

■ Generalità sui materiali compositi

<input type="checkbox"/> Cosa sono i materiali compositi	6
<input type="checkbox"/> Prodotti di base e semilavorati	13
<input type="checkbox"/> Tecnologie di produzione	20
<input type="checkbox"/> Alcuni esempi di impieghi e realizzazioni	28
<input type="checkbox"/> Generalità sulla meccanica dei compositi	39
<input type="checkbox"/> Bibliografia essenziale	48

Cosa sono i materiali compositi

- **Cos'è un materiale composito?** Per definizione stessa, è un materiale costituito dall'unione di due o più costituenti (le fasi) generalmente distinti in:
 - matrice;
 - fibre;
 - additivi o cariche.
- Le caratteristiche meccaniche essenziali dei compositi sono l'*eterogeneità* e, ma non sempre, l'*anisotropia*.
- Anche se considerati dei materiali moderni, i compositi sono usati da molto tempo e sono stati il risultato di idee volte a fornire all'uomo il materiale adatto alla soluzione dei problemi che si trovava a risolvere; esempi tipici sono i mattoni in argilla e paglia, gli archi *palintonos* e le baliste in legno e tendini di animali, le *katane* giapponesi, ma anche le leghe come il bronzo.
- Alla pagina seguente, alcuni esempi classici e meno classici di materiali compositi.

Cosa sono i materiali compositi

Tipologia	Esempi	Componenti	Campi di uso
Compositi a matrice organica	cartone pneumatici laminati plastiche rinforzate	cellulosa, cariche caucciù, acciaio resine organiche, fibre di vetro, carbonio, boro, etc. resine, fibre corte	imballaggi etc. trasporti impieghi strutturali diversi impieghi diversi
Compositi a matrice minerale	calcestruzzo compositi C-C compositi ceramici	cementi, sabbie, ghiaie, additivi C, fibre di C ceramiche, fibre ceramiche	ingegneria civile aerospaziale, aviazione, sport, biomeccanica componenti termomeccanici
Compositi a matrice metallica		Al/fibre di B Al/fibre di C	aerospaziale
Leghe	acciai leghe di Al ottoni	C, Fe, Mn, Cr, Al, Cu, Sn etc.	impieghi diversi, strutturali e non

7



Cosa sono i materiali compositi

- Il concetto chiave dei compositi è quello di unire due o più materiali a caratteristiche diverse, che da soli non hanno un grande pregio ma che uniti esaltano le loro proprietà: *l'unione fa la forza*.
- Inoltre, le fibre di rinforzo hanno proprietà meccaniche nettamente migliori, sia in termini di resistenza che di rigidità, del materiale massivo: questo perché la diminuzione delle dimensioni caratteristiche implica un miglioramento delle prestazioni meccaniche, dovuto, da un lato al fatto che la fibra ha, per il processo costruttivo, una *struttura più perfetta del materiale massivo* e dall'altro alla *diminuzione della probabilità di trovare dei difetti importanti in corpi a dimensioni piccole*.
- Lo sviluppo dei materiali compositi moderni è dovuto essenzialmente alla necessità di far fronte alle esigenze sempre più spinte dell'industria, soprattutto nei settori:
 - aerospaziale e aeronautico;
 - difesa;
 - sport;
 - biomeccanica.

8



Cosa sono i materiali compositi

- **Tipi di materiali compositi:** generalmente, i materiali compositi sono impiegati sotto forma di corpi bidimensionali, lastre o gusci, e per quanto concerne il loro comportamento meccanico e l'impiego strutturale, si possono dividere in:
 - **compositi a fibra corta:** le fibre sono disperse aleatoriamente in una matrice isotropa; il comportamento meccanico macroscopico è globalmente isotropo;
 - **compositi a fibra lunga:** le fibre sono disposte in modo ordinato e orientato in una matrice isotropa; il comportamento meccanico macroscopico è globalmente anisotropo.
- Questi materiali vengono poi generalmente assemblati per costituire dei macro-materiali compositi, che sono essenzialmente di due tipi:
 - **laminati:** sono ottenuti per sovrapposizione di lamine in composito diversamente orientate; il *comportamento meccanico macroscopico deve essere progettato*;
 - **sandwich:** sono pannelli concepiti per impieghi in flessione; generalmente il comportamento macroscopico è isotropo nel piano.



Cosa sono i materiali compositi

- **Principali costituenti dei compositi a matrice organica:** sono essenzialmente due, la matrice e le fibre.
- A loro volta, queste sono per lo più dei tipi seguenti:
 - Matrici:
 - resine epossidiche;
 - resine poliuretatiche;
 - resine poliammidiche;
 - resine fenoliche.
 - Fibre:
 - vetro;
 - carbonio;
 - kevlar;
 - boro;
 - berillio.
- Un uso sempre maggiore, legato anche a problemi ambientali, è quello di fibre di origine vegetale (canapa e simili).



Cosa sono i materiali compositi

■ Principali vantaggi dei materiali compositi:

- leggerezza;
 - resistenza;
 - rigidità;
 - buon comportamento alla fatica;
 - possibilità di progettare il materiale secondo il proprio bisogno (per i sandwich e i laminati);
 - riduzione dei costi di fabbricazione;
 - riduzione del peso e dei costi dei giunti.
- Lo svantaggio principale, soprattutto per i materiali a fibra lunga, è il costo, e da un punto di vista meccanico, il comportamento alla rottura, che in genere è fragile.
- I parametri sintetici di valutazione delle prestazioni di un composito sono i rapporti E/ρ e σ_{lim}/ρ . Nella tabella che segue sono riportati alcuni dati tipici sui compositi.

11



Cosa sono i materiali compositi

	Materiali	ρ	E	σ_u	E/ρ (A)	σ_u/ρ (B)	ρ/ρ_{ac}	E/E_{ac}	$\sigma_u/\sigma_{u,ac}$	A/A_{ac}	B/B_{ac}
		kg/m ³	MPa	MPa	MN m/kg	kN m/kg					
Forma massiva	Acciaio	7850	210000	360	26,75	45,86	1	1	0,171	1	0,171
	Acciaio alta resist.	7850	210000	2100	26,75	267,52	1	1	1	1	1
	Leghe d'Al	2700	70000	620	25,93	229,63	0,34	0,33	0,295	0,97	5,01
	Legno	500	30000	15	60,00	30,00	0,06	0,14	0,007	2,24	0,65
	Vetro	2500	75000	40	30,00	16,00	0,32	0,36	0,019	1,12	0,35
	Tungsteno	19300	350000	4100	18,13	212,44	2,46	1,67	1,952	0,68	4,63
	Berillio	1830	300000	700	163,93	382,51	0,23	1,43	0,333	6,13	8,34
Titanio	4610	115000	1900	24,95	412,15	0,59	0,55	0,905	0,93	8,99	
Fibre	Vetro E	2540	72400	3500	28,50	1377,95	0,32	0,34	1,667	1,07	30,05
	Vetro S	2480	85500	4600	34,48	1854,84	0,32	0,41	2,190	1,29	40,45
	Carbonio	1380	190000	1700	137,68	1231,88	0,18	0,90	0,810	5,15	26,86
	Carbonio HM	1900	390000	2100	205,26	1105,26	0,24	1,86	1,000	7,67	24,10
	Carbonio HR	1850	240000	3500	129,73	1891,89	0,24	1,14	1,667	4,85	41,25
	Kevlar	1500	130000	2800	86,67	1866,67	0,19	0,62	1,333	3,24	40,70
	Boro	2630	385000	2800	146,39	1064,64	0,34	1,83	1,333	5,47	23,22
Berillio	1830	300000	1700	163,93	928,96	0,23	1,43	0,810	6,13	20,26	
Matrici	Poliestere	1200	3000	80	2,50	66,67	0,15	0,01	0,038	0,09	1,45
	Fenoliche	1200	3000	40	2,50	33,33	0,15	0,01	0,019	0,09	0,73
	Epossidiche	1500	5000	80	3,33	53,33	0,19	0,02	0,038	0,12	1,16
	Poliammidiche	1140	2500	85	2,19	74,56	0,15	0,01	0,040	0,08	1,63

12

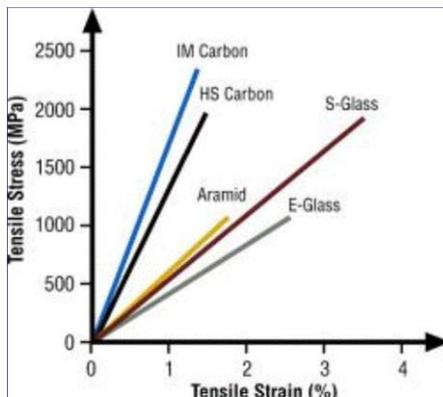


Prodotti di base e semilavorati

- L'industria produce una serie di prodotti di base e di semilavorati con i quali in seguito vengono assemblati i vari prodotti finali.
- I prodotti di base sono:
 - fibre;
 - mats;
 - tessuti;
 - lamine preimpregnate.
- I semi-lavorati (ma che a volte sono proprio, specie nelle applicazioni di punta, il prodotto finale) sono essenzialmente
 - laminati;
 - sandwich.
- Vediamoli rapidamente.

Prodotti di base e semilavorati

- **Fibre:** sono il costituente base del rinforzo dei compositi; vengono filate in bobine, come un filo qualunque, e sono in genere di vetro o carbonio.



vetro

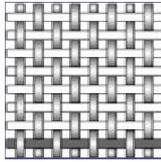


carbonio

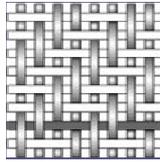


Prodotti di base e semilavorati

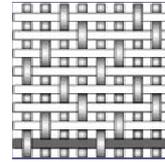
- **Tessuti:** generalmente, i rinforzi sono forniti sotto forma di tessuto; i principali tipi di tessuto sono:



Taffetas (plain)

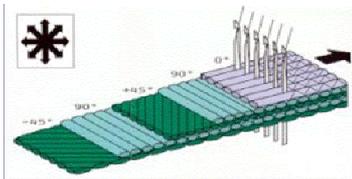


Sergé (twill)

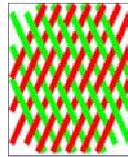


Satin

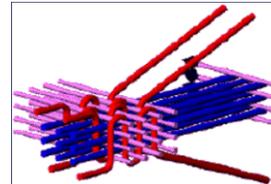
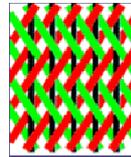
- Esistono anche tessuti multidirezionali, per usi speciali (soprattutto per campi di sforzo tridimensionali).



Stitched



Braided



3D

15



Prodotti di base e semilavorati

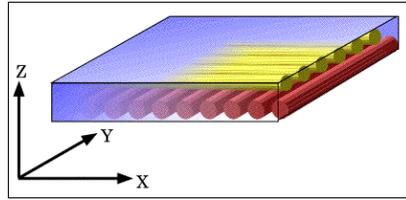
- **Mats:** sono strati di fibre non tessute, disposte aleatoriamente, che sono forniti secchi oppure già impregnati di resina.
- Il comportamento meccanico macroscopico è isotropo.
- L'uso dei mats è in generale riservato a situazioni in cui si ha da un lato necessità di leggerezza e di risposta isotropa, dall'altro dove le caratteristiche meccaniche richieste non sono eccezionali (i mats non hanno delle prestazioni elevate, né in rigidità né in resistenza).
- I vantaggi dei mats risiedono soprattutto nella facilità di messa in opera e di adattabilità alle forme le più diverse e inoltre nel loro costo, più contenuto rispetto ai pannelli a fibre orientate.
- **Lamine pre-impregnate:** sono semilavorati composti da fibre e resina da polimerizzare (in diversi modi).
- Le fibre possono essere disposte in una sola direzione o tessute; il comportamento è sempre anisotropo.

16



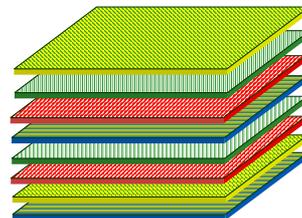
Prodotti di base e semilavorati

- L'uso delle lamine pre-impregnate è riservato alla fabbricazione dei laminati o degli strati esterni dei pannelli sandwich.
- I vantaggi dell'uso dei pre-impregnati sono molteplici; innanzitutto le elevate prestazioni meccaniche e poi la buona risposta al processo di fabbricazione.
- Generalmente, è con l'uso di tecniche che fanno impiego di pre-impregnati che si ottengono i migliori risultati in termini di assenza di difetti di fabbricazione; per queste ragioni, sono quindi utilizzati per la realizzazione di laminati in impieghi strutturali di punta (aviazione, spazio, sport etc.).
- Consideriamo adesso i due tipi di semilavorati, i laminati ed i pannelli sandwich.



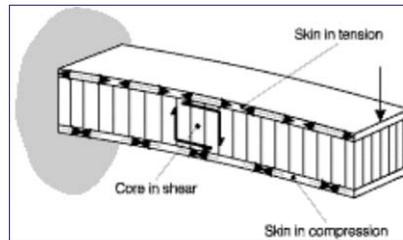
Prodotti di base e semilavorati

- **Laminati:** sono ottenuti per sovrapposizione di lamine, in genere a rinforzo unidirezionale o tessuto, disposte secondo differenti orientazioni.
- Generalmente l'assemblaggio delle lamine avviene per polimerizzazione dell'insieme, a volte per collaggio (per esempio nella tecnologia del legno compensato). Nel primo caso, quindi, la suddivisione in lamine del prodotto finito è una pura convenzione.
- I laminati vengono utilizzati, come materiali strutturali, laddove vi sia da un lato la necessità di elevate prestazioni meccaniche in termini di rigidità, resistenza, comportamento alla fessurazione, e dall'altro l'esigenza di limitare il peso.
- Questi materiali devono essere progettati secondo le necessità ed oggi si affaccia anche l'idea, e la tecnologia, di realizzare laminati con disposizione continuamente variabile delle fibre, in quantità e direzione.



Prodotti di base e semilavorati

- I campi di utilizzo principali sono dunque l'aeronautica e lo sport.
- **Sandwich:** i pannelli sandwich sono la generalizzazione della trave a doppio T al caso bidimensionale.
- Il concetto è quello classico di mettere la parte resistente a flessione laddove serve, all'esterno, e riempire la parte centrale con un materiale leggero (schiume solide, balsa, reticoli a nidi d'ape), preposto a trasmettere gli sforzi di taglio.
- I pannelli sandwich sono dunque utilizzati in quei casi in cui l'imperativo della leggerezza è dominante nelle strutture sollecitate essenzialmente in flessione.
- I campi di applicazione strutturale più importanti sono dunque quello navale, aerospaziale, aeronautico, sportivo.



19



Tecnologie di produzione

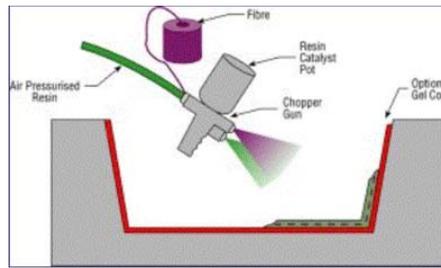
- Vediamo adesso, rapidamente, alcune delle tecnologie di produzione tra le più utilizzate nella fabbricazione dei materiali compositi.
- Queste sono le tecnologie seguenti:
 - a spruzzo;
 - a mano;
 - sotto vuoto;
 - RTM (*Resin Transfer Moulding*);
 - RFI (*Resin Film Infusion*);
 - pre-impregnati (*prepregs*);
 - pultrusione;
 - FW (*Filament Winding*).

20

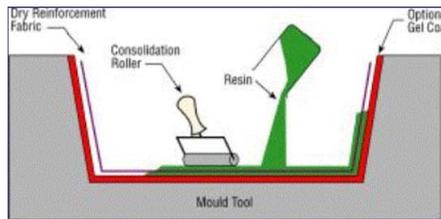


Tecnologie di produzione

- **Tecnologia a spruzzo:** è un getto in pressione di resina e fibre corte pre-miscelate.



- **Tecnologia a mano:** la resina è applicata a mano su uno strato di fibre preapplicato allo stampo.



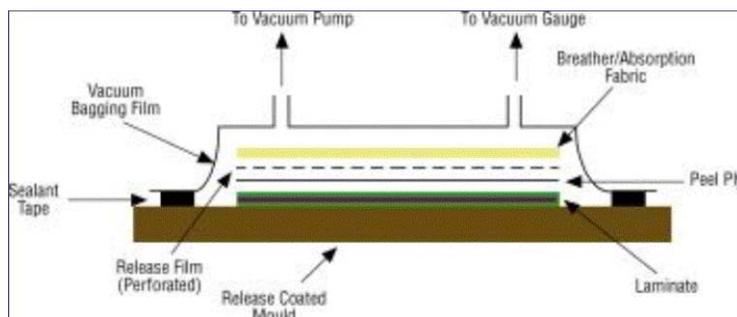
- In entrambi i casi la polimerizzazione avviene, normalmente, a condizioni ambiente, eventualmente con l'aggiunta di catalizzatore.

21



Tecnologie di produzione

- **Tecnologia sotto vuoto:** La polimerizzazione avviene in uno stampo con *vacuum bag*, che permette di comprimere il manufatto a pressione atmosferica.

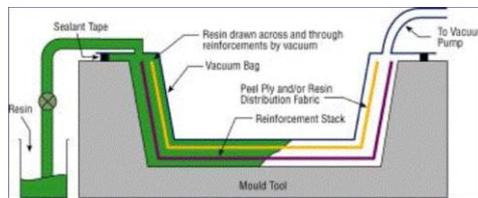
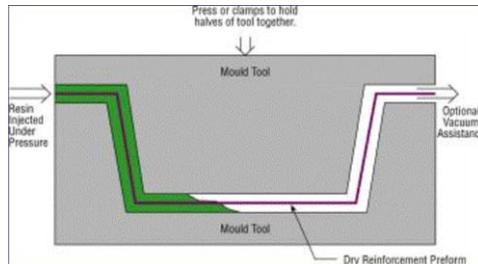


22



Tecnologie di produzione

- **Tecnologia RTM (*Resin Transfer Moulding*)**: il rinforzo è messo a secco nello stampo; in seguito, si procede all'iniezione di resina in pressione, a volte con stampo sotto vuoto.
- La polimerizzazione avviene a temperatura ambiente o a caldo, con o senza catalizzatore.
- Questa tecnologia è la più impiegata nella produzione in grande serie di pezzi a non elevato pregio strutturale.
- Una variante prevede l'iniezione sotto vuoto di resina non in pressione.

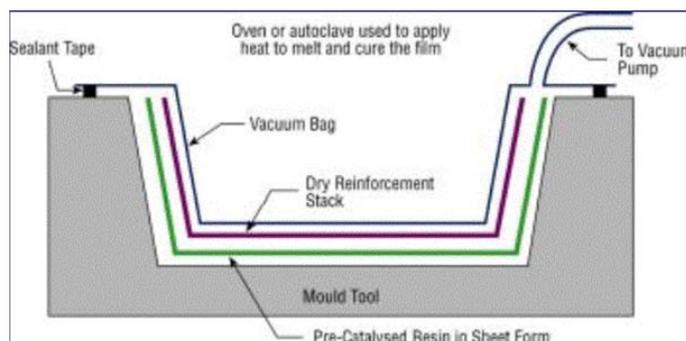


23



Tecnologie di produzione

- **Tecnologia RFI (*Resin Film Infusion*)**: la resina è preapplicata a uno stato semisolido, su uno strato di supporto, e lo stampo è posto sotto vuoto.
- In seguito, la resina viene fatta prima fondere poi polimerizzare tramite apporto di calore.

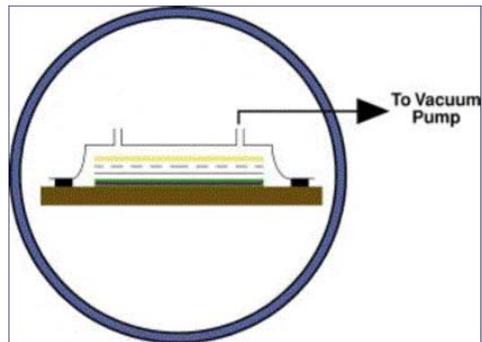


24



Tecnologie di produzione

- **Tecnologia dei pre-impregnati (*prepregs*):** questa tecnologia è quella più utilizzata per realizzare laminati piani, od anche, in autoclave, con certe curvature.
- Il laminato viene preparato a freddo, sovrapponendo i vari strati di preimpregnato.
- Il manufatto così realizzato viene posto in autoclave o in presse scaldanti per polimerizzare sotto pressione e temperatura (circa 180°C).
- Questa tecnologia, molto costosa, permette di ottenere dei componenti meccanici di alto pregio e di buona qualità di produzione, limitando al minimo i difetti di fabbricazione.

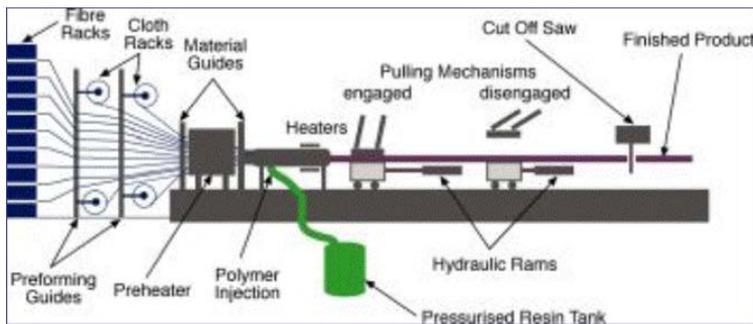


25



Tecnologie di produzione

- **Tecnologia di pultrusione:** viene impiegata industrialmente, per la produzione in grande serie e in continuo di profilati (gli stessi della serie in acciaio).
- La polimerizzazione avviene a caldo e in breve tempo.

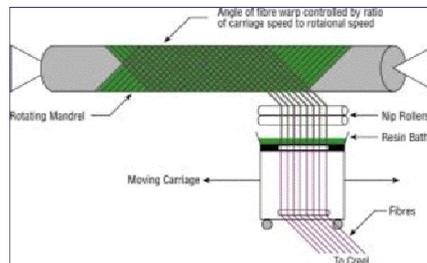


26



Tecnologie di produzione

- **Tecnologia FW (*Filament Winding*)**: è una tecnologia industriale di costruzione di pezzi a simmetria cilindrica o comunque a sezione convessa.
- La fibra è preimpregnata di resina e quindi avvolta in modo regolare e programmato su un mandrino della forma voluta.
- La polimerizzazione può essere a caldo o a temperatura ambiente, tramite catalizzatore o anche tramite raggi UV.
- E' una tecnica molto usata per la costruzione di serbatoi in pressione, ma anche di grandi pezzi, come fusoliere di aerei o corpi di razzi vettori.



27



Alcuni esempi di impieghi e realizzazioni

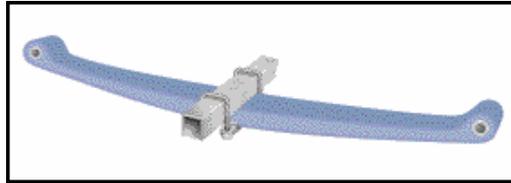
- Possiamo adesso in rassegna una serie di esempi a realizzazioni strutturali in materiale composito, appartenenti essenzialmente ai settori:
 - automobilistico;
 - ferroviario;
 - navale;
 - aeronautico;
 - aerospaziale;
 - sportivo.

28



Alcuni esempi di impieghi e realizzazioni

- **Settore automobilistico**
- Sospensioni a balestra in fibra di vetro.



- Utilizzo di plastiche rinforzate in numerose parti modellate (portiere, paraurti etc).

29



Alcuni esempi di impieghi e realizzazioni

- **Il progetto EuroSpring: Taxi Spring**, sospensioni in fibra di vetro per i taxi di Londra.



30



Alcuni esempi di impieghi e realizzazioni

- Il progetto **EuroSpring**: Trailer Spring, sospensioni per camion in fibra di vetro

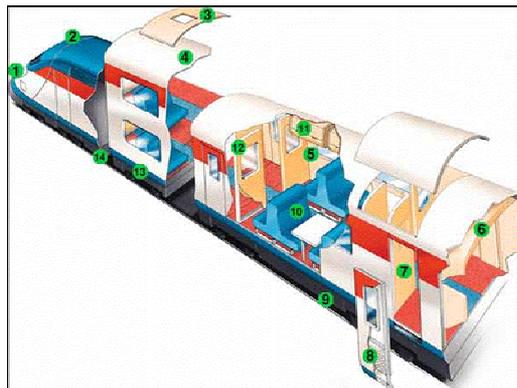


- Peso sospensione in acciaio: 45 kg.
- Peso sospensione in composito: 9 kg.
- Spessore max: 70 mm.

31

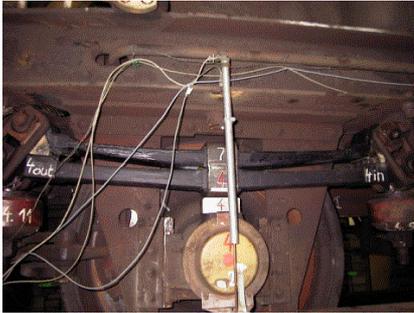
Alcuni esempi di impieghi e realizzazioni

- **Settore ferroviario.**
- Sospensioni in fibra di vetro.
- Parti accessorie non strutturali (pannelli isolanti e fono-assorbenti, parachoc in pannelli sandwich).



32

Alcuni esempi di impieghi e realizzazioni



- Il progetto Eurobogie (Eureka Project 1841) Sospensioni a due stadi in fibra di vetro per vagoni merci

- Carrelli di vagoni merci interamente in fibra di vetro, per la diminuzione dell'inquinamento sonoro.



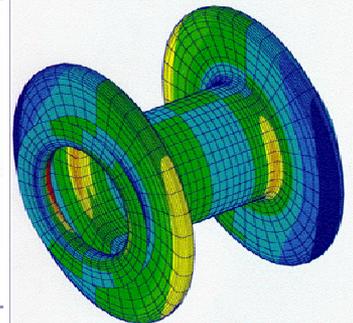
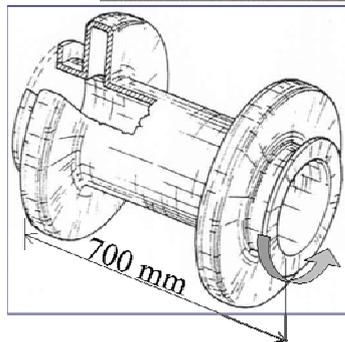
Alcuni esempi di impieghi e realizzazioni

- Due progetti per TGV (collaborazione ALSTOM, EMSE, ISAT)

- Barra antirollio in carbonio-acciaio



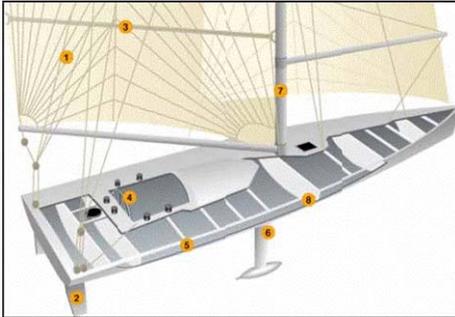
- Giunto Jacquemin in fibra di vetro: trasmissione di potenza



- Il futuro dei TGV: carrello motore in fibra di vetro.

Alcuni esempi di impieghi e realizzazioni

- Settore navale.
- Scafo in sandwich.
- Strutture in composito.
- Albero e vele in carbonio.



35



Alcuni esempi di impieghi e realizzazioni

- Settore aeronautico.
- Molte parti strutturali e aerodinamiche sono in laminato o in sandwich (nell'A380, la parte che opera la giunzione tra fusoliera e ali è interamente in composito).
- Freni in carbonio (brevetto Messier-Bugatti): matrice in carbonio e fibre non tessute in carbonio.



- Pale di eliche e di turbine, anche a controllo passivo del passo.

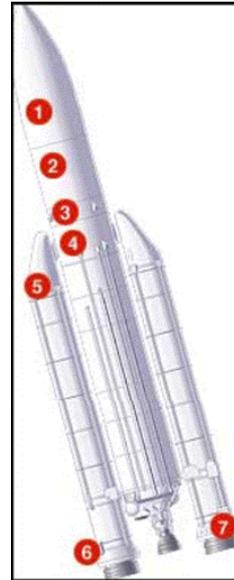
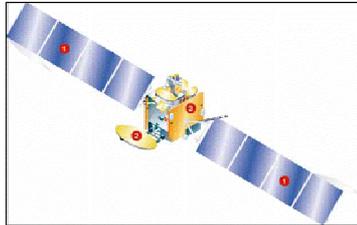


36



Alcuni esempi di impieghi e realizzazioni

- **Settore aerospaziale.**
- Parti strutturali di satelliti e vettori (sandwich Al-C, laminati in C e B).
- Protezioni termiche e strutture a deformazione termica direzionale nulla.
- Il risparmio di circa 1 kg di peso strutturale in un satellite per telecomunicazioni, permette la sua sostituzione con materiale elettronico per la realizzazione di canali di ricetrasmisione il cui affitto permette di finanziare il costo di messa in orbita del satellite!



37



Alcuni esempi di impieghi e realizzazioni

- **Settore sportivo.**
- Scocche e freni in carbonio per vetture da competizione (F1 e formula endurance).
- Biciclette da competizione in carbonio.
- Canoe e kayak in fibra di vetro o di carbonio.
- Sci e racchette da tennis in composito, con anche controllo passivo o attivo delle vibrazioni tramite sistemi piezoelettrici.



38



Generalità sulla meccanica dei compositi

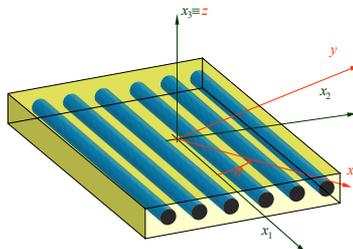
- **I compositi a fibre lunghe dei materiali da progettare:** l'impiego dei materiali compositi permette di risolvere brillantemente quei problemi strutturali dove le proprietà di resistenza e di rigidità devono conciliarsi con le necessità di leggerezza.
- Inoltre, i diversi parametri che determinano il comportamento finale di un composito strutturale offrono al progettista un vasto campo di azione, in cui la *progettazione ottimale del materiale* si afferma come nuova disciplina della meccanica strutturale.
- Tuttavia, i materiali compositi, per la loro natura di *materiali complessi* pongono al progettista dei nuovi problemi, con *fenomeni a volte inattesi e sconosciuti nei materiali tradizionali*.
- **La descrizione dei compositi a diverse scale:** essendo costituito da due fasi un composito è per sua natura un materiale *eterogeneo*.

39



Generalità sulla meccanica dei compositi

- Inoltre, per i compositi rinforzati con fibre lunghe, l'orientazione del rinforzo determina la direzionalità delle proprietà meccaniche di rigidità e resistenza; la risposta meccanica del materiale dipende dalla direzione: i compositi sono, spesso, dei materiali *anisotropi*.
- Questi due aspetti giocano un ruolo decisivo a scale diverse: a un livello *micromeccanico* l'eterogeneità e a un livello *macroscopico* l'anisotropia.
- **L'analisi macroscopica: l'anisotropia:** una lamina rinforzata da fibre orientate ha sempre un comportamento ortotropo.

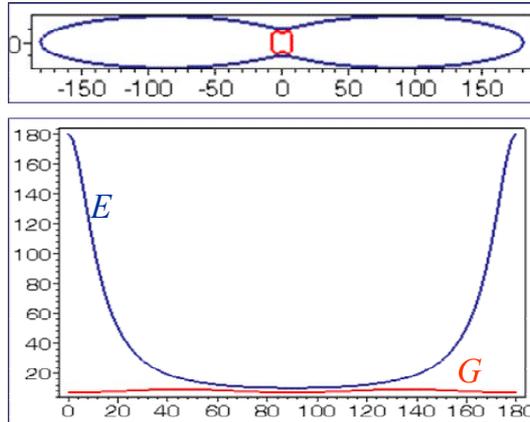


40



Generalità sulla meccanica dei compositi

- Un esempio: il diagramma, direzionale e Cartesiano, del modulo di Young e del modulo a taglio per una lamina in carbonio-epoxy a rinforzo unidirezionale, $V_f=0.7$.



41



Generalità sulla meccanica dei compositi

- **L'analisi microscopica: l'eterogeneità.** Lo scopo dell'analisi micromeccanica è quello di recuperare, dalla conoscenza delle proprietà dei singoli componenti e dalla geometria del composito, delle leggi che descrivano il comportamento del composito a un livello macromeccanico come materiale omogeneo: si cercano dunque delle *leggi di omogeneizzazione*.
- Esistono varie *teorie e modelli di omogeneizzazione*; l'approccio classico considera un volume elementare e significativo di composito e, per un comportamento isotropo lineare dei due componenti, ricava le leggi di omogeneizzazione sulla base dell'ipotesi dell'aderenza perfetta tra fibra e matrice.
- **Meccanica della rottura dei compositi:** il comportamento a rottura dei compositi è influenzato da diversi fattori che ne complicano l'analisi e la possibilità di cogliere il fenomeno con un criterio generale e affidabile come con i materiali omogenei e isotropi.

42



Generalità sulla meccanica dei compositi

- Le principali ragioni di incertezza e difficoltà sono dovute a:
 - anisotropia;
 - eterogeneità;
 - tipo di carico;
 - difetti di fabbricazione.
- L'anisotropia ha tre conseguenze importanti:
 - forte dipendenza delle caratteristiche di resistenza dalla direzione;
 - impossibilità di disaccoppiare in parti sferica e deviatorica l'energia elastica, e dunque impossibilità di utilizzare il criterio di Huber-Hencky-von Mises;
 - non coassialità dei tensori degli sforzi e delle deformazioni.
- L'eterogeneità può influenzare la rottura locale in diversi modi:
 - *pull-out* (sfilamento fibre dalla matrice);
 - instabilità locale delle fibre in compressione;
 - influenza sulla propagazione delle fessure;
 - differente resistenza in trazione e in compressione.

43



Generalità sulla meccanica dei compositi

- **Meccanica dei laminati:** la teoria classica dei laminati permette di ridurre il comportamento delle diverse lamine che compongono un laminato a quello di una sola piastra equivalente.
- Le ipotesi sono quelle classiche delle piastre-lastre: comportamento elastico lineare, piccole deformazioni e piccoli spostamenti, cinematica alla Kirchhoff, stato piano generalizzato di sforzo.
- In tali ipotesi si arriva alla legge fondamentale dei laminati, che ne descrive il comportamento meccanico (è una legge costitutiva).

$$\begin{Bmatrix} \mathbf{N} \\ \mathbf{M} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{B} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}^0 \\ \boldsymbol{\kappa} \end{Bmatrix}$$



- Il comportamento è quindi descritto da tre tensori, **A**, **B** e **D**, che in genere non sono uguali: è come se la piastra finale fosse costituita da materiali diversi secondo il comportamento preso in esame.

44



Generalità sulla meccanica dei compositi

- **Alcuni problemi tipici dei laminati:** nella meccanica dei laminati, si incontrano alcuni fenomeni e problemi sconosciuti nei materiali classici, come ad esempio:
 - delaminazione: rottura interlaminare provocata dalle tensioni interlaminari;
 - tensioni residue: la loro presenza dipende molto dal processo di fabbricazione; in particolare, se polimerizzato a caldo un laminato sarà sempre soggetto a tensioni interlaminari residue che possono essere anche molto importanti e soprattutto di difficile valutazione;
 - tensioni ai bordi: si può vedere, tramite modelli analitici, che in funzione della sequenza degli strati e del carico, si può avere una concentrazione degli sforzi ai bordi liberi, che può essere anche molto elevata e provocare delaminazione;
 - analisi della rottura: la rottura completa di un laminato è un fenomeno progressivo e spesso difficile da cogliere, sia a livello analitico che, per quanto concerne la sua evoluzione, sperimentale.



Generalità sulla meccanica dei compositi

- **Il progetto ottimale dei laminati:** si tratta di una operazione spesso complessa.
- Le difficoltà tipiche dell'ottimizzazione dei laminati sono:
 - forte non linearità (ottimizzazione non convessa);
 - elevata multimodalità;
 - molteplicità degli obiettivi;
 - numero di variabili spesso elevato;
 - soluzioni che a volte i presentano in forma continua;
 - difficoltà relative alla rappresentazione elastica: le trasformazioni cartesiane sono estremamente complesse e non si appoggiano a invarianti tensoriali (come pure la tecnica dei *lamination parameters* basata sui parametri di Tsai e Pagano).
- Poche sono le regole e i metodi utilizzati nella pratica, spesso si tratta di approcci molto semplificati, che restringono molto il campo delle possibilità.



Generalità sulla meccanica dei compositi

- **Verso l'automatizzazione delle scelte di progetto:** il progetto ottimale dei laminati è ancora oggi argomento di ricerca.
- Infatti, i compositi in generale ed i laminati in particolare sono materiali *complessi* e *complicati* e per il loro progetto si devono determinare numerosi parametri e conciliare diversi obiettivi a volte in contrasto tra loro.
- Il progettista deve quindi fare numerose scelte (a partire, per esempio, dalla scelta del miglior materiale con cui realizzare un laminato), per le quali la semplice esperienza a volte non basta.
- L'obiettivo per il futuro è dunque quello di arrivare ad un sistema in grado di compiere le scelte automaticamente, sulla base di criteri definiti matematicamente: il traguardo è *l'ottimizzazione globale dei laminati*.



Bibliografia essenziale

- **Meccanica dei materiali compositi in generale:**
 - Jones R. M., **1975:** *Mechanics of composite materials*. Mc Graw-Hill.
 - Tsai S. W., Hahn H. T., **1980:** *Introduction to Composite Materials*. Technomic.
 - Tsai, S. W., **1985:** *Composite design guide*. Technomic.
 - Turvey G. J., Marshall I. H., **1995:** *Buckling and postbuckling of composite plates*. Chapman & Hall (edited).
 - Pedersen P., **1997:** *Elasticity, anisotropy, laminates*. Corso di elasticità scaricabile all'indirizzo web www.fam.dtu.dk/html/pp.html
 - Vautrin A., **1997:** *Mechanics of Sandwich Structures*, Kluwer (edited).
 - Vasiliev V. V., Morozov E. V., **2001:** *Mechanics and analysis of composite materials*. Elsevier.
 - Reddy J. N., **2004:** *Mechanics of composite plates and shells: theory and analysis*. 2nd Edition. CRC Press.



Bibliografia essenziale

■ Progettazione dei laminati in composito:

- Abrate S., **1994**: Optimal design of laminated plates and shells. *Composite Structures*, v.29, 269-286 (articolo di sintesi).
- Barbero E. J., **1998**: Introduction to composite materials design. Taylor & Francis.
- Gürdal Z., Haftka R. T. & Hajela P., **1999**: Design and optimization of laminated composite materials. J. Wiley & Sons, New York.

■ Teoria dell'anisotropia in meccanica delle strutture:

- Lekhnitskii S. G., **1944**: *Anisotropic plates*. Edizione inglese: S. W. Tsai & T. Cheron, 1968. Gordon & Breach.
- Lekhnitskii S. G., **1950**: *Theory of elasticity of an anisotropic elastic body*. Edizione inglese: P. Fern, 1963. Holden-Day.
- Ting T. C. T., **1996**: Anisotropic elasticity: theory and applications. Oxford University Press.



Bibliografia essenziale

■ Alcuni siti internet sui compositi:

- <http://www.netcomposites.com/>
- <http://www.mdacomposites.org/> (applicazioni strutturali civili)
- <http://callisto.my.mtu.edu/> (corso in linea e applicativi MatCad)
- <http://composite.about.com/>

- **Ringraziamento**: per le informazioni e le illustrazioni dei progetti europei Eurospring e Eurobogie del programma di aiuto alla ricerca Eureka, si ringrazia il Professor Giorgio Jeronimidis dell'Università di Reading, UK.

