



**UNIVERSITÁ DEGLI STUDI DI PADOVA**

**FACOLTÁ DI INGEGNERIA  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DEI MATERIALI**

**Tesi di Laurea**

**Miglioramento delle Proprietà Interlaminari nei  
Tessuti Unidirezionali Dynanotex Attraverso lo  
Sfruttamento delle Proprietà Termoplastiche delle  
Resine Epossidiche**

**Relatrice: Professoressa Giovanna Brusatin**

**Laureando: Matteo Angeloni**

**ANNO ACCADEMICO 2010-2011**



**A Mia Madre**



# INDICE GENERALE

<b>Introduzione .....</b>	<b>pagina 1</b>
<b>Capitolo 1 Materiali compositi .....</b>	<b>3</b>
1.1 Considerazioni sui materiali compositi .....	4
1.2 I materiali costituenti .....	5
1.2.1 Fibre di Carbonio.....	6
1.2.2 Resine epossidiche.....	8
<b>Capitolo 2 Tessuti unidirezionali .....</b>	<b>11</b>
2.1 I tessuti unidirezionali (UD).....	12
2.2 Weaving .....	13
2.3 Bonding.....	14
2.4 Stitching.....	15
2.5 Lo spreading delle fibre .....	15
<b>Capitolo 3 Tessuto Unidirezionale Dynanotex .....</b>	<b>19</b>
3.1 Il processo Dynanotex.....	20
3.2 La stazione di adesivazione .....	21
3.3 Adesivo poliammidico .....	23
<b>Capitolo 4 Adesivo Epossidico .....</b>	<b>27</b>
4.1 Il polimero epossidico.....	28
4.2 Epikote 1007 1003 e 1001 .....	29
<b>Capitolo 5 Prove meccaniche .....</b>	<b>35</b>
5.1 Prova ILSS (Interlaminar Shear Strenght) .....	36
5.2 Preparazione provini .....	38
5.3 Attrezzatura di prova .....	40
5.4 Risultati .....	41

<b>Capitolo 6 Conclusioni .....</b>	<b>43</b>
6.1 Commenti ai risultati delle prove meccaniche .....	44
6.2 Considerazioni economiche .....	47
6.3 Sviluppi futuri .....	47
 <b>Bibliografia.....</b>	 <b>49</b>
 <b>Ringraziamenti .....</b>	 <b>51</b>

# INTRODUZIONE

In questa tesi ho voluto descrivere quello che ho appreso durante il tirocinio presso l'azienda I.T.T. S.r.l. di Gerno di Lesmo e il mio contributo al miglioramento delle caratteristiche fisiche del prodotto Dynanotex realizzato da tale azienda.

Inizierò dunque con la presentazione generale dei materiali compositi e delle loro proprietà, in particolare le caratteristiche e la produzione delle fibre di carbonio come rinforzo e le qualità chimico-fisiche delle resine epossidiche come matrice.

In seguito passerò ad analizzare le tecnologie di produzione dei tessuti unidirezionali, i loro vantaggi e svantaggi, e la tecnologia dello spreading delle fibre; infine descriverò le caratteristiche del processo e le proprietà meccaniche di Dynanotex nonché dell'adesivo poliammidico usato per la sua produzione.

Questa tesi, in conclusione, si focalizzerà sulla presentazione dell'alternativa da me proposta, finalizzata a portare un miglioramento della proprietà interlaminari tramite l'uso di un polimero epossidico: la validità di tale adesivo sarà poi verificata attraverso la prova meccanica ILSS secondo la norma UNI EN ISO 14130:1999.





# Capitolo 1

## *Materiali Compositi*

## 1.1 Considerazioni sui materiali compositi

Con il termine “materiali compositi” s’intendono tutti quei materiali formati da almeno due costituenti distinti, con caratteristiche fisiche sufficientemente diverse fra loro e che abbiano proprietà complessive significativamente migliori delle singole fasi costituenti.

I materiali compositi per applicazioni strutturali a più elevate prestazioni sono quelli formati da una fase discontinua, costituita da fibre, e una fase continua, detta matrice. Questo tipo di materiale sfrutta le ottime proprietà di resistenza e rigidità che si riscontrano in alcuni dei singoli componenti quando essi sono ottenuti sotto forma di fibre di diametro molto piccolo. Sfruttando particolari tecnologie di produzione si hanno valori di resistenza e di modulo elastico molto vicini a quelli teorici, ovvero a quelli previsti considerando l’energia necessaria a rompere i forti legami chimici primari dei cristalli o delle macromolecole che li compongono.

In questa tesi saranno presi in considerazione materiali compositi a fibre lunghe e matrice polimerica, spesso chiamati brevemente FRP (Fiber Reinforced Polymer).

I materiali compositi a matrice polimerica presentano diversi vantaggi rispetto ai materiali strutturali convenzionali, quali un’elevata resistenza a trazione, eccellente resistenza a corrosione, basso peso specifico, nonché la possibilità di variarne la composizione, e quindi le proprietà a seconda delle esigenze.

Le tecnologie di produzione, che prevedono la combinazione della matrice con fibre disposte secondo direzioni predeterminate in fase di calcolo strutturale, permettono di realizzare un materiale con proprietà meccaniche ottimizzate nei riguardi del particolare stato tensionale cui sarà soggetto in opera. Ne deriva la più importante peculiarità dei materiali compositi rispetto a quelli isotropi: la loro progettabilità.

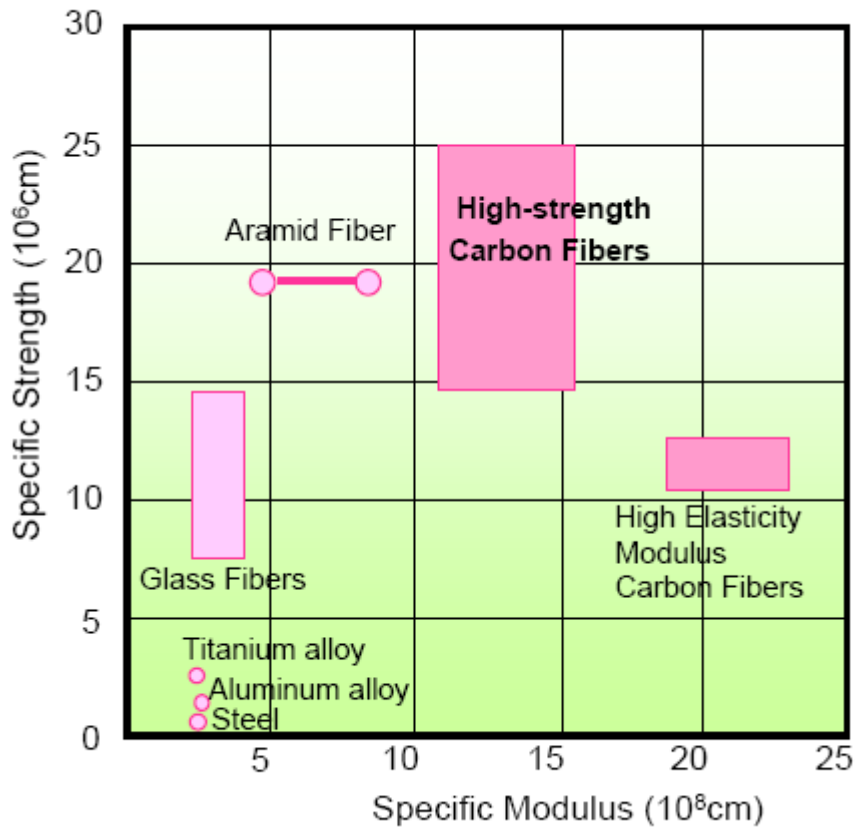


Fig. 1.1 Comparazione fra diversi materiali [Fonte: Toray]

## 1.2 I materiali costituenti

Le proprietà finali dei materiali compositi dipendono essenzialmente da quelle dei vari componenti utilizzati per la loro produzione. I fattori più importanti che ne caratterizzano il legame costruttivo sono:

- Le proprietà meccaniche delle fibre;
- Il loro orientamento;
- La loro lunghezza;
- Le proprietà chimiche delle fibre;
- Le proprietà meccaniche della matrice polimerica;
- Le proprietà chimiche della matrice;
- Il comportamento all'interfaccia fra fibra e matrice (adesione).

I materiali più utilizzati nella fabbricazione di manufatti

strutturali in materiale composito sono: fibre di vetro, fibre aramidiche (Kevlar, Twaron) e fibre di carbonio. Le matrici più utilizzate sono i polimeri termoindurenti, poiché facilmente lavorabili e poco costose, quali resine fenoliche, poliesteri, epossidiche e vinilesteri.

Di seguito saranno trattate le fibre di carbonio e resine epossidiche.

### 1.2.1 Fibre di Carbonio

Le fibre di carbonio dominano il campo delle fibre ad alto modulo ed ad alta resistenza per la fabbricazione di compositi ad elevate prestazioni, ma il loro maggior difetto è l'elevato costo.

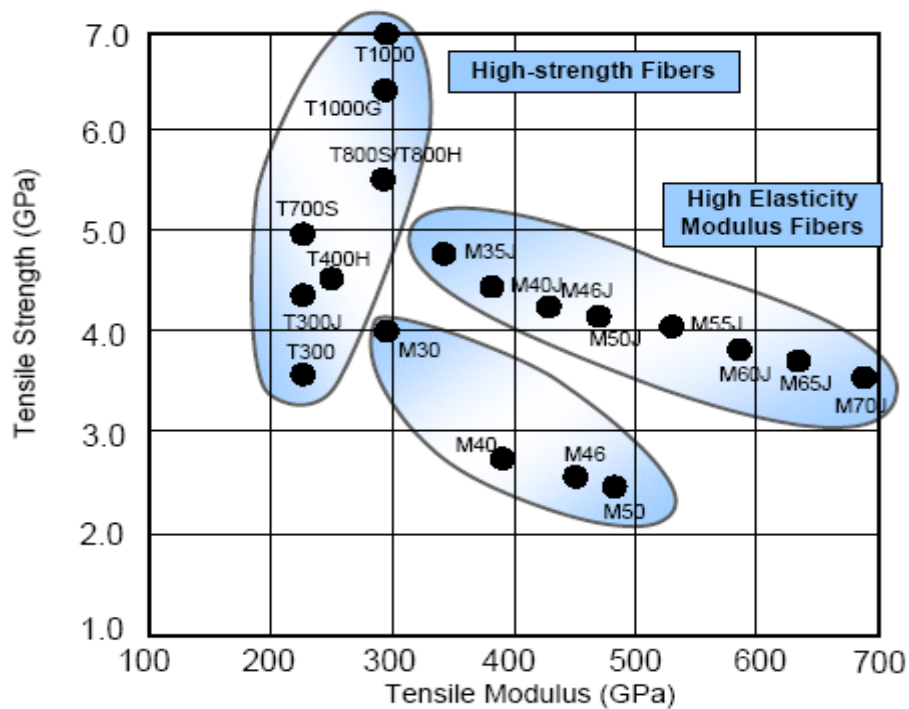


Fig. 1.3 Principali tipi di fibra di carbonio [Fonte: Toray]

Le fibre di carbonio sono costituite principalmente da carbonio ibridizzato  $sp^2$  sotto forma di grafite. Nella grafite gli atomi di carbonio sono disposti a forma di esagoni in piani paralleli, detti grafeni: i legami molto forti fra gli atomi di carbonio situati in questi piani rendono elevato il modulo del materiale nella stessa direzione, mentre i legami deboli di Van der Waals, cioè quelli tra piani vicini,

rendono molto inferiore il modulo nella direzione ortogonale ai piani.

La struttura della fibra di carbonio, tuttavia, non è mai così cristallina come quella della grafite (generalmente, il termine “grafite” indica una fibra il cui contenuto di carbonio è superiore al 99%, mentre il termine “carbonio” indica un materiale in cui la percentuale di carbonio è compresa fra l’80% e il 95%). Il contenuto di carbonio nelle fibre dipende dalla temperatura raggiunta durante i trattamenti termici per la loro produzione; le caratteristiche strutturali della fibra di carbonio vengono dunque impartite in questa fase, facendo in modo che i piani ad alto modulo, del tipo presente nel cristallo della grafite, risultino il più allineati possibile con la direzione della fibra. Da qui la non isotropia della fibra.

Le fibre di carbonio si possono classificare in base al materiale precursore utilizzato nella fase di produzione, che può essere pece, rayon o il più diffuso poliacrilonitrile (**PAN**) (vedi Tab 1.3).

Proprietà	Da pece	Da Rayon	Da PAN
Gravità specifica	2,0	1,7	1,8
Resistenza a trazione [MPa]	1550	2070 – 2760	2480 – 4000
Modulo elastico a trazione [GPa]	380	415 – 550	200 – 345
Allungamento a rottura [%]	1	—	0,6 – 1,55
Diametro [ $\mu\text{m}$ ]	10 – 11	6,5	7 – 8
Coeff. Di dilatazione termica Assiale [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]	da $-1,6 \cdot 10^{-6}$ a $-0,9 \cdot 10^{-6}$	—	da $-0,7 \cdot 10^{-6}$ a $-0,5 \cdot 10^{-6}$
Trasversale [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]	$7,8 \cdot 10^{-6}$	—	$7 \cdot 10^{-6} - 10 \cdot 10^{-6}$

Tab. 1.4 Proprietà delle fibre di carbonio

Rispetto a molti altri materiali di diversa natura, come metalli e polimeri, le fibre di carbonio presentano un'elevata resistenza accompagnata ad una bassa densità, e quindi una resistenza specifica molto più elevata. In conclusione, fabbricare materiali compositi che abbiano come rinforzo fibre di carbonio permette di ottenere prodotti leggeri e, contemporaneamente, performanti.

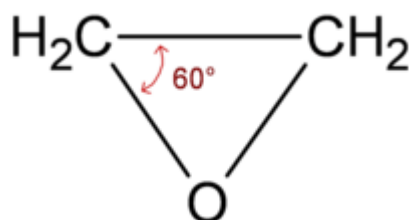
MATERIALE	RESISTENZA	DENSITA'	RESISTENZA SPECIFICA
	MPa	g/cm <sup>3</sup>	kN*m/kg
Nylon	78	1,13	69
Alluminio	600	2,7	222
Acciaio	2000	7,86	254
Titanio	1300	4,51	288
Fibra di Vetro	3400	2,6	1307
Fibra di Carbonio	4300	1,75	2457
Kevlar	3620	1,44	2514
Carbon-Epoxy Composite	1240	1,58	785

Tab. 1.6 Confronto della resistenza specifica tra diversi materiali

### 1.2.2 Resine epossidiche

Sarà descritto solo questo tipo di matrice, in quanto utilizzata nella sperimentazione della tesi.

Le resine epossidiche appartengono alla classe delle resine termoindurenti, sono preparate a partire da reagenti a basso peso molecolare e a bassa viscosità, in modo che possano facilmente impregnare le fibre. Sotto questo nome vengono classificate quelle resine che contengono gruppi funzionali ad anello, formati da due atomi di carbonio legato ad un atomo di ossigeno.



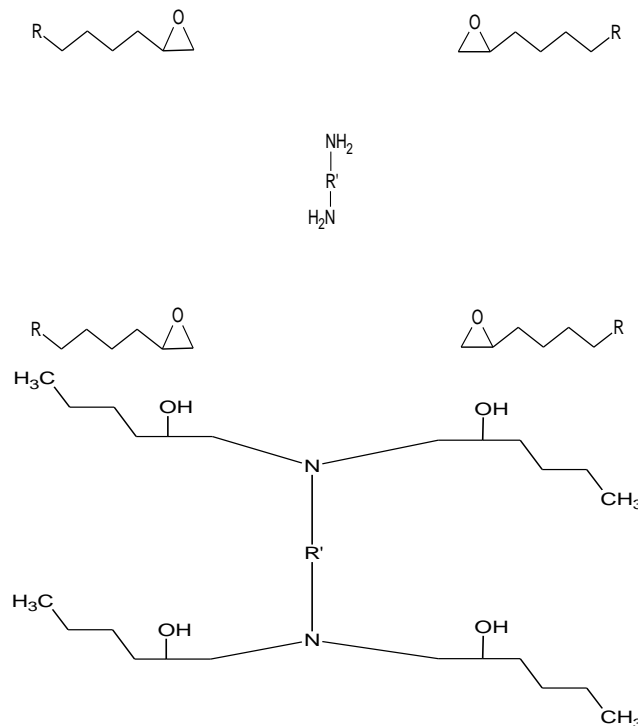
Come si può osservare l'angolo di legame è di 60°,

contrariamente a quanto ci si aspetterebbe da un atomo di carbonio ibridato  $sp^3$ : tale anello presenta una grande facilità all'apertura, conferendo così un'alta reattività alla molecola. Infatti basta semplicemente mescolare la molecola contenente il gruppo epossidico con il cosiddetto "hardner", un prepolimero contenente ammine, per ottenere la reazione di apertura dell'anello epossidico.

Le resine epossidiche per esser formate richiedono due prepolimeri:

- un prepolimero epossidico, che nasce dalla sintesi del bisfenolo A con una molecola contenente il gruppo epossido.
- l'induritore contenente ammine.

L'ammina dell'induritore reagisce con l'eossido rompendo l'anello e legandosi con un legame N-C agli atomi di carbonio di quattro catene diverse, reticolando così il polimero.



Nel campo delle matrici per compositi vengono utilizzate principalmente due formulazioni di base: la prima è una formulazione di-funzionale, utilizzata per applicazioni generiche, che può essere reticolata sfruttando come agente indurente un'anidride o un'ammina. L'altra è una forma tetra-funzionale, utilizzata invece per applicazioni aerospaziali e richiede alte temperature di reticolazione.

Le resine epossidiche sono più costose delle più diffuse resine poliesteri o fenoliche, ma, diversamente da queste, possiedono un'aderenza molto elevata e una migliore resistenza chimica, oltre a un'elevata stabilità dimensionale, caratteristica molto importante nel campo dei materiali compositi.

Proprietà	Cold curing	Hot curing
Viscosità [mPa·s]	600 – 1000	200 – 400 (a 60 °C)
Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	1,1	1,1
Resistenza a trazione [MPa]	60 – 80	70 – 85
Modulo elastico a trazione [GPa]	3,8 – 3,0	3,0 – 2,6
Allungamento a rottura [%]	1,9 – 7,5	4,5 – 8,0
Coefficiente di Poisson	0,35	0,35
Modulo di taglio [GPa]	1,1	1,0
Temperatura max di utilizzo [°C]	50 – 90 <sup>a</sup>	165

Tab. 1.4 Proprietà delle resine epossidiche



# Capitolo 2

## *Tessuti Unidirezionali*

## 2.1 I tessuti unidirezionali (UD)

Generalmente le fibre di carbonio non vengono utilizzate così come sono, ma vengono processate con i telai tessili al fine di ottenere dei veri e propri tessuti (intreccio di trama e ordito). Quando le quantità di fibre in una direzione (generalmente l'ordito) diventano predominanti, si hanno dei tessuti unidirezionali. Questi tipi di tessuti sono molto importanti in quanto permettono di sfruttare appieno le caratteristiche meccaniche delle fibre lungo direzioni precise. Lungo le altre direzioni possono essere presenti anche delle fibre di materiale differente con lo scopo di mantenere, il più possibile, la stabilità dimensionale del tessuto a secco senza però diminuirne la drappeggiabilità. Il principale vantaggio dei tessuti unidirezionali è la possibilità di poter posizionare la quantità ottimale di fibre esattamente dove le loro proprietà sono richieste. Inoltre le fibre UD si presentano macroscopicamente dritte, quindi rispetto a un normale tessuto, le prestazioni meccaniche sono notevolmente migliorate.

Vi sono vari metodi per mantenere le fibre primarie lungo la medesima direzione:

- Il Weaving, che consiste nel tessere la fibra principale con fibre di sostegno in trama.

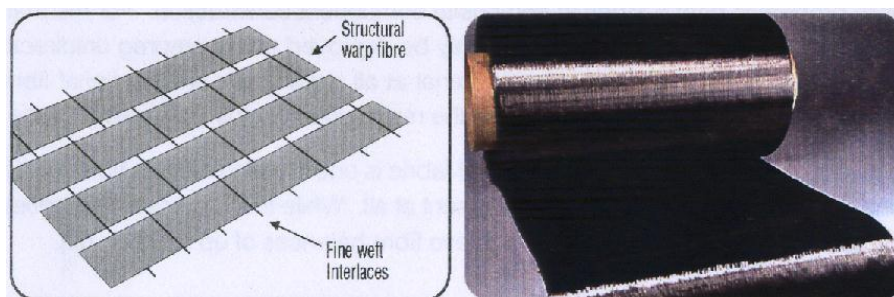


Fig. 2.1 Esempio di weaving

- Il bonding consiste nel legare assieme le fibre primarie con un altro materiale sulla superficie delle stesse. In genere si usano o "strip" sottili o molto più spesso "web", che coprano l'intera

superficie del filato, di materiale termoplastico o di adesivo termoindurente.

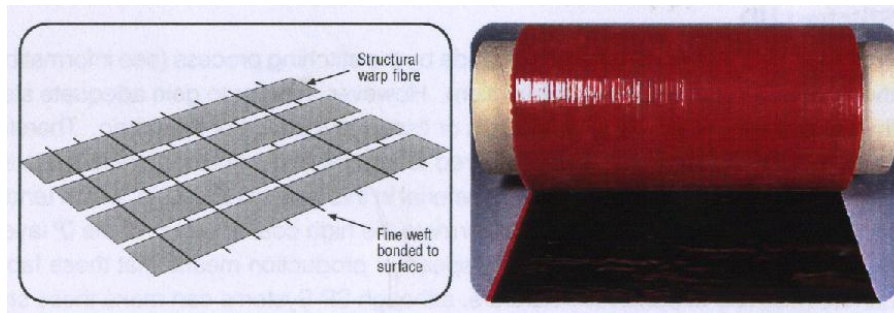


Fig. 2.2 Esempio di bonding

- Lo stitching invece prevede la cucitura delle fibre principali con le fibre in trama, anche in questo caso in materiale termoplastico o in adesivo termoindurente.

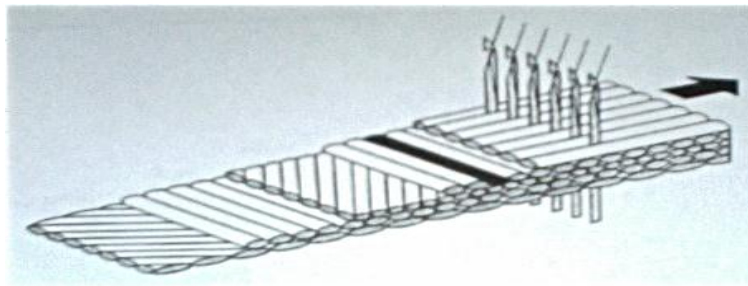


Fig. 2.3 Esempio di Stitching

## 2.2 Weaving

Poiché la resistenza a trazione della fibra è ottimale quando risulta totalmente allineata con la direzione dello sforzo, l'unidirezionale ideale è quello in cui tutte le fibre sono disposte lungo un'unica direzione. Tuttavia, la presenza delle fibre in trama, come avviene negli unidirezionali tradizionali, rappresenta un allontanamento da tale modello. Infatti, come si può osservare dalla figura 2.5, in cui s'ipotizza di avere una singola fibra fissata dalla trama (i pallini in figura) sottoposta a trazione  $\sigma_0$ , lo sforzo viene suddiviso in due componenti:

- $\sigma_x$  che è lungo la direzione di trazione e rappresenta lo sforzo resistente;
- $\sigma_y$  perpendicolare allo sforzo  $\sigma_x$ .

Quindi la presenza di fibre in trama riduce la resistenza a trazione poiché introduce uno sforzo lungo una direzione di minor resistenza della fibra stessa.

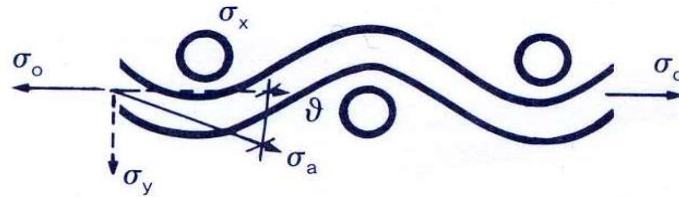


Fig. 2.4 Schema delle tensioni

Il weaving dipende dalla geometria della sezione delle fibre in trama, nonché dalla loro distanza reciproca.

## 2.3 Bonding

Il weaving nei tessuti unidirezionali tradizionali può essere risolto con l'utilizzo di web. Il web consiste in una rete di materiale termoplastico o termoindurente, a volte anche in fibre di vetro, passata in un bagno di adesivo. Successivamente il web viene fissato alle fibre di carbonio in genere attraverso calandratura, la quale, comprimendo rete e fibre e, contemporaneamente, riscaldando l'adesivo, permette la perfetta adesione e quindi la stabilità delle fibre primarie, mantenendo la drappeggiabilità del tessuto UD.

Evidentemente la presenza di un web costituisce, nel composito finale, una terza fase. Poiché il materiale utilizzato per il web è diverso da quello della matrice epossidica e delle fibre, bisogna valutarne l'aderenza con le altre due fasi e la capacità di trasmettere lo sforzo alle fibre di rinforzo.

## 2.4 Stitching

Sebbene lo stitching permetta di risolvere il problema del weaving, dato che il roving mantiene la sua caratteristica di linearità, la cucitura avviene tuttavia rompendo le fibre stesse che, quindi, perdono continuità. Inoltre, come nel caso del bonding, la fibra utilizzata per lo stitching è di un materiale terzo, diverso da matrice e rinforzo, che rappresenta perciò un “inquinante”.

## 2.5 Lo Spreading delle fibre

Dalla tabella 2.5 si possono ricavare i costi medi di mercato delle fibre di carbonio. Come si può osservare, minore è il titolo maggiore è il costo. Tale differenza è da imputare ai costi di produzione: infatti, a parità di velocità di produzione, una macchina impiega molto più tempo a produrre lo stesso peso di un filato da 3k, piuttosto che uno da 24k.

TITOLO	TEX	PREZZO
k	g/km	€/kg
3	200	40
6	400	35
12	800	18-20
24	1600	18-20

Tab. 2.5 Prezzo medio di mercato delle fibre di carbonio

Un problema degli UD, ma anche di tutti i tessuti tradizionali, è quello di non poter produrre tessuti che mantengano la caratteristica di leggerezza senza far lievitare i costi. Non è possibile fabbricare un tessuto da un tow a titolo alto (12-24 k) che abbia il medesimo peso di un tessuto ottenuto da roving a titolo basso (3-6 k). Infatti, per mantenere lo stesso peso, un tessuto, per esempio da 12k, dovrà avere un numero di tow per centimetro pari a un quarto di quello che si ha in un tessuto formato da filamenti da 3k. Ciò comporta dei problemi di stabilità dimensionale del tessuto a secco, nonché la diminuzione delle

prestazioni del materiale composito stesso. Infatti le caratteristiche del composito dipendono dalla frazione volumetrica di fibre, se si hanno meno tow per centimetro il composito risulterà molto meno performante in quanto sarà necessario utilizzare più matrice, che, essendo un polimero termoindurente, ha caratteristiche meccaniche inferiori.

Per far fronte a questo problema è stato sviluppato lo spreading, cioè l'“apertura” del singolo tow di fibre. Esso sfrutta la facilità con cui il roving si sfalda se trascinato su una serie di cilindri posti a certe angolature. Questo metodo permette un aumento della larghezza del tow pari a circa quattro volte la dimensione originale (come si può osservare in figura 2.6) e una conseguente diminuzione del titolo della fibra.

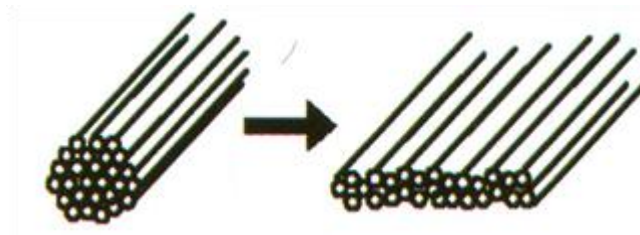


Fig. 2.6 Effetto dello spreading sul tow

Inoltre si hanno anche innalzamenti di alcune proprietà meccaniche: si possono notare un aumento, seppur minimo, della resistenza a trazione, imputabile al fatto che un maggior numero di singole fibre, dopo lo spreading, risultano allineate nella medesima direzione, ma soprattutto un miglioramento della resistenza a fatica.

Nei materiali compositi vi è una maggiore probabilità che una rottura cominci a originarsi nell'interfaccia tra matrice e fibra: migliore è l'adesione tra di essi, maggiore è la resistenza del composito. Come si può osservare dall'immagine 2.9, un UD Dynanotex ha una migliore capacità di impregnarsi grazie all'accentuamento del fenomeno della capillarità, quindi si avrà una maggiore quantità di fibre bagnate dalla resina, cui segue una migliore adesione.

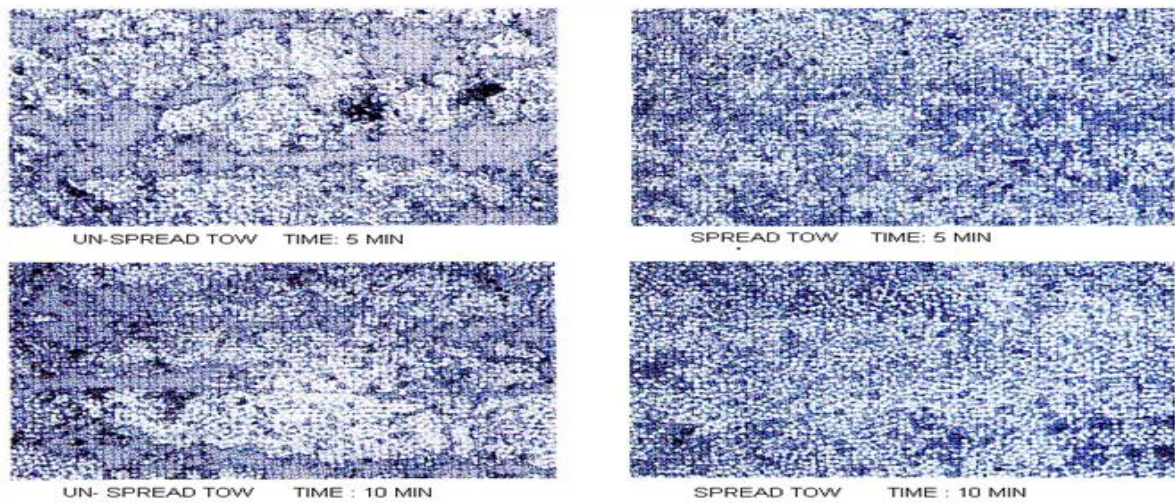


Fig. 2.7 Confronto d'impregnabilità tra spread tow e un-spread tow

Tuttavia questo processo presenta una serie di problemi rilevanti:

- Lo spreading sottopone la fibra a notevoli stress meccanici, poiché si applicano delle tensioni molto elevate per ottenere delle aperture significative.
- A causa delle elevate tensioni il numero dei passaggi attraverso le stazioni di spreading deve essere molto limitato per non compromettere l'integrità delle fibre stesse.
- Al processo di spreading viene spesso fatto seguire, immediatamente, una fase di preimpregnazione per poter mantenere lo stato tensionale delle fibre e non pregiudicare la stabilità dimensionale, poiché senza il processo di preimpregnazione la fibre che hanno subito il processo di spreading tendono a corrugarsi e perdono sia di processabilità che di prestazioni.





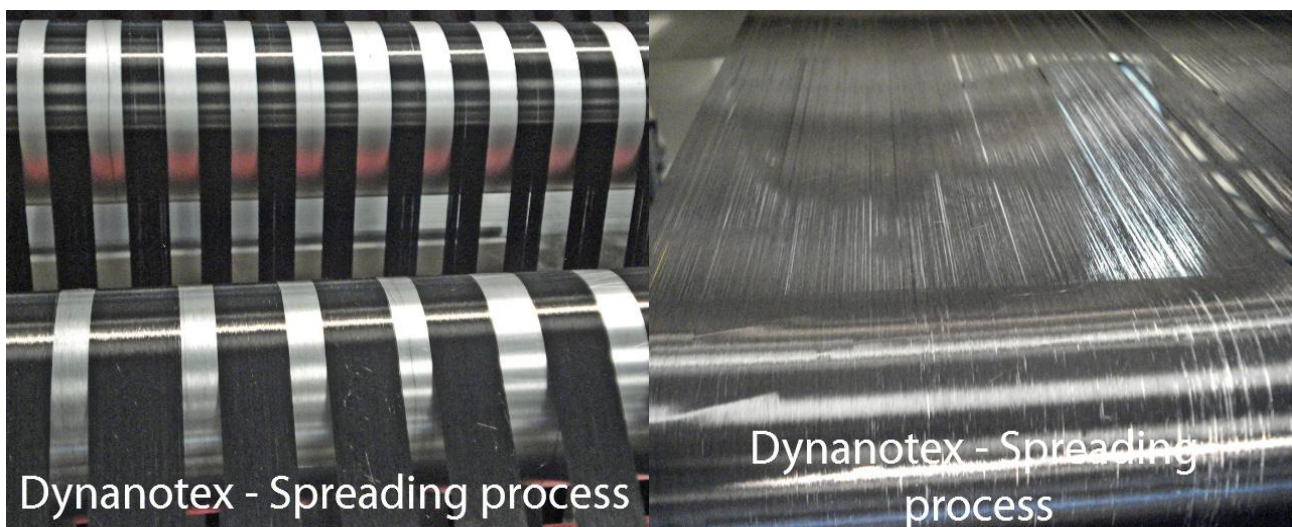
# Capitolo 3

## *Tessuto Unidirezionale* *Dynanotex*

### 3.1 Il Processo Dynanotex

Per far fronte ai limiti che i processi di spreading tradizionale presentano, l'azienda I.T.T. ha sviluppato e brevettato un nuovo processo, denominato Dynanotex.

Dynanotex è un sistema di produzione di rinforzi UD che sfrutta lo spreading dei tow di fibre per realizzare, a costi contenuti, tessuti leggeri da roving ad alto titolo. Il processo di spreading utilizzato da I.T.T. è stato brevettato ed è unico al mondo poiché, a differenza di tutti gli altri sistemi di spreading in commercio, esso ha la caratteristica poter eliminare i vincoli meccanici rappresentati dal sizing, permettendo così al tow non solo di stendersi (cioè di aprire le singole fibre in modo tale che da una sezione circolare-ellittica si ottenga una sezione piana), ma anche di poter allineare una maggiore quantità di fibre lungo la medesima direzione del roving. Un'altra caratteristica peculiare del sistema di spreading Dynanotex è di poter lavorare a tensioni pressoché nulle: in tal modo si riescono ad evitare stress e tensioni residue nella fibra, tipiche delle lavorazioni di spreading per prepreg tradizionali, e quindi di poter ripetere il processo per molte volte. Ciò permette di avere delle aperture dei singoli tow maggiori rispetto agli altri processi di spreading con allargature fino a cinque volte il diametro originale del roving.



Grazie a queste proprietà, Dynanotex permette la produzione di un tessuto secco stabile dimensionalmente, che non richiede una fase di preimpregnazione, evitando quindi tutti i problemi di tensioni residue all'interno del prepreg e di stoccaggio.

### 3.2 La stazione di adesivazione

Ciò che si ottiene, dunque, dal processo di spreading Dynanotex è un tessuto secco senza tensioni residue e che non richieda un'immediata stabilizzazione delle fibre attraverso prepreg. Tuttavia, come ogni UD, il tessuto Dynanotex necessita una soluzione al problema della stabilità dimensionale a secco. Come si può osservare dalla seguente immagine (Fig. 3.4) alle stazioni di spreading vengono fatte seguire delle stazioni di adesivazione.

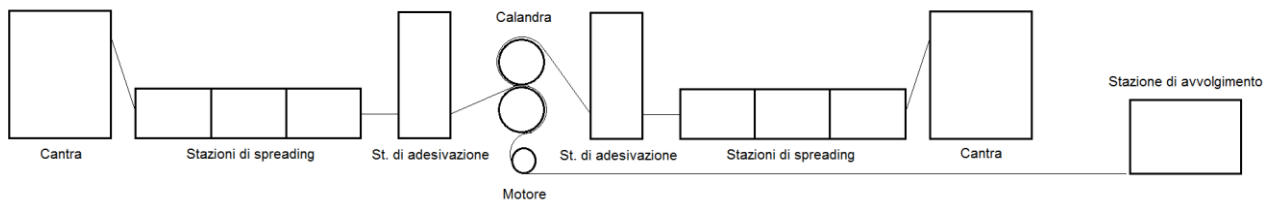


Fig. 3.4 Layout della macchina

La macchina di adesivazione consiste in due componenti collegate tra loro:

- Un elemento riscaldante
- Una pistola

L'elemento riscaldante permette di fondere l'adesivo, portandolo alla temperatura prefissata. Una volta fuso, il polimero viene portato alla pistola grazie a una pompa e a dei connettori riscaldati, in modo tale che l'adesivo si mantenga in temperatura. La pistola è montata su una guida che le permetta di muoversi nella direzione trasversale al movimento di avanzamento del tessuto. Impostando la frequenza di passaggi e la velocità di avanzamento del tessuto si può determinare la quantità di materiale spruzzato per metro quadro di tessuto. Attualmente l'azienda I.T.T. sta usando una pistola che permette di formare un getto sottile continuo, il quale viene depositato a spirale

grazie a un particolare ugello. Tale ugello presenta, all'uscita del getto, una serie di forellini orientati a diverse angolature, da cui viene fatta uscire dell'aria compressa. Così facendo, il getto viene fatto roteare e, assieme al movimento rettilineo lungo la guida, si ottiene un getto a spirale. Dalla tabella 3.1 si possono ricavare i dati tecnici della macchina utilizzata da I.T.T., tra cui le temperature e le pressioni di esercizio.

### Dati tecnici

<b>Struttura</b>	Modulare, composta da un blocco riscaldato e da un certo numero di elementi di spruzzo	
<b>Campo temperatura</b>	20...200° C (68...392° F) ± 0.5° C	
<b>Viscosità</b>	50...50.000 mPas, specifico per colla	
<b>Pressione aria</b>	<b>aria controllo</b>	5.5 bar
	<b>aria spray</b>	0.5...4 bar regolabili
<b>Connessione aria</b>	SP e SPM: filettatura interna 1/8" SPA: filettatura interna 1/4"	
<b>Connessione colla</b>	filettatura interna 1/4"	
<b>Tensione operativa</b>	200...240 Volt, 50/60 Hz	
<b>Potenza riscaldante</b>	200...1.000 Watt, dipendente dal tipo	

Tab. 3.1 Dati tecnici della macchina adesiva Robatech

Tuttavia, per evitare inconvenienti all'interno della caldaia e dei tubi riscaldati, si è scelto di utilizzare un'apparecchiatura di prova.

Tale apparecchiatura, come si può osservare dall'immagine 3.2, consiste in un contenitore pressurizzato in alluminio, in cui sarà introdotto il materiale adesivo. Il contenitore è stato circondato da due resistenze in mica e fissato direttamente alla pistola.



Fig3.2 Apparecchiatura di prova

Dopo la stazione di adesivazione è presente una calandra riscaldata che permette ai due tessuti provenienti dalle rispettive stazioni di spreading e adesivazione, di aderire tra loro grazie all'adesivo appena applicato per formare dei DL (Double Layer).

### 3.3 Adesivo Poliammidico

L'adesivo deve presentare le seguenti caratteristiche particolari:

- Mantenere la stabilità dimensionale a secco senza pregiudicare la drappeggiabilità del tessuto;
- Non rappresentare un "inquinante", cioè una fase terza rispetto a matrice e rinforzo;
- Poter essere utilizzato con la macchina di adesivazione.

L'adesivo utilizzato da I.T.T attualmente è un polimero termoplastico a base poliammidica, commercializzato da Henkel col nome di Macromelt 6790. Le caratteristiche principali sono descritte dalle tabelle 3.2 e 3.3.

MACROMELT 6790		
Caratteristiche tipiche	Unità di Misura	Valore
<b>Densità</b>	g/cm <sup>3</sup>	0,97
<b>Punto di infiammabilità</b>	°C	>300
<b>T di applicazione</b>	°C	200-240
<b>Viscosità Brookfield</b>	mPas a 210°C	1900
<b>Intervallo di rammollimento</b>	°C	170-180
Caratteristiche meccaniche		
<b>Carico snervamento</b>	MPa	4
<b>Carico a rottura</b>	MPa	4
<b>Allungamento</b>	%	200
<b>Modulo elastico 2%</b>	MPa	50

Viscosità Brookfield	Temperatura
mPas	°C
2400	200
1900	210
1400	220
1100	230
800	240

Tab.3.2 e 3.3 Caratteristiche di Macromelt dichiarate da Henkel

Come si può osservare, la poliammide adoperata presenta le caratteristiche fisiche sufficienti per essere utilizzata dalla macchina di adesivazione, infatti, la viscosità alla temperatura di esercizio è sufficientemente bassa per essere applicata come descritto nel paragrafo precedente.

Inoltre, una volta applicato al tessuto Dynanotex, tale polimero adempie perfettamente il compito di mantenere sia la stabilità delle fibre, sia la drappeggiabilità del tessuto: Macromelt a temperatura ambiente è un termoplastico molto flessibile che permette di maneggiare il tessuto a proprio piacimento senza che le fibre si sfaldino.

Il problema dell'utilizzo della poliammide Macromelt, come vedremo nel dettaglio nelle prossime pagine, è la sua incapacità di legarsi in qualche modo alla matrice e alle fibre, e ciò si può verificare facilmente confrontando le proprietà interlaminari del tessuto Dynanotex con quelle di altri unidirezionali.

A tale proposito si confrontano i valori dell'ILSS di diversi UD Dynanotex (tabella 3.5) con un UD tradizionale (tabella 3.4), il cui valore di resistenza interlaminare è indicativo di tutta questa categoria di filati.



20025 Legnano (MI) - ITALY  
 Tel. +39-0331-467.555 fax.: +39-0331-467.777  
 e mail: info.IT@seal.it web site: www.seal.it

*Data Sheet of Advanced Matrix Prepreg TEXIPREG® ET223*

## HS300 ET223 CARBON UD PREPREG

### PREPREG PROPERTIES

<i>Uncured Prepreg</i>	<i>Unit</i>	<i>Typical values</i>	
Carbon Fiber	-	T 600 24K	
<i>Cured Material Properties (*)</i>	<i>Unit</i>	<i>Typical Value</i>	<i>Standard Method</i>
Cured ply thickness	mm	0.21	
Tensile Strenght (normalized @ F.V.% = 60)	MPa	1710	ASTM D 3039
Tensile Modulus (normalized @ F.V.% = 60)	GPa	140	ASTM D 3039
Flexural Strenght (F.V.% = 50)	MPa	1050	ASTM D 790
Flexural Modulus (F.V.% = 50)	GPa	105	ASTM D 790
I.L.S.S.	MPa	70	ASTM D 2344
Compressive Strength	MPa	t.b.d.	Modified ASTM D 695 (SACMA SRM 1-88)

Tab.3.4 Proprietà fisico-chimiche e meccaniche di HS300 ET223 Carbon UD preimpreganto con una resina epossidica standard.

Prodotto	ILSS
Nome	MPa
HS15/130-SBT-1	38,63
HS15/130-SBT-2	37,83
HS15/130-SBT-3	38,80

Tab.3.5 Proprietà meccaniche interlaminari di diversi UD Dynanotex impregnati con una resina epossidica standard.

Come si può osservare i valori di resistenza interlaminare degli UD Dynanotex sono circa la metà rispetto a quelli riscontrati negli UD tradizionali.

Poiché le proprietà interlaminari sono determinate dalla resistenza all'interfaccia tra le diverse fasi, è chiaro, come si riscontra nei dati della tabella, che l'adesivo poliammidico non ha sufficiente adesione con matrice né fibre, determinando così un netto abbassamento delle proprietà di resistenza interlaminari del tessuto Dynanotex.





# Capitolo 4

## *Adesivo Epossidico*

## 4.1 Il polimero epossidico

Alla luce delle osservazioni fatte finora, ciò che pregiudica le caratteristiche meccaniche interlaminari dei tessuti UD è la presenza di una fase terza, di un “inquinante”, rispetto fibre e matrice. Ideale sarebbe quindi l'utilizzo di un materiale che mantenga la stabilità dimensionale e drappeggiabilità del tessuto secco, ma che in un secondo momento, durante la fase d'impregnazione delle fibre, in qualche modo si dissolva nella matrice.

Riassumendo il materiale che andiamo a cercare deve presentare le seguenti caratteristiche:

- Buone tenacità e flessibilità;
- Buona capacità adesiva;
- Viscosità del fuso sufficientemente bassa;
- Capacità di dissolversi nella matrice.

Un materiale attualmente presente in commercio e avente tali proprietà è il prodotto phenoxy Grilon<sup>®</sup> che, come si può vedere dall'immagine 4.1, si dissolve nella matrice, seppur in modo parziale. Il problema riscontrato in questo materiale è, in primis, la sua commercializzazione solamente sotto forma di fibre da tessere in trama o da cucire, ripresentando dunque gli svantaggi già descritti per il weaving e lo stitching. In secondo luogo le temperature di fusione di tale polimero sono molto più alte di quelle raggiungibili dalla macchina di adesivazione. Inoltre, una volta fuso, Grilon risulta essere pericoloso a causa dell'evaporazione dei solventi in esso contenuti.

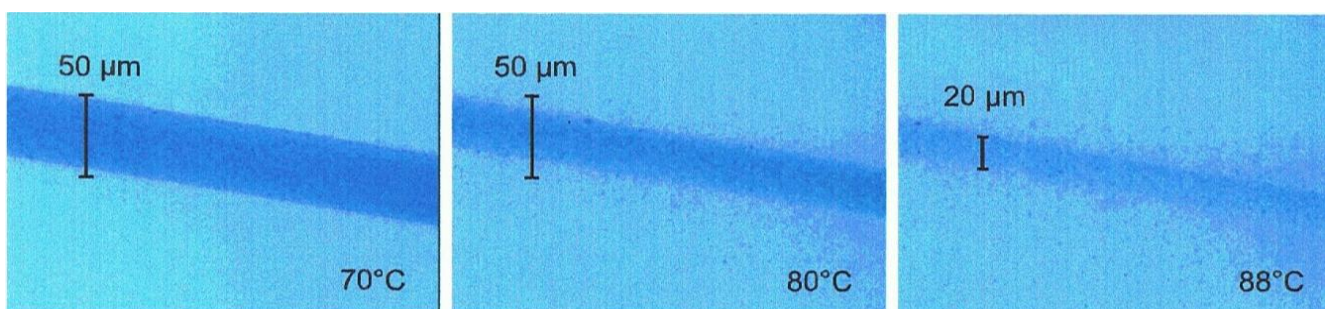


Fig. 4.1 Dissoluzione di una fibra di phenoxy Grilon in matrice epossidica

La soluzione da me individuata, soggetto della tesi, è l'utilizzo di un prepolimero epossidico che sia allo stato solido a temperatura ambiente. Tale materiale non evidenzia ancora le proprietà termoindurenti proprie delle resine epossidiche ma si comporta come un termoplastico amorfo. La formula di struttura di tale polimero è mostrata qui di seguito (fig. 4.2):

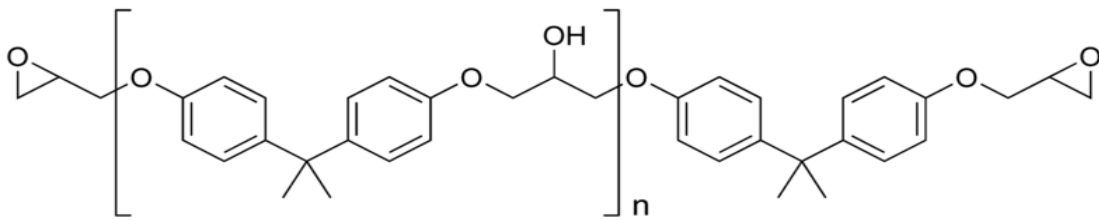


Fig. 4.2 Formula del prepolimero epossidico

Dalla natura del polimero appena descritto, si possono ragionevolmente desumere i seguenti comportamenti:

- Essendo un polimero termoplastico, tramite riscaldamento oltre la sua temperatura di fusione esso risulta essere applicabile alle fibre con la macchina di adesivazione.
- Essendo, appunto, un prepolimero della stessa natura della futura matrice, dovrebbe legarsi chimicamente e quindi dissolversi in essa e qualora non dovesse dissolversi del tutto, esso presenterebbe proprietà meccaniche, come tenacità e resistenza, comunque migliori rispetto alla poliammide utilizzata.

Ciò che non è prevedibile e che richiede la prova pratica è la valutazione dell'effettiva aderenza di tale polimero alle fibre e della drappeggiabilità del tessuto UD.

## 4.2 Epikote 1007 1003 e 1001

La scelta del prodotto è andata alle resine della famiglia Epikote prodotte da Momentive, leader europea e mondiale nella produzione di resine epossidiche. I tipi 1007 1003 e 1001 sono stati selezionati come

i più idonei all'applicazione che si sta studiando e si differenziano tra loro per proprietà fisiche e meccaniche:

Proprietà	Unità di misura	Epikote		
		1007	1003	1001
Densità a 25°C	kg/l	1,20	1,19	1,19
Tg	°C	67	44	26
Melting Range	°C	103-105	72-84	50-62
Hydroxyl Group Content	mmol/kg	3420	2900	2400
Peso Molecolare		2870	1300	880

Tab. 4.3 Confronto di proprietà fisiche di Epikote 1007 1003 e 1001.

Dalla lettura della tabella riportata nelle TDS delle resine Epikote, si possono trarre le seguenti indicazioni:

- Dal valore dei pesi molecolari si può desumere una maggiore flessibilità e tenacità dal tipo 1007 rispetto ai 1003 e 1001. Infatti, attraverso il peso molecolare si possono prevedere quali saranno le proprietà meccaniche del polimero: la lunghezza della molecola dipende dal numero di volte che l'unità ripetitiva viene reiterata lungo la catena, quindi maggiore sarà il peso molecolare, più sarà lungo il polimero. La lunghezza di una molecola polimerica influisce inoltre sul comportamento del polimero sotto sforzo, in particolare un materiale costituito da una molecola con una catena più lunga risulta essere più deformabile. Dalla lunghezza della catena dipende, infatti, la probabilità che la molecola formi degli entanglements, cioè degli aggrovigliamenti, da cui, sotto sforzo, essa si districa, deformandosi: minore è la facilità con cui la catena scioglie gli entanglements, minore è la deformabilità di un polimero. Di conseguenza, maggiore è il PM, maggiore risulta la lunghezza, quindi la probabilità che si formino entanglements e infine la deformabilità.
- Dai valori forniti dalle tabelle si può ragionevolmente affermare che il prepolimero epossidico Epikote 1007 ha maggiori capacità adesive degli altri due prodotti: la capacità di un materiale di adesivarsi a un altro dipende dal numero di gruppi ossidrilici -OH

che la sua struttura molecolare contiene. La quantità di tale gruppo all'interno di una molecola viene misurato dall'Hydroxyl Group Content che appunto è molto maggiore in E1007 che in 1003 e 1001.

- Si può prevedere, inoltre, che i due polimeri E1001 e 1003 saranno molto meno viscosi di 1007, poiché la lunghezza di una molecola determina anche la sua viscosità: maggiore è il suo PM, maggiore sarà la sua viscosità. Dal grafico sottostante si può osservare l'andamento della viscosità del fuso in funzione della temperatura di quest'ultimo, immaginando che tale andamento sia seguito anche dagli altri due polimeri, solo con valori di viscosità decisamente più bassi.

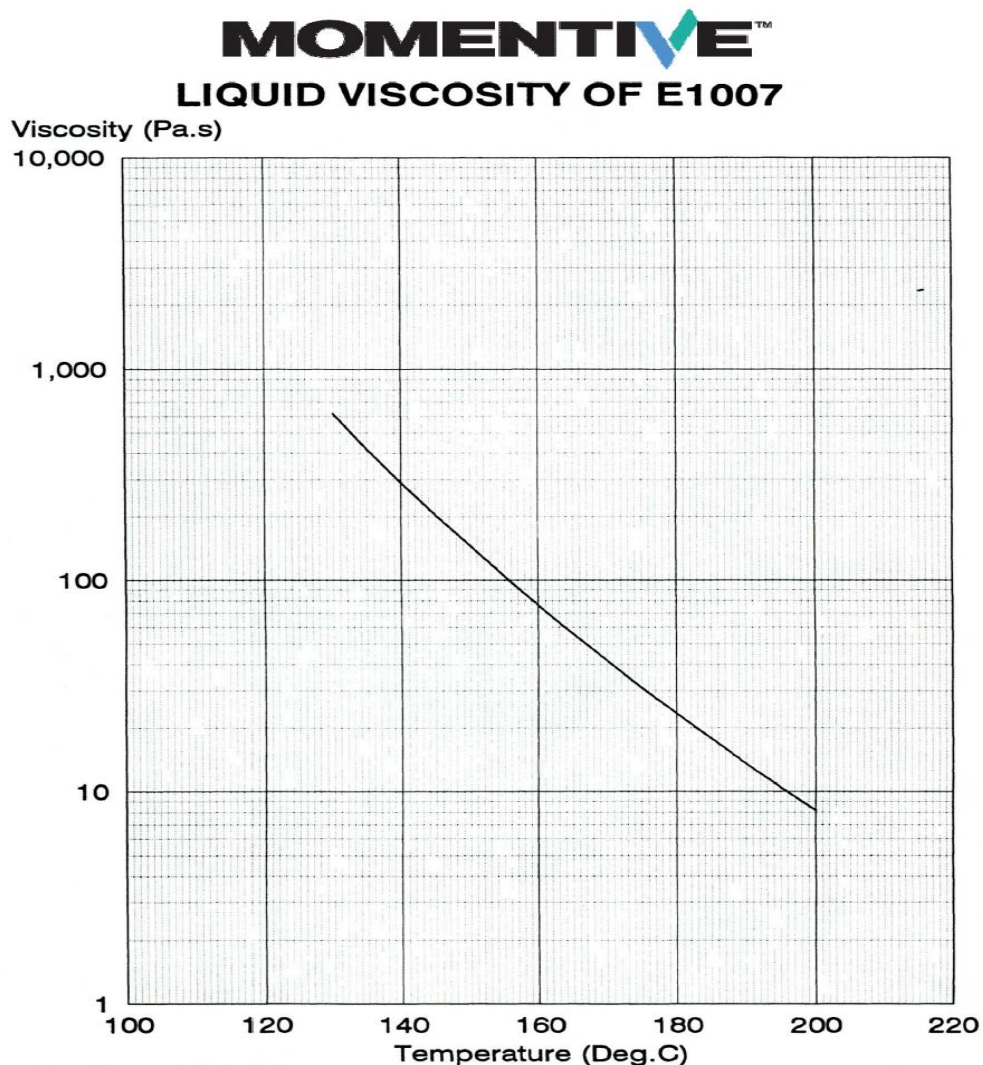


Grafico 4.5

Nella scelta del giusto polimero da impiegare, bisognerà trovare un compromesso cercando di ottenere una buona flessibilità e tenacità mantenendo tuttavia una viscosità sufficientemente bassa. In tal senso, l'utilizzo del polimero epossidico E1007 sarebbe ottimale per le sue proprietà meccaniche, ma troppo viscoso anche a temperature attorno ai 200°C, oltre alle quali, tuttavia, è sconsigliabile spingersi perché si è notato che a tali temperature il polimero si deteriora facilmente. D'altro canto il comportamento viscoso di Epikote 1001 alle alte temperature sarebbe ottimale per l'applicazione con la macchina di adesivazione, ma la fragilità fa di questo polimero un materiale inadatto al mantenimento della drappeggiabilità del tessuto.

Una buona soluzione al problema dell'eccessiva viscosità del fuso è la creazione di un blend con Epikote 1003. La scelta delle quantità relative dei due polimeri, in modo da ottenere un appropriato compromesso tra bassa viscosità, così da permettere l'impiego del polimero nella macchina, e buona flessibilità, affinché la drappeggiabilità non venga compromessa, viene lasciata all'esperienza. In tal senso, bisognerà porre attenzione alla necessità che le temperature ambientali di stoccaggio del tessuto, specialmente quelle estive, siano inferiori alla  $T_g$  del blend polimerico, affinché l'adesivo non rammollisca e non comprometta l'utilizzo dell'UD stesso.

Il blend ottenuto miscelando 70% di E1007 e 30% di E1003 è risultato, dalle prove effettuate (consistenti semplice spruzzatura attraverso l'apparecchiatura), avere una viscosità adatta per l'applicazione e una temperatura di transizione vetrosa sufficientemente alta.

Tuttavia l'apparecchiatura di prova non permette di utilizzare polimeri con tale viscosità, poiché le pressioni di spinta normalmente in gioco nella macchina (oltre le 10 atm) non sono supportate dal contenitore in alluminio, il cui limite massimo è circa 3 atm. Per ovviare a tale problema si è scelto di utilizzare Epikote 1001: il basso intervallo di temperatura di fusione e la bassissima viscosità già a 175 °C fanno di E1001 il polimero ideale per l'impiego con

l'apparecchiatura di prova. Bisogna però anche considerare che le sue proprietà meccaniche potrebbero compromettere la drappeggiabilità del tessuto, poiché esso è un polimero molto rigido e fragile. Ad ogni modo, per le finalità di questa tesi, i test necessari possono essere eseguiti anche con questo polimero: infatti, ciò che ci si aspetta è un assorbimento del polimero epossidico da parte della matrice, quindi E1001 può descrivere anche il comportamento degli altri prodotti presentati.





# Capitolo 5

## *Prove meccaniche*

## 5.1 Prova ILSS (Interlaminar Shear Strength)

Per verificare la reale dispersione del polimero epossidico nella matrice del composito si è ricorso ad un test di taglio interlaminare denominata ILSS (Interlaminar Shear Strength). La prova ILSS si riferisce ad una frattura lungo il piano della laminazione: infatti questo test meccanico dà una precisa valutazione sulla “bontà” della matrice e della sua interfaccia con le fibre di rinforzo. Essa viene eseguita su provini short beam con un rapporto lunghezza spessore (L/h) molto piccolo, secondo la norma UNI EN ISO 14130:1999. In tal modo si ha una preponderanza dello sforzo di taglio, in particolare si genera uno sforzo che tende a tagliare le fibre di rinforzo (non sufficiente tuttavia a romperle) e uno che tende a delaminare il composito. Di conseguenza il provino si rompe per taglio interlaminare con un cracking lungo un piano orizzontale fra le lamine.



Fig. 5.1 Cracking interlaminare a seguito della prova ILSS

In seguito è riportato lo schema per l’attrezzatura di prova, in accordo con le norme UNI EN ISO 14130:1999

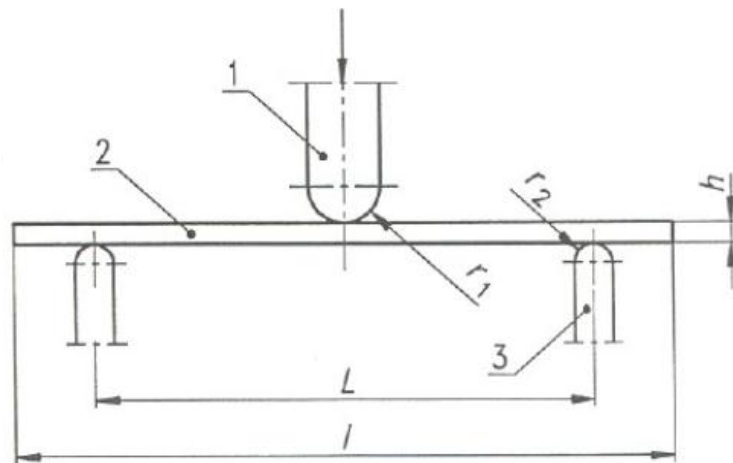


Fig.5.2 Schema dell'attrezzatura di prova

Il rapporto lunghezza spessore raccomandato dalla norma ha valore pari a 10: le dimensioni dei provini consigliate dalla norma, mostrate nell' immagine 5.3, e adeguate alla macchina di prova sono:

Spessore, $h$ mm	Lunghezza totale, $l$ mm	Larghezza, $b$ mm
$2 \pm 0,2$	$20 \pm 1$	$10 \pm 0,2$

Fig. 5.3 Dimensioni del provino relative tolleranze secondo la norma ISO

## 5.2 Preparazione provini

I provini sono stati ricavati da una lamina preparata attraverso il metodo d'infusione (tramite una resina standard per tale tipo di lavorazione: Hexion RIM235 più indurente RIM 233), al quale viene fatto seguire una fase di post-curing a circa 80°C.

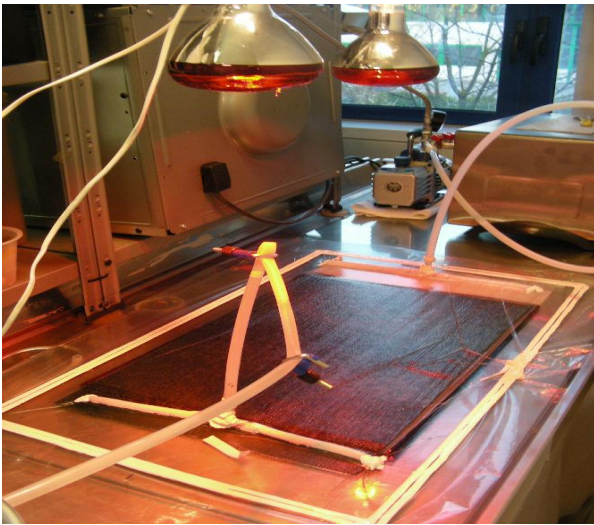


Fig. 5.1 Preparazione laminato per infusione



Fig. 5.2 Laminato prima post-curing

Si è deciso di produrre due laminati, uno con l'adesivo poliammidico, uno con quello epossidico, e di impregnarli entrambi con la medesima resina: ottenendo così parità di prestazioni della matrice e mantenendo anche lo stesso rapporto d'impregnazione (pari circa al 26,5% del peso), si possono confrontare i dati.

Durante la produzione dei laminati, si è voluto anche confrontare la drappeggiabilità dei due tessuti secchi prodotti con i diversi adesivi, e, nonostante il polimero epossidico sia fragile e quindi la drappeggiabilità sia un po' compromessa, le fibre rimangono unite e compatte e quindi maneggevoli.

I provini sono stati ricavati dai laminati con una fresa elettronica Roland MDX 540 e i campioni ottenuti ad un primo sguardo risultano essere omogeni e ben impregnati dalla resina della matrice, come si può osservare nelle figure sottostanti:



Fig 5.3 e 5.4 Fresa Roland MDX 540 e provino ottenuto

### 5.3 Attrezzatura di prova

I test sono stati effettuati con Dinamometro elettromeccanico MTS Alliance RF 300.

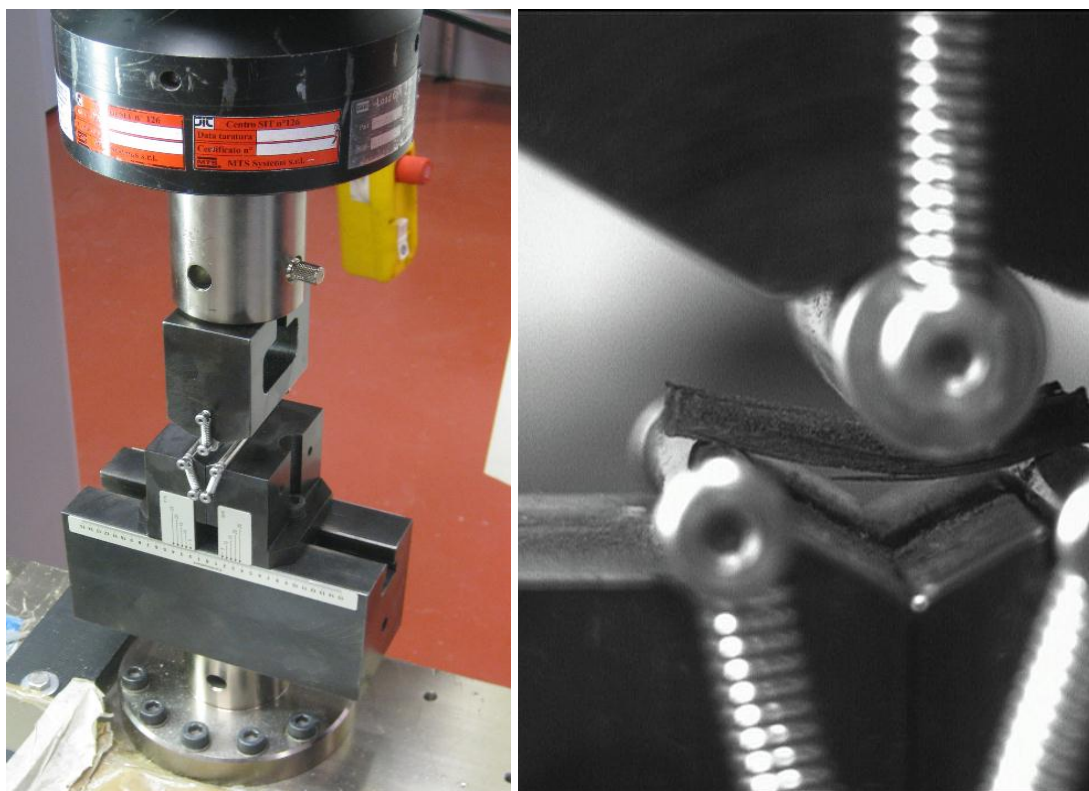


Fig. 5.4 e 5.5 MTS Alliance RF 300 e particolare durante una prova

La prova è stata condotta in controllo di spostamento, con una velocità di avanzamento del naso mobile di 1.0 mm/min., come da norma.

## 5.4 Risultati

I provini ricavati da entrambi i laminati si sono tutti delaminati in modo corretto, cioè presentando o un cracking interlaminare, come in figura 5.6 e 5.7, o un taglio multiplo in corrispondenza delle facce corte:

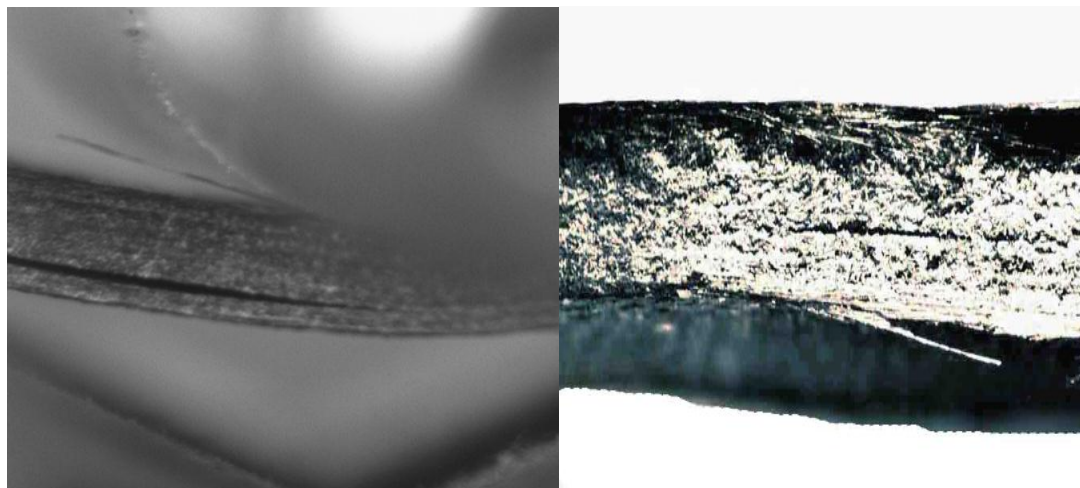


Fig. 5.6 e 5.7 Cracking interlaminari durante la prova e a 50 ingrandimenti

I risultati ottenuti sono riassunti nelle tabelle e grafici seguenti:

Specimen	Width	Thickness	Peak Load	Short Beam Strength
#	mm	mm	N	MPa
1	10,0	2,0	757	28,4
2	10,0	2,0	975	36,6
3	10,0	2,0	783	29,4
4	10,0	2,2	995	33,9
5	10,0	1,8	824	34,3
6	10,0	1,9	910	35,9
7	10,0	2,0	858	32,2
8	10,0	2,0	780	29,3
9	10,0	2,0	840	31,5
✓ Valore medio / mean	10,0	2,0	900	34,1
Deviazione standard		0,1	72	2,0
COV %		6,70	8,01	5,88

Tab. 5.9 Shear Strenght per Dynanotex con l'adesivo epossidico

Specimen #	Width mm	Thickness mm	Peak Load N	Short Beam Strength MPa
1	10,0	2,4	594	18,6
2	10,0	2,4	671	21,0
3	10,0	2,3	531	17,3
4	10,0	2,4	637	19,9
5	10,0	2,3	557	18,2
6	10,0	2,4	642	20,0
7	10,0	2,0	511	19,2
8	10,0	2,0	522	19,6
9	10,0	2,7	687	19,1
10	10,0	2,3	575	18,8
11	10,0	2,2	602	20,5
✓ Valore medio / mean	10,0	2,3	593	19,3
Deviazione standard		0,2	61	1,1
COV %		8,54	10,20	5,58

Tab. 5.10 Shear Strenght per Dynanotex con l'adesivo poliammidico

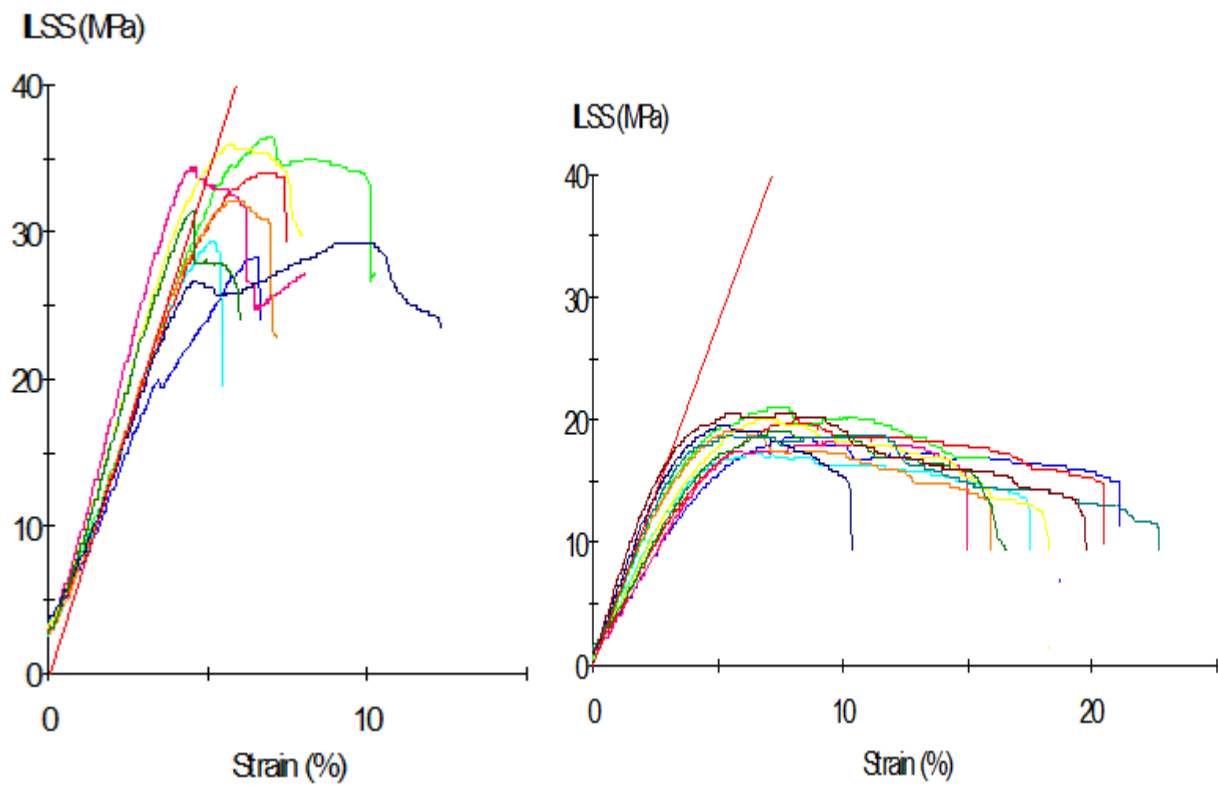


Fig. 5.11 e 5.12 Grafici sforzo-deformazione per Dynanotex con polimero epossidico e con poliammide.



# Capitolo 6

## *Conclusioni*

## 6.1 Commenti ai risultati delle prove meccaniche

Come si può osservare dalle tabelle del capitolo quinto, i risultati ottenuti sono di molto inferiori a quelli dichiarati in precedenza (capitolo terzo), tuttavia possono essere considerati validi analizzando due fattori:

- L'infusione, essendo una tecnica manuale, è soggetta a maggiori difficoltà e quindi a maggiori imperfezioni rispetto ad altre tecniche, come può essere la preimpregnazione.
- La resina epossidica utilizzata non dà luogo a elevate prestazioni rispetto a quella usata per produrre i provini, da cui si sono ricavati i dati citati all'inizio di questa tesi.

Nonostante questi risultati, ciò che si vuol far risaltare è la diversità dei comportamenti dei laminati prodotti con i due adesivi:

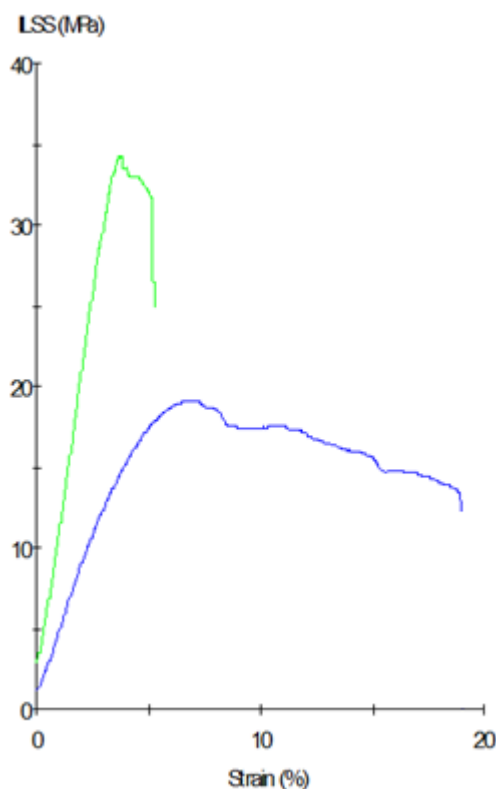


Fig. 6.1 Confronto curve stress-strain dei due laminati

Infatti, si può notare che il laminato prodotto con l'adesivo poliammidico non segue l'andamento tipico dei materiali compositi di questo tipo. Una volta raggiunto il massimo dello sforzo, riscontrato già a bassi valori di carico, il provino comincia a deformarsi

plasticamente: dopo un brusco calo del carico dovuto ad uno “slittamento interlaminare”, si registra un plateau in cui, nonostante lo sforzo sia costante, si hanno degli allungamenti e successivamente un altro calo dello sforzo dovuto ad un altro cedimento interlaminare. Questo comportamento è dovuto alla presenza della poliammide che, essendo per sua natura molto elastica, permette grandi allungamenti prima della rottura definitiva.

Di contro, ciò che si registra nel laminato prodotto con l’adesivo epossidico, è il comportamento di un materiale più resistente e più fragile allo stesso tempo (comportamento tipico dei compositi in generale e del polimero stesso in particolare): dopo aver raggiunto il massimo dello sforzo molto più rapidamente, il materiale ha un unico cedimento interlaminare, dopo il quale è completamente compromesso.

A verifica delle ipotesi fatte circa la dissolvenza del polimero epossidico nella matrice, si è voluto aprire un provino per ciascun laminato lungo il piano dove è avvenuto il cracking più vistoso, per poi confrontarli:



Fig. 6.2 Confronto delle superfici di cracking

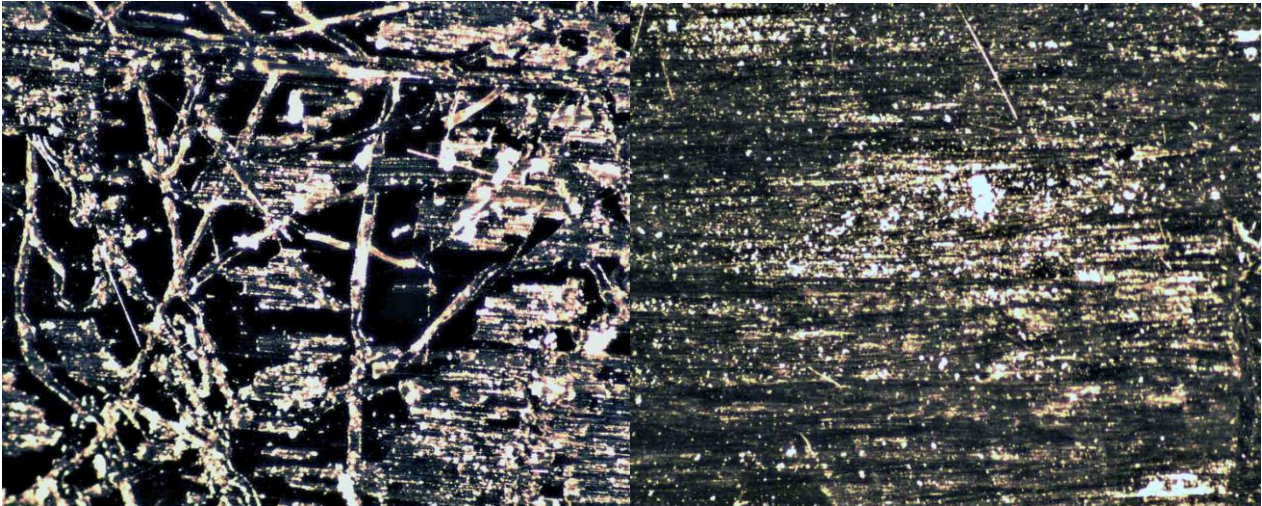


Fig. 6.3 e 6.4 Confronto a 100 ingrandimenti

Come si può osservare, i solchi presenti nel laminato contenente l'adesivo poliammidico sono dovuti proprio alla presenza del polimero stesso, che, non aderendo alle fibre né alla matrice e non legando chimicamente con quest'ultima, crea un'interfaccia, probabile sede della prima cricca, la quale propagandosi causerà in seguito la rottura del provino: così si spiegano i bassi valori di taglio interlaminare riscontrati.

Lo stesso non accade invece sulla superficie del cracking del provino proveniente dal laminato prodotto con l'adesivo epossidico, che si presenta perfettamente liscio: il polimero ha aderito alla matrice e sia durante l'impregnazione, grazie all'esotermicità della reazione della resina epossidica, sia durante il post-curing, si è disciolto in essa reagendo con l'indurente. Questo si traduce in un aumento delle prestazioni del laminato, dato che non è più presente un'interfaccia debole dove potrebbero originarsi le cricche, e quindi si potuto testare l'effettiva resistenza al taglio interlaminare della matrice.

In conclusione lo scopo della tesi è stato raggiunto: si è trovato un adesivo che migliori le proprietà interlaminari dei tessuti Dynanotex grazie alla sua capacità di dissolversi nella matrice.

## 6.2 Considerazioni economiche

Oltre a un effettivo vantaggio in termini di prestazioni, il polimero epossidico Epikote rappresenta anche un vantaggio economico per due ragioni:

- Il valore di mercato di Epikote è inferiore a quello della poliammide Macromelt 6790.

Prodotto	Costo
	€/kg
Macromelt 6790	22
Epikote 1001/1003/1007	5

Tab 6.5 Confronto prezzi di mercato dei diversi Epikote e di Macromelt.

- A parità di risultati in termini di applicabilità, poiché Macromelt 6790 ha una viscosità sufficiente per essere utilizzata dalla macchina di adesivazione a temperature superiori rispetto a quelle necessarie a Epikote, utilizzando quest'ultimo si ha anche un risparmio energetico e quindi economico.

## 6.3 Sviluppi Futuri

L'applicazione di tale polimero può sicuramente essere estesa a molteplici tecniche di produzione di materiali compositi, proprio grazie alle sue proprietà termoplastiche e per le sue capacità di legarsi e disciogliersi nella matrice epossidica. Un esempio può essere l'utilizzo mediante la sua spruzzatura nella fase di preforma del processo RTM (Resin Trasfer Moulding) al posto delle polveri di binder. La polvere, infatti, sono depositate sul tessuto da preformare e il tutto è posto in uno stampo caldo, nel quale la polvere fonde e funge da adesivo poiché stabilizza le fibre in funzione della pressatura vera e propria, in fase successiva. I problemi presentati dalle polveri, sono diversi:

- Le polveri, in quanto tali, sono dannose per la salute dell'uomo, quindi il loro utilizzo rende necessari una serie di dispositivi di sicurezza.
- Le polveri sono difficilmente controllabili, perciò è necessario distribuirle omogeneamente su tutta la preforma e in quantità superiori a quanto richiesto (mentre l'ideale sarebbe avere il binder solamente dove serve e nella minore quantità possibile).

L'utilizzo del polimero epossidico spruzzato sulle fibre nella fase di preforma può essere una valida alternativa al binder: infatti, esso può essere applicato ove richiesto e nelle quantità richieste e, non essendo sotto forma di polveri, non rappresenta un pericolo per la salute degli operatori.

Questo tuttavia è solo una delle applicazioni possibili, poiché il grande vantaggio che questo materiale apporta può essere sfruttato in molti altri modi.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Bhagwan D. Agarwal, Lawrence J. Broutman, *Analysis and Performance of Fiber Composites*, John Wiley & Sons, 1990
- [2] P. K. Mallick, *Fiber Reinforced Composites*, Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, 1993
- [3] Masayoshi Kamiura, *Toray Carbon Fiber Composite Materials Businesses*, Torayca & Advanced Composites Division, 2005
- [4] Torayca, *Type of carbon fiber*, Commercial Documentation N° AQ.866-1
- [5] Marino Quaresimin, *Comportamento statico e a fatica di laminati in composito tessuti*, Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali, Università di Padova, 2002
- [6] UNI EN ISO 14130 *Determinazione della resistenza al taglio interlaminare apparente per prova di flessione su appoggi ravvicinati*, novembre 1999
- [7] Vicki P. McConnell, *The making of carbon fiber*, High-Performance Composites, Volume 17 Number 1 January 2009, Gardner Publications Inc. Corporate
- [8] Giovanna Brusatin, *Scienza e Tecnologia dei Materiali Polimerici, Dispensa delle lezioni 2009-2010*
- [9] K. Bender, *Application Of Grilon MS Binder Yarn In Resin Transfer Molding*, EMS-GRILTECH

[10] Momentive, *Technical Data Sheet Epikote Resin 1007 1003 and 1001*

[11] Robatech, *Descrizione Prodotto AX 101S/SP*

[12] Henkel Technologies, *Macromelt 6790 S*



# Ringraziamenti

Vorrei ringraziare di cuore per il loro sostegno e aiuto:

L'azienda I.T.T. s.r.l. nella persona di Vasi Sara

La Professoressa Giovanna Brusatin

Gli amici tutti

Nonna Carla, Mario e Marina, Chiara, Silvia e la famiglia tutta

Nonni Giancarlo e Luciano

Giorgia

Beatrice

Papà Marco

...e te mamma, che sei stata e sempre sarai con me...