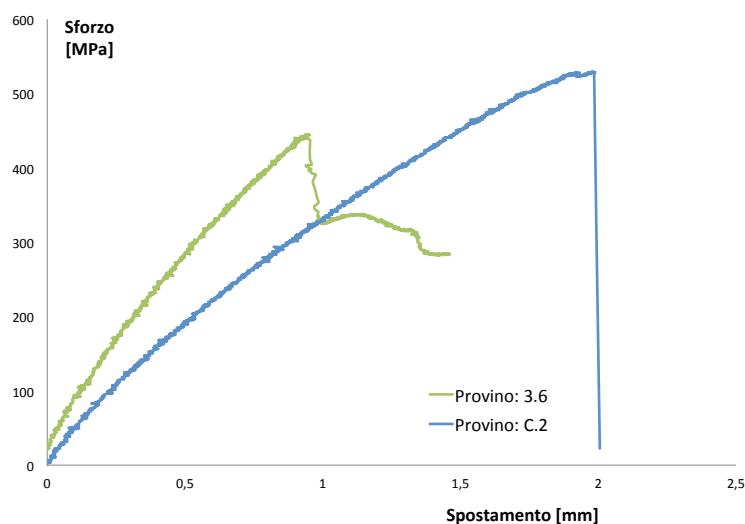
I test per la caratterizzazione a compressione del laminato osteonico, hanno messo in evidenza proprietà inaspettate.

Al contrario delle caratteristiche flessionali e tensili, che in direzione parallela alla struttura osteonica si erano dimostrate superiori per il composito bio ispirato, in compressione l'organizzazione classica del rinforzo si afferma come l'organizzazione più resistente in entrambe le direzioni analizzate.

Lo sforzo medio a rottura per il laminato comparativo, con un valore pari a 581 MPa è del 30% superiore rispetto al laminato osteonico per cui è stato stimato un valor medio della resistenza pari a 416 MPa.

Tale differenza è legata al tipo di cedimento del materiale. La disunione dei manicotti di carbonio che giocava un ruolo positivo nel caso di flessione e trazione in questo caso rappresenta una fonte d'indebolimento anche nel caso di sollecitazioni in asse con l'osteone. Infatti, i singoli tubi sono più facilmente portati allo scorrimento, rispetto a quanto invece non accade per il tessuto piano della configurazione classica.

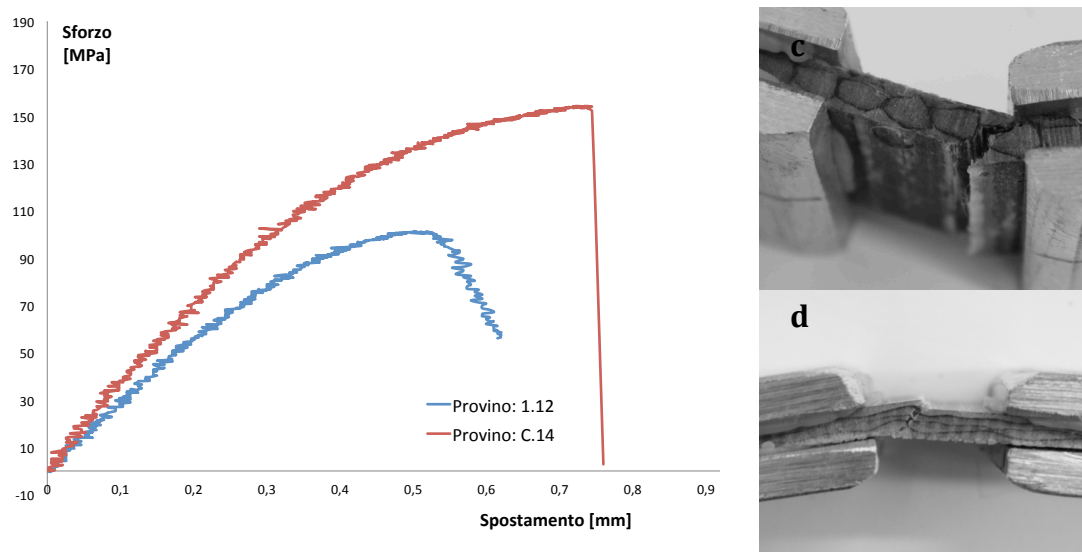
Osservando le pendenze delle curve di sforzo a confronto tra loro è possibile però constatare che la rigidità del laminato osteonico è almeno qualitativamente superiore a quella della struttura classica di confronto.



**Figura 5-44:** Confronto grafico del comportamento a flessione tra la struttura classica (blu) e quella osteonica (verde), entrambe in configurazione trasversale. A destra le zone di rottura. c) struttura osteonica d) struttura classica

Analoghi risultati sono stati osservati nella direzione trasversale per la quale si è calcolato un valore medio di sforzo limite pari a 157 MPa in configurazione classica e 101 MPa per il laminato osteonico, che anche in questa direzione perde nel confronto. Risultati più completi sono riportati nella [Tabella 5.24](#).





**Figura 5-45:** Confronto grafico del comportamento a flessione tra la struttura classica (rosso) e quella osteonica (blu), entrambe in configurazione trasversale. A destra le zone di rottura. c) struttura osteonica d) struttura classica

Si vuole ripetere, per chiarezza, che i test di compressione sono stati effettuati senza il sistema guida utile per migliorare gli allineamenti e senza strumenti atti di misura per le deformazioni. Non è stato quindi possibile identificare e riportare eventuali problematiche dovute a rotture instabili come il fenomeno del “buckling”.

I risultati ottenuti sono dunque da ritenersi non idonei per conclusioni forti circa il comportamento a compressione della struttura osteonica per la quale i disallineamenti potrebbero aver giocato un ruolo chiave sulle caratteristiche meccaniche misurate.

**Tabella 5-24:** Confronto dei risultati ottenuti

Direzione del test	Tipo Struttura	N° provette	Rc medio [MPa]	Dev standard [MPa]	CV	Tipo rottura
Longitudinale	Osteonica	5	416	32,5	7,8 %	SGM*
	Comparativa	3	581	47,8	8,2 %	DAT**
Trasversale	Osteonica	5	101	2,3	2,2%	TGM***
	Comparativa	2	157	2,38	1,5 %	HAM****

\*SGM: long Splitting, Gage, Middle

\*\*DAT: Delamination, At grip/tab, Top

\*\*\*TGM: Transverse shear, Gage, Middle

\*\*\*\*HAM: tHrough thickness, At grip/tab, Middle

## Conclusioni

### Risultati sperimentali:

La struttura osteonica, oggetto del presente lavoro, ha evidenziato un comportamento meccanico differente rispetto a quello del laminato tradizionale usato per il confronto. Le ragioni sono esclusivamente legate alla diversa configurazione delle fibre interne.

In termini di resistenza statica il nuovo composito ha evidenziato eccellenti caratteristiche nella direzione parallela alle fibre osteoniche. Con 880 MPa di sforzo limite a flessione si è registrato un incremento prestazionale del 12,5% rispetto alla configurazione tradizionale del rinforzo.

I test di trazione hanno confermato tale tendenza e con una resistenza in direzione degli osteoni di quasi 800 MPa il nuovo laminato si afferma del 40% più resistente.

**Tabella C.1:** Caratteristiche di resistenza a confronto

Direzione del test	Tipo Struttura	Resistenza a Flessione [MPa]	Resistenza a Trazione [MPa]	Resistenza a Compressione [MPa]
Longitudinale	Osteonica	880 (+12,5%)	797 (+40%)	416 (-29%)
	Comparativa	782	568	581
Trasversale	Osteonica	59 (-63%)	28 (-57%)	101 (-35%)
	Comparativa	156	65	157

Risultati analoghi sono stati ottenuti anche a proposito della rigidezza che è il 40% maggiore per il laminato bio ispirato con un valore medio pari a 46964 MPa.

**Tabella C.2:** Rigidezze a confronto

Direzione del test	Tipo Struttura	Rigidezza a Flessione [MPa]	Rigidezza a Trazione [MPa]	Rigidezza a Compressione [MPa]
Longitudinale	Osteonica	44296 (+43%)	46864 (+41%)	↑
	Comparativa	31108	33245	↓
Trasversale	Osteonica	10585(-37%)	14558 (+17,7%)	↓
	Comparativa	14583	12366	↑

Alla superiorità longitudinale si contrappone una riduzione delle proprietà in direzione trasversale. In tale configurazione, il laminato di confronto si afferma in ogni prova come il materiale largamente più resistente. Si rimanda alle Tabelle C.2 C.3 per il confronto completo.

La struttura tubolare ha quindi effetti positivi sia sulla resistenza sia sul modulo di Young nella direzione delle fibre, a cui si accompagna una riduzione drastica delle caratteristiche meccaniche in direzione trasversale. A titolo esemplificativo si fa notare che la resistenza a trazione in direzione longitudinale è ben 28 volte superiore rispetto a quella trasversale mentre per il laminato classico il rapporto tra i valori massimi si limita a 9. Tale analisi, permette di concludere che la struttura osteonica conferisce al laminato caratteristiche marcatamente anisotrope come mostrato in Tabella C.3.

**Tabella C.3:** Grado di anisotropia

Tipo Struttura	Flessione [MPa]		Trazione [MPa]		Compressione [MPa]	
	$\sigma_f$	$E_f$	$\sigma_t$	$E_t$	$\sigma_c$	$E_c$
Osteonica	15	4	28	3	4	-
Comparativa	5	2	9	3	4	-

Un fenomeno particolarmente interessante è stato osservato nelle prove di trazione e di flessione in configurazione longitudinale del rinforzo.

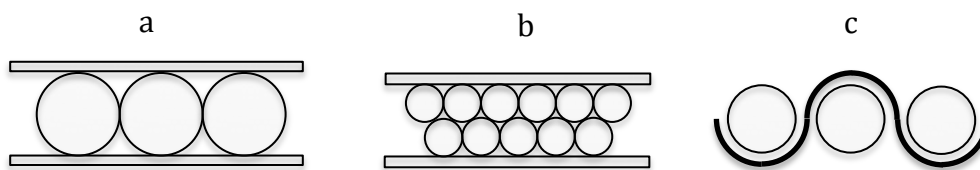
Si è notato che in tali condizioni, il materiale, prima del cedimento, presenta una sequenza di danneggiamento non catastrofica che avvisa, per così dire, dell'imminenza della rottura. Tale sequenza è strettamente correlata al numero dei tubi osteonici, i quali durante il danneggiamento cedono in modo indipendente uno dall'altro. Infatti, la disunione dei tessuti fa sì che il cedimento che interessa un elemento non propaghi istantaneamente su quelli adiacenti.

### Possibili sviluppi e miglioramenti:

La maggiore pecca della struttura è rappresentata dall'assenza di elementi fibrosi che limitano lo scorrimento trasversale degli elementi osteonici, liberi di scorrere l'uno su l'altro. Tale mancanza si traduce in un comportamento meccanico in direzione trasversale veramente scadente. Sviluppi della struttura devono seguire tale necessità, potenziando sistemi di collegamento che permettano al materiale di ridurre la debolezza trasversale.

Una possibile soluzione è data dallo svolgimento di uno strato fibroso in modo tale da abbracciare e vincolare lo scorrimento trasversale dei tubi osteonici.

Un miglioramento semplice e consistente può essere ottenuto riducendo il diametro dei manicotti di fibre intrecciate, tale soluzione consentirebbe di ridurre lo spessore del laminato finale e/o introdurre più file osteoniche sovrapposte. Altre soluzioni possibili sono comunque da valutare.



**Figura C.1:** Soluzioni, sviluppi, miglioramenti possibili. a) Schema della struttura bio-ispirata del presente lavoro, b) Soluzione a multi strato, riduzione del diametro dei manicotti, c) Soluzione di collegamento tra i manicotti osteonici, in nero lo strato avvolto.

Si auspicano, nel per il futuro, nuove indagini sulle proprietà meccaniche della struttura. Ad esempio potrebbero essere eseguite prove statiche interrotte per confermare le ipotesi di danneggiamento esposte nel presente lavoro di tesi. Un'ulteriore analisi potrebbe essere condotta sul comportamento a fatica per ed evidenziare l'effetto ipotizzato della deflessione della frattura caratteristica osservata nell'osso umano.

## Bibliografia:

- [1] Amilton Arruda, Tesi di dottorato: "Bionic Basic, Verso un nuovo modello di ricerca progettuale", pp 12-14, 22
- [2] CLAAS VISION, "The Magazine for Harvesting Specialists", Edizione nr. 25
- [3] Immagine da:  
[http://it.wikipedia.org/wiki/Materiale\\_composito](http://it.wikipedia.org/wiki/Materiale_composito) 3.07.2012, 17:25
- [4] Espinosa HD et al. Merger of structure and material in nacre and bone – "Perspectives on de novo biomimetic materials", Prog Mater Sci (2009), doi:10.1016/j.pmatsci.2009.05.001
- [5] Immagine da:  
<http://www.york.ac.uk/res/bonefromblood/background/bonestructure.html>  
3.07.2012, 17:28
- [6] Tesi di dottorato, Ing. Concetta Gentile, "Resistenza a pressione interna di tubi in composito ottenuti per Filament Winding", Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione, UNIVERSITÀ DI NAPOLI FEDERICO II, pp 5-15
- [7] P.K. Mallick, "Fiber-reinforced composites Materials Manufacturing and Desig", Taylor & Francis Group, pp 22-44
- [8] A.Hammami and B.R. Gebart, "Analysis of the Vacuum Infusion Molding Process", Mechanical Engineering Department, Luelà University of Technology, Sweeden
- [9] Autore non identificato, "Vacuum Infusion - The Equipment and Process of Resin Infusion"
- [10] C.E. Harris, J.H. Starnes, Jr., and M.J. Shuart, Design and manufacturing of aerospace composite structures, state-of-the-art assessment, J. Aircraft, 39:545 (2002).

- [11] C. Soutis, Carbon fiber reinforced plastics in aircraft applications, Mater. Sci. Eng., A, 412:171 (2005).
- [12] J.V. Noyes, Composites in the construction of the Lear Fan 2100 aircraft, Composites, 14:129 (1983).
- [13] R.L. Pinckney, Helicopter rotor blades, Appl. Composite Mat., ASTM STP, 524:108 (1973).
- [14] P. Beardmore, Composite structures for automobiles, Compos. Struct., 5:163 (1986).
- [15] G. Savage, Composite materials in Formula 1 racing, Metals Mater, 7:617 (1991).
- [16] Immagine da:  
[http://www.atuttascuola.it/tecno/roma/apparato\\_scheletrico.htm](http://www.atuttascuola.it/tecno/roma/apparato_scheletrico.htm) 3.07.2012, 17:35
- [17] Immagine da:  
<http://www.highlands.edu/academics/divisions/scipe/biology/faculty/harden/2121/images/femur.jpg>  
<http://www.apatech.com/lib/images/135728-femurbone.jpg>  
3.07.2012, 17:50
- [18] BME/ME 456 Biomechanics, Michigan Engineering  
<http://www.engin.umich.edu/class/bme456/bonestructure/bonestructure.htm>
- [19] Immagine da:  
<http://origin-ars.sciencedirect.com/content/image/1-s2.0-S0021929099001141-gr1.jpg> 3.07.2012, 18:50
- [20] Immagine da:  
[http://people.unipmn.it/pons/index\\_file/imm%20app%20scheletrico/osteone.JPG](http://people.unipmn.it/pons/index_file/imm%20app%20scheletrico/osteone.JPG) 3.07.2012, 19:50
- [21] Immagine da:  
[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/93/Fibers\\_of\\_Collagen\\_Type\\_I\\_-\\_TEM.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/93/Fibers_of_Collagen_Type_I_-_TEM.jpg) 3.07.2012, 20:50

- [22] Immagine da:  
<http://www.biomechanism.com/wp-content/uploads/2011/05/> 3.07.2012,  
20:55
- [23] Maximilien E. Launey, Markus J. Buehler, and Robert O. Ritchie  
*"On the Mechanistic Origins of Toughness in Bone"*;
- [24] Robert O. Ritchie, Markus J. Buehler, and Paul Hansma, *"Plasticity and toughness in bone"*
- [25] R. K. Nalla et al., *Mater. Sci. Eng. C* 26, 1251 (2006).
- [26] R. K. Nalla, J. H. Kinney, R. O. Ritchie, *Nat. Mater.* 2, 164 (2003);  
K. J. Koester, J. W. Ager III, R. O. Ritchie, *Nat. Mater.* 7, 672 (2008).
- [27] <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/bones/prereqs.php>