

IGF - XII Convegno Nazionale  
Gruppo Italiano Frattura  
Parma, 12-13 giugno 1996

CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI LAMINATI COMPOSITI  
IN FIBRA DI CARBONIO

*G. Nicoletto, M. Noli, E. Riva*

Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Università degli Studi di Parma  
Viale delle Scienze - 43100 Parma

Parole chiave: materiali compositi, tessitura, comportamento meccanico

## SOMMARIO

In questo lavoro sono presentati i risultati di una caratterizzazione sperimentale del comportamento meccanico di laminati compositi costituiti da tessuti realizzati con fibre di carbonio e con fibre aramidiche in matrice epossidica per impiego in campo automobilistico. Si sono determinate le risposte a trazione e a taglio nel piano in termini di resistenza a rottura e di rigidezza. Sulla base anche di un esame dei meccanismi di rottura si è evidenziato il ruolo della tipologia di tessitura sulla risposta meccanica dei laminati.

## 1. INTRODUZIONE

I materiali compositi a fibra lunga a matrice polimerica hanno avuto negli ultimi anni una diffusione industriale via via crescente anche grazie all'introduzione di fibre ad alta resistenza e ad alta rigidezza. Grazie infatti alle loro caratteristiche garantiscono ottime prestazioni in termini di rapporto peso/resistenza e di rapporto peso/rigidezza; prestazioni che diventano essenziali nelle strutture e nei componenti in cui uno dei requisiti fondamentale è la leggerezza [1]. Un campo di impiego ideale di tali materiali è il settore automobilistico. In questo lavoro si studiano i materiali con cui si realizzano le pelli della struttura a sandwich che costituisce il telaio di vetture da competizione di Formula 3.

I compositi realizzati con tessuti stanno diventando sempre più competitivi rispetto ai laminati unidirezionali per la loro migliore lavorabilità ed i ragionevoli costi di produzione. L'intreccio dei fasci di fibre dei tessuti consegue proprietà più bilanciate nel piano, maggiore resistenza all'impatto e migliore resistenza al taglio mentre uno svantaggio nell'uso dei tessuti è legato ad una riduzione delle caratteristiche di resistenza e rigidezza nel piano, [2]. Un ulteriore svantaggio nell'uso dei tessuti è associato alla

complessità ed alla difficoltà nel prevederne le prestazioni meccaniche poiché, a differenza dei laminati compositi unidirezionali già ampiamente studiati sia teoricamente sia sperimentalmente, sono influenzate da numerosi parametri, quali la densità dei fasci, le caratteristiche dell'ordito e della trama, il tipo di intreccio, la curvatura dei fasci di fibre, la sezione trasversale dei fasci di fibre ecc. [3, 4].

In questa memoria viene riportata una caratterizzazione sperimentale del comportamento meccanico di tessuti in matrice di resina epossidica. I due tessuti considerati sono costituiti da fibre di carbonio e da fibre aramidiche. In questo lavoro sono presentati e discussi i risultati di prove di trazione e di taglio nel piano. In particolare, vengono presentati gli andamenti e le variazioni delle principali caratteristiche meccaniche al variare della deformazione ed alcune osservazioni sui meccanismi di rottura. Questo studio rientra in una attività di ricerca sullo sviluppo di modelli del legame microstruttura-proprietà meccaniche dei tessuti realizzati in materiale composito.

## 2. METODOLOGIA SPERIMENTALE

### 2.1 Materiali

Si definiscono inizialmente alcuni termini necessari a caratterizzare un tessuto. Un tessuto è costituito da fasci di fibre disposti secondo due direzioni perpendicolari tra loro, chiamati ordito e trama e sono tra loro interlacciati secondo diversi schemi. Negli schemi di Fig. 1 la trama è orientata verticalmente e l'ordito orizzontalmente. In alcuni tessuti i fasci di ordito passano alternativamente sopra e sotto a due fasci di trama; in questo caso il tessuto viene chiamato *twill weave*, Fig. 1a. Nel tessuto denominato *plain weave*, Fig. 1b, invece, i fasci di ordito passano alternativamente sopra e sotto i fasci di trama mentre nel tessuto *satin weave*, Fig. 1c, i fasci di ordito passano sopra a tre fasci di trama e sotto ad un fascio di trama.

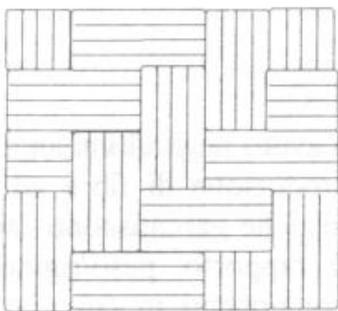


Fig. 1a - Twill Weave

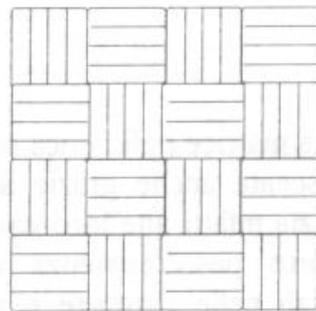


Fig. 1b - Plain weave

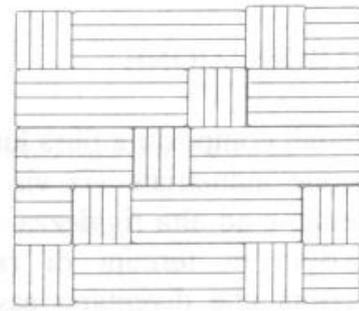


Fig. 1c - Satin Weave

Per realizzare i provini si sono utilizzati dei preimpregnati costituiti da 1) matrice di resina epossidica e tessuti di fibre di carbonio e 2) matrice di resina epossidica e tessuti di fibre aramidiche. In Tab. 1 sono riportate le principali caratteristiche dei tessuti analizzati. I provini sono stati ricavati da lastre piane ottenute sovrapponendo diversi strati di tessuto preimpregnato su appositi stampi. I preimpregnati sovrapposti sono stati poi inseriti in un sacco, in cui è stato fatto il vuoto, e introdotti in autoclave a 5 bar e a 120° C. A polimerizzazione avvenuta, le lastre sono state tagliate con frese diamantate per ottenere tagli puliti con limitato danneggiamento delle fibre.

Per la realizzazione delle prove si è utilizzata una macchina di prova MTS® servoidraulica. Tutte le prove sperimentali sono state inoltre video registrate al fine di indagare e monitorare i meccanismi macroscopici di cedimento. Alcuni provini sono stati preparati per un esame nel microscopio elettronico a scansione (SEM).

Tab. 1 - Caratteristiche dei tessuti

Materiale fibre	Tessitura	Frazione in peso di fibre	Fibre [g/m <sup>2</sup> ]	No. di counts /cm (*)	Spessore lamina [mm]	Stratificazione
Fibre di carbonio	Plain weave	0.58	200	5	0.19	[0°] <sub>8</sub>
Fibre di carbonio	Twill weave	0.58	200	5	0.19	[0°] <sub>8</sub>
Fibre aramidiche	Satin weave	0.50	170	5	0.20	[0°] <sub>8</sub>

(\*) numero di fasci di fibre per unità di lunghezza

## 2.2 Prove di trazione

Le prove di trazione sono state effettuate conformemente alla normativa ASTM D 3039-76, [5], sollecitando i provini in controllo di spostamento con una velocità di 0.028 mm/s. Durante le prove sono stati rilevati il carico, lo spostamento assiale della traversa della macchina e la deformazione longitudinale mediante l'applicazione di un estensometro avente una base di misura pari a 20mm.

## 2.3 Prove di taglio nel piano

La caratterizzazione a taglio nel piano dei materiali compositi è oggetto di numerosi studi e proposte metodologiche, [6]. In questo lavoro si è adottata la normativa ASTM D 4255-83, [7], che richiede l'attrezzatura di Fig. 2a in cui il provino (Fig. 2b) viene serrato tra due coppie di guide zigrinate mediante un collegamento bullonato. Le guide sono a loro volta collegate agli afferraggi della macchina attraverso dei perni ed un piatto (Fig. 2a).

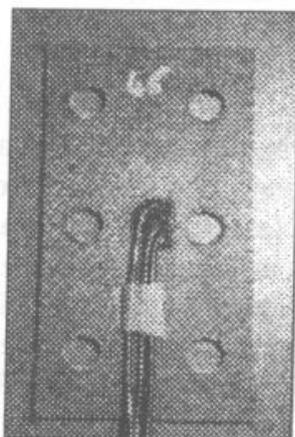


Fig. 2a - Provino

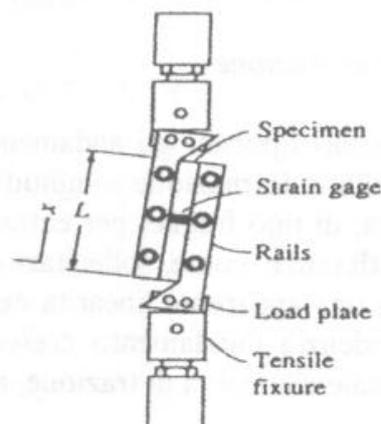


Fig. 2b - Attrezzatura di carico

Le difficoltà maggiori di questo tipo di procedura sono legate all'uniforme ripartizione del carico tra i bulloni e dall'elevata coppia di serraggio per evitare lo slittamento del provino durante la prova. Durante le prove sono stati rilevati il carico, lo spostamento assiale della traversa della macchina e le deformazioni mediante l'applicazione di estensimetri disposti, nella parte centrale del provino, a 45° rispetto alla direzione di applicazione del carico. La base di misura degli estensimetri è stata scelta tenendo conto che nel caso dei compositi deve essere significativamente maggiore (almeno cinque volte) rispetto alla dimensione caratteristica del tessuto, [8]. Inoltre, durante le prime prove sono state applicate delle rosette 0°/±45° per valutare se effettivamente l'attrezzatura di carico realizzata fornisce al provino un carico di taglio puro nel piano. Le prove sono state condotte in controllo di spostamento applicando uno spostamento di 1 mm/min.

### 3. RISULTATI E DISCUSSIONE

#### 3.1. Tessuti in fibre di carbonio

In Tab. 2 sono riportate le proprietà meccaniche ricavate dalle prove di trazione e dalle prove di taglio, in particolare la resistenza a trazione nella direzione della trama,  $S_x$ , il modulo elastico nella direzione della trama,  $E_x$ , la resistenza al taglio nel piano,  $S_{xy}$ , ed il modulo elastico tangenziale nel piano,  $G_{xy}$ . Per determinare l'evoluzione della rigidità in senso longitudinale e a taglio in funzione, rispettivamente, della deformazione e della distorsione si sono filtrati i segnali acquisiti durante le prove per eliminare inevitabili rumori di fondo. Per modellare la rigidità nella direzione longitudinale si è scelta una curva di 2° grado mentre per le prove di taglio si è utilizzata una curva di 3° grado.

Tab. 2 - Caratteristiche meccaniche dei tessuti in fibra di carbonio(\*)

Tessitura	$S_x$ [MPa]	$E_x$ [MPa]	$S_{xy}$ [MPa]	$G_{xy}$ [MPa]
Plain weave	742 (18%)	58767 (1.7%)	110 (0.13%)	2487 (13.31%)
Twill weave	598 (7.8%)	55570 (0.56%)	116 (3.95%)	3774

(\*) tra parentesi sono riportate le deviazioni standard percentuali

##### 3.1.1 Prove di trazione

In Fig. 3a sono riportati gli andamenti del carico unitario di trazione fino a rottura in funzione della deformazione longitudinale. Si può osservare che viene evidenziata una rottura netta, di tipo fragile, per entrambe le tipologie di tessuto. Si riscontrano, invece, notevoli differenze come sollecitazione di rottura per le diverse tessiture (Tab. 2). Nonostante una apparente linearità della risposta meccanica di Fig.3a, una elaborazione dei dati evidenzia l'andamento crescente della rigidità longitudinale, ottenuta come tangente locale alla curva di trazione, al procedere della deformazione di Fig. 3b.

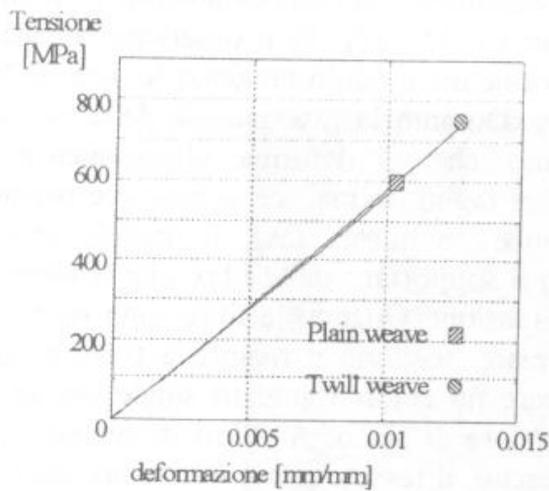


Fig. 3a - Diagramma tensione-deformazione

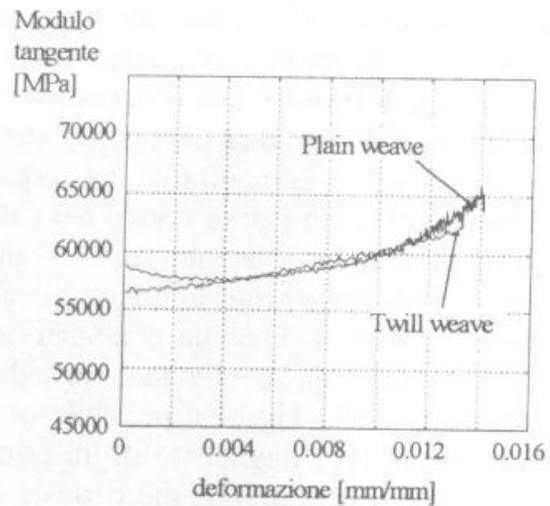


Fig. 3b - Diagramma rigidezza-deformazione

In particolare, si ha un incremento di rigidezza, tra il valore iniziale ed il valore letto al momento della rottura, del 8.5% nel caso del tessuto *plain weave* ed del 9.6% per il tessuto *twill weave*. Questo fenomeno può essere attribuito a due fattori. Innanzitutto, le fibre di carbonio mostrano un incremento di rigidezza con la deformazione attribuibile ai fenomeni cosiddetti di “stress-stiffening”, [9]. Inoltre, i fasci di fibre di carbonio, inizialmente curvi all’interno del tessuto, tendono a raddrizzarsi durante l’allungamento. A questa azione si oppone l’effetto delle fibre dell’ordito. Un approfondimento di questi aspetti che legano tessitura alla risposta meccanica del laminato composito saranno riportati in [10].

### 3.1.2 Prove di taglio

In Fig. 4 sono riportati gli andamenti del carico di taglio in funzione dello spostamento della traversa della macchina.

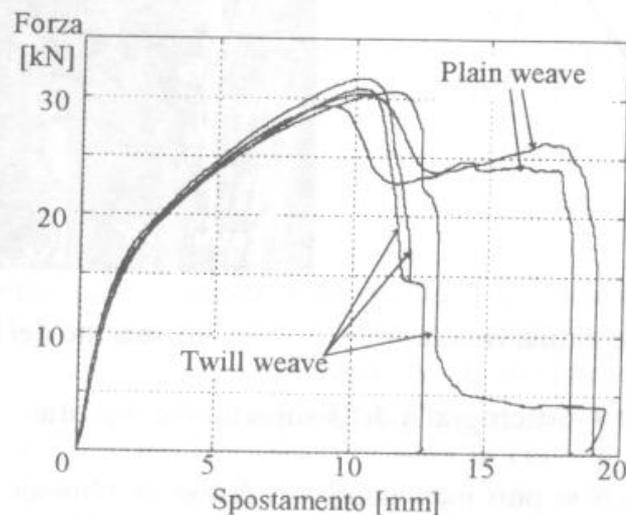


Fig. 4 - Diagramma tensione-deformazione

Come si può osservare i materiali analizzati presentano un comportamento fortemente non lineare, in accordo con quanto trovato in [9, 11, 12]. Si è osservata, infatti, in entrambi i tipi di tessuto, una progressiva riduzione del modulo tangenziale, fino al 50% del valore iniziale per una distorsione del 5%. Durante la fase iniziale della prova di taglio il carico è sopportato dal composito che si deforma elasticamente. Al raggiungimento di un valore critico del carico di taglio, la matrice si rompe e permette alle fibre di muoversi le une rispetto alle altre. In questa fase, il modulo elastico tangenziale cala fortemente in quanto il carico è sopportato dalle fibre che tendono ad orientarsi secondo le direzioni principali delle tensioni. Quando le fibre sono ruotate di circa  $45^\circ$  rispetto alla configurazione indeformata, tendono a reagire a trazione ed a compressione. Dalla Fig. 4 è possibile osservare un comportamento simile per le due tessiture fino al raggiungimento di un primo valore di picco. A valori di deformazione maggiori i due tessuti presentano risposte differenti: il tessuto *plain weave* presenta due fasi di danneggiamento ben distinte e la rottura si ha per instabilità a compressione confermata da un pronunciato rigonfiamento del tratto utile del provino, il tessuto *twill weave* mostra invece un brusco cedimento con conseguente pressoché immediata rottura lungo un piano ben definito, senza evidenti rigonfiamenti.

### 3.1.3 Meccanismi di rottura

Per quanto riguarda i tessuti in fibra di carbonio soggetti a trazione si è effettuata una indagine micrografica delle superfici di rottura. In Fig. 5b è riportata una micrografia della superficie di rottura di un provino. E' possibile osservare i fasci di fibre interlacciati e la matrice che circonda i fasci di fibre evidenziati nello schema di Fig. 5a. E' possibile osservare così la curvatura dei fasci, responsabile dell'irrigidimento del tessuto al procedere della deformazione.

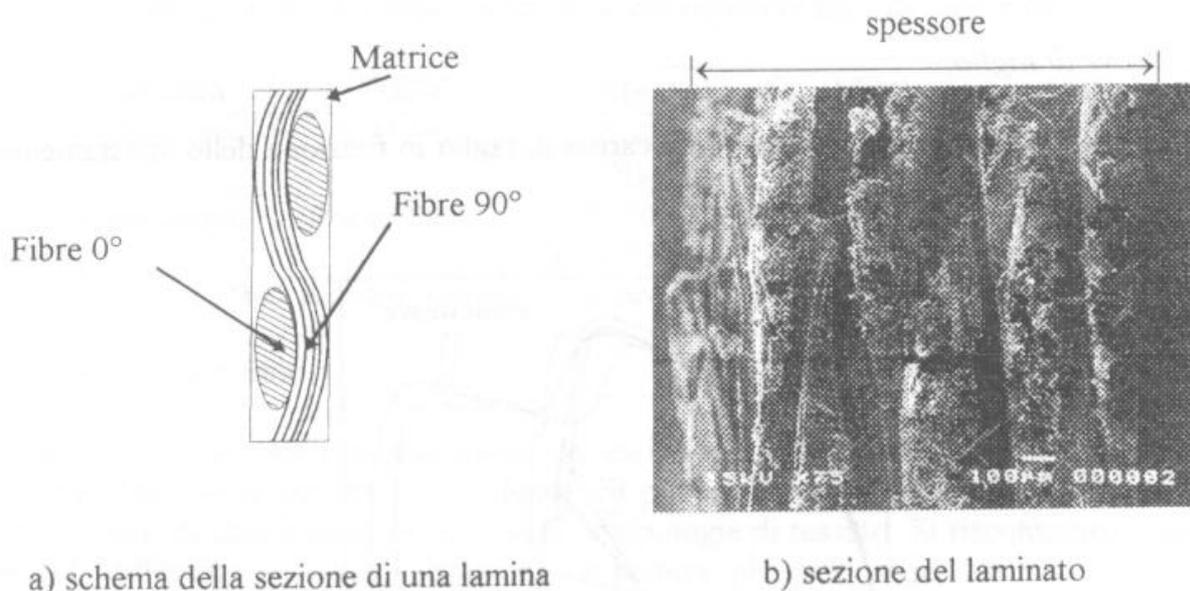


Fig. 5 - Micrografia della superficie di rottura

Nella micrografia di Fig. 6 si può individuare un fascio di fibre di trama fratturate in modo fragile. Si evidenzia anche il distacco, in corrispondenza della superficie di interfaccia, del fascio di fibre dalla matrice.

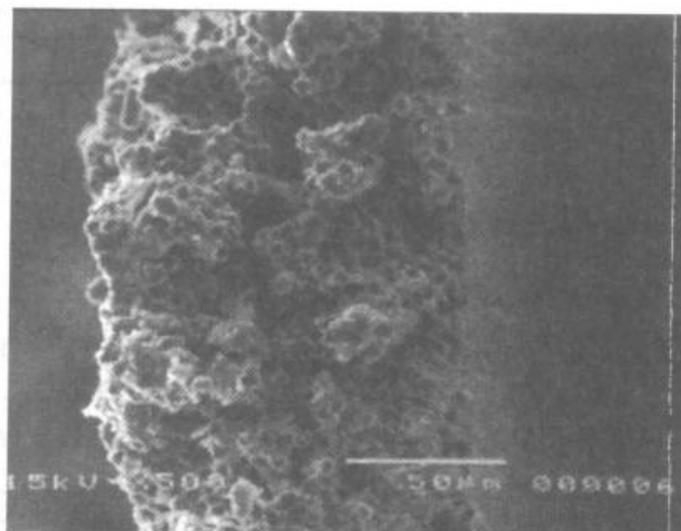


Fig. 6 - Vista di un fascio di fibre

### 3.2. Tessuti in fibre aramidiche

Brevemente, vengono ora riportati alcuni risultati relativi a tessuti con fibre aramidiche. L'obiettivo è di evidenziare alcune differenze con quanto riscontrato nei precedenti laminati di fibre di carbonio. In Tab. 3 sono riportate le proprietà meccaniche ricavate dalle prove di trazione e dalle prove di taglio. I provini, in questo caso presentano caratteristiche nominalmente identiche ma sono stati forniti però da due diversi produttori.

Tab. 3 Caratteristiche meccaniche dei tessuti in fibre aramidiche

Produttore	Tessitura	$S_x$ [MPa] (*)	$E_x$ [MPa]	$S_{xy}$ [MPa]	$G_{xy}$ [MPa]
A	Satin weave	489 (3.54%)	26700 (1.54%)	127 (1.97%)	1727 (9.74%)
B	Satin weave	481 (9.11%)	30700 (3.83%)	135 (0.99%)	2066 (11.4%)

(\*) valori solo indicativi

#### 3.2.1 Prove di trazione

In Fig. 7 sono riportati gli andamenti della rigidità al variare della deformazione nel caso dei tessuti in fibre aramidiche. Si riscontra un andamento opposto a quello trovato nei tessuti in fibra di carbonio caratterizzato da un modulo tangente che diminuisce all'aumentare della deformazione ed è attribuibile al graduale danneggiamento che subisce il laminato. A differenza dei tessuti in fibra di carbonio, i tessuti realizzati con fibre aramidiche presentano una rottura progressiva, caratterizzata da cedimenti graduali delle fibre. Siccome la maggior parte dei provini si è poi rotta definitivamente in corrispondenza dei rinforzi le tensioni di rottura sono da ritenersi solo indicative (non sono validi secondo la normativa ASTM D3039-76).

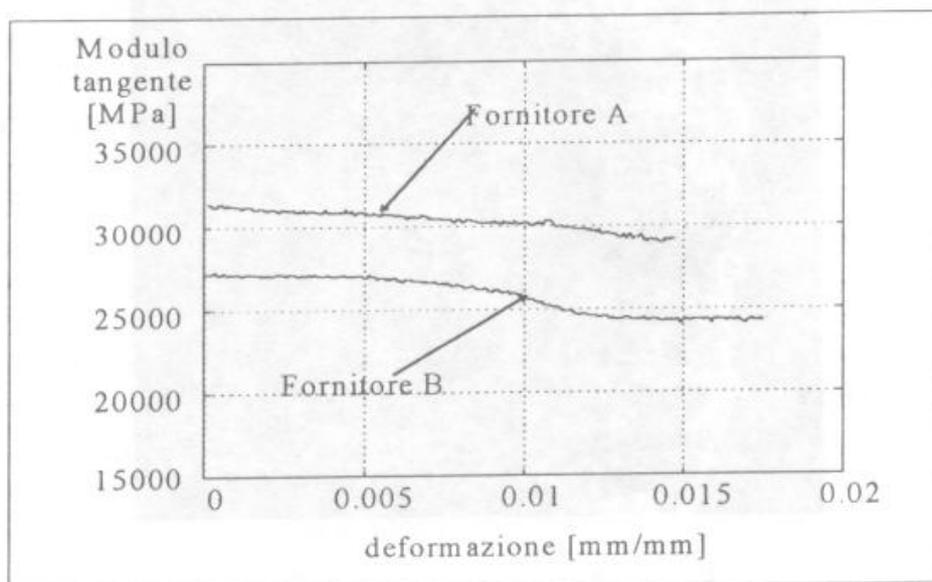


Fig. 7 - Diagramma rigidezza-deformazione

### 3.2.2 Prove di taglio

La risposta al taglio dei tessuti in fibre aramidiche è molto simile a quella riscontrata nei tessuti in fibra di carbonio *twill weave* per cui non viene riportata per motivi di spazio. Anche questo materiale presenta, infatti, un comportamento fortemente non lineare con una riduzione molto accentuata del modulo tangenziale all'aumentare della distorsione. La rottura, per entrambe le tipologie di materiale analizzato, avviene in maniera pressoché improvvisa senza cedimenti parziali. Non si osservano, inoltre, evidenti rigonfiamenti del materiale indicatori di instabilità.

## CONCLUSIONI

In questo lavoro sono stati presentati i risultati di una caratterizzazione sperimentale del comportamento meccanico di laminati compositi costituiti da tessuti realizzati con fibre di carbonio e con fibre aramidiche in matrice epossidica per impiego in campo automobilistico. Alla luce di questi risultati si possono fare le seguenti considerazioni.

- La risposta a trazione dei tessuti evidenzia delle deviazioni dalla linearità. Nei tessuti in fibra di carbonio si osserva un fenomeno di irrigidimento all'aumentare della deformazione mentre nei tessuti in fibre aramidiche la rigidezza diminuisce all'aumentare della deformazione.
- La risposta a taglio nel piano di tutti i tessuti ha caratteristiche fortemente non lineari con un dimezzamento della rigidezza a valori di distorsione di qualche punto percentuale.
- Si è evidenziato un effetto della tipologia di tessitura sulla resistenza a rottura e sulla rigidezza confermata da un esame dei meccanismi di rottura.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la ditta Dallara Automobili di Varano Melegari (PR) per la disponibilità offerta nella realizzazione dei provini.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] R.F. Gibson, Principles of Composites Material Mechanics, McGraw-Hill, Inc 1994.
- [2] N.K. Naik, Woven Fabric Composites, Tecnomac Pub., 1994
- [3] Ishikawa T., Chou T.W., "Stiffness and Strength Behaviour of Woven Fabric Composites", *Journal of Materials Science*, Vol. 17, 1982, pp. 3211-3220
- [4] N.K. Naik, V.K. Ganesh, "An analytical method for plain weave fabric composites", *Composites*, Vol. 26, 1995, pp. 281-289
- [5] AA. VV., Test Methods for Tensile properties of Fiber-Resin Composites, American Society for Testing and Materials, ASTM Standards D3039-76, Philadelphia, Pennsylvania, 1982
- [6] G.Nicoletto, M.Noli, E. Riva, "In Plane Shear Response of Woven Fabric Composites Laminates", *Danubia-Adria Symposium*, Zilina, Slovak Republic, Settembre 1996, in preparazione
- [7] AA. VV., Guide for Testing Inplane Shear Properties of Composites Laminates, American Society for Testing and Materials, ASTM Standards D4255-83, Philadelphia, Pennsylvania, 1983
- [8] Ajovalasit, "Tecniche Estensimetriche per l'Analisi delle Tensioni nei Compositi", *Atti del XXIV Convegno Nazionale AIAS*, Parma, 1995, pp.17-35
- [9] M. Beghini, L. Bertini, "Comportamento a trazione di laminati compositi per impieghi strutturali", *Atti del XXIII Convegno Nazionale AIAS*, Rende (CS), 1984, pp. 675-684
- [10] Medri, G.Nicoletto, E.Riva, "Modelling texture effects on tensile properties of woven fabric composite laminates", *3<sup>rd</sup> Seminar on Experimental Techniques and Design in Composite Materials*, Cagliari, Ottobre 1996, in preparazione
- [11] P. Ifju, "Shear Testing of Textile Composite Materials", *Journal of Composites Technology & Research*, Vol.17, N. 3, 1995, pp.199-204
- [12] T. Ishikawa, M.Matsushima, Y. Hayashi, T.W. Chou, Experimental Confirmation of the Theory of Elastic Moduli of Fabric Composites, *Journal of Composites Materials*, Vol. 19, 1985, pp.443-458