

Materiali

Ha qualità
meccaniche
superiori a fibre
oggi considerate
"pregiate"
il materiale
che da millenni
viene utilizzato
per costruire
imbarcazioni



Oggi la scelta del legno per una barca non è nostalgica. Si basa su corrette valutazioni delle qualità meccaniche. Tra le buone ragioni perché il legno continui la sua plurimillenaria carriera per le costruzioni: il calore di un interno, la gradevolezza al tatto, l'eleganza delle finiture...

LEGNO MEGLIO DEL CARBONIO?

di PAOLO LODIGIANI

MI È CAPITATO, DISCUTENDO CON PROGETTISTI, ingegneri o costruttori di barche, di sostenere che il legno ha qualità meccaniche superiori a quelle del carbonio o del kevlar. In genere la mia affermazione è stata accolta con un certo scetticismo se non addirittura con aperta incredulità e ho avuto l'impressione che molti la attribuissero più a un irrazionale e nostalgico amore per le barche in legno che a considerazioni di tipo scientifico.

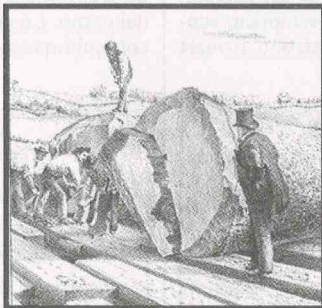
Ebbene: vorrei qui dimostrare in modo scientifico che l'affermazione è "veritiera" (il motivo delle virgolette si capirà alla fine dell'articolo). La dimostrazione non è farina del mio sacco: è riportata in vari autorevoli testi inglesi (cito, fra gli altri, l'ottimo *The Nature of Boats* di David Gerr), per parte mia tradurrò le spiegazioni lette, espresse in modo piuttosto complesso e per addetti ai lavori, in termini semplici cosicché risultino comprensibili a chi non ha familiarità con gli ostici problemi del calcolo strutturale.

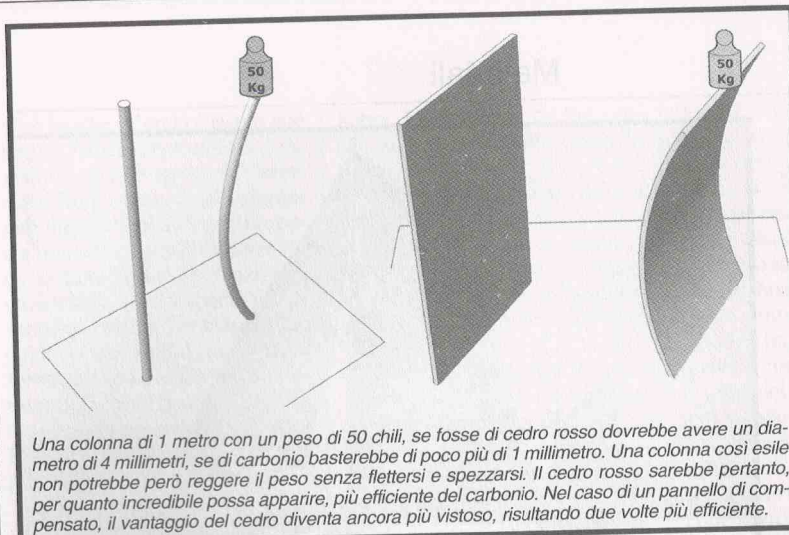
Chiedo venia in anticipo agli ingegneri se nel farlo dovrò ri-

correre a qualche approssimazione o improprietà di termini. Cominciamo con il dire che tutti i materiali solidi, sottoposti a una sollecitazione, reagiscono in modo analogo: se li si tira (ossia se sono sottoposti a uno sforzo o, meglio ancora, a un carico in trazione) si allungano, se li si schiaccia (compressione) si contraggono, se li si piega (flessione) si flettono. Se la sollecitazione rimane entro determinati limiti una volta che questa viene rimossa il materiale riacquista le sue dimensioni originarie senza avere perso le sue caratteristiche. Se invece la sollecitazione supera tali limiti il materiale subisce una deformazione permanente e,

continuando ad aumentare il carico, finisce per rompersi.

Questo comportamento è comune a tutti i materiali, che quindi attraversano tre fasi: quella di deformazione elastica, di deformazione plastica (che per alcuni materiali si chiama "snervamento") e di rottura; quello che cambia è il valore (o modulo) della sollecitazione in corrispondenza del quale un materiale passa da una fase al-





Hooke, la deformazione elastica che un materiale subisce è direttamente proporzionale al carico applicato. Le successive evoluzioni della scienza hanno dimostrato che non è proprio così per tutti i materiali e in tutte le situazioni ma per quanto ci riguarda possiamo considerarla valida e utilizzarla

l'altra. Per essere più precisi sono due le caratteristiche più importanti che servono a definire il comportamento di un materiale sotto questo aspetto: la sua resistenza (ossia la capacità di resistere agli sforzi senza rompersi) e la sua rigidità (ossia la tendenza a non deformarsi sotto sforzo). Le due caratteristiche sono completamente svincolate: un materiale può essere rigido ma non solido o viceversa. Si pensi al biscotto, tipico esempio di materiale rigido ma non resistente (guai per i denti se lo fosse), oppure al collant, che deve essere resistente ma al contempo molto elastico (guai per le gambe delle signore se non lo fosse).

Per quanto riguarda le barche entrambe le caratteristiche sono da perseguire: di primaria importanza è la resistenza perché lo scafo deve essere abbastanza solido da resistere alle varie sollecitazioni a cui è sottoposto, da quelle delle onde agli urti eventuali, a quelle, spesso rilevanti, che l'attrezzatura velica esercita su scafo e coperta. Meno essenziale è la rigidità ma è comunque evidente che meno lo scafo si deforma per effetto degli sforzi che subisce, migliori saranno le sue prestazioni.

Secondo una legge fisica molto semplice, scoperta nel XVII secolo dal matematico Robert

Hooke, per definire in termini un po' più precisi le caratteristiche di cui sopra, resistenza ed elasticità. Queste vengono misurate attraverso valori sperimentalmente rilevati che sono il carico di rottura, che indicheremo con "R" (benché abitualmente si preferisca usare la lettera greca σ), e il modulo elastico, o modulo di Young, indicato con la lettera "E".

Il carico di rottura è abbastanza intuitivo ed è il carico, per unità di superficie, a cui deve essere sottoposto il materiale per arrivare a rompersi. Naturalmente questo carico può assumere valori diversi a seconda del tipo di sollecitazione a cui il materiale è sottoposto. In particolare sono importanti, per il calcolo strutturale, la trazione e la compressione. Il modulo di elasticità è un po' più complesso: lo si può esprimere, tanto per aiutarci a "visualizzarlo", come il carico teorico in trazione, sempre per unità di superficie, a cui dovrebbe essere sottoposto il materiale per allungarlo del 100 per cento.

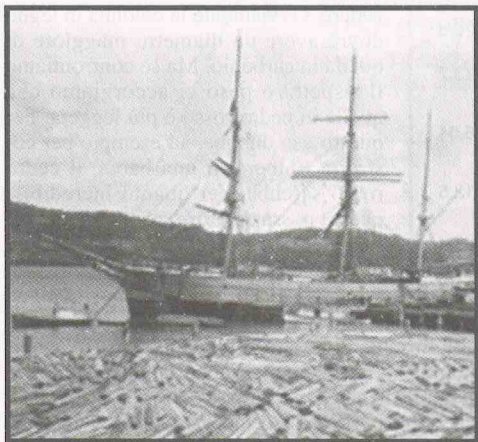
In altre parole esprime il rapporto fra lo sforzo applicato a un corpo e la deformazione risultante. Più il modulo è elevato maggiore è la forza che si deve esercitare per deformarlo e quindi la rigidità del corpo. Le unità di misura con cui si misurano entrambi questi valori è il pascal (Pa), che corri-

Tabella 1

materiale	densità (d) kg/dm ³	Rc compressione	Rt trazione	E elasticità
Cedro rosso occidentale	0,37	3,5	5	790
Mogano	0,60	5	10	800
Carbonio	1,5	35	119	8500

Tabella 2

materiale	Rt/d	E/d	$\sqrt{E/d}$	$\sqrt[3]{E/d}$
Cedro rosso occidentale	13,5	2,315	76	24,4
Mogano	16,6	1,333	47	15,1
Carbonio	79,3	5,666	61	13,2



sponde a un Newton (N) al metro quadrato. Il Newton è l'unità di misura della forza, che spesso viene impropriamente definita in kg. Per semplicità noi useremo il decanewton/ mm^2 (daN/ mm^2), che corrisponde a circa un kg/mm^2 , ossia a 100.000 Pa. Questo ci permette sia di evitare di avere a che fare con numeri troppo elevati sia di avere un'idea più chiara delle quantità di cui si parla, in quanto il kg è unità di misura più facile da immaginare del Newton.

La tabella 1 riporta per i materiali che intendiamo confrontare la densità, ossia il peso specifico, i carichi di rottura in trazione, in compressione e il modulo di elasticità. Per il legno abbiamo scelto due specie diverse, in quanto fra un legno e l'altro le caratteristiche sono abbastanza diverse: uno è il diffuso mogano, usato in costruzione nautica sia come massello sia come componente di compensati, l'altro è il cedro rosso occidentale, un legno molto leggero comunemente usato, proprio per questa sua caratteristica, nella costruzione di scafi in strip planking. Per quanto riguarda il carbonio consideriamo un laminato di carbonio unidirezionale ad alta resistenza stratificato con resine epossidiche e con un contenuto di resina del 36 per cen-

to, quindi un prodotto assolutamente hi tech (fonte dei dati: Performance-Composites).

I dati della tabella sembrano smentire seccamente l'affermazione della superiorità del legno, in quanto appaiono evidenti le prestazioni nettamente superiori del carbonio sia in termini di resistenza che di rigidità. Sembrerebbe quindi questo il materiale ideale per fare le barche. Non si deve però dimenticare che la barca, così come molte altre strutture, oltre che solida deve essere anche leggera. La resistenza del materiale non deve essere quindi valutata in assoluto ma in relazione al suo peso: è questa una misura più realistica della sua efficienza, ossia della sua capacità di rispondere alla funzione che deve svolgere. In termini più rigorosi si può definire l'efficienza di un elemento la relazione fra il carico che esso può sostenere e il suo peso.

Se si esaminano le colonne 2 e 3 della tabella 2 si vede che applicando questo criterio la differenza fra il legno e il carbonio diminuisce ma rimane pur sempre consistente. Il discorso però diventa un po' più complesso se anziché considerare il comportamento di un materiale sotto sforzo prendiamo in esame ciò che accade in un elemento strutturale in cui questo viene impiegato. In particolare considereremo due tipici elementi strutturali, la colonna e il pannello, e considereremo il caso in cui questi vengano sottoposti a un carico assiale in compressione.

Chiariamo con un esempio pratico: supponiamo di avere una colonna, ossia un cilindro sottile, lunga 1 metro, a sezione piena, in posizione verticale e semplicemente appoggiata a terra, e di voler posare sulla sua estremità superiore, esattamente al centro, un peso di 50 kg (circa 500 N). Se la colonna fosse di cedro rosso occidentale, il meno resistente fra i tre materiali, dovrebbe avere una sezione minima di $50/3,5 = 14 \text{ mm}^2$ per reggere il peso, ossia un diametro di 4 mm. Per il carbonio basterebbe un'astina sottilissima, con il diametro di poco più di 1 millimetro. È però del tutto intuitivo che una colonna così esile non potrebbe reggere

Tabella 3

materiale	diametro colonna	volume colonna	peso colonna	efficienza
	mm	dm^3	daN (kg)	50/peso colonna
<i>Cedro rosso occidentale</i>	13,8	0,149	0,055	909
<i>Mogano</i>	13,4	0,140	0,084	595
<i>Carbonio</i>	7,4	0,043	0,064	781

Tabella 4

materiale	spessore pannello	volume pannello	peso pannello	efficienza
	mm	dm^3	daN (kg)	50/peso pannello
<i>Cedro rosso occidentale</i>	5,27	2,635	0,975	51,2
<i>Mogano</i>	5,24	2,620	1,572	31,8
<i>Carbonio</i>	2,40	1,200	1,800	27,8

Tabella 5

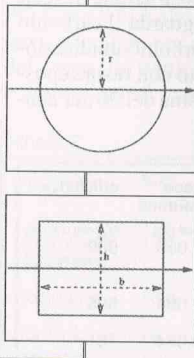
materiale	densità (d)	Rt	E	E/d	$\sqrt[3]{E/d}$	$\sqrt[3]{E/d}$
compensato marino	0,60	4	600	1000	40,8	13,7
fibra vetro E + poliestere	1,65	22,5	1420	860	22,8	6,64
kevlar + epossidica	1,52	165	7.520	4.947	57,1	12,5
alluminio	2,7	28	7.300	2.703	31,6	6,97
acciaio	7,8	42	20.600	2.641	18,4	9,82

questo peso senza flettersi e spezzarsi. In termini più generali si può esprimere ciò che accade dicendo che un'asta sottile sottoposta a un carico in compressione assiale (ossia nella direzione dell'asse dell'asta stessa) non si rompe perché il materiale collassa su sé stesso ma prima si flette (si "imbozza", per usare il termine più corretto) e quindi si rompe per effetto dell'imbozzamento. Il fenomeno si chiama di "instabilità euleriana", dal nome del matematico svizzero Leonhard Euler (1707-1783). Probabilmente non fu lui il primo ad accorgersene ma a lui spetta il merito di avere scoperto, nel 1744, la formula per calcolare il carico critico che fa instabilizzare una colonna quando soggetta a una forza di compressione.

Nel riquadro accanto forniamo la spiegazione della formula e tutti gli elementi per seguire i nostri calcoli. Per chi non ha la pazienza di farlo riportiamo i risultati nella tabella 3 che indica per ogni materiale la dimensione minima della colonna che sarebbe necessaria per sostenere il peso di 50 chili senza imbozzarsi e

LA FORMULA DI EULERO

La formula di Euler determina il carico critico di aste lunghe e sottili sottoposte ad azione di compressione. Carico critico è il carico limite oltre al quale se si verifica anche un minimo movimento dell'asta (o del carico stesso) questa collassa $P_{cr} = \pi^2 EI/L^2$, dove P_{cr} è il carico critico (N), π è 3,14, I è il momento di inerzia della sezione (m^4 oppure mm^4), E è il modulo di elasticità del materiale (Pa oppure N/mm^2), L è la lunghezza della colonna (m oppure mm). Essendo noti P_{cr} , E e L si può calcolare I con la formula: $I = (P_{cr} \times L^2)/\pi^2 E$. Il momento di inerzia I di una figura piana rispetto ad un asse è una proprietà geometrica della figura stessa che misura la distribuzione della sua area rispetto all'asse. In un cerchio il momento di inerzia rispetto al diametro è $\pi r^4/4$. Nota I il raggio r è $(I/\pi)^{1/4}$. In un rettangolo il momento di inerzia rispetto all'asse x è $(b \times h^3)/12$. □



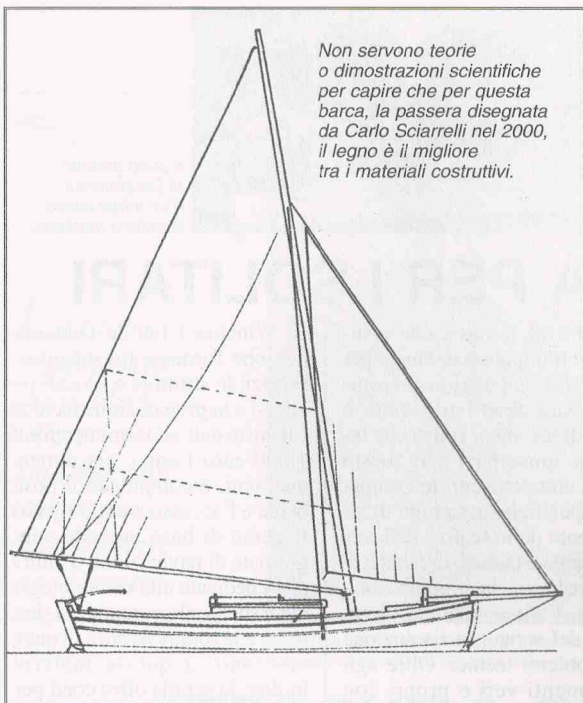
cedere. Ovviamente la colonna in legno dovrà avere un diametro maggiore di quella in carbonio. Ma se confrontiamo il rispettivo peso ci accorgiamo che quella in cedro rosso è più leggera. Per questo uso dunque, ad esempio per costruire l'albero di una barca, il cedro rosso sarebbe, per quanto incredibile questo possa apparire, materiale più efficiente del carbonio. Il condizionale è d'obbligo in quanto l'affermazione prescinde da alcuni aspetti pratici, quali ad esempio quelli costruttivi.

La formula di Euler si può applicare, in condizioni di carico analoghe, anche a un pannello. Immaginiamo che il pannello sia, come la colonna, di spessore sottile e alto 1 metro, abbia un lato di 50 centimetri, sia appoggiato per terra in verticale sul lato corto e che sul suo bordo superiore, esattamente al centro, appoggiamo il consueto peso di 50 chili.

La tabella 4 riporta i risultati di questo "esperimento" e in questo caso il vantaggio del legno sul carbonio diventa ancora più vistoso, al punto che anche il mogano risulta superiore al carbonio. Quanto al cedro rosso è addirittura 2 volte più efficiente! Questi risultati ovviamente non hanno nulla di casuale ma riflettono due regole generali che si possono così enunciare: l'efficienza del materiale (carico/peso) in una colonna è funzione diretta del rapporto fra la radice quadrata di E e la densità in un pannello del rapporto fra radice cubica di E e densità.

Grazie a queste regole il legno, impiegato in questi elementi risulta assai più efficiente non solo del carbonio, ma anche di ogni altro materiale da costruzione, come risulta dalla tabella 5. Anziché con un esempio avremmo potuto dimostrare questi enunciati dal punto di vista teorico ma la spiegazione sarebbe stata piuttosto laboriosa e tediosa e quindi la risparmiamo al lettore.

Ci preme piuttosto sottolineare che il discorso, pur con tutte le sue semplificazioni e i suoi limiti, non è puramente teorico in quanto nella



*Non servono teorie
o dimostrazioni scientifiche
per capire che per questa
barca, la passera disegnata
da Carlo Sciarrelli nel 2000,
il legno è il migliore
tra i materiali costruttivi.*

dicolarmente a questa; nel caso del cedro rosso occidentale per esempio quest'ultima è addirittura 20 volte inferiore alla prima. La resistenza inoltre può variare considerevolmente anche in funzione del grado di umidità, di difetti nella crescita, della presenza di nodi e di molti altri fattori non sempre facili da individuare: il legno, si è soliti dire, è materiale vivo e in quanto tale può deperire, ammalarsi, morire. Inoltre come per gli esseri viventi nessun esemplare è identicamente uguale all'altro, anche all'interno della stessa specie. Per il costruttore è più facile fidarsi di un materiale prodotto con procedimenti industriali, secondo precise specifiche tecniche, unificati e prevedibili nei loro comportamenti. Alcuni di questi limiti del legno sono stati ridotti o eliminati sia con l'introduzione di derivati quali il compensato marino, sia, in tempi più recenti, associando il legno con la resina epossidica, che lo isola dagli agenti atmosferici e ne preser-

va le caratteristiche meccaniche. Lo scopo di questo articolo comunque non è quello di dimostrare la superiorità assoluta del legno rispetto ad altri materiali e riteniamo che la provocatoria domanda posta nel titolo dell'articolo non possa avere una risposta univoca: in realtà così come non esiste la barca perfetta non esiste nemmeno il materiale perfetto con cui realizzarla cosicché fra gli appassionati possono continuare all'infinito le discussioni sulla superiorità dell'uno o dell'altro materiale e ognuno può vantare i pregi di quello che raccoglie i suoi favori.

La struttura complessa di una barca ci sono varie colonne (albero, puntoni, bompresso, etc.) e pannelli (le paratie, gli elementi del fasciame, di tuga e coperta) che contribuiscono alla solidità e rigidità dell'insieme e quindi l'aver dimostrato la validità del legno nel lavorare efficacemente in questi elementi non ci sembra irrilevante. Naturalmente per scrupolo di obbiettività dovremmo, dopo questa scientifica dimostrazione della "superiorità" del legno, dare la parola all'accusa che non manca di frecce nel suo arco sia contro il legno sia a favore del carbonio. Io stesso, pur nel mio amore per il legno, non posso ignorare che questo ha anche limiti e difetti e d'altra parte se molti preferiscono usare altri materiali, anche quando sono, come nel caso del carbonio, più costosi, un motivo deve esserci. In favore del carbonio va osservato soprattutto che qui l'abbiamo considerato come materiale monolitico, mentre questo si presta in particolare a essere usato come un elemento di materiali compositi, per esempio per laminare le pelli di un sandwich.

Quanto al legno un suo primo difetto è, ai fini del suo impiego nella costruzione nautica, il fatto di essere anisotropo, ossia di presentare caratteristiche meccaniche molto differenziate nelle diverse direzioni: la resistenza è ottima nel senso della fibra (ossia lungo l'asse del tronco) e scarsa perpen-

di parallelamente a questa; nel caso del cedro rosso occidentale per esempio quest'ultima è addirittura 20 volte inferiore alla prima. La resistenza inoltre può variare considerevolmente anche in funzione del grado di umidità, di difetti nella crescita, della presenza di nodi e di molti altri fattori non sempre facili da individuare: il legno, si è soliti dire, è materiale vivo e in quanto tale può deperire, ammalarsi, morire. Inoltre come per gli esseri viventi nessun esemplare è identicamente uguale all'altro, anche all'interno della stessa specie. Per il costruttore è più facile fidarsi di un materiale prodotto con procedimenti industriali, secondo precise specifiche tecniche, unificati e prevedibili nei loro comportamenti. Alcuni di questi limiti del legno sono stati ridotti o eliminati sia con l'introduzione di derivati quali il compensato marino, sia, in tempi più recenti, associando il legno con la resina epossidica, che lo isola dagli agenti atmosferici e ne preser-

va le caratteristiche meccaniche. Lo scopo di questo articolo comunque non è quello di dimostrare la superiorità assoluta del legno rispetto ad altri materiali e riteniamo che la provocatoria domanda posta nel titolo dell'articolo non possa avere una risposta univoca: in realtà così come non esiste la barca perfetta non esiste nemmeno il materiale perfetto con cui realizzarla cosicché fra gli appassionati possono continuare all'infinito le discussioni sulla superiorità dell'uno o dell'altro materiale e ognuno può vantare i pregi di quello che raccoglie i suoi favori.

Premevo sottolineare che oggi la scelta del legno per costruire una barca non è affatto nostalgica o irrazionale, ma si basa su solidi fondamenti razionali e su una corretta valutazione delle sue qualità meccaniche. Spero di averne convinto il lettore ma, se così non fosse, niente di male: anche senza dover ricorrere a formule e calcoli ci sono molte altre buone ragioni perché la costruzione delle barche in legno continui a lungo la sua plurimillenaria carriera: il calore di un interno in legno, la gradevolezza al tatto del materiale, l'eleganza di uno scafo con finitura trasparente, il profumo di alcune essenze, il piacere di lavorare il legno sono tutti pregi che ancora per lungo tempo porteranno molti a preferirlo ai suoi più giovani e aggressivi concorrenti.

PAOLO LODIGIANI