MANUALE BASICO SUI MATERIALI COMPOSITI

di Emiliano Benvenuti

Per principianti e autocostruttori

Prima Edizione

Guida pratica e vademecum alle conoscenze di base sul mondo dei materiali compositi ed alla realizzazione di manufatti in fibra di vetro,carbonio e aramidica

Copyright

Titolo del libro: MANUALE BASICO SUI MATERIALI COMPOSITI
Autore: Emiliano Benvenuti
© 19/02/17, Emiliano Benvenuti
Prima Edizione
Revisione 1.0.0
info@skyscooter.it
http://www.skyscooter.it/manuale-compositi

TUTTI I DIRITTI RISERVATI. La riproduzione, anche parziale e con qualsiasi mezzo, non è consentita senza la preventiva autorizzazione scritta dell'Autore

PREFAZIONE

Ho deciso di scrivere questo manuale con lo scopo di permettere a tutte le persone che non hanno particolari conoscenze tecniche e pratiche, di apprendere ed eventualmente mettere in pratica, le nozioni di base sulle lavorazioni dei materiali compositi, sviluppando così la capacità di realizzare manufatti in composito. Tale manuale, può anche svolgere il ruolo di testo ABC del settore.

Il manuale non si offre come prodotto da utilizzare per la progettazione e calcolo avanzato dei compositi, ma si rivolge invece a tutti gli appassionati di tecnica, in particolare agli auto-costruttori di velivoli ultraleggeri, aeromodellisti, modellisti, al settore nautico e artistico, a chi realizza particolari per la propria auto, moto, agli studenti delle scuole superiori ed a tutti gli "smanettoni" che amano auto-costruire manufatti sfruttando questa formidabile tecnologia. Adatto quindi a tutti gli appassionati di tecnologia ed amanti del fai da te.

Tutte le informazioni che troverete non sono state scritte da un professionista del settore, bensì da un autodidatta, che riporta la propria esperienza pratica e teorica cumulata in vari decenni di passione per questa tecnologia.

Lo scopo del manuale, è anche di colmare il gap presente in questo settore,sia a livello di letteratura tecnica, che pratica. Infatti troverete in commercio innumerevoli manuali in lingua inglese, la maggior parte statunitensi, ma ben poco in letteratura italiana.

Lo stile con cui è stato redatto risulta piuttosto semplice e non troppo ingegneristico, infatti spesso per definire dei concetti sono citati esempi pratici della vita comune, il tutto è corredato da semplici disegni, illustrazioni e tabelle.

La maggior parte delle illustrazioni sono state realizzate personalmente, sia con il computer, che a mano libera.

Il presente manuale è stato redatto nativamente in formato elettronico, per consentirne la lettura con un PC e con la maggior parte di lettori ebook, tablets, smartphones.

Di seguito, quando si parla di materiali compositi, ci riferiremo a matrici con rinforzo in fibra di vetro, carbonio e aramidico, tralasciando le altre tipologie esistenti.

I primi capitoli hanno una funzione introduttiva, con le nozioni più elementari, quelli centrali sono più tecnici, trattano quindi i materiali ed i processi previsti, quelli finali riguardano le realizzazioni pratiche. Per molti quest'ultimi risulteranno la parte più interessante del manuale.
Infine, troverete un glossario tecnico italiano/inglese, che tratta la terminologia del settore ed un appendice con varie informazioni e tabelle, di carattere generale.
Chi decide di scrivere un manuale tecnico o un libro di qualsiasi genere, si ispira sempre ad un personaggio e lo utilizza come riferimento e mentore. Nel mio caso considero come tale Burt Rutan, un grande ingegnere aeronautico e scienziato, ma prima di tutto un visionario e appassionato di macchine volanti.
I suoi concetti e metodi relativi ai materiali compositi sono stati sviluppati a metà degli anni Settanta ed ancora oggi sono in gran parte utilizzati ed emulati da tante persone e aziende del settore.

Buona lettura a tutti e Buone laminazioni !

"Il marmo è come l'uomo, prima di intraprendere qualcosa, devi conoscerlo bene e sapere tutto ciò che ha dentro. Così, se in te ci sono delle bolle d'aria, io stò sciupando il mio tempo. (Cit.)"

Michelangelo Buonarroti

DICHIARAZIONE DI NON ASSUNZIONE DI RESPONSABILITA'

Le informazioni presenti nel manuale sono costituite da elaborazioni autonome dell'autore, riferimenti e contributi forniti da terze parti.
Le sopracitate informazioni possono contenere imprecisioni tecniche e/o errori e tutto quanto appare nel manuale viene fornito senza garanzie di alcun tipo, implicite o esplicite.

L'Autore del manuale non presta alcuna garanzia sull'accuratezza del contenuto dello stesso. Non si assume alcuna responsabilità diretta ed indiretta per eventuali danni provocati dall'uso delle informazioni fornite.

L'Autore non può, in nessun caso, essere ritenuto responsabile per i danni o le perdite di qualsiasi natura che l'Utente assuma di aver subito per l'uso delle informazioni contenute in questo manuale.

Ogni abuso verrà perseguito civilmente e penalmente nelle sedi giudiziarie competenti.

Pagina Lasciata Intenzionalmente Vuota

AUTORE

Emiliano Benvenuti, classe 1974:
Nella vita quotidiana mi occupo da sempre di tecnologia, infatti lavoro nel campo della progettazione elettronica industriale da vari anni e per vari settori di applicazione.
La mia professione prevede oltre alla progettazione e lo sviluppo di apparecchiature elettroniche, di realizzare anche guide e manuali utente dedicati.
Sono grande appassionato del settore aeronautico, pilota ed auto-costruttore di velivoli ultraleggeri e di tutto il mondo dell'alta tecnologia, in precedenza ho praticato anche aeromodellismo.
Proprio l'esperienza e il progetto di auto-costruzione di un velivolo ultraleggero, mi ha permesso di cumulare un importante bagaglio di esperienza del settore dei compositi.
Lo studio e la realizzazione di parti per il progetto sopracitato mi ha spinto verso la stesura di questo manuale.
Fin da piccolo mi è sempre piaciuto inventare e creare cose utilizzando fantasia.
Nel tempo libero mi piace mantenermi in forma fisica, viaggiare, conoscere il mondo e leggere libri.
Adoro il mare e tutte le sue sfumature.

Pagina Lasciata Intenzionalmente Vuota

SOMMARIO

INTRODUZIONE....13
LE NOZIONI DI BASE....15
Cosa si intende per materiale composito?....15
Perché e dove si utilizzano....16
Settore aeronautico e aerospaziale....18
Competizioni Motoristiche....19
Autovetture di alto livello(Top Car)....20
Settore Nautico....20
Settore Elettronico....21
Caschi protettivi(moto,auto, aereo)....23
Giubbotti antiproiettile....24
Generatori eolici....24
Attrezzature per Attività Sportive e Ricreative....25
Biciclette....25
Mazze da Golf....25
Aeromodelli ed Elicotteri Radiocomandati....26
Canne da pesca....26
Tavole da surf....27
Canoe e Kayak....28
Sci e Tavole da SnowBoard....29
Strumenti Musicali....30
Come si realizzano i manufatti....31
CENNI DI MECCANICA DEI MATERIALI....33
Principi di base dei materiali....33
Concetto di Resistenza....33
Concetto di Rigidità....33
Concetto di Deformazione e legge di Hooke....35
Modulo di Elasticità (Modulo di Young)....36
Le Sollecitazioni Principali....37
Comparazione dei Materiali sotto carico....38
LE FIBRE DI RINFORZO....39
Panoramica....39
La Fibra di Vetro....40
La Fibra di Carbonio....42
La Fibra Aramidica(Kevlar® e Twaron®)....45
Le Trame dei rinforzi in fibra....48
Tessuti ibridi....51
Tessuti in poliestere....52
Nastri in Tessuto....52
I Preimpregnati(Prepreg)....52
Tabelle caratteristiche e comparative....55
Tabella comparativa caratteristiche principali delle fibre di rinforzo:....55
Tabella comparativa tra le trame delle fibre di rinforzo:....56
RESINE ED ADESIVI....57
Introduzione....57

Resine Epossidiche....59
Resina Epossidica Biologica....61
Resine Poliestere....62
Resine Vinilesteri 64
Adesivi strutturali....65
Adesivi a spruzzo....67
Il Gelcoat....67
Tabelle comparative matrici in resina....68
Tabella comparativa caratteristiche principali delle matrici in resina:....68
MATERIALI PER ANIME....71
Introduzione....71
Polistirene espanso ed estruso....71
Poliuretano espanso....72
PVC espanso....73
PET espanso....73
Alveolari....74
Legno di Balsa....75
ADDENSANTI E RIEMPITIVI....77
Le Microsfere....77
Fibre di cotone....79
Microfibre di Vetro....79
Paste coloranti....80
Gli Stucchi....80
PRODOTTI E TESSUTI DISTACCANTI....81
Introduzione....81
Alcool polivinilico(PVA)....81
Cera distaccante....82
Prodotti Alternativi....82
Film Distaccanti....83
Peel ply....84
LAMINATI E STRUTTURE....85
Definizione....85
Le tipologie....86
Laminato o Stratificato Semplice....86
Laminato sandwich....87
Rules of Mixtures....91
La formazione delle criccature sul laminato....92
Resistenza alla fatica dei laminati....93
Degrado del laminato per immersione in acqua....93
Fenomeni di Osmosi....94
CONCETTI DI GIUNZIONE E SISTEMI DI FISSAGGIO....95
Metodi di incollaggio e giunzioni adesive....95
Accoppiamento tra materiali diversi(Stress Termico)....101
Sistemi di fissaggio e ancoraggio....103
Incollaggio dei Perni e Collari Filettati....104
Installazione e Forature per Bulloni e Ancoraggi....106
PROCESSI E METODI DI LAVORAZIONE....109
Panoramica....109

Laminazione manuale(Hand Lay-Up)....110
Laminazione manuale su schiume(Hand Lay-Up Over Foam)....111
Laminazione con sacco a vuoto(Vacuum bag processing)....113
Laminazione in autoclave(Autoclave processing)....117
Laminazione per infusione RTM....120
Laminazione per infusione VARTM(Vacuum Assisted Resin Tranfer Moulding)....122
Laminazione Spray(Spray Lay Up)....124
Laminazione per Avvolgimento del Filamento (Filament winding)....126
Laminazione per Trazione (Pull-Trusion)....128
REALIZZAZIONE DEGLI STAMPI E FINITURA MANUFATTI....131
Introduzione....131
La realizzazione degli stampi....132
Stampaggio di parti piatte....133
Stampaggio di parti a curvatura semplice....136
Creazione di stampi maschio e femmina....137
Stampo Maschio....138
Stampo Femmina....141
Finitura dei manufatti....148
Stuccatura....148
Verniciatura....149
PROGETTAZIONE E CALCOLI DI BASE....151
Introduzione....151
Calcolo delle quantità dei materiali necessari alla laminazione....151
Stima della quantità di resina richiesta per realizzare un laminato....151
Stima della quantità di Gelcoat richiesta per una superficie....152
Stima delle proporzioni e dimensioni del laminato....152
Calcolo rapporto fibre per volume con densità dei materiali note....152
Calcolo rapporto fibre per volume noto il volume del tessuto di rinforzo....153
Calcolo rapporto fibre per peso noto il rapporto fibre per volume del tessuto di rinforzo...153
Calcolo spessore del laminato note le masse dello stesso....153
VERIFICHE DEI LAMINATI....155
Introduzione....155
Difetti di Laminazione dovuti al Processo Produttivo....155
Prove non distruttive....156
Ispezioni visive....156
Prova del tocco....156
Ultrasuoni....156
Tomografia computerizzata....157
Termografia....157
Radiografia....158
Prove distruttive....158
Prove meccaniche....158
REALIZZAZIONI PRATICHE....161
Consigli generali....162
Attrezzatura e utensili di base....164
Attrezzatura e utensili avanzati....167
Dispositivi di sicurezza e protezione....171
Lo stoccaggio dei tessuti di rinforzo e degli ausiliari di processo....172

Impianto per laminazione sottovuoto con pompa....174
Tutorial 1 - Realizzazione di uno Stratificato Semplice....176
Tutorial 2 - Lavorare con il polistirene....182
Tutorial 3 - La stuccatura con microsfere in vetro....188
Tutorial 4 - Tagliare e forare i manufatti composito....190
Tutorial 5 - Laminato a Sandwich tramite Sottovuoto....197
Tutorial 6 - Preimpregnato fatto in casa....203
Tutorial 7 - Realizzazione di uno Stampo Femmina....208
Tutorial 8 - La riparazione di un laminato....216
Tutorial 9 - Come discriminare il finto carbonio da quello vero....222
Tutorial 10 - La vetronite per circuiti stampati....224
ESEMPI DI APPLICAZIONE....225
CONCLUSIONI....231
APPENDICE....233
Glossario e nomenclatura....233
Caratteristiche Tipiche dei Tessuti di rinforzo....236
Caratteristiche Tipiche delle Matrici in Resina....237
Tabelle di conversione unità di misura....238
Tabella stima quantità di resina per laminazione manuale....241
Tabella prodotti chimici....242
BIBLIOGRAFIA E RIFERIMENTI....243

INTRODUZIONE

L'impiego dei materiali compositi nel settore industriale e non, oramai ha assunto un'importanza rilevante.
In alcuni settori, come vedremo in seguito, ha sostituito quasi totalmente i materiali metallici, plastici e lignei.
L'utilizzo di tali materiali necessita diverse valutazioni tecniche ed economiche, infatti a differenza dei metalli o altri materiali tradizionali, richiedono l'utilizzo di processi e metodologie, che anche se applicati su scala industriale e produttiva, risultano avere tempi e costi di realizzazione importanti.
A livello di auto-costruzione, attualmente esiste la possibilità di acquistare materiali e attrezzature, a costi accessibili a tutti, tale opzione era pressochè inesistente fino a 10-20 anni fa.
Esistono numerosi negozi specializzati sul web e non, consentendo a tutti di acquistare, anche in piccole quantità, i materiali necessari per le proprie realizzazioni.
Inoltre la nascita di negozi di bricolage di dimensioni importanti, presenti nei centri commerciali più blasonati, consente di reperire attrezzature, utensili e materiali di base, facilmente ed a basso costo. Anche questa opzione non era disponibile fino ad alcuni anni fa.
Spesso in questo settore si utilizza il termine laminazione, laminato etc, con il termine laminazione si intende il processo di realizzazione del manufatto in materiale composito in modo generico.
Mentre quando si parla in generale di laminato in composito, ci si riferisce a un manufatto in composito.
Un altra caratteristica importate che va definita quando si trattano i materiali compositi è il concetto di anisotropia(opposto di isotropia). Ovvero la proprietà per la quale un determinato materiale ha caratteristiche che dipendono dalla direzione lungo la quale vengono considerate. Come esempio, il legno è un materiale anisotropo in quanto le sue caratteristiche meccaniche e variazioni dimensionali variano a seconda della direzione in cui lo si considera, quindi rispetto a come sono allineate le fibre lignee.
Il concetto opposto è l'isotropia, ovvero la proprietà dei corpi di avere le stesse caratteristiche fisiche in tutte le direzioni. Come esempio di materiali con struttura pressoché isotropa, possiamo considerare in generale i

metalli.
Tutti i manufatti in materiale composito vanno considerati anisotropi, come vedremo in seguito tale proprietà sarà caratterizzata da come verranno orientate le fibre del tessuto di rinforzo.

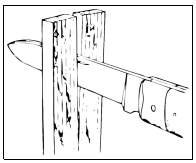
LE NOZIONI DI BASE

La storia narra che i primi popoli ad applicare il concetto di materiale composito furono gli antichi Egizi, realizzando dei mattoni mescolando paglia e argilla ed impiegandoli nelle loro costruzioni. Crearono così, un manufatto più resistente meccanicamente del mattone semplice in pura argilla e sabbia, inoltre garantiva una maggior resistenza alle intemperie e durata nel tempo.
Di seguito tratteremo solo i materiali compositi a matrice, con rinforzo in fibra di vetro, carbonio e aramidico, tralasceremo quindi le altre tipologie.

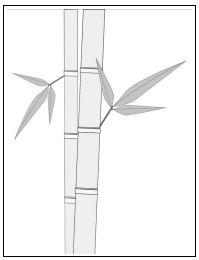
Cosa si intende per materiale composito?

Sono così definiti, i materiali ottenuti mediante la stretta coesione di almeno due componenti, le cui caratteristiche fisiche e chimiche, sono tali da renderli diversi e reciprocamente insolubili e quindi separati tra loro.
Tali materiali vengono chiamati, uno fibra o tessuto di rinforzo, l'altro matrice.
L'unione di due o più costituenti di questo tipo, deve necessariamente dare luogo ad un materiale solido continuo, che sia in grado di trasmettere e ridistribuire gli sforzi interni dovuti alle sollecitazioni esterne sui suoi componenti.
Esso inoltre deve essere in grado di resistere anche a carichi termici se sottoposto a differenze di temperatura, ed a quelli elettrici, quando sottoposto a campi elettrici.
Anche le leghe metalliche tradizionali rispondono a tali requisiti, ma non vanno considerati come appartenenti alla famiglia dei compositi. Infatti gli elementi costituenti quest'ultimi sono distinguibili solo su scala atomica cristallina, ovvero per dimensioni paragonabili alle frazioni di micron.
Mentre nei compositi i costituenti sono distinguibili con scale dell'ordine dei decimi o centesimi di millimetro.
La matrice caratterizza il tipo di composito, il quale può essere plastico, metallico, o ceramico.
Le fibre di rinforzo possono invece essere di tipo plastico, metallico, vetroso e ceramico. Tali fibre possono essere suddivise i varie tipologie: continue, discontinue, con orientamento casuale o con una direzione

predominante.
Tutti noi conosciamo il legno, esso è considerato come il materiale composito naturale per eccellenza e risulta costituito principalmente da cellulosa e lignina. Ecco quindi il primo esempio di materiale composito.
Il legno naturale viene impiegato in innumerevoli applicazioni ed utilizzato anche per creare a sua volta, altri materiali compositi, come ad esempio il compensato,i laminati truciolari e tanti altri.



La maggior parte di noi è già a conoscenza del fatto che il legno, ha delle caratteristiche meccaniche che dipendono da come viene applicato il carico rispetto all'orientamento delle sue fibre, in generale il legno naturale ha una fibra con orientamento unidirezionale, caratteristiche che tratteremo successivamente.



Un esempio classico di legno molto robusto è il bambù, Infatti è di gran lunga più resistente di qualsiasi essenza vegetale e più leggero del cemento armato e dell'acciaio.

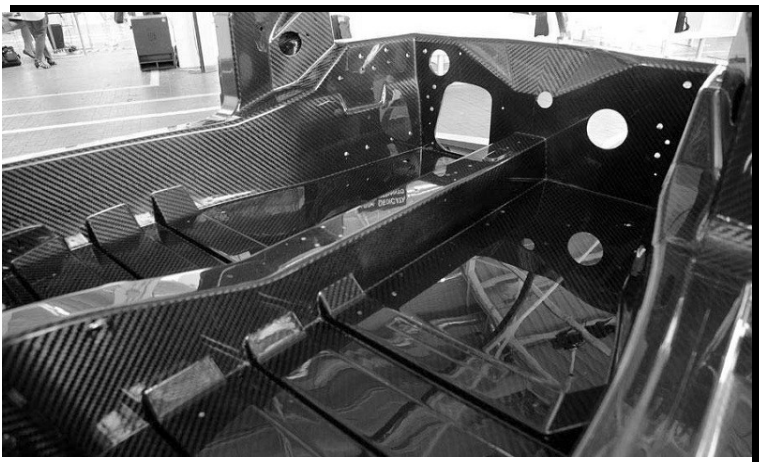
Perché e dove si utilizzano

Sicuramente il settore aeronautico e quello aerospaziale, sono da considerarsi come i settori di riferimento, ed all'avanguardia per quanto riguarda l'impiego dei materiali compositi.
Come è facile intuire, la leggerezza dei compositi e la possibilità di realizzare forme aerodinamiche complesse ha consentito di realizzare, e sostituire particolari metallici strutturali e non, sia su velivoli ad ala fissa che ad ala rotante.
Consentendo così un risparmio di peso e dimensioni, non ottenibili con altre tecnologie esistenti.
In generale vengono utilizzati quando è richiesto il contenimento delle masse di una struttura o di più particolari, pur mantenendo un elevata integrità strutturale, nonché la possibilità di realizzare particolari molto

integrati e di dimensioni ridotte.
Queste sono i principali vantaggi dei materiali compositi:

- Leggerezza
- Resistenza
- Rigidezza
- Comportamento a Fatica
- Resistenza alla Corrosione
- Resistenza all'Usura
- Attrattivi(dal punto di vista estetico)

Ovviamente, non tutte queste caratteristiche potranno essere ottenute allo stesso tempo e quasi mai ciò e richiesto. Infatti, in fase di progettazione, verrà analizzato e trovato il giusto compromesso, al fine di sfruttare al meglio tali proprietà per l'applicazione richiesta.



Chassis Alfa Romeo 4C(Foto fonte Google)

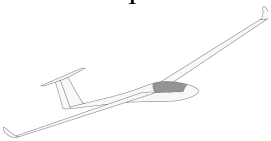
Come già preannunciato questi requisiti e compromessi si traducono in un costo di realizzazione più elevato, se paragonato ad altri metodi costruttivi più tradizionali.

Di seguito vedremo un elenco riassuntivo dei settori principali che fanno impiego di materiali compositi.

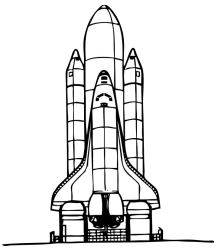
Settore aeronautico e aerospaziale

Trovano largo impiego nel settore aeronautico, sia su particolari strutturali, che non, in velivoli ad ala fissa ed ad ala rotante. Infatti vengono realizzate in materiale composito fusoliere, strutture alari, appendici aerodinamiche, serbatoi, pannellature interne ed esterne, eliche, pale rotore e tanti altri particolari.

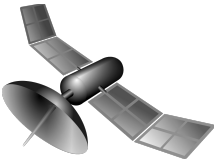
Per le parti strutturali si fa largo utilizzo di tessuti in fibra di carbonio, le eccellenti caratteristiche meccaniche, unite ad un ottima leggerezza, ne fanno il il materiale principe per questo settore.
Il rovescio della medaglia è l'elevato costo del materiale e del processo produttivo necessario per mantenere degli elevati standard qualitativi richiesti.



Dal punto di vista dell'innovazione il settore aerospaziale è forse più importante di quello aeronautico. Anche qui l'esigenza del contenimento delle masse è molto sentito.

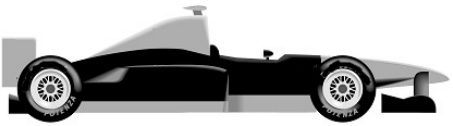


Sono utilizzati nella realizzazione dei lanciatori spaziali e nei satelliti.
Trovano largo impiego sia la fibra di carbonio che quella di vetro.
Con la fibra di vetro vengono realizzate, ad esempio, pannellature di isolamento termico, antenne paraboliche. Mentre con il carbonio si realizzano buona parte dei componenti strutturali.



Tuttavia ad ora non esistono materiali con caratteristiche migliori per tali applicazioni.

Competizioni Motoristiche



Le autovetture di Formula Uno hanno un telaio monoscocca realizzato totalmente in materiale composito.

Anche le appendici aerodinamiche, i braccetti delle sospensioni, i cerchioni delle ruote, i dischi dell'impianto frenante nonché il volante computerizzato, sono realizzati in materiale composito.
Anche in questo caso, come nel settore aeronautico, dove il costo non è il parametro più rilevante, la fibra di carbonio la fa da padrone.

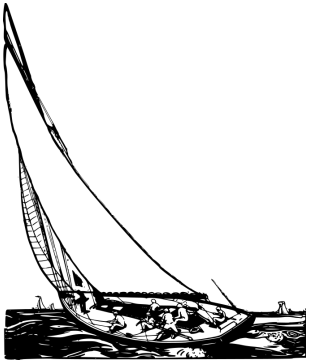
Spesso la trama di carbonio viene lasciata a vista, infatti è considerata in generale, molto bella esteticamente.
Anche nelle moto da competizione, in diversi casi, si realizza il telaio in materiale composito, anche in questo caso in fibra di carbonio.

La carenatura e anche altre parti quali i terminali di scarico sono sempre in composito.

Autovetture di alto livello(Top Car)

Tutti quanti siamo a conoscenza del fatto che, autovetture classificate come top-car o dream-car, spesso sono costruite in materiale composito.
La maggior parte di esse, risulta di fabbricazione italiana e tedesca, fanno largo utilizzo di tecnologie sviluppate nel settore Formula Uno, valgono quindi gli stessi concetti espressi di sopra.
Anche in questo caso la fibra di carbonio prevale su gli altri tipi.

Settore Nautico



Il settore nautico è quello dove probabilmente i materiali compositi vengono impiegati in maggior quantità a livello produttivo, si utilizza principalmente la fibra ed il tessuto di vetro, garantendo così dei costi produttivi contenuti. In questo caso il requisito leggerezza è meno sentito rispetto ad altre applicazioni citate in precedenza.
Molti processi produttivi, che vedremo in seguito, sono stati sviluppati proprio in questo settore e specificamente per la realizzazione degli scafi di piccole e medie imbarcazioni.
Altri particolari importanti in composito del settore sono, gli alberi delle barche a vela(mast), i migliori sono realizzati quasi totalmente in fibra di carbonio.

Modulo di Elasticità (Modulo di Young)

Il Modulo di Young è stato inventato per definire la rigidità intrinseca di un materiale, indipendentemente dalla sua applicazione.
Rappresenta la costante elastica di un materiale, può essere definito dal rapporto tra il carico specifico(δ) e la deformazione corrispondente(ε) :

$$E = \frac{\delta}{\varepsilon}$$

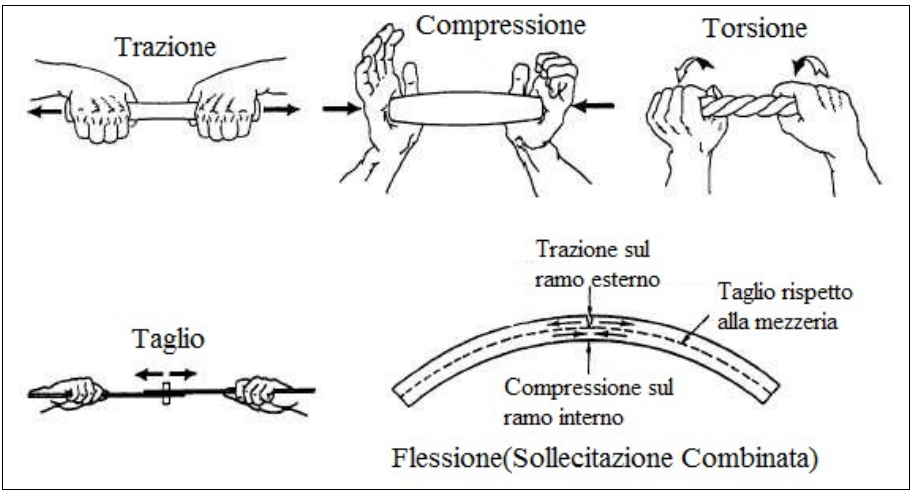
Il Modulo di elasticità normale (o longitudinale) è caratteristico per ogni tipo di materiale. In meccanica viene anche chiamato Modulo di Elasticità alla Trazione.
Per comprendere facilmente la scala dei valori in campo, basta analizzare la tabella sottostante:

Materiale	**Modulo di Young(E)(MPa)**
Gomma	7
Plastica per Bottiglie	1300
Matrice in Resina Epossidica	5500
Legno(medio)	14000
Ossa	41400
Cemento per Edilizia	69000
Vetro per Bottiglie	69000
Fibra di Vetro(E-Glass)(1)	69000
Alluminio(2024T3)	73000
Fibra di Kevlar® 49(1)	131000
Titanio	196000
Acciaio legato 42 CrMo 4	230000
Fibra di Carbonio HS(1)	160000÷270000
Diamante	1172000
Nota 1: Riferiti alle fibre secche, non laminate	

Risulta facile comprendere che il diamante sia di gran lunga più rigido, rispetto alla gomma.
Possiamo così farci un idea di come collocare le fibre di vetro, carbonio e aramidica, nei confronti dei materiali più noti.

Le Sollecitazioni Principali

Nella scienza dei materiali, la resistenza meccanica è la proprietà indicante il massimo sforzo, che un materiale è in grado di sopportare prima che sopraggiunga la sua rottura.
La resistenza meccanica dei materiali, rispetto ai vari tipi di sollecitazione, può essere misurata con prove specifiche di compressione, trazione, flessione, taglio e torsione, di conseguenza si parlerà rispettivamente di resistenza a compressione, resistenza a trazione, etc.



Comparazione dei Materiali sotto carico

Dal punto di vista numerico, la resistenza di un materiale è la sollecitazione misurata, richiesta per portarlo alla rottura. Tale parametro viene misurato sia per le sollecitazioni a trazione, che per quelle a compressione. Generalmente nelle tabelle dei materiali viene fornito il parametro a trazione.
La rigidità non ha alcun effetto sulla resistenza e viceversa.
Il vetro, ad esempio, ha un modulo di Young abbastanza alto e paragonabile a quello dell'alluminio, ma si romperà a sollecitazioni molto più basse.
Nella tabella di seguito sono riportati i parametri di carico di rottura a trazione dei materiali più comuni:

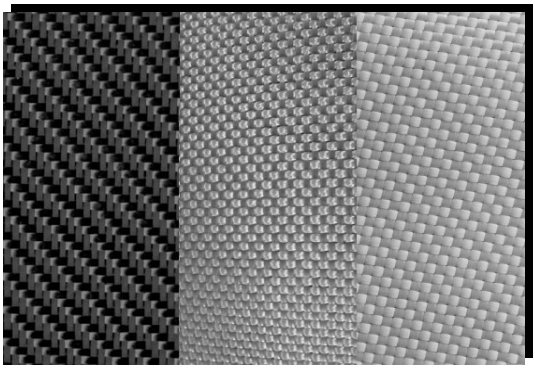
Materiale	**Carico di Rottura a Trazione(MPa)**
Matrice in Resina Epossidica	63
Vetro per Bottiglie	70
Legno(Spruce lungo fibra)	103
Alluminio(7075T6)	345
Titanio	345
Acciaio legato 42 CrMo 4	1050
Fibra di Carbonio(1)	2400
Fibra di Vetro(E-Glass)(1)	3450
Fibra di Kevlar® 49(1)	3800
Nota 1: Riferiti alle fibre secche, non laminate	

Dalla tabella emergono valori molto interessanti per le fibre dei tessuto di rinforzo per materiali compositi, tuttavia tale valore verrà ridotto drasticamente, dopo che saranno tessute e laminate con la matrice in resina; tutto ciò sarà affrontato nei capitoli successivi.

LE FIBRE DI RINFORZO

Panoramica

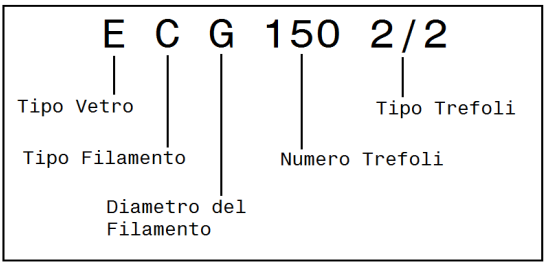
Tratteremo di seguito le principali tipologie di fibre di rinforzo. Dal punto di vista teorico, questo capitolo, insieme al successivo, vanno considerati i più importanti di tutto il manuale.



Vedremo come vengono fabbricate e a fine capitolo effettueremo un paragone delle loro più importanti caratteristiche.
Prima di iniziare questo paragrafo è importante chiarire un paio di concetti basati su definizioni usate spesso in modo ricorrente.
Spesso viene utilizzato in modo generico il termine vetroresina, ma è bene sottolineare che dal punto di vista meccanico ed economico, vi è una notevole differenza tra un manufatto o prodotto realizzato con lana di vetro(mat) e resina ed uno realizzato con tessuto di vetro e resina. In sostanza quest'ultimo risulta più resistente e raffinato meccanicamente, anche se più costoso.
Giusto per citare un esempio, la vetroresina realizzata con il mat e resina poliestere, viene utilizzata spesso in nautica per realizzare gli scafi ed anche per fabbricare i cassonetti dell'immondizia.
Per quanto riguarda la commercializzazione, le fibre di rinforzo, sono vendute generalmente al dettaglio, come tessuti arrotolati su tubi di cartone o plastica, oppure ripiegati e imbustati quando sono acquistati in quantità inferiori al metro, proprio come per i tessuti in cotone o sintetici.
Il prezzo è stabilito per metro lineare del prodotto.
L'altezza del tessuto venduto è generalmente di 1000mm o 1270mm.
Le fibre di rinforzo vengono vendute anche come nastri di rinforzo, avvolti in rotoli o rocchetti.

La Fibra di Vetro

Come dice lo stesso nome, le fibre di cui stiamo discutendo sono fabbricate dal vetro. Tali fibre vengono prodotte tramite un processo di trafilatura, facendo passare il vetro fuso attraverso delle filiere dotate di centinaia di fori. Si ottiene così un filamento che può avere una lunghezza adattabile ai vari processi industriali.
Il filamento viene poi trattato superficialmente con delle sostanze chimiche per migliorarne le caratteristiche di scorrevolezza, resistenza all'abrasione e l'iterazione con la matrice.
Comunemente le fibre di vetro, vengono fornite sotto forma di filati, quindi tessuti in vari modi.
I filati vengono ulteriormente trattati chimicamente al fine di proteggerli per la conservazione. Tali sostanze protettive verranno eliminate prima della messa in commercio del prodotto finale(tessuto o fibra di rinforzo), tramite un processo di essiccazione.
I filati in fibra di vetro, vengono realizzati con fasci a filamenti paralleli, oppure tramite fasci di filamenti ritorti ad S o a Z, che formano così dei trefoli, i quali poi vengono avvolti per formare il filato.
Le fibre di vetro, vengono prodotte in diverse tipologie, contraddistinte da lettere alfabetiche, di seguito illustreremo una classificazione e codifica di esempio reale:



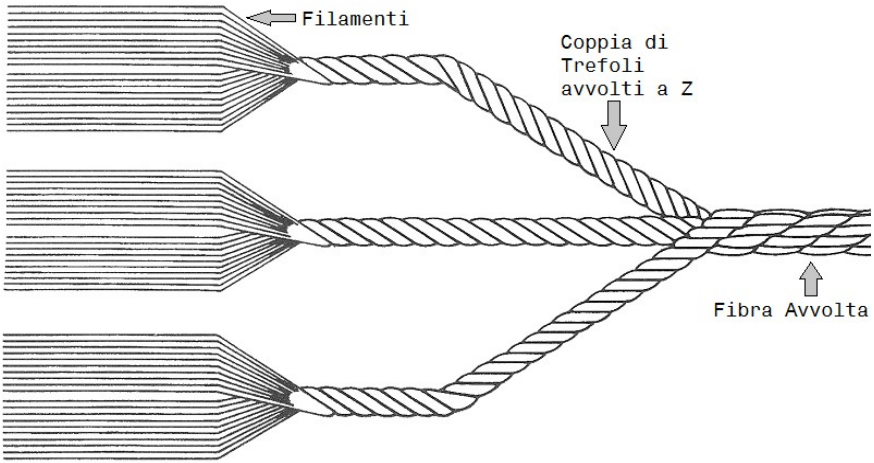
Tipo di vetro:
E = Elettrico, sono le più utilizzate e comuni in tutti i settori.
C = Chimico, vengono impiegate principalmente in ambienti chimicamente corrosivi.
S = Ad alto modulo, solitamente impiegate in campo aeronautico per particolari strutturali.

Tipo di fibra:
C = Continua, trattasi di un filamento continuo.
S = Fiocchi, utilizzati per creare rinforzi particolari.

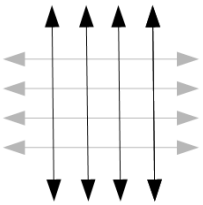
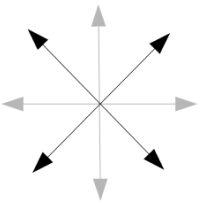
Diametro del filamento: Viene espresso in pollici o millimetri, rappresenta il diametro esterno, secondo una tabella fornita dal produttore.

Numero Trefoli: Rappresenta il numero di trefoli nella fibra rispetto all'unità di lunghezza specificata dal produttore.

Tipo Trefoli: Rappresenta il numero di coppie di trefoli nella fibra e come sono avvolti.

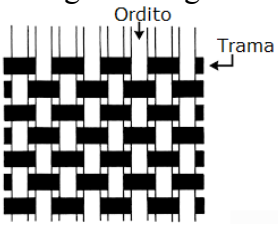


Possiamo suddividere le fibre o tessuti di rinforzo nelle due seguenti classi:

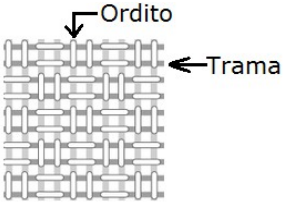
ORIENTAMENTO PREDOMINANTE	CLASSIFICAZIONE FIBRA
	Unidirezionali: Si classificano come tali quando le fibre del rinforzo sono orientate in una predeterminata direzione e tutte parallele tra loro, spesso vengono contraddistinte a livello internazionale con la sigla UNI.
	Bidirezionali o Bilanciate: Si classificano come tali invece quando le fibre del rinforzo sono incrociate formando un angolo tra di loro, queste vengono contraddistinte a livello internazionale con la sigla BID.
	Multi-Assiali: Si classificano multi-assiali, le fibre di rinforzo disposte parallelamente a strati sovrapposti, ed orientate nelle varie direzioni. Le fibre possono avere diversi orientamenti, in quelle bi-assiali sono comunemente disposte a 0/90° ed a +/- 45°, esistono anche tessiture più complesse denominate quadri-assiali.

I tessuti Bidirezionali sono quelli più utilizzati nella maggior parte delle applicazioni, mentre gli Unidirezionali essendo fortemente anisotropi, vengono impiegati quando si deve realizzare un manufatto soggetto a sforzi meccanici lungo una sola direzione prevalente.

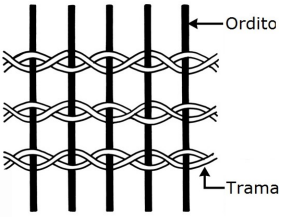
Di seguito vengono mostrate i sei tipi di trame più comuni:



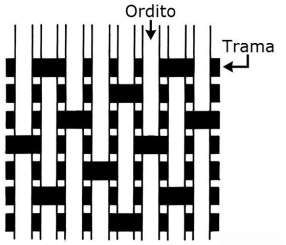
Plain: Le fibre di trama e ordito, sono intrecciate in modo alternato, uno sopra e uno sotto l'altra. Il tessuto risulta stabile e simmetrico. Generalmente è meno drappeggiabile delle altre. Dal punto di vista meccanico non risulta quella con caratteristiche migliori. L'alto numero di fibre piegate, ne limita le proprietà meccaniche rispetto ad altri tipi di tessitura.



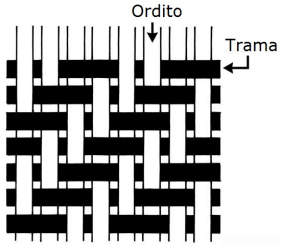
Basket: Risulta simile alla Plain tranne, per il fatto che due o più fibre sono intrecciate uno sopra l'altra.
Risulta più drappeggiabile e resistente meccanicamente della Plain, ma è meno stabile.



Leno: Viene usata quando si ha a che fare con un numero relativamente basso di fibre. Anche questa è simile alla Plain. Risulta molto stabile.
Questo tipo di trama è realizzata con due o più fibre della trama attorcigliate su quelle di ordito a spirale.



Four Harness Satin (Crowfoot) e Five-Eight Harness Satin: Trame molto drappeggiabili e bagnabili, rispetto alla Plain, consentono il rivestimento di curvature complesse.
Hanno una tessitura simile alla Twill, ma con minori intersezioni tra ordito e trama. Il numero di fibre tra ogni intersezione è per definito dal numero di designazione(4, 5, 8).
Questa trama ha buone caratteristiche meccaniche, ma avendo una tessitura asimmetrica, dovremo considerare tale aspetto in fase di progettazione, ciò ai fini di calcolo strutturale. Rispetto ad altre trame sono anche meno stabili.

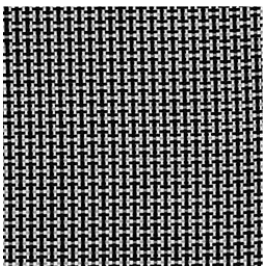


Twill(Batavia): Risulta più maneggevole, drappeggiabile e bagnabile, rispetto alla Plain, pur mantenendo una buona stabilità del tessuto rispetto alle Four/Eight Harness Satin.
Una o più fibre di trama s'intrecciano alternativamente sopra e sotto due o più fibre di ordito, in modo ripetuto e regolare. Ciò produce l'effetto visivo di una diagonale lungo il tessuto.
La stabilità è leggermente minore rispetto alla Plain ma ha buone

caratteristiche meccaniche.

In generale le trame tipo Plain e Twill risultano le più diffuse.
A parità di tipologia di fibra il tipo Plain presenta caratteristiche meccaniche superiori, non è delicato da maneggiare, ma risulta meno drappeggiabile e quindi non adatto a superfici con curvature complesse.
Mentre il tipo Twill, ha caratteristiche meccaniche leggermente inferiori alla precedente, è un po' più delicata da maneggiare per via della trama più complessa, ma risulta molto drappeggiabile e si adatta bene a superfici complesse.
Personalmente ritengo che dal punto di vista estetico e pratico, entrambi le trame siano molto valide.
Le trame appena descritte sono impiegate nella fabbricazione di tutti i tessuti di rinforzo, con le varie tipologie di fibre che abbiamo considerato(vetro, carbonio, aramidica).
Ogni produttore di tessuti di rinforzo fornisce le caratteristiche tecniche della trama e del tipo di fibra in apposite schede tecniche(datasheets), dove troveremo tutte le informazioni necessarie per effettuare le valutazioni del prodotto.

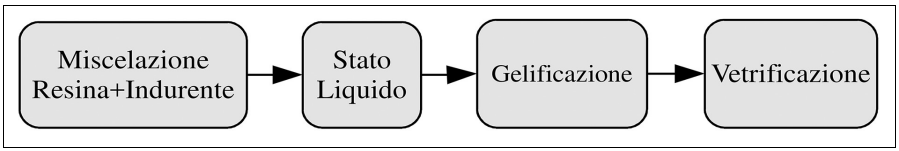
Tessuti ibridi



Vengono definiti come tali, i tessuti realizzati con due o più tipologie di fibra.
Il tipo più comune è quello denominato tessuto carbon-kevlar, realizzato con fibre aramidiche e di carbonio in rapporto 2:1(aramidica:carbonio).
La trama con cui è realizzato è del tipo Plain.
Questo tessuto ha caratteristiche meccaniche eccellenti, in quanto combina la rigidità della fibra di carbonio con la resistenza agli urti di quella aramidica. Risulta anche molto leggero.
Questo tessuto è indicato per tutti i tipi di manufatti, sia per gli strati interni che esterni, del laminato.

Resine Epossidiche

Per questo tipo di resine, si trovano in commercio varie tipologie di prodotti, con qualità e viscosità differenti.
Dal punto di vista chimico è classificabile come una matrice polimerica organica.
Il gruppo epossidico si trova in alcuni polimeri, ottenuti addizionando epossidi e fenoli, quali epiclorina e bisfenolo. Il polimero ottenuto sotto forma di liquido viscoso, viene chiamato comunemente resina epossidica.
Per ottenere la condensazione per polimerizzazione della resina, deve essere addizionato un'altro componente, detto indurente, costituito generalmente da ammine, contenenti il gruppo amminico. Esso funziona come catalizzatore della reazione chimica.
Il processo di solidificazione di tali resine è piuttosto complesso e viene riassunto di seguito nei suoi passaggi in modo semplificato:



Dal punto di vista chimico l'indurimento può avvenire anche a temperatura ambientale relativamente bassa, se pur con tempistiche elevate. Ciò porta alla eliminazione dell'acqua formata da ossidri liberi, formando legami trasversali tra le singole molecole, secondo la reazione chimica definita reticolazione.
Nei processi industriali, l'indurimento avviene a temperatura più elevata rispetto a quella ambiente, con un processo di riscaldamento definito "curing". Spesso questo processo avviene in autoclave, ovviamente insieme al processo di sottovuoto ed aumento di pressione come vedremo nel capitolo "PROCESSI E METODI DI LAVORAZIONE".
Nel caso di indurimento a temperatura ambiente, quando si rende necessario, viene effettuato il cosi detto ciclo di post-cura(o post indurimento), che consiste nel riscaldare il manufatto, che ha già affrontato un ciclo di indurimento a temperatura ambiente, ad una temperatura superiore a quella ambiente per un intervallo di tempo predetermino. Con lo scopo di migliorare ulteriormente le caratteristiche meccaniche della

matrice in resina.
Tale processo viene effettuato comunemente per i particolari strutturali.
Il livello della temperatura e l'intervallo di tempo per la fase di indurimento, sono parametri molto importanti. Ogni produttore di resine epossidiche fornisce tutte le indicazioni per garantire un corretto ciclo di indurimento.
Le resine di buona qualità e bassa viscosità sono a base di bisfenolo. Tali prodotti consentono una facile e rapida impregnazione dei tessuti di rinforzo. Inoltre sono molto più salutari ed inodore, rispetto ad altri prodotti.
Le resine a base di bisfenolo hanno inoltre prestazioni superiori. Un ciclo di indurimento tipico completo di tali prodotti, richiede una settimana a temperatura ambiente di 25°C.
Anche le caratteristiche meccaniche sono migliorate rispetto al passato, rendendo tali resine, molto più sicure nelle applicazioni strutturali.
Citando come riferimento l'autocostruzione di velivoli, possiamo affermare che fino a pochi anni fa venivano utilizzate per applicazioni strutturali, solo resine prodotte da tre o quattro aziende statunitensi. Adesso la scelta è molto più ampia e la qualità generale è superiore.
Quando si effettua la miscela della resina e dell'indurente, bisogna rispettare le dosi, evitando errori di mescola superiori al 3-5%. Pena il degrado delle caratteristiche generali della matrice in resina. Si consiglia, sempre in questa fase, di utilizzare una buona bilancia di precisione digitale e di mescolare solo le quantità di resina necessaria per il manufatto.
Miscelando modesti quantitativi di resina alla volta, avrete più tempo per l'applicazione della stessa sul tessuto di rinforzo.
Durante la miscelazione dei componenti della resina, si svilupperà del calore, quindi evitare di utilizzare recipienti troppo delicati o sensibili alla temperatura.
Per le resine epossidiche esistono anche dei prodotti chimici detti "acceleratori", che velocizzano il ciclo di indurimento.
Se sarà necessario aumentarne la tixotropia, ovvero se vi fosse la necessità di avere una miscela più pastosa e stabile, si può ricorrere ai cosi detti addensanti o cariche inerti, vedi capitolo "ADDENSANTI E RIEMPITIVI".

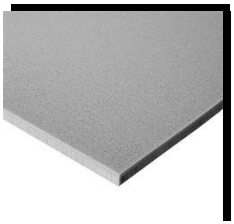
Le resine epossidiche sono inoltre l'unica famiglia adatta per laminare tutti i tipi di tessuto di rinforzo(carbonio, vetro, aramidica).
Personalmente ritengo che per le auto costruzioni, il tipo a matrice epossidica sia la migliore opzione. Nonostante il costo superiore ad altre matrici, è quella che garantisce risultati migliori dal punto di vista meccanico e delle durabilità, inoltre è poco nociva per la salute.

Resina Epossidica Biologica

Sono da poco usciti sul mercato una gamma di resine epossidiche, classificabili a basso impatto ambientale.
I loro produttori, promettono il mantenimento delle stesse caratteristiche di quelle derivate dagli idrocarburi.
Si enfatizza il concetto di riduzione dell'impatto ambientale, attraverso l'utilizzo di materiali eco sostenibili, senza comprometterne le prestazioni meccaniche.
Le resine sono fabbricate utilizzando fonti energetiche a basso impatto ambientale. Inoltre, le materie prime per la fabbricazione delle resine, sono prodotti di scarto di altri processi industriali.
Le tecniche chimiche adottate impiegano concetti eco sostenibili, che richiedono meno energia e generano meno emissioni di gas ad effetto serra durante la fase di produzione delle resine,con una riduzione pari al 50%, questo rispetto ai tradizionali prodotti derivati dagli idrocarburi.
Mi auguro che tali prodotti abbiano un futuro quantomeno importante.

PVC espanso

Questo materiale di qualità più elevata rispetto ai precedenti, ha buone caratteristiche meccaniche e resistenza ai solventi. Risulta compatibile con la maggior parte dei tessuti di rinforzo e matrici in resina. Inoltre è in grado di resistere a temperature fino a 120-150°C, caratteristica utile in caso si utilizzi il prepreg.



Può anche essere termo-formato sottovuoto con temperatura minima intorno ai 95°C.
Adatto quindi ad applicazioni strutturali e disponibile in lastre e blocchi di varie densità. Esteticamente risulta più poroso del polistirene estruso, ma presenta comunque un basso assorbimento di resina.
Anche tale prodotto, è adatto a lavorazioni con macchine a controllo numerico tramite operazioni di fresatura.
Ha inoltre una buona resistenza all'assorbimento dell'acqua.

PET espanso

Pure questo prodotto può essere considerato di qualità più elevata rispetto al polistirene estruso.

La struttura di queste anime, permette di ottenere un basso assorbimento di resina, spesso inferiore al PVC.
Questo prodotto è anche riciclabile al 100%, quindi più ecologico da impiegare.
Risulta compatibile con la maggior parte delle matrici in resina, non è infiammabile ed è auto-estinguente.
Come il PVC consente operazioni di termo-formatura con temperatura minima intorno ai 95°C ed è in grado si sopportare temperature fino a 150°C.
Il PET risulta piuttosto semplice da tagliare e lavorare, va comunque maneggiato con cura come tutte le schiume in quanto piuttosto morbido.
Le lastre in cui viene fornito sono meno omogenee, dal punto di vista dimensionale, rispetto al PVC.
Dal punto di vista strutturale presente ottime caratteristiche, infatti ha un ottima resistenza a fatica. Adatto quindi alla realizzazione di parti strutturali.

Peel ply

Anche se tale prodotto dovrebbe essere collocato in un'altro capitolo, verrà discusso qui per motivi pratici.
Si tratta di un tessuto sintetico in nylon, che ha la caratteristica di non incollarsi alla resina epossidica. Tale proprietà, permette di utilizzarlo nelle fasi di laminazione come tessuto traspirante per eliminare la resina in eccesso. Di solito viene posizionato nelle facce interne del laminato e rimosso ad essiccazione avvenuta, strappandolo via dalla superficie. Il suo utilizzo ha anche il vantaggio di lasciare una superficie ruvida perfettamente adatta ad incollaggi e successive stratificazioni.
Se impiegherete il peel-ply nelle vostre laminazioni, consiglio di rimuoverlo solo quando necessario, ovvero a fine di tutte le lavorazioni, sfruttando così la protezione da polvere o contaminanti per il laminato che ci offre gratuitamente.
Vedremo nei dei dettagli il suo impiego nel capitolo "PROCESSI E METODI DI LAVORAZIONE" .

Stesura Peel Ply(Foto fonte Google)

LAMINATI E STRUTTURE

Definizione

Nei capitoli precedenti abbiamo definito i prodotti ed i materiali necessari per la realizzazione di manufatti in composito, quali i tessuti di rinforzo, le matrici in resina, i materiali di anima ed i vari ausiliari di processo.
Tali prodotti possono essere considerati come gli "ingredienti" per la realizzazione dei laminati.

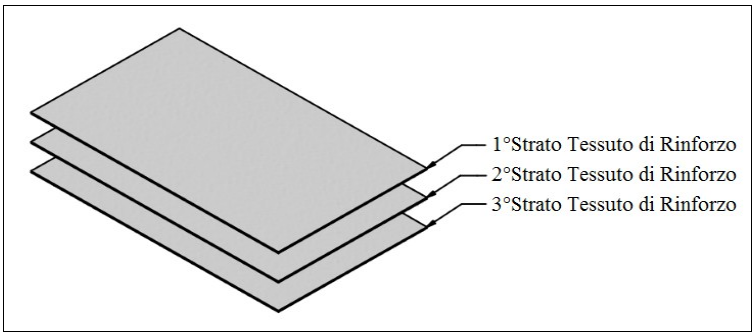
Per laminato in composito, si intende un manufatto, realizzato con uno o più strati di tessuto di rinforzo, sulla quale è applicata una matrice in resina e nel caso sia previsto, anche da un materiale di anima. A seguito di tale operazione vi sarà la fase di indurimento della matrice in resina(curing).
Spesso il tessuto di rinforzo è anche chiamato pelle o stuoia.
Ad essiccazione della matrice in resina avvenuta, il laminato sarà considerato utilizzabile per le successive ed eventuali fasi di lavorazione.

Foto fonte Scaled Composites

Le tipologie

Laminato o Stratificato Semplice

Come dice il suo stesso nome, è la tipologia di laminato più semplice e utilizzata in tutte le applicazioni.



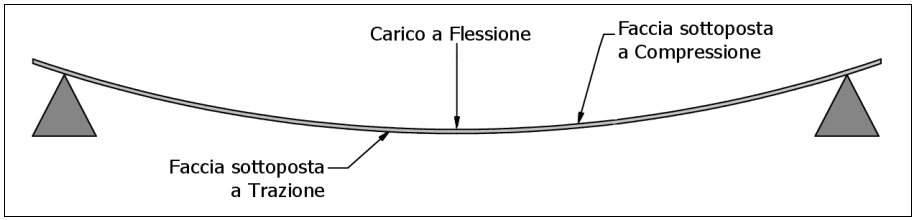
Questo può essere realizzato con uno o più strati di tessuto di rinforzo sovrapposti, ed impregnati con una matrice in resina.

Un semplice esempio di stratificato semplice è il circuito stampato(PCB) come mostrato nel capitolo "LE NOZIONI DI BASE".

I tessuti di rinforzo impiegati in un singolo laminato possono essere anche di tipo misto(vetro,carbonio e aramidico), analizzeremo nel dettaglio tale aspetto in uno dei paragrafi successivi("Rules of Mixtures").

Questo tipo di laminato è realizzabile con la maggior parte dei metodi e processi di fabbricazione più conosciuti.

Consente anche di realizzare parti molto complesse e quindi di adattarsi a superfici con raggi di curvatura molto stretti.

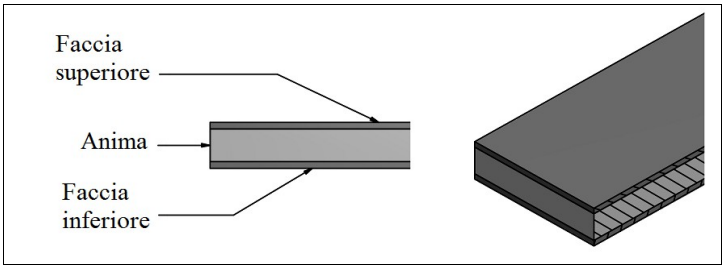


Dal punto di vista meccanico e strutturale, quando viene sottoposto a

flessione, la faccia esterna è sollecitata a trazione e quella interna a compressione, al centro invece la sollecitazione è nulla. Quindi il materiale prossimo all'asse neutro non viene sfruttato a dovere, in quanto non è sollecitato. Tale aspetto negativo viene risolto adottando il laminato a sandwich come descritto nel prossimo paragrafo.

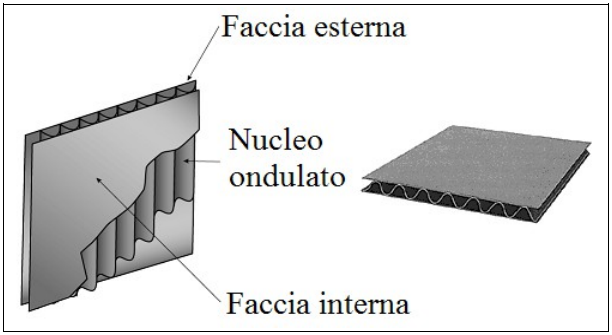
Laminato sandwich

In meccanica, per laminato, pannello o struttura a sandwich, si intende un elemento costituito da due strati resistenti, detti pelli o facce, distanziati tra loro e collegati rigidamente ad un elemento connettivo che prende il nome di anima("core" in inglese).



Tale struttura così composta ha un comportamento statico notevolmente migliore delle singole parti da cui è costituita.

Un esempio comune di pannello a sandwich è il cartone, in particolare quello in cui le facce esterni piani sono separati da uno strato di cartone ondulato(nucleo).



Esempio struttura cartone ondulato

L'anima è in genere un materiale leggero e poco resistente, che permette di distanziare le facce, composte da materiali più robusti e di spessore ridotto. Esse sono le preposte alla distribuzione dei carichi nel piano, la funzione dell'anima è invece quella di aumentare il valore della rigidezza a flessione del laminato, il quale dipende dalla distanza delle facce rispetto piano medio dello stesso.

In sostanza, sottoponendo questa struttura a flessione, una delle facce viene

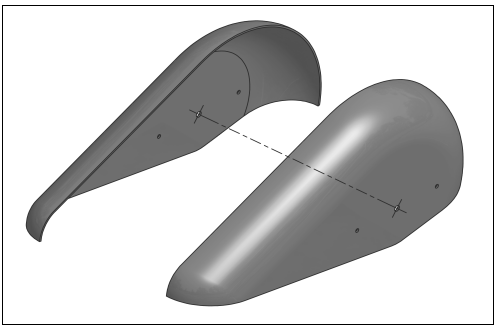
CONCETTI DI GIUNZIONE E SISTEMI DI FISSAGGIO

Metodi di incollaggio e giunzioni adesive

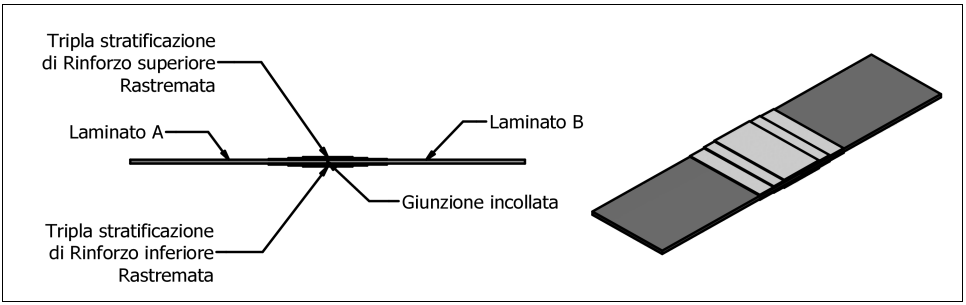
Nel settore dei materiali compositi si ha spesso a che fare con la giunzione di grandi parti strutturali con l'utilizzo di prodotti adesivi. Proprio questo settore ha il vantaggio di consentire l'impiego di adesivi strutturali in modo sicuro e affidabile nel tempo, anche con tecniche costruttive alla portata di tutti.

Atri settori non permettono l'utilizzo così esteso di tali concetti, se prendiamo come riferimento metalli come l'alluminio, l'incollaggio tramite prodotti adesivi di parti realizzate con tale metallo, richiede dei processi chimici di preparazione delle superfici molto costosi ed anche inquinanti, questo per via delle ossidazioni superficiali che l'alluminio subisce a contatto con l'ambiente circostante.

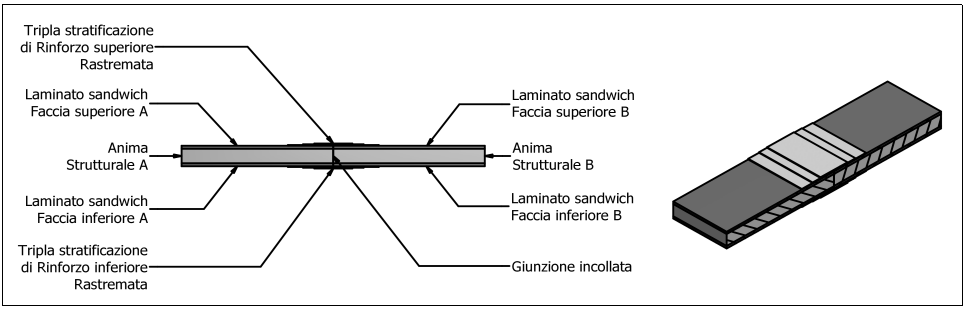
Quando si laminano più parti per arrivare ad un manufatto completo, si presenta il problema di come accoppiarle e incollarle insieme, con il fine di ottenere un risultato ottimale sia dal punto di vista strutturale, che da quello estetico.
Un tipico esempio può essere considerata la fabbricazione di una fusoliera di un velivolo, lo scafo per un imbarcazione o un semplice parafango. Infatti tali parti, se realizzati in due sezioni simmetriche, laminate in due stampi differenti, ad esempio fiancata destra e sinistra, si presenta il problema di come accoppiarle insieme in modo solidale e continuo.



La zona di accoppiamento delle due parti è chiamata linea di giunzione.
Quando si ha che fare con la giunzione di parti differenti spesso si incappa in problematiche di allineamento e vuoti tra di esse. Quindi si devono adottare tutte le precauzioni per evitare ciò.
Saranno mostrate diverse soluzioni relative ai concetti di incollaggio e giunzione delle parti in composito:



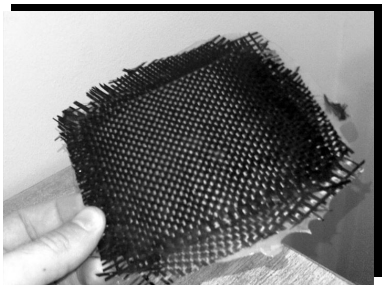
Questi primi due casi rappresentano il modo più semplice e comunemente utilizzato, si solito viene chiamato "giunzione di testa".
In entrambi i casi, laminato semplice e sandwich, le parti sono accoppiate aggiungendo strati di tessuto di rinforzo, laminati sulle fiancate interne ed esterne. Gli strati di rinforzo dovranno essere rastremati per distribuire al meglio il carico.



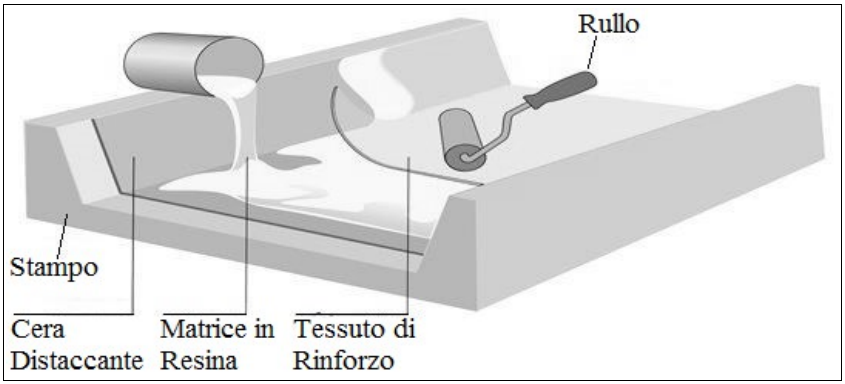
Per ottenere ottimi risultati, preparare la zona di giunzione con tessuto peel-ply in fase di realizzazione del laminato. Inoltre non dovranno essere presenti vuoti tra la giunzioni sulla mezzeria, per ovviare a ciò si può ricorrere eventualmente a stuccature non strutturali(Vedi capitolo "Addensanti e Riempitivi"), questo vale in particolare per i laminati a sandwich.

Laminazione manuale(Hand Lay-Up)

Si tratta del metodo più semplice ed alla portata di tutti. Consiste nel laminare il tessuto di rinforzo, impregnandolo con la matrice in resina direttamente sulla superficie in lavorazione o sullo stampo. Per fare ciò si utilizzano pennelli piatti, spatole in plastica e anche rulli.
Il processo di indurimento avviene a pressione e temperatura ambiente.



Lo svantaggio di tale processo è che non permette l'evaporazione delle bolle d'aria che si creano nella matrice in resina durante la laminazione. Inoltre, non è facile controllare lo spessore del laminato, in quanto non è sottoposto a pressione.
Di conseguenza il rapporto fibre/resina è difficilmente controllabile.
Molto dipende dall'abilità ed esperienza di chi effettua il processo di laminazione.
Per questi motivi, dopo l'indurimento della matrice in resina è richiesta una fase di rifinitura, tramite levigatura e stuccatura del manufatto, talvolta tale fase può rivelarsi piuttosto impegnativa. Un altro svantaggio è che l'operatore è esposto alla tossicità delle matrici in resina durante la fase di impregnazione, tale aspetto non è trascurabile nel caso delle resine poliesteri e vinilesteri, che richiedono particolari precauzioni per la sicurezza del personale. A livello hobbistico si consiglia di lavorare sempre con resine epossidiche.



Tale metodo è comunque il più diffuso in tutti i settori, sia industriali che hobbistici. Infatti è applicabile a tutti i tipi di tessuto di rinforzo e matrice in resina, che abbiamo trattato.
Chiunque decida di far pratica con i materiali compositi, inizierà imparando tale metodo. Richiede poche attrezzature e spazi di lavoro, quindi è adatto a tutti.

Laminazione manuale su schiume(Hand Lay-Up Over Foam)

Questa è semplicemente una variante del precedente metodo.
Si tratta di utilizzare un materiale schiumoso di anima, come stampo su cui creare il manufatto.
Generalmente, come materiale di anima, si utilizza il polistirene estruso ed espanso. Questo materiale viene letteralmente lavorato e scolpito con utensili tradizionali e tramite l'utilizzo della tecnica di taglio con filo a caldo.

Laminazione fusoliera velivolo(Foto fonte Google)

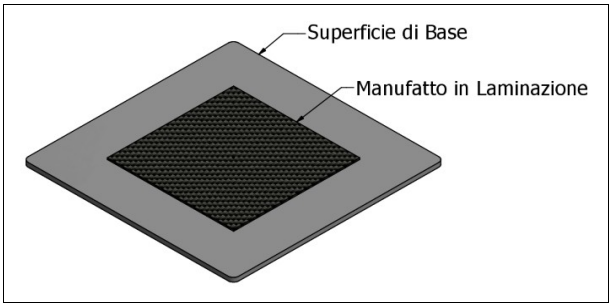
Una volta creata la forma del manufatto, si procede alla laminazione del tessuto di rinforzo su tale geometria, procedendo manualmente per stratificazioni successive. Se previsto, una volta completata la fase di indurimento, il materiale di anima in polistirene può essere rimosso con l'utilizzo di solventi quali diluente nitro e acetone. In molte applicazioni invece il polistirene funge da anima strutturale e quindi non viene rimosso, in questo caso si ha che fare con laminati a sandwich.
Il primo settore che utilizzò tale metodo di lavorazione, fu quello della fabbricazione delle tavole da surf negli anni Cinquanta, quando il legno di balsa venne rimpiazzato da anime sintetiche più leggere.
Tale metodo fu ulteriormente sviluppato da Burt Rutan a fine degli anni Settanta, per creare velivoli auto-costruiti ad alte prestazioni. Tale tecnica

costruttiva è chiamata "Moldless Composite Sandwich Aircraft Contruction". Attualmente è ancora molto utilizzata in vari settori industriali e non, compreso quello aeromodellistico e fa capo a quanto descritto sopra.
Anche questo metodo di lavorazione è considerabile alla portata di tutti.
Il vantaggio principale è che non richiede la realizzazione di stampi di lavorazione come è invece richiesto da altri. Consente quindi di realizzare forme tridimensionali, anche complesse, senza attrezzature particolari.
Presenta però gli stessi svantaggi del metodo precedente, rendendo laboriosa la fase di rifinitura.

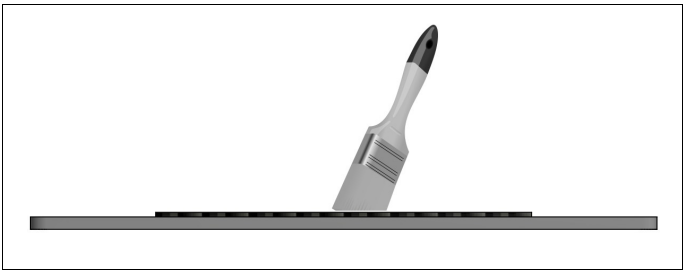
Fabbricazione tavola da surf (Foto fonte Google)

Stampaggio di parti piatte

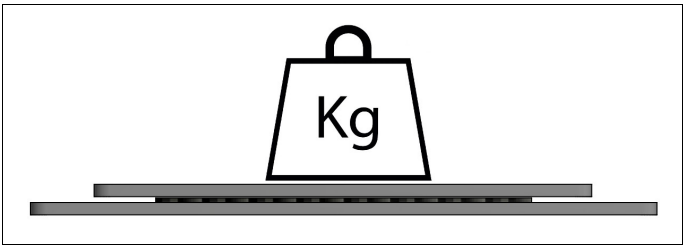
Possiamo considerare lo stampaggio di parti piatte quello più facile da realizzare.
Utile quando si ha la necessità d stampare lastre e pannelli con superfici piane.
Per realizzare uno stampo è necessaria solo una superficie piatta, levigata e in materiale abbastanza rigido da non deformarsi durante la laminazione (Es: pannelli di vetro, policarbonato o metallo).
Questa tecnica di stampaggio può essere utilizzata con i principali metodi di laminazione, in particolare quella manuale e con sacco a vuoto.
Di seguito viene mostrato il concetto di stampaggio con laminazione manuale.



Le superfici di lavoro vengono trattate con agenti distaccanti o film plastici antiaderenti(vedi Cap.PRODOTTI E TESSUTI DISTACCANTI).
Si laminano quindi il tessuto di rinforzo in vari strati, applicando la matrice in resina.
Con questo metodo solo una faccia verrà stampata con un livello di finitura elevato.



Per delimitare il perimetro dei manufatti in laminazione si possono utilizzare angolari in alluminio o listelli di legno, anche questi vanno trattati con agenti distaccanti o film plastici antiaderenti.
Vi è anche la possibilità di aggiungere una contro-piastra, di caratteristiche analoghe alla superficie piana di base, posizionandola sulla faccia superiore del laminato:



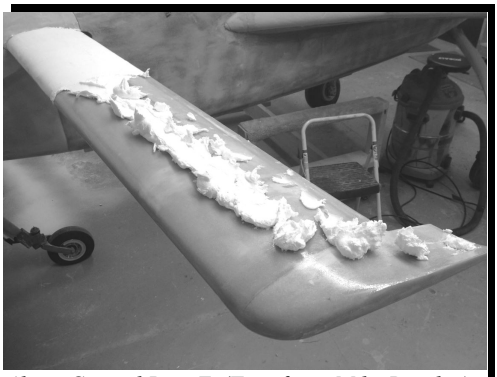
Alla contro-piastra viene applicata una massa nota, così da creare una pressione distribuita sul laminato, la quale andrà mantenuta per tutto il ciclo di indurimento. Lo scopo è di far fluire via la resina in eccesso ed eliminare le bolle di aria presenti all'interno di essa.
Maggiore è la massa applicata, maggiore sarà la pressione esercitata.
Con questo metodo si ottengono così manufatti con due facce, che presentano un elevato livello di finitura superficiale, con un solo passaggio di laminazione.
Come ulteriore affinamento tecnico, è possibile usare il processo di laminazione con sacco a vuoto, consultare il Cap.”Laminazione con sacco a vuoto(Vacuum bag processing)” per approfondimenti.

Tutorial 3 - La stuccatura con microsfere in vetro

Livello di Difficoltà: *******
Capitoli di Riferimento: "ADDENSANTI E RIEMPITIVI", "Dispositivi di sicurezza e protezione".

Scopo: Apprendere le nozioni necessarie per stuccare, rifinire e riparare i manufatti in composito, tramite l'utilizzo delle microsfere in vetro.
Anche in questo caso, prima di effettuare le operazioni indicate successivamente, si raccomanda l'utilizzo di protezioni per l'apparato respiratorio, visivo, di indossare guanti e indumenti protettivi.
Se possibile utilizzare un aspirapolvere o aspiratore, mantenendolo attivo posizionato nella zona di lavoro, durante le fasi di levigatura.

Stuccatura: Come è stato discusso riguardo agli addensanti e rimepitivi, con questi prodotti è possibile realizzare impasti di varia densità, lavorando sul rapporto di miscelazione tra resina epossidica e microsfere.
Il vantaggio della stuccatura con microsfere è il mantenimento della leggerezza, requisito piuttosto sentito nei manufatti in composito. Infatti se si paragona tale impasto con stucchi da carrozziere a base di poliestere, ci rende conto subito della differenza di peso sostanziale tra i due.
Questa tecnica tuttavia è applicabile solo in caso di superfici dove si effettua la verniciatura del manufatto, quindi non applicabile in caso di applicazioni cosmetiche con trama del tessuto mantenuta a vista.


Aletta Canard LongEz(Foto fonte Mike Beasley)

Dopo aver realizzato un manufatto, in particolare quando si effettua la laminazione manuale, le superfici dello stesso non saranno levigate e la trama superficiale del tessuto di rinforzo sarà piuttosto visibile.
Per rifinire tale superficie si procede preparando un impasto di tipo Dry Micro, costituito da un rapporto 5:1 in volume, di microsfere e resina epossidica, applicandolo con una spatola sulla superficie non levigata.

Quando la resina avrà completato il ciclo di indurimento, si procede alla carteggiatura leggera con carta o spugnetta abrasiva, della superficie ricoperta dall'impasto essiccato, fino a ottenere una superficie liscia ed uniforme, attenzione a non danneggiare le fibre del tessuto di rinforzo durante tali fasi.

In caso di superfici particolarmente irregolari, si procede effettuando più passaggi di stuccatura.

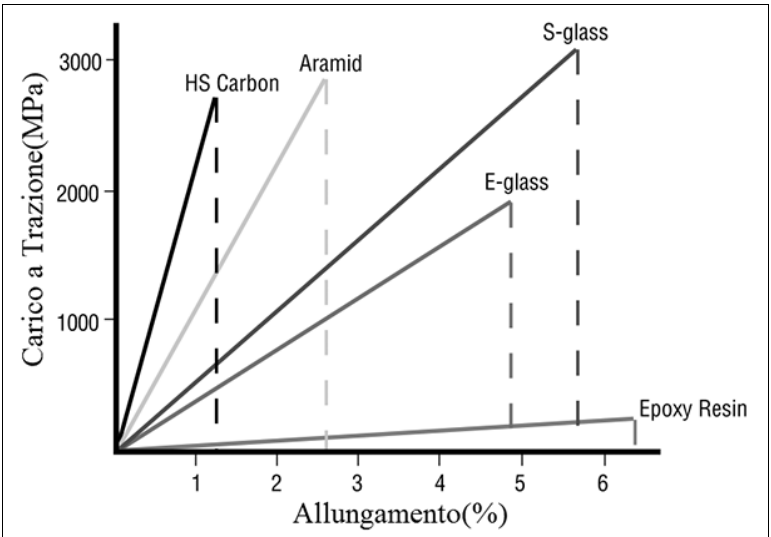
Se si ha a che fare con manufatti con superfici estese, superiori al metro quadro è consigliabile utilizzare una levigatrice orbitale con platorello morbido e dischi a grana fine.

Aletta Canard LongEz(Foto fonte Mike Beasley)

I risultati ottenuti con tale tecnica sono di ottimo livello, richiede una certa manualità e generano una buon quantitativo di polveri, tuttavia è largamente utilizzata da anni in vari settori di applicazione.
La superfici così preparate sono già pronte per poter essere verniciate con stucco a spruzzo tipo primer ed i prodotti necessari per la verniciatura finale.

Caratteristiche Tipiche dei Tessuti di rinforzo

Caratteristiche fisiche e meccaniche tipiche					
Parametro	**Fibra di Vetro Tipo E**	**Fibra di Vetro Tipo S2**	**Fibra di Carbonio Tipo HM**	**Fibra di Carbonio Tipo HS**	**Fibra Aramidica**
Modulo di Elasticità(GPa)	69	85	390	230	130
Allungamento a Rottura(%)	4,8	5,4	0,5	1,1	2,5
Carico Max a Rottura(GPa)	3,5	4,5	2,4	2,8	3,8
*Densità(gr*cm³)*	2,5	2,54	1,86	172	1,44
Temperatura Max Oper.(°C)	850	970	315	315	200



Curve Allungamento a Rottura Vs Carico Max a Trazione