



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia  
e lo sviluppo economico sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

## Tecnologie innovative per la realizzazione di compositi a matrice polimerica con rinforzo in fibre naturali

*Luigi Carrino, Massimo Durante*



*Università degli Studi di Napoli Federico II*

Report RdS/2012/103

TECNOLOGIE INNOVATIVE PER LA REALIZZAZIONE DI COMPOSITI A MATRICE POLIMERICA CON RINFORZO  
IN FIBRE NATURALI

Luigi Carrino, Massimo Durante (Università di Napoli Federico II, Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e  
della Produzione)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

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

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

Responsabile del Progetto: Giuseppe Barbieri, ENEA

## Indice

<b>Sommario.....</b>	<b>4</b>
<b>Introduzione.....</b>	<b>5</b>
<b>Capitolo 1 Sviluppo e messa a punto di tecnologie innovative .....</b>	<b>6</b>
<i>Materiali impiegati.....</i>	<i>6</i>
<i>Processo Rubber Forming.....</i>	<i>10</i>
<i>Prove di formatura .....</i>	<i>13</i>
<i>Analisi dei risultati.....</i>	<i>19</i>
<i>Tecnologie di infusione.....</i>	<i>23</i>
<b>Capitolo 2 Caratterizzazione meccanica.....</b>	<b>28</b>
<i>Prove di trazione.....</i>	<i>28</i>
<i>Prove sull'elemento formato .....</i>	<i>29</i>
<i>Prove sul materiale riciclato .....</i>	<i>31</i>
<b>Conclusioni.....</b>	<b>33</b>
<b>Riferimenti bibliografici .....</b>	<b>34</b>
<b>Abbreviazioni ed acronimi .....</b>	<b>35</b>

## Sommario

La seguente relazione illustra i risultati ottenuti relativamente all'applicazione di tecnologie di formatura per pannelli di materiale composito a matrice termoplastica con rinforzo in fibra naturale; tale lavoro è stato sviluppato presso il Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione (DIMP) dell'Università degli Studi di Napoli "Federico II".

Per motivi legati principalmente a problematiche ambientali ed a politiche di riciclaggio si è deciso di optare per la scelta di materiali termoplastici per la matrice. Le fibre vegetali rappresentano rinforzi e riempitivi molto interessanti per i termoplastici. I vantaggi che offrono rispetto a quelli sintetici sono legati al basso peso specifico, abbondanza, rigidità e resistenza specifiche e basso costo. Sono riciclabili, rinnovabili e biodegradabili. Sono state scelte due tipologie di rinforzo: polpa di legno con fibre corte e 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. La polpa di legno è impiegata sia come rinforzo che riempitivo per dare un colore simil-legno alla matrice.

Obiettivo della ricerca è la messa a punto di tecnologie per la formatura di compositi descritti e la valutazione delle proprietà meccaniche dei materiali dopo formatura, degli elementi formati e del materiale riciclato.

Sono state applicate, in particolare, tecnologie con controstampo in gomma e sacco; sono state misurate le caratteristiche geometriche degli elementi prodotti. Sugli elementi prodotti sono state successivamente eseguite prove di caratterizzazione meccanica per valutare le proprietà del materiale formato, degli elementi stampati e del materiale riciclato.

## Introduzione

Il presente rapporto tecnico si riferisce al Piano Annuale di Realizzazione 2011, per quanto attiene all'Area RAZIONALIZZAZIONE E RISPARMIO NELL'USO DELL'ENERGIA ELETTRICA tematica di ricerca: 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.

Nello specifico, si riferisce alla linea F: "SVILUPPO DI PROCESSI DI IBRIDIZZAZIONE DI MICROSFERE METALLICHE CON POLIMERI TERMOPLASTICI E DI PROCESSI PER L'IMPIEGO DI FIBRE NATURALI IN COMPOSITI TERMOPLASTICI.

I temi sviluppati nell'ambito del presente accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di ingegneria dei materiali e della produzione dell'Università di Napoli Federico II riguardano lo studio di tecnologie innovative per la realizzazione di compositi a matrice polimerica con rinforzo in fibre naturali.

## CAPITOLO1

Sviluppo e messa a punto di tecnologie innovative per la realizzazione di elementi in materiale composito a matrice termoplastica rinforzati con polpa e fibre naturali

## 1.1 Materiali impiegati

### 1.1.1. Introduzione

Quando si utilizza il termine composito in generale si intende un materiale ottenuto combinando due o più componenti in modo che il prodotto finale abbia proprietà diverse da quelle dei singoli costituenti. I compositi sono generalmente costituiti da almeno due componenti, chiamati anche fasi, combinati in varie proporzioni e forme: una delle fasi, la matrice, è in forma continua, e ha come scopo principale quello di garantire una determinata forma al pezzo nonché quello di proteggere e trasmettere in modo uniforme il carico alla fase di rinforzo. L'altra fase è rappresentata da un componente discontinuo, il rinforzo, detto anche carica o filler.

Alla base della progettazione dei compositi c'è l'ottimizzazione, in termini di caratteristiche meccaniche e leggerezza, delle prestazioni dei materiali cosiddetti convenzionali. Combinando, infatti, un materiale con una certa proprietà, con un altro di proprietà differenti, è possibile ottenere un materiale, composto dai due, che ne esalti le caratteristiche migliori.

In tale studio sono stati considerati materiali composti a matrice termoplastica, le fibre naturali e il WPC (wood plastic composite).

### 1.1.2. Le fibre

Si definiscono fibre filamenti elementari caratterizzati da un elevato rapporto lunghezza-diametro e dotati di sufficiente tenacità e flessibilità. Le fibre utilizzate nei materiali compositi sono sia di tipo inorganico che organico. Tra le prime ricordiamo quelle di vetro, di carbonio o di grafite, di carburo di silicio, di alluminio; fra le altre importanti sono i poliammidi, ma anche le poliolefiniche. Grazie alle loro dimensioni limitate, le fibre presentano una perfezione strutturale fuori del comune; questa caratteristica, unita alle proprietà intrinseche dei materiali costitutivi, assicura ad esse:

- Elevata resistenza meccanica;
- modulo elastico molto alto;
- peso specifico molto basso;
- comportamento elastico lineare fino alla rottura.

Le fibre possono essere classificate nel seguente modo:

- Fibra elementare o singola: la più piccola unità isolabile tramite macerazione delle fibre liberiane (legnose);
- Fibra tecnica: è un fascio costituito da più fibre elementari, idoneo alle operazioni tessili;
- Fibra fiocco o di filiera: si tratta di fibra ottenuta per via chimica e che si può tessere;
- Fibra a nastro: fibra tagliata da nastri prodotti artificialmente e profilati mediante passaggio attraverso ugelli;
- Fibra da taglio: fibra del tipo a nastro, ottenuta per riduzione a strisce sottili di pellicole a base di derivati cellulosici tipi nitro e acetilcellulose.

L'ottenimento di un significativo grado di rinforzo è possibile solo se il legame interfacciale fibra-matrice è forte. Affinché l'adesione tra le fibre e la matrice sia perfetta occorre che il grado di bagnabilità delle fibre da parte della matrice sia molto elevato. L'importanza attribuita a tale fattore ha indotto gli studiosi ad approfondire la ricerca che si è diretta verso agenti capaci di migliorare l'adesione qualora essa non risultasse sufficiente.

Dunque, per ottenere un effettivo rafforzamento ed irrigidimento della struttura è necessario che la fibra raggiunga almeno una certa lunghezza critica, che dipende dall'accoppiamento fibra-matrice. Le fibre per le quali la lunghezza è molto maggiore della lunghezza critica sono definite fibre continue, mentre quelle più corte di essa vengono chiamate fibre discontinue o fibre corte. In questo secondo caso la matrice si deforma intorno alle fibre in maniera tale che in pratica non vi è nessun trasferimento di carico, né viene fornito alcun rinforzo da parte della fibra. In tal caso il composito diventa sostanzialmente un particellare.

Anche la disposizione delle fibre risulta critica per le caratteristiche del composito. Le proprietà meccaniche di un composito con fibre continue ed allineate sono fortemente anisotrope. Il rinforzo e la conseguente resistenza raggiungono il massimo valore nella direzione di allineamento ed il minimo nella direzione trasversale. Infatti, lungo questa direzione l'effetto di rinforzo delle fibre è praticamente nullo e normalmente si presentano delle fratture per valori di carichi di trazione relativamente bassi. Per altre orientazioni del carico, la resistenza globale del composito assume valori intermedi.

Nei compositi a fibre corte e discontinue le fibre possono essere sia allineate che distribuite casualmente. Per quelli con fibre allineate è possibile ottenere resistenze e rigidità significative nella direzione longitudinale. Le proprietà dei compositi a fibre corte casualmente orientate sono invece isotrope a discapito, tuttavia, di alcune limitazioni sull'efficienza del rinforzo.

Si definiscono fibre naturali fibre presenti in natura, ricavabili mediante diversi procedimenti chimici e meccanici. In base alla loro origine si classificano in:

- fibre vegetali: si tratta delle fibre che più si prestano alla trasformazione in materiali tessili ricavate da parti diverse di piante attraverso procedimenti chimici e meccanici (come ad esempio la macerazione);
- fibre animali: lana e seta;
- fibre minerali: amianto.

La tipologia di fibra studiata è quella vegetale. Le fibre vegetali sono quasi esclusivamente costituite da cellulosa, suo elemento costitutivo principale ed in alcuni casi unico, come ad esempio nel cotone.

Fra tutti i materiali tessili naturali, la canapa possiede le fibre elementari più resistenti.

Tali fibre si ricavano dal fusto della Cannabis sativa, appartenente alla famiglia delle Cannabinae; è una pianta annuale dal fusto alto e sottile, con la parte sommitale ricoperta di foglie, e può superare i 4 m d'altezza. La canapa è costituita essenzialmente da cellulosa. Le proprietà della canapa sono simili a quelle del lino dal punto di vista strutturale, chimico e fisico. I fattori che ne determinano il pregio sono:

- lucentezza;
- lunghezza;
- resistenza meccanica.

Per quanto riguarda la produzione di questa fibra, la canapa cresce spontanea in una vasta zona che va dal basso Danubio alla Cina ed è coltivata in tutte le regioni a clima temperato – umido.

La canapa ha un campo vastissimo di possibili utilizzazioni (più di 50.000) e secondo diversi ricercatori è la risorsa naturale di maggior valore e più versatile al mondo.

Può essere usata come:

- produttrice primaria di fibra naturale;

- produttrice di cibo per consumo umano o animale;
- produttrice di solventi e oli combustibili;
- produttrice di medicinali;
- produttrice di energia;
- miglioratrice della fertilità del terreno;
- produttrice di carta e cartone;
- produttrice di cellulosa;
- produttrice di materiale edilizio, sia come isolante sia per costruzione.

### 1.1.3. I materiali termoplastici

I materiali plastici sono prodotti sintetici ottenuti da materiali di base quali petrolio, gas naturali e carbone; dalle conversioni di queste sostanze derivano dei composti chimici che possono essere suddivisi in tre categorie di prodotti:

- termoplastici;
- termoindurenti;
- elastomeri.

Comunemente vengono definiti con il termine termoplastici tutti quei materiali plastici che rammolliscono in presenza di calore e solidificano raffreddandosi; solitamente la loro struttura è formata da molecole con una catena lineare o ramificata, a forma di fiocco. La coesione delle molecole e la loro forza ne determinano il comportamento. Le proprietà di resistenza meccanica e chimica dei termoplastici sono strettamente legate alle temperature di esercizio, dal momento che queste forze fisiche variano notevolmente a seconda della temperatura.

Inoltre se per la realizzazione di forme o configurazioni più complesse sono necessari processi di formatura complementari, i compositi termoplastici sono potenzialmente saldabili. Riscaldando le zone locali delle diverse parti, queste si possono saldare ottenendo buone proprietà ed inoltre, nessun dispositivo di giunzione è necessario. Tuttavia, i materiali termoplastici richiedono elevate temperature per la formatura e quindi per l'abbinamento con le fibre naturali è possibile impiegare solo due tipologie di polimeri termoplastici il polipropilene ed il polietilene.

Il polietilene (più comunemente noto come polietilene) è il più semplice dei polimeri sintetici ed il più comune fra le materie plastiche. Viene indicato con la sigla PE, ha formula chimica  $(-C_2H_4-)_n$  dove n può arrivare fino ad alcuni milioni.

### 1.1.4. Il WPC (wood plastic composite)

I nuovi criteri di sviluppo sono indirizzati verso l'utilizzo di prodotti a basso impatto ambientale, ovvero ecocompatibili e sostenibili da poter sostituire a quelli presenti "inquinanti". tra i materiali compositi così formati si distingue il WPC, acronimo di Wood Plastic Composite, composto da una matrice termoplastica e da polvere di legno.

La nascita di industrie produttrici di WPC ha comportato l'interazione di due settori storicamente estranei tra loro: l'industria del legno e quella della plastica in possesso di due differenti prospettive, esperienze e conoscenze. La prima in possesso di una maggiore esperienza e di risorse nel mercato dell'edilizia i cui processi produttivi ruotano intorno alle tipiche lavorazioni del legno: taglio, impiallacciatura, desquamazione ed incollaggio; la seconda, quella delle industrie plastiche, specialiste nella lavorazione della plastica e in operazioni quali estrusione, compressione e

stampaggio ad iniezione. Non sorprende, allora, che tra le prime aziende di WPC ci sono state quelle produttrici di finestre aventi esperienze sia con legno che con la plastica.

#### 1.1.5. Composizione del WPC

Il WPC si ottiene riutilizzando e rivalorizzando scarti di lavorazione, come quella del legno; è uno dei materiali maggiormente ecosostenibili e presenta impatto ambientale pari a zero. Questo perché la realizzazione e la posa dei manufatti in WPC richiede pochissima energia, rispetto ai materiali plastici che devono essere smaltiti in modo separato e oneroso, ed anche perché i prodotti in WPC sono riciclabili al 100%, trasformandosi di nuovo in manufatto o venendo riutilizzato come combustibile naturale (date le bassissime emissioni pericolose). Il WPC, quindi, non diventa mai un rifiuto. Non comporta emissioni di sostanze dannose, né inquinanti e neppure di fibre o polveri cancerogene per la salute. Il Wood Plastic Composite, come già accennato, è un materiale complesso di fibre naturali – legno o altri vegetali – e plastica, che unisce la naturale bellezza del legno ai pregi dei moderni materiali plastici. È in grado di sostituire il legno in tutto e per tutto.

Per quanto concerne la composizione dei WPC, non esistono 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 che strutturali. La scelta e la preparazione delle materie prime sono due fasi strategiche e fondamentali nella produzione dei WPC. La selezione dei materiali dipende da vari fattori: disponibilità delle materie prime, posizione di mercato del prodotto (a basso costo o sostenuto) e dai requisiti di prestazioni del prodotto. La materia prima legno può essere sotto forma di farina o di fibre e possono provenire da varie specie di alberi. Le fonti disponibili in commercio del legno sono:

- Segatura;
- Farina di legno (Figura 1.2);
- Fibra di legno;
- Cellulosa.



Figura 1: Farina di legno

#### 1.1.6. Processo produttivo del WPC

Preparate le materie grezze, il primo passo nel processo di fabbricazione del WPC consiste nel miscelare le fibre di legno con il materiale della matrice: questa fase è detta compounding. La seconda fase comporta la formazione di granuli che serviranno come materia prima nei processi di

stampaggio a compressione, estrusione o stampaggio ad iniezione. I pellets vengono creati attraverso un estrusore.

## 1.2.IL PROCESSO DI RUBBER FORMING

### 1.2.1.Introduzione

Il processo di Rubber Forming appartiene alla categoria dei processi di formatura sia di lamiera metalliche [1-4] che di laminati in composito[5-7]. Tale tecnologia di formatura con elastomero vede le sue origini più di un secolo fa [1], quando Adolph Delkescamp utilizzò un tappetino di gomma per il taglio di materiali sottili, come la carta e la pellicola. Tuttavia, fu H. Guerin che ottenne, durante la seconda guerra mondiale, tre brevetti relativi alla tecnologia Rubber Forming[2].

Questa tecnica ha subito un notevole sviluppo grazie all'utilizzo di nuovi elastomeri sintetici come il poliuretano, ossia materiali più duri della gomma, più resistenti alla corrosione causata da oli ed in generale più resistenti all'usura.

Il forte impatto di questi processi è legato principalmente a due caratteristiche della produzione di parti in lamiera nel settore aereo:

- una grande varietà di pezzi (differenti in dimensioni, forme e spessori);
- una serie di prodotti relativamente piccoli di ogni parte.

Queste due caratteristiche rendono necessario l'utilizzo di processi produttivi flessibili e che offrano bassi costi di lavorazione. Il Rubber Forming risponde bene a questi requisiti perché, mentre nella maggior parte dei processi di formatura delle lamiere queste vengono disposte in una pressa in cui le due parti sono in metallo, la formatura in gomma utilizza, appunto, come una delle due parti, uno stampo di gomma. La gomma è un materiale molto efficace per la sua flessibilità, la bassa comprimibilità, un ridotto costo, è facile da produrre nelle forme desiderate, presenta un tasso di usura generalmente basso ed, infine, protegge anche la superficie del pezzo da eventuali danni.

Questa tecnologia affiancata all'utilizzo di materiali e compositi termoplastici permette di raggiungere standard di qualità nei prodotti, tempi di produzione efficienti, risparmi di risorse energetiche con un ottimo trade-off tra costi e benefici. È chiaro, dunque, il motivo che ha spinto sempre più le aziende ad investire nella ricerca e nello sviluppo di risorse naturali rinnovabili, che comportano un ridotto impatto ambientale, di materiali che sono facilmente reperibili ma, soprattutto, a basso costo, al contrario dei metalli o della plastica termoindurente, e nello sviluppo di tecnologie sempre più all'avanguardia in grado di rispondere al meglio alle richieste del mercato. Il tutto con lo scopo di ottenere dei prodotti da poter impiegare in diversi campi e ambiti, come ad esempio quello edile e dello sport e del tempo libero ad un basso costo di produzione, ma soprattutto di risorse naturali tutte rinnovabili e facilmente reperibili. L'utilizzo stesso di materiali compositi apporta notevoli vantaggi nella realizzazione dei prodotti, in quanto essi posseggono ottime caratteristiche di resistenza, rigidità e leggerezza.

### 1.2.2.Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento è molto semplice: la lamiera viene compressa tra due stampi, di cui uno in metallo e uno di gomma, creando la forma tridimensionale desiderata. La tecnica più diffusa è la seguente: lo stampo superiore realizzato in gomma è collegato ad una pressa idraulica mentre quello di acciaio, modellato secondo la forma finale del prodotto da ottenere, è posto inferiormente. Le presse idrauliche sono utilizzate perché la pressione e la velocità di funzionamento possono essere così facilmente modificate e controllate. Si possono distinguere due tipologie di Rubber Forming:

- positive pressing: il materiale viene pressato sopra lo stampo;
- negative pressing: il materiale viene pressato nello stampo.

In Figura 2 sono riportati gli schemi delle due tipologie pocanzi descritte:

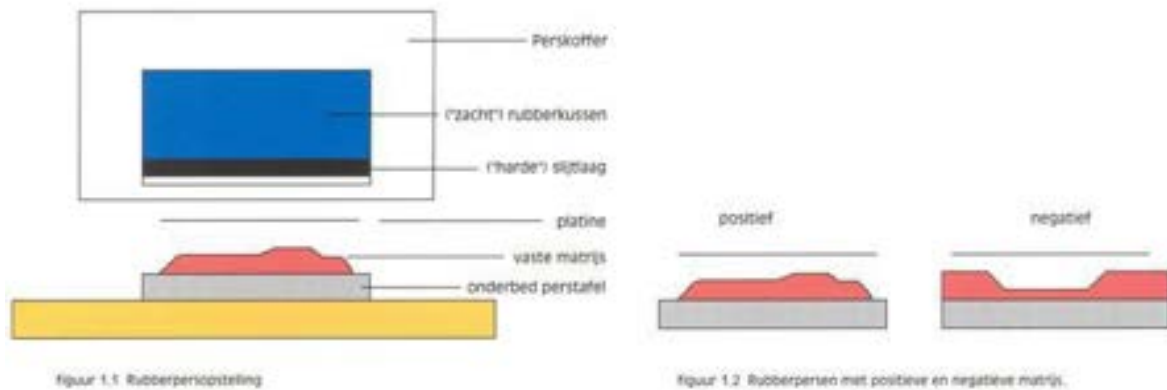


Figura 2: Positive e Negative pressing nel Rubber Forming

Durante il ciclo di lavorazione, l'utensile "morbido" si deforma elasticamente sullo stampo applicando una pressione elevata (tipicamente dell'ordine di 100 MPa). Quando il ciclo è completato, la gomma torna alla sua geometria originale. Si tratta, quindi, di uno strumento universale che può essere utilizzato per una vasta gamma di parti diverse. Questo processo appena descritto è il più semplice tra i possibili procedimenti applicabili ed è conosciuto come "Guerin Process" (Figura 3).

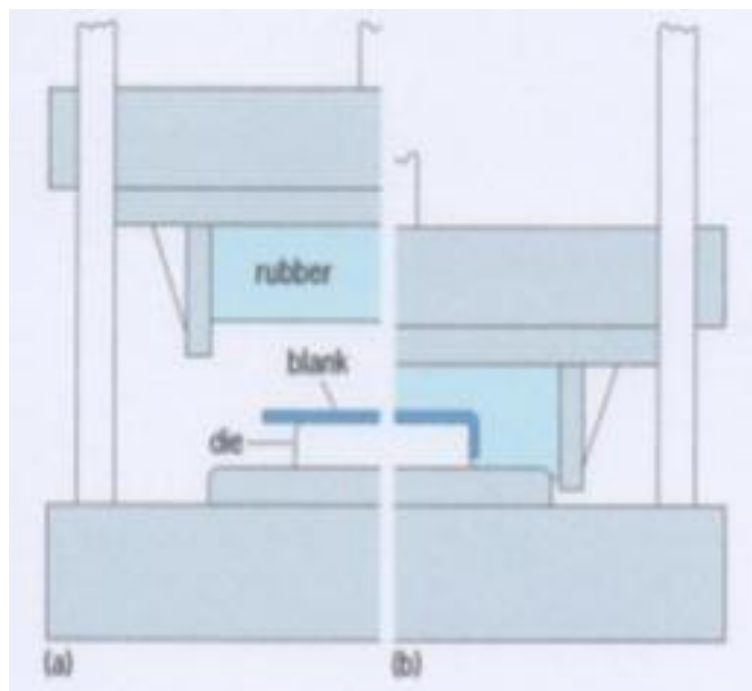


Figura 3: Guerin Process, a) prima del processo b) dopo il processo

Un differente approccio di formatura (il procedimento classico) è il seguente: la lamina ancora calda è posta su di uno stampo in gomma posizionato inferiormente alla macchina, nel quale è già impressa la forma finale desiderata per il prodotto, e lo stampo di metallo, collegato ad una pressa

idraulica superiormente, imprime la pressione necessaria per l'operazione. La Figura 4 mostra il processo appena descritto:

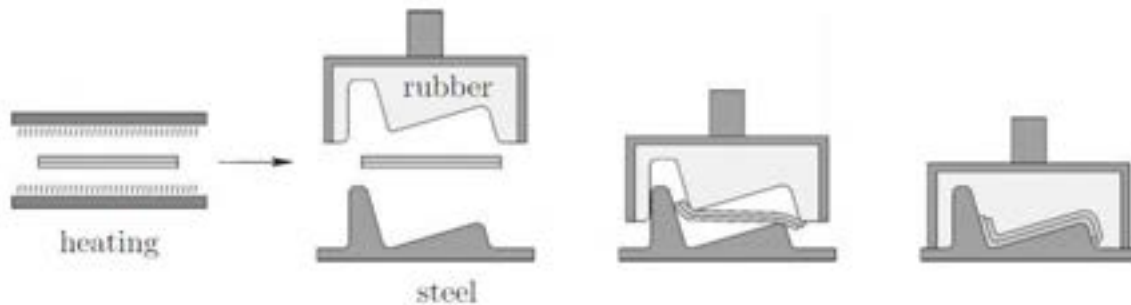


Figura 4: Processo di formatura classico

È evidente quanto il processo sia semplice ma richiede esperienza ed il know-how necessari per ottenere condizioni corrette di funzionamento, altrimenti potrebbero ad esempio verificarsi fratture localizzate della lamiera dovute ad un'eccessiva compressione dell'elastomero.

### 1.2.3. Vantaggi e svantaggi del processo

I principali vantaggi derivanti dall'impiego del Rubber Forming sono i seguenti:

- versatilità, in quanto il blocco di gomma può essere utilizzato per la realizzazione di pezzi di diverse forme;
- i problemi di adattamento della forma e di mancata corrispondenza tra gli stampi sono eliminati;
- la lubrificazione delle parti non è necessaria;
- il blocco di gomma costituisce una sorta di membrana protettiva sul pezzo. Ciò offre la possibilità di lavorare su laminati, ad esempio, verniciati o comunque su superfici che già costituiscono il prodotto finale;
- i vari dettagli da realizzare possono essere creati in un unico ciclo di lavorazione grazie alla pressione uniforme che la gomma consente di ottenere su tutta la superficie della lamina;
- basso costo di lavorazione.

Da tutti questi vantaggi deriva un notevole abbassamento dei tempi di immissione dei prodotti sul mercato e quindi un possibile rapido recupero dei costi fissi iniziali relativi agli impianti e i macchinari. Tuttavia, la tecnologia del Rubber Forming presenta anche alcuni limiti e svantaggi quali, ad esempio:

- lo stampo di gomma è soggetto ad usura e quindi deve essere sostituito periodicamente;
- la complessità delle forme che si possono realizzare è limitata;
- possono essere, a volte, necessarie grandi forze di formatura, siccome in alcune tipologie di formatura in gomma la stessa parte flessibile deve deformarsi secondo la forma dello stampo inferiore;
- possono sempre crearsi, durante alcuni processi, rughe e lievi difetti superficiali;
- costituisce una tecnica di lavorazione tipica di produzioni relativamente lente costituite da lotti e volumi di prodotti non elevatissimi.

### 1.3.prove di formatura

#### 1.3.1.Realizzazione dei laminati

I provini, successivamente formati mediante Rubber Forming, consistono in laminati di materiale composito. I materiali utilizzati sono il WPC, il PE e le fibre di canapa. La scelta di questi materiali è stata dettata dall'obiettivo del lavoro, ossia la realizzazione di elementi in materiale composito ecosostenibile utilizzando come processo di produzione il Rubber Forming.

Al fine di ottenere i laminati ci si è avvalsi della Carver Laboratory Press (Figura 5). Questa macchina è caratterizzata da un telaio, che può essere fissato in una posizione desiderata, ed una traversa mobile che può essere avvicinata alla parte fissa mediante l'azione manuale di una pompa oleodinamica. A queste parti della macchina sono fissate le due piastre autolivellanti che possono essere portate alla temperatura di stampaggio grazie alla presenza di resistenze poste al loro interno. La pressione che si instaura tra le due piastre è rilevabile mediante un manometro che dispone di una doppia scala graduata la quale da un lato mostra il valore della forza di serraggio espressa in tonnellate e dall'altra espressa in libbre. Sulla parte frontale delle piastre sono posti due termometri che forniscono una misura della temperatura delle piastre. Questa è impostabile mediante le apposite manopole, una per ciascuna piastra, poste su un lato; le manopole sono accompagnate da due spie di colore rosso che avvertono quando le piastre sono in fase di riscaldamento e si spengono una volta raggiunta la temperatura impostata.



Figura 5: Carver Laboratory Press

I laminati realizzati appartengono alle seguenti categorie:

- I. laminati costituiti da solo polietilene;
- II. laminati con polietilene e fibra di canapa posta in modo unidirezionale;
- III. laminati costituiti da solo WPC;
- IV. laminati in WPC e fibra di canapa unidirezionale;

La fase di realizzazione ha comportato alcune difficoltà, in particolare nel caso dei laminati unidirezionali, che hanno riguardato l'allineamento delle fibre di canapa nella stessa direzione e la presenza di zone a differente concentrazione della fibra stessa. I provini di laminati compositi sono stati realizzati con WPC al 20 e 40% di farina di faggio e con polietilene, con e senza rinforzo in canapa.

#### Laminati costituiti da solo WPC nelle varie percentuali

Prima di passare alla realizzazione del composito sono stati realizzati dei laminati costituiti da solo WPC, aventi circa 1mm di spessore, ottenuti attraverso un'operazione di stampaggio del materiale posto in due strati di carta-forno tra le piastre della pressa preriscaldate ad una temperatura di 200°C. Il tempo di permanenza del materiale, ad una pressione di circa 4 bar, è stato di circa trenta secondi. Prima della rimozione della carta forno, durante il raffreddamento, si è assistito ad una leggera incurvatura della sottile lamina dovuta alla presenza delle tensioni residue al suo interno. Le lamine ottenute, come è possibile visualizzare in Figura 6, sono risultate nel complesso di una buona finitura superficiale e facilmente malleabili.



Figura 6: Lamine di solo WPC

Una volta realizzate queste lamine si è proceduto con il taglio per facilitare la successiva operazione di distribuzione unidirezionale delle fibre di canapa. Il materiale di scarto è stato ulteriormente utilizzato per la realizzazione di ulteriori lamine.

### Laminati costituiti da solo polietilene e polietilene rinforzato

Per la realizzazione di tali laminati si è proceduto nel seguente modo: fili di PE lunghi all'incirca 10 cm e 5mm di diametro, sono stati disposti tra due strati di carta forno, allineati l'uno accanto all'altro, e poi posti sulle piastre della pressa riscaldate alla temperatura di 200 °C. Su queste ultime, inoltre, sono stati posizionati dei lamierini aventi lo spessore di 1,0 mm circa in modo da poter ottenere delle lamine con lo stesso spessore.

Il tempo di permanenza del materiale tra le piastre della pressa, ad una pressione di 4bar, è stato di circa trenta secondi, il tempo necessario a far liquefare il polietilene.

Sono state realizzate in questo modo lamine di PE per i processi successivi (Figura 7).



Figura 7: Lamina di polietilene

In particolare sono state ottenute a partire da queste lamine di PE piastre più doppie di PE e PE con rinforzo in fibra di canapa disposta in modo unidirezionale

La percentuale di canapa disposta trasversalmente sulla lamina centrale è stata del 10% .

Il composito così preparato, posto tra un film di peel ply e uno di carta forno, è stato portato sulle lastre della pressa riscaldate a 200°C, e vi è stata impressa una pressione di 4 bar per circa 60 secondi.

### WPC con rinforzo in fibra di canapa disposta in modo unidirezionale

Una volta ottenute le lamine di WPC nelle varie percentuali, si è proceduto alla realizzazione del composito. La fibra è stata disposta solamente su due delle cinque lamine utilizzate. Le fibre di canapa hanno consentito di realizzare dei laminati unidirezionali, disponendo le stesse lungo la direzione longitudinale delle lamine di WPC precedentemente preparato.

Una volta preparati, i compositi sono stati disposti sulla pressa, preriscaldata alla temperatura di 200°C. E' stata applicata una pressione di 4 bar, mentre il tempo di permanenza sotto pressa alla temperatura desiderata è stato di circa 1 minuto e trenta secondi.

Sono state impiegate lamine con WPC al 20 e 40% e percentuali di canapa del 10%.

### 1.3.2. Processo di formatura mediante Rubber Forming

Per le operazioni di formatura è stato utilizzato il processo di Rubber Forming. A tale scopo ci si è avvalsi di una macchina studiata e realizzata appositamente per il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e della Produzione (Figura 8). La macchina in questione è costituita da un carrello di carico/scarico (Figura 9) sul quale si dispongono i laminati, un forno nel quale i laminati vengono riscaldati ed una pressa sotto la quale i laminati vengono formati secondo la geometria dello stampo. La fase di carico prevede il posizionamento del laminato da formare sul carrello. Dopo la fase di carico, attraverso l'apposito pannello di controllo, vi è la fase di riscaldamento del laminato. In seguito, il carrello porta il laminato, riscaldato, nella zona della pressa (Figura 10) dove avverrà la fase di formatura (Figura 11). E' stato utilizzato un valore di forza di chiusura molto basso pari a 180N. Oltre ai comandi per azionare l'abbassamento e la risalita del pistone idraulico della pressa vi è il controllo di temperatura dello stampo nonché il controllo del carico applicabile durante il processo di formatura.

Una volta abbassata, la pressa rimane chiusa per un tempo di circa 5 minuti per evitare deformazioni causate dalle tensioni residue.

Una volta terminata la fase di formatura, utilizzando il carrello di carico/scarico è possibile estrarre dalla macchina il laminato.



Figura 8: Macchina per le operazioni di formatura

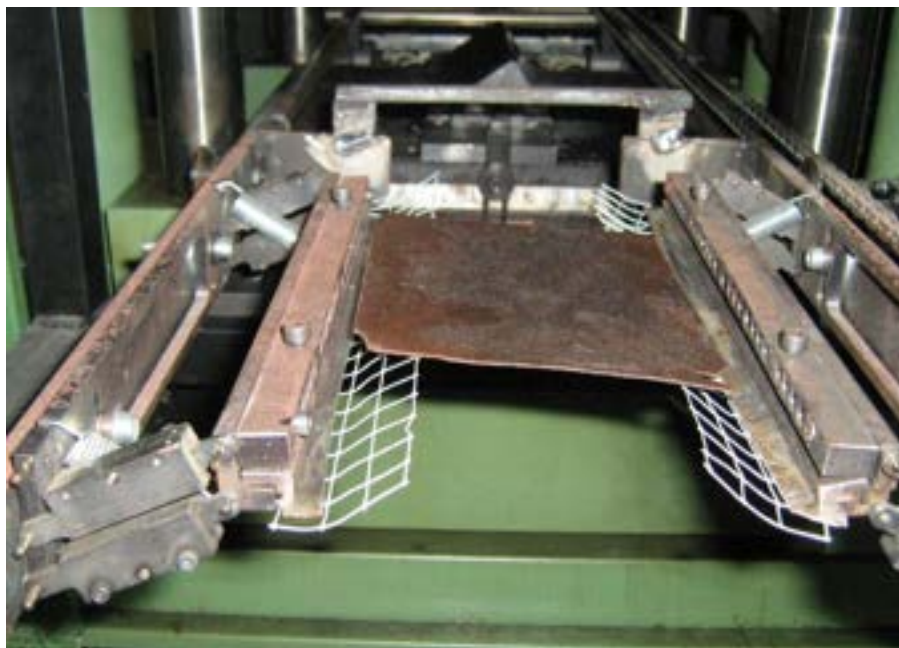


Figura 9: Carrello di carico/scarico dei laminati



Figura 10: Laminato pronto per la fase di formatura

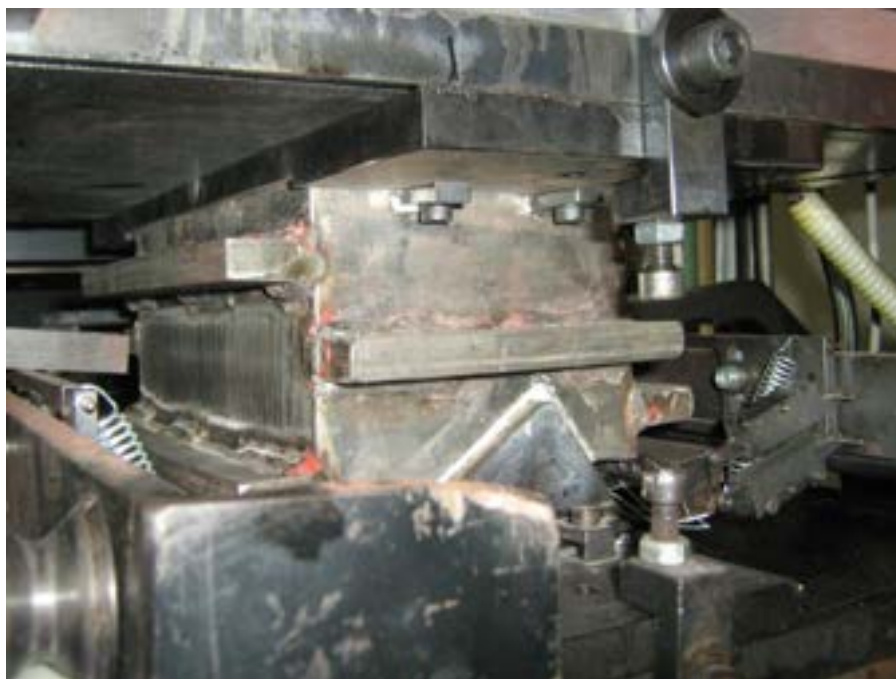


Figura 11: Stampo chiuso durante la fase di formatura

### 1.3.ANALISI DEI RISULTATI

#### 1.3.1.Considerazioni generali

Tutti i laminati e quindi gli stampi realizzati sono stati oggetto di accurate osservazioni visive prima di essere tagliati; in particolare è stato possibile rilevare, in alcuni casi, la presenza di inclusioni gassose, e quindi di una cattiva distribuzione dei componenti utilizzati o di presenza di umidità negli stessi. Inoltre nei compositi è stato possibile osservare la disposizione lineare ed unidirezionale delle fibre di rinforzo in canapa presenti al loro interno.

Una volta rifiniti i bordi dei "prodotti" realizzati, si è proceduto con la misurazione degli spessori degli stessi grazie all'utilizzo di un calibro. Da uno spessore iniziale noto, in seguito alla formatura della lamiera tramite Rubber Forming, si è potuto osservare che:

- una pressione maggiore, quindi una diminuzione di spessore più accentuata, si è avuta in corrispondenza dello spigolo delle mensole;
- nel complesso la tecnologia permette di ottenere una formatura delle lamiere senza eccessive variazioni di spessore. In alcuni casi la variazione è stata totalmente nulla.

Inoltre, sempre l'osservazione visiva ha evidenziato:

- una buona finitura superficiale con assenza di difetti ed inclusioni gassose;
- nella sezione della lamina assenza di porosità all'interno dei compositi plastici.

#### 1.3.2.Misurazioni ed osservazioni al microscopio

La misurazione degli spessori in seguito alla formatura è stata effettuata in tre punti distinti (Figura 12), al fine di osservare sperimentalmente se la tecnologia Rubber Forming consente o meno una formatura delle lamiere con variazioni di spessore poco significative.

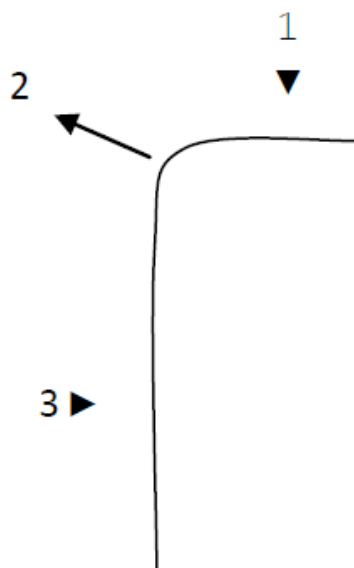


Figura 12: Punti di misurazione degli spessori

Ogni laminato è stato nominato con lettere dell'alfabeto in modo da renderlo facilmente identificabile durante le misurazioni. La Tabella 1 riassume le tipologie di materiali compositi esaminati:

Laminato	Materiali	Spessore (mm)
A	PE	0.5-1-1.5-2
B	PE+20%canapa	1-1.5-2
C	WPC20%	0.8-1-1.5-2
D	WPC40%	0.8-1-1.5-2
E	WPC20%+15% canapa	1.5-2
F	WPC40%+10%canapa	1.5-2

Tabella 1: Materiali esaminati

Si riportano alcuni dei componenti formati (Figure 13÷15):



Figura 13: Mensola di tipo C



Figura 14: Mensola di tipo F



Figura 15: Mensola di tipo B

L'evidenza sperimentale ha mostrato che le variazioni di spessore registrate sono strettamente correlate all'entità dello spessore ed alla tipologia di ogni singolo laminato. Nel complesso, la distribuzione di pressione risulta omogenea, le variazioni di spessore sono poco significative e la maggiore diminuzione di spessore si osserva in corrispondenza dell'angolo di piegatura. Osservazioni al microscopio hanno confermato questo risultato. Infatti dalle immagini si può constatare la leggera diminuzione dello spessore nella zona centrale del provino. I risultati sono riassunti nei grafici di Figura 16 e 17. In particolare in fig.16 vi è l'andamento della variazione di spessori per i laminati in solo WPC al 40%, mentre in fig.17 sono riportati gli andamenti delle variazioni di spessori per alcuni dei materiali testati.

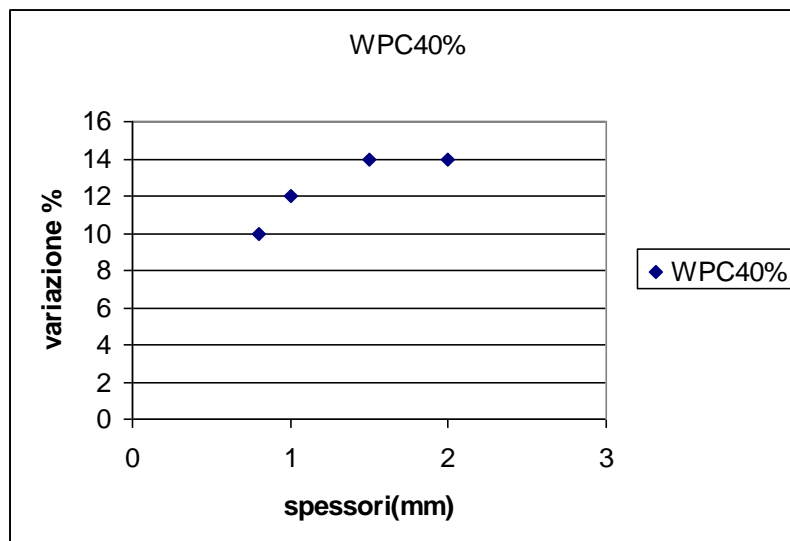


Figura 16: Variazione percentuale degli spessori in funzione dello spessore

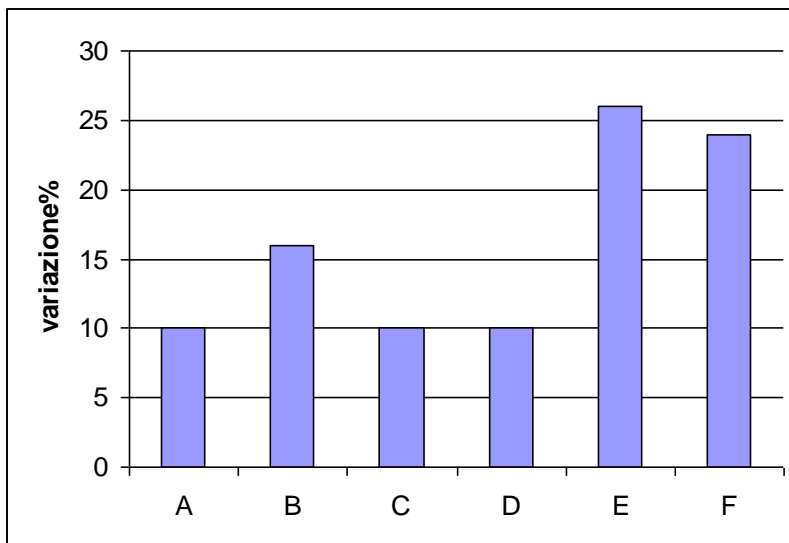


Figura 17: Variazione percentuale degli spessori in funzione della tipologia di laminato

I risultati sono stati i seguenti:

- all'aumentare degli spessori dei laminati aumenta anche la variazione percentuale degli spessori in seguito alla formatura in gomma.
- la presenza di fibre lunghe di rinforzo nei laminati genera maggiore variazione percentuale degli spessori.

Relativamente alla valutazione degli angoli tra le facce delle mensole, tale misura è stata effettuata solo per alcune tipologie di laminati (WPC, WPC e canapa, PE e canapa; WPC solo al 40% di farina di faggio). Si è evinto che l'angolo si avvicina a quello di progetto, ossia 90°, per piccoli spessori ed all'aumentare del tempo di permanenza dei laminati in forno.

In particolare per laminati di spessore inferiore ad 1 mm è sufficiente un tempo di permanenza di 15 secondi per laminati di spessore superiore ad 1mm è stato necessario un tempo di permanenza di 20 secondi. L'apertura dello stampo dopo la formatura deve però avvenire quando la temperatura del laminato è inferiore ai 70°C per evitare distorsioni legate alle tensioni residue. Per ridurre il tempo di permanenza in stampo è possibile impiegare stampi raffreddati.

## 1.4 Tecnologie di infusione

### 1.4.1 Introduzione

La riduzione dei costi di fabbricazione e la richiesta di maggior qualità dei prodotti rappresentano i punti critici per l'applicazione dei materiali compositi nell'industria aeronautica.

Proprio tali punti hanno portato allo sviluppo di nuove tecnologie basate sullo stampaggio con resina liquida.

Con queste tecnologie si fa uso quindi di un rinforzo secco, che deposto sullo stampo deve essere successivamente impregnato con una resina liquida. Le nuove tecnologie sviluppate prevedono sostanzialmente l'impiego di un solo stampo e non del controstampo per la riduzione dei costi rispetto alla classica tecnologia del resin transfer molding.

In campo nautico grande successo hanno riscosso le tecniche di infusione sottovuoto [8], mediante le quali è possibile realizzare elementi di grosse dimensioni adottando un solo stampo sul quale vengono disposti strati di rinforzo secco molto permeabili.

Il controstampo è costituito da un sacco polimerico, dopo la compattazione delle fibre generata con l'applicazione del vuoto tra stampo e sacco si ha l'infusione della resina che sarà curata a temperatura ambiente.

Le tecniche di infusione sotto vuoto furono introdotte nel 1950 per economizzare i processi nella produzione di compositi di dimensioni medio-grandi.

Il metodo Marco [9] fu ideato negli USA per la manifattura delle carene delle barche: tale sistema prevedeva l'utilizzo di uno stampo maschio rigido, sul quale avveniva la deposizione del rinforzo e sul quale avveniva la stesura di uno stampo femmina semiflessibile che occorreva per compattare e sigillare il rinforzo una volta creato il vuoto.

Successivamente, nel 1972, il Group Lotus Car [10] brevettò un metodo per la produzione di componenti per auto in materiale composito.

Il processo consisteva nel disporre le fibre asciutte in uno stampo rigido; prima della chiusura dello stampo veniva versata una quantità di resina sulle fibre la quale penetrava in esse una volta praticato il vuoto.

Nel 1978, Gotch [11] migliorò il metodo dell'impregnazione con il vuoto, usando una parte dello stampo rigida e un'altra costituita da un sacco di gomma di silicone.

La resina liquida era versata sul rinforzo asciutto prima di essere anch'essa ricoperta col sacco.

La qualità dello stampaggio era migliore di quella che si otteneva con la disposizione a mano di fibre e matrice e non richiedeva manodopera specializzata.

Il disegno del sacco elastomerico fu cambiato successivamente con un semistampo rigido, per produrre forme complesse attribuendo comunque i difetti che si riscontravano alla elevata viscosità della resina utilizzata e alla geometria della preforma, che aumentavano il tempo di riempimento e creavano problemi di polimerizzazione.

Nel 1980, Gotch [12-13] accentuò nuovamente il problema di mantenere livelli di vapori di stirene più bassi negli ambienti di lavoro, che già erano imposti nei paesi CEE.

Egli perfezionò ulteriormente il suo metodo del semistampo, costituito dal sacco in silicone, usando il vuoto come la pressione che agisce sulla resina per l'impregnazione e suggerì che la viscosità ideale della resina, per un sistema di iniezione sotto vuoto, era di 100-200 mPa·s.

I sistemi sviluppati commercialmente hanno previsto viscosità simili. Inoltre, Gotch notò che le proprietà dei compositi ottenuti con tale metodologia erano meno variabili rispetto ai valori ottenuti ripetendo esperimenti con il metodo di disposizione a mano.

Nel 1982, Allen [14] considerò l'uso dell'infusione sottovuoto per la produzione di compositi con elevato contenuto di fibre disposte in stampi di alluminio; si dimostrò che, anche sotto basse pressioni come 1 bar, era possibile ottenere compositi avendo utilizzato frazioni volumetriche di tessuto di vetro oscillanti tra il 43% e il 60% e resine vinilestere.

Nello stesso anno, Le Comte [15] brevettò il suo *Metodo e apparato per produrre un articolo sottile di resina sintetica*. Il brevetto ha un disegno simile al metodo Marco: il tessuto di rinforzo è compresso sottovuoto tra una faccia dell'utensile rigida e un'altra flessibile. Il metodo può essere usato per la produzione di carene plastiche di barche rinforzate con fibre di vetro.

Nel 1985, Tengler [16] realizzò, attraverso un processo d'iniezione sottovuoto, dei compositi aventi una elevata resistenza grazie all'utilizzo di fibre di carbonio disposte in uno stampo di alluminio accuratamente chiuso con sigilli di analogo materiale per favorire il vuoto all'interno che a sua volta favoriva il fluire della resina e quindi l'impregnazione.

Non si riuscì ad utilizzare percentuali volumetriche di fibre superiori al 35% a causa della viscosità della resina epossidica e i bassi tempi di solidificazione.

Adams e Roberts [17] utilizzarono invece degli stampi rivestiti al nichel per la produzione di laminati con il metodo Vacuum Assisted Resin Injection.

Questo processo fu sviluppato nel 1970, una volta evacuata l'aria dalla cavità dello stampo, il consolidamento avveniva per la sola pressione atmosferica senza sistemi di serraggio e con conseguente risparmio economico. Fu utilizzato questo metodo per la produzione di pannelli di protezione laterale delle automobili Lotus.

Ciba-Geigy [18] pubblicarono dettagliatamente una loro metodologia di infusione sottovuoto per la manifattura di un alettone di un aliante.

Lo stampo era realizzato da una componente femmina rigida e da una componente maschio flessibile costituito da un sacco di nylon. Praticando il vuoto nella cavità dell'utensile, la resina rifluisce all'interno dello stampo garantendo efficienza e qualità alla produzione, oltre ad una maggiore sicurezza per la salute degli addetti alla lavorazione rispetto alla tradizionale disposizione a mano.

Inoltre, lo stampo femmina era costituito internamente da un circuito nel quale scorreva un olio che fungeva da fluido di riscaldamento o raffreddamento, mentre il sacco, che poteva essere anche di silicone o PVC, veniva sigillato ai bordi comprimendo tutta la sua circonferenza con un telaio di alluminio serrato con degli stringenti. La resina epossidica, di bassa viscosità, entrava nello stampo attraverso un canale periferico ed impregnava la preforma partendo dai bordi verso il foro centrale collegato alla pompa del vuoto, furono prodotti così componenti di buona qualità.

Nel 1989 e 1990, Hayward e Harris [19-20] studiarono gli effetti del vuoto in uno stampo per RTM e constatarono notevoli miglioramenti nella finitura superficiale del laminato e nella sua resistenza flessionale. I benefici erano dovuti, in particolar modo, alla riduzione delle soffiature nel laminato indipendentemente dalla depressione applicata.

Gli autori rilevarono l'importanza di non applicare più il vuoto una volta riempito lo stampo, per evitare la vaporizzazione dello stirene in eccesso, anche se, con un vuoto modesto nel sacco, si riduceva inevitabilmente la pressione di compattazione sul rinforzo.

Boey [21], nel 1990, nel 1991, usarono le tecniche di infusione con sacco sottovuoto per studiare come ridurre la formazione di bolle d'aria nel composito.

Nel campo aeronautico le elevate prestazioni richieste al materiale prevedono l'utilizzo di resine ad alta prestazioni che non curano a temperatura ambiente e che a tale temperatura posseggono delle elevate viscosità che non consentono l'impregnazione del rinforzo.

Generalmente per le strutture aeronautiche sono utilizzate o il processo di RTM con stampo e controstampo riscaldati o il processo in autoclave con impiego di rinforzi preimpregnati.

Tale tipologia di rinforzo però presenta costi d'acquisto e di stoccaggio molto elevati.

Per tale motivo si è sviluppata una nuova tecnologia molto simile al RIFT per il campo aeronautico: il Resin Film Infusion (RFI).

Con questa tecnologia si usano strati di resina filmabile semicurata. Come per il RIFT anche l'RFI prevede l'utilizzo del solo stampo al di sopra del quale sono disposti gli strati del film di resina su di questi quelli di rinforzo, successivamente si dispongono come per il classico processo con preimpregnati gli strati di pellicole forate, assorbente per la resina in eccesso e sacco. Il sacco viene sigillato allo stampo e tra questi viene generato il vuoto prima del ciclo di cura in autoclave.

In fig. 18 si vede uno schema del processo di RFI.

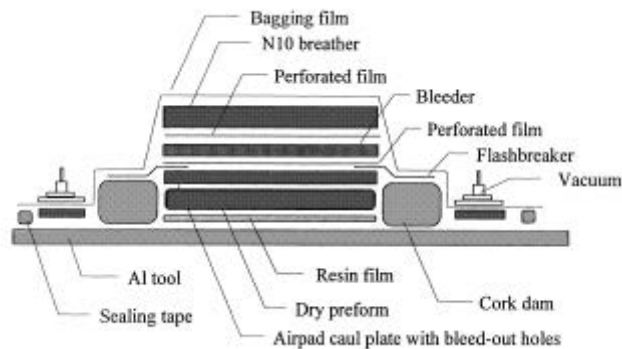


Fig.18 Schema del processo RFI

Durante il ciclo di cura in seguito ai valori di temperatura raggiunta la viscosità della resina diminuisce ed in seguito all'applicazione del vuoto e della pressione la resina si infonde negli strati di rinforzo secco. Naturalmente il ciclo dovrà essere studiato e messo a punto in base alla tipologia dell'elemento da realizzare [22]. Uno dei parametri importanti che influenza la percentuale volumetrica di fibra è rappresentato dalla quantità e dal diametro dei fori della pellicola disposta a diretto contatto con il rinforzo secco. La resina che attraversa il film preforato viene assorbita dal bleeder.

In fig. 19 si riporta uno schema del processo evidenziando il passaggio di resina attraverso il film preforato.

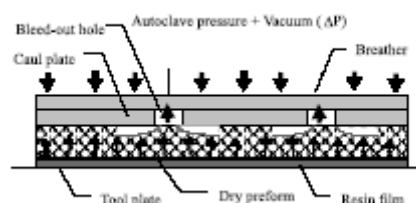


Fig.19 Schema di flusso nel film forato.

Attraverso tali fori fuoriesce la resina in eccesso prima che gelifichi. Una grande quantità di fori e di grosse dimensioni garantisce delle percentuali volumetriche elevate ma una minore qualità della superficie e una maggiore deformazione delle fibre. Quindi di notevole importanza è anche lo studio dei flussi all'interno dei materiali ausiliari oltre che all'interno del rinforzo secco.

La pressione esercitata sugli strati di rinforzo genera una deformazione degli stessi in fase di compattazione; studi sono stati condotti mediante simulazioni agli elementi finiti per la valutazione della deformazione degli strati di rinforzo e per lo studio dell'impregnazione del rinforzo stesso [23].

I punti fondamentali [24] da considerare per lo studio del processo RFI sono:

- 1) Percentuale volumetrica di rinforzo in funzione della pressione di compattazione;
- 2) Permeabilità in funzione della percentuale volumetrica di rinforzo;

3) Viscosità della resina in funzione del tempo e della temperatura.

Lo studio del primo punto porta alla conoscenza delle pressioni da applicare nel ciclo di polimerizzazione per poter ottenere le percentuali di rinforzo che garantiscono le proprietà meccaniche desiderate. Generalmente l'andamento risulta meno che lineare nel senso che superato il valore di percentuale volumetrica di fibra del 60% bisogna applicare elevate pressioni per poter incrementare ulteriormente il volume di rinforzo.

L'aumento di rinforzo se da un lato garantisce migliori proprietà specifiche dell'elemento dall'altro porta ad una riduzione della permeabilità del rinforzo.

Inoltre la tecnologia RFI risulta valida sotto l'aspetto economico per la realizzazione di manufatti in campo aeronautico ed è l'unica utilizzabile con il ciclo di cura in autoclave quando si impiegano preforme di rinforzo secco realizzate con la tecnica dell'automated fibre placement [25]. Questo è un fattore molto importante perché nell'ultimo periodo si è incrementato lo studio delle preforme 3D, queste garantiscono buone proprietà anche in direzione normale al piano di giacitura dei layers. Si ottengono, generalmente, per cucitura strutturale di strati di tessuto. Naturalmente si deve partire da strati di tessuto secco che deve successivamente essere impregnato con tecnologie tipo liquid molding. Tra queste l'RFI presenta dei vantaggi economici rispetto alle altre.

1.4.2 Prove di infusion

Si è tentato, inizialmente, di eseguire una classica infusion come in campo nautico, dove però si utilizzano resine termoindurenti a bassa viscosità. Per portare la matrice in stato fluido si è posto un recipiente metallico contenente pellets di PE in forno a 200° C. Ma la viscosità del polimero risultava troppo alta. Anche aumentando la temperatura a 220°C non si sono ottenuti migliori risultati. Oltre tale temperatura si porterebbe a degradazione la cellulosa e in particolare per il WPC questo processo non sarebbe applicabile.

Si è impiegato un sistema simile alla tecnologia RFI in cui la matrice è presente tra sacco e stampo. Si sono inizialmente disposti pellets di WPC al 40% sullo stampo, ma si è avuta una buona compattazione solo del materiale più vicino allo strato con la formazione di un film che non ha interessato i granuli sovrastanti. Si sono allora realizzati dei film sottili di PE (0.3mm circa) e si sono disposti sullo stampo alternandoli con strati di fibre lunga di canapa. Sullo stratificato si è disposto il sacco che è stato sigillato allo stampo riscaldato a una temperatura di 180°C, mediante resistenze elettriche, secondo lo schema riportato in fig.20.

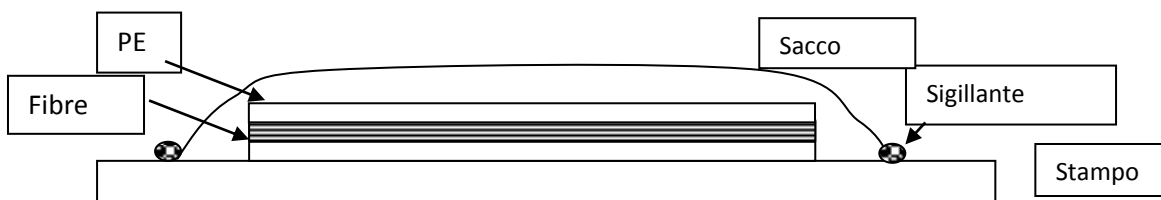


Fig.20 Schema di infusion

Per migliorare la distribuzione di calore negli strati superiori si sono disposte delle lamine metalliche sotto il sacco a diretto contatto con i film superiori di PE. Si sono ottenuti dei laminati piani compatti per spessori fino ad 1mm, oltre tale dimensione gli strati superiori non erano ben compattati. In figura21 si riporta una fotografia della prova realizzata.

Tale tecnologia potrà essere applicata per la realizzazione di laminati con geometrie semplici di grandi dimensioni.

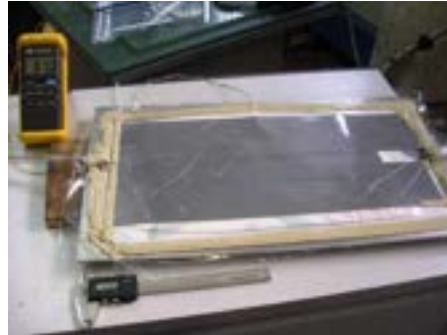


Fig.21 Prova di infusione

## CAPITOLO2

Caratterizzazione meccanica degli elementi realizzati e valutazione della loro riciclabilità

## 2.1 Introduzione

Dopo la fase di produzione mediante tecnologie di formatura è seguita la fase di caratterizzazione meccanica. Questa fase è stata suddivisa in tre linee di ricerca condotte sulle mensole a forma di L realizzate mediante rubber forming. La prima per valutare le proprietà del materiale dopo la formatura.

La seconda per valutare le caratteristiche degli elementi prodotti mediante prove non standard. La terza per verificare la possibilità di riciclare il WPC senza avere perdite di proprietà meccaniche. Per tutte le prove eseguite è stata impiegata una macchina di prove universale tipo MTS Alliance RT50, con cella di carico da 1kN.

## 2.2 Prove di trazione sul materiale formato

Da tutti i laminati formati sono stati tagliati provini con larghezza della sezione resistente di 20mm e spessore pari a quello del pezzo. Sono stati testati 3 provini per ogni tipologia di materiale. In fig.22 si riporta il diagramma delle prove eseguite con il confronto tra i diversi materiali.

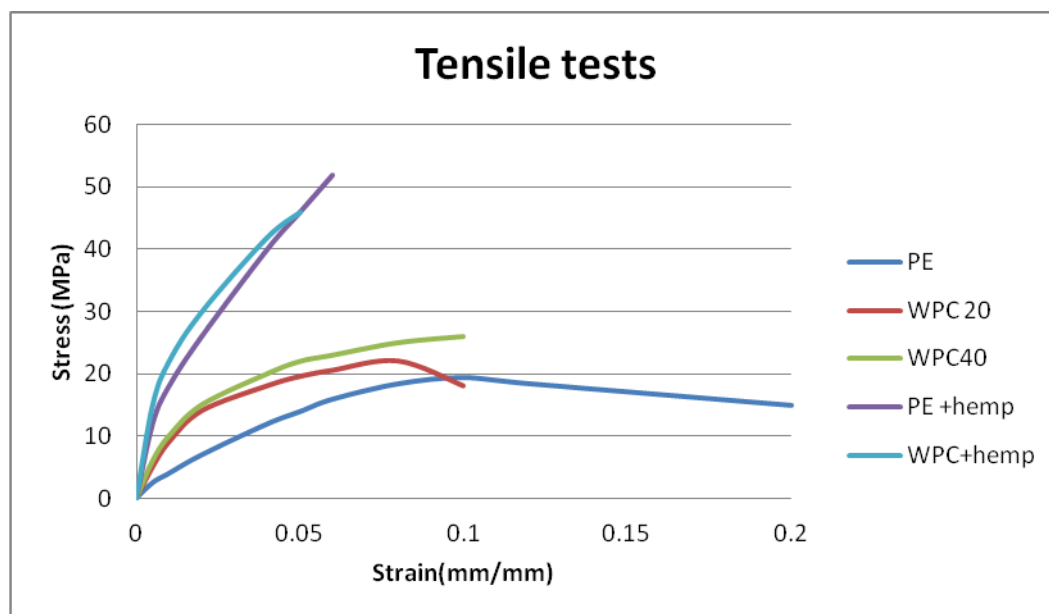


Fig.22 Curve  $\sigma$ - $\epsilon$  della prova di trazione

In tabella2 si riportano i valori medi della massima sollecitazione e del modulo di elasticità rilevati dalle prove di trazione.

Materiale	Massima sollecitazione (MPa)	Modulo di elasticità (GPa)
PE	18.1	0.6
WPC 20%	21.7	1.2
WPC 40%	26.8	1.4
PE+hemp	46.3	3.1
WPC 20%+20%Hemp	43.7	3.6
WPC 40%+15%hemp	40.8	3.8

Tabella 2 Proprietà a trazione dei materiali formati

Dai risultati si può notare come il rinforzo naturale incrementi nettamente le proprietà del polietilene. Maggiore è la percentuale di rinforzo migliori sono le proprietà. Naturalmente le fibre lunghe di canapa fanno incrementare notevolmente sia il modulo che la resistenza dei laminati. Le migliori proprietà di resistenza si sono registrate per il solo polietilene rinforzato con il 20% di canapa, mentre il WPC rinforzato con le fibre lunghe di canapa ha un miglior modulo, ma una resistenza a rottura che risulta, probabilmente, influenzata dall'interferenza tra fibre lunghe e fibre corte.

### 2.3 Prove condotte sui prodotti realizzati

Per testare direttamente le mensole realizzate mediante rubber forming, è stata utilizzata una prova non standard il cui schema è riportato in figura 23. Sono state testate le mensole con spessore pari ad 1.5 mm.

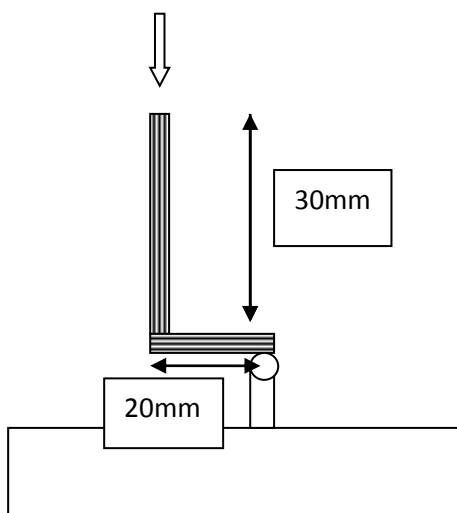


Fig.23 Scema di prova delle mensole.

In figura24 si riporta la fotografia della prova eseguita.



Fig.24 fotografia della prova sull'elemento stampato

I risultati della prova sono riportati nel grafico di fig25. Da tale grafico si può notare le differenti rigidità per i diversi materiali e in particolare come le mensole con rinforzo lungo di canapa risultino essere più rigide.

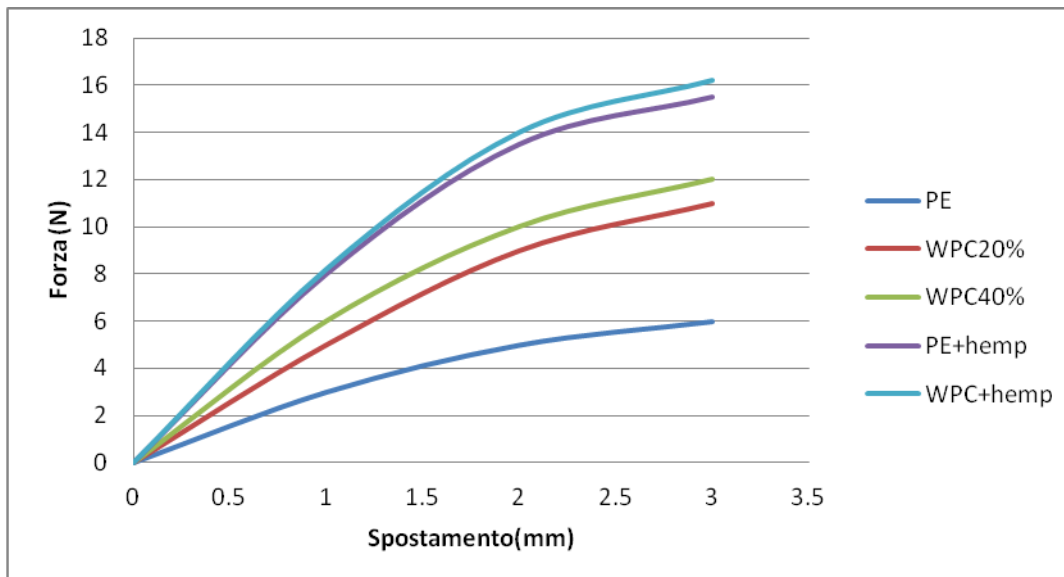


Fig. 25 Curve carico spostamento ricavate da prove sulle mensole

## 2.4 Prove condotte su prodotti di riciclo

Infine sono state condotte prove per valutare la riciclabilità dei prodotti. Per quest'ultima tipologia di prova sono stati utilizzati i pannelli in WPC al 40%. Dopo aver formato la prima mensola, questa è stata tagliata in pezzi di area di circa 4cm<sup>2</sup>, che sono stati successivamente pressati nella pressa a piani caldi per realizzare i laminati piani da formare con il processo di rubber formig. Si è ripetuto per tre volte il procedimento e successivamente da provini ricavati dall'ultima mensola sono stati realizzati i test meccanici di trazione. Dai risultati delle prove non si è notato una variazione delle proprietà meccaniche(figura26 ).

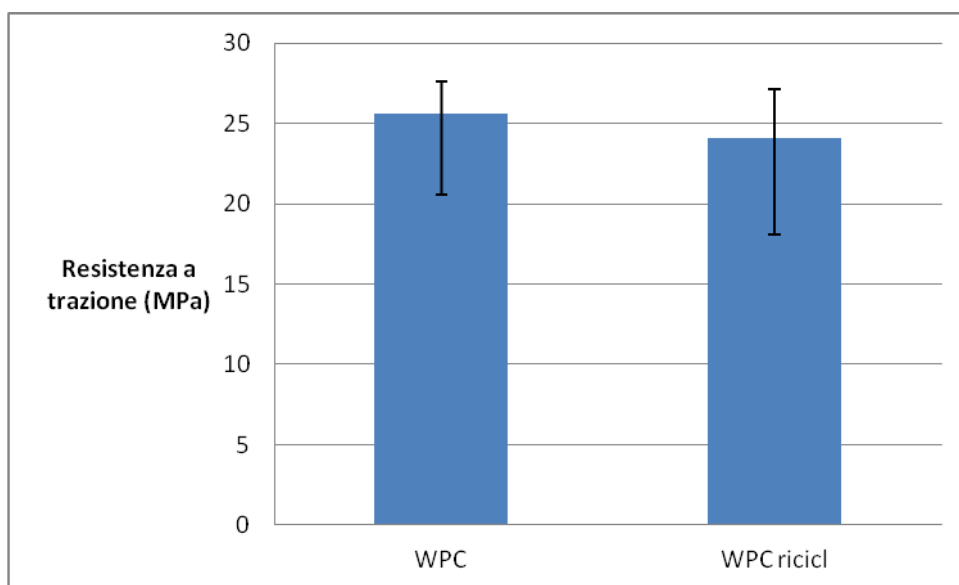


Fig.26 Resistenza a trazione con indicatori del minimo e massimo

Dal grafico si nota che sia i valori medi che l'intervallo totale tra il minimo e massimo valore per le due classi di materiale sono molto simili e quindi si può dedurre che le operazioni di formatura e quelle di riciclaggio non comportano un decadimento delle proprietà meccaniche del materiale. Dall'analisi visiva è però risultato un notevole cambio di colore del materiale che si presentava molto imbrunito in seguito alla permanenza in forno (figura 27).



Fig. 27 Fotografia di un elemento con materiale di partenza (sinistra) ed elemento con materiale riciclato(destra)

## Conclusioni

Il lavoro di ricerca si è concentrato principalmente sull'applicazione di tecnologie con stampo rigido e controstampo flessibile a materiali compositi a matrice termoplastica con fibre naturali.

In particolare sono state impiegate due tecnologie il rubber forming e il resin film infusion.

Come materiali di partenza sono stati usati film di PE, WPC e fibre di canapa.

Per il rubber forming a partire da uno stampo metallico è stato realizzato un controstampo in silicone con colata diretta sullo stampo rigido. E' stato messo a punto un ciclo di stampaggio di laminati in composito con permanenza in forno di circa 10 secondi e permanenza in stampo di circa un minuto con stampo raffreddato. La pressione di stampaggio è stata molto bassa inferiore a 0.1 bar, che dovrebbe garantire una ridotta usura del controstampo; in particolare sono state in totale eseguite più di 50 stampate e non si sono notati danneggiamenti sul controstampo.

Sono state realizzate delle mensole a forma di L e sono state misurate le proprietà geometriche delle stesse ed in particolare la riduzione dello spessore nella zona di piegatura.

La tecnologia ha consentito di formare senza difficoltà anche i laminati con fibre lunghe.

Maggiori difficoltà sono state incontrate nell'applicazione di tecnologie di infusione; è stato comunque messo a punto un processo di resin film infusion per film di PE e fibre lunghe di canapa. Tale processo prevede uno stampo rigido riscaldato ed un film polimerico come controstampo. Sono stati realizzati laminati con spessore ridotto (1mm) a causa della scarsa conducibilità termica dei materiali.

Dai pezzi formati sono stati ricavati provini per valutare le proprietà dei materiali dopo formatura.

Sono state eseguite prove di trazione che hanno messo in evidenza l'incremento di proprietà legato alla presenza del rinforzo ed in particolare di fibre lunghe di canapa; si sono triplicati i valori di proprietà meccaniche del polietilene.

Sono state eseguite prove non standard sugli elementi stampati; anche queste prove hanno messo in risalto l'ottimo comportamento del polietilene rinforzato ed in particolare di quello con fibre lunghe.

Sono stati realizzati elementi stampati con materiale riciclato per tre volte e sono state eseguite prove di trazione sul materiale di tali elementi. Tali prove non hanno messo in evidenza particolari cambiamenti nel comportamento meccanico del materiale.

In conclusione si può dedurre che le operazioni di formatura e quelle di riciclaggio non comportano un decadimento delle proprietà meccaniche del materiale.

## Riferimenti bibliografici

- [1] H.A. Al Qureshi Analysis of simultaneous sheet metal forming operations using elastomer technique, *Journal of Materials Processing technology* 125-126 (2002) 751-755.
- [2] P.J. Mossedale, The use of avothane for sheet metal forming, *J. Sheet Metal Industries*, April (1965), 257-267.
- [3] Ming-Wang Fu, Si Quang Lu, Mao Heng Huang, A new technology of sheet metal flexible die forming using a viscoplastic pressure carrying medium, *Journal of Materials Processing Technology* 52 (1995) 359-367.
- [4] J.W. Lee a, H.C. Kwon b, M.H. Rheec, Y.T. Imb, Determination of forming limit of a structural aluminum tube in rubber pad bending *Journal of Materials Processing Technology* 140 (2003) 487-493
- [5] Ming-Wang Fu, Si Quang Lu, Mao -Heng Huang, High precision sheet metal workpieces manufactured by flexible-die forming using a viscoplastic pressure carrying medium, *Journal of Materials Processing Technology* 62 (1996) 70-75.
- [6] Jorge Diaz, Luis Rubio Developments to manufacture structural aeronautical parts in carbon fibre reinforced thermoplastic materials, *Journal of Materials Processing Technology* 143-144 (2003) 342-346
- [7] Pratapkumar Nagarajan Æ Donggang Yao Rubber-assisted micro forming of polymer thin films *Microsyst Technol* (2009) 15:251-257 DOI 10.1007/s00542-008-0680-6
- [8] V. Antonelli, D. Decoster, R. Marissen, A. Beukers, Improvements in the Pressure Distribution during the Forming of Thermoplastic Composites *Int. J. Mater. Form.* (2008) Suppl 1:819-822
- [8] Resin infusion under flexible tooling: a review, C. Williams, J. Summerscales and S. Groove, *Composites Part A* 27A (1996) 517-524.
- [9] Marco Method, US Patent No. 24956240, 24 January 1950
- [10] Group Lotus Cae Ltd. "Vacuum Moulding Patent" GB Patent No.1432333, 30 March 1972
- [11] Gotch, T.M. "Improved Production Process For Manufacture of GRP on British Rail", *Reinforced Plastics Conference*, BPF RPG, Brighton, November 1980, Paper 7, pp2531
- [12] Gotch, T.M. "Development and Potential of Vacuum Impregnation Techniques for GPR Manufacture", I 2th *Reinforced Plastics Congress*, BTF RPG, Brighton November 1980 Paper 7, pp 25-31
- [13] Gotch, T.M. "Low Investment Alternatives to Hand Lay GRP Production". *Hands Off GRP 11 Conf.*, *Plastics and Rubber Institute*, May 1985 pp. 1/1-1/11
- [14] Allen, R., Best P.F. and Short, D. "Vacuum Injection Moulding of High Volume Fraction Fiber Composites", I 3th *Reinforced Plastics Congress*, BPF RPG Brighton November 1982, Paper 49 pp207-209
- [15] Le Comte, A. "Method and apparatus for producing a thin waile article of syntetic resin, in particular a large size veicle", US Patent No. 4359437, 16 November 1982
- [16] Tengier, H. Vakuum-Injektionsverfahren, 1. *Kunststoffe* 1985, 75(2), 73-72
- [17] Adams, A.A. and Roberts, J.H. "A General Outline of the Main Characteristics and Prime Uses of Vacuum Injection Moulding System", *Conf. Plastics and Rubber Institute* , May 19, pp 5/1-5/3
- [18] Ciba-Geigy, Publication, Vacuum Injection Process Ciba -Geigy Aileron Publication No.28626/d,f, e 880 729/40 (Printed Switzerland)
- [19] Hayward, J.S. and Harris, B. Processing factors affecting the quality of resin transfer moulded composites, *Plastics & Rubber Processing & Applications*, 1989, 11(4), 191-198
- [20] Hayward, J.S and Harris, B. The effect of the vacuum assistance in resin transfer moulding, *Composites Manufacturing* 1990, 1(3), 161-166.
- [21] Boey, F.Y.C. Reducing the void content and its variability in polimeric fiber reinforced composites test specimen using a vacuum injection moulding process, *Polymer Testing* 1990 , 9, 363-377.
- [22] B. Qi, J. Raju, T. Kruckenberg, R. Stanning, A resin film infusion process for manufacture of advanced composite structures, *Composite structures* 47 (1999) 471-476.
- [23] Joohyuk Park, Moon Koo Kang, A numerical simulation of the resin film infusion process, *Composite structures* 60 (2003) 431-437.

[24] N.L. Han, S.S. Suh, J.M. Yang, H.T. Hahn, Resin film infusion of stitched stiffened composite panels, Composites Part A 34 (2003) 227-236.

[25] J. Hinrichsen, C. Bautista, The challenge of reducing both airframe weight and manufacturing cost, Air & Space Europe, vol.3, n3/4- 2001.

## Abbreviazioni ed acronimi

WPC	wood polymer composite
WPC 20%	wood polymer composite con20% in peso di carica
WPC 40%	wood polymer composite con40% in peso di carica
PE	polietilene
RFI	resin film infusion

## Curriculum del gruppo di lavoro

Il gruppo di ricerca del DIMP- Università di Napoli Federico II si occupa prevalentemente di sviluppo di materiali innovativi e messa a punto di tecnologie innovative. In particolare le principali tematiche studiate riguardano: materiali compositi a matrice polimerica rinforzati con fibre di vetro, di carbonio e fibre naturali; caratterizzazione di strutture sandwich con core in schiuma metallica; ottimizzazione dei processi di super plastic forming ed incremental forming per la lavorazione di lamiera metalliche; tecnologie di produzione di tipo transfer ed infusion di materiali compositi a matrice polimerica; simulazione agli elementi finiti di lavorazioni per deformazione plastica.

Per lo sviluppo delle attività si fa utilizzo dei seguenti laboratori:

- Laboratorio di processo di materiali polimerici e compositi;
- Laboratorio di caratterizzazione meccanica;
- Laboratorio di simulazione numerica per la caratterizzazione, lavorazione e progettazione dei materiali.
- Laboratorio di microscopia ottica ed elettronica.
- Laboratorio con centro di lavoro a 5 assi.