

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA E MECCATRONICA

**TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA
MECCANICA**

**Materiali compositi, in applicazioni automotive,
con fibre di origine naturale**

Relatore: **Prof. Enrico Bernardo**

Laureando: **Alberto Giaretta**

Anno accademico 2012 – 2013

Indice

1	Introduzione	3
2	Normative per il settore automotive	7
3	Tipi di fibre	9
3.1	Fibre Naturali	9
3.1.1	Tipi di fibre naturali	9
3.1.2	Proprietà delle fibre naturali	10
3.1.3	Produzione delle fibre naturali	11
3.1.4	Lavorazione delle fibre naturali	12
3.1.5	Applicazioni in ambito automotive	13
3.2	Fibre di vetro	20
3.2.1	Tipi di fibre di vetro	20
3.2.2	Proprietà delle fibre di vetro	21
3.2.3	Produzione delle fibre di vetro	21
3.2.4	Vetroresina	22
3.2.5	Applicazioni in ambito automotive	23
3.3	Confronto tra fibre naturali e fibre di vetro	26
4	Matrici utilizzate con le fibre naturali	29
4.1	Matrici polimeriche termoindurenti e termoplastiche	29
4.1.1	Matrici termoplastiche utilizzate	30
4.1.2	Matrici termoindurenti utilizzate	30
4.2	Matrici di origine naturale	30
5	Riciclo dei materiali compositi	31
5.1	Riutilizzo	31
5.2	Riciclo	31
5.2.1	Riciclo di compositi con matrice termoplastica	32
5.2.2	Riciclo di compositi con matrice termoindurente	33
5.2.3	Tecnologie di riciclo	33
6	Confronto tra materiali compositi	35
7	Conclusioni	37
8	Bibliografia	39
9	Sitografia	41

1. Introduzione

I materiali compositi nascono dalla richiesta di soddisfare insolite proprietà in un unico materiale, si tratta di materiali di solito non presenti in natura che sono il risultato di una combinazione tridimensionale di almeno due materiali tra loro chimicamente differenti con un'interfaccia di separazione.

I materiali compositi si distinguono dai metalli in quanto si tratta della combinazione di materiali tra loro differenti per composizione o forma. I solidi metallici sono isotropi, cioè le proprietà meccaniche di un punto non variano al variare delle direzioni secondo cui esse sono considerate; mentre per i materiali compositi ciò non è sempre verificato.

Il materiale composito è caratterizzato da una struttura non omogenea, dovuto al fatto che ogni materiale che lo compone corrisponde ad una fase, e vanta proprietà chimico-fisiche non riscontrabili nei singoli materiali che lo compongono. Lo scopo di questa unione è dare al nuovo materiale proprietà migliori rispetto a quelle dei singoli costituenti; a seconda della loro funzione prendono il nome di rinforzo o matrice.

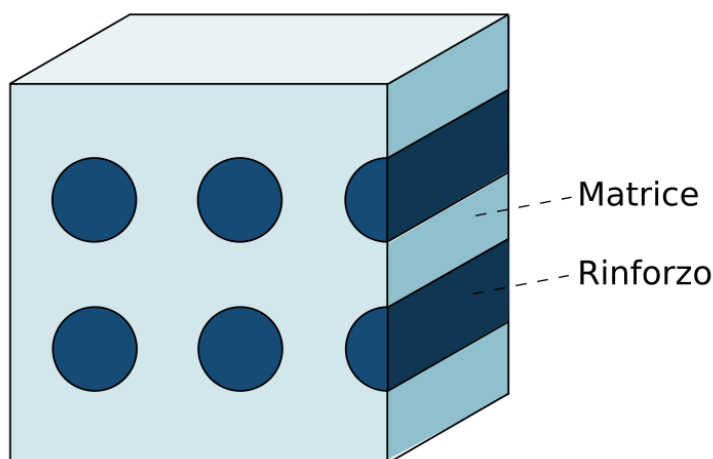


Fig. 1.1 Struttura di un materiale composito rinforzato con fibre

La matrice è costituita da una fase continua omogenea il cui compito è di racchiudere il rinforzo e mantenerlo in posizione assicurandone la coesione, la giusta dispersione e l'assenza di segregazione; poiché i rinforzi sono solitamente discontinui tra loro, la matrice ha anche la funzione di trasferimento dei carichi.

Nella zona di contatto tra rinforzi e matrice si crea la fase d'interfaccia che è sede di particolari interazioni chimico-fisiche, fondamentali per il trasferimento di carico tra matrice e fibre.

Infine ci sono le porosità che sono delle piccole imperfezioni dovute

all'incompleta infiltrazione della matrice negli spazi tra le fibre.

I rinforzi dei materiali compositi sono il costituente che migliora le caratteristiche della matrice e sono di tre tipi: particolati, fibre discontinue e fibre continue.

I particolati hanno approssimativamente le stesse dimensioni in ogni direzione benché non siano necessariamente in presenza di elementi sferici. Alcuni esempi di rinforzi particolati sono ghiaie, microgranuli e polveri di resina.

I rinforzi di materiali compositi si dicono fibre quando una dimensione diventa prevalente rispetto alle altre. Rinforzi in fibra discontinua possono variare in lunghezza da pochi millimetri ad alcuni centimetri. La maggior parte delle fibre ha un diametro di pochi micron, quindi basta poco per passare da particolato a fibra.

Nel caso dei particolati e delle fibre discontinue la matrice deve trasferire i carichi ad intervalli di tempo estremamente ravvicinati; di conseguenza le proprietà finali del composito non riescono ad avvicinarsi più di tanto a quelle tipiche del rinforzo.

Nel caso di rinforzi di materiali compositi a struttura continua, invece, ci sono poche o nessuna interruzione nella struttura del rinforzo e le proprietà fisico-chimiche del composito migliorano lungo la direzione delle fibre. In caso di trazione del materiale avviene un trasferimento del carico tra le fibre e la matrice, se l'interfaccia è adeguatamente forte, e le due fasi collaborano ed hanno uguale deformazione.

Nel caso in cui il composito sia rinforzato con fibre continue unidirezionali o discontinue allineate le proprietà devono considerarsi anisotrope, poiché è presente una sola direzione che identifica le proprietà meccaniche massime per tutti i punti del materiale.

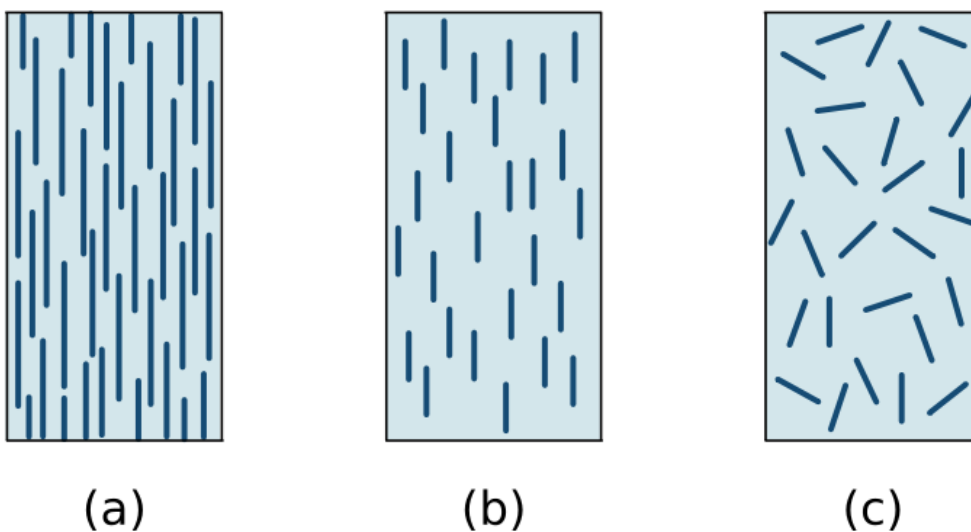


Fig. 1.2 Tipologie di materiali compositi rinforzati con fibre: a) fibre continue; b) fibre discontinue allineate; c) fibre discontinue orientate in modo casuale

Le proprietà dei compositi vengono enfatizzate quando le sollecitazioni cui sono sottoposti avvengono lungo l'asse in cui sono disposte le fibre. Invece le proprietà della matrice prevalgono nel caso di sollecitazioni perpendicolari o trasverse alle fibre poiché in questo caso le sollecitazioni devono essere sopportate dal diametro di ciascuna fibra nella matrice stessa.

Dato che la maggior parte delle strutture non viene sollecitata in un solo senso, benché possa esserci un senso prevalente, è necessario orientare le fibre in più direzioni.

Ciò viene ottenuto con la sovrapposizione di più fogli. L'insieme sovrapposto dei fogli è chiamato laminato.

I materiali usati per le matrici sono solitamente dei tipi di plastica e questi compositi sono conosciuti col nome di plastiche rinforzate. Esistono altri tipi di matrici, di origine metallica o ceramica, ma quelle plastiche sono di gran lunga le più comuni.

I tipi di matrice polimerica sono due, matrici termoindurenti e matrici termoplastiche.

Le matrici termoindurenti sono le più diffuse, il loro impiego consiste nell'impregnare le fibre con dei pre-polimeri liquidi che poi reagiscono con uno speciale induritore che trasforma la matrice in solida. Le matrici più comuni sono le epossidiche e le poliestere insature. Questo tipo di matrici sono materiali fragili in quanto hanno una deformabilità limitata.

L'altro tipo di matrici polimeriche sono quelle termoplastiche, costituite da molecole con elevato peso molecolare, che a differenza delle prime non sono reticolate ma, grazie a particolari gruppi chimici nelle catene polimeriche, massimizzano i legami intermolecolari deboli; con queste proprietà sono più deformabili e meno fragili rispetto alle matrici termoindurenti. La matrice termoplastica viene iniettata allo stato fuso in modo da riempire gli spazi tra le fibre del materiale composito da formare.

2. Normative per il settore automotive

Il Protocollo di Kyoto, firmato nel 1997, è un trattato internazionale relativo al riscaldamento globale del pianeta terra. Esso è entrato in vigore il 16 febbraio 2005 e prevede, per i paesi sottoscrittori, l'obbligo di ridurre, nel periodo 2008-2012, le emissioni ad effetto serra (biossido di carbonio, metano, ossido di azoto, idrofluorocarburi, perfluorocarburi, esafluoruro di zolfo) in misura non inferiore al 5,2% rispetto alle emissioni registrate nel 1990. Per l'Italia il valore percentuale di riduzione fissato era del 6,5%, obiettivo raggiunto e superato alla fine del 2012 con una diminuzione del 7% dei gas serra.

Si è dimostrato un buon punto di partenza, ma le emissioni globali sono ancora in continuo aumento. Con l'accordo Doha l'estensione del protocollo è stata prolungata fino al 2020.

L'unione Europea ha delineato un piano che porterà entro il 2050 alla riduzione delle emissioni di anidride carbonica del 60%, inoltre ha attuato una legge che prevede che tutti i veicoli prodotti dopo il 2006, alla fine del loro ciclo di vita, siano per almeno l'80% riutilizzati o riciclati; questa percentuale entro il 2015 dovrà essere dell'85%. Attualmente in Giappone è previsto che almeno l'88% di un veicolo sia recuperabile, percentuale che entro il 2015 diventerà del 95%. Anche negli Stati Uniti, seppur più recentemente, sono state emanate normative simili.

Il risultato di queste norme è che la maggior parte delle case automobilistiche stanno valutando l'impatto ambientale del ciclo di vita dei veicoli, dalle materie prime, alla produzione, ai consumi, allo smaltimento; con la priorità di interessarsi alla sostenibilità globale.

3. Tipi di fibre

Esistono tre tipi principali di fibre nell'automotive, che sono fibre naturali, fibre di vetro e fibre di carbonio; tratteremo solo le prime due che sono le più utilizzate nel settore automobilistico, mentre le fibre di carbonio vengono maggiormente utilizzate nella automobili super-sportive e fuoriserie.

3.1. Fibre naturali

Come conseguenza delle normative dell'ultimo decennio, i produttori di automobili hanno iniziato ad interessarsi ai materiali compositi a matrice polimerica con fibre di rinforzo di origine naturale. Tali materiali possono essere utilizzati nel settore dei trasporti per varie applicazioni non strutturali, come rivestimenti interni, imbottiture dei sedili, cruscotti, pannelli delle portiere, carene e paraurti. Le proprietà derivate dall'utilizzo di queste fibre sono il miglioramento dell'isolamento termico e acustico, la riduzione del peso del veicolo, che contribuisce alla riduzione di consumo di carburanti.

3.1.1. Tipi di fibre naturali

Le fibre naturali si possono classificare in base alla loro origine che può essere animale, vegetale o minerale.

1. Le fibre animali, come la seta e il lino sono utilizzate prevalentemente nel settore tessile.
2. Le fibre vegetali sono formate principalmente da cellulosa, emicellulosa e lignina. La loro origine è varia in quanto provengono da molte piante, anche diverse tra loro, e da diversi organi della pianta come le foglie (per esempio ananas, banana, sisal, formio, henequen), lo stelo (per esempio canapa, juta, lino, kenaf, ginestra, bambù, paglia di grano, canna comune), il frutto (cocco) e il seme (cotone). Nei compositi vengono utilizzate maggiormente le fibre provenienti dai residui agricoli di piante coltivate per altri scopi, come la paglia dei cereali, e piante coltivate esclusivamente per estrarne le fibre, come le piante tessili.
3. Le fibre minerali generalmente sono di lunghezza limitata, a parte qualche tipo come l'amianto che però è pericoloso per i suoi effetti cancerogeni.

Le fibre che a noi interessano maggiormente sono le fibre vegetali in quanto sono le più significative.

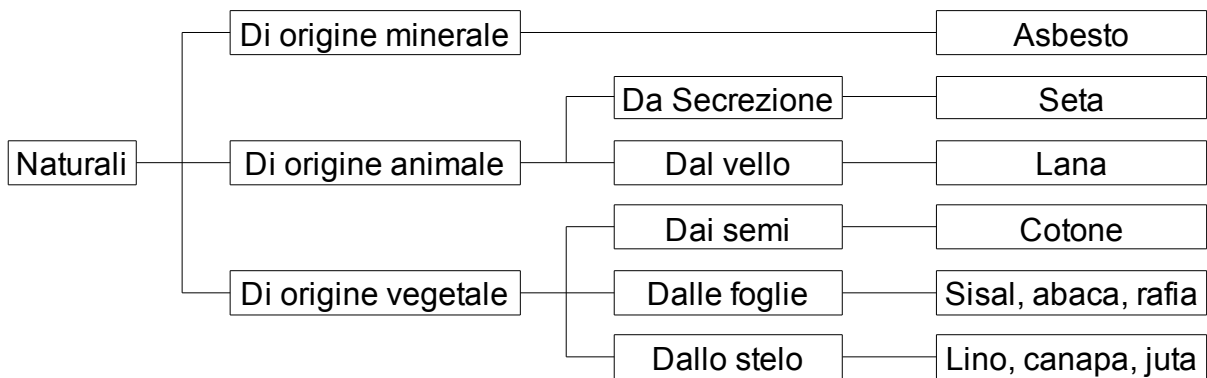


Fig. 3.1 Piante di Sisal



Fig. 3.2 Fibre di Sisal



Fig. 3.3 Piante di Kenaf



Fig. 3.4 Fibre di Kenaf

3.1.2. *Proprietà delle fibre naturali*

Le proprietà delle fibre vegetali si possono suddividere in vantaggiose e svantaggiose. I principali vantaggi sono:

1. facile reperibilità e abbondante presenza;
2. coltivazione ecologica e non inquinante, rispetto alle fibre di vetro;

3. non tossicità;
4. leggerezza, rispetto alle fibre di vetro;
5. valori specifici di proprietà meccaniche comparabili con quelle di fibre sintetiche;
6. ottime proprietà isolanti e fonoassorbenti;
7. morbidezza e non abrasività;
8. biodegradabilità ed eco-compatibilità;
9. basso costo.

I principali svantaggi, invece, sono:

1. proprietà meccaniche variabili, che dipendono dalla qualità del raccolto, dalla pianta d'origine da cui derivano, dalle condizioni ambientali e climatiche, dalla tecnica di mietitura e di estrazione della fibra;
2. proprietà idrofile che causano possibili variazioni di dimensione;
3. bassa compatibilità chimica con la matrice, ciò limita la dispersione delle fibre e la formazione di un'interfaccia fibra-matrice resistente;
4. scarse proprietà nella resistenza a creep e a fatica;
5. morfologia poco controllabile;
6. possono essere attaccate da microbi e funghi;
7. limitata stabilità termica, a causa della degradazione della fibra oltre i 200°C.

C'è da specificare che la biodegradabilità oltre che un vantaggio può essere anche uno svantaggio se le fibre sono utilizzate in condizioni ambientali poco controllate.

3.1.3. Produzione delle fibre naturali

La macerazione è quel processo che permette la separazione delle fibre vegetali dagli altri tessuti non fibrosi e dal midollo legnoso della pianta. Le fasi di questo processo sono il distacco, la dissoluzione e la decomposizione delle pectine, gomme ed altre sostanze mucillaginose.

Ci sono vari metodi di macerazione, ma il più utilizzato è quello della macerazione in acqua che consiste nell'immergere gli steli, da cui estrarre le fibre, in acqua. L'acqua penetra il fusto centrale e gonfia le cellule fino a far scoppiare lo strato più esterno, favorendo l'ulteriore assorbimento d'acqua e il degrado da parte dei batteri. Deve essere valutato il tempo di macerazione, perché se fosse troppo breve renderebbe difficile la separazione, se troppo lungo renderebbe la fibra debole.

Un altro tipo di macerazione consiste nel suddividere il tempo di permanenza in

acqua degli steli in due volte, intervallati da diversi mesi di essiccazione. Invece in zone in cui c'è carenza d'acqua si può sfruttare il metodo di macerazione con la rugiada; consiste nel distribuire i gambi delle piante uniformemente in campi erbosi, e l'azione di sole, aria, batteri e rugiada favorisce la fermentazione sciogliendo le parti attorno alle fibre che possono essere poi separate. Tuttavia la macerazione con la rugiada restituisce fibre di minor qualità rispetto alla macerazione in acqua.

Il prodotto della macerazione è chiamato paglia, che dopo essere stato essiccato e conservato per un breve periodo di tempo viene lavorato. La lavorazione comporta la separazione della fibra attraverso la rottura della parte legnosa, più fragile, seguita dalla strigliatura che rimuove ulteriori residui legnosi.

3.1.4. Lavorazione delle fibre naturali

I processi produttivi dei materiali compositi con fibre di origine naturale sono i medesimi utilizzati per i compositi con fibre di vetro: pultrusione, avvolgimento di filamenti, formatura attraverso lamine preimpregnate, laminazione manuale, applicazione a spruzzo, processo al sacco sotto vuoto, processi di stampaggio.

È di fondamentale importanza il controllo e la riduzione dell'umidità delle fibre perché il gruppo ossidrilico (-OH) dell'acqua è più reattivo del gruppo ossidrilico delle fibre e ciò rende l'idrolisi più veloce della sostituzione.

Il maggior problema nella produzione di compositi con fibre naturali è l'adesione tra fibre e matrice, poiché le fibre sono idrofile, mentre la matrice è idrofoba. Una soluzione, per garantire una buona adesione fibra-matrice, consiste nell'applicare una soluzione alcalina alle fibre. Le fibre naturali sono composte principalmente da cellulosa, le cui unità elementari di glucosio contengono tre gruppi ossidrilici (-OH), questi gruppi rendono la cellulosa e le fibre naturali idrofile. Applicando una soluzione alcalina alla cellulosa vengono eliminate gli indesiderati solchi microscopici e crepe, rendendo migliore l'aderenza tra fibra e matrice.

Un altro metodo per migliorare l'adesione fibra-matrice è l'utilizzo di agenti di accoppiamento che hanno due funzioni: reagire con i gruppi ossidrilici della cellulosa e anche con il gruppo funzionale della matrice per facilitare il trasferimento di carichi tra fibra e matrice. Ci sono stati numerosi studi condotti sull'uso di agenti di accoppiamento per migliorare l'adesione tra fibre naturali e polipropilene, il metodo più utilizzato è l'uso di un agente contenente anidride maleica, che forma il polipropilene maleato il quale migliora enormemente le proprietà di questi materiali.

3.1.5. Applicazioni in ambito automotive

L'utilizzo delle fibre naturali nel settore automobilistico non sono un'idea nuova. Infatti già negli anni '30 e '40 Henry Ford sosteneva con forza l'uso di materiali naturali, quali la canapa e compositi rinforzati a base di resina di soia per la costruzione delle carene esterne.



Fig. 3.5 H. Ford dimostra la resistenza di un'autovettura realizzata in canapa e resina di soia

Con le moderne tecnologie possiamo trovare fino a 10kg di fibre naturali in un'auto, escluse le imbottiture dei sedili. Le fibre naturali le possiamo trovare:

1. nei pannelli interni, e conferiscono a portiere, cruscotti e rivestimenti, una maggiore insonorizzazione, isolamento termico, resistenza agli urti e leggerezza rispetto ad alcuni materiali tradizionali. In caso di urto questi pannelli non si frantumano e non formano schegge a differenza di quelli in fibra di vetro; hanno minor costo di produzione e minor costo di smaltimento. Le fibre più utilizzate in questi materiali compositi sono lino e sisal, mentre le matrici sono epossidiche o poliuretatiche;
2. nei paraurti “salva pedone”;
3. nei filtri anti-polline;
4. nelle tappezzerie interne, anche se non si tratta di veri e propri materiali compositi, ma sono fatte riciclando compositi, con fibre naturali, giunti a fine vita.



Fig. 3.6 Fasi produttive di un materiale composito con fibre naturali

Negli anni '90, la Daimler AG produttore tedesco di automobili e mezzi di trasporto, iniziò a utilizzare fibre di lino e agave per i rivestimenti interni dei suoi veicoli, intraprendendo così uno sviluppo senza precedenti. L'interesse per questi materiali portò sino alla realizzazione dei pannelli degli sportelli della Mercedes Benz Classe E nel 1996, con un risparmio di circa il 20% in termini di peso rispetto ai precedenti pannelli. Daimler AG ha fatto un ulteriore passo coinvolgendo nella ricerca i paesi delle Filippine, del Sud America e del Sud Africa attraverso il trasferimento di tecnologie, ed utilizzando energie rinnovabili in sostituzione dei combustibili fossili convenzionali. Ad oggi la Daimler AG è la più grande azienda produttrice di materiali compositi di origine naturale con oltre 50 componenti per veicoli.

Nel 2000 la direttiva Europea 2000/53/EC ha promosso l'uso di prodotti compatibili con l'ambiente e che riducono il conferimento in discarica. La direttiva stabiliva che la frazione non riciclabile per veicolo fosse pari al 15% nel 2005 per ridursi, gradualmente, al 5% nel 2015. Questa direttiva, e altre simili pubblicate negli USA ed in Giappone hanno spinto diverse case automobilistiche ad aumentare l'utilizzo di materiali compositi con fibre naturali. Attualmente, esistono numerosi modelli di automobili che utilizzano diversi componenti basati su fibre naturali.

I produttori tedeschi di Mercedes (Daimler AG), Bmw e Audi/Volkswagen sono i più attivi nel definire e qualificare i materiali a base di fibre naturali rispetto a produttori di massa. Tuttavia, poiché i fornitori di componenti di questi produttori sono gli stessi dei produttori di massa, si è verificato, e continua a verificarsi, un trasferimento di competenze tra queste aziende. Oggigiorno, tutti i modelli BMW e Mercedes usano fibre naturali per alcuni componenti quali: fodere, rivestimenti, sedili, poggiatesta e cappelliere. Altre case automobilistiche, ad esempio Ford, Opel, Renault, Peugeot, Citroen e Fiat lavorano meno alla definizione dei materiali ma li utilizzano ugualmente.

La Mercedes-Benz ha sviluppato ed installato 17 componenti nelle vetture Classe-E, e 22 nelle Classe-S che contengono fibre di lino, cotone, sisal e noce di cocco: dallo sportello posteriore (cotone) alle finiture interne della portiera (lino e sisal) ai sedili. In particolare, la Mercedes ha sviluppato i cosiddetti pannelli “Fibropur”, utilizzati come rivestimento dell’abitacolo, e realizzati per il 60% con fibre di lino e sisal e per il restante 40% con resina poliuretanic della Bayer. Il principale vantaggio dato dalla resina poliuretanic è il ridotto peso: una serie di quattro pannelli, quindi un set completo per l’auto, pesa circa 2,8 kg, contro i 4-6 kg delle soluzioni tradizionali. Questo materiale si presta anche ad ulteriori applicazioni, per esempio il ripiano posteriore e il supporto della plancia portastrumenti, e sono largamente utilizzati anche nelle vetture Classe-A.



Fig 3.7 a sinistra, Mercedes-Benz classe S: componenti in fibra naturale

Fig 3.8 a destra, Mercedes-Benz classe A: componenti in fibra naturale

Sempre la Bayer, ha sviluppato per la Mercedes il paraurti “salvapedone”: un paraurti sviluppato per ridurre, in caso d’investimento, le lesioni al ginocchio ed alle gambe dei pedoni, come richiesto dalla normativa comunitaria. Il sistema messo a punto da Bayer prevede un rivestimento spesso 1,5-1,8 mm in

poliuretano Bayflex 180, rinforzato con fibre di vetro e fibre vegetali, schiumato sul retro con l'espanso semirigido Bayfill EA ad elevato assorbimento d'energia. Grazie all'elasticità del rivestimento, le sollecitazioni a cui viene sottoposta la gamba del pedone sono comprese nei limiti ammessi dalla normativa UE; oltre a ciò, si riducono le ammaccature del paraurti, frequenti in caso di incidenti di piccola entità.

Johnson Controls, uno dei principali produttori di pannelli per sportelli di Fiat e tra i maggiori fornitori mondiali, presenta una vasta gamma di materiali compositi a base di fibre naturali sviluppati internamente. Il fibrowood, ad esempio, è un composito con matrice acrilica e fibre derivate dal legno che può essere trasformato per stampaggio a compressione in stampi ad alta temperatura. Il contenuto di fibra nel fibrowood è del 70%. Questo prodotto è utilizzato per: copertura di sportelli, coperture per pannelli di strumentazione, coperture per sedili. Il fibrowood è in produzione dal 1998 ed è utilizzato da Ford, Kia, Mercedes-Benz, Opel, Hyundai.



Fig. 3.9 Particolare di un pannello interno prodotto da Johnson Controls

Il fibrin è un prodotto realizzato con processi simili alla produzione della carta. Il contenuto di fibra naturale è pari al 94%, una percentuale alta che assicura al prodotto stabilità di prezzo rispetto alle variazioni delle risorse da combustibile fossile. Il fibrin è basato su fibre derivate dal legno e un legante acrilico, è in produzione dal 1954 ed è utilizzato da Opel.

Johnson Controls produce anche compositi con fibra naturale (lino o canapa) impregnati con resina epossidica. Questi pre-impregnati sono lavorati per stampaggio in presse ad alta temperatura. Il contenuto di fibra naturale

dichiarato è del 70%. Il materiale è in produzione dal 2003 ed è utilizzato da BMW. Johnson Controls ha fatto passi avanti considerevoli introducendo anche cicli virtuosi di utilizzo del materiale in produzione.

Ad esempio, gli scarti del processo di punzonatura dei materiali naturali, quali il fibrowood, sono lavorati e legati con polipropilene per produrre dei granuli di polipropilene rinforzato. I granuli a loro volta vengono lavorati per stampaggio ad iniezione per produrre fermi, ganci e braccioli. Questo materiale è in produzione dal 2006 ed è utilizzato per lo più da Mercedes-Benz. Visteon ha lanciato un prodotto denominato R-flax che consiste di polipropilene rinforzato con paglia di lino e fibre corte.

Fornitori come Johnson Control focalizzano la loro attenzione anche su prodotti interamente realizzati con materiali naturali. Ad esempio, la linea di prodotti Fasertec, basata su fibre da nocce di cocco e latex naturali. Un composito al 100% naturale, le cui sue proprietà permettono ottime performance per sedili e poggiatesta. Questo prodotto è in commercio dal 2002 ed è utilizzato da Maybach, Mercedes-Benz, Volkswagen.



Fig. 3.10 Interno di un sedile in Fasertec prodotto da Johnson Controls

Un altro prodotto diffuso nel mercato automobilistico è il wood-stock. Si tratta di un foglio estruso in termoplastico costituito da una matrice poliolefinica e un mat in fibra naturale. Nella fase di trasformazione il materiale è pre-riscaldato in un forno all'infrarosso e poi stampato in uno stampo a bassa temperatura. Il prodotto è sul mercato dal 1982 ed è utilizzato da Fiat, Lancia e Alfa Romeo.

Un altro prodotto disponibile per i produttori di automobile è il pre-impregnato Acrodur della Basf, basato su un co-polimero acrilico che permette di ottenere contenuti di fibra dal 70% al 90%. La chiave del prodotto è la realizzazione di un pre-impregnato con struttura porosa che ha permesso al produttore Dräxlmaier Group di eliminare le fasi di punzonatura laser necessari con i termoplastici convenzionali per l'applicazione del vuoto durante la laminazione. Con questo prodotto si realizzano gli sportelli della serie 7 della Bmw.

Bmw Group dichiara di utilizzare oltre 10.000 tonnellate di fibre naturali nei suoi veicoli ogni anno.

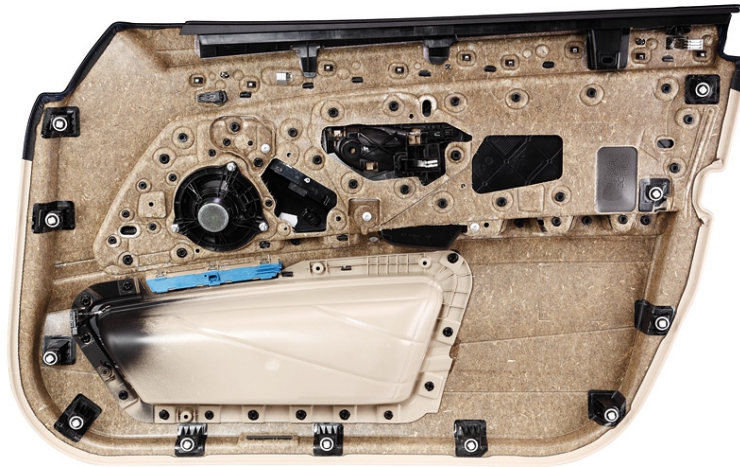


Fig. 3.11 Sportello in Acrodur della BMW Serie 7

Faurecia, un altro fornitore mondiale, ha sviluppato una linea denominata Lignoflex, che utilizza il 70% di fibra derivata dal legno un 20% di PET e un 10% di legante basato su resina fenolformaldeide. Questa soluzione presenta pesi e costi ridotti rispetto ai compositi termoplastici rinforzati in vetro e migliori caratteristiche di assorbimento acustico. I pannelli sono più leggeri di quelli convenzionali in composito termoplastico e con aspetto simile alla radica. I compositi in fibra naturale sono utilizzati anche per altri componenti.



Fig. 3.12 Particolare di un interno in Lignoflex

Anche il produttore giapponese Toyota ha continuato ad investire nelle bioplastiche lanciando nel 2010 sulla Lexus HS250h dei componenti in tessuto non tessuto forniti da Toyota Boshoku e Toray Industries.

Un altro produttore giapponese, Honda, ha intrapreso l'utilizzo di materiali naturali quali la fibra di legno per pavimento dei proprio SUV.

Alla General Motors una miscela di kenaf e lino è stata utilizzata per gli inserti dei pannelli delle portiere della Saturno L300s che è utilizzata anche sull'opel Vectra.

Fibre di legno vengono utilizzate negli schienali della Cadillac DeVille e nel pavimento del bagagliaio della GMC Envoy e Chevrolet TrailBlazer.

L'azienda produttrice di pneumatici Goodyear ha introdotto nei suoi pneumatici le fibre di grano, che hanno portato ad una nuova tipologia di pneumatici con una minor resistenza al rotolamento rispetto ai pneumatici tradizionali, ciò comporta una diminuzione del consumo di carburante dei veicoli.

L'inglese Lotus, con la sua Lotus Eco Elise, utilizza largamente fibre vegetali. Si comincia dalla carrozzeria, i cui pannelli e gli spoiler sono in fibra di canapa e verniciati ad acqua. La canapa è stata anche impiegata per la struttura dei sedili rivestiti poi di lana grezza. Queste modifiche orientate a migliorare l'impatto ambientale dell'Elise, ne hanno ridotto anche il peso di ben 32 kg, rispetto agli 828 kg della Lotus Elise, il che significa, prestazioni sportive ancora superiori.



Fig 3.13 Lotus Elise Eco



Fig 3.14 Particolare dell'Elise Eco

Anche azienda americana produttrice di macchine agricole John Deere ha rimpiazzato le scocche metalliche ed utilizza pannelli e carene della carrozzeria prodotti con canapa, lino, kenaf, sisal e resina di soia.



Fig. 3.14 Mietitrebbiatrice John Deere con carene e pannelli rinforzati con fibre naturali

Nel 2012 la casa automobilistica americana Ford ha annunciato l'introduzione di componenti completamente naturali nelle nuove vetture, con l'obiettivo di rendere completamente biodegradabili gli interni delle auto del futuro; i prodotti che saranno utilizzati sono i derivati di soia, kenaf e paglia di grano, e plastica derivata dalle carote, dal mais e dall'olio della noce di cocco.

3.2. Fibre di vetro

L'esperienza comune ci insegna che il vetro monolitico è un materiale fragile; ma se viene filato in fibre del diametro inferiore al decimo di millimetro perde la sua caratteristica fragilità, e diventa un materiale dall'elevata resistenza meccanica e resilienza. Il vetro monolitico è fragile a causa del gran numero di difetti della cristallizzazione, ma nelle fibre di vetro non ci sono questi difetti, quindi riescono a raggiungere resistenza meccaniche vicine alla resistenza teorica del legame covalente.

3.2.1. Tipi di fibre di vetro

Esistono diversi tipi di fibre di vetro che si distinguono in base alla composizione chimica e alle loro proprietà:

1. Il vetro E o elettrico che è principalmente utilizzato come isolante per i cavi elettrici, e come fibra è usato come fase di rinforzo, ed è utilizzato nell'industria tessile e nei materiali compositi. È la fibra di vetro più utilizzata nei materiali rinforzati.
2. Il vetro S o strength è un'evoluzione del vetro E e presenta migliori proprietà meccaniche sia di resistenza che di modulo.
3. Il vetro R è un vetro ad alto rendimento meccanico. È stato sviluppato per i settori militari e aerospaziali, ed ha ottime resistenza a fatica, alle variazioni di temperatura e di umidità.
4. Il vetro D è caratterizzato dal fatto di avere perdite elettriche molto basse, quindi viene utilizzato per quei materiali compositi che devono essere permeabili alle onde elettromagnetiche.
5. Il vetro AR viene impiegato come fibra di rinforzo nel cemento in quanto è molto resistente ai composti alcalini e conferisce al cemento una miglior resistenza ai carichi e una maggior durezza; il composito prende il nome di fibrocemento.

6. Il vetro C è quella fibra utilizzata per la produzione di lane di vetro dato che è resistente alla corrosione.

3.2.2. Proprietà delle fibre di vetro

I vari tipi di fibre di vetro hanno proprietà anche molto diverse tra loro, ma quelle più ricercate nel settore automotive sono principalmente quelle fibre che garantiscono al materiale composito buone proprietà meccaniche, come le fibre di vetro E e vetro S.

I principali vantaggi dell'utilizzo di queste fibre sono:

1. facilità di produzione;
2. alta resistenza;
3. non infiammabili;
4. resistenti al calore;
5. insensibilità all'umidità;
6. buona resistenza agli attacchi chimici.

Invece i principali svantaggi sono:

1. alta densità rispetto alle fibre naturali;
2. abrasività;
3. basso modulo elastico;
4. bassa resistenza a fatica;
5. costo di produzione superiore alle fibre naturali.

3.2.3. Produzione delle fibre di vetro

I metodi di produzione delle fibre di vetro sono:

1. a marmo fuso;
2. trafilatura di bacchette;
3. a fusione diretta.

I primi due metodi sono in disuso; la fusione diretta è la principale tecnologia utilizzata, essa adopera delle fornaci ed i passaggi fondamentali per ottenere le fibre di vetro sono tre. Durante la prima fase il vetro fuso viene omogeneizzato e vengono tolte le inclusioni gassose, nella seconda fase la temperatura diminuisce per aumentare la viscosità del fuso, ed è detta fase di raffinamento. L'ultima fase consiste nel far passare il vetro attraverso delle trafilature di platino-iridio riscaldate che contengono fino ad 8000 fori. Alle fibre appena formate viene applicato un

composto chimico, chiamato sizing, che agisce come lubrificante, protegge le fibre dall'abrasione e provvede a migliorare l'interfaccia tra fibre di vetro e resina organica. Le fibre vengono raccolte in bobine che vengono messe in forno per eliminare i residui di solventi ed acqua del sizing.

La viscosità del vetro fuso, il numero e la dimensione degli orifizi, la velocità di trafilatura sono parametri che influiscono sul diametro finale delle fibre di vetro.

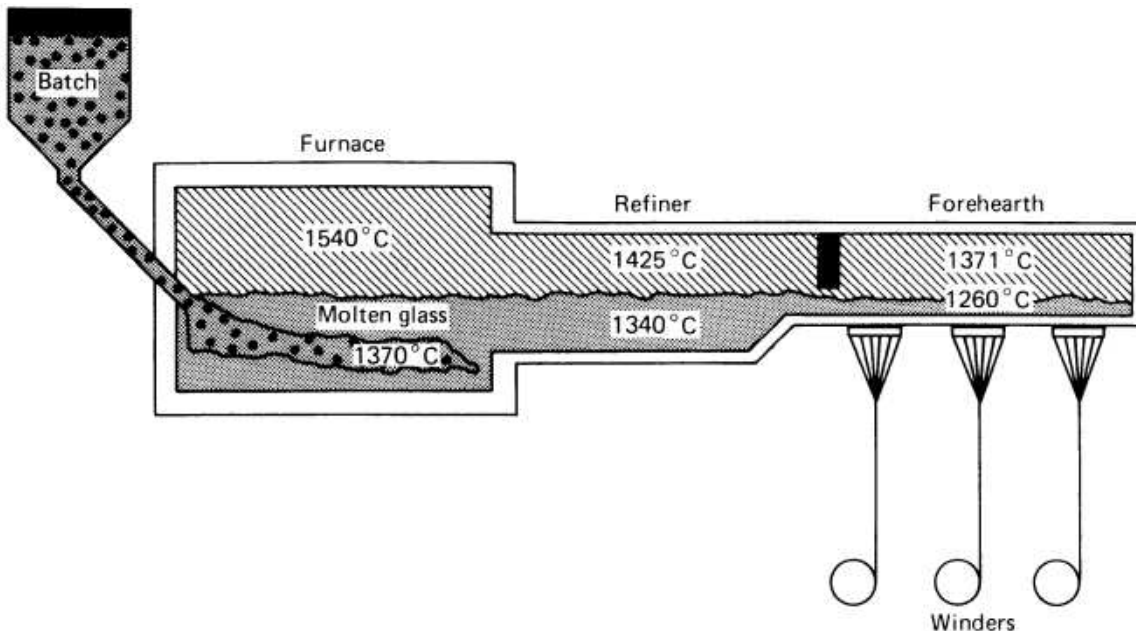


Fig 3.15 Forno per la produzione di fibre di vetro

3.2.4. Vetoresina

La vetoresina è un tipo di plastica rinforzata con vetro, in forma di tessuti o di fibre orientate casualmente, impregnate con resine termoindurenti, in genere liquide ed a base di poliestere, vinilestere o epossidiche.

È stata usata per la prima volta negli anni '50, riscuotendo subito un notevole consenso; è stato il primo materiale plastico composito, stampabile a freddo, senza pressione e che, adeguatamente rinforzato, migliorava notevolmente le caratteristiche di resistenza meccanica.

Nella produzione di vetoresina i materiali utilizzati sono:

1. gelcoat: costituisce la parte in vista dei manufatti. Viene applicato mediante verniciatura manuale a doppio strato. Conferisce alla struttura un'ottima resistenza agli urti, una buona resistenza termica, protegge dagli agenti atmosferici, dai raggi ultravioletti e dall'attacco di sostanze chimiche, oltre a dare alla struttura una superficie continua e liscia;

2. resina: ha la funzione di vero e proprio “collante”, è il materiale che determina, con la polimerizzazione, la forma permanente. Ha un’elevata resistenza al carico di rottura e trazione;
3. fibra di vetro: composta da fogli spessi 1 mm applicata a mano in tre strati incrociati (MAT), conferisce un’elevata elasticità al materiale finito;
4. poliuretano espanso: alternato a listelli di multistrato fenolico per un miglior fissaggio degli arredi, è composto da lastre spesse 20 mm che costituisce la maggior parte dello spessore, conferisce alla struttura robustezza ed un’elevata resistenza tecnica. E’ un materiale auto-estinguente.

La vetroresina è un materiale molto versatile, infatti è utilizzata in molti ambiti: dai veicoli da competizione alle automobili, dagli aerei alle imbarcazioni, per piscine, serbatoi, tubazioni e oggetti di uso comune come sedie, tavoli, eccetera.

3.2.5. Applicazioni in ambito automotive

L'utilizzo della fibra di vetro nel settore automobilistico, è stato principalmente rivolto alla carrozzeria, utilizzando la vetroresina. Le caratteristiche della carrozzeria in vetroresina sono:

1. resistenza a flessione: elevata e paragonabile ad altri prodotti utilizzati per la costruzione di carrozzerie;
2. resistenza all'urto: grazie alla elevata flessibilità assorbe notevolmente gli urti riducendone gli effetti negativi sulla struttura e riducendo altresì i rischi per gli occupanti dell'abitacolo. In caso di urti violenti, come in un incidente stradale, una carrozzeria in vetroresina, si comprime, ammortizza l'impatto e ritorna nella posizione originale, senza schiacciamenti permanenti. Le riparazioni risultano quindi essere semplici ed economiche, riducendo notevolmente la necessità del ricorso a pezzi di ricambio ed la sostituzione di parti danneggiate;
3. bassa dispersione termica: una carrozzeria in vetroresina possiede un’ottima climatizzazione. In climi freddi, la struttura ha una bassissima dispersione di calore interno, in climi caldi protegge dalle radiazioni solari;
4. la struttura in vetroresina è continua ed esclude completamente il rischio di infiltrazioni d’acqua ed è praticamente inattaccabile da agenti atmosferici.

Tuttavia, le fibre di vetro sono state utilizzate anche per lo sviluppo di componenti. Esempio significativo sono le molle a balestra adottate per assali e

sospensioni; oltre a permettere di alleggerire sensibilmente la vettura (la sospensione posteriore pesa quasi 15 chilogrammi meno di una in acciaio) non sono attaccabili dalla ruggine e quindi hanno una durata cinque volte superiore, grazie all'ottima resistenza a fatica.

Il primo utilizzo di materiali compositi nel settore automotive è stato fatto dalla Chevrolet nella Corvette del 1953, che è stata la prima automobile di serie con carrozzeria in fibra di vetro, a causa dei forti dazi imposti sull'acciaio durante il dopoguerra. La carrozzeria e la scocca interna di questa auto era completamente in vetroresina, ciò comportò maggiore libertà per i progettisti e facilità di produzione. Da allora l'utilizzo di questi materiali nelle automobili ha avuto una notevole evoluzione tanto che il modello della Corvette del 1981 fu il primo ad adottare le molle a balestra in fibra per l'assale posteriore. Tre anni dopo divennero di serie anche per le sospensioni anteriori e posteriori.



Fig. 3.16 Chevrolet Corvette del 1953 realizzata in vetroresina

Anche in Italia la Ferrari ha sviluppato carrozzerie in vetroresina. Gli esemplari prodotti tra il 1975 e il 1977 della Ferrari 308 GTB, uno dei modelli della casa di Maranello più conosciuto nel mondo, sono state fabbricate, per velocizzare i tempi di produzione, con carrozzeria in vetroresina. Inoltre, l'utilizzo del composito, ha fatto in modo che i primi modelli commercializzati pesassero 1050 kg, a differenza dei 1200kg delle versioni successive con carrozzeria in acciaio.



Fig. 3.17 Ferrari GTO del 1975 con carrozzeria in vetroresina

La vetroresina è molto utilizzata anche per le scocche di camper e caravan per le sue proprietà di leggerezza, resistenza e facilità di riparazione.

I materiali compositi con fibra di vetro hanno dimostrato di soddisfare le richieste strutturali e le esigenze di durata per un'automobile, sia per le parti interne che per quelle esterne. Le buone proprietà meccaniche, la ricerca e i processi di produzione della fibra di vetro hanno favorito la diffusione di essa come fibra di rinforzo all'interno alle materie plastiche nel settore automobilistico. Tuttavia questi compositi hanno degli svantaggi, come l'alta densità delle fibre di vetro, difficoltà di lavorazione, scarse proprietà di riciclaggio e alto potenziale di rischio per la salute a causa dei particolati della fibra di vetro.

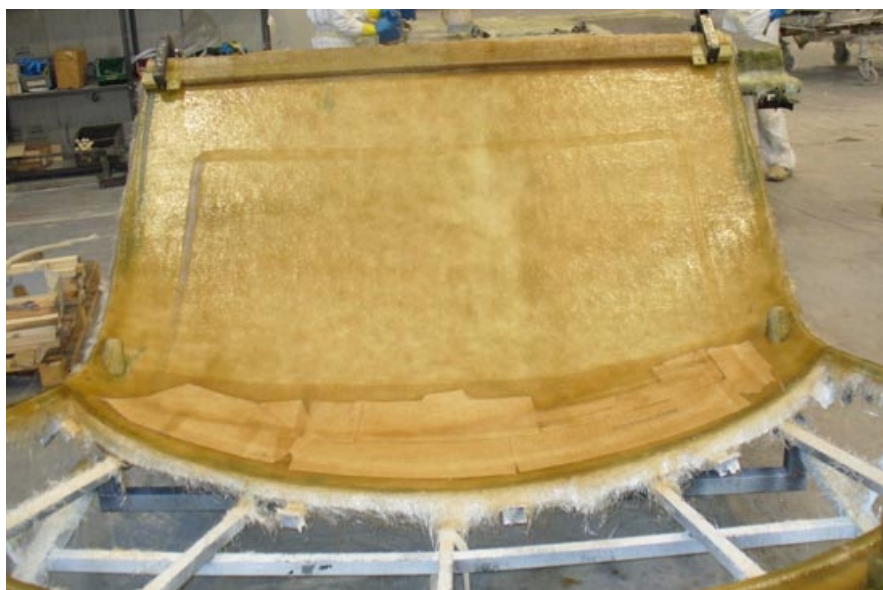


Fig. 3.18 Particolare della costruzione di un camper con la vetroresina

3.3. Confronto tra fibre naturali e fibre di vetro

Come abbiamo visto i principali materiali compositi per applicazioni automotive possono avere fibre di origine naturale oppure fibre di vetro.

Sin dagli anni '90 si è capito che le fibre naturali possono essere una valida alternativa alle fibre di vetro. Le fibre naturali hanno attratto particolarmente gli sviluppatori di autoveicoli per due motivi fondamentali: basso costo e bassa densità.

Le fibre di vetro usate per i materiali compositi hanno una densità di circa 2.6 g/cm^3 a differenza delle fibre naturali che hanno densità di circa 1.5 g/cm^3 , il che le rende preferibili per ridurre il peso dei componenti ed ottenere migliori prestazioni nelle autovetture, specialmente quelle sportive, e per ridurre i consumi di carburante che sono strettamente connessi con la massa del veicolo.

Un altro motivo che favorisce la scelta delle fibre naturali è il prezzo; può variare dai $0.30 \text{ \$/kg}$ fino a $1.50 \text{ \$/kg}$, a differenza del prezzo delle fibre di vetro che varia da $2.00 \text{ \$/kg}$ fino a $5.00 \text{ \$/kg}$.

Le fibre di origine naturale hanno anche degli svantaggi legati ai problemi di produzione come il loro danneggiamento durante l'operazione di estrazione, la sensibilità al contenuto di umidità, anisotropia delle fibre anche nella direzione di carico, dovuta a geometrie irregolari. Inoltre non esistono ancora molti dati dinamici, come comportamento a fatica e ad impatto, sulle fibre naturali.

Le proprietà meccaniche delle fibre di vetro sono superiori a quelle delle fibre naturali, infatti le prime hanno carico di rottura molto superiore, ma se si fa un confronto della resistenza specifica tra i due tipi si può notare che le fibre di vetro hanno comunque un miglior rapporto, ma il rapporto delle fibre naturale è di poco inferiore.

Fibra	Densità [kg/m³]	Carico di rottura [MPa]	Resistenza specifica [MPa*m³/kg]	Costo relativo [\$/kg]
Carbonio	1880	1700 – 2400	0,90 – 1,28	220
Vetro	2540	1400 – 2500	0,57 – 0,98	5
Cotone	1520	300 – 600	0,20 – 0,39	1,5
Juta	1450	400 – 600	0,28 – 0,41	0,3
Lino	1540	900 – 1200	0,58 – 0,80	1,5
Canapa	1480	400 – 700	0,27 – 0,47	1,3
Sisal	1450	500 – 600	0,34 – 0,41	0,75
Cocco	1150	100 – 200	0,09 – 0,17	0,5
Kenaf	1450	800 – 900	0,55 – 0,62	0,6

Per dare ad un materiale composito con fibre naturali proprietà meccaniche equivalenti ad un composito con fibre di vetro si ricorre all'aumento della frazione di fibre nel composito; ciò riduce la quantità di matrice e di conseguenza la quantità di inquinanti presenti nei polimeri. Questa maggior frazione di fibre con bassa densità riduce il peso finale del materiale composito con fibre naturali. L'applicazione di compositi con fibre naturali nel settore automobilistico comporta una diminuzione del peso delle vetture e ne consegue una diminuzione del consumo di carburante, e quindi minori emissioni di gas inquinanti. Infatti si può avere fino ad un risparmio di circa 0.29 – 0.48 litri ogni 100kg per 100km percorsi.

La coltivazione di piante per l'estrazione di fibre naturali comporta uno stoccaggio di CO₂ che viene immagazzinato nella fibra fino al momento dell'incenerimento, contribuendo alla diminuzione dei gas serra. La produzione di fibre di origine naturale ha un basso impatto ambientale in quanto la coltivazione dipende dall'energia solare e per l'estrazione vengono usate solo piccole quantità di combustibile fossile, a differenza della produzione di fibre di vetro che dipende prevalentemente dai combustibili fossili.

Per esempio il kenaf è una pianta erbacea stagionale originaria dell'Africa, con un gran contenuto di fibre, che viene coltivata commercialmente negli Stati Uniti; in passato veniva utilizzata per la produzione di funi e tele. La coltivazione del kenaf è ritenuta estremamente rispettosa dell'ambiente perché accumula un'elevata quantità di anidride carbonica, non impoverisce i terreni dove viene coltivata e, secondo alcuni studi, ha la proprietà di assorbire lo smog. La quantità di energia non rinnovabile per la produzione di 1 kg di fibre di vetro è superiore di 5 - 15 volte rispetto alla produzione di 1 kg di fibre naturali. Quindi le emissioni inquinanti per la produzione della fibra di vetro è significativamente maggiore.

4. Matrici utilizzate con le fibre naturali

Le matrici più utilizzate nei materiali compositi con fibre di origine naturale sono quelle polimeriche, ma si stanno ricercando delle alternative di origine naturale per creare dei materiali compositi naturali al 100% e quindi completamente riciclabili.

4.1. Matrici polimeriche termoindurenti e termoplastiche

Le matrici polimeriche termoindurenti hanno avuto un forte sviluppo negli anni passati, ma stanno via via per essere soppiantate dalle matrici polimeriche termoplastiche. Ciò è dovuto da una serie di vantaggi che derivano dall'utilizzo di queste ultime:

1. le termoplastiche sono tenaci e possono essere rifuse e riformate (polietilene, nylon, polipropilene) a differenza delle termoindurenti che sono fragili e non possono essere rifuse o riformate a causa della loro reticolazione;
2. migliore capacità di stoccaggio, ossia un impatto ambientale in genere minore dovuto alla possibilità di riformare i pezzi, riciclarli e saldarli;
3. riduzione dei costi, dovuto all'utilizzo di materie prime più economiche, tecnologie produttive più veloci e consumi energetici inferiori;
4. proprietà meccaniche, in particolare di durezza, che possono essere buone nel caso di creine polimeri semicristallini, e quindi con una struttura ordinata, formabili solo da polimeri termoplastici;
5. volumi produttivi che possono essere più elevati, grazie ai ridotti tempi di processo;
6. migliore capacità di controllare le temperature di processo, essendo la temperatura di transizione vetrosa ben individuabile.

Ma ci sono anche degli svantaggi delle termoplastiche rispetto alle termoindurenti che sono:

1. peggior aderenza tra fibre e matrice, dovuta alla mancanza di reticolazione. Inoltre si ha una maggior difficoltà di impregnazione delle fibre a causa dell'elevata viscosità del fuso termoplastico;
2. proprietà a lungo termine peggiori di creep e di fatica, dovuta alla scarsa stabilità delle catene lineari ramificate rispetto alle reticolate.

4.1.1. Matrici termoplastiche utilizzate

Le matrici termoplastiche più utilizzate nell'automotive con le fibre di origine naturale sono:

1. l'ABS, acrilonitrile-butadiene-stirene, presenta una buona resistenza all'impatto, agli agenti chimici e all'abrasione, buone proprietà di resistenza e tenacia alle basse temperature. Viene molto utilizzato per i componenti interni;
2. il PP, polipropilene, ha buone proprietà meccaniche, elettriche e chimiche, buona resistenza allo strappo. Viene utilizzato principalmente per la componentistica interna;
3. il PS, polistirene, poco costoso, ma con proprietà di medio livello e fragile, buone proprietà di insonorizzazione e di isolamento termico. Viene utilizzato nei componenti soggetti a piccoli sforzi;
4. il PEEK, polietilene-eterochetoniche, ha migliori proprietà di tenacia rispetto alle matrici termoindurenti, ma un'inferiore resistenza al calore.

4.1.2. Matrici termoindurenti utilizzate

Le matrici termoindurenti più utilizzate nell'automotive con le fibre di origine naturale sono le epossidiche in quanto combinano proprietà di flessibilità, adesione e resistenza chimica, ma hanno un prezzo elevato.

4.2. Matrici di origine naturale

Esistono matrici biodegradabili da poter accoppiare a fibre naturali per avere dei biocompositi completamente sostenibili. Queste matrici possono essere di tipo termoplastico, per esempio amido-sorbitolo e acido polilattico, oppure di tipo epossidico, per esempio a base di olio di ricino, di soia o di cardanolo.

Negli ultimi anni sono state svolte ulteriori ricerche per utilizzare polimeri derivanti da prodotti naturali, come carote, mais e dall'olio della noce di cocco per rimpiazzare i polimeri derivanti dal petrolio, e sembrerebbe che questi polimeri naturali siano più leggeri di quelli convenzionali.

5. Riciclo dei materiali compositi

Il riciclo dei materiali compositi è iniziato negli anni '80, solo dopo il loro forte sviluppo ed il conseguente utilizzo, non solo in campo automobilistico. Per i compositi arrivati alla fine della loro ciclo di vita il riciclo non è la soluzione preferenziale poiché si presentano come un mix di materiali e sostanze chimiche di non facile smaltimento e quindi si cerca prima di riutilizzarli in vari modi.

5.1. Riutilizzo

La maggior parte dei materiali compositi vengono realizzati su misura, in base alla loro applicazione; quindi risulta difficile che questi prodotti vengano riutilizzati per altri tipi di applicazioni. Inoltre lo smontaggio di un composito presenta diverse problematiche, come la rimozione dei fissaggi, il danneggiamento del materiale stesso e la formazione di polveri nel caso venga tagliato, che mette a rischio la salute del personale che lo maneggia.

Quindi un materiali composito giunto alla fine del ciclo di vita viene, preferibilmente, riutilizzato dopo essere stato frantumato, oppure viene riutilizzato mantenendo la sua originale forma fisica. I principali campi di riutilizzo sono:

1. come isolanti acustici in pannelli per pareti o per pannelli a lato delle strade;
2. come isolanti termici e ritardanti di fiamma;
3. per modificare la viscosità di un mix di polimeri;
4. all'interno di pannelli sandwich a basso costo;
5. come rinforzo per asfalti;
6. nelle linee bianche stradali della segnaletica orizzontale con alto coefficiente d'attrito e resistenza all'abrasione;
7. all'interno del calcestruzzo per ridurre il fenomeno della fessurazione.

5.2. Riciclo

Per il riciclo dei materiali compositi ci sono quattro principali classi:

1. riciclo primario: si converte il rifiuto in un materiale con proprietà equivalenti a quelle del composito originale;
2. riciclo secondario: si converte il rifiuto in un materiale con proprietà inferiori a quelle del composito originale;

3. riciclo terziario: si converte il rifiuto in prodotti chimici e di carburante;
4. riciclo quaternario: si converte il rifiuto in energia.

Le tecniche che si cercano di utilizzare maggiormente sono il riciclo primario e secondario che consistono nel miscelare i materiali di scarto con materie prime vergini, questo mix viene poi lavorato come se fosse tutta materia vergine; in base al successo della miscelazione si parla di riciclo primario o secondario.

Il riciclo terziario comporta la decomposizione chimica del polimero in chimica utile per alcune sostanze ottenibili per i carburanti; mentre il riciclo quaternario è sinonimo di termo-valorizzazione del rifiuto, che non è un vero e proprio riciclo, ma un mezzo per ridurre il volume del rifiuto.

Generalmente è preferibile avere il massimo livello di riciclo possibile, tuttavia non è così perché i primi tre metodi richiedono un quantitativo elevato di energia e di risorse, mentre il riciclo quaternario è semplice e non necessita di ingenti risorse specializzate ed energie.

5.2.1. Riciclo di compositi con matrice termoplastica

Teoricamente i polimeri termoplastici possono essere rifusi un numero infinito di volte; quindi dovrebbe risultare più semplice riciclare un materiale composito con matrice termoplastica rispetto ai termoindurenti, Tuttavia alcuni studi hanno dimostrato che ripetuti processi di riciclo spesso inducono la degradazione dei materiali polimerici attraverso la scissione ed il restringimento delle catene lineari, ed una distribuzione del peso non uniforme. Questo è causato dagli sforzi di taglio e di rettifica che si producono durante la separazione del composito; un'altra causa è l'utilizzo di parametri di lavorazione impropri, come temperature troppo elevate; comunque nella maggior parte dei casi il riciclo non comporta significative perdite di proprietà. Il materiale specifico, la sua contaminazione e la storia di lavorazione influiscono sulle caratteristiche del materiale riciclato che possono essere migliorate aggiungendo materiale vergine o additivi.

I compositi termoplastici offrono anche l'opportunità di risagomare un componente in un altro. Per esempio, un componente scartato di curvatura moderata può essere riutilizzato in un'operazione di stampaggio a compressione. Il processo equivale ad un vero riciclo primario, senza alcuna degenerazione delle proprietà; anzi le proprietà possono essere effettivamente migliorate grazie alla maggiore impregnazione delle fibre risultante dalle ripetute fusioni e solidificazioni.

È anche possibile utilizzare materiale riciclato, che è stato macinato, come il

GMT (glass mat thermoplastic), con l'aggiunta di materiale vergine, per lo stampaggio ad iniezione; oppure GMT estruso, con l'aggiunta di materiale vergine, per lo stampaggio a compressione.

5.2.2. Riciclo di compositi con matrice termoindurente

Riciclare un composito con matrice termoplastica è più semplice rispetto ad un termoindurente, ma non per questo è impossibile, come si potrebbe pensare a causa dei legami reticolati al suo interno. Il riciclo dei compositi termoindurenti si basa su tecnologie che prevedono la triturazione o la macinazione dei rifiuti che vengono poi riutilizzati come riempitivi in altri materiali compositi.

Nel primo passo del processo di riciclo vengono rimossi inserti metallici ed i fissaggi, successivamente si riduce la dimensione del rifiuto fino a rimpicciolirlo in pezzi di dimensioni gestibili, dell'ordine delle decine di centimetri. Quindi si procede con la triturazione e la frantumazione, la dimensione delle particelle finali può essere dell'ordine dei millimetri o frazioni di millimetro. Nel macinato grosso il rinforzo rimane parzialmente intatto e può quindi essere utilizzato come rinforzo, mentre la polvere fine può essere utilizzata esclusivamente come riempitivo.

I materiali compositi termoindurenti riciclati possono diventare materie prime secondarie per SMC (sheet moulding compound) e BMC (bulk moulding compound). Per questo riciclo sono necessari materiali di composizione nota, non contaminata e di buona qualità, come gli scarti di lavorazioni. Utilizzando compositi riciclati in SMC e BMC non si hanno effetti negativi sulle proprietà meccaniche del prodotto, però il materiale di riciclo non deve essere utilizzato oltre certi rapporti rispetto al materiale vergine, in genere massimo 20 o 30% di materiale riciclato. Tuttavia, il basso valore d'uso di materiale riciclato implica che è difficile recuperare il costo del processo di riciclo.

5.2.3. Tecnologie di riciclo

Esistono varie tecnologie per il riciclo di materiali compositi, le quattro tecniche principali sono:

1. pirolisi;
2. fluidised-bed processing;
3. supercritical water processing;
4. incenerimento.

La pirolisi consiste nel riscaldamento dei rifiuti a temperature tra i 400°C e gli 800°C, in assenza di ossigeno e viene utilizzata per separare il composito nei suoi elementi originali. Le temperature ed i tempi sono adattate ai materiali dei componenti da riciclare. A queste temperature i materiali, che a temperatura ambiente sono allo stato solido, vengono convertiti in altri solidi, liquidi e gas. Il residuo carbonioso solido viene raffinato per ottenere altri prodotti, come il carbone attivo; gli oli e le fibre possono essere riutilizzati in altri materiali compositi; i gas vengono utilizzati come combustibili o come materie prime per altri processi chimici. Questa procedura è poco costa ma efficace e viene utilizzata nell'industria automobilistica per i veicoli da rottamare.

Il flused-bed processing è una camera contenente sabbia che si comporta come un fluido in sospensione in un flusso d'aria, la temperatura della camera è compresa tra i 450°C ed i 500°C, temperatura che permette una buona pulizia delle fibre senza che subiscano perdite di resistenza. Il rifiuto viene prima frantumato e poi immesso nella camera dove le resine evaporano e la fibra viene spinta dal flusso d'aria in un punto di raccolta, mentre i gas che si producono vengono bruciati in una camera secondaria per il recupero del calore. Questo processo è in grado di trattare materiali di grandi volumi, come quelli dell'industria automobilistica.

Il supercritical water processing consiste nell'idrolizzare e scomporre in modo efficace il materiale da riciclare, evitando la carbonizzazione. Il rifiuto composito viene riscaldato con vapore tra i 300°C ed i 500°C, viene decomposto e parzialmente idrolizzato da parte di acidi. Questo processo è in grado di smaltire tutti i tipi di materiali compositi, anche senza pre-trattamenti e lavaggi.

L'incenerimento è quel processo nel quale i rifiuti vengano bruciati con recupero di energia, ma non è una soluzione a lungo termine poiché viene prodotta cenere dai materiali che non bruciano, come le fibre di vetro e i riempitivi inorganici. Un materiale composito con fibre di vetro può lasciare fino al 70% del composito come residuo dopo l'incenerimento; mentre i polimeri rinforzati con fibre naturali sono il miglior tipo di materiale composito smaltibile attraverso l'incenerimento perché le fibre bruciano facilmente senza lasciare residui e senza nessuna perdita di energia. I cementifici utilizzano materiali compositi con fibre di vetro nel co-incenerimento perché le fibre residue diventano parte del cemento che agiscono da rinforzo, evitando così i residui finali; però questo processo può generare polveri contenenti fibre di vetro.

6. Confronto tra materiali compositi

Abbiamo visto che nelle ultime generazioni di autoveicoli si sta puntando molto all'utilizzo di materiali compositi rinforzati con fibre di origine naturale in sostituzione ai compositi di vecchia concezione con fibre di vetro.

Questa tendenza è dovuta, in buona parte, dalle normative emesse che incentivano all'utilizzo di materiali facilmente riciclabili ed ecocompatibili.

I compositi con fibre di rinforzo naturali hanno una serie di vantaggi rispetto a quelli con fibre di vetro, primo tra tutti il basso impatto ambientale poiché l'energia specifica di produzione è minore fino al 60%. Inoltre la loro produzione, pur essendo più dispendiosa in termini di tempo a causa della maggior difficoltà di lavorazione delle fibre naturali, risulta più economica grazie anche al minor costo delle materie prime.

Se prendiamo due compositi rinforzati, uno con fibre naturali e uno con fibre di vetro, con pari proprietà meccaniche noteremo subito che il primo è molto più leggero dell'altro, poiché la densità delle fibre naturali è circa la metà delle fibre di vetro. La riduzione di massa dei componenti di un autoveicolo influisce sul consumo di carburante, che viene diminuito, rendendo inferiori le emissioni dei motori.

Un altro punto di forza del materiale composito con fibre naturali è che ha maggiori proprietà di isolamento termico e insonorizzazione, che in un autoveicolo si traducono in maggior comfort di viaggio.

Un materiale rinforzato con fibre di vetro ha una maggiore longevità rispetto ad uno rinforzato con fibre di origine naturale; il primo è inattaccabile da microbi, funghi e muffe, non risente dell'umidità e degli sbalzi di temperatura a differenza dei compositi con fibre naturali che sono più delicati da questo punto di vista e hanno una durata nel tempo più limitata.

Un composito con fibre naturali, giunto a fine del ciclo di vita, può essere incenerito ricavando energia. L'anidride carbonica emessa nella combustione delle fibre naturali equivale a quella assorbita dalla pianta quando è stata coltivata, quindi le fibre naturali possono considerarsi come un modo di stoccare, temporaneamente, l'anidride carbonica. La termo-valorizzazione dei compositi con fibre naturali dà maggiori emissioni, tra cui valori elevati di nitrati e fosfati dovuti alla concimazione delle piante, rispetto ad un composito con fibre di vetro che forniscono meno energia e lasciano però più residui dovuti alle fibre di vetro che perdurano alla fine della combustione e devono essere smaltite in discarica.

Quest'ultimi materiali compositi possono essere frantumati e utilizzati come

riempitivi, oppure scomposti, attraverso vari processi, in fibre e matrice per un eventuale riutilizzo, queste tecniche comportano un ulteriore impiego di energia e di tecnologie specifiche.

Il futuro dei materiali compositi rinforzati con fibre di origine naturale sembra avere buone prospettive perché sono meno costosi, più leggeri, ecologicamente superiori rispetto ai materiali compositi in fibre di vetro. La ricerca deve quindi concentrarsi sul raggiungimento di equivalenti o superiori prestazioni tecniche e durata dei componenti.

7. Conclusioni

I risultati di questo studio dimostrano che l'utilizzo di fibre di origine naturale combinate con matrici polimeriche ha permesso la realizzazione di innovativi materiali compositi per l'automotive, consentendo il rispetto delle recenti normative e leggi riguardanti i requisiti di riciclabilità dei nuovi autoveicoli.

I compositi con fibre naturali riescono ad avere le stesse proprietà meccaniche dei compositi rinforzati con fibre di vetro, con qualche accorgimento: come ad esempio l'aumento della frazione di fibre nel materiale.

Lo sviluppo dei materiali compositi con fibre naturali ha avuto un impatto positivo sul mercato mondiale, i maggiori produttori del settore automobilistico e del settore agricolo, già da alcuni anni, installano parti realizzate con i suddetti materiali che favoriscono:

- la diminuzione del peso del componente poiché le fibre naturali hanno una densità minore rispetto a quelle di vetro;
- la riduzione di peso a sua volta ha ridotto i consumi di carburante del veicolo senza nulla togliere alle prestazioni;
- l'isolamento e l'acustica interna nei veicoli è migliorata;
- la minor tossicità dei componenti;
- l'abbassamento dei costi di produzione.

In futuro questa tecnologia potrà essere applicata anche alle auto elettriche che ancora non possiedono un rapporto peso-potenza paragonabile alle auto con motore a combustione interna.

Tale pratica ha ridotto la dipendenza dalle fonti di energia non rinnovabile, come il petrolio, migliorando l'ambiente attraverso uno sviluppo sostenibile della catena di approvvigionamento delle materie prime e notevole riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra relative al ciclo di vita degli autoveicoli. Inoltre gli studi hanno dimostrato come l'utilizzo di fibre naturali nei compositi ha un grande potenziale poiché agiscono da mezzo di stoccaggio di CO₂.

Notevole beneficio ha avuto il mondo del riciclo da tali innovazioni: maggior facilità di riciclo, minori emissioni inquinanti, minori residui da smaltire.

8. *Bibliografia*

- Bernardo Enrico, 2009, slide del corso “Scienza e Tecnologia dei Materiali” per la Laurea in Ingegneria Meccanica e Meccatronica, II anno (DM 270/04), dalla 21 alla 24
- Grasso F., Calabretta C., corso di “Tecnologie di chimica applicata”, “I materiali compositi nei mezzi di trasporto”
- James Holbery and Dan Houston, 2006, “Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications”
- Official Journal of the European Communities, 2000, “Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on End of Life Vehicles”
- S. V. Joshi, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, S. Arora, 2003, “Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?”
- Muhammad Pervaiz, Mohini M. Sain, 2002, “Carbon storage potential in natural fiber composites”
- Halliwell Sue, National composite network best practice guide, “End of life options for composite waste”
- Rudd C. D., 2000, Rapra review reports, “Composite for automotive applications”
- Job Stella, 2010, “Composite recycling: summary of recent research and development”
- Alireza Ashori, 2007, “Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries!”
- Liciulli Antonio, “Le fibre di vetro e basalto”

- Pipino Andrea, 2010, centro ricerche FIAT, "Utilizzo delle fibre nel campo dell'automotive"

9. Sitografia

- “Le applicazioni attuali dei compositi con fibre vegetali”, [http://xoomer.virgilio.it/apjqgi/Cap. %201/cap.1%20-%2023-30.PDF](http://xoomer.virgilio.it/apjqgi/Cap.%201/cap.1%20-%2023-30.PDF)
- “Recycling thermoset composites”, <http://www.jeccomposites.com/news/composites-news/recycling-thermoset-composites>
- “Vetroresina”, <http://it.wikipedia.org/wiki/Vetroresina>
- “La vetroresina”, <http://www.aiesistem.net/lavetroresina.pdf>
- “Fibre naturali per il settore automobilistico”, <http://www.portalecompositi.it/Articoli/Fibre-naturali-per-il-settore-automobilistico/4-13-1.html>
- “Dagli Stati Uniti, le automobili biodegradabili”, <http://www.greenews.info/prodotti/dagli-stati-uniti-le-automobili-biodegradabili-20120209/>