



Università degli Studi di Napoli "*Parthenope*"

Dipartimento di Scienze e Tecnologie

Tecnologia delle costruzioni ed allestimento navale

Vincenzo Piscopo

Materiali compositi di interesse navale

Lezione 7 (14/48)

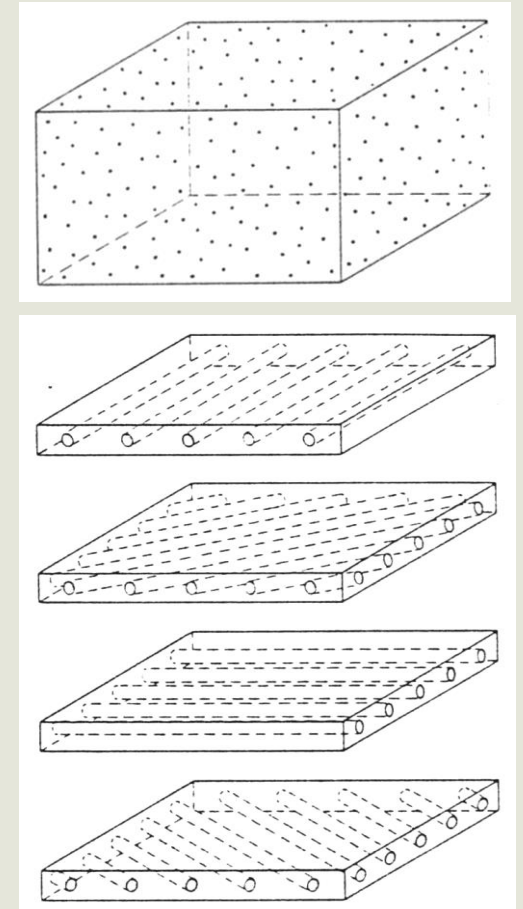
1.1 Classificazione

Si definisce **materiale composito** un materiale artificiale composto da due o più fasi componenti che restano divise tra loro da superfici identificabili. Una delle due fasi è detta **matrice** e conferisce la forma al manufatto. La seconda, immersa nella prima, è detta **rinforzo** e contribuisce prevalentemente alle caratteristiche meccaniche del materiale. In funzione della geometria del rinforzo i materiali compositi si classificano in:

- **compositi particellari:** il rinforzo è annegato in piccole particelle disposte in modo omogeneo all'interno della matrice;
- **compositi fibrosi:** il rinforzo è disposto secondo direzioni prevalenti all'interno della matrice.

In funzione del tipo di matrici i compositi si distinguono nelle seguenti categorie:

- **a matrice polimerica (termoplastica o termoindurente):** i polimeri più diffusi sono le resine poliestere, epossidiche o fenoliche. Le resine termoplastiche possono essere rifuse e riformate, quelle termoindurenti invece non possono essere ulteriormente rifusi dopo che hanno subito il processo di indurimento (reticolazione);
- **a matrice metallica:** acciaio, alluminio, titanio;
- **a matrice ceramica:** nitrato di silicio.



1.2 Fibre

Come detto in precedenza, le fibre garantiscono le opportune caratteristiche meccaniche ai materiali compositi. Le caratteristiche meccaniche sono particolarmente elevate e nettamente migliori di quelle riscontrate in pezzi massicci realizzati con lo stesso materiale, grazie all'**effetto scala**. In altri termini, le piccole dimensioni dei filamenti di fibra, aventi normalmente un diametro tra 0.1 e 0.01 mm garantiscono la **sostanziale mancanza di difetti** con conseguente incremento delle relative caratteristiche meccaniche.

Fibre di vetro

Sono fabbricate mediante un processo di trafilatura. Sono normalmente avvolte su una bobina e ricoperte di appretto. Tale sostanza forma una guaina protettiva e favorisce la formazione di fasci di fibre e la successiva adesione di fibre e matrice.

Fibre di carbonio

Sono fabbricate mediante un processo di grafitizzazione di fibre organiche tessili tra cui in particolare il poliacrilonitrile. Sono caratterizzate da una elevata resistenza a trazione e le proprietà meccaniche sono scarsamente dipendenti dalla temperatura.

Fibre aramidiche

Sono fibre organiche normalmente conosciute con il marchio commerciale kevlar. A differenza delle precedenti le caratteristiche meccaniche si deteriorano sensibilmente con l'aumento della temperatura.

Fibre	ρ t/m ³	E GPa	σ_{UT} MPa	ϵ_{UT} %	Costo relativo
Vetro E	2.55	72	2400	3.0	1
Vetro R	2.50	88	3400	3.5	8
Fibre di carbonio HS	1.74-1.81	248-345	3100-4500	0.9-1.8	45-50
Fibre di carbonio HM	2.00-2.18	520-826	2100-2200	0.3-0.4	250-2700
Kevlar	1.45	124	2800	2.5	15

1.3 Matrici

Come detto in precedenza, le matrici hanno caratteristiche meccaniche modeste e conferiscono prevalentemente la forma al materiale composito. Le matrici di interesse navale sono sempre **resine termoindurenti**. In particolare per favorire il processo di indurimento (reticolazione) si aggiungono alle resine catalizzatori o induritori. In taluni casi si aggiungono anche acceleranti o inibitori che consentono di ridurre o aumentare il tempo di reticolazione della matrice.

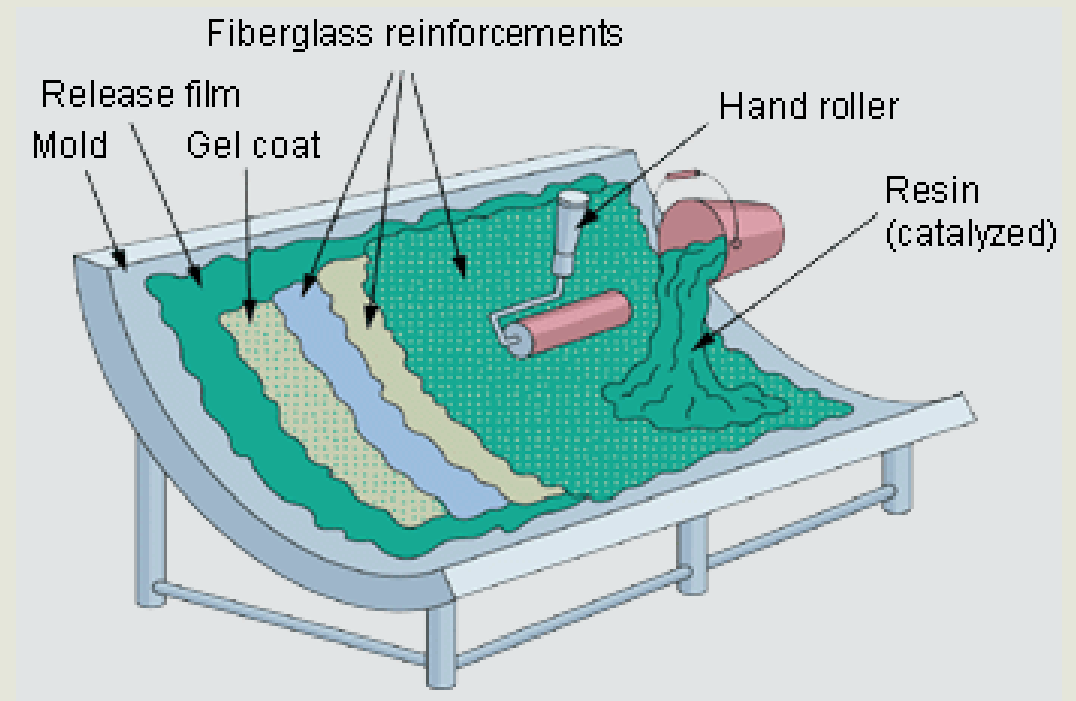
Poliestere	Sono le più diffuse e sono normalmente adoperate in unione con le fibre di vetro. La reticolazione avviene normalmente a temperatura ambiente. Sono suddivise in due categorie: resine <u>ortoftaliche</u> e <u>isoftaliche</u> in funzione del reticolo cristallino. Le prime sono più economiche, mentre le seconde hanno migliori caratteristiche meccaniche e assorbono meno l'acqua.
Vinilestere	Sono simili alle precedenti, ma presentano una migliore resistenza agli urti e agli agenti chimici.
Epossidiche	Hanno caratteristiche meccaniche migliori delle poliestere ed ottima capacità di adesione. Tuttavia presentano costi più elevati che le rendono utilizzate solo per prestazioni elevate, in unione con le fibre di carbonio.
Fenoliche	Hanno un elevato assorbimento di acqua e non sono adatte per superfici a contatto con ambienti umidi e, pertanto, sono scarsamente diffuse in ambito navale.

Fibre	ρ t/m³	E GPa	σ_{UT} MPa	ϵ_{UT} %	Costo relativo
Poliestere ortoftaliche	1.23	3.2	65	2.0	0.9
Poliestere isoftaliche	1.21	3.6	60	2.5	1.0
Vinilestere	1.12	3.4	83	5.0	1.8
Epossidiche	1.20	3.0	85	5.0	2.3
Fenoliche	1.15	3.0	50	2.0	0.8

2.1 Metodi di fabbricazione: classificazione

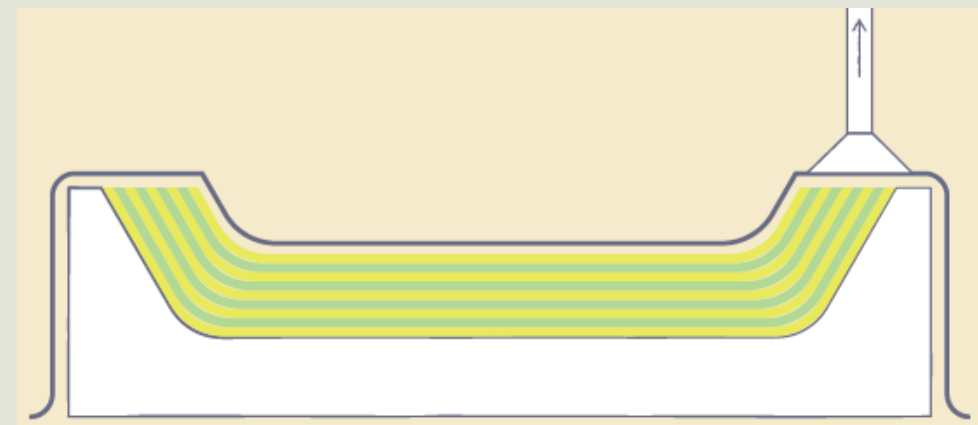
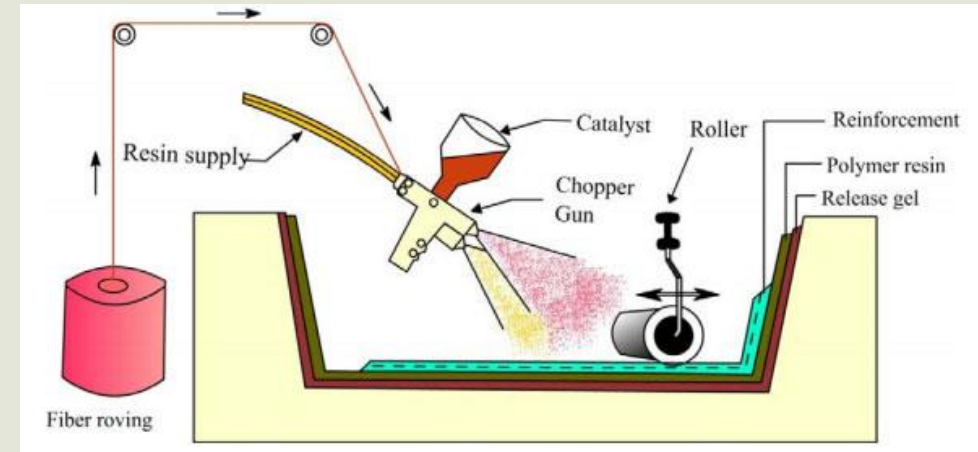
I metodi di fabbricazione degli scafi in materiale composito sono sostanzialmente di 3 tipi in funzione della diversa modalità di impregnazione delle fibre con le matrici:

- **Formatura per contatto a mano (*Hand lay-up process*):** è un processo a stampo aperto. All'interno dello stampo sono via via posizionati ed impregnati strati di rinforzo fino a raggiungere lo spessore desiderato. L'operazione di impregnazione è eseguita a mano con pennelli ed è seguita dalla rullatura per compattare il materiale ed espellere eventuali bolle d'aria. Lo stampo è inizialmente rivestito con resine impermeabili, dette *gel coat*, che oltre ad evitare l'impregnazione dello stratificato con acqua, migliorano la finitura superficiale esterna dello scafo. Gli strati sono posti sequenzialmente sullo stampo (mold) che, pertanto, garantisce la forma voluta al manufatto.



2.1 Metodi di fabbricazione: classificazione

- **Formatura per contatto a spruzzo (*Spray lay-up process*):** con questa tecnica di formatura, la fibra sminuzzata viene mescolata con la resina ed il catalizzatore e successivamente spruzzata all'interno dello stampo mediante una apposita pistola. Si procede successivamente alla rullatura. Con tale tecnica è possibile ridurre i costi della lavorazione, ma il controllo dello spessore dello stratificato è meno accurato rispetto alla tecnica precedente.
- **Formatura con sacco sottovuoto (*Vacuum lay-up process*):** con questa tecnica di formatura lo stratificato viene ricoperto con un foglio di materiale plastico, detto sacco, sigillato al contorno; con una pompa si aspira l'aria creando pressoché il vuoto. Lo stratificato è pertanto sottoposto, durante la reticolazione, alla pressione atmosferica che agendo uniformemente garantisce un elevato grado di impregnazione del rinforzo rispetto alle tecniche precedenti.



3.1 Proprietà dei materiali compositi: frazioni ponderali e volumetriche

I materiali compositi sono eterogeni, benché costituiti da fasi componenti (fibra e matrice) che invece possono ritenersi singolarmente omogenee e isotrope. A livello macroscopico i compositi possono essere trattati come materiali omogeneo e anisotropi (le caratteristiche meccaniche variano in funzione della direzione dei carichi applicati). Le proprietà meccaniche possono essere definite partendo dalle seguenti definizioni:

- v_c e w_c sono il volume e il peso del composito;
- v_f e w_f sono il volume e il peso del rinforzo;
- v_m e w_m sono il volume e il peso della matrice.

In assenza di vuoti valgono le due seguenti equazioni:

$$w_c = w_m + w_f \quad \text{e} \quad v_c = v_m + v_f$$

che possono essere riscritte come segue:

$$\frac{w_m}{w_c} + \frac{w_f}{w_c} = 1 \quad \text{e} \quad \frac{v_m}{v_c} + \frac{v_f}{v_c} = 1$$

I rapporti adimensionali precedenti si definiscono rispettivamente frazioni ponderali della matrice e delle fibre e frazioni volumetriche della matrice e della fibra:

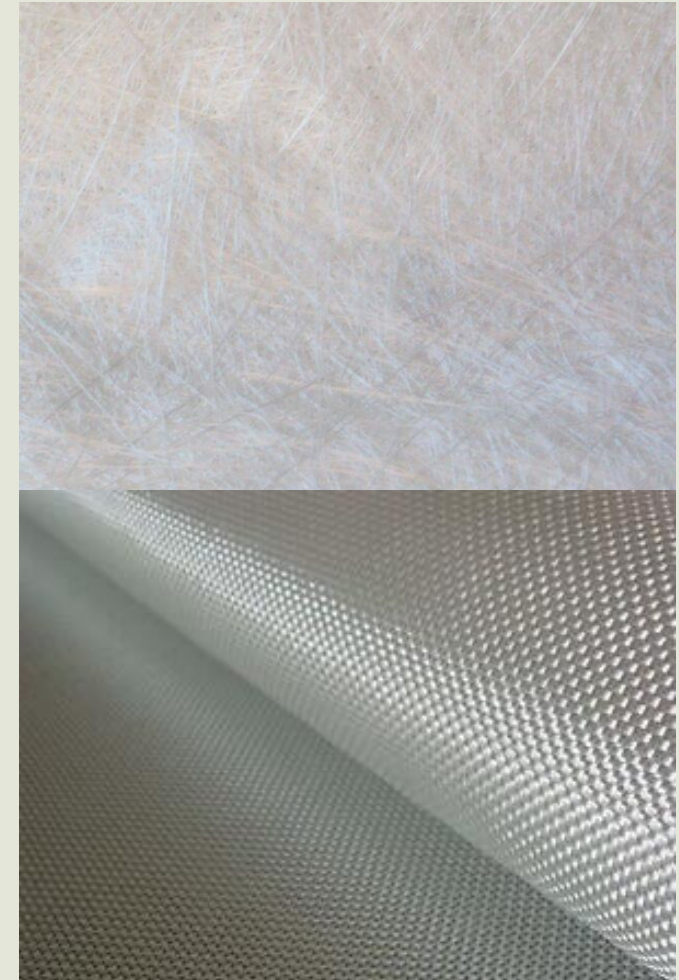
$$W_m + W_f = 1 \quad \text{e} \quad V_m + V_f = 1$$

Per gli scafi in vetroresina, ovvero realizzati con fibre di vetro E unite a resine poliestere, la frazione ponderale di matrice si definisce anche **grado di impregnazione** o **glass content** (g_c).

3.2 Proprietà dei materiali compositi: gli stratificati

I termini adimensionali precedentemente introdotti possono essere utili per determinare alcune proprietà meccaniche dei materiali compositi. In particolare si definisce **stratificato** una serie di lamine sovrapposte secondo una assegnata **sequenza di laminazione**. Le fibre maggiormente adoperate sono:

1. **Feltri (*Mat*)**: sono composti da fili di fibra di vetro disposti in maniera omogenea ma con orientamento casuale. Sono caratterizzati da una elevata impregnabilità con resine poliestere, epossidiche e vinilestere e sono particolarmente indicati per la realizzazione di calchi e manufatti in vetroresina anche di forma complessa e per eseguire riparazioni. Dal momento che le fibre sono disposte in modo casuale, le caratteristiche meccaniche sono isotrope nel piano della fibra.
2. **Stuoie (*Roving*)**: sono veri e propri tessuti in fibra di vetro a trama grossa, in cui un filo di trama scavalca uno di ordito, disposto a 90° rispetto al precedente, per tutta la larghezza e la lunghezza del tessuto. Contrariamente al mat, le fibre sono orientate secondo due direzioni ortogonali e pertanto, le caratteristiche meccaniche sono fortemente anisotrope e massime secondo le direzioni della trama e dell'ordito.



3.2 Proprietà dei materiali compositi: gli stratificati

Sia i feltri che le stuoie sono caratterizzate da una assegnata **grammatura** (g/m^2) che misura il peso della fibra per unità di superficie ed è implicitamente un indice delle sue caratteristiche meccaniche.

In ambito navale, soprattutto nella nautica da diporto, si ricorre generalmente alla **vetroresina**, dal momento che quest'ultima rappresenta uno dei materiali compositi aventi costo minore, anche se normalmente pari a 3-5 volte quello dell'acciaio ordinario. La maggior parte degli scafi sono realizzati mediante formatura per contatto a mano o a spruzzo alternando normalmente feltri e stuoie come di seguito specificato

- **Feltri:** hanno grammature comprese tra 300 e 600 g/m^2 , fibre lunghe tra 25 e 50 mm con gradi di impregnazione tra 0.25 e 0.30,
- **Stuoie:** hanno grammature comprese tra 400 e 800 g/m^2 con gradi di impregnazione tra 0.45 e 0.55. Normalmente non si adoperano grammature superiori a meno che non si adotti la tecnica di formatura sottovuoto, dal momento che risulterebbero di difficile impregnazione mediante le tecniche per contattato a mano o a spruzzo.

Si definisce **sequenza di laminazione** la successione di rinforzi che determina complessivamente il laminato. Generalmente la sequenza tipica si basa sull'alternanza di feltri e di stuoie.

3.2 Proprietà dei materiali compositi: gli stratificati

Sia i feltri che le stuoie sono caratterizzate da una assegnata **grammatura** (g/m^2) che misura il peso della fibra per unità di superficie ed è implicitamente un indice delle sue caratteristiche meccaniche.

In ambito navale, soprattutto nella nautica da diporto, si ricorre generalmente alla **vetroresina**, dal momento che quest'ultima rappresenta uno dei materiali compositi aventi costo minore, anche se normalmente pari a 3-5 volte quello dell'acciaio ordinario. La maggior parte degli scafi sono realizzati mediante formatura per contatto a mano o a spruzzo alternando normalmente feltri e stuoie come di seguito specificato

- **Feltri:** hanno grammature comprese tra 300 e 600 g/m^2 , fibre lunghe tra 25 e 50 mm con gradi di impregnazione tra 0.25 e 0.30,
- **Stuoie:** hanno grammature comprese tra 400 e 800 g/m^2 con gradi di impregnazione tra 0.45 e 0.55. Normalmente non si adoperano grammature superiori a meno che non si adotti la tecnica di formatura sottovuoto, dal momento che risulterebbero di difficile impregnazione mediante le tecniche per contattato a mano o a spruzzo.

Si definisce **sequenza di laminazione** la successione di rinforzi e matrici che determina complessivamente il laminato. Generalmente la sequenza tipica si basa sull'alternanza di feltri e di stuoie.

3.2 Proprietà dei materiali compositi: gli stratificati

Le caratteristiche dello stratificato, ovvero la sua massa areica m in kg/m² e il suo spessore t in mm sono determinati mediante le seguenti relazioni:

$$m = \sum_{i=1}^n m_i \quad e \quad t = \sum_{i=1}^n t_i$$

avendo indicato con m_i e t_i la massa areica e lo spessore dell' i -ma lamina dello stratificato (unione di rinforzo e matrice). Tali grandezze si determinano mediante le seguenti relazioni:

$$m_i = \frac{p_i}{1000} \left(1 + \frac{1 - g_{c,i}}{g_{c,i}} \right) \quad e \quad t_i = \frac{1}{1000} \left(\frac{p_i}{\rho_f} + \frac{1 - g_{c,i}}{g_{c,i}} \frac{p_i}{\rho_m} \right)$$

dove:

- p_i è la grammatura dell' i -mo strato di rinforzo in g/m²;
- ρ_f è la densità del rinforzo in g/cm³, normalmente pari a 2.56 per scafi in vetroresina;
- ρ_m è la densità della matrice in g/cm³, normalmente pari a 1.20 per scafi in vetroresina;
- $g_{c,i}$ è il glass content dell' i -mo strato di rinforzo.

3.3 Proprietà dei materiali compositi: sequenza di laminazione

In tabella è indicata una sequenza di laminazione tipo per uno stratificato di una imbarcazione in vetroresina con glass content medio pari a 0.48. Lo stratificato ha una massa areica totale pari a 9.585 kg/m² di cui 4.600 kg/m² sono del rinforzo e 4.585 kg/m² sono di matrice.

N	tipo	p _i g/m ²	t _i mm	m _i kg/m ²
1	MAT	300	0.388	0.625
2	R	500	0.647	1.042
3	MAT	300	0.388	0.625
4	R	500	0.647	1.042
5	MAT	300	0.388	0.625
6	R	500	0.647	1.042
7	MAT	300	0.388	0.625
8	R	500	0.647	1.042
9	MAT	300	0.388	0.625
10	R	500	0.647	1.042
11	MAT	300	0.388	0.625
12	MAT	300	0.388	0.625
		4600	5.951	9.585

Alcune caratteristiche meccaniche dello stratificato possono essere direttamente determinate in funzione del suo *glass content*, mediante utilizzo di formula fornite dagli Enti di Classifica. Si riportano di seguito quella per la determinazione del Modulo di Young (modulo di elasticità) e del carico ultimo a trazione, entrambi in MPa:

$$E = 37000g_c - 4750$$

$$\sigma_{uT} = 1278g_c^2 - 510g_c + 123$$

In alternativa le caratteristiche meccaniche del profilato possono essere determinate mediante prove sperimentali su un provino avente la stessa sequenza di laminazione.