



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Realizzazione e caratterizzazione di laminati in composito polimerico termoplastico rinforzato con fibre naturali

Stato dell'arte e scelta della matrice polimerica e della fibra di rinforzo

*L. Carrino, M. Durante*



Report RdS/2011/149

REALIZZAZIONE E CARATTERIZZAZIONE DI LAMINATI IN COMPOSITO POLIMERICO  
TERMOPLASTICO RINFORZATO CON FIBRE NATURALI. STATO DELL'ARTE E SCELTA  
DELLA MATRICE POLIMERICA E DELLA FIBRA DI RINFORZO

L. Carrino, M. Durante (Università degli Studi di Napoli "Federico II", Dipartimento  
di Ingegneria dei Materiali e della Produzione)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore  
elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: Nuovi  
materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Responsabile Progetto: Giovanni Pede, ENEA

## **Inquadramento programmatico**

Il Presente Report si inquadra nella Ricerca di Sistema Elettrico svolta dall'ENEA nell'ambito del relativo Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA.

La Ricerca di Sistema ha come obiettivo l'innovazione del Sistema Elettrico per migliorarne l'economicità, la sicurezza e la compatibilità ambientale, assicurando al Paese le condizioni per uno sviluppo sostenibile.

Per lo svolgimento delle attività di ricerca e sviluppo previste dal Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico il Ministero dello Sviluppo Economico ha stipulato Accordi di Programma con ENEA, CNR ed ERSE.

Le attività sono finanziate attraverso un fondo alimentato dalla componente A5 della tariffa di fornitura dell'energia elettrica, il cui ammontare viene stabilito dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas.

Nell'Accordo di Programma sono previsti temi di ricerca fondamentale e studi di carattere sistemico e prenormativo a totale beneficio dell'utente di sistema elettrico nazionale.

Le ricerche sono condotte dall'ENEA in collaborazione con le principali Istituzioni universitarie nazionali (oltre 28 Atenei e 65 diversi Dipartimenti coinvolti) e con le partecipate SOTACARBO e FN Nuove Tecnologie Avanzate. Nell'ambito dell'Accordo di Programma Triennale, l'ENEA ha terminato le attività terzo anno di attività.

L'accordo è meglio definito da un piano annuale di realizzazione, suddiviso in Attività. Ogni attività ha un contesto scientifico-programmatico di riferimento, suddiviso in aree e tematiche di ricerca, in ognuna delle quali sono definiti specifici progetti di ricerca, a loro volta suddivisi in obiettivi da perseguire.

Nel dettaglio, l'inquadramento programmatico completo del presente report è il seguente:

**Accordo di Programma MSE-ENEA:** Attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale

**Piano Triennale 2006-2008**

**Piano annuale di realizzazione Terza annualità (2008-2009):** da realizzarsi tra l'ottobre 2010 ed il settembre 2011

**Attività:** Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

**Area di riferimento:** razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

**Tematica di ricerca:** risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto elettrici

**Progetto 3.5:** studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

**Obiettivo G.:** Sviluppo di processi di ibridizzazione di microsferi metalliche con polimeri termoplastici e di processi per l'impiego di fibre naturali in compositi termoplastici.

## Indice

Introduzione.....	5
1. Fibre vegetali.....	6
1.1 Classificazione.....	7
1.2 Proprietà delle fibre vegetali.....	7
1.3 Analisi chimica.....	8
1.4 Analisi morfologica.....	9
1.5 Proprietà fisiche.....	11
2. Compositi polimero-legno:WPC.....	12
2.1 Processo di fabbricazione del WPC.....	19
2.2 Applicazioni del WPC.....	21
3. Compositi con fibre naturali lunghe.....	27
4. Adesione fibra matrice.....	28
4.1 Metodi fisici.....	29
4.2 Metodi chimici.....	29
5. Applicazioni nel settore automobilistico.....	31
6. Conclusioni.....	34

## Introduzione

Le fibre naturali e la polpa di legno sono forse i più antichi additivi impiegati nei materiali polimerici; la loro applicazione risale alla realizzazione della bakelite, mediante la carica di resina fenolica con fibre naturali. Le fibre naturali presentano la caratteristica di rinnovabilità delle risorse. Le plastiche rinforzate con fibre naturali offrono un abbattimento dei costi per qualsiasi applicazione. L'utilizzo delle fibre naturali in polimeri termoindurenti porta ad una riduzione dei costi, del peso e a compositi ecocompatibili. I difetti di tali applicazioni sono legati all'assorbimento di umidità da parte delle fibre naturali e alla instabilità dimensionale; altro vincolo è legato alle temperature di processo ed alle proprietà dell'interfaccia fibra matrice.

Il passaggio innovativo è dovuto alla combinazione delle fibre naturali con i termoplastici, diverse applicazioni hanno conseguito una certa popolarità dal 1980[1-2]. In particolare i concetti legati alla rinnovabilità delle risorse ed alla riciclabilità dei materiali hanno portato allo sviluppo di materiali termoplastici rinforzati con fibre naturali [3] . Il potenziale di tali materiali non è stato ancora pienamente individuato a causa principalmente dell'incompatibilità tra le caratteristiche idrofile della fibra di cellulosa e quelle idrofobe dei polimeri. L'interfaccia ha quindi un ruolo significativo sugli effetti di trasferimento del carico dalla matrice alla fibra. Comunque l'attenzione maggiore è concentrata sulla sostituzione di riempitivi minerali o fibre artificiali con fibre naturali per polimeri termoplastici. I motivi di tale scelta sono diversi [4]:

- ridotto impatto ambientale;
- sicurezza dei processi di fabbricazione in termini di impatto sulla salute degli uomini;
- produzione di parti con buone proprietà meccaniche;
- riduzione dei costi;
- buon aspetto estetico dei prodotti.

Altri fattori strategici sono:

- utilizzo di risorse rinnovabili
- crescita economica delle aree rurali.

Le fibre vegetali presentano una bassa resistenza termica [5] e così solo quei polimeri con temperatura di processo inferiore ai 230°C [6] possono essere impiegati con fibre naturali. Quindi nei compositi naturali si impiegano principalmente PP e PE.

Le fibre vegetali hanno proprietà specifiche paragonabili o superiori a quelle di vetro, come si vedrà nel seguito, e particolarmente performanti sono quelle di lino e canapa. Queste due tipologie sono anche quelle più coltivate in europa [7], per impieghi in prevalenza nel tessile e nella realizzazione di carta, ma molto importanti sono anche Kenaf e Agave, che possono essere coltivate in zone desertiche e in paesi in via di sviluppo[8]. Naturalmente la cellulosa in genere può essere utilizzata ed in particolare quella ottenibile dagli scarti di produzione dell'industria di processo di legname. Proprio la polpa di legno è quella più impiegata per la realizzazione di polimeri rinforzati (Wood plastic composite) che sono oggi molto impiegati in diversi campi da quello dell'edilizia a quello automobilistico. Le fibre corte di legno consentono di utilizzare tecnologie ad elevata produttività e per tale motivo sono quelle più utilizzate nel settore industriale. Molto studiati sono però i compositi con fibre lunghe naturali le cui applicazioni sono ancora limitate. La

ricerca scientifica mira all'incremento delle proprietà dei compositi migliorando l'adesione fibra matrice e ricorrendo all'impiego di fibre lunghe per poter giungere alla sostituzione delle fibre di carbonio e vetro con quelle naturali.

## Bibliografia

- [1] McKenzie A W (1979) Wood fibre reinforced polymers, *Appita* 32:460-465.
- [2] Zadorecki P, Michel A, (1989) Future prospects for wood cellulose as reinforcement in organic polymer composite, *J Polymer Composites*, 10: 69-77.
- [3] Liu F, Wolcot M, Gardner D, Rials T, (1995) Characterization of the interface between cellulosic fibres and a thermoplastic matrix, *Composit interfaces*, 2:419-432.
- [4] C.Baley A review of biocomposite development , *JEC Composites*, n.46 2009
- [5] Stamboulis, A, Baillie, C. Environmental durability of flax fibres and their composites based on polypropylene matrix. *Applied Composite Materials* 2000;7(5):273–94.
- [6] Bledzki, A.K., Gassan, J., Composites reinforced with cellulose based fibres, *Progress Polymer Science* 24 (1999) 221–274.
- [7] P. Bono, L. Augier The availability of vegetable fibre resources, *JEC Composites*, n.46 2009
- [8] M. Mohamad, Natural fibres for 3<sup>rd</sup> millennium *JEC Composites*, n.55 2010

## 1. Fibre vegetali

Per *fibra vegetale* si intende la singola cellula, che, avendo contribuito all'accrescimento della pianta, ha ormai cessato le sue funzioni vitali. Con questa definizione dunque si fa riferimento a strutture *monocellulari*, caratterizzate da materiale omogeneo, integrità strutturale ed elevate proprietà meccaniche, dimensione trasversale dell'ordine della decina di micron (20 - 30  $\mu\text{m}$ ); il costituente principale, che diventa l'unico in alcune fibre come quelle di cotone, è la *cellulosa*.

Le fibre sono estraibili dalle piante mediante procedimenti fisici o chimici che consentono di liberarle, completamente o parzialmente, dalla matrice vegetale a cui sono legate.

Con il nome di *fibra vegetale*, che, da quanto detto, è usato in modo proprio solo se riferito alla cellula singola, si indica tuttavia anche una grande varietà di fibre *pluricellulari* che, pur essendo entità ben definite, sono aggregati delle prime, contengono altre sostanze vegetali residue e sono presenti nei formati più diversi: si va da particelle di dimensioni dell'ordine del millimetro, ottenute per tritatura di materiale soprattutto legnoso, a filamenti lunghi anche oltre il metro, ricavati dalle robuste foglie di alcune piante soprattutto tropicali.

Le fibre pluricellulari, pur non avendo quella integrità caratterizzante quelle monocellulari, attualmente sono quelle maggiormente impiegate sia nelle esperienze di laboratorio che nella pratica industriale, in quanto si estraggono con economici processi fisici e sono più facilmente disponibili come materia prima.

## 1.1 Classificazione

Le fibre vegetali si classificano in base alla specifica parte della pianta dalla quale vengono estratte.

**Fibre estratte dal fusto.** Si tratta di fibre nello stelo o nel tronco, a seconda della struttura posseduta dalla pianta di provenienza.

Le fibre estratte da legno sono spesso destinate all'industria della carta, alla quale vengono fornite raggruppate in blocchi di materiale, denominato col nome di *pulp*, o *pasta di legno*. L'operazione di produzione di tale pasta, e quindi l'estrazione delle fibre, viene indicata col termine di *pulping*. **Fibre estratte da foglie.** Il più delle volte, queste fibre non vengono estratte singolarmente, ma in forma di filamenti, da quelle piante le cui foglie hanno le necessarie caratteristiche dimensionali e strutturali. Il processo prevede prima la macerazione delle foglie in soluzioni acquose poco concentrate di vari sali minerali e successivamente la loro essiccazione. Alla fine del trattamento le foglie si trovano nelle condizioni di poter rilasciare i suddetti filamenti, ricavati per mezzo di una graffiatura meccanica operata spesso manualmente con l'utilizzo di opportuni strumenti. L'impiego canonico di queste fibre è nella produzione di cordami o tappeti. Nella gran parte dei casi, esse sono il prodotto dell'economia di paesi tropicali o in via di sviluppo. Per questo motivo, il loro impiego nella produzione di materiali compositi può anche essere un fattore economicamente strategico. Le fibre da foglie più diffuse, anche nella realizzazione di materiali compositi sono: *sisal*, *ananas*, *cabuya (fico)*, *banana*.

**Fibre estratte da semi:** Si trovano nella forma di peluria prodotta dalla superficie dei semi della pianta. Vengono ricavate con una semplice sfregatura dei semi stessi, che le rilasciano facilmente. Per questo motivo sono caratterizzate dall'essere disponibili nella loro purezza originaria, senza l'intervento di trattamenti chimici che ne intaccano l'integrità strutturale chimico-fisica. Tipiche sono le fibre delle piante di cotone.

## 1.2 Proprietà delle fibre vegetali

In tabella 1.1 si riportano le proprietà di alcune fibre naturali

Fiber	Young's modulus (GPa)	Ultimate tensile strength (MPa)	Elongation at break (%)	Flexural modulus (MN/m <sup>2</sup> )
<b>Bark/Stem fiber</b>				
Bagasse (sugar cane)	27.1	222	1.1	
Banana	27-32	711-789 (I)	2.5-3.7	2.0-5.0
Flax	60-80	800-1500	1.2-2.4	
Jute	10-30	400-800	1.5-1.8	0.3-0.5
Ramie	44	500-870	1.2	
Hemp	70	690	1.6	
Palmyrah	4.4-6.1	180-215	7-15	
Piaçava	1.07-4.59	134.58-142.9	6.4-21.9	
Suan hemp		440	5.5	12.5-17.5
Talipot	9.3-13.3	143-263	2.7-5.2	
<b>Leaf fiber</b>				
Curauá	10.5	439-495 (MOR)	1.3-4.5	
Pineapple	82 (B)	180 (B)	3.2 (B)	
	25-36 (I)	362-748 (I)	2-2.8 (I)	0.2-0.40 (I)
Sisal		600-700		12.5-17.5
	17-22 (I)	324-329 (B)	2-2.5 (B)	
		530-630 (I)	3.64-5.12 (I)	
<b>Fruit/Seed fiber</b>				
Coir	4-6(I)	105-175(I)	17-47(I)	
	2.8	95-118 (B)	23.9-51.4 (B)	15-20
Cotton	12	400		0.03-0.10
Oil palm	6.7	248	14	

Tabella 1.1 proprietà meccaniche di fibre vegetali

Dai valori riportati in tabella risulta che le fibre di lino e di canapa presentano le migliori proprietà meccaniche con valori uguali a quelli delle fibre di vetro.

### 1.3 Analisi chimica

La materia di cui tutte le fibre vegetali sono in gran parte costituite è la **cellulosa**. Dal punto di vista chimico, essa costituisce il materiale polimerico più abbondante in natura.

La cellulosa è costituita da lunghe catene macromolecolari, derivanti dall'unione ripetitiva dello stesso monomero, il *glucosio* ( $C_6H_{12}O_6$ ), sicché la formula identificativa della catena è  $(C_6H_{12}O_6)_n$ .

L'unità base, la cella elementare della struttura, è il *cellobiosio*, che è l'unione di due monomeri di glucosio.

La lunghezza delle catene formate da questa unità è molto variabile: il massimo corrisponde a un grado di polimerizzazione pari a 30.000. Questo valore si riferisce al materiale di alcune fibre quando ancora contenute nella piante di appartenenza, cioè prima dell'intervento di qualsiasi processo di estrazione che vada ad intaccarne la struttura originaria.

Le singole catene macromolecolari di cellulosa vengono indicate col nome di *fibrille*. Esse si dispongono nello spazio

formando sia zone ad organizzazione altamente ordinata, la cosiddetta *cellulosa cristallina*, sia zone di disordine microstrutturale, dove la cellulosa è in forma *amorfa*.

I legami chimici intercorrenti fra gli atomi della stessa catena sono di tipo primario: si tratta di legami tra carbonio ed ossigeno. Invece i legami presenti tra gli atomi di catene adiacenti sono di tipo secondario: si tratta di ponti ad idrogeno. Responsabili della formazione di quest'ultimo tipo di legami sono i gruppi ossidrilici (OH), che compaiono come gruppi laterali della catena: ogni monomero di glucosio ne ha 3 liberi di creare legami con radicali esterni alla catena. Il quarto è invece impegnato nella creazione del legame che forma tutta la catena.

La presenza di un numero così consistente di gruppi ossidrilici laterali alla catena è la causa di tutte le caratteristiche più importanti della cellulosa. Innanzitutto, da essi deriva la sua forte *idrofilia*; ciò è dovuto proprio all'affinità chimica con le molecole di H<sub>2</sub>O che sono anch'esse dotate di forte polarità. La presenza abbondante di gruppi funzionali con cui è facile creare ponti ad idrogeno non può che favorire l'assorbimento di acqua, che sperimentalmente si riscontra.

I gruppi OH sono anche responsabili della struttura cristallina del polimero, così come dell'esistenza di zone amorfiche; intatti, il legame esistente tra catena e catena è proprio dovuto ad una serie di ponti ad idrogeno disseminati regolarmente lungo le catene: questo permette di stabilizzare l'organizzazione spaziale delle catene, creando così le regioni ordinate. Se una catena è ripiegata su sé stessa, i ponti a idrogeno si possono formare anche tra gruppi laterali OH, appartenenti alla stessa catena; questo comporta la stabilizzazione della catena nella forma incurvata; se ciò accade a più catene vicine, viene a formarsi la cellulosa amorfa.

Altra peculiarità della cellulosa è la sua *non solubilità*, sia in acqua che in solventi organici. Il monomero che forma la catena, è stato detto, è quello del glucosio, il comune zucchero di cui ben si conosce la solubilità. Nella cellulosa invece, poiché ciascuna molecola di glucosio è legata ad altre molecole identiche, è impedito lo stesso facile dissolvimento che il glucosio presenta quando è isolato; il fatto, poi, che le catene che esso forma siano collegate l'una all'altra in più punti tramite i legami a idrogeno fa nascere la necessità di utilizzare, come solventi, acidi minerali.

La composizione chimica è qualitativamente identica in tutte le fibre; ciò che varia passando da una specie vegetale all'altra è l'ammontare relativo delle varie sostanze. Questo aspetto incide in modo non trascurabile sulla risposta alle sollecitazioni dei carichi esterni applicati.

## 1.4 Analisi morfologica

Le fibre vegetali sono caratterizzate da una morfologia molto particolare che le contraddistingue dagli altri tipi di rinforzo per materiali compositi. Esse presentano una *struttura tubolare* [1], che è ciò che rimane della cellula dopo la sua morte biologica che, quindi, coincide con la parete cellulare. Tale struttura, rappresentata schematicamente in fig.1, è a sua volta composta da tre strati coassiali, detti *parete primaria*, *parete secondaria* e *parete terziaria*.

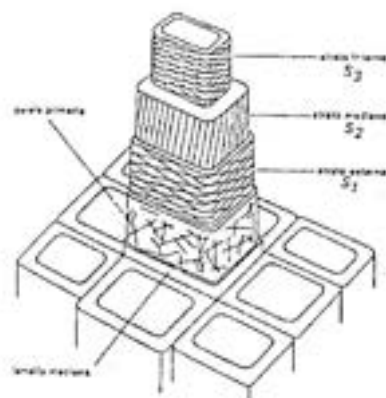


Fig.1.1 Schema della parete cellulare di una fibra vegetale

La parete primaria e la parete terziaria consistono in un unico strato sottilissimo, praticamente un'epidermide, che ricoprono la più spessa parete secondaria dall'esterno e dall'interno, rispettivamente [2]. La parete secondaria, invece, è a sua volta composta da 3 strati, identificati comunemente con S1, S2, S3. Di essi, il più spesso è lo strato intermedio, S2. È proprio la parete secondaria, dal momento che costituisce la maggior parte della struttura, la principale responsabile della resistenza della fibra.

Le fibre, nella pianta, sono immerse in una matrice vegetale, la cosiddetta *lamella mediana*; è significativo sottolineare come, all'interno della pianta, esista una composizione fibra-matrice proprio come per un materiale composito; lo scopo dei processi di estrazione delle fibre vegetali è quello di liberarle dalla matrice vegetale.

Data la morfologia appena descritta, l'aspetto assunto dalla sezione retta delle fibre vegetali è approssimativamente quello di un anello. Sarebbe tale se le fibre fossero sempre perfettamente cilindriche; nella realtà il contorno della sezione della fibra non è mai perfettamente circolare, in quanto innumerevoli sono le fonti di sollecitazione che spingono le fibre a deformarsi, allontanandosi dalla forma cilindrica. Tuttavia, quello che è sempre presente e ben riconoscibile con una osservazione al microscopio è il *foro centrale* di cui la sezione di tutte le fibre è dotata.

Lo spessore totale della parete cellulare costituente la fibra vegetale è estremamente variabile da specie a specie fermo restando un diametro esterno di circa 25  $\mu\text{m}$  (quando la fibra è perfettamente cilindrica), lo spessore totale della parete può crescere verso l'interno da un minimo, in cui essa è ridotta ad una sottile pellicola, fino ad un massimo che rende le dimensioni del foro centrale molto limitate (5  $\mu\text{m}$ ). La struttura cava, unita alla parziale deformabilità del materiale costituente, è responsabile dello schiacciamento a cui pressoché tutte le fibre vegetali vanno soggette, già all'interno della struttura della pianta. Le osservazioni delle fibre al microscopio mostrano molto spesso il foro centrale della sezione degenerato in una fessura simile ad un segmento e, di conseguenza, tutta la fibra ridotta alla stregua di un nastro di spessore dipendente da quello della parete cellulare. Questa situazione non implica affatto la perdita assoluta delle capacità di resistenza da parte della fibra; tuttavia limita in modo evidente la regolazione dei parametri (la pressione in particolare) di ogni processo produttivo in cui le fibre siano coinvolte.

Anche la morfologia delle varie fibre non subisce variazioni qualitative passando da una specie all'altra, mentre quelle che variano sono le dimensioni dei vari elementi geometrici che definiscono la forma della fibra.

Quando le fibre sono nella pianta, la cellulosa in esse presente ha il più alto grado di polimerizzazione, cioè presenta le

catene macromolecolari molto lunghe ed estese zone ad organizzazione cristallina. In questa forma, la cellulosa costituisce il componente chimico principale delle fibre vegetali: in alcune specie, il suo contenuto percentuale supera il 90%; nel cotone esso è vicino al 100%. Normalmente, essa è accompagnata ad altri composti non cristallini, costituenti della matrice vegetale che ricopre le fibre. I principali sono: *emicellulosa*, *lignina*, *pectina*. Gli ultimi due composti sono chimicamente molto complessi: il primo è considerato al pari di un *gel*, visto che è capace di gonfiarsi in presenza d'acqua; il secondo è un grasso vegetale. L'emicellulosa è chimicamente non dissimile dalla cellulosa, ma è caratterizzata da catene molto più corte, ragione per la quale essa è addirittura solubile in quei solventi organici inefficaci nell'azione di dissoluzione della cellulosa I. L'ammontare relativo di queste sostanze nel materiale costituente le fibre varia da specie a specie, differenziandone chimicamente le rispettive fibre.

La cellulosa che compone gli strati di parete S2 è disposta tipicamente in una struttura elicoidale che avvolge la fibra per tutta la sua lunghezza. L'angolo dell'elica è variabile nei vari tipi di fibre ed è uno dei fattori responsabili di determinate caratteristiche meccaniche. Le fibrille di cellulosa, disposte ad elicoide, sono riunite in strati che, sovrapposti, formano lo spessore della parete S2. Le fibrille così disposte coesistono con le porzioni di cellulosa amorfa e con i limitati quantitativi di altri composti che completano la composizione chimica della fibra.

## 1.5 Proprietà fisiche

Come detto, sia la composizione chimica che la morfologia sono sostanzialmente uguali per tutte le fibre, anche se appartenenti a specie vegetali diverse.

Ciò che distingue le fibre di specie diverse è l'ammontare relativo degli elementi chimici (in particolare della cellulosa) e le dimensioni: sono questi i fattori che determinano l'insieme delle proprietà meccaniche di ciascun tipo di fibra [3].

Occorre però sottolineare che l'appartenenza ad una specifica pianta e la struttura chimico-fisica giustificano solo in parte i diversi valori di resistenza relativi alle varie fibre: esistono fattori di ordine diverso che, nella pratica, incidono molto più pesantemente sulle prestazioni delle singole fibre. Tali fattori sono legati ai processi tecnologici ad esse applicati.

I trattamenti a cui esse devono essere sottoposte per la realizzazione di un materiale composito sono molteplici. Alcuni si dimostrano essere estremamente pesanti, producendo sensibili danneggiamenti della microstruttura delle fibre, ed abbassandone sensibilmente le proprietà di resistenza. Il primo processo è quello dell'estrazione. Specialmente se essa è operata con metodi chimici, dimostra di incidere non poco sull'integrità del materiale costituente le fibre, che presentano spesso valori di proprietà meccaniche molto inferiori a quelli che presumibilmente le caratterizzano quando sono ancora inglobate nella struttura della pianta.

Un fattore ambientale importante per la sua influenza sulle proprietà meccaniche delle fibre è sicuramente l'umidità. I materiali vegetali sono fortemente idrofilici, e questo causa spesso la perdita di controllo dell'entità dell'assorbimento d'acqua cui sono soggetti. Il risultato è che le proprietà meccaniche, in presenza di diversi valori dell'assorbimento subito, sono diverse e possono risultare molto distanti, anche a parità di fibra considerata.

Riguardo la *densità* [4] delle fibre occorre fare alcune precisazioni. La cellulosa, loro principale costituente, possiede la densità dello zucchero, pari a  $1,5 \text{ g/cm}^3$ . Le fibre, per il fatto di essere internamente cave, presentano un valore sicuramente inferiore a questo. Esso può scendere anche a  $0,6 \text{ g/cm}^3$ , ma un valore più usuale è intorno a  $1 \text{ g/cm}^3$ .

La sua precisa determinazione non sarebbe di difficile ottenimento, previa una misura del volume occupato eseguita ad

esempio mediante l'uso di un microscopio. Il problema vero che sorge nell'affrontare questa misurazione è che l'entità dello schiacciamento della fibra, che incide in maniera diretta sul calcolo della densità, è dipendente dalle condizioni di lavoro in cui la fibra si trova. Questo rende di fatto impossibile la determinazione di un valore assolutamente univoco della densità. Se utilizzate nella produzione di materiali compositi, le fibre subiscono una compressione dipendente dai parametri del processo produttivo che hanno attraversato. Per questo motivo la densità andrebbe calcolata in corrispondenza di ogni caso specifico.

#### Bibliografia

- [1] Sukumaran K, Satyanarayana K. , Pillai S., Ravikumar K, (2001) *Metals Mater Proc* 13:21-136
- [2] Franck R. (Ed) (2005) *Bast and other plant fibers*, Woodhead publishing & CRC press, Abington-Cambridge, UK.
- [3] Mohanty A, Misra M, Hinrichsen G, (2000), *Macromol Mater Eng.* 276/277:1-24.
- [4] Tanobe V, Sydensricker T, Munaro M, Amico S, (2005), *Polym testing*, 24:474-482.

## **2. I compositi polimero-legno: WPC (Wood Polymer Composite) <sup>[1-7]</sup>**

Nel campo dei materiali termoplastici è piuttosto comune adoperare cariche di varia natura durante la lavorazione, sia per abbassare il costo del prodotto finito sia per ottenere determinate caratteristiche estetiche o funzionali; l'utilizzo di cariche di tipo ligneo nei polimeri non è una novità del recente passato, dato che la casa automobilistica Rolls-Royce già nel 1916 (circa 10 anni prima del brevetto della prima resina sintetica) usava un pomello del cambio realizzato con polimeri caricati con legno. I moderni compositi polimero legno, realizzati con matrici termoplastiche, nascono in Italia negli anni '70, realizzati dalla GOR applicazioni speciali con macchinari forniti dalla ICMA di San Giorgio; i primi compositi polimero legno realizzati erano dei pannelli termoformabili (da qui la necessità di un polimero termoplastico) commercializzati con il nome di WOOD-STOK<sup>®</sup>, tuttora adottati per la realizzazione di interni di autovetture da numerose case automobilistiche.

L'interesse per questo tipo di materiali è cresciuto nel corso degli anni '90 soprattutto nel mercato nord americano, e nei primi anni del 2000 il materiale è stato apprezzato anche dai paesi asiatici come Cina, India, Malesia, Singapore e Giappone.

Il mercato dei compositi rinforzati con fibre naturali è stato valutato in 771000 tonnellate di prodotto nel 2003 e numerosi studi di settore indicano che questi materiali sono destinati a penetrare pesantemente anche nel mercato europeo nei prossimi anni; a conferma di ciò vi sono già numerosi prodotti in commercio realizzati da industrie europee con vari tipi di compositi polimero legno, dal settore delle costruzioni a quello della cancelleria, oltre che il ripetersi, con cadenza quasi annuale, di un evento fieristico di rilevanza europea incentrato sui WPC.

Attualmente la maggior parte dei compositi polimero legno sono adoperati nel settore dell'edilizia, che rappresenta il 65% del mercato di questi prodotti. In particolar modo il *decking* è il settore in cui questi materiali sono estremamente presenti, infatti si stima che il mercato nordamericano della pavimentazione sia occupato per il 15% da prodotti realizzati in WPC. In Europa il mercato è certamente più piccolo, ma presenta una interessante singolarità; infatti il volume di prodotti adoperati nel settore automobilistico è stato pari a 36000 tonnellate.

Il WPC (Wood Plastic Composite) è un materiale complesso di fibre naturali (legno e/o altri vegetali) e plastica, che unisce la naturale bellezza del legno ai pregi dei moderni materiali plastici ( Fig. 2.1). È in grado di sostituire il legno in tutto e per tutto.



Fig. 2.1

I materiali plastici compositi con legno (WPC) furono inizialmente utilizzati negli USA per molti anni, prima di svilupparsi nel resto del mondo. L'uso di materiali WPC nella fabbricazione di pannellatura interna di automobili, utilizzando tecnologia italiana di estrusione, è stata una delle prime applicazioni principali negli Stati Uniti di tecnologia WPC. Gran parte della recente crescita dello sviluppo e utilizzo di materiali WPC è stata inizialmente guidata da iniziative volte alla salvaguardia dell'ambiente, in particolare per arginare il problema della deforestazione. L'industria del legname è finita sotto pressione da parte degli ambientalisti per fermare la sua pratica di abbattere di larghe quantità di alberi per la produzione di legname. Proprio per far fronte a queste esigenze di tipo ambientalista, i maggiori produttori di legno hanno iniziato a sviluppare nuovi materiale che permettevano di offrire ai clienti una alternativa al legno.

Dai primi anni '90, il mercato dei materiali WPC è cresciuto in modo significativo passando da cifre trascurabili a volumi di vendita elevati. Ad esempio alcune aziende hanno iniziato a produrre WPC solido in alternativa ai tradizionali legni duri e morbidi usati come bordi di piattaforma, tavoli per picnic e pavimenti industriali.

Va osservato che i prodotti WPC sono spesso classificati insieme a prodotti di legname di plastica. Anche se questi materiali sono simili e possono essere utilizzati in applicazioni simili (ad esempio profili decking, recinzioni, mobili da giardino e porte) c'è una differenza fondamentale, il legname di plastica è fabbricato da solo polimero (spesso riciclato), che è composto con additivi chimici vari per realizzare adeguate caratteristiche di prestazione e qualità estetica per la particolare applicazione mentre i prodotti WPC sono realizzati da polimeri e polveri di legno. Sia il WPC che il legname di plastica sono, tuttavia, offerti in sostituzione del legno e, pertanto, sono in concorrenza diretta.

Per quanto concerne la composizione dei WPC, non abbiamo delle quantità prefissate di materiale plastico e fibra di legno da unire per preparare un composito di tipo "standard", bensì tale scelta viene fatta tenendo conto di vari aspetti sia economici sia strutturali. Grande cura deve essere posta, quindi, nella scelta e preparazione delle materie prime. I materiali selezionati dipendono molto dalla disponibilità delle materie prime, dalla posizione di mercato del prodotto (a basso costo o alla fine di alto valore del mercato), dai requisiti di prestazioni del prodotto

e dall'etica ambientale della società ( di utilizzare o meno materiali riciclati). Ad esempio, il decking in WPC può essere prodotto da entrambi i polimeri vergini e riciclati o una combinazione di entrambi. Il polimero può essere polietilene (alta e bassa densità) o polipropilene. La materia prima legno può essere farina o fibre e possono provenire da varie specie di alberi.

Le fonti disponibili in commercio del legno sono segatura, farina di legno, fibra di legno e cellulosa.

La farina di legno è una forma di particelle di legno ed è ottenuta con l'essiccazione e macinazione di segatura. È disponibile in commercio ed è classificato per fasce di dimensione delle particelle, vale a dire 50-150 $\mu$ , 100-200 $\mu$ , 200-450 $\mu$  e 250-700 $\mu$ . Il contenuto di umidità è garantito inferiore all' 8% e la densità apparente è di 0,1 - 0.3g/cm<sup>3</sup>.

La fibra di legno può essere ottenuta mediante trattamento chimico del legno (processo Kraft, che rimuove la lignina e le cere a basso peso molecolare) o da processi di trattamento termo-meccanici, che conservano il contenuto di lignina e cera. Il processo chimico è favorito in quanto è possibile trattare diversi tipi di legno comunemente richiesti.

Le proprietà del composito WPC dipendono solo in parte dalle dimensioni delle particelle del legno. Aumentando le dimensioni delle particelle si ottiene un miglioramento del flusso e modulo a flessione, però risulta più difficile garantire che la miscela prodotta sia omogenea.

Le proprietà fisiche della fibra del legno variano a seconda del tipo di legno utilizzato. E 'chiaro, quindi, che la scelta del legno è importante per le proprietà finali del WPC, per esempio la densità del legno di latifoglie può essere quasi il doppio di quello del legno di conifere si tradurrà in un prodotto più pesante.

Per quanto riguarda, invece, l'impiego di legno riciclato possiamo individuare tre tipi di rifiuti di legno da poter impiegare:

1. *Rifiuti di legno primario*: si tratta di scarti di legno post-industriale da segherie;
2. *Rifiuti di legno secondario*: si tratta di scarti di legno post-industriale generata dalla produzione di prodotti in legno come mobili, armadi o porte;
3. *Rifiuti di legno post-consumo*: questo può includere qualsiasi cosa, da detriti di costruzione e demolizione di imballaggio, casse e pallet.

L'impiego di rifiuti di legno presenta però dei problemi derivanti dai precedenti impieghi. Infatti, i prodotti in legno possono essere stati trattati in vari modi durante la loro vita con sostanze chimiche, per esempio pitture, adesivi e leganti, impregnazione con conservanti (come il creosoto o pentaclorofenolo). Nei casi in cui vi è incertezza sulla storia dei rifiuti di legno il potenziale di contaminazione con sostanze chimiche del materiale finale li renderebbe inadeguati per l'uso in applicazioni WPC. La pulizia del legno è una priorità pertanto questo dovrebbe essere esente da qualsiasi contaminante non-legno. Piccole quantità di colla, vernice o laminati possono generalmente essere tollerata, purché l'importo non superi il 5%. Di conseguenza, è più probabile che il legno utilizzato nella produzione del WPC provenga da rifiuti di legno primari e secondari, piuttosto che da rifiuti post-consumo (Fig. 2.3).



Fig. 2.3

La scelta della plastica da utilizzare nei materiali compositi WPC dipende da una serie di fattori. Le diverse tipologie di polimero utilizzate influiscono sulle diverse caratteristiche del WPC. I tipi di polimeri utilizzati attualmente sono: PVC- polivinile, PE- polietilene, PP- polipropilene.

PVC - polivinile: la quantità di imballaggi post-consumo di PVC è limitato ad alcuni detergenti per la casa ed alcuni oli da cucina. Vi sono anche alcuni rifiuti post-industriali di PVC che potrebbero trovare impiego in applicazioni di legno composito.

PP - polipropilene: è uno dei prodotti plastici industriali più versatili. Molti prodotti sono realizzati in polipropilene tra cui, fioriere, mobili da giardino, cassette di birra e flessibili, contenitori richiudibili per la conservazione degli alimenti. Anche se PP è usato in un certo numero di applicazioni WPC, come vasi da fiori, manici di utensili e interni per automobili - il polimero tende ad essere materiale vergine piuttosto che riciclato.

PE – polietilene: viene a sua volta diviso in base alla densità in HDPE ( High Density Polyethylene) e LDPE (Low Density Polyethylene).

HDPE: polietilene ad alta densità è più comunemente usato in bottiglie di latte, che tendono ad essere naturalmente traslucide, e bottiglie di sapone e detersivi, che sono normalmente di colore. Il materiale traslucido è più importante sul mercato in quanto può essere usato per fare qualsiasi plastica di colore mentre il materiale già colorato di solito è utilizzato per applicazioni scuro nero o di altri colori. Il tipo di HDPE utilizzata per imballaggi flessibili e sacchetti di plastica fonde a 135 ° C ed i processi nel range 150-200 °C. È, quindi, adattabile per l'uso in materiali compositi legno-plastica.

LDPE: polietilene a bassa densità è molto versatile e viene utilizzato in applicazioni di packaging flessibile come film. Come in HDPE, i sacchetti di plastica sono fatti da molti LDPE. Come HDPE, anche LDPE si scioglie e può essere lavorato tra i 150 e i 200 °C ed è adatto per i compositi legno-plastica.

Nella tabella 2.1 sono comparate alcune caratteristiche dei tre polimeri:

	PE - POLIETILENE	PP - POLIPROPILENE	PVC - POLIVINILE
<b>DENSITA'</b>	0.95	0.9	Da 1.4 a 1.5
<b>MODULO DI ELASTICITA'</b>	Da 0.5 a 1.1 GPa	Da 0.7 a 1.5 GPa	3.5 GPa
<b>MODULO DI FLESSIONE</b>	1.25 GPa	Da 0.5 a 1.4 GPa	Da 2.2 a 3.5 GPa
<b>DUREZZA (SHORE D)</b>	65	70	>80
<b>INFIAMMABILITA'</b>	Continua con o senza fiamma	Continua con o senza fiamma	Arresto immediato e senza fiamma
<b>COEFFICIENTE DI DILATAZIONE [10<sup>5</sup>/K]</b>	Da 12 a 18	11	Da 5 a 8
<b>APPLICAZIONI</b>	Film plastici (teloni impermeabili, borse di plastica); articoli domestici; serbatoi	Imballaggi alimentari; paraurti automobili	Profili edili
<b>QUALITA' RICONOSCIUTE</b>	Impermeabilità; resistenza agli urti	Resistenza agli urti e agli agenti chimici	Resistenza al degrado e agli agenti atmosferici; ottime proprietà meccaniche; resistenza al fuoco; innocuo per la salute; resistente all'abrasione

Tab. 2.1 Proprietà dei termoplastici impiegati con fibre naturali

Il polietilene (PE) è la plastica più comunemente usata per WPC, utilizzando sia materiale vergine che riciclato. Tutti i polietileni sono relativamente facili da stabilizzare contro la degradazione termica durante la lavorazione, sono meno costosi e hanno una temperatura di distorsione maggiore rispetto ai prodotti a base di cloruro di polivinile.

Poiché il legno si degrada a temperature elevate, vengono generalmente utilizzate plastiche che possono essere lavorate sotto i 200 °C.

Ogni polimero deve essere adattato alle particolari situazioni di utilizzo. Nel caso del WPC, i coefficienti di dilatazione del PE/PP necessitano di aggiungervi una forte carica di legno per evitare una dilatazione eccessiva del materiale; il PVC necessita, invece, l'aggiunta di un additivo che permetta al materiale di resistere alle basse temperature.

Come per la plastica vergine, tutta la plastica riciclata che può fondere ed elaborare sotto il punto di degradazione del legno (200 °C) è di solito adatta per la produzione di materiali WPC. La scelta della plastica dipenderà dalle esigenze applicative particolari.

Come per ogni tecnologia di elaborazione di plastica, più piccole e più uniformi sono le dimensioni delle particelle e migliori risultano per l'alimentazione, la miscelazione e la lavorazione. Il riciclaggio meccanico è il principale metodo di trattamento dei rifiuti polimerici. I rifiuti sono trasformati in pellets o granuli da utilizzare per la successiva elaborazione in nuovi prodotti (Fig. 2.4).



Fig. 2.4

È altresì essenziale che la plastica utilizzata sia pulita e priva di qualsiasi contaminante non plastico. Questo esclude una serie di flussi di rifiuti quali i rifiuti post-consumo e i rifiuti di plastica derivanti dai veicoli a fine vita, che può contenere fino a 25 diversi tipi di plastica e di essere contaminato con ganci in metallo, ecc. Risulta troppo oneroso pulire e selezionare questi materiali per l'ulteriore ri-elaborazione pertanto, tali materiali, tendono ad essere inviati direttamente in discarica. Alcuni composti, tuttavia, possono tollerare una piccola quantità di carta di recupero da etichette ma, ancora una volta, la quantità di carta deve essere entro i limiti del 5% - 8%.

Studi effettuati hanno dimostrato che, per ottenere sufficienti garanzie circa il comportamento meccanico, la stabilità e la durata del materiale, bisogna utilizzare una quantità minima di polimero superiore al 45%. Generalmente è ottenuto combinando all'incirca il 60% di polvere di legno e il 40% di materiale termoplastico.

La fibra di legno conferisce al materiale un'estetica simile a quella di un'asta di legno e ottimizza leggermente la rigidità delle aste.

Il WPC per essere di buona qualità necessita di una fine granulometria dei componenti allo scopo di facilitare l'omogeneità del composto e ottimizzare l'estetica del materiale in superficie.

L'associazione del PVC, riconosciuto per la sua durabilità, e del legno permettono una finitura carteggiabile o spazzolabile proprio come il normale legno.

Tra i compositi WPC sul mercato vi sono forti variazioni in percentuale del contenuto di legno. In effetti questo si

spiega perché la farina di legno è la materia prima più economica nel WPC: per ridurre il prezzo e proporre dunque un prodotto economicamente più competitivo, molti produttori non esitano nel forzare il contenuto di legno al di là del 55% consigliato.

Le tipologie di profili che si trovano sul mercato sono di tipo pieno o alveolare. Con un WPC a forte carica di legno e a grossa granulometria, estruso impastando il polimero, gli additivi e i pigmenti, si è tecnicamente costretti a realizzare un profilo pieno. Diversamente si otterrebbe un profilo alveolare con dei componenti che non si amalgamerebbero a dovere provocando il rapido deterioramento del prodotto.

Va messo in evidenza che le doghe a forte carica di legno sono spesso piene. Si pone quindi la questione del prezzo di vendita al metro quadrato di una doga piena. Anche se la forte carica di legno diminuisce il prezzo di vendita al kg, la quantità di materia da utilizzare necessita di trovare degli artifici per proporre una doga piena al prezzo dell'alveolare, perfino meno caro.

Le norme europee in corso di elaborazione permetteranno di identificare le doghe di WPC piene che utilizzano per ragioni di economia altri tipi di materiali che non siano legno (papiro, bambù, noci ecc) cioè scarti di cellulosa provenienti dall'agricoltura a un prezzo assai limitato.

Oltre ai due materiali principali del WPC (fibra di legno e polimeri) nel corso della produzione, per migliorare le caratteristiche del prodotto, vengono aggiunti degli additivi che serviranno per migliorare il materiale, facilitarne la produzione e dare colore al composto.

Gli additivi che migliorano il materiale sono di due tipologie differenti: uno per la resistenza alle sollecitazioni che il WPC può subire a temperature particolarmente basse ed un altro per trattare il WPC contro il muschio.

Gli additivi che facilitano la produzione sono appositi lubrificanti che impediscono al materiale di aderire alle parti metalliche della macchina e ne facilita lo scorrimento.

I pigmenti che danno colore al prodotto vengono aggiunti all'impasto in modo da conferire una colorazione uniforme e duratura nel tempo (Fig. 2.5).



bianco – noce – ciliegio – faggio – abete – verde gold

Fig. 2.5

I principali vantaggi associati al WPC rispetto al legno sono riconducibili alla totale impermeabilità del materiale. Il WPC pur essendo costituito in gran parte da legno, ha le stesse proprietà impermeabili della plastica. Infatti i polimeri vanno a mescolarsi con le particelle di legno creando una sorta di involucro che annulla il potere assorbente del legno. Grazie a questa proprietà, è possibile utilizzare il WPC in ambienti fortemente umidi quali laghi, fiumi, mare o piscine senza il pericolo di marcitura. L'impermeabilità delle particelle di legno contenute nel WPC impedisce l'essiccazione del pezzo e la conseguente formazione di schegge superficiali o la deformazioni della geometria del pezzo dovuta sempre all'essiccazione del legno. Questa peculiarità permette di calpestare a piedi nudi le pavimentazioni in WPC senza il pericolo di schegge.

I prodotti in WPC risultano inattaccabili da insetti e tarli, sono altamente resistenti ai raggi UV tanto da non

modificare il colore anche dopo diversi anni di esposizione al sole e sono testati per resistere ad escursioni termiche comprese tra i -40 e +50 °C. Tali proprietà si ottengono dall'utilizzo degli additivi chimici durante la fabbricazione. Essendo gli additivi uniti al composto di legno e polimeri durante la fase di produzione, il materiale risulta omogeneamente protetto dalle intemperie quindi non necessita di trattamenti superficiali specifici.

Altro aspetto da non sottovalutare è la facilità di posa in opera delle doghe in WPC, infatti, si lavorano con gli stessi utensili del legno e si appoggiano su supporti regolabili con testa autolivellante che compensa automaticamente pendenze e dislivelli fino al 5% e si regola millimetricamente in altezza per creare un pavimento flottante con tutti i vantaggi da esso derivanti (ispezionabilità, isolamento termico, possibilità di occultare gli impianti), (fig. 2.7). Grazie alla facilità d'installazione, in caso di danneggiamenti accidentali, è possibile sostituire solo le doghe danneggiate senza pregiudicare la bellezza della pavimentazione (non essendo soggette a variazioni cromatiche, anche sostituendo solo alcune doghe non si altera l'uniformità della pavimentazione).



Fig. 2.7

In un contesto ambientale in continuo mutamento quale quello attuale, in cui l'attenzione per l'ambiente è uno tra i principali problemi da affrontare in ogni ambito, il WPC si colloca perfettamente in quanto capace di coniugare tecnologia e rispetto per la natura.

Oltre agli innumerevoli vantaggi citati finora, quello che ha attirato maggiormente l'attenzione sul WPC è la sua totale eco-compatibilità. Il WPC infatti è uno tra i materiali con impatto ambientale pari a zero: la realizzazione del materiale e la sua posa in opera non richiede enormi quantità di energia; i materiali che vengono miscelati, come visto in precedenza, sono il più delle volte polimeri provenienti dal riciclo e legno proveniente da scarti di lavorazione; dopo l'uso, inoltre, può essere nuovamente riciclato senza quindi produrre rifiuto. A differenza dei comuni materiali da costruzione (legno, calcestruzzo) che necessitano di specifiche ed onerose procedure di smaltimento, i pezzi realizzati in composito di legno (WPC) possono essere rilavorati e dar vita a nuovi manufatti senza doverli smaltire come rifiuti.

I WPC, inoltre, non risultano dannosi per la salute poiché non emettono sostanze dannose ed inquinanti, ne tantomeno fibre o polveri cancerogene.

## 2.1 PROCESSO DI FABBRICAZIONE DEL WPC

La maggior parte del WPC prodotto oggi è ottenuto per estrusione tramite estrusori bivate, all'interno dei quali la farina di legno, di granulometria selezionata, viene intimamente miscelata con la matrice polimerica, oltre ad eventuali additivi antifrizione, antifunginei e protettivi per i raggi UV; si ottengono così pannelli, profili e travi pronte per l'utilizzo senza la necessità di adoperare impregnanti o vernici oppure granuli adoperabili per lo stampaggio. La tecnologia adoperata è del tutto simile a quella tradizionale delle industrie di trasformazione delle materie plastiche, inoltre la possibilità di ottenere estrusi di forma cava ha fatto sì che i compositi polimero-legno fossero adottati anche per la realizzazione di infissi, camminamenti esterni per balconate, ringhiere e scale; la grande versatilità nelle forme assunte dai semilavorati ha fatto sì che fosse possibile adoperare il legno in applicazioni dove prima questo era impensabile a causa della suscettibilità del legno agli agenti atmosferici.

Uno schema di processo del WPC è riportato in figura 2.8 .

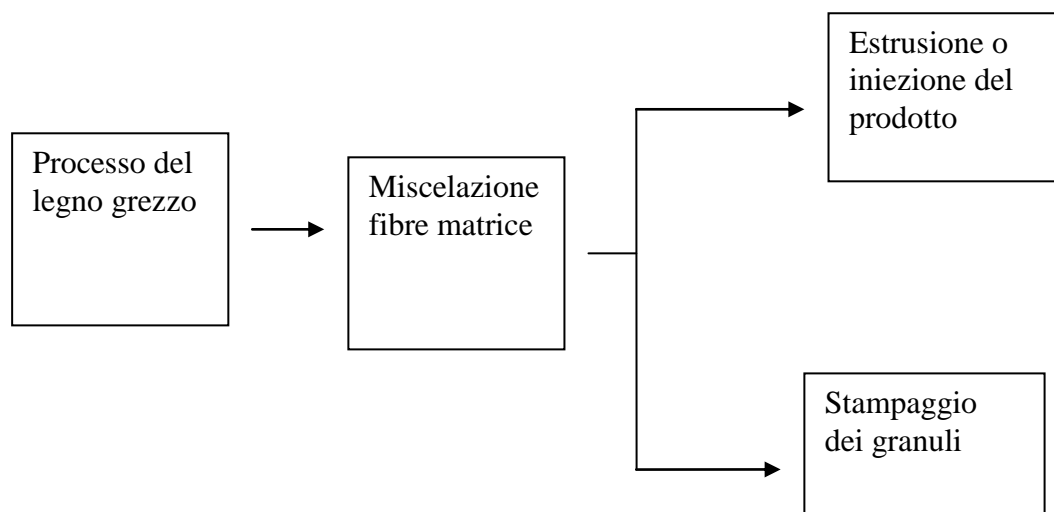


Fig. 2.8 Schema di processo del WPC

Il primo step prevede la preparazione delle materie grezze ed in particolare delle fibre di legno.

Successivamente una delle fasi più delicate è la miscelazione delle fibre con il materiale della matrice. In questa fase si possono raggiungere percentuali di rinforzo anche molto elevate (60-80%). La miscelazione avviene generalmente direttamente in un estrusore bivate e poi successivamente si ha l'estrusione per produrre direttamente profili o pellets che saranno o estrusi o stampati.

I maggiori sviluppi del settore sono orientati all'utilizzo di rinforzi misti legno-fibra di vetro, all'utilizzo di fibre lunghe vegetali come rinforzo strutturale per soppiantare l'utilizzo di fibre di vetro, oltre che all'ingegnerizzazione del processo di stampaggio ad iniezione; l'interesse per questa tecnologia deriva dal fatto che lo stampaggio ad iniezione permette di ottenere in maniera veloce prodotti dalle forme complesse a prezzi estremamente vantaggiosi.

La lavorazione di stampaggio ad iniezione richiede una conoscenza più approfondita della reologia del materiale rispetto al processo di semplice estrusione o dello stampaggio a compressione. Per questo tipo di caratterizzazione è molto utile adoperare un reometro a capillare; questo strumento permette di indagare un campo di velocità di deformazioni molto vasto in breve tempo, inoltre costringendo il materiale a fluire in canali di sezione molto piccola si

possono studiare alcuni fenomeni altrimenti non visibili con altri strumenti di indagine reologica. Per lo studio del comportamento reologico dei WPC il più comune reometro a piatto e cono non può essere adoperato come dimostrato da Hristov e altri [8]. Per i WPC risulta dunque essenziale l'uso di un reometro a capillare e non può essere sostituito da un reometro di tipo piatto e cono in regime oscillatorio dato che questi materiali non rispettano la legge di Cox-Merz date le peculiarità geometriche del rinforzo.

L'utilizzo di reometri a capillare comporta la necessità di un numero maggiore di prove con l'utilizzo di diversi diametri ma rapporto L/D costante per correggere il problema dello scorrimento alla parete. Questo fenomeno è estremamente importante nello studio della lavorabilità dei WPC sia a mezzo di estrusori che con tecniche di stampaggio ad iniezione in quanto alle alte temperature di estrusione/stampaggio i WPC si comportano come delle sospensioni affette dal fenomeno della migrazione del rinforzo in presenza di scorrimento alla parete; in pratica se il flusso di materiale non è in adesione alle pareti il rinforzo tende a concentrarsi verso il centro del flusso, lasciando una regione periferica del tutto priva di particelle disperse.

In questa direzione si è profuso lo sforzo di numerosi ricercatori, tra cui Li e Woolcott [9] Hristov e Vlachopoulos [10], per diverse tipologie di polietilene, mentre Maiti ed altri [11] ed Azizi e Ghasemi [12] per i compositi con matrice di polipropilene; a seguito di queste pubblicazioni è evidente che l'aspetto superficiale degli estrusi è fortemente influenzato dalla velocità di scorrimento alla parete. A seguito di queste pubblicazioni appare evidente come l'utilizzo di lubrificanti specifici per l'estrusione possano portare migliorie nell'aspetto finale degli estrusi, così come una opportuna scelta dei materiali dello stampo nelle lavorazioni di stampaggio ad iniezione possano favorire l'ottenimento di finiture superficiali più o meno vicine a quelle dei manufatti in legno o comunque differenti dall'aspetto tipico dei prodotti polimerici colorati con effetto legno.

La ricerca sugli aspetti reologici dei polimeri caricati con rinforzi lignei ha posto la sua attenzione anche sugli effetti degli agenti accoppianti adoperati nella produzione dei WPC sulle caratteristiche reologiche; Li e Wolcott [13] hanno dimostrato che l'utilizzo di compatibilizzanti come il MA-g-PE aumentano la viscosità dei compositi WPC, l'operazione di compatibilizzazione comporta dunque oltre ad un aumento delle caratteristiche meccaniche un aumento della coppia motrice richiesta per estrarre il materiale. Mancano attualmente studi atti a determinare il quantitativo ottimo di lubrificante e compatibilizzante per massimizzare le prestazioni meccaniche e al contempo ridurre la coppia motrice necessaria per l'estrusione del materiale.

La conoscenza della reologia dei WPC alle diverse temperature e concentrazioni può permettere una fase di ingegnerizzazione delle linee di produzione più veloce, fornendo i dati di comportamento del materiale durante le simulazioni di stampaggio ad iniezione permettendo così di risparmiare tempo e facilitando la fase di progettazione degli stampi.

Appare dunque evidente che gli sviluppi futuri nel campo delle lavorazioni per stampaggio ad iniezione dei WPC siano fortemente legati alla corretta modellazione dei canali e dei passaggi del materiale nello stampo, al fine di ottenere un prodotto dalle caratteristiche estetiche accettabili e alla corretta interpretazione dello strato di scorrimento che si viene a creare durante il fenomeno dello scorrimento alla parete.

## 2.2 APPLICAZIONI DEL WPC <sup>[14-16]</sup>

Attualmente la maggior parte dei compositi polimero legno (WPC) è adoperata nel settore dell'edilizia, che rappresenta il 65% del mercato di questi prodotti. In particolar modo il decking è il settore in cui i WPC sono molto presenti, si stima che il mercato nordamericano della pavimentazione sia occupato per il 15% da prodotti realizzati in WPC.

Il comparto delle costruzioni è interessato a poter adoperare materiali del tutto simili al legno senza le problematiche relative all'umidità e al fuoco; la possibilità di realizzare pavimentazioni per esterni del tutto simili al legno naturale ma con capacità di resistenza agli agenti atmosferici ed alla fiamma, unita alla semplicità nella fabbricazione di profili estrusi (fig2.9), hanno fatto sì che nascesse una fiorente industria del decking, ovvero della pavimentazione a mezzo di estrusi assemblabili ad incastro, soprattutto nei paesi a maggior vocazione ambientalista come il Giappone, gli Stati Uniti e recentemente l'Europa.



Fig2.9 Una selezione dei profili commerciali realizzati in WPC

Il punto di forza di questi materiali è, quindi, la loro performance superiore rispetto ai prodotti di legno comparabili. I prodotti in WPC sono più resistenti all'umidità e hanno meno probabilità di essere attaccati dalla muffa, non si deformano o scheggiano, sono generalmente più resistenti e hanno minori costi di manutenzione perché non hanno bisogno di essere verniciati o colorati. In più, il WPC può essere segato e installato come il legno.

Le attività correlate al giardino hanno ricevuto grande rilievo dai media negli ultimi anni che ha portato a focalizzare l'attenzione su progetti di design da giardino e beni costosi come piano di calpestio, coperture e verande che permettono l'uso del giardino per il tempo libero. L'interesse suscitato verso questo settore ha portato i produttori di WPC a sviluppare oggetti di design, pavimentazioni e arredi vari da esterni in WPC, sfruttando gli innumerevoli vantaggi ad esso associati (Fig. 2.10).

Come citato da molte fonti, il decking è il numero uno nelle applicazioni dei materiali WPC rappresentando circa il 60% della produzione totale del WPC.



Fig. 2.10 Prodotti in WPC

Il Wood Plastic Composite dona una piacevole sensazione di calore e comfort, oltre alla capacità di resistere al logorio dell'acqua. Può essere pertanto impiegato per rivestimenti di superfici che circondano piscine, grazie alla sua composizione che ne impedisce il deterioramento. Contrariamente al legno, che, a causa del sole e dell'umidità, naturalmente tende a modificare le sue caratteristiche tecniche, il WPC presenta una superficie particolarmente regolare e quindi calpestabile a piedi nudi. Ottimi sono i risultati in termini di impatto estetico, versatilità e flessibilità (fig. 2.11).

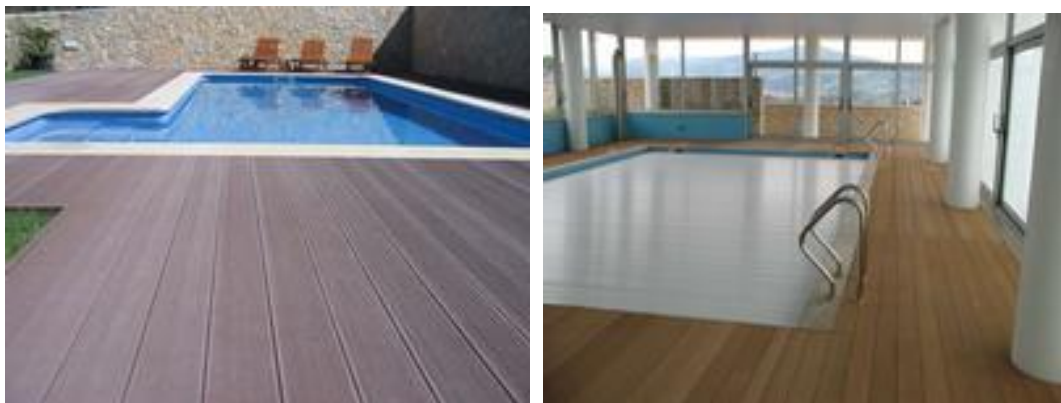


Fig. 2.11 Prodotti in WPC

All'interno del settore dei materiali da costruzione sono stati individuati una varietà di potenziali applicazioni in WPC.

Il 70% dei tradizionali materiali da costruzione nel mondo è legno che potrebbe essere sostituito quasi totalmente da prodotti WPC. Dall'arredamento alla struttura portante può essere usato anche dove il legno male si adatta alle condizioni ambientali. Pannelli fonoassorbenti, interpareti, porte, infissi interni ed esterni, mobili, cassetti, pavimentazioni, ecc. (Fig. 2.12 ).

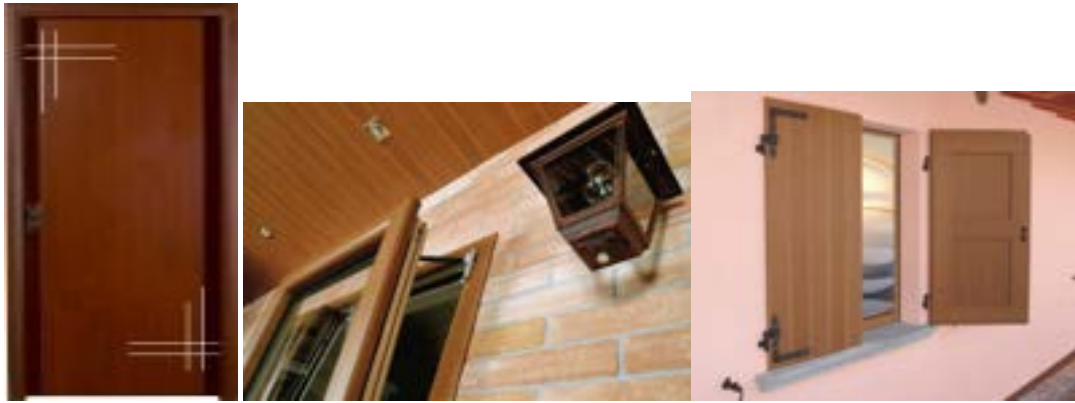


Fig.2.12 Porte e finestre in WPC

Ciò che rende così largamente utilizzato il WPC in queste applicazioni sono le sue esigenze di manutenzione limitate rispetto ai prodotti del legno (cioè pittura annuale o colorazione non sono richieste), la sua resistenza alla deformazione e frammentazione e sono esteticamente più gradevoli di finestre in PVC. I prodotti in WPC possono essere realizzati in una gamma di colori naturali che li fanno assomigliare al legno.

I profili delle finestre in WPC non sono fabbricati usando materiali riciclati post consumo. Tuttavia, piccole quantità di materiale di scarto del processo di fabbricazione degli infissi in PVC sono inseriti nel processo di produzione del WPC.

Processo di riciclaggio dei rifiuti è una pratica standard in tutto il settore finestra. La fibra di legno viene dal materiale di scarto derivante dalla produzione di prodotti standard di finestra in legno .

Il WPC viene, inoltre, impiegato per rivestimenti di superfici esterne verticali. Alla parete vengono fissati i magatelli (supporti sui quali vengono fissati i pannelli di WPC) su cui si avvitano le clips che permettono l'attacco delle doghe. Nell'intercapedine creata tra le doghe e la parete verticale si forma un flusso d'aria ascendente, azionato dal gradiente termico, dovuto dalla differenza di temperatura tra l'ambiente esterno e quello interno all'intercapedine. Questo fenomeno viene detto "effetto camino". La presenza di questo moto convettivo permette di mantenere il sottostante strato isolante sempre asciutto eliminando eventuali penetrazioni idriche. Il sistema consente di mantenere le pareti a temperatura più elevata, evitando fenomeni di condensa e aumentando il confort abitativo (Fig. 2.13).



Fig. 2.13 Pareti esterne in WPC

Nel campo delle costruzioni i compositi polimero-legno sono adoperati anche per la fabbricazione di installazioni sperimentali ibride con legno vergine per realizzare componenti strutturali di piccoli ponti (fig2.14).



Fig. 2.14 Ponte sperimentale

Nel settore marino viene fatto largo uso del legno sia nelle rifiniture delle imbarcazioni sia per la realizzazione di passerelle e pontili di attracco. Visto il gran numero di intemperie al quale questo legno viene esposto, per renderlo più duraturo, viene trattato a pressione.

L'introduzione del WPC sul mercato ha portato ad una quasi totale sostituzione di tutte le parti in legno con questo nuovo materiale.

La specifica resistenza all'umidità e alle muffe rende particolarmente indicato l'impiego del WPC nella realizzazione di pontili di attracco e passeggiate.

Le passeggiate ed i pontili in WPC sono esteticamente simili a quelli tradizionali e presentano un'ottima biocompatibilità con la flora e la fauna acquatica (fig. 2.15).



Fig. 2.15 Pontili in WPC

Il WPC sta via via sostituendo tutte le parti in legno (pavimentazioni, rivestimenti in genere) presenti sulle imbarcazioni. Anche in questo caso, lo svantaggio principale del legno risulta essere quello manutentivo: essendo esposti di continuo all'azione corrosiva dell'acqua marina, il legno necessita di continue opere di manutenzione per renderlo impermeabile. Con il WPC questo problema viene risolto senza però rinunciare al

fascino degli inserti in legno (Fig.2.16).



Fig. 2.16 Impiego di WPC in imbarcazioni

Altri campi di applicazione del WPC che stanno prendendo piede negli ultimi tempi sono quelle degli imballaggi. L'impiego di questo materiale riduce enormemente i rifiuti da imballaggio poiché è riutilizzabile svariate volte ed è inoltre realizzato con materie prime che non rilasciano polveri o sostanze cancerogene.

Le cassette termoformabili (Fig. 2.17) sono ottenute da lastre co-estruse realizzate miscelando una matrice polimerica con fibre naturali o minerali, per il trasporto e l'imballaggio di frutta e vegetali.



Fig.2.17 Cassette in WPC

Un altro settore in cui questi materiali possono risultare succedanei al legno è quello dei trasporti, in cui è possibile sostituire il legno dei pallet (fig.2.18) con gli estrusi di WPC, ottenendo sia un risparmio nella quantità di legno adoperato, sia la possibilità di usare scarti di legno in luogo del legno vergine.



2.18 Pallet per il trasporto e lo stoccaggio di colli in WPC

Al di fuori di queste aree applicative i WPC hanno recentemente trovato applicazione anche in settori come la cancelleria, dove la tedesca STAEDTLER produce una matita usando i materiali compositi polimero legno, vincendo il premio Design Plus 2009 bandito da “Material Vision” e nell'ottobre 2009 il premio "Bio Composite of the Year" per l'impiego dell'innovativo materiale legno-polimeri.

Il recente interesse del mercato per la sostenibilità e il basso impatto ambientale di materiali e prodotti hanno permesso una penetrazione più profonda di questi materiali grazie al basso impatto ambientale.

Altre ricerche hanno individuato una serie di applicazioni del WPC anche nella realizzazione di manici per utensili, traverse ferroviarie, accessori per ufficio, violini e fioriere. Essendo quest'ultime applicazioni sporadiche, non vi sono, purtroppo, molte informazioni a riguardo.

## Bibliografia

- [1] Geoff Pritchard, *Two technologies merge: wood plastic composites*, REINFORCED PLASTICS June 2004, Elsevier.
- [2] Wood Plastics Composites in Europe (2006) Analysis - Technology - Market Opportunities, the Hackwell Group.
- [3] Rodriguez, Ferdinand, *Principles of Polymer Systems 5Th Ed.*, Taylor & Francis Routledge.
- [4] A. Turco, *Nuovissimo ricettario chimico terza edizione* Volume 1, Hoelpi.
- [5] Anatole A. Klyosov, *Wood-Plastic Composites*, John Wiley & Sons, Inc..
- [6] Jennifer Markarian, *Wood-plastic composites: current trends in materials and processing*, Plastics Additives & Compounding, September/October 2005, Elsevier.
- [7] A. K. Mohanty, M. Misra, L. T. Drzal, NATURAL FIBERS, BIOPOLYMERS, AND BIOCOSCOMPOSITES, Taylor & Francis Group, LLC.
- [8] Velichko Hristov, Elizabeth Taka'cs, John Vlachopoulos; Surface Tearing and Wall Slip Phenomena in Extrusion of Highly Filled HDPE/Wood Flour Composites; POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE—2006
- [9] T.Q. Li, M.P. Wolcott Rheology of HDPE-wood composites. I. Steady state shear and extensional flow; Composites: Part A 35 (2004) 303–311
- [10] Velichko Hristov, John Vlachopoulos Effects of Polymer Molecular Weight and Filler Particle Size on Flow Behavior of Wood Polymer Composites; POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE—2006
- [11] S. N. Maiti, R. Subbarao, Mohd. Nordin Ibrahim Effect of Wood Fibers on the Rheological Properties of i-PP/Wood Fiber Composites Journal of Applied Polymer Science, Vol. 91, 644–650 (2004)

- [12] H. Azizi, I. Ghasemi Investigation on the Dynamic Melt Rheological Properties of Polypropylene/Wood Flour Composites POLYMER COMPOSITES—2009
- [13] T.Q. Li, M.P. Wolcott; Rheology of Wood Plastics Melt. Part 1. Capillary Rheometry of HDPE Filled With Maple; POLYMER ENGINEERING AND SCIENCE—2005
- [14] Optimat Ltd and MERL Ltd; Wood plastic composites study – Tecnology and uk market opportunity; The Waste and Resources Action Programme The Old Academy, 21 Horsefair, Banbury, Oxon OX16 0AH
- [15] Donald A. Bender, P.E., Michael P. Wolcott, J. Daniel Dolan, P.E.; Wood Plastic Composites Structural Design and Applications; Structure magazine. March 2007 :43-46
- [16] Using Wood Composites as a Tool for Sustainable Forestry; Proceedings of Scientific Session 90, XXII IUFRO World Congress

### 3. Compositi con fibre naturali lunghe

L'utilizzo di fibre naturali, non derivate da legno, sta incrementando maggiormente in alcuni settori industriali quali quello automobilistico e quello del packaging. Nel passato scarti di fibre naturali provenienti dal settore tessile erano usati nella Trabant. Oggi la Mercedes ha pianificato, con impiego di fibre di canapa e lino, lo sviluppo della serie K, dove K sta per "kraut" e "Compost". [1]

In particolare l'impiego delle fibre naturali riguarda pannelli di porte o di tetto, vi sono però studi relativi anche ad altri componenti quali ad esempio le pastiche per freni in sostituzione delle fibre di asbesto[2].

Naturalmente per le applicazioni industriali i processi tecnologici giocano un ruolo fondamentale. Mentre per le resine termoindurenti possono essere utilizzati tutti i processi di produzione già impiegati con fibre di vetro e carbonio, per i termoplastici si possono adottare solo processi tipo compression molding. Tutti i processi di iniezione generalmente utilizzati per processare termoplastici sono applicati per le fibre corte(WPC); negli ultimi anni sono state sviluppate delle tecnologie per il processo di fibre lunghe naturali; in particolare un processo per la realizzazione di semilavorati è stato messo a punto dalla BASF con impiego di PP come matrice e mat in fibre naturali (NMT: natural mat reinforcing thermoplastic)[3]. Il processo "Express" [4] di estrusione fu sviluppato dalla Daimler Benz per la produzione di compositi a matrice di PP con fibre di lino non tessute. Il processo consiste nella sovrapposizione alternata di strati di fibra e termoplastico che esce da un estrusore mobile all'interno di uno stampo successivamente chiuso e pressato a caldo.

Comunque le maggiori difficoltà di processo hanno contribuito ad una minore espansione nelle applicazioni industriali dei compositi a fibre lunghe rispetto al WPC. La ricerca scientifica invece, ha ampiamente studiato il comportamento dei termoplastici rinforzati con fibre lunghe soprattutto in relazione ai compatibilizzanti e le percentuali da adottare per migliorare le proprietà meccaniche. Anche per l'uso di compatibilizzanti le fibre lunghe presentano maggiori difficoltà di trattamento rispetto alle fibre corte che possono essere miscelate con il compatibilizzante direttamente nell'estrusore. I vari processi per migliorare l'adesione fibra matrice saranno trattati nel successivo paragrafo. Si riportano, in tabella 3.1, alcuni valori di confronto di proprietà a trazione tra differenti compositi PP-fibra di sisal, di lino e di vetro.

Materiale	Resistenza(MPa)	Modulo(MPa)
PP-wood flour	19	2500
PP-sisal non-woven	38	3600
PP-sisal non-woven with surface treatment	55	4800
PP-flax non-woven	47	5100
PP-flax non-woven with surface treatment	67	6700
PP-glass non-woven	100	6000

Tabella 3.1 .Valori delle proprietà a trazione di compositi con il 40% in peso di fibra[3]

Tali valori sono solo indicativi del fatto che con le fibre naturali lunghe si possono raggiungere valori del tutto simili a quelli delle fibre di vetro.

#### Bibliografia

- [1] Wittig W. *Kunststoffe im Automobilbau*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994
- [2] A.K. Bledzki, J. Gassan, *Composites reinforced with cellulose based fibres*, *Prog. Polym. Sci.* 24 (1999) 221–274
- [3] Baumgartl H, Schlarb A. 2. Symposium Nachhaltig Rohstoffe-perspektiven für die Chemie. Frankfurt, 5–6 May 1993.
- [4] Schloßer Th, Förster Th. *Kunststoffe* 1995;85(3):319–321.
- [5] Snijder, M.H., Bos, H., 2000. Reinforcement of polypropylene by annual plant fibers: optimisation of the coupling agent efficiency, *Comp Interface*, 7,69.

#### 4. Adesione all'interfaccia fibra matrice

Uno dei principali temi di ricerca scientifica per i compositi a fibra naturale è legato all'adesione fibra matrice.

Le fibre o filler di cellulosa sono polari e idrofile mentre i termoplastici come PP e PE sono non polari ed idrofobi. Queste caratteristiche sono la causa di una incompatibilità chimica tra fibre naturali e termoplastici. In particolare si hanno difficoltà nella distribuzione delle fibre nella matrice e scadenti proprietà all'interfaccia con decadimento delle proprietà meccaniche[1].

Le fibre naturali sono polimeri eterogenei complessi le cui proprietà superficiali dipendono dal tipo di pianta da cui derivano, dalla quantità e dal tipo di componenti presenti e dai trattamenti subiti. Per caratterizzare le proprietà dell'interfaccia fibra-matrice, importanti per la comprensione delle proprietà meccaniche del composito, sono state sviluppate alcune tecniche sperimentali: i test di *pull-out*,[2], i *single fiber fragmentation test* (SFFT),[3] il *fiber push out*[4], ecc. L'applicazione di questi metodi consiste nell'incapsulare in una matrice selezionata una singola fibra o più fibre parallele e sottoporle a trazione in direzione longitudinale. A questo punto è possibile analizzare la lunghezza delle fibre che sporgono dalla matrice dopo frattura del composito (test di *pull out*), il numero di frammenti in cui si spezza la fibra (SFFT) oppure la forza per estrarre la fibra dalla matrice (*push out*). L'adesione tra la fibra e la matrice utilizzata può essere ricavata da questi parametri misurabili applicando procedure matematiche complesse.

Per migliorare l'interfaccia fibra-matrice, qualora non sia sufficiente per osservare un effetto di rinforzo, sono stati ampiamente studiati metodi chimici o fisici atti a modificare la matrice, le fibre in superficie, o entrambe.[5]

#### 4.1 METODI FISICI

Con trattamenti termici, con plasma o con scariche elettriche,[6,7] si possono ossidare i gruppi ossidrilici presenti sulla superficie delle fibre, a gruppi meno polari (come ad esempio le aldeidi) oppure si possono innestare sostanze apolari sulle fibre. La versatilità di queste tecniche è legata alla possibilità di variare il tipo di gas, la potenza elettrica e il tipo di carica usata. D'altra parte i trattamenti fisici presentano l'inconveniente di produrre, insieme alla modifica superficiale, anche reazioni di degradazione delle fibre.

#### 4.2 METODI CHIMICI

L'adesione fibra-matrice può essere migliorata anche attraverso reazioni chimiche che modificano la matrice[6,8-13], la fibra in superficie oppure a legano covalentemente gruppi più idrofobi sulle fibre[14] o polari nella matrice.

Alternativamente sono stati studiati e introdotti compatibilizzanti e agenti di accoppiamento specifici per una certa matrice[1-18]. Come nelle miscele di polimeri incompatibili, i compatibilizzanti sono copolimeri a blocchi o ad innesto che contengono segmenti che si sciolgono bene nella matrice e segmenti che invece possono dare buone interazioni superficiali con le fibre.

I principali metodi chimici per favorire l'adesione sono quindi:

##### Trattamenti con anidride

Anidride maleica, acetica, succinica, italica sono impiegate come compatibilizzanti per compositi vegetali.

Per esempio l'anidride ftalica può essere utilizzata come agente di accoppiamento per fibre di legno e polistirene: l'anello benzenico dell'anidride ftalica interagisce con gli anelli del polistirene e il gruppo anidride con gli ossidrilici della cellulosa[15-16]. In fig.4.1 si riporta uno schema del processo.

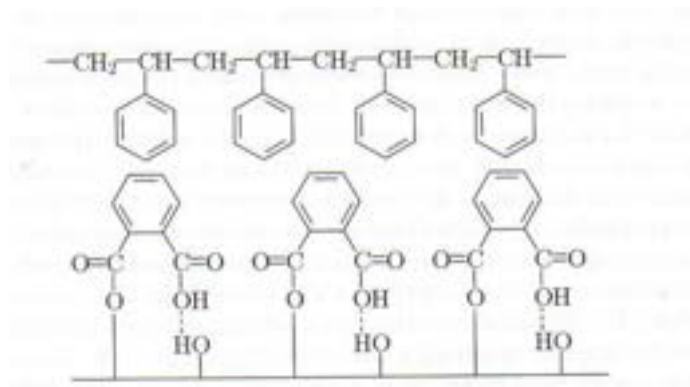


Fig.4.1 Ipotesi di interazione tra anidride italica e polistirene

Stesso effetto lo si raggiunge tra anidride maleica e PP o PE. In un lavoro di *Felix e Gatenholm*[14] un copolimero di unità propileniche e unità di propilene modificato con anidride maleica PP-(MAH-PP), viene esterificato sulla

superficie delle fibre. *Takase e Shiraishi*[17] hanno invece modificato la matrice con gruppi polari come l'anidride maleica, l'idrossimetilmetacrilato e il glicidilmetacrilato. Infine il PP graffato con anidride maleica è un perfetto agente di accoppiamento per il PP rinforzato con fibre naturali:[14,18-19] i segmenti di PP del compatibilizzante si sciolgono nella matrice mentre i segmenti modificati con l'anidride maleica possono dar luogo a legami idrogeno con gli ossidrili delle fibre ancorandole strettamente alla matrice.

#### Trattamenti con silano

Esempi di compatibilizzante sono diversi tipi di silano A-172,A-174,A-1100. Un'ipotesi di legame è riportata in fig.4.2.

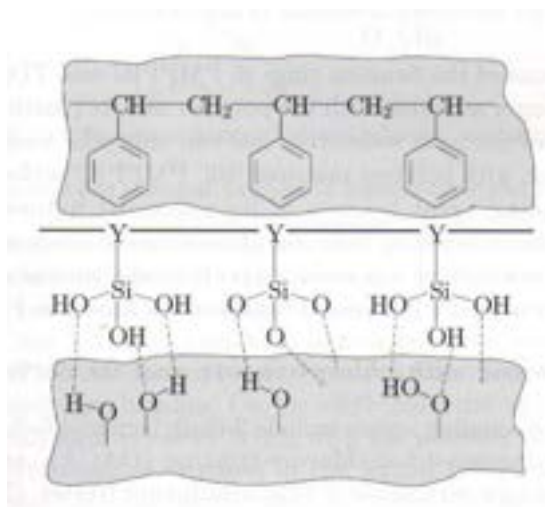


Fig. 4.2 Ipotesi di struttura tra lignocellulosa-silano-polistirene

#### Trattamenti con isocianati

Sono impiegati per favorire l'adesione con polistirene e polietilene. I tre tipi comunemente usati sono:PMPPIC, TDIC, HMDIC. L'efficienza del legame decresce nel modo seguente: PMPPIC>TDIC> HMDIC[20]

#### Bibliografia

- [1] P. J. Herrera-Franco, M. J. Aguilar-Vega *J. Appl. Polym. Sci.* **1997**, 65, 197.
- [2] A. Stamboulis, C. Baillie, E. Schulz *Die Angew. Makrom. Chem.* **1999**, 272, 117.
- [3] A. Valadez-Gonzales, J. M. Cervantes-Uc, R. Olayo, P. J. Herrera-Franco *Composites Part B* **1999**, 30, 309.
- [4] J. K. Kim, S. Lu, Y. W. Mai *J. Mater. Sci.* **1994**, 29, 554.
- [5] J. George, M. S. Sreekala, S. Thomas *Polym. Eng. Sci.* **2001**, 41, 1471.
- [6] P. Zadorecki, P. Flodin *J. Appl. Polym. Sci.* **1985**, 30, 3971.
- [7] N. M. Belgacem, P. Bataille, S. Sapiaha *J. Appl. Polym. Sci.* **1994**, 53, 379.
- [8] D. Maldas, B. V. Kokta *Composites Interfaces* **1993**, 1, 87.
- [9] J. A. Trejo-O'Reilly, J. Y. Cavaille, A. Gandini *Cellulose* **1997**, 4, 305.
- [10] G. Frisoni, M. Baiardo, M. Scandola, D. Lednickà, M. C. Cnockaert, J. Mergaert, J. Swings *Biomacromolecules* **2001**, 2, 476.
- [11] E. Zini, M. Scandola, P. Gatenholm *Biomacromolecules* **2003**, 4, 821.
- [12] "Chemical modification of the surface of natural fibers" European Patent Application EP 1 170 415 A1 invs.: M. Scandola, S. Sandri, M. Baiardo, G. Frisoni, **2002**.

- [13] M. Baiardo, G. Frisoni, M. Scandola, A. Licciardello *J. Appl. Polym. Sci.* **2002**, 83, 38.
- [14] J. M. Felix, P. Gatenholm *J. Appl. Polym. Sci.* **1991**, 42, 609.
- [15] D. Maldas, B. V. Kokta *J. Appl. Polym. Sci.* **1990**, 41, 185.
- [16] R. G. Raj, B. V. Kokta, D. Maldas, C. Daneault *J. Appl. Polym. Sci.* **1989**, 37, 1089.
- [17] S. Takase, N. Shiraishi *J. Appl. Polym. Sci.* **1989**, 37, 645.
- [18] A. C. Karmaker, J. A. Youngquist *J. Appl. Polym. Sci.* **1996**, 62, 1147.
- [19] V. Tserki, C. Matzinos, C. Panayiotou *J. Appl. Polym. Sci.* **2003**, 88, 1825.
- [20] Lu JZ, Wu Q and Mc Nabb HS, Chemical coupling in wood fiber and polymer composites: A review of coupling agents and treatments, *Wood fiber science* (2000), 32, 88-104.

## 5. Applicazioni nel settore automobilistico di polimeri rinforzati con fibre naturali <sup>[1-2]</sup>

I materiali polimerici rinforzati con fibre naturali sono attualmente utilizzati anche nel settore automobilistico per applicazioni interne. Le fibre naturali sono normalmente impiegate per la realizzazione di tessuti per interni, ma negli ultimi decenni i più importanti produttori di componenti per auto utilizzano WPC o in generale polimeri rinforzati da fibre naturali. Ciò che motiva la scelta di utilizzare tali materiali per alcuni componenti di automobili è il peso ridotto, la capacità di isolamento acustico e soprattutto la possibilità di poter riciclare il materiale al termine della vita dell'automobile; si prestano ad essere utilizzati come materiale naturale di sostegno e come prodotti finiti, colorati, accoppiati o saldati ad altri materiali. Da qui le applicazioni nell'allestimento di carrozzerie di ogni genere, dalle vetture agli autocarri, dai camper ai mezzi industriali (fig.5.1).



Fig.5.1 Elementi per interiors realizzati in WPC

Nelle fig.5.2 e 5.3 si riporta l'utilizzo delle differenti fibre vegetali nel mercato automobilistico tedesco.

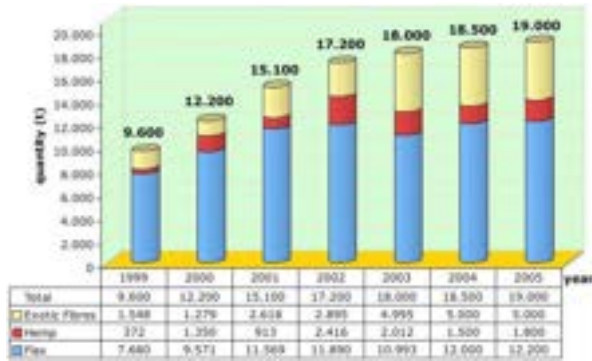


Fig. 5.2 Quantità di fibre impiegate nel settore automobilistico in Germania

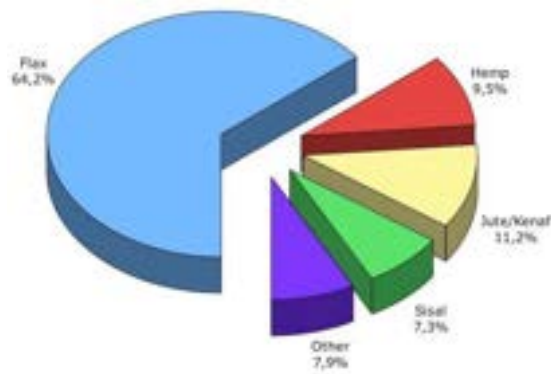


Fig. 5.3 Fibre naturali impiegate nel settore automobilistico in Germania

Nelle fig.5.4 si riportano per i vari modelli della Mercedes i diversi elementi realizzati con fibre naturali.

	
<p>A-class weight: 24 kg - 26 components</p>	<p>C-class weight: 17 kg - 20 components</p>



	
<p>E-class weight: 32 kg - 50 components</p>	<p>S-class (new)weight: 43 kg (+73 % compared to previous S-class model) 32 components</p>

Fig. 5.4 Componenti in fibra naturale impiegati in modelli della Mercedes

Ma sono ormai diversi i modelli di automobile in Europa per i quali vengono impiegati compositi a fibra naturale. In fig. 5.5 si riportano alcuni esempi.

**ALCUNI DEI PRIMI MODELLI DI VETTURA CON COMPONENTI IN COMPOSITO VEGETALE IN EUROPA**

<b>VW</b>		Golf, Passat, Bora
<b>Audi</b>		A3, A4, A6, A8, A4 Avant, Roadster
<b>Mercedes</b>		Tutti i modelli, inclusi Classe A, Classe E, Classe S
<b>Opel</b>		Vectra, Astra, Zefira
<b>Ford</b>		Mondeo, Focus
<b>Fiat</b>		Punto, Idea, Musa, Alfa 146, Alfa 156
<b>Renault</b>		Clio
<b>Volvo</b>		C70, V70




Fig.5.5 Modelli di autovettura che utilizzano compositi a fibra naturale

[1] A. Pipino, Evoluzione materiali eco-sostenibili nell'auto, 3°Convegno ATA "Materiali per l'ecosostenibilità", Pomigliano d'Arco,6 Novembre 2009.

[2] G. Levita, G. Belfiore,Compound termoplastici 100%ecocompatibili per componenti automobilistici, 3°Convegno ATA "Materiali per l'ecosostenibilità", Pomigliano d'Arco,6 Novembre 2009.

## 6. Conclusioni

I materiali basati su cellulosa naturale, come fiocchi di legno, fibre di legno, fibre da agricoltura rappresentano rinforzi e riempitivi molto interessanti per i termoplastici. I vantaggi che offrono rispetto ai rinforzi o riempitivi sintetici sono legati al basso peso specifico, abbondanza, rigidità e resistenza specifiche, basso costo. Sono riciclabili, rinnovabili e biodegradabili. I compositi a base legno possono essere divisi in due gruppi, convenzionali e nuovi. Alla prima categoria appartengono quei compositi in cui le fibre naturali sono incollate con adesivi termoindurenti presenti in basse percentuali (10%-20%)[1], un'applicazione sono i pannelli MDF. I nuovi sono quelli in cui si adopera una matrice termoplastica la cui presenza nel composito può anche superare il 50%. Questi compositi possono essere processati come i convenzionali termoplastici e con le stesse attrezzature [2]. La fase continua di matrice incrementa la resistenza all'acqua e la stabilità dimensionale in quanto protegge maggiormente le fibre rispetto al composito classico [3].

L'utilizzo di una matrice termoplastica rende questo composito riciclabile [4].

L'interesse in questi materiali sta crescendo sempre di più soprattutto in USA , ASIA ed Europa dell'ovest [5].

Il fatto che le fibre di legno siano riciclabili, biodegradabili e rinnovabili gioca un ruolo fondamentale nel futuro utilizzo, essendo crescente il numero di persone sensibili ai problemi legati all'ambiente. Naturalmente all'utilizzo delle fibre di legno come rinforzo sono legati alcuni problemi dovuti principalmente all'igroscopicità delle fibre ed alla difficoltà di dispersione delle stesse in una matrice termoplastica. Un altro fattore che limita l'utilizzo di tali fibre con poche matrici termoplastiche è legato alla bassa temperatura di degradazione (200°C).

Negli ultimi anni lo studio di fibre lunghe naturali è stato molto intenso, sono state evidenziate le ottime proprietà di compositi rinforzati con tali fibre. Restano alcune problematiche relative alle tecnologie di produzione che non consentono elevate produttività. Per tale motivo il WPC resta il materiale maggiormente impiegato per i processi industriali. Tuttavia la possibilità di impiegare fibre lunghe consente di realizzare laminati unidirezionali che prevedono di sfruttare al meglio le caratteristiche meccaniche dei materiali. Proprietà meccaniche più elevate, anche ad alte temperature, consentirebbero di ampliare i campi di applicazione delle fibre naturali. In particolare nel settore automobilistico dove tali materiali restano confinati nella produzione di interiors.

Per tale motivo nella ricerca che si intende sviluppare si terrà conto della possibilità di rinforzare polimeri con fibre lunghe. Lo studio comprenderà, comunque, la realizzazione e la valutazione delle proprietà meccaniche di WPC. Questi compositi restano quelli più utilizzati in campo industriale e possono garantire buone proprietà estetiche.

Per la realizzazione di pannelli in WPC si utilizzerà PE ( come già detto è uno dei pochi polimeri che può essere utilizzato con fibre naturali) perché garantisce delle buone proprietà meccaniche e presenta comunque una densità paragonabile a quella delle fibre naturali. I pannelli di WPC saranno realizzati con differenti percentuali di polpa di legno.

Le tecnologie che si intende adoperare sono quelle classiche per il processo dei polimeri. Adoperando tali tecnologie si cercherà di realizzare pannelli in WPC rinforzato anche con fibre lunghe di canapa. La scelta della canapa è legata alle elevate proprietà meccaniche della fibra da essa estratta ed al fatto che è ampiamente coltivata in Italia.

E' stata condotta una prima fase di sperimentazione su fibre di canapa coltivate in Italia e fornite da ASSOCANAPA; in particolare in fig 6.1 si riporta una fotografia al microscopio ottico di una fibra. Dalla foto è possibile notare la presenza di più filamenti singoli costituenti la singola fibra.

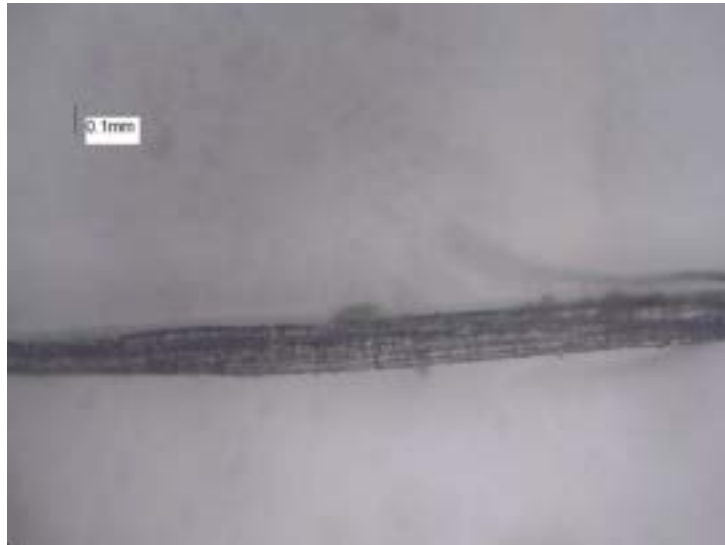


Fig. 6.1 Fotografia di una fibra di canapa al microscopio ottico

Su tali fibre di canapa sono state realizzate anche delle prove di trazione con un DMA RSA III della TA Instruments, una fotografia della prova è riportata in fig.6.2.

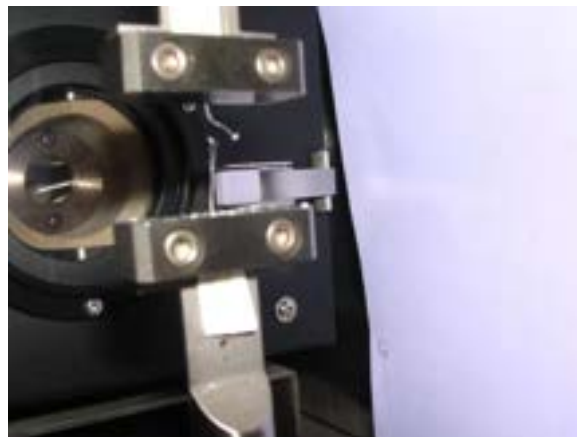


Fig. 6.2 Prove di trazione su singola fibra

I valori medi del modulo di Young e della resistenza a trazione sono riportati in tabella 6.1 .

Modulo di Young (GPa)	Resistenza a trazione (MPa)
53	650

Tabella 6.1 Proprietà meccaniche di fibre di canapa

Dai valori riportati in tabella si può notare che tali fibre presentano delle ottime proprietà meccaniche paragonabili a quelle delle fibre di vetro. E' quindi giustificato l'impiego di tali fibre nella produzione di pannelli in composito per incrementare le proprietà meccaniche.

In definitiva la ricerca potrà focalizzarsi sulla realizzazione e caratterizzazione di pannelli di WPC con differenti percentuale di rinforzo e di pannelli in WPC rinforzati con fibre lunghe di canapa per cercare di migliorare le proprietà

meccaniche senza alterare quelle estetiche. Si impiegheranno fibre sciolte distribuite casualmente o in strati monodirezionali. Si adotterà un estrusore per la realizzazione di un semilavorato in WPC che potrà poi essere stampato con o senza fibre lunghe per ottenere dei pannelli che saranno successivamente impiegati per le prove di caratterizzazione termomeccanica.

#### Bibliografia

- [1] Youngquist J, (1999) Wood-based composites and panel products, in Wood Handbook-Wood and Engineering Material, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Lab, Madison.
- [2] English B, Chow P and Bajwa B, (1997) Processing into composites, in Paper and composites from agrobased resources (eds. Rowell R, Young R, Rowell J) CRC Press, New York.
- [3] Oksman K Lindberg H, (1995) Interaction between wood and synthetic polymers, *Holzforschung* 49:249-254.
- [4] Sanadi A, Caulfield D and Jacobson R, Agro-fiber thermoplastic composites, in Paper and composites from agrobased resources (eds. Rowell R, Young R, Rowell J) CRC Press, New York
- [5] Wolcott M, Smith P (2005) Wood-plastic composite- markets and application, 39<sup>th</sup> Int Wood Composites Symp, Pullman, Washington, USA.