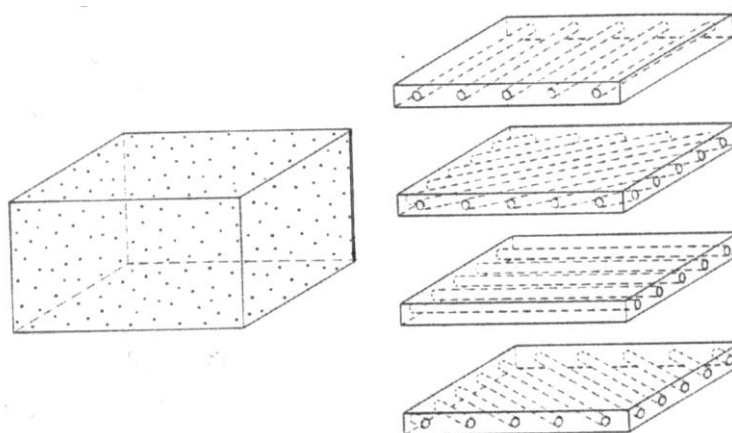


4. Scafi in plastica rinforzata.

Si dice composito un materiale artificiale composto da due o più fasi componenti che restano divise tra loro da superfici identificabili. Normalmente una fase, detta matrice, è continua e dà la forma al manufatto; in essa è immersa l'altra fase, detta rinforzo, che è discontinua e contribuisce in misura prevalente alle caratteristiche meccaniche del materiale. Si conviene che le proprietà del composito debbano differire apprezzabilmente da quelle delle singole fasi.

In dipendenza della geometria del rinforzo si hanno:

- compositi particellati;
- compositi fibrosi.



Compositi particellati e fibrosi

In dipendenza della natura della matrice, si hanno:

- compositi a matrice polimerica (termoplastica, termoindurente);
- compositi a matrice metallica (acciaio, alluminio, titanio);
- compositi a matrice ceramica (nitruro di silicio).

Quelli di interesse per il campo navale, nonché i più diffusi per applicazioni strutturali in genere, sono i compositi fibrosi a matrice polimerica, detti comunemente plastici rinforzati. Essi sono diffusamente utilizzati per la nautica da diporto; in tali applicazioni sono più economici del legno ed inoltre i costi di costruzione sono inferiori a quelli dell'acciaio per lunghezze inferiori a circa 25 m, anche superiori in climi tropicali ove la corrosione dell'acciaio è maggiore. Questi costi non vanno confusi con quelli del materiale, e difatti la vetroresina presenta un costo per unità di peso che è circa quattro volte quello dell'acciaio ordinario. Un'altra applicazione tipica riguarda i cacciamine, essendo i plastici rinforzati materiali non magnetici. Sono stati utilizzati compositi anche per paratie e per superfici di controllo di sommergibili; se ne sta studiando l'applicazione alle eliche.

Si dicono polimeri quelle sostanze naturali od artificiali a struttura macromolecolare composte da catene di molecole semplici dette monomeri. Polimeri naturali sono, ad esempio, la cellulosa, le proteine, il caucciù; i polimeri di sintesi più diffusi sono le materie plastiche, o

resine sintetiche; esse sono caratterizzate dall'assumere in determinate condizioni una consistenza plastica.

Si definiscono termoplastiche le resine che, per effetto di un innalzamento di temperatura, passano dallo stato di solido duro a quello di liquido viscoso; tale rammollimento è dovuto ad una trasformazione fisica temporanea e non ad una reazione chimica, per cui il ciclo è ripetibile. Queste resine, rispetto alle termoindurenti, sono meno resistenti alle alte temperature.

Le resine termoindurenti invece, grazie ad un riscaldamento a temperatura opportuna ed in presenza od assenza di catalizzatori od indurenti, subiscono una trasformazione chimica irreversibile (reticolazione) ed induriscono permanentemente, per cui lo stato di plasticità non è più ripetibile. Sono queste le resine attualmente utilizzate nei plastici rinforzati.

Le fibre.

Le fibre possono essere di vetro, di carbonio, aramidiche (kevlar), di boro. Le loro caratteristiche meccaniche sono straordinariamente elevate, nettamente migliori di quelle riscontrate in pezzi massicci realizzati con lo stesso materiale; tale effetto scala è attribuito alla sostanziale mancanza di difetti dovuta alle piccole dimensioni delle fibre; queste sono difatti dei fili del diametro di circa 0.01 mm, salvo le fibre di boro che presentano un diametro dell'ordine di 0.1 mm.

Le fibre di vetro sono fabbricate per trafilatura; prima di essere avvolte sulla bobina, le fibre sono ricoperte da appretto, che forma una guaina di protezione delle singole fibre e favorisce la formazione di fasci di fibre e, successivamente, l'adesione di fibre e matrice. Le proprietà delle fibre dipendono dalla composizione del bagno di fusione; il tipo più comune è il vetro E, detto elettrico; si ricordano ancora: il vetro M, caratterizzato da un maggior modulo di elasticità, il vetro S, caratterizzato da un maggior carico di rottura, ed il vetro R, caratterizzato dal resistere anche ad alta temperatura. La vetroresina è la plastica rinforzata più diffusa (e anche più antica: il primo esemplare fu prodotto nel 1940).

Le fibre di carbonio si ottengono grafitizzando in atmosfera inerte e ad elevata temperatura, oltre 1800°C, fibre organiche tessili dette precursori, come il poliacrilonitrile che è il più diffuso. Durante il processo, le fibre sono sottoposte a trazione e l'entità di tale sforzo determina le proprietà meccaniche del prodotto, cioè all'aumentare della trazione aumenta il modulo, ma diminuisce la resistenza. Si distinguono pertanto le fibre ad alto modulo di elasticità, HM High Modulus, da quelle ad elevata resistenza, HT High Tensile strength.

Le aramidiche sono fibre organiche, e per questo le caratteristiche meccaniche si deteriorano sensibilmente con l'aumento della temperatura. Esse furono commercializzate nel 1972 dalla Du Pont de Nemours col marchio di kevlar. I tipi più diffusi sono il kevlar 29, che si caratterizza per l'elevata resistenza agli urti, ed il kevlar 49, che si caratterizza per l'elevata resistenza meccanica e l'elevata rigidità, e quindi meglio si presta ad impieghi strutturali.

Le fibre di boro presentano proprietà meccaniche eccezionali, ma il loro costo altrettanto eccezionale ne limita l'applicazione a casi speciali. La fabbricazione consiste nel

far condensare vapori di boro su un filamento di tungsteno riscaldato alla temperatura di 1100°C ed immerso in una miscela di tricloruro di boro ed idrogeno.

Commercialmente, il formato più semplice di fibre è il roving, avvolto su bobina; il roving è un gruppo di fili elementari paralleli tra loro. Dal roving possono poi ottenersi:

- feltri a fibre spezzate (CSM Chopped Strand Mat);
- feltri unifilari;
- lamine unidirezionali (UD UniDirectional laminate);
- stuoie (WR Woven Roving laminate);
- tessuti (fabric o cloth laminate).

Le matrici.

La matrice può essere di resina poliestere (ortoftalica, isoftalica), vinilestere, epossidica, fenolica, siliconica. Perché avvenga la reticolazione, si aggiungono alle resine catalizzatori o induritori; i primi sono utilizzati nelle matrici poliestere e non partecipano alla reazione, mentre i secondi, impiegati nelle altre matrici, vi prendono parte. Si utilizzano pure acceleranti ed inibitori per regolare il tempo di reticolazione.

Le resine poliestere sono le più diffuse, tipicamente utilizzate con le fibre di vetro. Esse sono disponibili allo stato liquido in soluzione con lo stirene; la vita della soluzione è compresa tra 3 e 12 mesi, in dipendenza del rapporto di diluizione e della temperatura di conservazione. La reticolazione avviene a temperatura ambiente e ciò riduce i costi di produzione. Le ortoftaliche sono più economiche delle isoftaliche, che però hanno migliori caratteristiche meccaniche e assorbono meno l'acqua; per questo motivo le isoftaliche sono diffusamente utilizzate per il gel coat.

Le resine vinilestere, simili alle poliestere, sono più resistenti agli urti, più resistenti agli agenti chimici e più lavorabili, ma più costose.

Le resine epossidiche, disponibili sotto forma di fluido viscoso, presentano caratteristiche meccaniche migliori delle poliestere ed ottime capacità di adesione alle fibre. La temperatura per avere tempi di reticolazione compatibili con le esigenze produttive è elevata, anche prossima a 100°C, ed inoltre sono più costose; ciò porta a costi di produzione maggiori rispetto alle matrici poliestere, per cui sono utilizzate solo per prestazioni elevate, tipicamente insieme alle fibre di carbonio.

Le resine fenoliche, rispetto alle poliestere, presentano un elevato assorbimento d'acqua per cui non sono adatte a superfici bagnate; per altro aspetto, hanno una ridotta emissione di fumi a temperature elevate. Esse sono state le prime ad essere state prodotte; ci si riferisce in particolare alla bachelite, il cui processo di fabbricazione fu brevettato nel 1909 da tal Baekeland, da cui il nome. Le matrici fenoliche sono più economiche delle poliestere, ma la tecnologia di lavorazione è più complessa per cui il costo del materiale messo in opera è più elevato.

Le resine siliconiche sono inorganiche in quanto in esse, strutturalmente simili ai polimeri organici, il silicio prende il posto del carbonio. Tale proprietà rende le resine siliconiche resistenti anche alle temperature elevate.

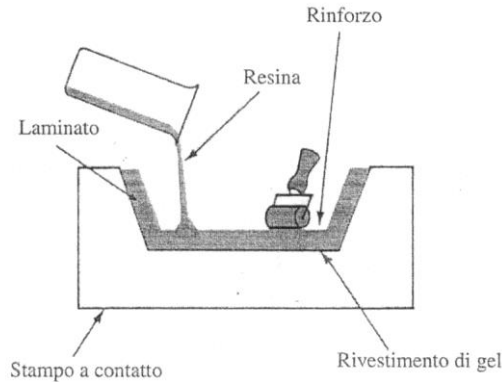
<i>Proprietà tipiche di fibre e matrici</i>						
	ρ g/cm ³	E GPa	ν	σ_{UT} MPa	ϵ_{UT} %	costo relativo
E glass	2.55	72.0	.2	2400	3.0	1
R-glass	2.50	88.0	.2	3400	3.5	8
HS carbon	1.80	345.0		3100	0.9	45÷50
	1.74	297.0		4100	1.4	
	1.81	248.0		4500	1.8	
HM carbon	2.00	520.0		2100	0.4	250÷2700
	2.18	826.0		2200	0.3	
kevlar	1.45	124.0		2800	2.5	15
polyester orthophtalic	1.23	3.2	.36	65	2	.9
polyester isophtalic	1.21	3.6	.36	60	2.5	1.0
vinyl ester	1.12	3.4		83	5	1.8
epoxy	1.2	3.0	.37	85	5	2.3
phenolic	1.15	3.0		50	2	.8

<i>Typical properties of sandwich core materials</i>					
	ρ g/cm ³	shear modulus MPa	shear strength MPa	through-thickness Young's modulus MPa	through-thickness compress. strength MPa
PVC foam	.075	25	.8	50	1.1
	.13	40	1.9	115	3.0
	.19	50	2.4	160	4.0
PU foam	.10	10	.6	39	1.0
	.19	30	1.4	83	3.0
Syntactic foam	.4	430		1200	10
	.8	1000	21	2600	45
Balsa	.10	110	1.4	800	6
	.18	300	2.5	1400	13
Aluminium honeycomb	.07	455/205	2.2/1.4	965	3.5
	.13	895/365	4.8/3.0	2340	9.8
GRP honeycomb	.08	117/52	2.3/1.4	580	5.7
Aramid paper honeycomb	.065	53/32	1.7/1.0	193	3.9
Syntactic foam is made by mixing microspheres with a resin.					
Pairs of numbers refer to longitudinal and transverse directions of exagonal honeycomb.					

Metodi di fabbricazione.

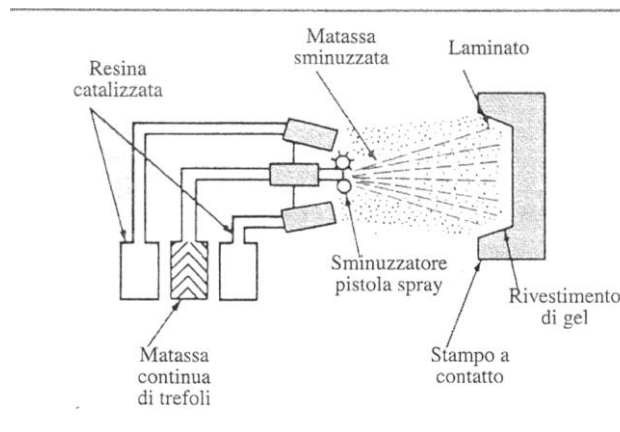
Formatura per contatto a mano: è un processo a stampo aperto. All'interno dello stampo sono via via posizionati ed impregnati strati di rinforzo fino a raggiungere lo spessore desiderato; l'operazione di impregnazione è eseguita a mano con pennelli ed è seguita da un'operazione di rullatura per compattare il materiale ed espellere le bolle d'aria. Lo stampo è inizialmente rivestito con uno strato di resine particolari, dette gel coat, che migliorano la

finitura della superficie esterna dello scafo e possono essere colorate, evitando così la verniciatura.



Schema di formatura per contatto a mano.

Formatura per contatto a spruzzo: con questa tecnica di formatura, fibre corte, ottenute tagliando roving, sono mescolate con la resina ed il catalizzatore in un'apposita pistola e spruzzate all'interno dello stampo; si procede successivamente alla rullatura. Con tale formatura è possibile ridurre sia i costi del rinforzo, sia quelli di lavorazione, ma il controllo dello spessore è meno accurato e possono realizzarsi gradi di impregnazioni minori.



Schema di formatura per contatto a spruzzo.

Formatura con sacco sotto vuoto: in questo tipo di formatura lo stratificato viene ricoperto con un foglio di materiale plastico, detto sacco, sigillato al contorno; con una pompa si crea il vuoto, per cui lo stratificato è sottoposto, durante la reticolazione, alla pressione atmosferica. In tal modo si migliora la qualità del prodotto: la finitura della superficie interna è migliore; è minore il contenuto d'aria nel manufatto; possono ottenersi gradi di impregnazione più elevati.

Processo di pull-trusion: il processo viene utilizzato per la fabbricazione di pezzi a sezione trasversale costante quali profilati strutturali; in esso trefoli di fibre continue vengono impregnati e quindi fatti passare attraverso uno stampo in acciaio riscaldato, che determina la forma del pezzo, tramite l'azione esercitata da rulli di tiro; si è in presenza quindi di una formatura plastica ibrida che assomma quelle di trafilatura e di estrusione. Il procedimento si presta ad essere automatizzato, il che riduce il costo di fabbricazione.

Proprietà del composito.

Il composito è un materiale eterogeneo costituito da componenti che sono sostanzialmente omogenei ed isotropi. A livello macroscopico, pure il composito può essere trattato come un materiale omogeneo, anche se in generale anisotropo; le sue proprietà dipendono da quelle delle fasi componenti e dai relativi contenuti.

Siano per una assegnata quantità di composito:

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

In assenza di vuoti, l'eguaglianza di pesi e volumi porge:

$$w_c = w_m + w_f$$

$$v_c = v_m + v_f$$

Si definiscono:

- la frazione volumetrica, o volume relativo, della matrice $V_m = v_m/v_c$
- la frazione volumetrica, o volume relativo, delle fibre $V_f = v_f/v_c$
- la frazione ponderale, o peso relativo, della matrice $W_m = w_m/w_c$
- la frazione ponderale, o peso relativo, delle fibre $W_f = w_f/w_c$

La frazione ponderale delle fibre è la grandezza più comunemente utilizzata nella pratica costruttiva ed è diffusamente denominata grado di impregnazione.

Valgono le seguenti:

$$W_m + W_f = 1$$

$$V_m + V_f = 1$$

Le eguaglianze di pesi e volumi possono risciversi come segue:

$$\rho_c v_c = \rho_m v_m + \rho_f v_f$$

$$\frac{w_c}{\rho_c} = \frac{w_m}{\rho_m} + \frac{w_f}{\rho_f}$$

Si ricavano pertanto le seguenti espressioni della massa volumica del composito:

$$\rho_c = \rho_m V_m + \rho_f V_f$$

$$\frac{1}{\rho_c} = \frac{W_m}{\rho_m} + \frac{W_f}{\rho_f}$$

Si hanno le seguenti relazioni tra frazioni volumetriche e ponderali

$$W_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} V_m$$

$$W_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f$$

Da

$$V_f = \frac{\rho_c}{\rho_f} W_f = \frac{W_f}{\rho_f \left(\frac{W_m}{\rho_m} + \frac{W_f}{\rho_f} \right)}$$

si ricava

$$V_f = \frac{W_f}{W_f + (1 - W_f) \frac{\rho_f}{\rho_m}}$$

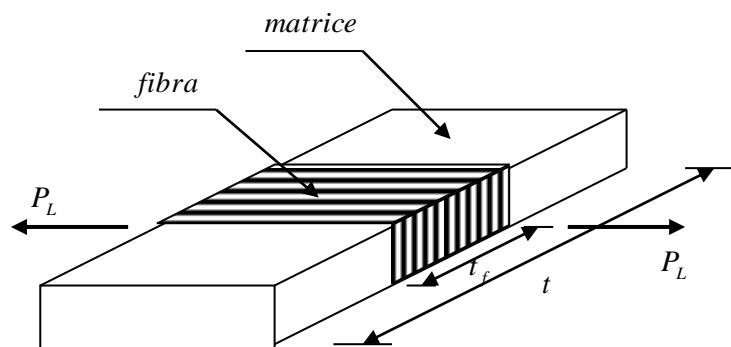
La precedente mostra che per una assegnata coppia di materiali componenti la frazione volumetrica del composito, e così la massa volumica, dipende solo dal grado di impregnazione. In particolare, assumendo per la vetroresina $\rho_f = 2.56 \text{ g/cm}^3$ e $\rho_m = 1.20 \text{ g/cm}^3$ si traggono le seguenti corrispondenze.

$W_f =$.25	.35	.50
$V_f =$.14	.20	.32

Regola delle miscele.

Si considera un composito unidirezionale, soggetto a trazione secondo la direzione delle fibre. Per congruenza, gli allungamenti di composito, fibre e matrice sono gli stessi:

$$\varepsilon_L = \varepsilon_m = \varepsilon_f$$



Modello di un composito unidirezionale teso longitudinalmente.

Per l'equilibrio delle forze, deve essere

$$P_L = \sigma_L t = \sigma_m t_m + \sigma_f t_f$$

da cui

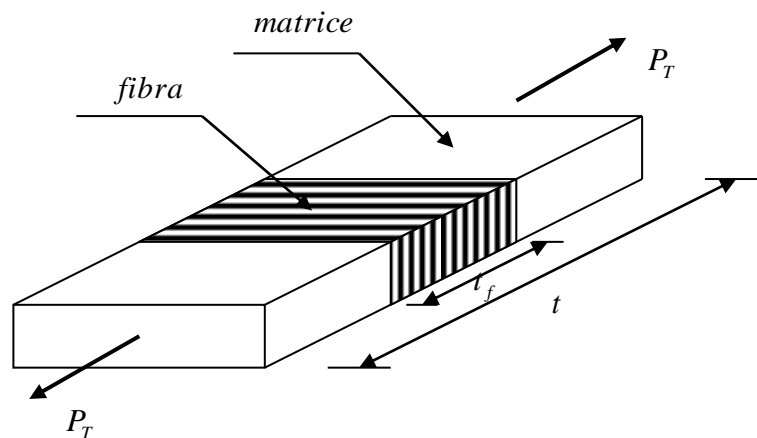
$$\sigma_L = \sigma_m V_m + \sigma_f V_f$$

Pertanto il modulo di elasticità normale nella direzione longitudinale, quella parallela alle fibre, è

$$E_L = E_m V_m + E_f V_f$$

Nel caso di carico trasversale, l'equilibrio delle forze porge

$$\sigma_T = \sigma_m = \sigma_f$$



Modello di un composito unidirezionale teso trasversalmente.

L'allungamento trasversale è

$$\varepsilon_T t = \varepsilon_m t_m + \varepsilon_f t_f$$

da cui

$$\varepsilon_T = \varepsilon_m V_m + \varepsilon_f V_f$$

Si ricava pertanto il modulo di Young trasversale

$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m}$$

Da ragionamenti simili, si definiscono il modulo di elasticità tangenziale¹ ed il modulo di contrazione trasversale, quello maggiore:

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{V_m}{G_m}$$

¹ Si ricorda che per i materiali isotropi, quali si considerano fibre e matrice, vale il seguente legame tra i tre moduli elastici:

$$\nu_{LT} = \nu_m V_m + \nu_f V_f$$

L'altro coefficiente di Poisson, detto minore, si ottiene dalla condizione di reciprocità

$$\frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T}$$

Moduli elastici delle lamine.

La regola delle miscele mostra che il modulo di Young longitudinale ed il coefficiente di Poisson dipendono prevalentemente dalle proprietà del rinforzo, mentre il modulo trasversale ed il modulo di Coulomb dipendono prevalentemente dalle proprietà della matrice. L'esperienza ha poi mostrato che i valori al vero delle ultime due grandezze non sono rappresentate soddisfacentemente dalla regola delle miscele, per cui sono state proposte numerose formule alternative di natura teorica-sperimentale.

Tra le più diffuse, quelle di Halpin-Tsai, sufficientemente accurate fino a valori di 0.6 della frazione volumetrica delle fibre:

$$\frac{E_T}{E_m} = \frac{1 + \xi_E \eta_E V_f}{1 - \eta_E V_f}$$

$$\frac{G_{LT}}{G_m} = \frac{1 + \xi_G \eta_G V_f}{1 - \eta_G V_f}$$

essendo

$$\eta_E = \frac{E_f/E_m - 1}{E_f/E_m + \xi_E}$$

$$\eta_G = \frac{G_f/G_m - 1}{G_f/G_m + \xi_G}$$

e potendosi assumere per fibre a sezione circolare

$$\xi_E = 2 \qquad \xi_G = 1$$

Tutte le espressioni precedenti fanno riferimento ad un composito unidirezionale; ad esse si fa riferimento per la previsione dei moduli elastici di feltri e stuoie.

Per i feltri si ricorre alle espressioni empiriche:

$$E = \frac{3}{8} E_L + \frac{5}{8} E_T$$

$$G = \frac{1}{8} E_L + \frac{1}{4} E_T$$

Il coefficiente di Poisson si ricava dai precedenti considerando che un feltro può considerarsi un materiale isotropo.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

Nel caso delle stuoie, si ricorre al concetto dell'efficienza di strato, quantificato tramite il coefficiente di bilanciamento k ; questo si assume in pratica pari al rapporto tra il peso delle fibre disposte secondo l'asse longitudinale x e quello totale delle fibre. Si pone pertanto:

$$E_x = kE_L + (1-k)E_T$$

$$E_y = (1-k)E_L + kE_T$$

Per quanto riguarda il modulo tangenziale, esso è lo stesso di quello della lamina unidirezionale

$$G = G_{LT}$$

Nel caso comune di stuoie bilanciate, per cui è $k = 0.5$, il modulo normale è lo stesso per trama ed ordito ed è pari alla media di quelli longitudinale e trasversale del composito unidirezionale con lo stesso grado di impregnazione.

Carichi a rottura.

Anche per la previsione dei carichi a rottura, si fa riferimento a quelli di una lamina unidirezionale. Bisogna considerare in generale: i carichi a trazione e compressione nelle direzioni longitudinale e trasversale nonché lo sforzo di taglio.

Per quanto riguarda la trazione longitudinale, per i materiali in uso a scopi strutturali è trascurabile il contributo alla resistenza della matrice; la tensione di trazione a rottura può allora essere posta in funzione della resistenza delle fibre secondo

$$\sigma_{utL} = V_f \sigma_{utf}$$

Il cedimento a compressione longitudinale può realizzarsi secondo diverse modalità: per schiacciamento delle fibre, ma solo per bassi contenuti di rinforzo, per instabilità locale (micro-buckling) delle fibre, per scorrimento della matrice, per eccessiva deformazione trasversale della matrice. Quest'ultimo meccanismo è quello prevalente per la vetroresina; il carico di rottura può allora essere posto in funzione del carico ultimo a trazione della matrice come segue

$$\sigma_{ucL} = \frac{E_L \varepsilon_{utT}}{V_{LT}} = \frac{E_L}{V_{LT}} \varepsilon_{utm} / SMF$$

Nell'ambito della linearità, il fattore di amplificazione della deformazione (Strain Magnification Factor: $SMF = \varepsilon_m / \varepsilon_T$) è legato al fattore di concentrazione della tensione (Stress Concentration Factor $SCF = \sigma_m / \sigma_T$) da

$$SCF = \frac{E_m}{E_T} SMF$$

per cui

$$\sigma_{ucL} = \frac{E_L}{V_{LT} E_T} \sigma_{utm} / SCF$$

Per quanto riguarda gli altri tre carichi di rottura, il contributo prevalente è quello della matrice; anzi, la presenza delle fibre genera localmente concentrazioni di tensione, rispetto ad

una distribuzione uniforme, e quindi un indebolimento della matrice stessa. In definitiva, i carichi in questione possono essere posti pari a quelli corrispondenti della matrice, opportunamente ridotti:

$$\sigma_{utT} = \sigma_{um} / SCF$$

$$\sigma_{ucT} = \sigma_{ucm} / SCF$$

$$\tau_{uLT} = \tau_{um} / SCF_{\tau}$$

Esistono svariate espressioni per i fattori di concentrazione della tensione²; ai fini pratici possono assumersi per la vetroresina: $SCF = 1.15$; $SCF_{\tau} = 1.10$

I carichi a rottura di feltri e tessuti possono poi determinarsi schematizzandoli come un insieme di sublamine unidirezionali, infinite e casualmente orientate per i feltri, due ad assi ortogonali per i tessuti; l'adozione di un adatto criterio di resistenza, ad esempio quello della massima dilatazione, ed il ricorso alla teoria classica dei laminati porta alla previsione delle grandezze in gioco.

Dati statistici.

Gli schemi cui si è ricorso per la previsione teorica dei moduli elastici e delle resistenze a rottura, sono necessariamente approssimati e necessitano della conferma sperimentale. Comunque, sia da essi, sia dalle esperienze al vero e di laboratorio, si è rilevato che per la vetroresina le grandezze in esame dipendono sostanzialmente dal solo grado di impregnazione.

Si riportano allora di seguito due tabelle statistiche relative la prima alla cantieristica europea, la seconda a quella statunitense.

² Si ricordano ad esempio le seguenti

$$SCF = \frac{1}{1 - (\sqrt{V_f} - V_f)(1 - E_m/E_T)}$$

$$SCF_{\tau} = \frac{1}{1 - (\sqrt{V_f} - V_f)(1 - G_m/G_{LT})}$$

Statistical data for GRP laminas (from Smith)					
	x	\overline{W}_f	\bar{x} (MPa)	$\Delta x/\Delta W_f$	δx
UD/polyester GRP	σ_{ut}	.66	819	1740	200
CSM/polyester GRP	E	.31	7970	10500	1800
	σ_{ut}	.32	101	370	27
	σ_{uc}	.29	137	290	20
	σ_{ub}	.32	177	660	81
	τ_u	.32	77.0	140	13
	τ_{uz}	.40	26.4	14	6
WR/polyester GRP	E	.50	15800	35500	3900
	σ_{ut}	.52	249	770	58
	σ_{uc}	.52	213	430	86
	σ_{ub}	.53	295	410	170
	τ_u	.53	104	320	18
	τ_{uz}	.52	23.5	29	12

Statistical data for GRP laminas (from Scott)					
	x	\overline{W}_f	\bar{x} (MPa)	$\Delta x/\Delta W_f$	δx
CSM GRP	E	.26	6100	19600	2000
	σ_{ut}		73	300	n/a
	σ_{uc}		141	170	23
	σ_{ub}		177	320	20
	τ_u		76	110	8
CSM/WR GRP	E_L	.35	8200	20500	2100
	E_T		7800	18600	2000
	σ_{utL}		108	510	25
	σ_{utT}		103	450	20
	σ_{uc}		155	170	23
	σ_{ubL}		214	440	26
	σ_{ubT}		195	370	21
	τ_u		85	100	8
WR GRP	E_L	.50	13200	41300	2300
	E_T		10700	18600	2200
	σ_{utL}		204	760	31
	σ_{utT}		190	640	32
	σ_{uc}		180	160	23
	σ_{ubL}		289	530	32
	σ_{ubT}		263	420	25
	τ_u		100	100	8

Dai dati di tabella, la generica grandezza x può valutarsi con

$$x = \bar{x} + \frac{\Delta x}{\Delta W_f} (W_f - \overline{W}_f) - \delta x$$

essendo la riduzione δx legata alla fascia di dispersione dei dati statistici.

Nelle tabelle si è indicato con τ_{uz} il taglio interlaminare e con σ_{ub} la resistenza a flessione, diversa in genere da quella a trazione perché diversa è la modalità di crisi. Si osservi infine che nella seconda tabella diversi sono i carichi di rottura a trazione e flessione

secondo le due direzioni, malgrado si sia in presenza di stuoie bilanciate; ciò dipende dall'intreccio delle fibre, per cui quelle di ordito, longitudinali, sono rettilinee e più efficienti di quelle di trama, trasversali.

Gli stratificati.

Uno stratificato è composto da una serie di lamine sovrapposte secondo una assegnata sequenza di laminazione.

Nelle tipiche applicazioni della nautica da diporto si ricorre generalmente alla vetroresina, il cui costo unitario è da 3 a 5 volte quello dell'acciaio ordinario; gli altri compositi, più costosi, sono riservati ad applicazioni per cui si richiedono prestazioni elevate. Si adotta la formatura per contatto. Con la stratificazione a spruzzo si realizzano gradi di impregnazione compresi tra 0.25 e 0.30. Nella formatura per contatto a mano, si utilizzano feltri, con grammature tra 300 e 600 g/m² e fibre lunghe tra 25 e 50 mm, e stuoie bilanciate, con grammature tra 400 e 800 g/m²; si realizzano gradi di impregnazione tra 0.25 e 0.35 nel primo caso, tra 0.45 e 0.55 nel secondo caso. Strati con grammature superiori ad 800 g/m² comportano difficoltà di movimentazione, formatura ed impregnazione cui si può ovviare solo coi sistemi di costruzione automatizzati presenti nei cantieri di maggiori dimensioni; in tal caso si adottano grammature tra 1500 e 2000 g/m². Eccezionalmente si è arrivati ad utilizzare tele con grammature di 4000 g/m².

Generalmente strati di feltro si alternano a strati di stuoia bilanciata; dal lato bagnato, quello a vista, si dispongono due strati di feltro per migliorare la finitura superficiale. Si riporta di seguito una sequenza di laminazione di tal tipo.

<i>Sequenza di laminazione di uno stratificato in GRP con grado di impregnazione 0.48</i>				
lamina	tipo	grammatura del rinforzo (g/m ²)	spessore della lamina (mm)	massa areica della lamina (kg/m ²)
1	CSM	300	0.388	0.625
2	WR	500	0.647	1.042
3	CSM	300	0.388	0.625
4	WR	500	0.647	1.042
5	CSM	300	0.388	0.625
6	WR	500	0.647	1.042
7	CSM	300	0.388	0.625
8	WR	500	0.647	1.042
9	CSM	300	0.388	0.625
10	WR	500	0.647	1.042
11	CSM	300	0.388	0.625
12	CSM	300	0.388	0.625
stratificato		4600	5.951	9.585

Si osservi che il peso e lo spessore di una lamina si determinano rapidamente pensando ad essa come composta da due sublamine, l'una di rinforzo e l'altra di matrice:

$$m = \frac{p}{1000} \left(1 + \frac{1 - g_c}{g_c} \right) \quad ; \quad t = \frac{1}{1000} \left(\frac{p}{\rho_f} + \frac{1 - g_c}{g_c} \frac{p}{\rho_m} \right)$$

ove la massa areica m è in kg/m^2 , lo spessore t è in mm, si è indicata con p la grammatura dello strato di rinforzo, le densità sono in g/cm^3 e si è supposto il grado di impregnazione pari a quello globale dello stratificato g_c , cosa imposta dalla pratica in quanto non è possibile determinare la distribuzione della resina nello spessore. Sviluppando l'espressione dello spessore:

$$t = \frac{p}{1000\rho_f\rho_m} \left(\frac{\rho_f}{g_c} + \rho_m - \rho_f \right)$$

Assumendo per la vetroresina $\rho_f = 2.56 \text{ g/cm}^3$ e $\rho_m = 1.20 \text{ g/cm}^3$ si ottiene

$$t = \frac{p}{3072} \left(\frac{2.56}{g_c} - 1.36 \right)$$

espressione tipica delle normative e delle trattazioni sull'argomento.

Al comportamento complessivo dello stratificato sotto carico, concorrono le singole lamine con le loro specifiche caratteristiche; allo scopo si ricorre ai metodi della teoria classica dei laminati. Comunque, per le tipologie semplici del campo navale, lo stratificato può riguardarsi ai fini pratici come un materiale omogeneo ed isotropo; le relative proprietà dipendono prevalentemente dal grado di impregnazione e per la loro determinazione può farsi riferimento ai dati statistici riportati in tabella per strati CSM/WR.

Con considerazioni di tal tipo si giustificano le espressioni dei valori minimi richiesti da alcune normative, come quelle del "Regolamento per la costruzione di scafi con plastica rinforzata" del RINA che si riportano di seguito.

$$\begin{aligned} \sigma_{ut} &= 1278g_c^2 - 510g_c + 123 & E &= 37000g_c - 4750 \\ \sigma_{uc} &= 150g_c + 72 & E_c &= 40000g_c - 6000 \\ \sigma_{ub} &= 502g_c^2 + 106.8 & E_b &= 33400g_c^2 + 2200 \\ \tau_u &= 80g_c + 38 & G &= 1700g_c + 2240 \\ \tau_{uc} &= 22.5 - 17.5g_c \end{aligned}$$

Nel campo del grado di impregnazione compreso tra 0.25 e 0.29 è inoltre richiesto o consentito:

$$\begin{aligned} E &\geq 6000 & \sigma_{uc} &\geq 115 \\ \sigma_{ub} &\geq 0.85(502g_c^2 + 106.8) & E_b &\geq 5000 \end{aligned}$$

Le precedenti si riferiscono a stratificati in vetroresina composti da feltri e stuoie o tessuti; nel caso di stratificati unidirezionali sono indicate le seguenti:

$$\sigma_{ut} = 1900g_c^2 - 1500g_c + 560 \quad E = 143000g_c^2 - 114000g_c + 42700$$

La realizzazione dei valori minimi regolamentari deve essere verificata da specifiche prove di laboratorio.