

Fibre di Carbonio ad Alto Modulo in Compound Super-Strutturali



PRESENTAZIONE DEL PROBLEMA

Le fibre di carbonio sono fra i rinforzi più comunemente impiegati nella realizzazione di compositi destinati ad applicazioni in cui esiste l'esigenza tassativa di rilevanti prestazioni meccaniche.

La moderna tecnologia dei compositi è oggi in grado di fornire materiali e parti finite il cui comportamento strutturale può superare ampiamente quello di molte leghe metalliche, anche delle più sofisticate.

Nonostante le eccezionali proprietà, i limiti intrinseci dei compositi e delle relative tecniche di trasformazione ne impediscono di fatto l'impiego nella realizzazione di manufatti caratterizzati da geometrie complicate, recanti dettagli

progettuali di piccole dimensioni, superfici elaborate e curvature particolari.

Anche nei compound per stampaggio ad iniezione è diffusa l'adozione di fibre corte di carbonio ad alta tenacità al fine di incrementare le prestazioni meccaniche di quasi tutte le resine termoplastiche, dal polipropilene al PEEK.

Per raggiungere prestazioni sempre più elevate, il contenuto di rinforzo può essere portato fino al **50% in peso**.

Tuttavia è necessario tener conto della pesante riduzione nell'efficienza strutturale delle fibre causata dal processo di estrusione e stampaggio che ne riduce la lunghezza.

Come evidenziato nei grafici riportati nelle fig. 1 e 2, sia il modulo elastico che il carico a rottura dei compound crescono all'aumentare del contenuto di fibra di carbonio.

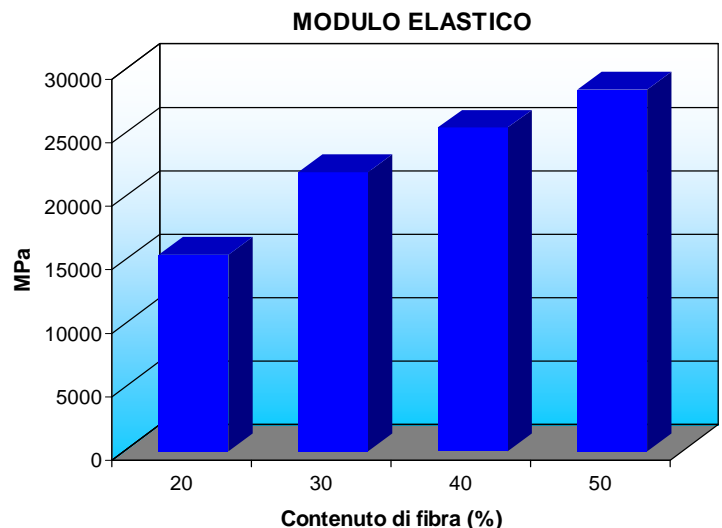


Fig. 1 Variazione del modulo elastico rispetto al contenuto di fibre di carbonio

Ciononostante, tanto l'evidenza sperimentale che la verifica teorica confermano l'impossibilità di migliorare indefinitamente le proprietà meccaniche di un compound, es. il carico a rottura, semplicemente aumentando il contenuto di rinforzo.

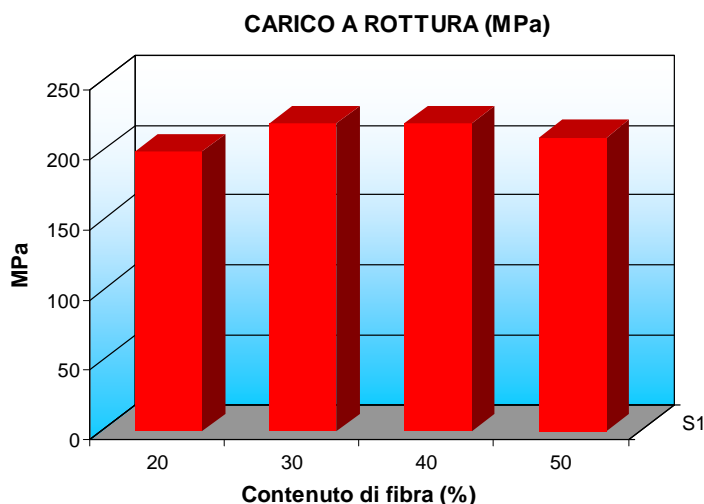


Fig. 2 Variazione del carico a rottura rispetto al contenuto di fibre di carbonio

In ogni caso, non è possibile superare il limite comunque imposto dalla struttura, dalla dispersione, dall'adesione fibra-matrice e dalla geometria del rinforzo.

Per questa ragione i materiali più carichi soffrono spesso di uno svantaggioso rapporto prezzo-prestazioni, ovvero a fronte di un costo più consistente dovuto all'elevato contenuto di fibra, non si conseguono risultati in linea con le aspettative.

SOSTITUZIONE DEL METALLO

Lo sviluppo di nuovi progetti a livello industriale attualmente contempla richieste e specifiche sempre più esigenti. Le necessità più frequenti, nel caso di tecnopolimeri strutturali, riguardano:

- maggior rigidità dei manufatti, che devono pertanto risultare capaci di sostenere carichi anche considerevoli

ma con spostamenti e deformazioni correlate sempre più contenute;

- rispetto sempre maggiore delle tolleranze di progetto grazie anche ad un'ottima stabilità dimensionale;
- maggiori possibilità di sostituzione del metallo e dei compositi a matrice termoindurente, in modo da introdurre così processi industriali più economici e puliti come lo stampaggio ad iniezione.

Questi miglioramenti sono richiesti con crescente ricorrenza specialmente da quei settori in cui la precisione di funzionamento è di grande importanza: elettrico ed elettronico, meccanica di precisione, automazione ecc.

E' chiaro che soluzioni soddisfacenti devono essere trovate dagli specialisti nel campo dei materiali, superando le difficoltà legate ai limiti dei materiali e della tecnologia di trasformazione.

L'obiettivo di LATI è stato quello di creare quindi una nuova gamma di compound super strutturali per stampaggio ad iniezione, capaci di ampliare il raggio di impiego dei termoplastici rinforzati tradizionali verso campi fino ad oggi riservati a metalli e compositi.

Per conseguire tale scopo è stato necessario progettare una nuova famiglia di compound strutturali che non puntasse tanto alla presenza sempre più massiccia di rinforzi tradizionali, bensì che puntasse su formulazioni ad hoc in cui venissero adottati nuovi elementi strutturali.

L'attenzione di LATI si è in questo caso concentrata sulle straordinarie caratteristiche meccaniche delle fibre di carbonio ad alto modulo destinate al settore aeronautico.

LATI HM - COMPOUND AD ALTO MODULO ELASTICO

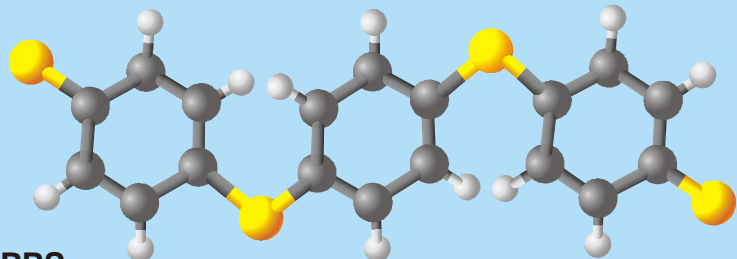
L'attività di ricerca e sviluppo LATI è stata sostanzialmente suddivisa lungo tre principali direzioni di indagine.

A - identificare le resine di base più adeguate

Essendo sostanzialmente destinati ad impieghi di alto livello, i nuovi compound sono stati concepiti considerando solo matrici ad elevate prestazioni. I polimeri sono stati pertanto selezionati sulla base delle caratteristiche chimiche, termiche e meccaniche.

PPS: il polifenilensolfuro è una delle resine termoplastiche con il miglior rapporto prezzo-prestazioni grazie all'ottima resistenza chimica e meccanica, anche a temperature superiori ai 200°C.

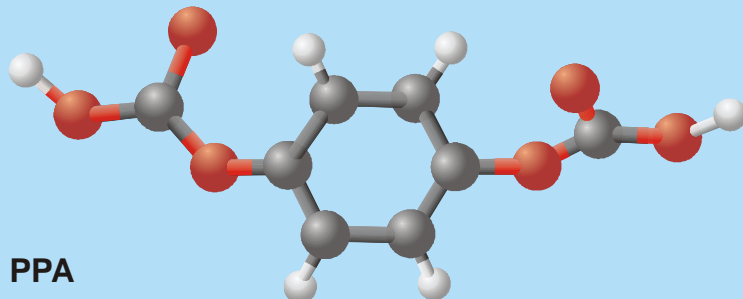
La rigidità e l'intrinseca stabilità dimensionale fanno del PPS un valido candidato per la realizzazione di compound a ridottissima deformabilità.



PPA: la poliammide aromatica offre una performance termica e meccanica di assoluto rilievo, in particolare se si considera la resistenza a carichi imposti di natura statica e dinamica, anche protratti nel tempo (fenomeni di creep e fatica).

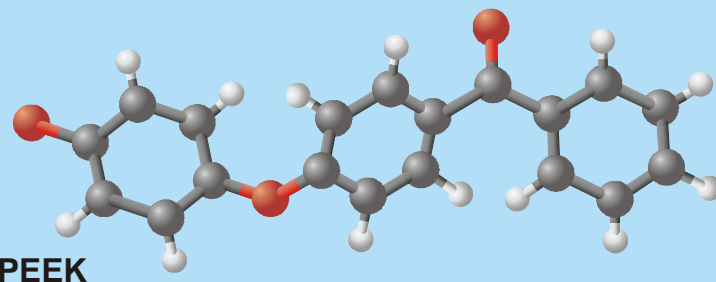
Per questa ragione la PPA risulta essere la base più idonea per quelle applicazioni soggette ad impatti, vibrazioni e sforzi

particolarmente gravosi, es. nel sottocofano e nell'industria tessile.



PEEK: il polietereterchetone è generalmente riconosciuto come il polimero commerciale più performante in assoluto grazie alle sue proprietà tribologiche ed alla resistenza chimica e termica (temperature di uso in continuo superiore a 260°C).

Una simile matrice si presta ottimamente alla realizzazione di un compound rinforzato con fibre di carbonio HM destinato ad applicazioni senza compromessi, es. nel campo delle telecomunicazioni o in ambito elettronico e militare.



B - selezionare le fibre di carbonio.

Le fibre di carbonio normalmente impiegate nella produzione di compound termoplastici vengono selezionate fra quelle ad alta tenacità, al fine di accrescere il modulo elastico del materiale risultante senza però penalizzarne la resilienza.

LATI ha voluto però verificare il comportamento delle fibre di carbonio ad alto modulo, realizzando dei compound utilizzando direttamente il filato destinato alla produzione di compositi.

La differenza fra le fibre ad alto modulo (HM) e quelle ad alta tenacità (HT) è evidente: le prime mostrano un modulo elastico più che doppio rispetto alle seconde.

Per questa ragione, tanto nell'estrusione quanto nello stampaggio l'intero processo deve essere concepito ed ottimizzato con una particolare attenzione verso la tutela della lunghezza iniziale delle fibre.

Si è reso pertanto necessario ottimizzare i parametri di estrusione e l'assetto generale della macchina, soprattutto per quanto concerne il posizionamento e la tipologia di alimentazione della fibra di

CARATTERISTICHE DELLE FIBRE DI CARBONIO					
	Modulo	Basso	Medio	Alto	Molto Alto
	Nome	HT <i>(alta tenacità)</i>	IM <i>(modulo medio)</i>	HM <i>(modulo alto)</i>	UHM <i>(modulo ultra alto)</i>
	Origine	Pece	PAN	Pece/PAN	Pece/PAN
Densità (g/cm³)		1.78	1.76-1.80	1.79-1.80	1.90-2.00
Modulo a trazione (MPa)		240.000	325.000	400.000	450.000
Carico a trazione (MPa)		4.300	5.000	2.400	3.500
Conducibilità termica (W/mK)		17	17	17	-
Calore specifico (J/KgK)		710	710	710	-
Resistività di volume (Ω/cm)		1.5 10 ⁻³	1.5 10 ⁻³	0.9 10 ⁻³	-

Tab. 1 Analisi del comportamento delle fibre di carbonio ad alto modulo

C - messa a punto del processo di estrusione.

Le straordinarie caratteristiche meccaniche delle fibre ad alto modulo devono essere trasferite quanto più possibile al compound che si intende realizzare.

Purtroppo questa esigenza mal si coniuga con gli aspetti più sfavorevoli legati al processo di estrusione, in cui gli elevati sforzi di taglio, le pressioni e le frizioni interne inducono un notevole grado di frammentazione nel rinforzo.

La risultante mancanza di integrità compromette pesantemente l'efficienza meccanica nella trasmissione degli sforzi applicati attraverso l'interfaccia fibra/matrice.

carbonio all'interno del cilindro di plastificazione. Anche il profilo della relativa vite è stato fatto oggetto di revisione in modo da ottimizzarne il rendimento.

Altri problemi collaterali hanno richiesto attenzione:

- la formazione di ammassi di fibra di carbonio durante la fase di estrusione del compound e nel corso della plastificazione durante lo stampaggio. Questi ammassi, favoriti dalla maggior lunghezza media delle fibre rispetto ai classici prodotti industriali disponibili come chopped strand in cluster, costituiscono un ostacolo al regolare flusso del polimero fuso generando così problemi di carbonizzazione, ostruzione

dei canali di alimentazione, blocco della macchina e manufatti difettosi;

- eccessiva viscosità del fuso. I compound sono stati caricati fino al 45% in peso introducendo una notevole frazione volumetrica di cariche non fusibili. Si è reso pertanto necessario controllare molto scrupolosamente la fluidità dei materiali in modo da evitare successivi problemi di stampaggio e degradazione delle caratteristiche meccaniche a causa di eccessivi sforzi di taglio e frizioni legate al gradiente di velocità presente durante il riempimento delle cavità (stampaggio) e la plastificazione (estrusione);
- scarsa dispersione del rinforzo. Una concentrazione disomogenea delle fibre di carbonio si sarebbe infatti tradotta in proprietà non uniformi fra un manufatto e l'altro.

La famiglia di compound così creati è stata denominata HM e conta oggi tre gradi disponibili e di interesse commerciale, tutti rinforzati al 40% con fibre di carbonio ad alto modulo:

- LARTON K/40 HM: basato su PPS ramificato;
- LARAMID D K/40 HM: basato su poliammide aromatica (PPA);
- LARPEEK 10 K/40 HM: basato su PEEK ad elevata fluidità.

I RISULTATI

I test di laboratorio evidenziano fin da subito il divario prestazionale fra compound rinforzati con fibre di carbonio ordinarie ed i compound LATI HM.

A - Modulo elastico

Le verifiche di trazione, in accordo con la norma ISO-R-527, offrono una prima ed importante risposta circa i reali vantaggi offerti dai compound HM. Il valore di modulo elastico si attesta infatti ben oltre

i 40000 MPa, laddove un compound tradizionale rinforzato con il 30% di fibre ad alta tenacità è in grado di garantire circa 24000 MPa.

Fluttuazioni minori di questi valori sono da ricondursi alla natura della matrice ed una particolare menzione va al compound su base PPS, il cui modulo di Young arriva a sfiorare i 50000 MPa introducendo in tal modo un tecnopolimero nel campo d'impiego proprio dei metalli.

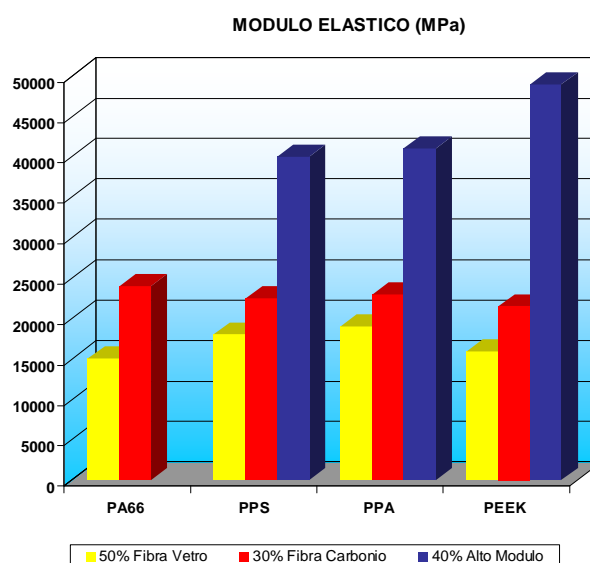


Fig. 3 Valori del modulo elastico

COMPOUND	E (MPa)
PA66 50% Fibra Vetro	15000
PPS 50% Fibra Vetro	18000
PPA 50% Fibra Vetro	19000
PEEK 50% Fibra Vetro	16000
PA66 30% Fibra di Carbonio ad Alta Tenacità	23000
PPS 30% Fibra di Carbonio ad Alta Tenacità	22500
PPA 30% Fibra di Carbonio ad Alta Tenacità	23000
PEEK 30% Fibra di Carbonio ad Alta Tenacità	21500
PEEK 40% Fibra di Carbonio ad Alto Modulo	40000
PPA 40% Fibra di Carbonio ad Alto Modulo	41000
PPS 40% Fibra di Carbonio ad Alto Modulo	49000

Il vantaggio concreto offerto da materiali così rigidi è evidentemente quello di garantire una maggiore indeformabilità a particolari strutturali, permettendo così una vistosa riduzione degli spostamenti e delle deformazioni dei particolari sotto

carico: un argomento di sicuro interesse nella realizzazione di bracci, leverismi, flangie, camme, alberi motori e di trasmissione, giunti ecc.

Una simile peculiarità può evidentemente promuovere la sostituzione del metallo – ed anche di alcuni compositi – in progetti particolarmente esigenti. Come termine di paragone, si può osservare che il più diffuso compound strutturale oggi disponibile sul mercato, ovvero la poliammide 66 rinforzata con fibra vetro al 50%, risulta essere quasi tre volte meno rigida del miglior grado HM prodotto da LATI.

B - resistenza alla fatica

La resistenza al creep ed alla fatica dipende dalla quantità e dalla qualità delle fibre disperse nel compound.

Se la lunghezza dei filamenti è sufficiente, si può infatti costituire un reticolo che costituisce il vero elemento di rinforzo presente nella matrice termoplastica.

I gradi **LATI HM** presentano fibre di una lunghezza superiore rispetto a quanto ottenibile, anche con la migliore tecnologia di estrusione, utilizzando il tradizionale chopped strand industriale.

Per questa ragione nei **LATI HM** è presente un network decisamente più compatto e ricco di nodi (entanglements) fra i filamenti e ciò costituisce un vantaggio concreto in termini di:

- resistenza all'avanzamento della faglia di rottura attraverso la matrice polimerica. Le fibre ostacolano di fatto la propagazione del fronte della cricca migliorando così le prestazioni del manufatto in termini di resistenza alla fatica, sia per il numero di cicli a rottura che per il carico limite;

- riduzione dei fenomeni di scorrimento viscoso a carico o deformazione imposta a causa di un impedimento più accentuato ai moti delle macromolecole. Ciò si traduce in una resistenza migliorata al creep;
- resistenza ai carichi applicati, sia statici che dinamici, grazie ad una più efficace distribuzione della sollecitazione imposta.

Resistenza a fatica per vari compound su base PPA - flessione 30 Hz -

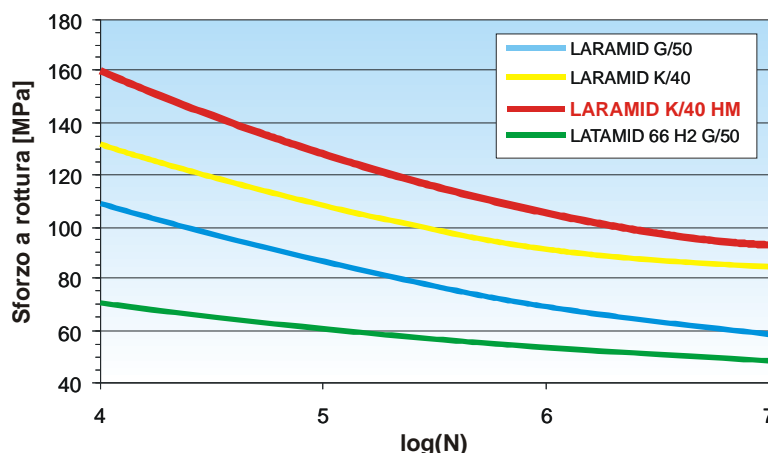


Fig. 4 Test di resistenza alla fatica

La differenza nella resistenza alla fatica (sforzo vs. numero di cicli a cedimento) è interessante anche qualora si comparino le prestazioni di un grado HM ad un compound costituito dalla medesima matrice e da un identico contenuto di fibra di carbonio HT. Il divario prestazionale fra un HM ed un caricato 50% fibra vetro è invece notevole e si traduce, es., in un valore limite di sforzo a rottura superiore del 40%.

C - carico a rottura

Un elevato modulo elastico risulta interessante dal punto di vista strutturale solo se non si compromettono anche altre caratteristiche, specialmente allungamento e carico a rottura. I prodotti **HM** offrono una resistenza estremamente interessante unita ad allungamenti a

cedimento ottimi per un materiale rinforzato in modo così consistente.

Per esempio, il grado ottenuto su base PPA arriva ad offrire 280 MPa con un allungamento pari a 1,5%, valori superiori a quelli di molti tecnopolimeri analoghi e di diverse leghe metalliche.

- meccanica di precisione;
- automazione e robotica;
- industria tessile;
- elettrico ed elettronico;
- energie rinnovabili e soluzioni "verdi".

Le superiori proprietà di questi materiali ben si sposano con i tipici vantaggi dello

COMPOUND	Modulo Elastico (MPa)	Carico a rottura (MPa)	Allungamento a rottura (%)
PA66 G/50	15000	215	2,5
PA66 K/30	24000	240	1,5
PPS G/40	16000	160	1,2
PPS K/30	22500	185	1
PPS - HM (ultrarigido)	49000	200	0,6
PPA G/50	19000	265	2
PPA - HM (ultrarigido)	41000	280	1,5
PEEK G/40	14000	205	1,5
PEEK K/30	21500	225	1,5
PEEK - HM (ultrarigido)	40000	210	0,7

Tab. 2 Prova di trazione secondo la norma ASTM D256

CONCLUSIONI

I materiali **LATI HM** fissano un nuovo punto di riferimento nel mondo dei compound termoplastici per impiego strutturale.

La possibilità di sostituire metalli ed alcuni compositi nei progetti più esigenti risulta oggi concreta, così come risulta percorribile la strada dello stampaggio ad iniezione ordinario per la realizzazione di particolari strutturali anche molto complicati e non accessibili alle tradizionali soluzioni che prevedano metalli o compositi.

Un vasto numero di settori industriali potrà trarre beneficio sfruttando opportunamente le caratteristiche dei gradi **HM**:

- aeronautico e militare;

stampaggio ed iniezione, ossia flessibilità, contenuto costo dell'attrezzatura necessaria e rapida adattabilità a nuovi progetti.

Il minor impatto sull'ambiente e sulla salute degli operatori, oltre ad una gestione semplice e pulita degli scarti (a differenza di metalli e compositi) ben completano il già positivo approccio di questi compound alle nuove sfide dell'ingegneria moderna.