

# Indice

<u>Introduzione</u>	<u>3</u>
<u>1.Le fibre di vetro cave</u>	<u>5</u>
<u>1.1.Vetro cavo e fibre di vetro cave</u>	<u>5</u>
<u>1.2.Produzione fibre di vetro cave</u>	<u>6</u>
<u>1.3.Importanza dei parametri di fabbricazione nella produzione delle fibre di vetro cave</u>	<u>10</u>
<u>2.Proprietà meccaniche delle fibre di vetro cave nei compositi</u>	<u>15</u>
<u>2.1.Generalità sui compositi rinforzati con fibre di vetro cave</u>	<u>15</u>
<u>2.2.Resistenza a trazione per compositi rinforzati con fibre di vetro cave e influenza dei parametri di produzione su tale grandezza</u>	<u>18</u>
<u>2.3.Resistenza a flessione per compositi rinforzati con fibre di vetro cave</u>	<u>20</u>
<u>2.4.Resistenza a compressione per compositi rinforzati con fibre di vetro cave</u>	<u>22</u>
<u>2.4.1.Compressione assiale</u>	<u>22</u>
<u>2.4.2.Compressione trasversale (test di impatto)</u>	<u>27</u>
<u>3.Applicazioni dei compositi rinforzati con fibre di vetro cave</u>	<u>29</u>
<u>3.1.Meccanismo di auto riparazione e aumento della visibilità del danno nelle fibre di vetro cave</u>	<u>29</u>
<u>3.2.Utilizzo delle fibre di vetro cave e dei relativi compositi</u>	<u>32</u>
<u>Conclusione</u>	<u>35</u>
<u>Bibliografia</u>	<u>39</u>



# Introduzione

L'utilizzo di materiali compositi al giorno d'oggi è relegato ad un ristretto numero di applicazioni. La maggior parte dei prodotti fabbricati, siano essi componenti strutturali o di altro tipo, sono solitamente realizzati in materiali metallici, soprattutto in acciaio. Ciò deriva dal fatto che questi elementi forniscono al pezzo delle elevate proprietà meccaniche unite ad una caratteristica che ad oggi è sempre più importante: il basso costo. Tuttavia anche questi elementi hanno dalla loro dei consistenti svantaggi; il principale è senz'altro l'elevata densità e ciò si traduce in un peso considerevole del pezzo finito. Per questo motivo tali materiali non sono gli unici ad essere sviluppati e prodotti, anzi, in ambiti particolari, dove le prestazioni sono più importanti del risparmio economico, si utilizzano esclusivamente materiali compositi che, se ben studiati, offrono resistenze meccaniche paragonabili a quelle dei metalli ma un peso decisamente più contenuto. È facile capire quindi perché in questi ultimi anni hanno trovato un utilizzo sempre maggiore i compositi fibrorinforzati.

In questo elaborato andremo ad analizzare una tipologia particolare di tali materiali: compositi rinforzati con fibre di vetro cave. La loro produzione si è sviluppata nel tempo ma il concetto di base della fabbricazione è rimasto lo stesso; ad oggi infatti il metodo di produzione più comune prevede la trafilatura di un preformato tubolare, riscaldato, fino al raggiungimento dei diametri richiesti (interno ed esterno). Il meccanismo con il quale avviene il passaggio da preformato tubolare a fibra cava è regolato principalmente da tre parametri di fabbricazione, collegati e dipendenti tra loro, ossia: velocità di avanzamento del preformato, temperatura della fornace e velocità di trafilatura. Regolando questi fattori è possibile ottenere dei filamenti continui con dimensioni prestabilite, sia per quanto riguarda il diametro esterno, sia per il rapporto di cavità della fibra stessa, in quanto questi parametri interagiscono con il coefficiente di viscosità del vetro, modificandolo.

Un discorso più approfondito verrà fatto per parlare delle proprietà meccaniche di tali fibre, comparando le prestazioni di quelle cave rispetto alle controparti piene. Analizzando diverse prove svolte da ricercatori universitari, si potranno notare le caratteristiche di questi materiali oltre a capire vantaggi e svantaggi nell'utilizzo degli stessi. Saranno esaminate le resistenze a trazione, flessione e compressione oltre ad un nuovo meccanismo sviluppato negli ultimi anni. Esso consente, tramite l'inserimento nella cavità delle fibre di una resina curativa che fuoriesce il caso di frattura di quest'ultime, un'auto-riparazione delle stesse, dopo aver subito delle lesioni causate

da un forte impatto, permettendo al materiale di riacquistare parte della resistenza persa dopo l'urto. Parallelamente allo studio per lo sviluppo di tale tecnologia è stato introdotto un metodo per aumentare la visibilità del danno all'interno del materiale. E' sufficiente unire alla resina curativa un colorante UV fluorescente che, in caso di crepa nelle fibre, fuoriesce ricoprendo la zona danneggiata, facilitando la localizzazione della stessa, oltre a determinarne l'estensione, tramite un visore ultravioletto o uno scanner ultrasonico.

Infine vedremo l'utilizzo di tali materiali in applicazioni odierne, osserveremo l'uso di tali compositi all'interno degli sci, e cercheremo di capire in quali ambiti vengono principalmente adottati, analizzando le motivazioni dell'impiego di questi materiali, oltre a descrivere ulteriori proprietà che essi offrono rispetto alle già citate prestazioni meccaniche.

# CAPITOLO 1

## Le fibre di vetro cave

### 1.1.Vetro cavo e fibre di vetro

Il vetro è un materiale molto utilizzato al giorno d'oggi in varie forme; i tipi di vetro principalmente prodotti sono il vetro piano e il vetro cavo. Di quest'ultimo possiamo distinguere diversi utilizzi, il principale è senz'altro l'utilizzo nel campo alimentare. In questo elaborato si andrà invece a analizzare i processi le proprietà e le applicazioni delle fibre di vetro cave utilizzate per la realizzazione di materiali compositi. Il vetro cavo si ottiene fondendo una miscela vetrificabile (prende il nome di fuso) e immettendola in particolari stampi diversificati in base al tipo di prodotto finale che si vuole ottenere. Il fuso viene poi soffiato per renderlo cavo facendolo aderire allo stampo; la quantità di fuso che viene immessa nello stampo è proporzionale alla dimensione dello stesso e allo spessore finale che dovrà avere il nostro prodotto.

Un diverso procedimento è previsto per le fibre di vetro. Quest'ultime, infatti, si ottengono tramite trafilatura del fuso, questo porta diversi vantaggi di prestazione. Innanzitutto le fibre sono molto leggere in quanto gli spessori caratteristici si attestano nell'ordine delle decine di micron, inoltre diverse esperienze hanno mostrato che ottenendo dei filati di spessore inferiore al decimo di millimetro la fibra di vetro perde la caratteristica più svantaggiosa del vetro solido: la fragilità. Si ottengono così fibre dalle elevate prestazioni meccaniche e con un alto valore di resilienza. La differenza principale nell'utilizzo di fibre di vetro e vetro cavo sta nel fatto che quest'ultimo può svolgere l'attività per la quale è stato concepito subito dopo la produzione (ovviamente non prima di eventuali trattamenti per rimuovere tensioni residui e piccoli difetti di produzione), le fibre di vetro invece sono utilizzate per la realizzazione di materiali compositi (solitamente accoppiate con materiali polimerici e non ceramici o metallici) ottenendo così una struttura che offre le migliori prestazioni dei materiali combinati e unendo quindi l'elevata duttilità e tenacità dei polimeri all'altissima resistenza meccanica delle fibre di vetro.

Una fibra di vetro cava (come dice il nome stesso) non è altro che un filamento di vetro con un vuoto al suo interno (una cavità) che conferisce ulteriore leggerezza alla fibra non indebolendo quella che è la sua resistenza meccanica, pur avendo una sezione resistente ridotta rispetto alla fibra di vetro piena.

## 1.2. Fibre di vetro cave e produzione

Come detto in precedenza le fibre di vetro cave altro non sono che filamenti di vetro con una cavità interna. Negli ultimi decenni sono stati sviluppati vari metodi per produrle. Uno dei primi metodi di fabbricazione fu brevettato da C.J. Stalego registrato nel 1962 e pubblicato nel 1966; questa tecnica si basava sul porre del vetro all'interno di un contenitore sagomato appositamente con diversi fori. Grazie all'alta velocità di rotazione, e riscaldando il vetro, la grande forza centrifuga che si creava dava il via a un processo di estrusione del vetro attraverso i fori creando dei filamenti di vetro che venivano poi raccolti in appositi rocchetti. Tale metodo però, pur funzionando egregiamente per la produzione di filamenti di vetro pieni, non riuscì a creare fibre di vetro cave continue.

Nov. 1, 1966 C. J. STALEGO ET AL 3,282,667  
METHOD OF MAKING HOLLOW GLASS FIBERS  
Filed Aug. 30, 1962 3 Sheets-Sheet 1

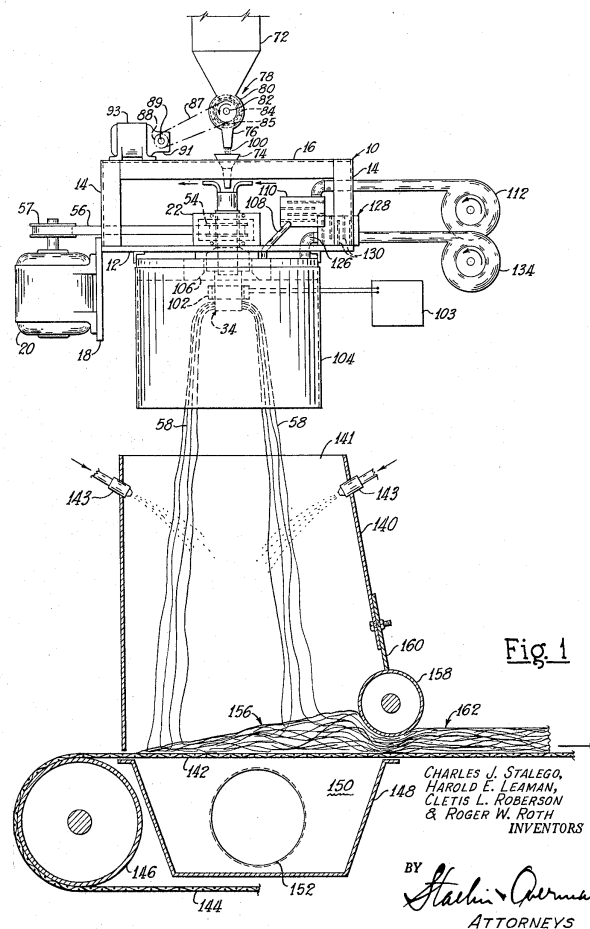


Fig. 1: Schema dell'impianto di produzione di fibre di vetro cave brevettato da C.J. Stalego.

Un'ulteriore tecnica di fabbricazione fu brevettata da J.A. Burgman nel 1965 e pubblicata nel 1966. Tale metodo prevedeva che il flusso di vetro riscaldato veniva fatto passare attraverso una boccola dotata di tanti ugelli; all'interno di questi si trovavano dei tubi rastremati nell'estremità contenenti gas in pressione. Una bobina di raccolta dei filamenti avvolgendosi esercitava la trazione sul vetro che uscendo dagli ugelli si assottigliava. Nel momento del passaggio del flusso vetroso il gas in pressione veniva fatto fuoriuscire mantenendo così una cavità all'interno del filamento. Si ottenevano così fibre continue di dimensione costante e con cavità concentriche.

Aug. 23, 1966 J. A. BURGMAN ET AL 3,268,313  
 METHOD AND APPARATUS FOR FORMING HOLLOW GLASS FIBERS  
 Original Filed Oct. 1, 1962 3 Sheets-Sheet 1

Aug. 23, 1966 J. A. BURGMAN ET AL 3,268,313  
 METHOD AND APPARATUS FOR FORMING HOLLOW GLASS FIBERS  
 Original Filed Oct. 1, 1962 3 Sheets-Sheet 2

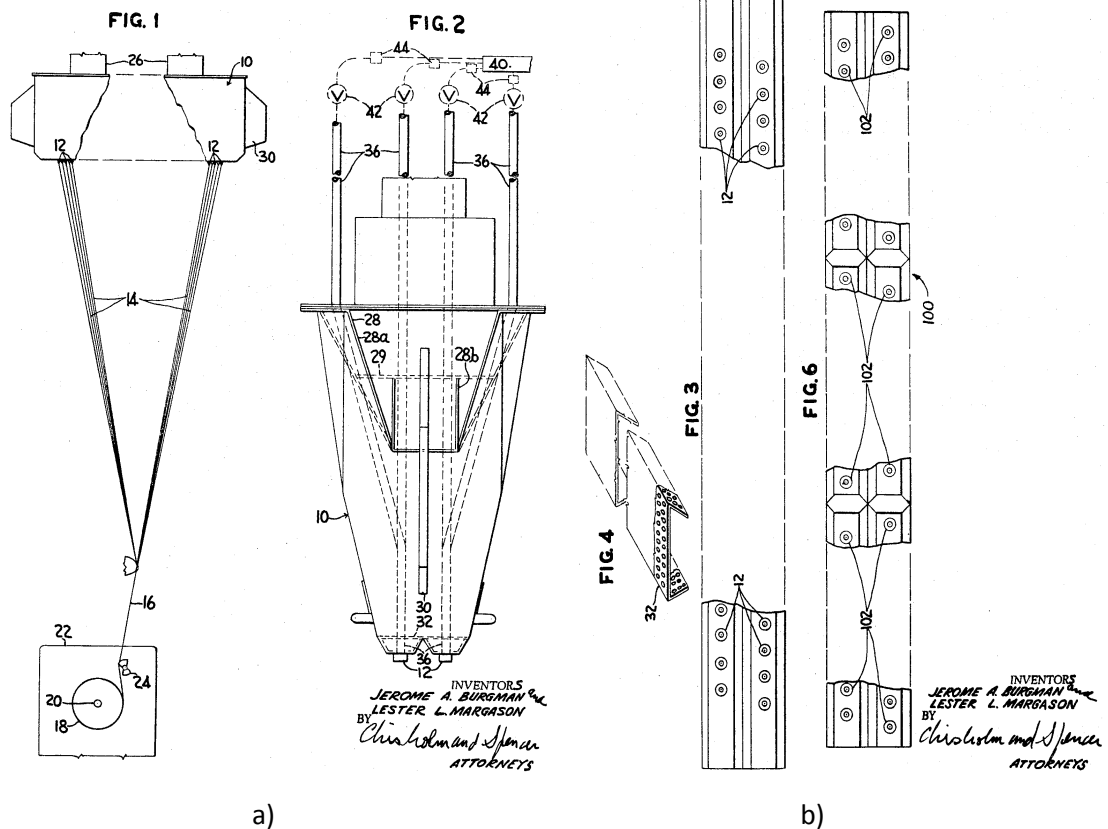
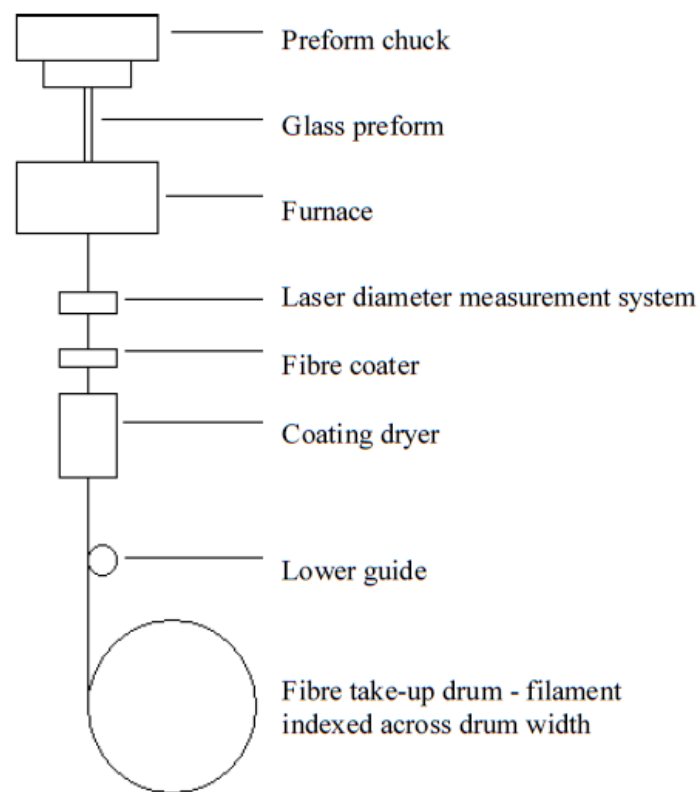


Fig.2: a) Schema dell'impianto di produzione di fibre di vetro cave brevettato da J.A. Burgman b) schema degli ugelli per formazione del filato.

Il metodo più recente per la produzione delle fibre di vetro cave prevede che quest'ultime vengano trafilate a partire da barre tubolari di vetro, solitamente borosilicato, di differenti diametri. Un impianto sperimentale di produzione di fibre di vetro cave è stato creato a Bristol da un lavoro di collaborazione tra l'Università di

Bristol e il DERA (Defence Evaluation and Research Agency) di Farnborough. L'impianto è descritto nella Fig.3.

Si osserva un tratto iniziale in cui il preformato di vetro viene immesso all'interno di un condotto, costituito da un elemento grafitico, e portato fino alla fornace. Qui il preformato viene riscaldato per aumentarne la lavorabilità per una più facile filatura (si abbassa la viscosità del vetro). La temperatura del forno viene controllata tramite un pirometro; esso svolge una duplice funzione, oltre a rilevare la temperatura della fornace fornisce anche un feedback per il controllo della stessa. Si ottiene così un filamento di vetro cavo che procede verso il basso subendo un'azione di tiraggio dall'avvolgimento del tamburo di raccolta delle fibre.

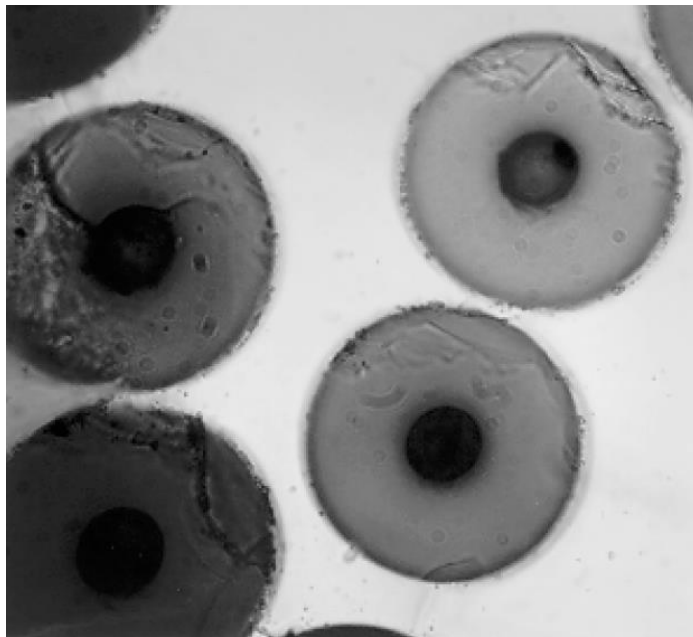


*Fig.3: Schema dell'impianto di produzione di fibre di vetro cave dell'Università di Bristol.*

Un sistema di misurazione laser controlla il diametro della fibra subito dopo la trafilatura, permettendo un'elevata precisione. Il filamento dopo il controllo passa all'interno di una vasca di rivestimento, dove un appretto (composto di agenti silani) riveste la fibra per minimizzare la contaminazione della superficie o eventuali danni, l'appretto inoltre evita che le fibre subiscano fenomeni di corrosione e abrasione reciproca oltre a migliorare l'aderenza che avrà la fibra con la futura matrice polimerica. Il tutto viene poi raccolto nel tamburo di avvolgimento; lo scopo di questa produzione è



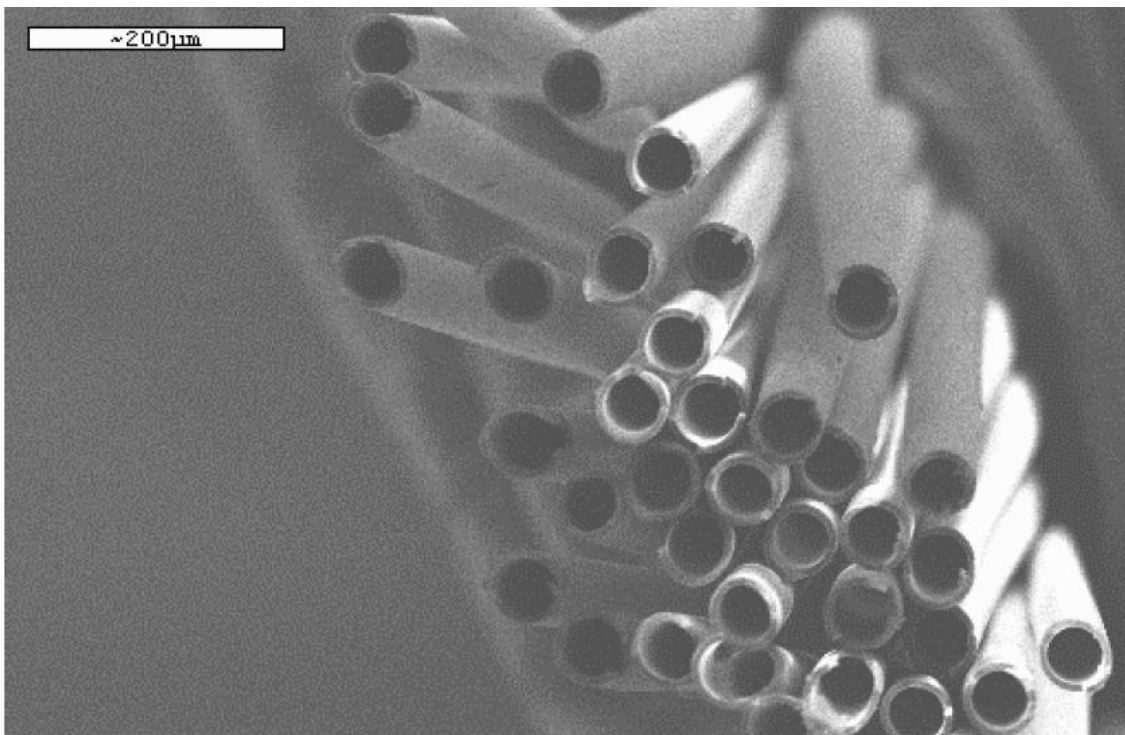
quello di ottenere un filamento di vetro cavo, continuo, consistente e concentrico. La struttura finale che si ottiene muta al variare di particolari parametri di fabbricazione; è così possibile ottenere fibre di diametri differenti con diverse frazioni di cavità. Attualmente è in sviluppo un sistema basato sul controllo dei metodi di misurazione tramite PC. Questo sistema consentirà di monitorare e registrare i suddetti parametri per gestire al meglio le dimensioni delle fibre ottenute alla fine del processo di produzione. L'obiettivo della produzione di tali fibre è quello di ottenere dei filamenti di diametro esterno sempre più ridotto ma con un elevato rapporto di cavità.



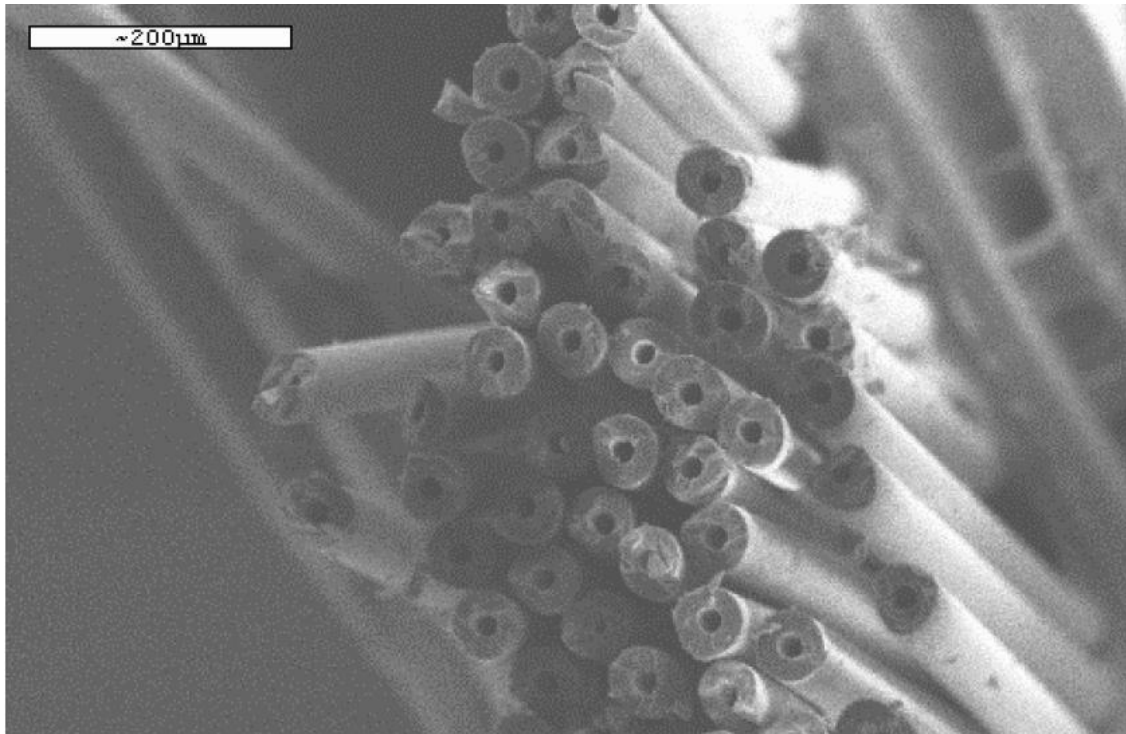
*Fig.4: Vista di sezioni di fibre di vetro cave usando un microscopio ottico.*

### 1.3.Importanza dei parametri di fabbricazione nella produzione di fibre di vetro cave

Durante il processo di produzione di un filamento cavo di vetro è possibile controllare alcuni parametri che svolgono un ruolo fondamentale nella struttura finale della fibra. Com'è emerso dallo studio di M.J. Hucker e I.P.Bond descritto nell'articolo "Optimisation of hollow glass fibres and their composites" del 1999 tramite il controllo della velocità di avanzamento del preformato, della velocità di trafilatura (data dalla velocità di rotazione del tamburo di avvolgimento) e della temperatura del forno si riescono a produrre fibre con diversi diametri esterni e differenti frazioni di cavità. Partendo quindi da un preformato di data dimensione (ad es. diametro esterno  $D$  e diametro interno  $d$ ) si possono ricavare fibre con lo stesso diametro finale ( $D_1$ ) ma con diverso rapporto di cavità ( $K^2 = \frac{d^2}{D^2}$ ), ossia diverso diametro interno ( $d_1$ ), modificando appropriatamente i parametri di lavorazione appena descritti. Questo è visibile in Fig.5 e Fig.6 in cui osserviamo un fascio di fibre di vetro cave ottenute tramite trafilatura dello stesso preformato, un tubo di vetro con diametro esterno di 18mm e diametro interno di 15.3mm. Ciò che cambia nelle fibre delle due immagini è la temperatura del forno con il quale sono state prodotte; nel primo caso la temperatura di fabbricazione è di 1400°C, mentre nel secondo caso è di 1580°C.



*Fig.5: Micrografia di un fascio di fibre di vetro cave di diametro esterno 55µm con cavità pari al 55%.*



*Fig.6: Micrografia di un fascio di fibre di vetro cave di diametro esterno  $54\mu\text{m}$  con cavità pari al 11%.*

Si nota che pur partendo dallo stesso preformato risultano due fasci di fibre che hanno quasi lo stesso diametro esterno ma un rapporto di cavità completamente diverso. Per capire come viene influenzata la struttura dai parametri di fabbricazione, durante lo studio in esame sono stati prodotti diversi fasci di fibre di vetro a partire da preformati diversi. La prima cosa che si osserva è un'inevitabile riduzione della frazione di cavità,  $K^2$ , che si rileva in qualsiasi processo di produzione di fibre di vetro cave, indipendentemente dalle dimensioni del tubo di partenza, come si evince dalla Tab.1. In tale tabella vengono descritti i dettagli e le dimensioni dei vari preformati (OD= diametro esterno, ID= diametro interno) e delle relative fibre nonché i parametri utilizzati per produrle (Draw rate= velocità di trafilatura, Feed rate= velocità di avanzamento del preformato nel forno).

Preform OD / ID (mm)	Preform K <sup>2</sup> ratio (%)	Fibre OD (µm)	Fibre ID (µm)	Fibre K <sup>2</sup> ratio (%)	Fibre K <sup>2</sup> / Preform K <sup>2</sup>	Draw rate (ms <sup>-1</sup> )	Feed rate (mms <sup>-1</sup> )	Temp (°C)
18/12.5	48.2	105.0	68.0	41.9	0.85	0.67	0.0500	1400
18/12.5	48.2	70.0	47.0	45.1	0.91	1.47	0.0250	1460
18/12.5	48.2	40.0	20.0	25.0	0.51	4.1	0.0125	1480
18/15.3	72.3	45.0	32.0	50.6	0.70	1.08	0.0125	1480
18/15.3	72.3	55.0	40.9	55.2	0.76	0.94	0.0125	1400
18/15.3	72.3	53.6	17.7	10.8	0.15	0.52	0.0125	1580
18/15.3	72.3	28.3	9.5	11.3	0.16	1.42	0.0125	1580
18/15.3	72.3	25.4	7.4	8.5	0.12	1.96	0.0125	1580
18/15.3	72.3	19.5	6.8	12.2	0.17	2.77	0.0125	1580

Tab. 1: Dettagli delle fibre di vetro prodotte durante lo studio di M.J. Hucker e I.P.Bond.

Dalla tabella si osserva inoltre che all'aumentare della velocità di trafilatura il diametro esterno della fibra subisce una contrazione maggiore, a parità di temperatura, mentre al diminuire di quest'ultima il rapporto di cavità della fibra tenderà a crescere.

M.J. Hucker e I.P.Bond riportarono i dati ottenuti nel loro studio all'interno di un grafico ottenendo quello che è possibile osservare in Fig.7.

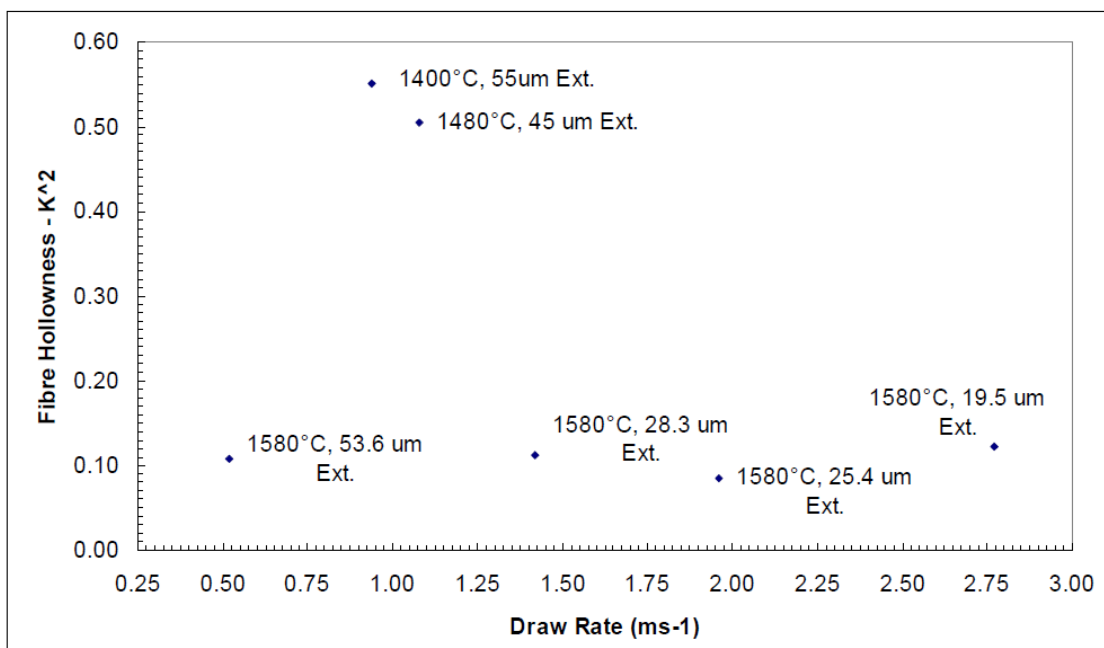


Fig.7: Correlazione tra la velocità di trafilatura (m\*s<sup>-1</sup>) e la cavità finale delle fibre (K<sup>2</sup>).

Esistono tuttavia dei limiti che non possono essere facilmente oltrepassati. È vero che come appena detto una bassa temperatura della fornace mi aumenta la frazione della cavità finale della fibra, ma è altresì corretto dire che non posso ridurla troppo. Questo

infatti porterebbe il mio preformato ad avere un valore di viscosità troppo elevato, inibendo così l'effetto delle tensioni superficiali della parete interna della fibra e rischiando un collasso della stessa. Un discorso equivalente si può fare per la velocità di trafilatura. Come detto in precedenza, infatti, l'obiettivo della produzione di queste fibre è quello di ottenere un'alta frazione di cavità contenuta nel minor diametro esterno possibile (identificata dalla zona grigia in alto a sinistra nella Fig.8).

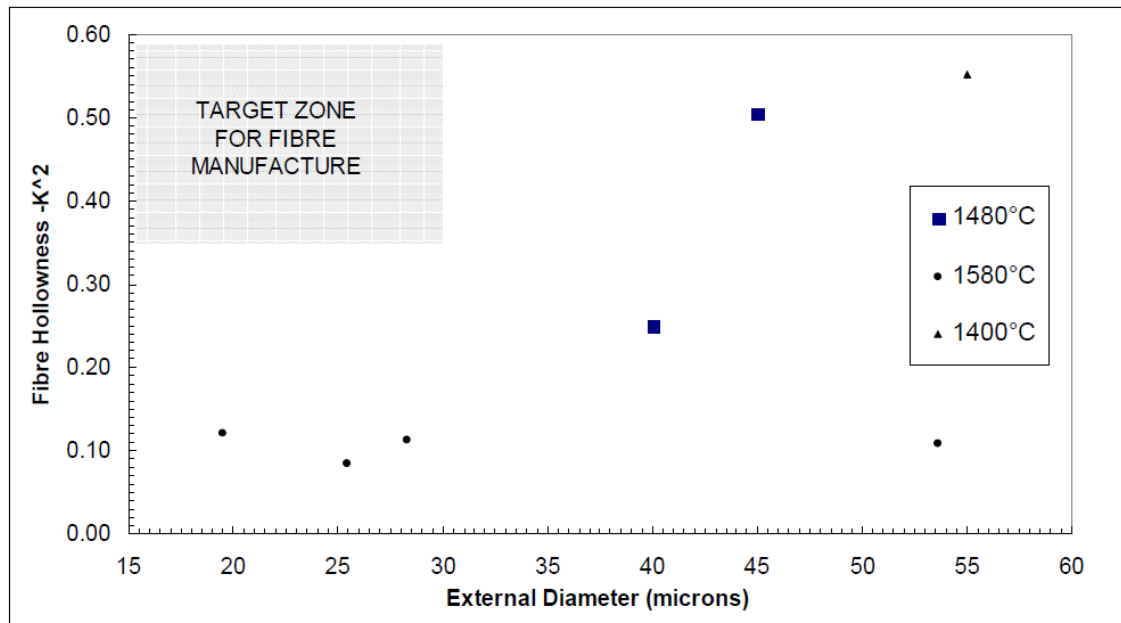


Fig.8: Correlazione tra cavità ( $K^2$ ) e diametro esterno ( $\mu\text{m}$ ) delle fibre ottenute.

Bisogna allora aumentare la velocità di trafilatura, ma questo porta, ovviamente, ad altri inconvenienti. Provando a filare un tubo di vetro con bassa temperatura ed alta velocità ciò che si otterrebbe sarebbero delle elevatissime forze di tensione su tutta la superficie che porterebbero alla rottura della fibra durante il processo. Tutto ciò ha portato alla conclusione che per una data temperatura e velocità di trafilatura esiste una singola condizione per cui è massimizzata la cavità della fibra e minimizzato il diametro esterno. Inoltre il fatto di non riuscire ad ottenere una struttura ottimizzata come si vorrebbe pone l'accento sui limiti che si hanno nelle attrezzature e nella produzione di questo tipo di fibre.



## **CAPITOLO 2**

# **Proprietà meccaniche dei compositi rinforzati con fibre di vetro cave**

### **2.1.Generalità sui compositi rinforzati con fibre di vetro cave**

Come detto in precedenza le fibre di vetro cave, così come le fibre di vetro classiche, non possono essere utilizzate direttamente dopo fabbricazione ma devono essere inserite all'interno di una matrice andando a formare così dei compositi. Solitamente questo tipo di fibre è utilizzato per rinforzare matrici polimeriche termoindurenti; le più utilizzate sono sicuramente quelle epossidiche e le poliestere insature. I casi che saranno studiati a seguire riguardano compositi con matrice polimerica epossidica. Tale combinazione ci suggerisce che le fibre siano molto più resistenti della matrice in cui sono contenute; questo fa sì che, se ad esempio poniamo in trazione un composito come quello appena descritto, la matrice sarà la prima a cedere, fessurandosi e arrivando al caso limite in cui saranno presenti solamente frammenti di polimero tenuti insieme dalle fibre. Anche per questo motivo l'aggiunta di un appretto dopo la formazione della fibra è fondamentale. Esso, infatti, migliora l'adesione fibra-matrice evitando un possibile scorrimento reciproco tra i due componenti.

I processi produttivi con cui solitamente si fabbricano compositi fibrorinforzati, sono i seguenti:

- Pultrusione
- Filament winding
- Pre-preg

Nella pultrusione (dall'inglese pull+extrusion ossia estrusione per trazione) le fibre sono sistemate in fasci e immerse in una vasca d'impregnazione, dove raccolgono la matrice polimerica. Uscendo da questa vasca una trafila compatta il polimero e provvede a disporre parallelamente le fibre. Successivamente il composito entra in uno stampo di formatura che andrà a definire la forma finale del prodotto; si provvederà poi a far indurire la resina. Una volta che essa è polimerizzata, il materiale passa attraverso dei rulli che applicano una forza di trazione, andando a formare così dei profilati di lunghezza continua che andranno in seguito tagliati in base alle necessità.



Fig.9: Processo di pultrusione

Il processo di avvolgimento dei filamenti (filament winding) prevede che le fibre siano prima impregnate e poi sistemate attorno ad un mandrino rotante. In base al numero di giri effettuati si sovrappongono vari strati di fibre, raggiunta la condizione voluta si provvede a reticolare la resina (in forno o a temperatura ambiente) e infine si procede a rimuovere il mandrino. Questo tipo di produzione viene sfruttato principalmente per la realizzazione di tubazioni, componenti cilindrici, o comunque con sezione convessa, che necessitano di un elevato rapporto resistenza/peso.

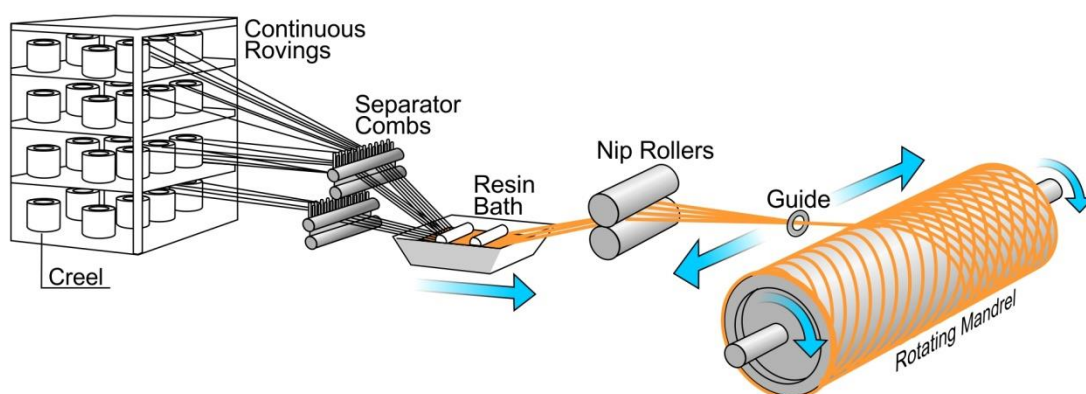
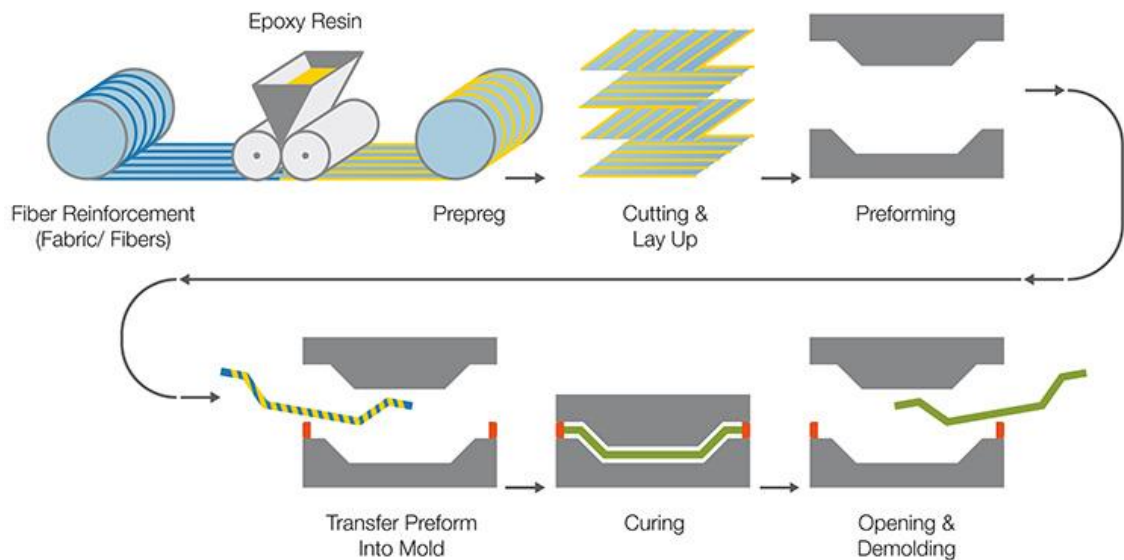


Fig.10: Processo di avvolgimento di filamenti (filament winding).



Un altro metodo per la produzione di compositi fibrorinforzati prevede l'utilizzo di lamine preimpregnate (pre-preg). Questa tecnologia è quella maggiormente utilizzata per la realizzazione di laminati piani. Il tutto viene preparato a freddo, sovrapponendo i vari strati di preimpregnato (semilavorati costituiti da fibre incorporate all'interno di fogli o nastri, di matrice non completamente polimerizzata). Il manufatto viene così posto in stampi riscaldati (o in autoclave se vogliamo ottenere prodotti finali curvi), per ottenere una polimerizzazione per pressione e temperatura e andando a dare, simultaneamente, la forma finale al pezzo.

### Prepreg Process



*Fig.11: Processo di formatura attraverso lamine preimpregnate (pre-preg).*

## 2.2. Resistenza a trazione per compositi rinforzati con fibre di vetro cave e influenza dei parametri di produzione su tale grandezza

Consideriamo adesso le proprietà meccaniche dei compositi rinforzati da fibre di vetro cave. In un materiale fibrorinforzato matrice e fibra “collaborano” spartendo i carichi a cui il materiale viene sottoposto, per aumentare la resistenza complessiva del pezzo. Se consideriamo un carico longitudinale e vogliamo valutare la resistenza massima del nostro materiale, potremmo usare la regola delle mescolanze:

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot V_m$$

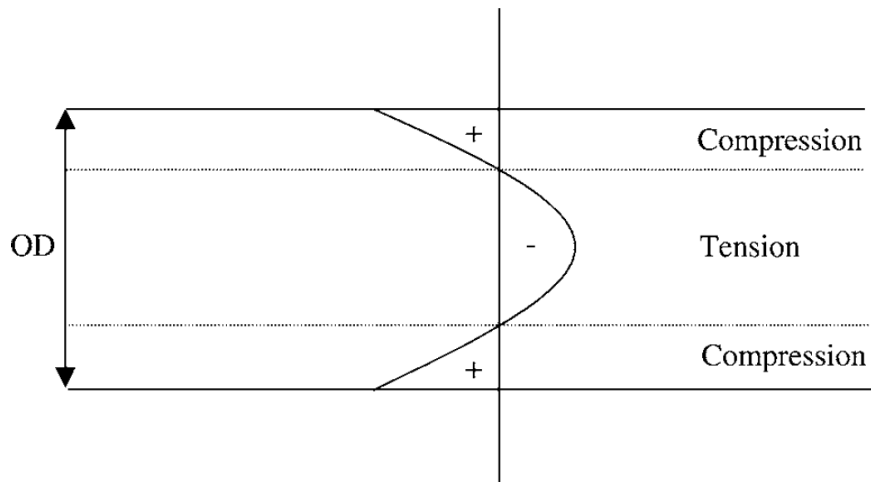
dove  $V_f$  e  $V_m$  sono rispettivamente le frazioni volumetriche di fibra e matrice mentre  $\sigma_f$  e  $\sigma_m$  sono le resistenze di fibre e matrice. Solitamente però le fibre sono molto più resistenti della matrice; è allora possibile semplificare la formula appena vista nel modo che segue:

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f$$

In generale, quindi, la massima resistenza di un materiale composito è paragonabile alla sola resistenza delle fibre moltiplicata per la frazione volumetrica di quest'ultime all'interno del materiale. È risaputo inoltre che la resistenza a trazione di un corpo è direttamente proporzionale alla sezione trasversale resistente. Appare quindi ovvio che se sottoposta a trazione una fibra di vetro piena ha delle prestazioni maggiori rispetto alla controparte cava. Quello appena descritto è il maggiore svantaggio derivante dalla morfologia cava delle fibre.

Il discorso appena affrontato perde la sua validità se consideriamo i parametri di fabbricazione descritti nel primo capitolo. Ottimizzando tali variabili possiamo, infatti, ottenere dei miglioramenti consistenti per quanto riguarda la resistenza a trazione di fibre cave e compensare il gap che le separava dalle fibre piene. Ricordiamo che i parametri che influenzano maggiormente la produzione delle fibre cave sono: temperatura della fornace, velocità di avanzamento del preformato e velocità di trafilatura. Tali variabili non sono disaccoppiabili ed è per questo che modificando il valore di un parametro, devo necessariamente adattare anche gli altri due, pena il collasso e la rottura del filamento. Cerchiamo di capire, allora, come questi valori possano aumentare le prestazioni del materiale. Durante il processo di trafilatura in cui si produce il filamento si procede ad una riduzione del diametro del preformato e ad un ovvio assottigliamento della parete della fibra. Questo fattore, unito alla variazione di temperatura e alla velocità di entrata e uscita del filamento dalla trafilatura, induce una differenza del coefficiente di viscosità tra parte interna ed esterna della parete. Ciò produce una differenza di tensione attraverso il raggio della fibra che si traduce in uno

stato di compressione nella superficie esterna; per equilibrio, all'interno della fibra, dovrà sussistere quindi uno stato di trazione (Fig.12).



*Fig.12: Distribuzione della tensione residua termicamente indotta attraverso la fibra*

Normalmente tale situazione penalizzerebbe il materiale, poiché lo stato di trazione a cuore andrebbe a sommarsi alla trazione in esercizio portando prima del tempo il filamento a rottura. Tuttavia in una fibra cava ciò non accade; non avendo fisicamente materiale all'interno lo stato che si osserva è solamente quello di compressione sulla superficie. Essendo questa una tensione inversa alla trazione, in caso il materiale fosse posto in esercizio e subisse tale forza, questa si sommerebbe alla tensione di compressione superficiale facendo percepire alla fibra uno sforzo minore. Grazie a questo meccanismo si osserva un incremento delle prestazioni di fibre cave di vetro che colmano così lo svantaggio di una ridotta sezione trasversale.

### 2.3. Resistenza a flessione per compositi rinforzati con fibre di vetro cave

Studiamo ora la resistenza a flessione di un composito fibrorinforzato. Tutte le grandezze di cui parleremo in questo paragrafo si riferiscono (anche se non espressamente specificato) calcolate rispetto alla densità del materiale, sono quindi resistenze specifiche. Come abbiamo già visto nel paragrafo precedente la resistenza del materiale può essere espressa come la sola resistenza delle fibre. Andiamo quindi ad analizzare la resistenza delle sole fibre di vetro cave. Per dimostrare che le prestazioni di quest'ultime sono maggiori delle rispettive fibre di vetro piene osserviamo due fattori. In primo luogo notiamo la differenza di rigidità flessionale tra le diverse fibre. Il modo migliore per confrontare il valore di queste due strutture è quello di osservare il rapporto di tale grandezza. Sappiamo che la rigidità flessionale è calcolabile conoscendo modulo elastico e momento d'inerzia dell'elemento. Da uno studio condotto dapprima da Burgman e in seguito da Watson e Farrow è emerso che tale rapporto vale:

$$\frac{R_c}{R_p} = \frac{1}{(1 - K^2)^2}$$

dove  $R_c$  e  $R_p$  sono rispettivamente le rigidità flessionali delle fibre cave e piene mentre  $K^2$  è la frazione di cavità delle fibre  $K^2 = d^2/D^2$ .

Questo rapporto è valido per due fibre con la stessa massa e siccome  $(1 - K^2)^2 \leq 1$ , il rapporto appena specificato è  $\geq 1$ . Ciò significa che una fibra cava ha una rigidità flessionale maggiore rispetto a una fibra piena e questa differenza aumenta con l'aumentare della frazione di cavità  $K^2$ . Tal effetto implica che se sottoponiamo queste due fibre sotto lo stesso carico di flessione la fibra cava risulterà più rigida grazie all'aumento del carico critico che ne ritarda la deformazione, portando quindi un rafforzamento del materiale composito.

Un ulteriore parametro da tenere in considerazione è la massima resistenza a flessione. Dallo studio teorico si sa che applicando una sollecitazione flessionale ad un elemento e osservando le zone in cui lo sforzo si concentra maggiormente si nota che questo è massimo sulla superficie del pezzo e decresce man mano che ci si avvicina al baricentro. Per questo motivo una struttura cava offre, circa, le stesse prestazioni di una piena, riducendone di molto il peso. Dalla Tab.2 è possibile osservare l'incremento della resistenza flessionale derivante dall'aumento della frazione di cavità della fibra.

Per esempio, per una fibra cava con rapporto  $K^2 = 0.3$  la rigidità aumenta (rispetto alla stessa fibra piena) più del 100% mentre la resistenza a flessione aumenta di quasi il 50%, tutto questo con un lieve aumento del peso del composito a causa della resina interstiziale nelle fibre.

Relative values (hollow / solid)		
Hollowness Ratio ( $K^2$ )	Rigidity	Max. bending strength / Ult. tensile strength
0.0	1.00	1.00
0.1	1.23	1.11
0.2	1.56	1.25
0.3	2.04	1.43
0.4	2.78	1.67
0.5	4.00	2.00
0.6	6.25	2.50
0.7	11.11	3.33
0.8	25.00	5.00
0.9	100.00	10.00

*Tab.2: Comparazione tra i valori di rigidezza e resistenza a flessione di fibre cave (hollow) e piene (solid).*

## **2.4. Resistenza a compressione per compositi rinforzati con fibre di vetro cave**

Un ulteriore motivo per cui vengono prodotti materiali compositi rinforzati con fibre di vetro cave è l'alta resistenza alla compressione che queste offrono. Infatti, mentre è possibile realizzare compositi dallo spessore ridotto con elevate qualità di resistenza a trazione, solitamente essi non forniscono né un'alta rigidità a flessione e nemmeno una grande resistenza a deformazione in compressione. Per risolvere questo problema si è passati alla produzione di laminati e pannelli "sandwich" composti da un nucleo di schiuma sintattica. L'uso di questi materiali però, oltre ad aumentare considerevolmente il peso del pezzo finito, accresce di molto la complessità e il costo della produzione dello stesso. Si è pensato quindi di rinforzare i materiali compositi con fibre di vetro cave. L'uso di tali materiali consente di aumentare la resistenza del pezzo dove prima avevamo un deficit, incrementando lo spessore del materiale, senza gravare sul peso di quest'ultimo. Le fibre di vetro cave sono state pensate per offrire un incremento della resistenza a compressione e un'alta resistenza a micro deformazione delle fibre, migliorando l'allineamento delle stesse all'interno del composito. Analizziamo adesso due tipi di compressione:

- compressione assiale
- compressione trasversale (test d'impatto)

2.4.1. Compressione assiale Anche in questo caso, come per la resistenza a flessione, per osservare i miglioramenti ottenuti con questo tipo di fibre è necessario confrontare le prestazioni che offrono rispetto alle stesse fibre di vetro piene. Quest'analisi si basa su uno studio effettuato da M.J. Hucker e I.P. Bond.

Sono state eseguite diverse prove su dei campioni di varie geometrie per cercare di capire in che modo i diversi valori di frazione di cavità delle fibre e di diametro esterno condizionavano le prestazioni dei componenti. La realizzazione di tale test richiedeva l'uso di provini con la stessa sezione e con il medesimo valore di frazione volumetrica lorda delle fibre (questo rapporto è calcolato includendo il volume dei fori delle fibre cave). I campioni testati sono dei laminati di vetro resina epossidica ottenuti tramite il metodo di produzione pre-preg e formati da diciotto lamine. L'applicazione di un'atmosfera sotto vuoto ha permesso di ridurre le infiltrazioni di resina all'interno delle cavità. La prova viene svolta tramite un macchinario in cui viene installata una cella di carico di 25 kN e la velocità di compressione è di 0.5 mm/min. Si

è osservato che la maggioranza dei provini si sono fratturati nel tratto utile con un tipo di cedimento chiamato a “scopa” (Fig.13).

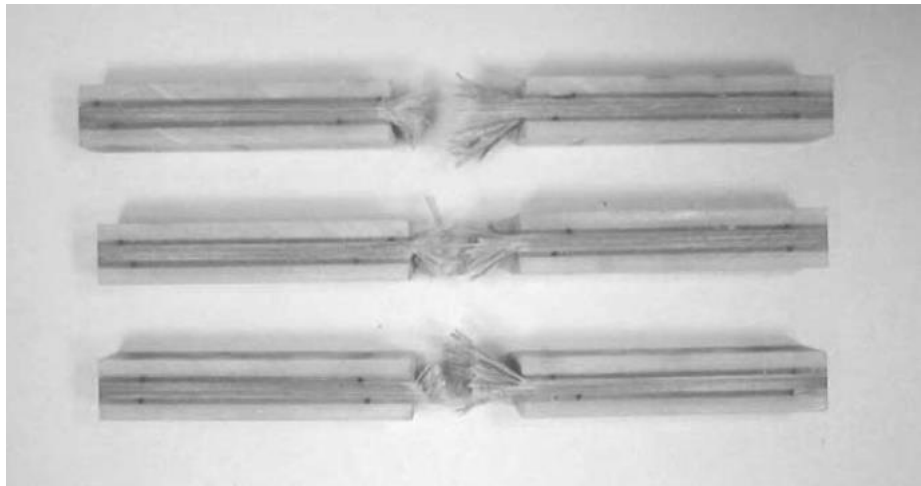


Fig. 13: Campioni dopo test di compressione presentano un cedimento detto a “scopa”.

Specimen type	$E_{(0.25\%)} \text{ (GPa)}$	$UCS_{\text{exptl}} \text{ (MPa, c.v. \%)}$	$UCS_{\text{exptl}}/\rho_{\text{comp}} \times 10^5 \text{ (m}^2 \text{ s}^{-2}\text{)}$
30/0	27.63	756.96 (11.21)	0.46
30/25	24.54	760.22 (3.62)	0.54
45/0	27.25	855.60 (4.50)	0.54
45/25	21.11	779.34 (9.10)	0.58
45/40	18.50	665.22 (6.86)	0.53
60/0	30.51	947.40 (2.49)	0.56
60/25	22.53	860.86 (6.11)	0.60
60/50	16.33	640.46 (3.51)	0.49

a)

Specimen type	$\nu_{\text{finet}}$	$\nu_{\text{fgross}}$	$\rho_{\text{comp}} \text{ (kg m}^{-3}\text{)}$
30/0	0.43	0.43	1641
30/25	0.35	0.48	1417
45/0	0.43	0.43	1573
45/25	0.29	0.45	1341
45/40	0.25	0.45	1249
60/0	0.45	0.45	1682
60/25	0.32	0.46	1441
60/50	0.21	0.46	1294

b)

Tab.3: a) tipo provino (D/d), modulo elastico al 0.25%, resistenza a compressione massima e resistenza a compressione specifica. b) tipo provino (D/d), frazione volumetrica netta e lorda, densità composito.

I risultati ottenuti dalle varie prove sono schematizzati nella Tab.3. La prima cosa che possiamo notare da tali dati è che il modulo elastico segue la regola delle mescolanze; il suo valore (calcolato per ogni provino tramite una secante allo 0.25% di deformazione) decresce all'aumentare della frazione di cavità della fibra. Si può osservare inoltre che la resistenza a compressione specifica cresce all'aumentare del diametro esterno della fibra  $D$ , ma ciò non vale se parliamo della frazione di cavità  $K^2$ . L'informazione più importante che ricaviamo dalla tabella, infatti, è che la resistenza a compressione non aumenta con il crescere della cavità delle fibre ma ottengo un incremento delle prestazioni per un ben preciso valore di tale frazione. Con una frazione di cavità del 22% possiamo ottenere un aumento delle performance del nostro componente fino al 10% rispetto ad una fibra di vetro piena. L'andamento della resistenza a compressione rispetto alla frazione di cavità è descritto dal grafico nella Fig. 14.

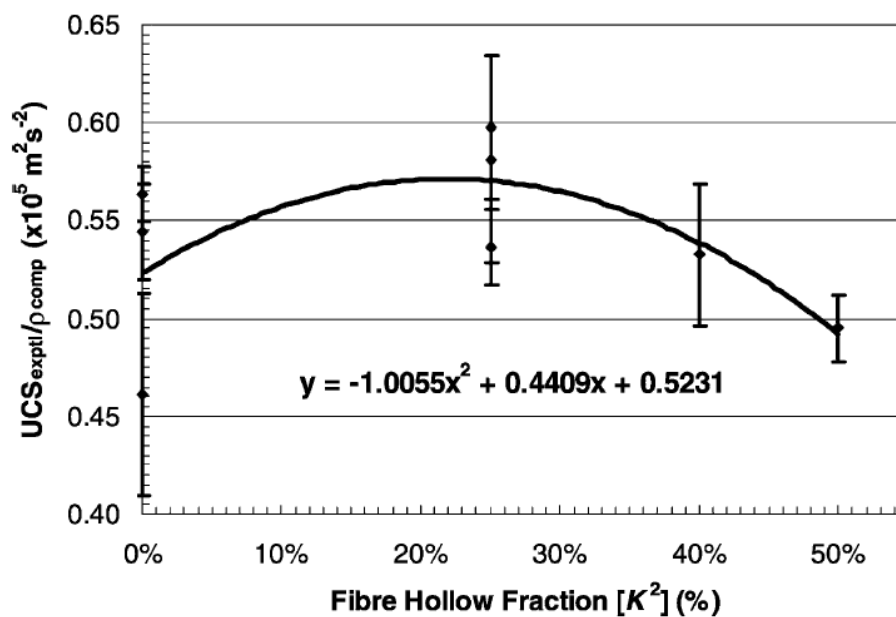


Fig. 14: Campioni dopo test di compressione presentano un cedimento detto a "scopa".

Per capire ancora meglio come si comportano le fibre sotto un carico di compressione assiale, possiamo studiare un'altra prova (eseguita sempre da M.J. Hucker e I.P.Bond) in cui si indaga il comportamento dei fasci di fibre, piene e cave, sotto sforzo di compressione. A differenza dello studio precedente in cui si analizzava il comportamento di un laminato, ora lo scopo dell'esperienza è quello di capire la resistenza di fasci contenenti lo stesso numero di fibre dello stesso diametro esterno. Il numero di fibre all'interno del fascio è stato calcolato in modo che l'area della sezione



trasversale sia la stessa per ogni fascio di fibre piene ad ogni diametro. Per eseguire questo tipo di test è importante che durante la prova il campione non venga portato a rottura. Poiché ciò non avvenga è stato studiato un metodo su misura che prevede l'incapsulazione del fascio di fibre in un blocco polimerico e l'utilizzo di provini con un rapporto di forma molto basso; inoltre l'applicazione del carico viene effettuata in modo indiretto. Con questo tipo di test si misura la deformazione del campione ad un certo punto del prova per ricavare poi la tensione di rottura.

Anche in quest'analisi l'obiettivo è di accertare l'effetto della frazione di cavità delle fibre ( $K^2$ ) e del diametro esterno. I dati ricavati dalle varie prove sono quelli osservabili dalla Tab.4.

Bundle type (No. of filaments) × (external diameter)/(% hollowess)	Average peak failure load (N, CoV (%))	Exptl bundle c.s.a. ( $\mu\text{m}^2$ )	Exptl compression strength (MPa)
28 × 30/0	14.6 (6.0)	35,416	413
28 × 30/25	14.1 (10.1)	26,562	532
12 × 45/0	11.6 (10.7)	27,963	414
12 × 45/25	10.4 (13.4)	20,972	495
12 × 45/40	11.5 (14.7)	16,778	682
7 × 60/0	10.5 (9.2)	23,134	455
7 × 60/25	10.4 (16.8)	17,351	602
7 × 60/50	9.2 (13.6)	11,567	799

a)

Bundle type (No. of filaments) × (external diameter)/(% hollowess)	Actual glass c.s.a. ( $\mu\text{m}^2$ )	Calculated compression strength (MPa)
28 × 30/0	19,792	739
28 × 30/25	14,844	952
12 × 45/0	19,085	606
12 × 45/25	14,314	725
12 × 45/40	11,451	1000
7 × 60/0	19,792	532
7 × 60/25	14,844	704
7 × 60/50	9896	934

b)

*Tab.4: a)picco medio del carico di rottura, area sperimentale della sezione trasversale del fascio, tensione di compressione sperimentale b) area calcolata della sezione trasversale del fascio, tensione di compressione calcolata*

Notiamo che, nella tabella della pagina precedente, sono presenti due diverse tensioni di compressione: la prima è sperimentale, la seconda calcolata. Mentre nel primo caso la tensione deriva dalla misurazione sperimentale della dimensione del fascio di fibre, nel secondo caso la tensione si riferisce al valore derivato considerando il contributo dell'area della sezione conosciuta, del solo vetro, in ogni fascio. Come si osserva dalla Tab.4 i due valori della tensione mostrano una forte dipendenza dal tipo di fibre. La tensione di compressione sperimentale ci suggerisce che per avere un miglioramento delle prestazioni abbiamo bisogno di un diametro esterno grande e di un'elevata frazione di cavità. Al contrario, per migliorare le performance secondo la tensione di compressione calcolata le fibre devono avere un diametro ristretto e un alto rapporto di cavità. Appare quindi evidente che la disposizione delle fibre all'interno del composito influenza le prestazioni del materiale, inoltre anche le rigidità delle singole fibre aiutano a ritardare l'inizio del cedimento e quindi, più in generale, a migliorare la resistenza a compressione.

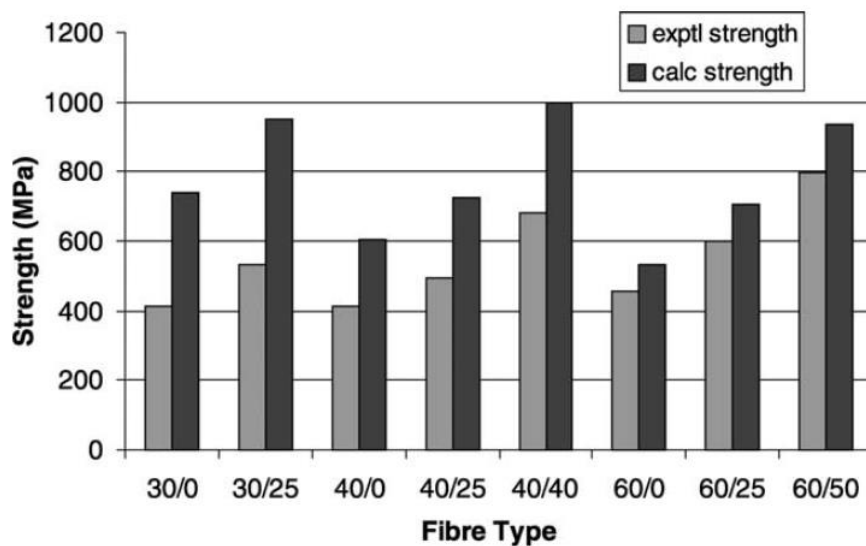
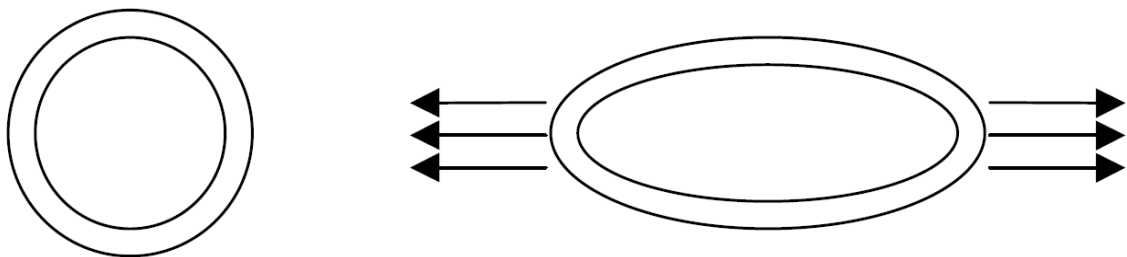


Fig. 15: Tensione di compressione sperimentale e calcolata per ogni tipo di fibre considerato.

2.4.2. Compressione trasversale (test di impatto) Parlando invece di compressione trasversale, dobbiamo subito chiarire che il vantaggio prestazionale derivante dall'inserimento di fibre continue, indipendentemente dal fatto che si parli di vetro o carbonio, in una matrice polimerica, non è assolutamente paragonabile a quello ottenuto rispetto ad uno sforzo longitudinale. Partendo da questo presupposto osserviamo come si comportano le fibre di vetro cave durante una sollecitazione di questo tipo. Un filamento cavo, con una parete molto sottile, sottoposto a compressione trasversale può deformarsi, assumendo una forma ellittica (Fig.16); ciò permette di avere un abbassamento della concentrazione delle tensioni interfacciali ed una conseguente riduzione dell'interfaccia in cui può svilupparsi una cricca. Successive prove hanno confermato che i danni indotti da test di impatto, effettuati su due compositi rinforzati con fibre di vetro piene e cave, sono risultati minori nel secondo caso; questo è reso possibile grazie al fenomeno di schiacciamento delle fibre cave che è stato appena descritto.



*Fig. 16: Deformazione ellittica di una fibra di vetro cava sottoposta a carico trasversale.*

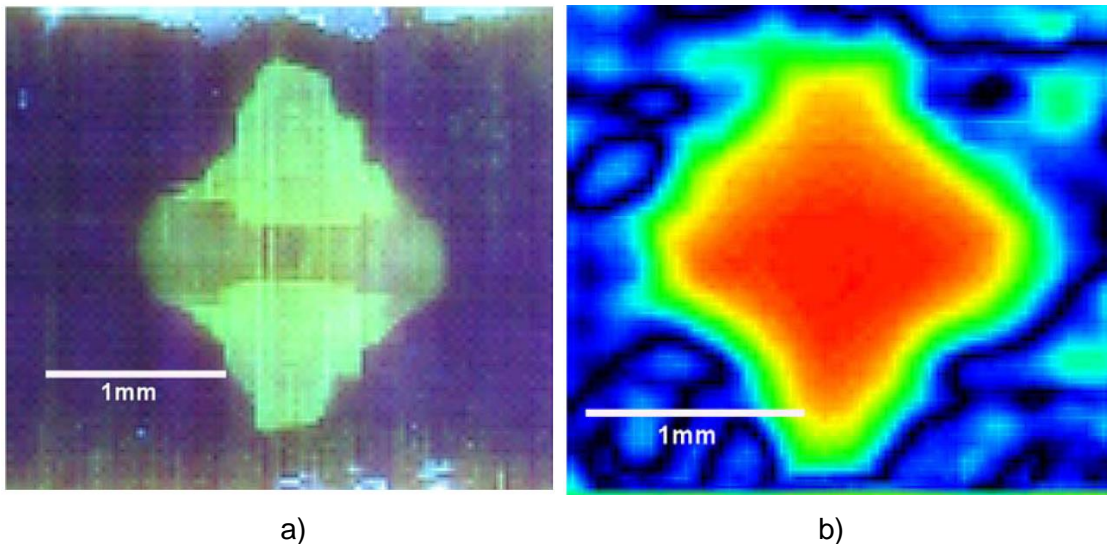


## **CAPITOLO 3**

### **Applicazioni dei compositi rinforzati con fibre di vetro cave**

#### **3.1. Meccanismo di auto riparazione e aumento della visibilità del danno nelle fibre di vetro cave**

Come abbiamo visto nel precedente capitolo, le fibre di vetro cave sono un rinforzo molto vantaggioso, per un materiale composito, in termini di prestazioni meccaniche. In questi ultimi anni sono stati eseguiti diversi studi per migliorare ulteriormente il rendimento di questi prodotti. In particolare, per quanto concerne l'integrità strutturale dei compositi fibrorinforzati, si è cercato di migliorare le performance dopo un danno da impatto. Dopo tale carico, infatti, all'interno del composito possono formarsi cricche, delaminazioni e deformazioni della struttura del materiale. Tuttavia, mentre in caso occorrono danni a livello macroscopico l'individuazione e la riparazione sono facilitate, se si verifica una lesione su scala microscopica (come micro-cricche o delaminazioni) è molto difficile intervenire sia per una riparazione ma anche solo per evidenziare l'area danneggiata. Si è lavorato molto sull'attivazione di un meccanismo di auto-riparazione delle fibre e su un metodo che rendesse possibile il rilevamento dei danni di un materiale in maniera semplice e veloce. La soluzione a questi due problemi è stata trovata riempiendo la cavità delle fibre con una resina di riparazione mescolata a un colorante UV fluorescente. In questo modo se durante una prova d'impatto le fibre dovessero fratturarsi, il liquido potrà fuoriuscire e andare a riempire la sede della cricca. Così facendo è più semplice visualizzare l'area danneggiata in modo da valutare le condizioni del materiale e, in caso di danno elevato, procedere alla riparazione permanente del pezzo. Per evidenziare il sito della lesione è possibile utilizzare una tecnica di mappatura UV, che consiste nel registrare delle immagini digitali ingrandite dell'area sotto un'illuminazione ultravioletta, oppure attraverso uno scanner ultrasonico. I risultati ottenuti con i due metodi sono paragonabili, con un'ovvia percentuale di scarto tra uno e l'altro (attestata intorno al 25%); è possibile vedere un esempio di tali metodi di rilevazione nella Fig.17. Il rilascio e l'infiltrazione di un colorante UV all'interno dell'area danneggiata è molto utile per una semplice e rapida valutazione dello stato del materiale; questo metodo permette di evidenziare e marcare zone sospette su pezzi di grandi dimensioni abbassando così notevolmente i costi per i controlli di sicurezza.



*Fig. 17: Vista posteriore di un provino dopo test di impatto. a) vista utilizzando una tecnica di mappatura UV. b) vista utilizzando uno scanner ultrasonico.*

Come abbiamo accennato poco sopra, all'interno della cavità delle fibre, oltre ad un colorante che aumenta la visibilità in caso di danni microstrutturali, solitamente s'inseriscono anche delle resine specifiche, studiate apposta per fornire un discreto grado di riparazione in caso di danno. Solitamente in un laminato  $0^{\circ}/90^{\circ}$  s'inserisce una resina epossidica non polimerizzata nello strato a  $0^{\circ}$ , mentre in quello a  $90^{\circ}$  le cavità sono riempite con un catalizzatore. Dopo la frattura delle fibre, i due liquidi si mescolano nella zona danneggiata solidificando la resina curativa, questa dona supporto alla struttura agendo come il meccanismo di guarigione biologica degli organismi viventi. È bene specificare subito che il meccanismo di auto-riparazione delle fibre cave non è inteso come soluzione definitiva; esso, infatti, è utile per compensare il decadimento prestazionale dopo un danno da impatto e per evitare la propagazione della lesione. Ovviamente bisogna provvedere alla riparazione vera e propria o alla sostituzione completa del pezzo in caso di danno elevato. La chiave di tale meccanismo è che esso non ha bisogno di alcuna azione esterna diversamente dalle riparazioni convenzionali. L'obiettivo di tale tecnologia è di ripristinare parte delle prestazioni perse dal materiale dopo un danno subìto, senza modificare le proprietà globali del sistema.

Analizzando uno studio svolto da J.W.C. Pang e I.P. Bond è possibile osservare che i risultati ottenuti dimostrano il reale funzionamento di questo meccanismo. I due ricercatori oltre a studiare l'effetto delle resine di riparazione all'interno delle fibre cave, dopo una prova d'indentazione, hanno anche osservato l'effetto del tempo sull'efficienza della guarigione del composito. Sono stati prodotti sei gruppi di campioni

(dal provino A al provino F); in quattro di questi gruppi le fibre cave sono state riempite con un agente riparante mentre gli altri due sono stati utilizzati come metro di paragone, rispettivamente per fibre di vetro cave non danneggiate (gruppo A) e fibre danneggiate (gruppo F). I restanti gruppi di provini sono stati inseriti in un essiccatore per un diverso periodo, che andava da un minimo di zero a un massimo di nove settimane, prima della prova d'indentazione. Dopo questo periodo i provini sono stati prelevati e sottoposti al test, lasciando in seguito agire la resina curativa per ventiquattro ore a temperatura ambiente. In seguito è stata eseguita su ogni campione una prova a flessione su quattro punti per valutare la resistenza effettiva. I risultati ottenuti da queste prove sono schematizzati nella Fig.18 nella quale è possibile osservare che la prova d'impatto ha effetti molto marcati sulla resistenza a flessione di un composito rinforzato con fibre di vetro cave (differenza tra gruppi A e F). Si ha inoltre un netto miglioramento prestazionale del gruppo B (auto-riparazione dopo zero settimane) rispetto ai provini danneggiati del gruppo F (senza agente riparante). Questo miglioramento può essere attribuito a un'elevata penetrazione, nell'area danneggiata, della resina, prima che la viscosità aumenti in modo da precludere il progredire del processo. È importante notare come lo scorrere del tempo porti a un degrado dell'attività di auto-riparazione fino ad arrivare al punto che questa non cominci nemmeno la sua azione. Infatti, le fibre conservate per nove settimane risultano avere circa lo stessa resistenza a flessione delle fibre danneggiate e non curate; questo può significare che l'agente di riparazione non sia riuscito a fluire dalle fibre fratturate.

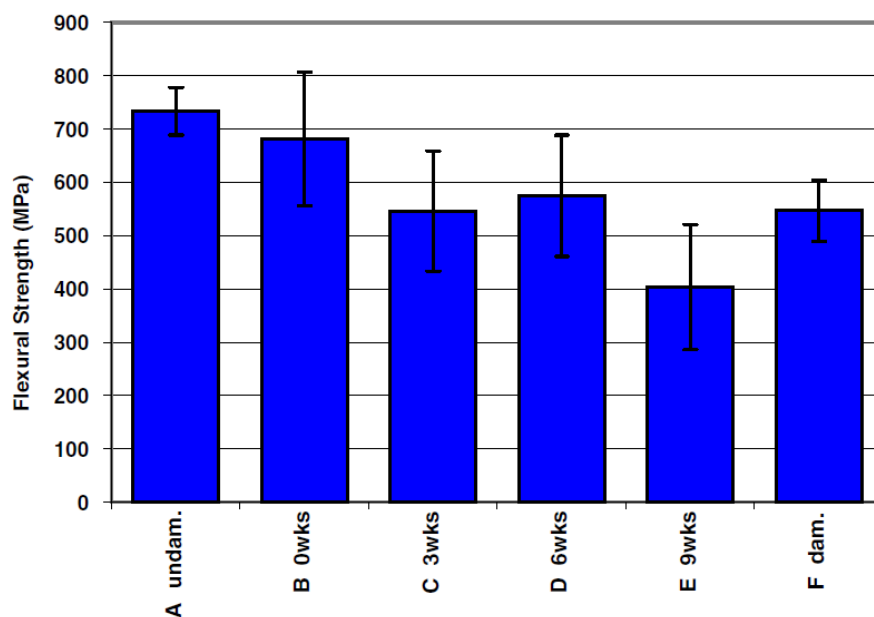


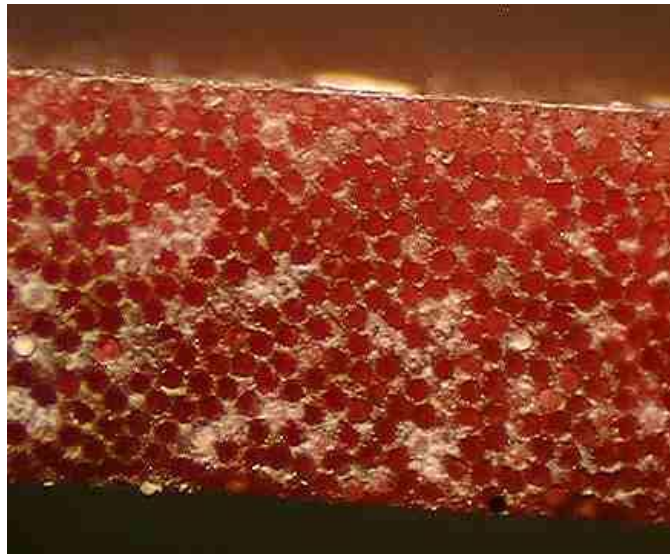
Fig. 18: Risultati dei test di flessione per provini non danneggiati (A), danneggiati e auto-riparati dopo diverse settimane di stoccaggio (B → 0 settimane, C → 3 settimane, D → 6 settimane, E → 9 settimane) e campioni danneggiati e non auto-riparati (F).

### **3.2.Utilizzo delle fibre di vetro cave e dei relativi compositi**

I compositi rinforzati con fibre di vetro cave hanno molte proprietà utili, ciò li rende adatti a svolgere una vasta gamma di compiti. Oltre alle varie prestazioni di cui abbiamo già discusso in precedenza, tali materiali sono caratterizzati da ulteriori caratteristiche: sono degli ottimi isolanti termici, elettrici e acustici, inoltre sono in grado di assorbire egregiamente elevate vibrazioni. Un fattore molto importante da tenere in considerazione quando si parla di compositi di questo tipo è il costo della loro produzione. Il costo per la fabbricazione delle normali fibre di vetro è molto contenuto se paragonato ad esempio alla spesa per la realizzazione di fibre di carbonio. Tuttavia l'utilizzo di tali fibre è ridotto a pochi campi; anche se il costo di fabbricazione non è eccessivo, per la realizzazione di componenti strutturali si preferisce puntare su materiali con prestazioni comparabili ma costi nettamente inferiori (ad es. materiali metallici). Per questo motivo tali compositi sono utilizzati in campi particolari in cui le prestazioni meccaniche, ma soprattutto la caratteristica di leggerezza, hanno la precedenza sul costo del pezzo. Parliamo quindi di campi aeronautici, aerospaziali, dell'auto motive e, in generale, in quegli ambienti in cui si producono articoli di uso sportivo in cui c'è necessità di elevata leggerezza unita a una grande rigidità e resistenza. Se si pensa al campo aeronautico e aerospaziale (in cui questi compositi sono largamente utilizzati) è ovvio pensare come sia necessario l'utilizzo di materiali con elevate proprietà meccaniche, viste le grandi forze cui un velivolo è sottoposto, con un buon assorbimento sonoro, per il forte rumore derivante dall'attrito dell'aria con il mezzo, il tutto unito ad un peso decisamente ridotto. Il motivo principale per cui sono richiesti materiali molto leggeri è per un risparmio economico: infatti, per far decollare e volare un aeromobile più pesante abbiamo bisogno di più potenza, ciò incide in un aumento del costo dei componenti, inoltre con un velivolo più leggero si ha una cospicua riduzione del consumo di carburante che si traduce in un abbassamento delle spese. In un utilizzo in ambito aerospaziale invece, oltre alle caratteristiche appena citate, c'è il bisogno di un'elevata resistenza alle alte temperature, caratteristica presente nei compositi appena descritti. L'impiego e lo sviluppo di compositi rinforzati con fibre di vetro cave però, sono rallentati dalla presenza sul mercato di compositi con complessità e costi di fabbricazione superiori ma con prestazioni più elevate e quindi preferiti in quegli ambiti in cui la resistenza gioca un ruolo fondamentale, questi sono i materiali rinforzati con fibre di carbonio.

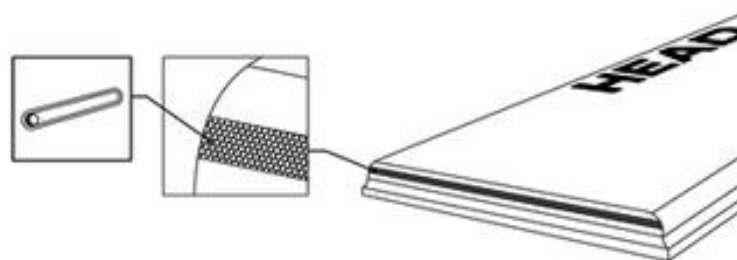


Quest'argomento non è d'interesse in questa sede, ma basti pensare che a parità di frazione volumetrica di rinforzo in un composito, le fibre di carbonio possono offrire il doppio delle prestazioni rispetto alle fibre di vetro appena investigate.



*Fig. 19: Composito rinforzato con fibre di vetro cave (diametro esterno 60  $\mu\text{m}$  e cavità 50%) su una matrice epossidica Hexcel 913.*

Un'ulteriore applicazione delle fibre cave, riferita ad un utilizzo più comune, riguarda l'inserimento di tali elementi in uno sci. Da una ricerca personale, infatti, è emerso che uno dei maggiori colossi presenti nel panorama della produzione sciistica utilizza tale tecnologia per la fabbricazione dei loro sci per quanto concerne il modello di punta. La ditta in questione è la Head. Essa sfrutta le fibre di vetro cave all'interno dell'anima dello sci, brevettando una struttura rinominata Aircoat.



*Fig. 20: Struttura interna di uno sci Head con tecnologia Aircoat.*

Il motto con cui il colosso austriaco pubblicizza tale tecnologia è "Ultraleggere + ultraforti = ultraagili". Il significato del motto è presto spiegato; l'utilizzo di fibre cave riduce notevolmente il peso complessivo dello sci rispetto a uno stesso prodotto con fibre piene (Head attesta la diminuzione del peso delle fibre attorno al 40%), questo è il

motivo del primo punto: ultraleggere. Come si evince dal capitolo precedente, inoltre, le fibre cave non hanno nulla da invidiare rispetto a quelle piene, sia per quanto riguarda la rigidità flessionale sia per la resistenza alla compressione, in questo modo le prestazioni del prodotto finale non vengono intaccate ma, al contrario, aumentano. Il ragionamento svolto da Head nel dire che la somma di leggerezza e resistenza danno come risultato un'elevata agilità deriva dal fatto che le fibre di vetro cave sono più veloci sia ad assorbire l'energia cui sono sottoposti, sia nel trasferirla alle lamine, rendendo lo sci veloce e reattivo.

## Conclusione

Dopo aver analizzato a fondo il tema dei compositi fibrorinforzati, è possibile descrivere velocemente e in modo generale gli aspetti affrontati finora. In questo elaborato sono stati introdotti vari metodi per la produzione delle fibre di vetro cave. Uno dei metodi utilizzati ad oggi, permette di ricavare la fibra partendo da un preformato di forma tubolare in vetro e, dopo averlo riscaldato, si passa alla fase di trafilatura. I tre parametri di produzione: velocità di avanzamento del preformato, temperatura del forno e velocità di trafilatura (dipendente dalla velocità di avvolgimento della bobina di raccolta), se ottimizzati permettono di ottenere un'alta varietà di tipologie di fibre cave. Infatti, andando ad interagire direttamente con il coefficiente di viscosità del vetro, questi parametri consentono di ottenere fibre con diametro esterno e frazione di cavità regolabile a piacere, sempre entro i limiti di produzione. Gli esiti di vari test hanno confermato che al crescere della velocità di trafilatura il diametro esterno della fibra diminuisce, al contrario, all'aumentare della temperatura della fornace la frazione volumetrica cava aumenta. Ovviamente questi parametri sono collegati e dipendenti e non è possibile disaccoppiarli, pena la rottura della fibra durante il processo. Inoltre esistono dei limiti nella produzione di tali fibre; non è ancora possibile, infatti, creare dei filamenti con diametro esterno inferiore ai 30  $\mu\text{m}$  e cavità superiore al 30%.

Il motivo principale per il quale le fibre di vetro cave sono utilizzate al posto delle fibre classiche è facilmente individuabile. Esse, infatti, riescono a fornire una resistenza superiore a quella di una normale fibra piena, diminuendone però il peso. Osservando i risultati ottenuti nelle diverse prove meccaniche è facile notare come tutte le resistenze risultino migliorate. Durante uno sforzo di trazione, le tensioni di compressione indotte sulla superficie della fibra, derivanti dalla produzione, compensano la mancanza di materiale a cuore del filamento (ricordando che la resistenza a trazione dipende dall'area della superficie resistente), colmando la differenza di prestazione tra fibre piene e cave. Testando le fibre con prove di flessione è risultato che la cavità non pregiudica le performance, anzi, se consideriamo grandezze specifiche (ossia il rapporto di tali valori rispetto la densità delle varie fibre), la resistenza è maggiore rispetto alle stesse fibre piene. Analizzando delle prove di compressione invece, i dati ottenuti sono discordanti. Da una prima analisi risulta che un valore di cavità delle fibre ben preciso è necessario per ottenere il massimo rendimento del materiale, aumentando o diminuendo la frazione volumetrica di cavità (rispetto al valore stabilito

in precedenza) la resistenza del materiale diminuisce. In seguito sono stati testati fasci di queste stesse fibre, cercando di calcolare due diverse resistenze di compressione: resistenza a compressione sperimentale e calcolata. Anche in questo caso i dati ottenuti danno risultati diversi. Secondo l'andamento della resistenza sperimentale, infatti, le fibre dovrebbero avere degli elevati diametri esterni uniti ad un'alta frazione di cavità per portare benefici prestazionali, mentre per la resistenza calcolata servono dei diametri esterni ridotti e delle cavità ampie. Il foro all'interno delle fibre è utile anche per resistere maggiormente a compressioni trasversali: studi hanno dimostrato che le fibre, schiacciandosi sotto carico trasversale, si deformano ecletticamente, permettendo di ridurre la concentrazione delle tensioni interfacciali e riducendo così l'interfaccia di sviluppo per una futura cricca.

Una volta comprese le potenzialità di questi elementi, molti studiosi hanno cercato dei modi per migliorarne ulteriormente le qualità, in modo da colmare le limitazioni che ne ostacolavano l'utilizzo. Tramite l'inserimento all'interno dei fori delle fibre di una resina mescolata ad un colorante ultravioletto fluorescente è stato possibile indurre un meccanismo di auto-riparazione delle fibre fratturate dopo una prova d'impatto. Infatti, nel momento in cui la parete della fibra cedeva, crepandosi, la resina era libera di fuoriuscire andando a riempire la zona danneggiata. Inoltre l'aggiunta del colorante è stata molto utile per evidenziare la sede della zona danneggiata (osservando il materiale con illuminazione UV o scanner ultrasonici) rendendo così facile e veloce la valutazione dello stato del pezzo, soprattutto nei casi in cui c'è necessità di visionare una superficie molto estesa. Questi due meccanismi appena menzionati sono vantaggiosi per arginare un problema che successivamente deve essere comunque risolto, con una riparazione completa o con la sostituzione totale del pezzo danneggiato, essi non sono infatti trattamenti di riparazione definitivi.

Dopo aver analizzato tutte queste particolarità dei compositi rinforzati con fibre di vetro cave, è possibile definirne approssimativamente un campo di utilizzo. Essi, infatti, sono perfetti per quelle applicazioni che richiedono leggerezza (poiché la densità di questi compositi è minore di  $2 \text{ g/cm}^3$ ) come il ramo aerospaziale e aeronautico. Tali ambiti non hanno restrizioni economiche, che sono il principale scoglio da superare per i materiali compositi. Il loro costo non è eccessivo ma è comunque di molto superiore se si accostano questi materiali con altri di tipo metallico, soprattutto se si parla di acciaio. Per questo motivo questi elementi sono limitati a dei settori ristretti, solitamente militare e sportivo; a questo proposito possiamo osservare come una ditta famosa in tutto il mondo nel ramo degli sport invernali abbia adottato tale tecnologia per alcuni suoi prodotti. La società in questione è la Head che ha inserito fibre di vetro

cave all'interno dell'anima di alcuni modelli dei propri sci. In questo modo ha reso possibile un alleggerimento di tutta la struttura (Head dichiara una differenza tra fibre piene e fibre cave del 40%) e sfruttando le proprietà che abbiamo appena analizzato il risultato è un prodotto più performante che permette un assorbimento e un rilascio dell'energia in modo molto più rapido rispetto alla concorrenza.

Dopo quanto è emerso in questo studio è possibile ritenere questi compositi tra i più innovativi del settore. Tuttavia sono d'obbligo ulteriori studi e ricerche per approfondire una conoscenza ancora limitata di tali materiali e per migliorare tecniche produttive nonché prestazioni meccaniche. Inoltre ottimizzando tali materiali sarebbe utile ampliare i campi di utilizzo in cui possano essere applicati.



## Bibliografia

- Bernardo E., Scarinci G., “Lezioni del corso di scienza e tecnologia dei materiali”, A.A. 2010-2011
- Bond I.P., Hucker M.J., Weaver P., Bleay S., Haq S., “*Mechanical behavior of circular and triangular glass fibres and their composites*” Composites Science and Technology, Volume 62, Issue 7-8, June 2002, Pages 1051-1061, Elsevier Ltd.
- Hucker M.J., Bond I.P., “*Optimisation of hollow glass fibres and their composites*”. in ICCM-12: 12th International Conference on Composite Materials, June 1999. vol. Paper 660, Woodhead Publishing Ltd.
- Hucker M.J., Bond I.P., Bleay S., Haq S., Foreman A., “*Influence of manufacturing parameters on the tensile strengths of hollow and solid glass fibres*” Journal of Materials Science Volume 37, Issue 2, January 2002, Pages 309-315, Kluwer Academic Publisher.
- Hucker M.J., Bond I.P., Bleay S., Haq S., “*Experimental evaluation of unidirectional hollow glass fibre/epoxy composites under compressive loading*” Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 34, Issue 10, October 2003, Pages 927-932, Elsevier Ltd.
- Hucker M.J., Bond I.P., Bleay S., Haq S., “*Investigation into the behavior of hollow glass fibre bundles under compressive loading*” Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 34, Issue 11, November 2003, Pages 1045-1052, Elsevier Ltd.
- Kling S., Czigány T., “*Damage detection and self-repair in hollow glass fiber fabric-reinforced epoxy composites via fiber filling*” Composites Science and Technology, Volume 99, July 2014, Pages 82-88, Elsevier Ltd.
- Pang J.W.C., Bond I.P., “*A hollow fibre reinforced polymer composite encompassing self-healing and enhanced damage visibility*” Composites Science and Technology, Volume 65, Issues 11-12, September 2005, Pages 1791-1799, Elsevier Ltd.
- Head Aircoat (<http://www.head.com/ski/technologies>), 7 Ottobre 2014
- Google Brevetti (<http://www.google.com/patents>), 7 Ottobre 2014