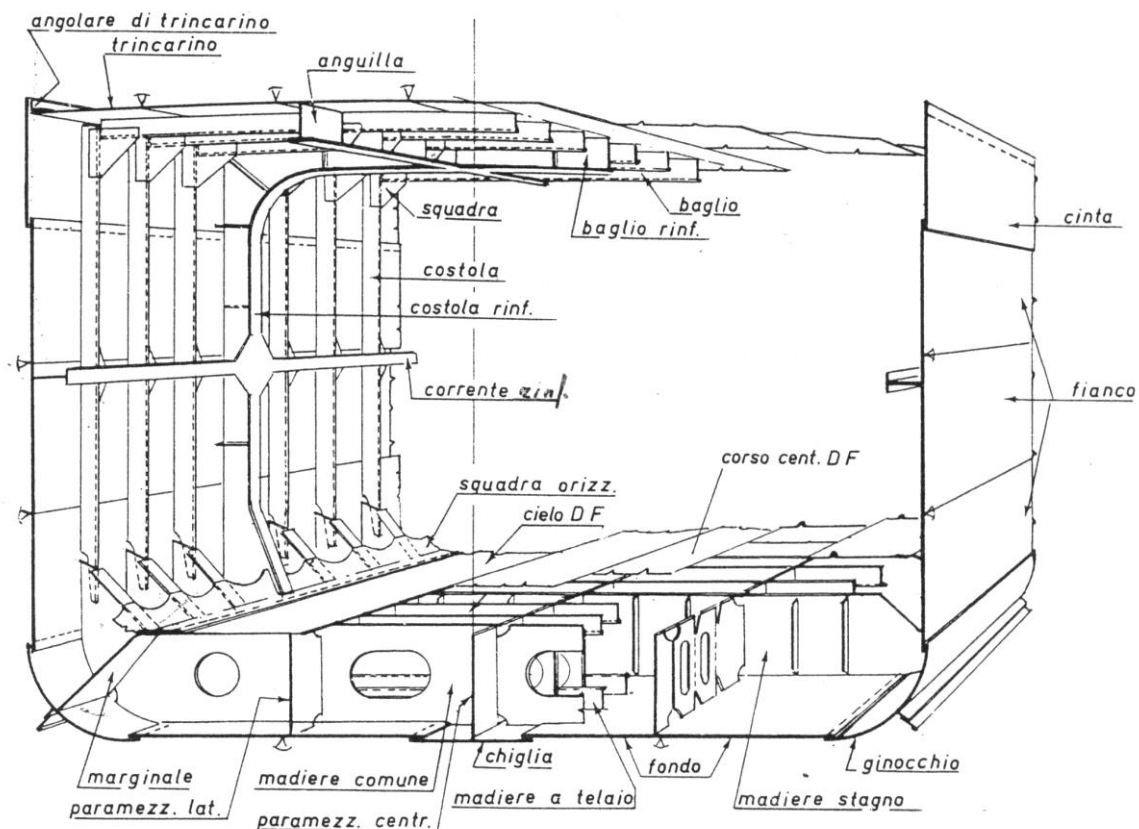


6. Lo scafo in acciaio.

Lo scafo.

Si intende per scafo l'insieme degli elementi costruttivi che costituiscono l'involucro stagno e la parte resistente della nave. Lo scafo può globalmente riguardarsi come una trave scatolare diaframmata; i suoi componenti principali sono i fasciami, i rinforzi ordinari, le travi rinforzate e le paratie.



Elementi costruttivi di uno scafo in acciaio.

La nave in acqua tranquilla è sottoposta alla pressione idrostatica del liquido circostante e ai pesi propri, fissi e variabili. Alle sollecitazioni generate da questo sistema di forze devono resistere i componenti strutturali.

La gran parte dei carichi agenti è applicata sui fasciami, che tendono a flettersi. È intuitivo comprendere che un elemento piano ha scarsa capacità a resistere ai conseguenti sforzi flettenti ed ancor meno a sollecitazioni di compressione. Perciò i pannelli di fasciame sono irrigiditi da rinforzi ordinari, generalmente costituiti da semplici profilati; in tal modo la robustezza aumenta considerevolmente e si evita il rischio dell'imbozzamento delle lamiere.

Le travi rinforzate hanno la funzione di spezzare la campata dei pannelli nervati e di riportarne i carichi alla struttura scatolare; sono in genere travi composte da un'anima e da una piattabanda, mentre il fasciame cui sono collegate funge da seconda piattabanda. In

corrispondenza degli incroci tra i rinforzi ordinari e le travi primarie, almeno ogni quarto rinforzo ordinario e comunque a non più di 4 m, l'anima di queste ultime è irrigidita da squadre (tripping bracket) che hanno la funzione di irrigidire l'anima e vincolare la piattabanda ad evitare fenomeni di imbozzamento o svergolamento. In assenza di rinforzi passanti, vanno comunque disposti adeguati irrigidimenti e, nel caso che l'altezza dell'anima sia elevata, all'incirca superiore a 100 volte lo spessore, anche nervature parallele alla piattabanda, distanziate non più di 110 volte lo spessore. Le squadre sono talvolta disposte ad ogni incrocio ad evitare l'insorgere di elevate concentrazioni di tensione nel collegamento tra le due travi.

Particolarmente sollecitato risulta il fondo, in quanto su di esso grava buona parte del peso e la pressione idrostatica spinge col suo valore massimo; per tale motivo esso è irrobustito da un grigliato di travi rinforzate, dette madieri e paramezzali, che formano, per così dire, un reticolo di fondazione. Su di esso sono impostati i telai trasversali che resistono ai carichi agenti sui fianchi e sui ponti.

Bisogna ancora considerare che i pesi e le spinte, anche se sono globalmente in equilibrio, non lo sono nella singola sezione; pertanto la trave scafo è sottoposta a sollecitazioni flettenti globali, tanto maggiori quanto maggiore è la lunghezza di costruzione. Sono quindi soggetti a sforzi ulteriori i fasciami del fondo, dei fianchi, dei ponti, delle eventuali paratie longitudinali, nonché delle travi longitudinali comuni e rinforzate, che contribuiscono alla robustezza globale.

Le paratie trasversali, oltre a compartimentare longitudinalmente la nave, costituiscono i diaframmi verticali della trave nave, che si oppongono alla distorsione della geometria delle sezioni trasversali.

I sistemi strutturali.

La struttura trasversale.

E' il sistema tradizionale, mutuato dalle costruzioni in legno. Il fasciame è irrigidito da ossature trasversali, costituite da madieri, costole e bagli, regolarmente disposte nel senso longitudinale; tali ossature ordinarie si appoggiano alle travi rinforzate longitudinali del fondo, dette paramezzali, e del ponte, dette anguille, che possono essere collegate tra loro mediante linee di puntellatura; si dispongono eventualmente anche correnti rinforzati di murata. Sono pure presenti ossature rinforzate, tipicamente a sostegno dei battenti frontali delle boccaporte, nel locale dell'apparato motore, nella zona prodiera ed a sostegno di correnti rinforzati ed anguille.

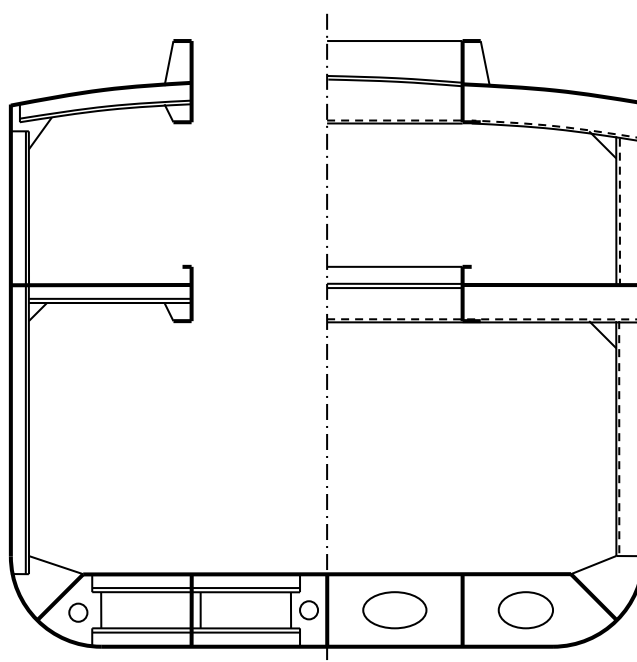
La struttura longitudinale.

Il fasciame è irrigidito da correnti longitudinali sostenuti da ossature rinforzate. Il sistema è particolarmente adatto alle navi di grandi dimensioni, soggette ad elevati momenti flettenti, in quanto si realizzano robustezze longitudinali maggiori a parità di peso scafo; inoltre, a parità di spessore ed intervallo tra i rinforzi, il carico di imbozzamento del fasciame del ponte è circa quattro volte superiore rispetto ad un'orditura trasversale. Lo svantaggio di

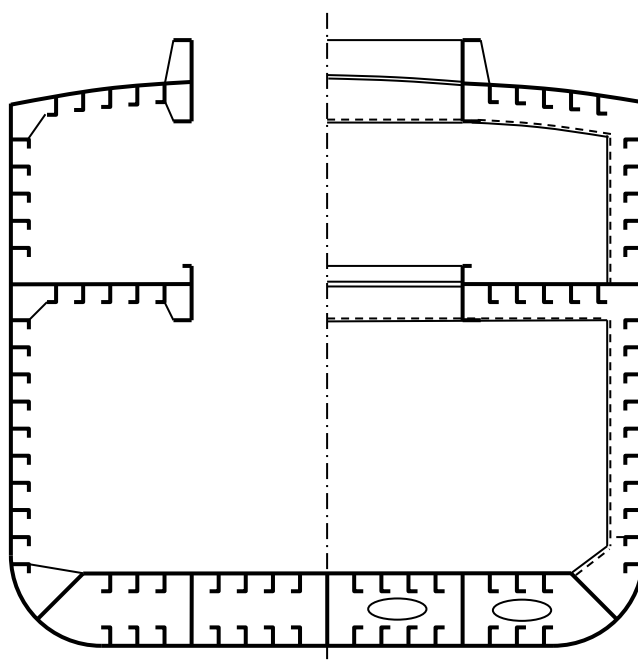
tale sistema è il notevole ingombro trasversale delle costole rinforzate che interferiscono con le esigenze di caricazione delle navi da carico solido; anche i correnti a murata sono di intralcio, perché possono dar luogo a segregazioni di merce o sporcizia.

La struttura mista.

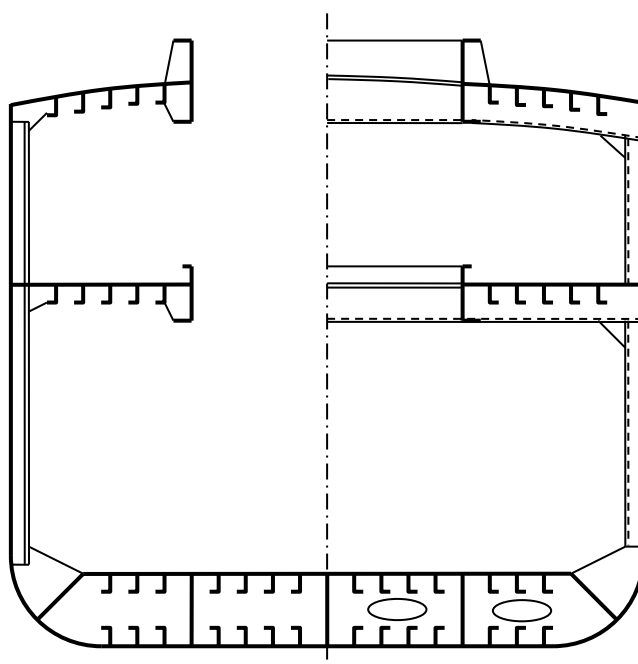
In tal caso il fasciame del fianco è irrigidito da costole ordinarie, mentre i fasciami del fondo e del ponte sono irrigiditi da correnti longitudinali. Tale sistema è adottato tipicamente per le grandi rinfusiere solide, in quanto offre una buona resistenza flessionale ed allo stesso tempo le operazioni di scarico della merce non sono intralciate dai correnti longitudinali. Il sistema è pure adottato per le petroliere di modeste dimensioni in quanto sono agevolate le operazioni di esaurimento e pulizia delle cisterne.



Sistema strutturale trasversale.



Sistema strutturale longitudinale.

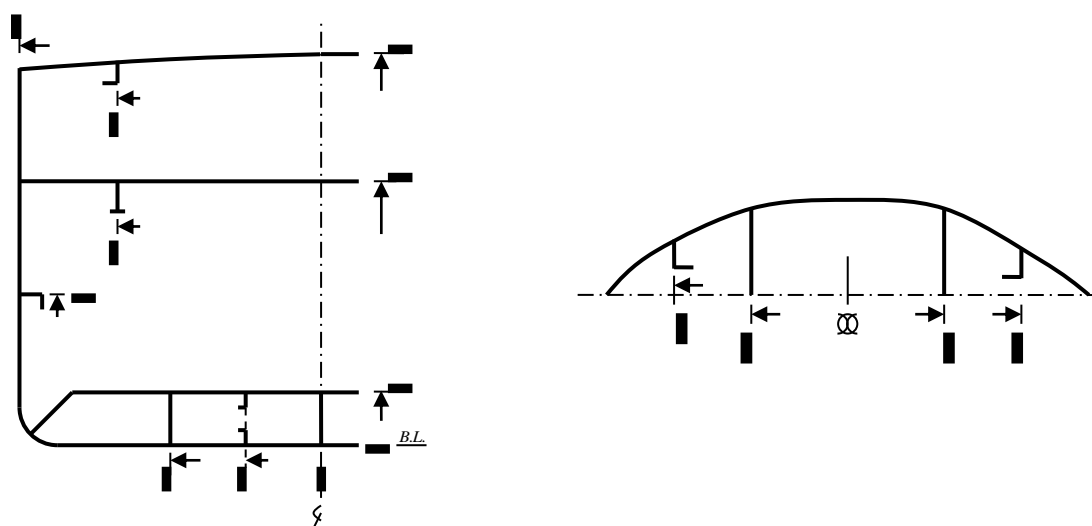


Sistema strutturale misto.

Le sezioni maestre.

I sistemi strutturali sono illustrati mediante le loro sezioni maestre tipiche. Si intende per sezione maestra il disegno in sezione delle strutture del tronco centrale dello scafo, cioè dei fasciami, delle ossature, delle travi rinforzate e dei relativi collegamenti ed irrigidimenti.

E' in definitiva necessario specificare il posizionamento degli elementi strutturali sia trasversalmente rispetto alla linea del garbo, sia longitudinalmente rispetto al piano del garbo; ciò può essere sinteticamente specificato tramite disegni specifici quali quelli appresso riportati, ove è riportata la pratica più comunemente seguita.



Posizione delle strutture rispetto alla linea del garbo ed al piano del garbato.

Bisogna inoltre che le singole parti di un elemento strutturale, tipicamente collegate tramite saldatura, siano geometricamente allineate; è perciò opportuno evitare, quando possibile, collegamenti in cui le parti costituenti siano separate da una lamiera e non si possa controllare la loro posizione mutua visivamente o mediante misure semplici. Si ricorda a tal proposito che è di norma richiesto che l'eccentricità dei giunti cruciformi sia al più metà spessore dell'elemento più sottile e quella dei giunti di testa non più del 15%.

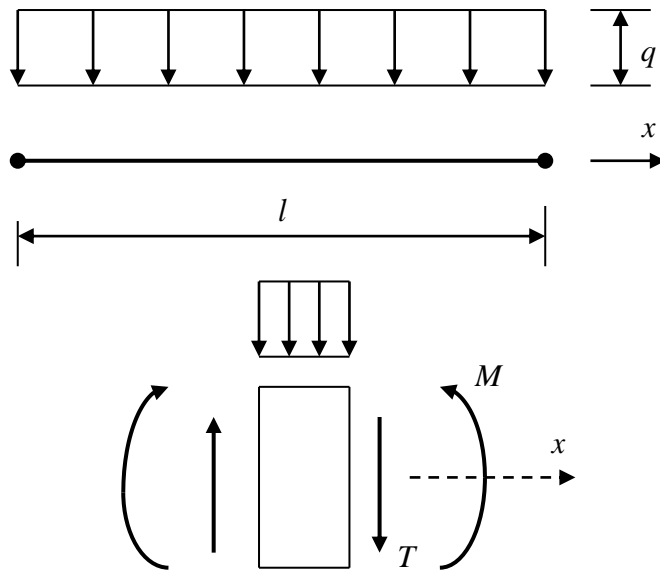
La continuità strutturale richiede che gli sforzi siano trasmessi da una membratura all'altra con continuità, senza generare localmente elevati incrementi di tensione; ciò richiede che siano assenti brusche discontinuità geometriche. Vanno quindi predisposte strutture di raccordo tra blocchi con diversi sistemi strutturali, alle estremità dei gavoni, del locale dell'apparato motore e delle sovrastrutture e vanno progettate con cura le giunzioni tra le travi ordinarie e quelle rinforzate e le riduzioni di spessore nei corpi di estremità.

Particolare attenzione va posta nel disegno delle numerose aperture presenti a bordo, quali fori di alleggerimento, di drenaggio, di sfogo d'aria, di passaggio di tubi, ecc.; gli spigoli devono essere opportunamente arrotondati, con raggi dell'ordine di 150 mm o di un terzo dell'ampiezza dell'apertura; inoltre tali aperture non devono indebolire la sezione resistente dell'elemento in cui sono praticate al di là del dovuto; ad esempio, le aperture praticate nelle anime delle travi rinforzate, a meno che non si irrobustiscano adeguatamente i contorni, non devono superare in altezza il 20% dell'altezza dell'anima ed in larghezza il minore tra il 40% dell'altezza dell'anima ed il 60% dell'intervallo tra i rinforzi ordinari.

I moduli di resistenza.

Il comportamento dello scafo sotto carico può schematizzarsi con un modello a travi. Sono travi allora: la striscia di fasciame tra due rinforzi; le travi comuni e rinforzate col loro fasciame associato; lo scafo nel suo insieme.

Si dice trave un solido con la dimensione longitudinale prevalente sulle due trasversali. Una trave caricata in campata resta assoggettata ad uno stato di sollecitazioni interne e si deforma; in particolare, se si estrae un tronco elementare, sulle sue sezioni di estremità agiscono una sollecitazione tagliante, che tende a far scorrere le due sezioni tra loro, ed una sollecitazione flettente, che tende a flettere il tronco. Tali sollecitazioni dipendono dal carico applicato, dalla campata e dal grado di incastro dei vincoli di estremità.

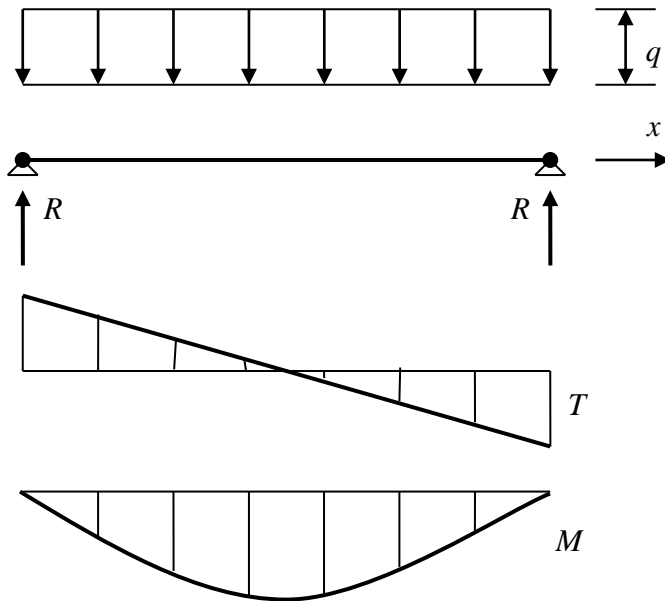


Schema di trave e definizione delle sollecitazioni

Nel caso semplice rappresentato in figura di una trave uniforme uniformemente caricata, incernierata agli estremi, le reazioni vincolari, da considerazioni di equilibrio e di simmetria, sono: $R = ql/2$. Per una generica sezione di ascissa x , le caratteristiche di sollecitazione sono date da:

$$T = R - qx = q\left(\frac{l}{2} - x\right)$$

$$M = Rx - \frac{qx^2}{2} = \frac{qx}{2}(l - x)$$

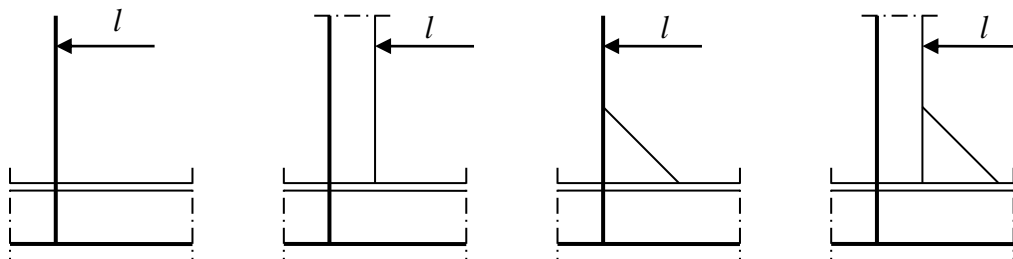


Diagrammi delle sollecitazioni di una trave incernierata.

E' possibile così definire i valori massimi di sollecitazione. Per i due casi tipici risulta:

	grado di incastro:	nullo	perfetto
M_{max}		$ql^2/8$	$ql^2/12$
T_{max}		$ql/2$	$ql/2$

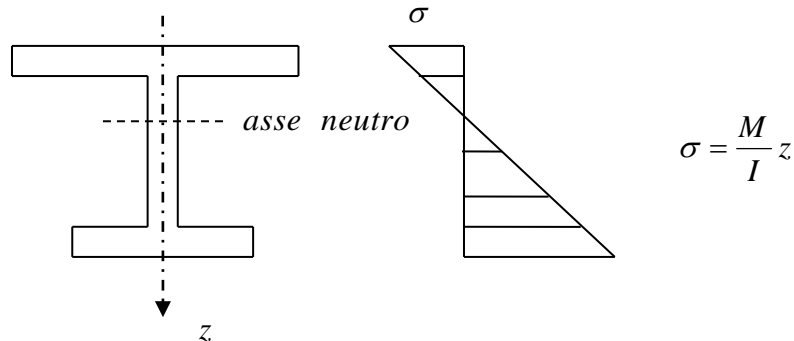
Si osserva che la luce della trave gioca un ruolo importante; per la sua concreta definizione, può farsi riferimento agli schemi strutturali della figura seguente.



Definizione della campata per collegamenti tipici.

Per la maggior parte dei casi di interesse le travi sono snelle, nel senso che la loro altezza è piccola rispetto alla lunghezza; in tal caso gli sforzi flettenti sono prevalenti e solo di essi si tiene conto nel dimensionamento, almeno in quello preliminare.

La distribuzione delle tensioni normali agenti sulla sezione trasversale, che danno luogo al momento flettente, è di tipo lineare, secondo quanto rappresentato dalla formula di Navier ed illustrato in figura.



Nella formula di Navier, I è il momento d'inerzia della sezione rispetto all'asse neutro, cioè l'asse perpendicolare al piano di flessione lungo cui gli sforzi sono nulli; per materiale omogeneo l'asse neutro passa per il centro della sezione.

Definita la tensione ammissibile in funzione della resistenza del materiale e del grado di sicurezza, la verifica di resistenza si scrive

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{amm}$$

quindi

$$w = \frac{I}{z_{\max}} \geq \frac{M}{\sigma_{amm}}$$

In definitiva la robustezza a flessione della trave resta definita dal modulo di resistenza minimo w , che è funzione della sola geometria della sezione retta.

Momento d'inerzia di una figura piana.

Si abbia una generica figura piana, definita rispetto ad una coppia di assi (x,y) , e sia A l'area della sua superficie. Le coordinate del baricentro C^2 , i momenti d'inerzia I_x, I_y rispetto agli assi x, y rispettivamente ed il prodotto d'inerzia I_{xy} rispetto agli stessi assi sono definiti dalle seguenti:

$$x_c = \frac{1}{A} \int_A x dA \quad y_c = \frac{1}{A} \int_A y dA$$

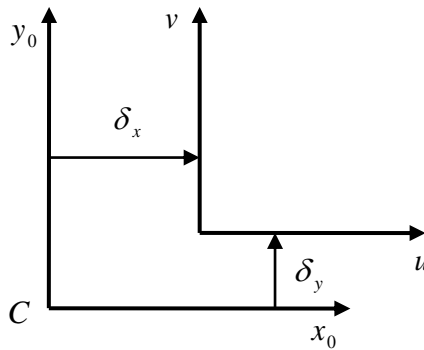
$$I_x = \int_A y^2 dA \quad I_y = \int_A x^2 dA \quad I_{xy} = \int_A xy dA$$

Il teorema di Steiner, o del trasporto, dà il modo di variare del momento d'inerzia in un fascio di rette parallele. Sia pertanto u una generica retta distante δ dal centro di figura e I_x^0 il momento d'inerzia rispetto alla retta parallela ad u passante per C ; vale la relazione:

$$I_u = I_x^0 + A\delta^2$$

² Dicesi baricentro di un sistema di punti materiali il centro di un qualsiasi sistema di vettori applicati paralleli e concordi, aventi intensità proporzionali alle masse. Se il sistema è continuo omogeneo, il baricentro è indipendente dalla densità e si parla di baricentro di figura.

Ne consegue che fra tutte le rette aventi una stessa direzione, la retta passante per il centro di figura è quella di minimo momento d'inerzia. In termini più generali valgono le seguenti relazioni.



$$\begin{cases} I_u = I_x^0 + A\delta_y^2 \\ I_v = I_y^0 + A\delta_x^2 \\ I_{uv} = I_{xy}^0 + A\delta_x\delta_y \end{cases}$$

Si considerano ora i due sistemi di assi riportati in figura; tra essi vale la trasformazione di coordinate



$$\begin{cases} u = x\cos\alpha + y\sin\alpha \\ v = -x\sin\alpha + y\cos\alpha \end{cases}$$

Il modo di variare dei momenti d'inerzia nel fascio di rette concorrenti nell'origine è dato da:

$$\begin{cases} I_u = I_x \cos^2 \alpha + I_y \sin^2 \alpha - 2I_{xy} \sin \alpha \cos \alpha \\ I_v = I_x \sin^2 \alpha + I_y \cos^2 \alpha + 2I_{xy} \sin \alpha \cos \alpha \\ I_{uv} = (I_x - I_y) \sin \alpha \cos \alpha + I_{xy} (\cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha) \end{cases}$$

La posizione degli assi principali d'inerzia è definita dall'angolo α_0 che l'asse di massimo momento d'inerzia forma con l'asse x ; tale angolo è dato da:

$$\sin(2\alpha_0) = -\frac{2I_{xy}}{\sqrt{4I_{xy}^2 + (I_y - I_x)^2}}$$

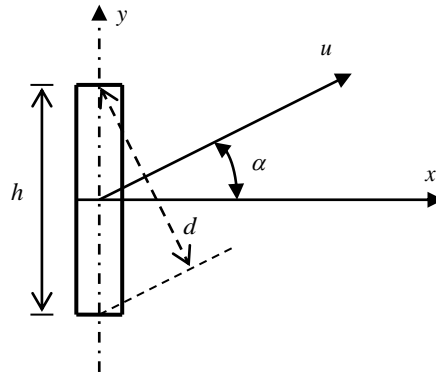
$$\cos(2\alpha_0) = -\frac{I_y - I_x}{\sqrt{4I_{xy}^2 + (I_y - I_x)^2}}$$

Raggio d'inerzia di una sezione rettangolare.

Il raggio d'inerzia di un rettangolo di altezza h è: $r_x = \frac{h}{\sqrt{12}}$. Se la larghezza è piccola,

il secondo raggio d'inerzia è trascurabile, per cui può porsi:

$$I_u \cong I_x \cos^2 \alpha = A \frac{h^2}{12} \cos^2 \alpha = A \frac{d^2}{12} \Rightarrow r_u = r_x \cos \alpha$$

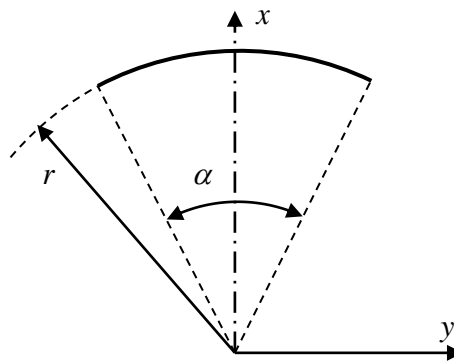


Geometria della sezione rettangolare

Approssimazione simile può adottarsi per altri elementi in piccolo spessore quali, ad esempio, i piatti a bulbo.

Elementi geometrici di un arco di circonferenza.

Si esamina ora l'arco di circonferenza dello schizzo. La posizione ed i momenti d'inerzia rispetto agli assi x e y sono:



Geometria di un arco circolare.

$$x_c = \frac{1}{r\alpha} \int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} r \cos \varphi r d\varphi = \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\alpha/2} r$$

$$I_x = \int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} (r \sin \varphi)^2 r d\varphi = r^3 \left[\frac{\varphi}{2} - \frac{\sin 2\varphi}{4} \right]_{-\alpha/2}^{\alpha/2} = \frac{\alpha - \sin \alpha}{2} r^3 = \left(1 - \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right) \frac{\alpha r^3}{2}$$

$$I_y = \int_{-\alpha/2}^{\alpha/2} (r \cos \varphi)^2 r d\varphi = r^3 \left[\frac{\varphi}{2} + \frac{\sin 2\varphi}{4} \right]_{-\alpha/2}^{\alpha/2} = \frac{\alpha + \sin \alpha}{2} r^3 = \left(1 + \frac{\sin \alpha}{\alpha} \right) \frac{\alpha r^3}{2}$$

Rispetto agli assi baricentrici risulta:

$$I_x^0 = I_x$$

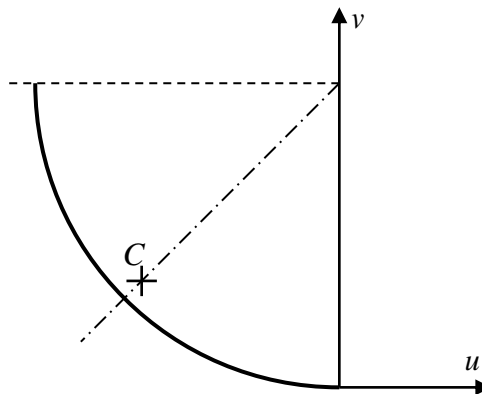
$$I_y^0 = I_y - r\alpha x_C^2 = \left[1 + \frac{\sin \alpha}{\alpha} - 2 \left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\alpha/2} \right)^2 \right] \frac{\alpha r^3}{2}$$

In particolare, per il quarto di circonferenza e gli assi di figura dalle precedenti espressioni si ricavano le seguenti:

$$v_C = r - x_C \cos \frac{\pi}{4} = r - r \frac{\sin \frac{\pi}{4}}{\pi/4} \cos \frac{\pi}{4} = \left(1 - \frac{2}{\pi} \right) r = 0.363r$$

$$I_u^0 = I_x^0 \cos^2 \frac{\pi}{4} + I_y^0 \sin^2 \frac{\pi}{4} = \frac{\alpha r^3}{4} \left[\left(1 - \frac{\sin \frac{\pi}{2}}{\pi/2} \right) + \left(1 + \frac{\sin \frac{\pi}{2}}{\pi/2} \right) - 2 \left(\frac{\sin \frac{\pi}{4}}{\pi/4} \right)^2 \right] =$$

$$= \left(\frac{1}{2} - \frac{4}{\pi^2} \right) \alpha r^3 = (.308r)^2 \frac{\pi}{2} r$$

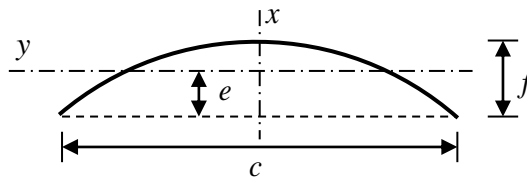


Geometria di un quarto di circonferenza.

Si esprimono ora gli elementi geometrici dell'arco circolare in forma adimensionale, assumendo a grandezze di riferimento la corda c e la freccia f . Queste, in funzione del raggio e dell'angolo al centro, sono espresse da:

$$c = 2r \sin \frac{\alpha}{2} \quad f = r \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2} \right)$$

Geometria di un arco generico.



L'inarcamento è
$$\frac{f}{c} = \frac{1 - \cos \frac{\alpha}{2}}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}$$

La distanza del centro dalla corda è

$$\frac{e}{f} = \frac{x_c - r \cos \frac{\alpha}{2}}{f} = \frac{r \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\alpha/2} - r \cos \frac{\alpha}{2}}{r \left(1 - \cos \frac{\alpha}{2}\right)} = \frac{\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\alpha/2} - \cos \frac{\alpha}{2}}{1 - \cos \frac{\alpha}{2}}$$

I raggi d'inerzia propri sono

$$\frac{r_x}{c} = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{I_x^0}{\alpha r}} = \frac{1}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\sin \alpha}{\alpha}\right)}$$

$$\frac{r_y}{f} = \frac{1}{f} \sqrt{\frac{I_y^0}{\alpha r}} = \frac{1}{1 - \cos \frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{1 + \frac{\sin \alpha}{\alpha}}{2} - \left(\frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\alpha/2}\right)^2}$$

Come si vede, le precedenti grandezze sono funzioni del solo angolo al centro α , di conseguenza, del solo inarcamento; alcuni loro valori sono riportati di seguito.

<i>Elementi geometrici dell'arco circolare</i>					
α (°)	f/c (%)	s/c	e/f	r_x/c	r_y/f
5	1.1	1.000	.667	.289	.298
10	2.2	1.001	.667	.289	.298
15	3.3	1.003	.666	.289	.298
20	4.4	1.005	.666	.289	.298
25	5.5	1.008	.666	.290	.298
30	6.6	1.012	.666	.290	.298
35	7.7	1.016	.666	.290	.298
40	8.8	1.021	.665	.291	.299

Dall'esame di tali valori si riscontra che per inarcamenti inferiori al 6% le caratteristiche geometriche dell'arco possono soddisfacentemente essere rappresentate dai seguenti rapporti:

$$\frac{s}{c} = 1 \quad \frac{e}{f} = \frac{2}{3} \quad \frac{r_x}{c} = \frac{1}{\sqrt{12}} \quad \frac{r_y}{f} = \frac{2}{\sqrt{45}} = \frac{1.033}{\sqrt{12}}$$

Inarcamenti maggiori sono ben rappresentati assumendo per la lunghezza una delle due espressioni quadratiche che seguono.

$$\frac{s}{c} = 1 + \frac{8}{3} \left(\frac{f}{c} \right)^2 = \sqrt{1 + \frac{16}{3} \left(\frac{f}{c} \right)^2}$$

Questi rapporti ed espressioni possono essere assunti, in mancanza di dati specifici, per un arco generico e quindi per la valutazione degli elementi geometrici di una curva generica mediante una opportuna scomposizione della stessa.

Modulo di resistenza di un profilato col fasciame associato.

Si considera la trave costituita da un rinforzo, realizzato mediante un profilato che nel caso di figura è solo a titolo esemplificativo un piatto a bulbo, e dal fasciame ad esso associato. Siano:

- A_s la sezione resistente del ferro;
- h_s l'altezza del ferro;
- d_s la distanza del baricentro del ferro dalla faccia inferiore della lamiera;
- r_s il raggio d'inerzia proprio del ferro;
- b_p la larghezza della striscia di fasciame associata³;
- t_p lo spessore della lamiera.

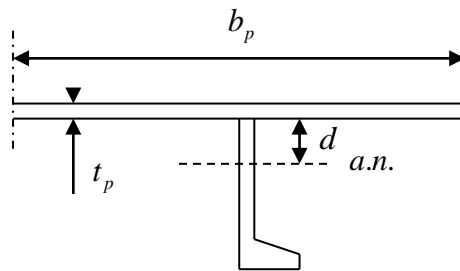
La quota del baricentro d , il momento d'inerzia proprio I ed il modulo di resistenza della trave w sono dati da:

$$d = \frac{A_s d_s - b_p t_p^2 / 2}{A_s + b_p t_p}$$

$$I = A_s \left[r_s^2 + (d_s - d)^2 \right] + b_p t_p \left[\frac{t_p^2}{12} + \left(d + \frac{t_p}{2} \right)^2 \right]$$

$$w = \frac{I}{h_s - d}$$

³ Per i rinforzi ordinari va assunta pari all'intervallo tra di essi. Per le travi primarie va assunta pari allo intervallo tra di esse o, se minore, al 20% della campata. In entrambi i casi, va dimezzata per le travi di bordo.



Geometria di un rinforzo col fasciame associato

Si assuma ora che il rinforzo sia costituito da un piatto 270 x 15 mm e che il fasciame associato sia spesso 15 mm e largo 500 mm; si ha cioè:

$$A_s = 40.5 \text{ cm}^2 \quad (r_s)^2 = 60.75 \text{ cm}^2 \quad h_s = 27 \text{ cm} \quad d_s = 13.5 \text{ cm}$$

$$b_p = 50 \text{ cm} \quad t_p = 1.5 \text{ cm}$$

Sviluppando:

$$d = \frac{40.5 \times 13.5 - 50 \times 1.5^2 / 2}{40.5 + 50 \times 1.5} = 4.25 \text{ cm}$$

$$I = 40.5 \left[60.75 + (13.5 - 4.25)^2 \right] + 50 \times 1.5 \left[\frac{1.5^2}{12} + \left(4.25 + \frac{1.5}{2} \right)^2 \right] = 7815 \text{ cm}^4$$

$$w = \frac{7815}{27 - 4.25} = 343.5 \text{ cm}^3$$

Si confronta tale valore con quello di una lamiera semplice di pari peso:

$$t'_p = \frac{50 \times 1.5 + 40.5}{50} = 2.31 \text{ cm} \quad w' = \frac{1}{6} b_p t_p'^2 = 44.5 \text{ cm}^3$$

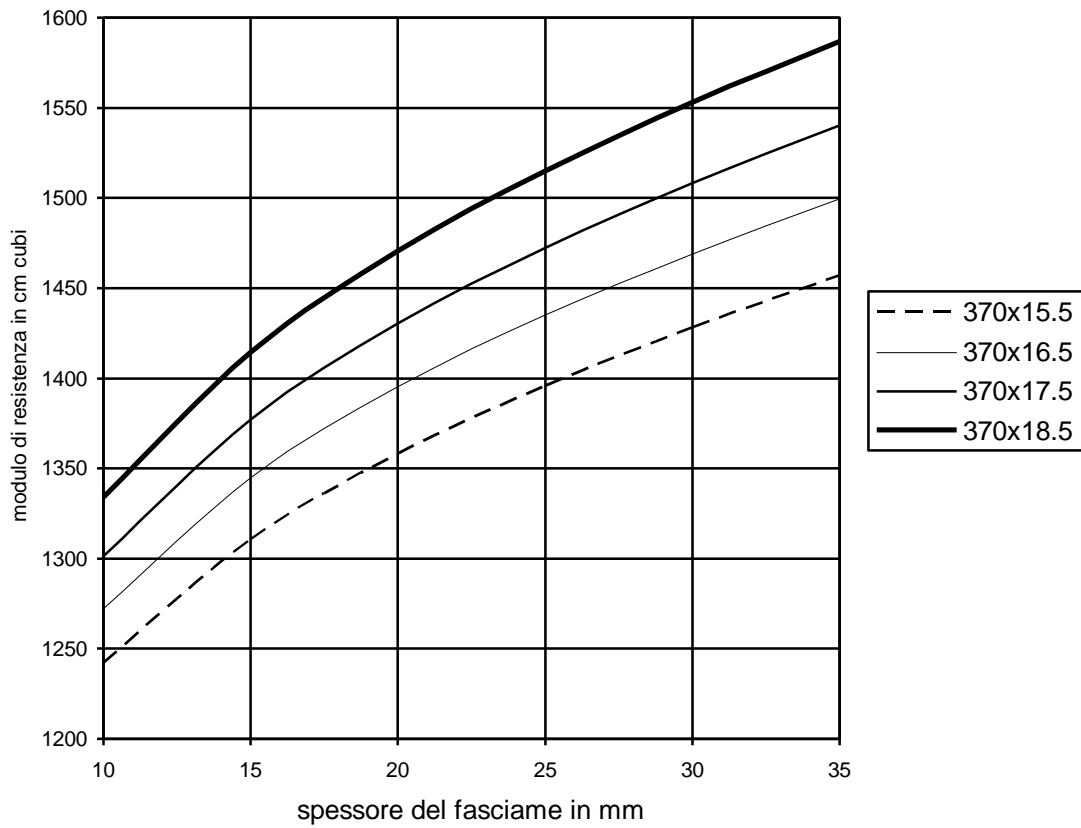
Si riscontra che il modulo di resistenza w' è nettamente inferiore. Facendo ora il confronto a parità di modulo:

$$\frac{1}{6} b_p t_p'^2 = 343.5 \quad \Rightarrow \quad t'_p = 6.42 \text{ cm}$$

quindi la lamiera semplice pesa $\frac{b_p t_p'}{b_p t_p + A_s} = 2.8$ volte la lamiera irrigidita. Tali considerazioni mostrano chiaramente l'efficacia degli irrigidimenti.

Curve del modulo di resistenza di profilati con fasciame associato.

Il Lloyd's Register of Shipping ha pubblicato il catalogo Geometric Properties of Rolled Sections and Built Girders ove sono riportati in forma grafica i momenti d'inerzia ed i moduli di resistenza di profilati con una striscia di fasciame associata larga 610 mm; tra le altre, è presente una serie di piatti a bulbo di produzione italiana. I grafici del modulo di resistenza si presentano come quello di seguito.

Moduli di resistenza, comprensivi del fasciame, dei piatti a bulbo alti 370 mm.

Una rappresentazione di tal tipo è utile perché, noti lo spessore del fasciame ed il modulo di resistenza, consente di scegliere con immediatezza le dimensioni del caso; siccome però è considerata, per ovvi motivi di compattezza, la sola larghezza di fasciame b_0 di 610 mm, bisogna ricorrere ad un artificio quando la larghezza effettiva è diversa. Si procede a parità di area, si assume cioè lo spessore equivalente t_e che moltiplicato per la larghezza di riferimento b_0 dà luogo all'area effettiva del fasciame collaborante:

$$t_e = \frac{b_p}{b_0} t_p$$

Questa posizione è ovviamente approssimata; essa corrisponde ad uno schema filiforme della geometria, accettabile per fasciami di piccolo spessore. Gli errori relativi che la tecnica comporta possono apprezzarsi dalle seguenti configurazioni risolte numericamente, ove con w si è indicato il modulo della geometria effettiva e con w_a quello della geometria equivalente.

Errori relativi ε commessi per alcune configurazioni d'esempio					
Piatto a bulbo	b_p (mm)	t_p (mm)	w (cm ³)	w_a (cm ³)	ε (%)
300 x 14	500	10	688	685	-0.4
“	700	15	748	752	0.6
“	900	20	784	805	2.7
“	1100	25	810	863	6.4
430 x 20.5	800	20	2213	2237	1.1
“	1000	25	2314	2385	3.0
“	1200	30	2389	2530	5.9
“	1400	35	2449	2696	10.1

Si rileva che il modulo è sovrastimato per larghezze di fasciame maggiori di quella di riferimento, sottostimato per larghezze inferiori. Si vede inoltre che l'errore cresce con lo spessore del fasciame e con la differenza tra la larghezza effettiva e quella di riferimento.

Modulo di resistenza di una trave composta.

Si fa riferimento alla trave a doppio T illustrata in figura. Siano:

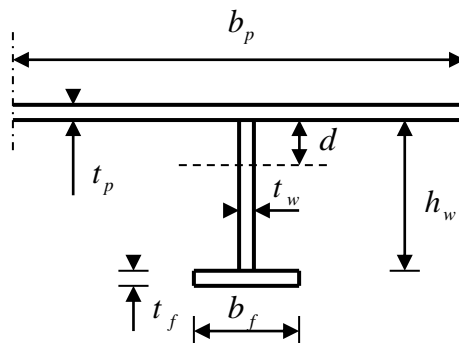
- h_w e t_w l'altezza e lo spessore dell'anima;
- b_f e t_f la larghezza e lo spessore della piattabanda;
- b_p e t_p la larghezza e lo spessore della striscia di fasciame associata.

La quota del baricentro d , il momento d'inerzia proprio I ed il modulo di resistenza della trave w sono dati da:

$$d = \frac{\frac{h_w^2 t_w}{2} + b_f t_f \left(h_w + \frac{t_f}{2} \right) - \frac{b_p t_p^2}{2}}{b_p t_p + h_w t_w + b_f t_f}$$

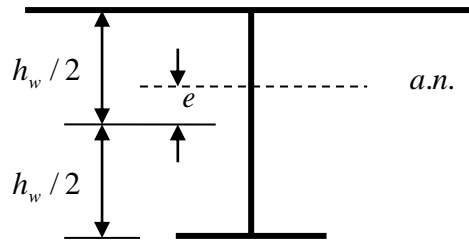
$$I = h_w t_w \left[\frac{h_w^2}{12} + \left(\frac{h_w}{2} - d \right)^2 \right] + b_f t_f \left[\frac{t_f^2}{12} + \left(h_w - d + \frac{t_f}{2} \right)^2 \right] + b_p t_p \left[\frac{t_p^2}{12} + \left(d + \frac{t_p}{2} \right)^2 \right]$$

$$w = \frac{I}{h_w - d + t_f}$$



Geometria di un rinforzo composto col fasciame associato

Ad una espressione più semplice si perviene se è lecito trascurare gli spessori della piattabanda e del fasciame, secondo lo schema filiforme di figura.



Schema filiforme di una trave a doppio T

Posto $A = A_p + A_w + A_f = b_p t_p + h_w t_w + b_f t_f$ si ottiene⁴ la formula:

$$w = A_f h_w + \frac{t_w h_w^2}{6} \left(1 + \frac{A_p - A_f}{A_p + t_w h_w / 2} \right)$$

suggerita dalle norme del RINA a condizione che sia: $A_p \geq t_f b_f$; $h_w / t_p \geq 10$; $h_w / t_f \geq 10$. Bisogna considerare che l'applicabilità di tale espressione resta legata alla validità delle ipotesi fatte; perciò sono date le due condizioni sui valori di h_w / t_p e h_w / t_f , mentre la prima assicura che è la piattabanda, non il fasciame, ad essere l'elemento più distante dall'asse neutro.

Le sezioni sottili aperte del tipo di quelle in esame sono soggette a fenomeni di instabilità. Perciò le travi rinforzate sono irrigidite da squadre trasversali, mentre le dimensioni dei rinforzi ordinari devono soddisfare opportune proporzioni dettate dalla buona pratica costruttiva; ad esempio, il RINA prescrive in merito quanto segue.

⁴ La posizione del baricentro è

$$e = \frac{A_p - A_f}{A_p + A_f + A_w} \frac{h_w}{2}$$

da cui

$$\frac{h_w}{2} + e = \frac{2A_p + A_w}{A} \frac{h_w}{2} \quad ; \quad \frac{h_w}{2} - e = \frac{2A_f + A_w}{A} \frac{h_w}{2}$$

Sviluppando

$$I = (A_p + A_f) \left(\frac{h_w}{2} \right)^2 + \frac{t_w h_w^3}{12} - A e^2 = A \left(\frac{h_w}{2} \right)^2 - \frac{t_w h_w^3}{4} + \frac{t_w h_w^3}{12} - A e^2 = A \left(\frac{h_w}{2} + e \right) \left(\frac{h_w}{2} - e \right) - \frac{t_w h_w^3}{6}$$

$$w = \frac{I}{\frac{h_w}{2} + e} = A \left(\frac{h_w}{2} - e \right) - \frac{t_w h_w^3}{6 \left(\frac{h_w}{2} + e \right)} = (2A_f + A_w) \frac{h_w}{2} - \frac{t_w h_w^3}{6 \frac{2A_p + A_w}{A} \frac{h_w}{2}} =$$

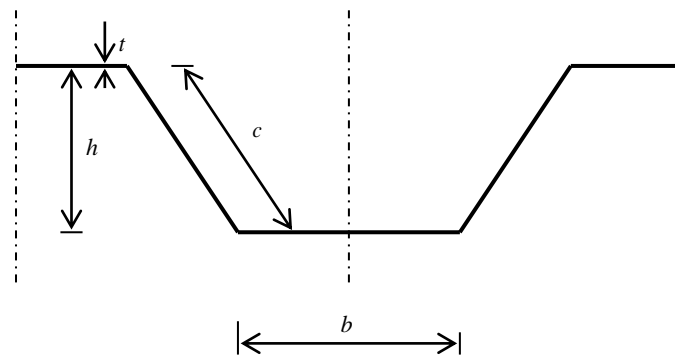
$$= A_f h_w + \frac{t_w h_w^2}{2} - \frac{t_w h_w^2}{3} \frac{A}{2A_p + A_w} = A_f h_w + \frac{t_w h_w^2}{6} \left(3 - 2 \frac{A_p + A_f + A_w}{2A_p + A_w} \right) = A_f h_w + \frac{t_w h_w^2}{6} \left(3 - 2 \frac{2A_p + A_w + A_f - A_p}{2A_p + A_w} \right)$$

Vincoli del RINA sulle dimensioni dei rinforzi ordinari				
Piatti	$h_w/t_w \leq 20\sqrt{k}$			
Sezioni a T	$h_w/t_w \leq 55\sqrt{k}$	$b_f/t_f \leq 33\sqrt{k}$	$b_f t_f \geq h_w t_w / 6$	
Sezioni a L	$h_w/t_w \leq 55\sqrt{k}$	$b_f/t_f \leq 16.5\sqrt{k}$	$b_f t_f \geq h_w t_w / 6$	
In funzione di R_{eH} (MPa)	235	315	355	390
valori di k	1	0.78	0.72	0.70

Bisogna pure che gli spessori degli elementi tra loro collegati non siano troppo difforni ad evitare difetti di saldatura o condizioni di saldatura incompatibili con la pratica di cantiere; orientativamente non bisogna superare il rapporto 2.

Modulo di resistenza di una paratia corrugata.

L'irrigidimento di una lamiera può essere ottenuta attraverso una opportuna sagomatura della stessa, come quella dello schema di figura. A tale soluzione si ricorre nel caso delle paratie corrugate.



Geometria di una paratia corrugata

Per determinare il modulo di resistenza, si considera l'elemento unitario del corrugamento, cioè la metà della sezione in figura. Si ha:

$$I = tb \left(\frac{h}{2} \right)^2 + tc \frac{h^2}{12} = th^2 \left(\frac{b}{4} + \frac{c}{12} \right) = \frac{th^2}{12} (3b + c)$$

$$w = \frac{th^2 (3b + c) / 12}{h/2} = \frac{th(3b + c)}{6}$$

Moduli di resistenza della trave scafo.

Per esaminare la risposta della trave scafo nel suo insieme, bisogna determinare i moduli di resistenza della generica sezione trasversale, in particolare della sezione maestra. I moduli da considerare sono quelli al fondo ed al ponte; essi sono dati dal rapporto del momento d'inerzia della sezione resistente, rispetto all'asse neutro, con la distanza tra l'asse neutro e la linea di costruzione, nel primo caso, o la retta del baglio, nel secondo caso.

Quando però siano presenti mastre o cofani continui, che quindi partecipano alla robustezza longitudinale, la distanza del ponte dall'asse neutro va aumentata; secondo le prescrizioni del RINA:

$$V_D = (z_T - h_{an}) \left(0.9 + 0.2 \frac{y_T}{B} \right)$$

essendo y_T e z_T le coordinate del bordo superiore dell'elemento.

La sezione resistente è costituita dagli elementi strutturali longitudinalmente continui compresi tra il fondo ed il ponte di resistenza, essendo quest'ultimo il ponte più alto che contribuisce efficacemente alla robustezza longitudinale. Perché ciò si verifichi, bisogna che esso si estenda adeguatamente in lunghezza all'interno del tronco più sollecitato. Dal punto di vista quantitativo, si fa riferimento al Regolamento del RINA del 1989, per cui:

- i ponti delle sovrastrutture del primo ordine contribuiscono alla robustezza longitudinale quando sono estesi per almeno il 15% della lunghezza di costruzione entro il tronco al mezzo di lunghezza pari al 40% di quella di costruzione;
- i ponti delle sovrastrutture di ordine superiore al primo contribuiscono alla robustezza longitudinale quando sono lunghi almeno il 60% della lunghezza di costruzione.

Pertanto, in presenza di sovrastrutture parziali efficaci, il ponte di resistenza si presenta a gradini.

Nello sviluppo tabulare del calcolo del modulo di resistenza è necessario elencare in modo chiaro tutti gli elementi che vi contribuiscono; quando i corsi di fasciame sono numerosi, diventa necessario numerarli ed è conveniente riferirsi alla consuetudine per cui si procede progressivamente:

- dal piano diametrale verso i fianchi nel caso dei fasciami orizzontali;
- dal basso verso l'alto nel caso dei fasciami verticali.

Ovviamente analoga convenzione può applicarsi ai correnti longitudinali.

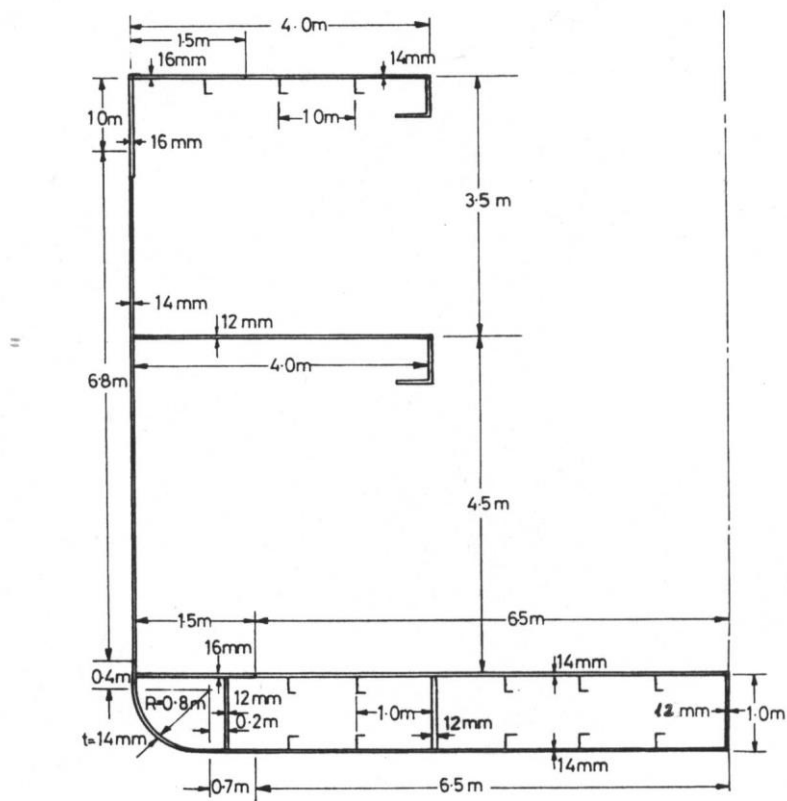
Contributo di una lamiera alleggerita.

Nel caso di lamiere alleggerite, detta h_{DF} la larghezza della lamiera e h_O la larghezza del foro, che si suppone centrato, area e momento d'inerzia proprio possono così esprimersi:

$$a = (h_{DF} - h_O)t = \left(1 - \frac{h_O}{h_{DF}} \right) h_{DF} t$$

$$i = \frac{h_{DF}^3 - h_O^3}{12} t = \left[1 - \left(\frac{h_O}{h_{DF}} \right)^3 \right] \frac{h_{DF}^3 t}{12}$$

Di tali alleggerimenti bisogna tener conto quando di grandi dimensioni; in termini quantitativi il RINA definisce grandi aperture quelle ellittiche che abbiano una lunghezza maggiore di 2.5 m o una larghezza maggiore di 1.2 m e quelle circolari il cui diametro sia maggiore di 90 cm.



Elementi longitudinalmente continui della nave da carico generale di esempio.

<i>Esempio di calcolo dei moduli di resistenza della sezione maestra</i>						
<i>Elemento</i>	<i>Dimensioni (mm)</i>	<i>Area a (cm²)</i>	<i>Altezza h (cm)</i>	<i>Momento statico ah (cm³)</i>	<i>Momento d'inerzia ah² (cm⁴)</i>	<i>Momento proprio i (cm⁴)</i>
Fasciame del fondo	7200 x 14	1008	0	0	0	0
Fasciame del ginocchio	1257 x 14	176	29.1	5,122	149,000	107,000
Fasciame del cielo del d.f.	6500 x 14	910	100	91,000	9,100,000	0
Marginale	1500 x 16	240	100	24,000	2,400,000	0
Paramezzale centrale ½	1000 x 12	60	50	3,000	150,000	50,000
Paramezzali laterali n. 2	1000 x 12	240	50	12,000	600,000	200,000
Fasciame del fianco	7200 x 14	1008	440	443,520	195,149,000	43,546,000
Cinta	1000 x 16	160	850	136,000	115,600,000	133,000
Trincarino del ponte di coperta	1500 x 16	240	900	216,000	194,400,000	0
Fasciame del ponte di coperta	2500 x 14	350	900	315,000	283,500,000	0
Fasciame del ponte di stiva	4000 x 12	480	550	264,000	145,200,000	0
Anima dell'anguilla del ponte di coperta	500 x 25	125	875	109,375	95,703,000	26,000
Piattabanda dell'anguilla del ponte di coperta	400 x 25	100	850	85,000	72,250,000	0
Anima dell'anguilla del ponte di stiva	500 x 25	125	525	65,625	34,453,000	26,000
Piattabanda dell'anguilla del ponte di stiva	400 x 25	100	500	50,000	25,000,000	0
Correnti del fondo n. 5	L 200 x 100 x 12	174	13	2,257	29,000	7,000
Correnti del cielo del d.f. n. 5	L 200 x 100 x 12	174	87	15,143	1,317,000	7,000
Correnti del ponte di coperta n. 3	L 150 x 100 x 12	86	889.9	76,620	68,184,000	2,000
	Σ	5756		1,913,662	1243,184,000	44,104,000
$h_{a.n.} = \frac{\sum ah}{\sum a} = \frac{1913662}{5756} = 332.5cm$ $I_{a.n.} = 2(\sum ah^2 + \sum i - h_{a.n.}^2 \sum a) =$ $= 2 \times (1,243,184,000 + 44,104,000 - 5756 \times 332.5^2) = 1,301,852,000cm^4 = 13.02m^4$ $Z_{ponte} = \frac{I_{a.n.}}{D_{ponte} - h_{a.n.}} = \frac{1,301,852,000}{900 - 332.5} = 2,294,000cm^3 = 2.294m^3$ $Z_{fondo} = \frac{I_{a.n.}}{h_{a.n.}} = \frac{1,301,852,000}{332.5} = 3,915,000cm^3 = 3.915m^3$						

Il rendimento geometrico.

La valutazione della correttezza, anche solo qualitativa, del modulo di resistenza è difficile perché i valori in gioco variano molto con le dimensioni della sezione resistente. Conviene perciò riferirsi ad un indice adimensionale i cui valori si collochino in un ambito ristretto e prevedibile.

Si presta a questo scopo il rendimento geometrico, definito da:

$$\eta = \frac{w_{\min} + w_{\max}}{Ah}$$

essendo w_{\min} il modulo di resistenza minimo, w_{\max} quello massimo, A l'area e h l'altezza della sezione resistente. Il rendimento geometrico è definito nel campo tra 0 ed 1; inoltre le geometrie più efficienti, a parità di ingombro verticale, sono quelle col rendimento maggiore. In verità questa correlazione vale in senso stretto solo per le sezioni col centro posto a metà altezza, per cui i due moduli di resistenza sono uguali; in presenza di una eccentricità infatti la resistenza è caratterizzata più propriamente dal modulo minore, che può differire sensibilmente da quello medio.

Ove ciò sia, se ne può apprezzare l'incidenza ricordando che il rapporto tra i due moduli di resistenza in presenza dell'eccentricità e è:

$$\frac{w_{\max}}{w_{\min}} = \frac{h/2 + e}{h/2 - e}$$

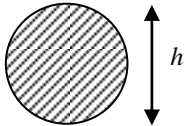
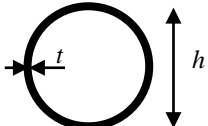
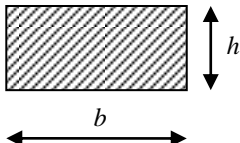
Si ha pertanto:

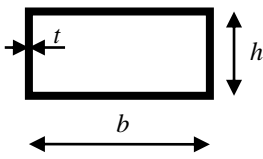
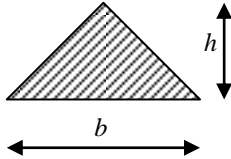
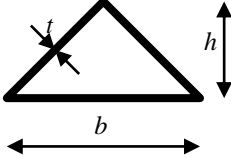
$$\eta = \frac{w_{\min}}{Ah} \left(1 + \frac{h/2 + e}{h/2 - e} \right)$$

da cui:

$$\frac{w_{\min}}{Ah} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{2e}{h} \right) \eta$$

Ad esplicitare numericamente quanto esposto, si riportano i valori relativi ad alcune sezioni elementari, piene e sottili.

	$I = \pi h^4/64$ $\eta = 1/4$
	$I = \pi h^3 t/8$ $\eta = 1/2$
	$\eta = 1/3$

	$b/h =$ 1 0.8 0.6 0.4 0.2 0 $\eta = \frac{1}{3} \frac{1+3b/h}{1+b/h} =$ 2/3 0.63 0.58 0.52 0.44 1/3
	$I = bh^3/36$ $2 e/h = 1/3$ $\eta = 1/4$
	$b/h =$ 1 0.8 0.6 0.4 0.2 0 $2 e/h =$.31 .27 .22 .16 .09 0 $\eta =$.70 .63 .56 .48 .41 .33

Si riportano ancora i campi di valori relativi ad alcuni profili, con o senza striscia di fasciame associata; per questa, quando presente, si è assunta una larghezza di 610 mm ed uno spessore pari a quello del ferro.

profilato	isolato		con fasciame	
	$2 e/h$	η	$2 e/h$	η
ad U	0	0.51 ÷ 0.61		
ad L	0.26 ÷ 0.38	0.43 ÷ 0.46	0.67 ÷ 0.74	0.53 ÷ 0.64
a bulbo	0.16 ÷ 0.26	0.40 ÷ 0.43	0.34 ÷ 0.66	0.58 ÷ 0.65

Dai risultati ottenuti per la sezione maestra prima esaminata, si ricava:

$$\eta = 0.60 \quad 2 e/D = 0.26$$

Come elemento di controllo dell'area resistente può poi assumersi il peso degli elementi resistenti per unità di volume, cioè l'area rapportata alla larghezza ed alla altezza della sezione ed il risultato moltiplicato per la densità dell'acciaio. Nel caso dell'esempio questo peso unitario risulta pari a 63 kg/m^3 .

Moduli di resistenza netti.

Gli acciai ordinari e ad elevata resistenza sono soggetti al fenomeno della corrosione, a meno che non siano appropriatamente protetti. Bisogna pertanto aumentare gli spessori strettamente necessari per ragioni di resistenza. Ad esempio, il RINA indica le seguenti maggiorazioni minime da adottare in funzione del tipo di compartimento e della posizione del ferro all'interno di esso; tali maggiorazioni si riferiscono alla corrosione di un solo lato, per cui la maggiorazione totale t_c deve essere la somma di due, diverse quando le facce dell'elemento strutturale appartengono a due diversi compartimenti adiacenti; se poi il ferro si estende in zone cui corrispondono maggiorazioni diverse, si assumeranno quelle maggiori.

Maggiorazioni minime per la corrosione da un solo lato, in mm.			
Tipo di compartimento e di ferro		In generale	In particolare
Casse di zavorra		1.00	1.25 nella zona superiore (1)
Cisterne e depositi di combustibile (con appropriata protezione, la maggiorazione può assumersi 0)	Fasciami orizzontali	0.75	1.00 nella zona superiore (1)
	Fasciami non orizzontali	0.50	1.00 nella zona superiore (1)
	Rinforzi ordinari	0.75	1.00 nella zona superiore (1)
Cisterne delle gassiere (liquefied gas carrier)		0.00	
Stive per rinfuse solide	In generale	1.00	
	Fasciami del cielo del doppio fondo, dei fianchi di contorno della stiva, degli scivoli alti e bassi, delle paratie trasversali	1.75	
	Costole	1.00	1.50 nella zona inferiore (2)
Tramogge delle draghe		2.00	
Locali di alloggio		0.00	
Compartimenti diversi dai precedenti Superfici esterne esposte all'acqua e all'aria		0.50	
(1) Zona sottoposta al cielo della cisterna fino ad 1.5 m da esso. Non vale per le casse del doppio fondo.			
(2) Zona al di sopra del fondo della stiva fino a 3 m da esso.			

In molte verifiche di resistenza⁵, bisogna riferirsi alle dimensioni nette; se sono noti gli spessori lordi, cioè quelli nominali dei laminati, bisogna allora detrarre da essi la maggiorazione t_c , assumendo, come di norma, che la corrosione sia uniformemente distribuita. Tale operazione è banale per i fasciami e la travi composte, ma può risultare difficoltosa nel caso dei profilati, che non presentano una geometria elementare.

Dalle caratteristiche dei profilati di interesse, per cui sostanzialmente lo spessore è lo stesso per anima ed ali, si riscontra di massima che, data la forma della sezione, l'area A_g ed il momento d'inerzia I_g variano linearmente con lo spessore, mentre la posizione del baricentro non cambia in rapporto all'altezza; se ne può dedurre che ciò valga anche per lo spessore netto ($t_g - t_c$). Coerentemente con ciò, si suggeriscono le seguenti espressioni⁶, più che soddisfacenti, purché lo spessore corroso sia una frazione modesta dello spessore lordo:

$$A_n = A_g - \frac{t_c}{2} p_g \quad e_n = e_g \quad k_n = k_g$$

⁵ Sfugge in particolare a tale regola il modulo di resistenza della sezione maestra; bisogna comunque verificare che sia $Z_n \geq 0.9 Z_g$, altrimenti gli sforzi globali conseguenti alle dimensioni lorde andranno divisi per 0.90.

⁶ Il RINA ammette la seguente espressione lineare del modulo di resistenza netto w_n in funzione di quello lordo w_g : $w_n = w_g (1 - \alpha t_c) - \beta t_c$ essendo i coefficienti dati da:

Tipo di ferro	α	β
Piatti	0.035	2.8
Profilati	0.060	14.0
Piatti a bulbo con $w_g \leq 200 \text{ cm}^3$	0.070	0.4
Piatti a bulbo con $w_g > 200 \text{ cm}^3$	0.035	7.4

Questa formulazione non è però utile nei dimensionamenti pratici ove interessa il modulo di resistenza di un insieme di elementi, non del singolo profilato. Si ricorda ancora che il RINA suggerisce una formula di equivalenza del piatto a bulbo ad un angolare che può essere utilmente utilizzata per la determinazione delle proprietà geometriche nette di tale ferro.

essendo p_g il perimetro, A le aree, e le coordinate baricentriche e k i raggi d'inerzia. Ove poi possa assumersi lo schema filiforme, ad esempio per i profilati a L ed a T, posto $p_g = 2A_g / t_g$, si ottengono le seguenti, più semplici perché non richiedono la conoscenza del perimetro p_g :

$$A_n = \left(1 - \frac{t_c}{t_g}\right) A_g \quad e_n = e_g \quad k_n = k_g$$

Corrosione e protezione dello scafo in acciaio.

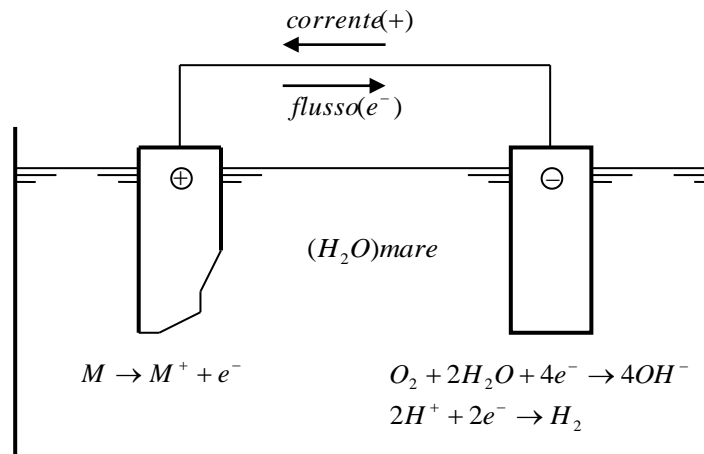
Si intende per corrosione il deterioramento di materiali metallici per effetto di reazioni con sostanze presenti nell'ambiente circostante, in particolare ossigeno ed acqua, che danno luogo a composti detti prodotti di corrosione. Per effetto di tali reazioni i metalli, che sono prodotti artificiali, ritornano al loro stato naturale di minerale, tipicamente ossido, che possiede una maggiore stabilità strutturale; perciò si parla a tal proposito di antimetallurgia.

La corrosione è ovviamente determinata dalla natura del materiale e del mezzo corrosivo, nonché dalla finitura e pulizia della superficie, dalla temperatura, dall'esistenza di stati tensionali, ecc. Si distingue tra corrosione a secco, che si svolge in presenza di atmosfere gassose per effetto di reazioni chimiche, e corrosione a umido, che si svolge in presenza di soluzioni elettrolitiche per effetto di reazioni elettrochimiche.

In questo caso il fenomeno può spiegarsi col formarsi di una cella galvanica⁷ del tipo di quella illustrata schematicamente in figura. I due elettrodi⁸, dissimili tra loro, sono posti in contatto tramite un filo metallico e sono immersi in un elettrolita. All'elettrodo positivo, detto anodo, avviene la reazione di ossidazione: il materiale di cui è costituito l'elettrodo entra in soluzione sotto forma di ioni positivi ed allo stesso tempo si generano elettroni che si dirigono dall'anodo al catodo tramite il circuito elettrico. All'elettrodo negativo, detto catodo, avviene la reazione di riduzione, di cui le più importanti sono la riduzione dell'idrogenione e quella dell'ossigeno disciolto a ioni ossidrilici; allo stesso tempo si consumano elettroni. A seguito del processo, l'anodo si consuma mentre il catodo si conserva.

⁷ Si dice cella galvanica una cella elettrochimica che genera corrente elettrica mediante una reazione di ossido-riduzione.

⁸ Si dice elettrodo un conduttore metallico che connette un circuito elettrico costituito da conduttori metallici ad un mezzo più o meno conduttore, quale una soluzione elettrolitica, un gas, un metallo fuso, ecc.



Schema di corrosione galvanica.

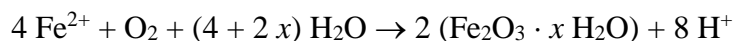
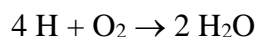
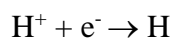
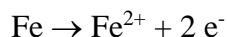
I ruoli assunti dai due elettrodi dipendono soprattutto dalla natura dei materiali a contatto; si prevede il loro comportamento tramite l'opportuna serie galvanica, quale quella appresso riportata che è relativa all'acqua di mare; in essa i materiali sono ordinatamente disposti da quelli più nobili, cioè più resistenti alla corrosione, a quelli meno nobili. Pertanto, si comporta da anodo e si corrode il materiale meno nobile dei due.

Serie galvanica di metalli e leghe in acqua di mare	
<i>Estremità catodica o nobile</i>	
Platino, Oro	
Argento	
Titanio	
Acciaio inossidabile (passivo)	
Nichel (passivo)	
Bronzo	
Rame	
Nichel (attivo)	
Ossido di ferro	
Ottone	
Piombo, Stagno	
Acciaio inossidabile (attivo)	
Ferro, Ghisa, Acciaio al carbonio	
Leghe di alluminio	
Alluminio	
Zinco	
Magnesio	
<i>Estremità anodica o ignobile</i>	

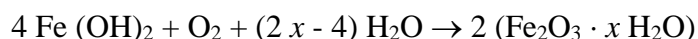
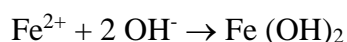
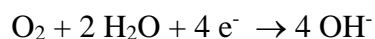
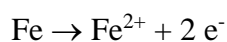
La corrosione dell'acciaio prende il nome arrugginimento. La ruggine è un ossido ferrico idrato la cui composizione è mediamente $2 \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$; in realtà il contenuto d'acqua è variabile, per cui si scrive in generale $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x \text{H}_2\text{O}$. Per la formazione della ruggine è necessaria la presenza sia dell'ossigeno, sia dell'acqua, come si evince da una delle possibili reazioni alla base del processo



Il processo poi si articola nelle seguenti fasi, di cui la prima rappresenta la reazione di ossidazione:



oppure:



L'arrugginimento è severo in ambiente marino ed è generalmente di tipo galvanico; ciò è vero anche per la corrosione atmosferica delle superfici emerse quando il tasso di umidità supera valori tra il 60 ed il 70%, condizione che usualmente si verifica sia in cantiere, sia in galleggiamento.

Per quanto detto, la corrosione è propriamente galvanica allorché si ha il contatto di due metalli dissimili con la creazione di una macrocoppia galvanica; ciò può verificarsi, ad esempio, quando l'acciaio dello scafo è in contatto col bronzo dell'elica o con sovrastrutture in lega leggera. Perciò si ricorre in questi casi all'interposizione di opportuni isolanti. La corrosione si verifica anche su una singola superficie metallica; in tal caso si creano, in forma più o meno diffusa, molteplici microcoppie galvaniche, cioè aree anodiche e catodiche adiacenti di piccola dimensione, ma con una differenza di potenziale capace di generare le reazioni di ossidazione e riduzione; ciò avviene in presenza di discontinuità metallurgiche o difetti superficiali, ad esempio per effetto di screpolature dello strato di vernice o di ossido passivizzante, a causa di impurità, in corrispondenza dei cordoni di saldatura.

La forma della corrosione può essere generalizzata, detta pure diffusa, o localizzata; convenzionalmente si definisce localizzata una corrosione la cui profondità sia maggiore delle dimensioni superficiali. La corrosione generalizzata si dice uniforme quando la profondità è pressoché la stessa in tutta la superficie corrosa, altrimenti disuniforme; essa si manifesta soprattutto negli acciai al C in ambienti naturali quali acqua ed aria e può essere prodotta, ad esempio, dalle scaglie di laminazione: esse, fessurate perché fisicamente instabili, non formano una barriera protettiva, ma invece fungono da catodo rispetto all'acciaio nudo. Per quanto riguarda la corrosione localizzata, si distingue tra la vaiolatura (pitting), che si manifesta con cavità a forma di caverna o di punta di spillo o di emisfera, e la corrosione interstiziale o sotto deposito (crevice), che si verifica in fessure di piccole dimensioni, inferiori ad un decimo di millimetro, quali quelle che si hanno in corrispondenza dei collegamenti saldati tra i rinforzi ed il fasciame; in entrambi i casi questa corrosione di tipo puntiforme è attribuita all'aerazione differenziale, cioè alla difficoltà che incontra l'ossigeno a diffondere all'interno di queste cavità capillari. Il pitting si manifesta negli acciai inossidabili e nelle leghe di rame ed alluminio; l'innescò è dato da difetti superficiali o da rotture del film

superficiale di ossidi; il crevice si manifesta sia negli acciai al C, sia in quelli basso-legati ed inossidabili.

Si parla poi di corrosione selettiva, che può essere intergranulare o transgranulare; la prima, detta anche intercristallina, si ha quando la corrosione si manifesta ai bordi dei grani cristallini; quella transgranulare si ha quando la corrosione si manifesta solo in uno dei componenti di lega. Tra le leghe soggette alla corrosione intergranulare si hanno gli acciai inossidabili ed alcune leghe di Ni.

La corrosione può inoltre essere favorita o generata da altre cause, cui si accompagna più o meno intensamente quella elettrochimica; si parla in tal caso di: corrosione sotto sforzo o tensocorrosione (stress corrosion), ad esempio in pezzi lavorati a freddo e soggetti a campi di tensione residua; per fatica, che accelera la propagazione della cricca sotto l'azione di carichi dinamici; per erosione, per cavitazione, per sfregamento (fretting), ove l'azione elettrochimica è preceduta dall'azione meccanica; per correnti disperse (stray current corrosion).

Una superficie di acciaio dolce priva di protezione è soggetta ad una sensibile corrosione generalizzata; indicativamente, essa può essere tra 0.03 e 0.1 mm all'anno nelle cisterne di greggio, tra 0.2 e 0.4 mm all'anno nella casse di zavorra, circa 0.15 mm all'anno sulle superfici immerse in acqua calma; valori maggiori si hanno per effetto del bagnasciuga, circa 0.5 mm all'anno, e in presenza da una corrente fluida si può arrivare a 0.8 mm all'anno. Nel caso di corrosione localizzata possono aversi penetrazioni ancora maggiori, fino a 5 mm annui, col rischio di sfondamenti. Tali valori impongono l'adozione di adeguate misure contro il fenomeno.

La scelta dei materiali costituenti lo scafo non può avere l'obiettivo di evitare la corrosione perché ciò determinerebbe costi eccessivi; il fine da perseguire è invece quello di adottare tecniche di protezione che contengano la corrosione entro limiti tecnicamente accettabili ed economicamente sostenibili.

Il controllo della corrosione si basa intanto su un attento progetto che eviti interstizi, ristagni d'acqua, strutture inaccessibili, e che preveda gli opportuni drenaggi ed i necessari sovrassessori. Bisogna poi predisporre ed eseguire un adeguato programma di ispezione e manutenzione esteso a tutta la vita della nave. Infine le superfici devono essere adeguatamente protette e ciò può ottenersi col sistema catodico o mediante l'applicazione di rivestimenti protettivi che possono essere organici, cioè le vernici, o inorganici o cementizi.

La protezione catodica, o elettrica, consiste nel rendere negativo il potenziale del materiale da proteggere in modo da farlo diventare il catodo della cella elettrolitica, cosicché la corrente che ne consegue protegge il materiale. La corrente media per unità di superficie che rende trascurabile la corrosione è detta densità di corrente di protezione; essa dipende dalle proprietà del materiale e dell'elettrolita e dalla tecnica di protezione. La protezione catodica può realizzarsi mediante anodi di sacrificio (protezione galvanica) o mediante l'applicazione di correnti impresse.

Gli anodi di sacrificio sono corpi costituiti da leghe di zinco o alluminio o magnesio, cioè materiali meno nobili dell'acciaio, che, applicati allo scafo, fungono da anodi e quindi si

sacrificano, consumandosi, e così proteggono lo scafo dalla corrosione. Per una protezione efficace di superfici adeguatamente rivestite gli anodi applicati⁹ devono assicurare una corrente tra 12 e 20 mA/m².

⁹ La massa anodica totale M_a deve fornire le cariche elettriche necessarie a proteggere la superficie A per un assegnato periodo di tempo L ; dal punto di vista teorico, essa è chimicamente determinata dalla natura degli anodi. Difatti, secondo la legge dell'elettrolisi di Faraday, la carica elettrica Q , in Coulomb, necessaria per depositare o liberare all'elettrodo la massa di materia M_t è:

$$Q = Fz M_t / m$$

dove m e z sono la grammo-mole e la valenza dello ione e F è la costante di Faraday, pari a 96500 Coulomb/mole; essa è la quantità di carica di una mole di ioni monovalenti, data dal prodotto del numero di Avogadro, cioè il numero di atomi o molecole contenuto in una mole, pari a 6.022×10^{23} , per la carica di un elettrone, pari a -1.60×10^{-19} Coulomb. Per avere la carica di un Ampere per un anno, cioè $3600 \times 24 \times 365 = 31.536 \times 10^6$ Coulomb, il consumo teorico di materiale anodico, in kg/A/anno, è:

$$C_t = \frac{31.536 \times 10^6}{1000F} \frac{m}{z} = \frac{m}{3.06z}$$

Ad esempio, nel caso del magnesio la massa atomica è 24.32 g e lo ione è bivalente, per cui: $C_t = 24.32/3.06/2 = 4$ kg/A/anno.

Siccome poi il rendimento elettrochimico è sempre inferiore all'unità, il consumo pratico di materiale anodico C risulta sempre maggiore di quello teorico. Deve essere pertanto:

$$M_a = s i_0 A C L$$

ove i_0 è la densità di corrente di protezione ed s è un fattore di sicurezza maggiore dell'unità. Bisogna poi che il numero N e le dimensioni degli anodi garantiscano l'erogazione della densità di corrente di protezione dal punto di vista elettrico:

$$I_a = A i_0 / N$$

La corrente I_a del singolo anodo dipende dalla sua natura, dalle sue dimensioni e dalla resistività ambientale; essa può esprimersi, come al solito, con:

$$I_a = E / R$$

ove: E è la forza elettromotrice data dalla differenza di potenziale di corrosione dei due elettrodi, ridotta per eventuali effetti di polarizzazione; R è la resistenza dell'elettrolita localizzata all'anodo, che può valutarsi con la

formula di Dwight: $R = \frac{P}{2\pi l_a} \left(\ln \frac{4l_a}{r_a} - 1 \right)$, avendo indicato con P la resistività dell'elettrolita, all'incirca tra 20

e 30 Ω cm per l'acqua di mare, e con l_a ed r_a la lunghezza ed il raggio di un anodo cilindrico; per sezioni rette diverse può assumersi $r = \sqrt{a/\pi}$, essendo a l'area della sezione. A concretizzare quanto esposto, si riportano alcuni dati di interesse pratico.

Materiale	Potenziale di corrosione (V)	Consumo pratico di anodo (kg/A/anno)
Acciaio dolce	- 0.60	
Acciaio dolce polarizzato	- 0.80	
Zinco	- 1.10	11
Alluminio	- 1.15 ÷ - 1.20	3.0 ÷ 3.5
Magnesio	- 1.55 ÷ - 1.75	8
Lega Al-Zn-Hg	- 1.05	3.1 ÷ 3.2
Lega Al-Zn-Sn	- 1.05	3.4 ÷ 9.7

Ad esempio, si voglia proteggere per 5 anni la superficie di scafo di 3000 m² con anodi in lega di Al di massa volumica 4.2 g/cm³ e consumo pratico 3.2 kg/A/anno. Si assume la densità di corrente di protezione di 20 mA/m² ed il fattore di sicurezza di 1.25. La massa anodica totale deve essere $M_a = 1.25 \cdot (20/1000) 3000 \cdot 3.2 \cdot 5 = 1200$ kg. Assumendo ora 10 anodi cilindrici caratterizzati dal rapporto $l_a/r_a = 20$, si ricava la lunghezza

$$l_a = \sqrt[3]{\frac{M_a/N}{4200} \frac{1}{\pi} \left(\frac{l_a}{r_a} \right)^2} = 1.54m \quad \text{Per la resistività } P \text{ di } 20 \Omega\text{cm, la resistenza è } R = \frac{P/100}{2\pi l_a} (\ln 80 - 1) = 0.070 \Omega$$

La densità di corrente erogata risulta $i = \frac{E}{R} \frac{N}{A} = \frac{1.05 - 0.80}{0.070} \frac{10}{3000} = 0.012 A/m^2$ insufficiente a proteggere lo

Col sistema delle correnti impresse, il polo positivo di un circuito elettrico alimentato da un generatore di corrente continua è collegato ad anodi relativamente inerti, che si corrodono poco; essi possono essere fatti con leghe di piombo ed argento, o con leghe di platino e palladio o con metalli, in particolare titanio e niobio, platinati¹⁰. Lo scafo è collegato al polo negativo del circuito. Sullo scafo sono fissati, direttamente a fasciame o in recessi, almeno due elettrodi di zinco; essi posseggono caratteristiche elettrochimiche ben definite per cui sono assunti a riferimento per rilevare la differenza di potenziale rispetto allo scafo, che è indice dell'efficienza del sistema; il segnale è inviato ad una centralina di controllo che regola il generatore di corrente in modo da mantenere il potenziale al livello voluto; per lo scafo verniciato si adotta una differenza di potenziale tra 0.80 e 0.85 V e la corrente deve essere tra 20 e 100 mA/m².

Le superfici metalliche possono essere isolate e protette dall'ambiente corrosivo mediante rivestimenti inorganici, tra cui quelli metallici, ed organici, cioè la vernice, che è certamente il più diffuso mezzo di protezione dello scafo.

La vernice è una sostanza liquida che, applicata in strato sottile su una superficie, essiccandosi forma una pellicola solida, detta film, che ha scopi decorativi e protettivi.

La vernice consiste di un pigmento disperso in un liquido detto veicolo. Il pigmento è una sostanza in polvere di natura inorganica od organica, insolubile nel veicolo, avente la funzione di conferire colore, potere coprente ed altre proprietà quali quelle anticorrosive od antivegetative. Il veicolo è formato da una sostanza filmogena, cioè in grado di formare un film, che è detta anche legante, quasi sempre disciolta o dispersa in un solvente, che è un liquido volatile che permette l'applicazione del prodotto verniciante e regola il tempo di formazione della pellicola. La pellicola si forma per ossidazione all'aria o per evaporazione del solvente o per reticolazione a elevata temperatura o per la reazione chimica tra due componenti, detti comunemente base ed induritore, che sono conservati in recipienti separati (vernice a due componenti o two pack paint) e vengono miscelati al momento dell'uso. Al veicolo possono essere aggiunti riempitivi, cioè sostanze acromatiche ed insolubili di natura minerale, aventi la funzione di ridurre il costo e di modificare talune proprietà quali la consistenza, la resistenza all'abrasione, la permeabilità e la durabilità.

Le vernici possono essere all'olio, bituminose e resine, naturali od artificiali; tra di esse le seguenti.

- Le vernici bituminose sono economiche e posseggono ottima impermeabilità, ma scarsa durezza ed emettono vapori nocivi.
- Le vernici all'olio sono costituite da oli essiccativi vegetali, come il ben noto olio di lino; la loro essiccazione in aria richiede tempi lunghi.

scafo. Riprovando, per $N = 22$ si trova la soluzione appropriata, caratterizzata da: $l_a = 1.18 \text{ m}$; $R = 0.091 \Omega$; $i = 0.020 \text{ A/m}^2$.

¹⁰ A titolo indicativo, il consumo pratico di materiale anodico è tra 0.1 e 0.2 kg/A/anno per le leghe di Pb ed Ag (Ag al 2%) e di 8×10^{-6} kg/A/anno per il Ti ed il Nb platinati, valori notevolmente inferiori a quelli degli anodi sacrificali della protezione galvanica.

- Le vernici oleo-resinose incorporano resine naturali od artificiali per accelerare il processo di essiccamento e conferire specifiche proprietà.
- Le resine alchidiche hanno rimpiazzato le vernici ad olio in molteplici applicazioni; esse sono versatili ed economiche in virtù dei materiali da cui sono ricavate, che sono acidi grassi ed alcool; sono adatte per atmosfere poco aggressive; a bordo sono utilizzate per le sovrastrutture, eventualmente con l'aggiunta di smalti.
- Le resine epossidiche presentano notevole resistenza alla corrosione chimica e fanno buona presa, ma sono costose e soggette a sfarinamento; sono confezionate nella forma two-pack. Si prestano a proteggere la superficie immersa dello scafo dall'aggressione dell'acqua di mare.
- Le poliuretatiche sono resine dure, lucenti, resistenti all'abrasione ed alla corrosione chimica ed atmosferica; sono adatte alla protezione delle superfici bagnate ed anche utilizzate sulle sovrastrutture per ragioni estetiche. Sono prodotte in confezioni ad uno e due componenti; in quelle ad un componente, la reticolazione non avviene prima dell'uso per la presenza di un olio minerale, che poi evapora.
- Le resine viniliche sono basate sulla stessa molecola del PVC; resistono bene all'acqua ed a molti agenti chimici, per cui si prestano molto bene alla protezione delle superfici immerse. Presentano però scarsa aderenza e piccolo spessore di pellicola.
- Le vernici acriliche, spesso in combinazione con altre resine per ottenere proprietà specifiche, sono apprezzate per il loro valore estetico. Esse sono ad un sol componente.
- Le vernici epossi-bituminose, disponibili in confezione two-pack, sono formate da catrame di carbon fossile e resina epossidica, e perciò son dette anche catrami epossidici; sono vernici che sposano la capacità impermeabilizzante delle bituminose con la resistenza chimica delle resine epossidiche. Perciò sono spesso usate per la protezione della superficie di carena, anche perché offrono una buona protezione contro l'abrasione causata da contatti a banchina e con corpi galleggianti.
- Le vernici a base di gomma clorurata, resina ottenuta per reazione della gomma col gas di acido cloridrico, dette anche cloro gommose o cloro caucciù, resistono bene all'umidità, agli acidi ed agli alcoli, ma resistono male a temperature superiori a 60°; in soluzione con solventi organici hanno il pregio di conferire un elevato contenuto solido al veicolo, potendosi così realizzare film di grande spessore. Sono adatte alla protezione della coperta.

Rivestimenti fondamentali per i cantieri navali sono i cosiddetti shop primer: essi sono applicati a tutti i laminati, subito dopo la sabbiatura, ed hanno lo scopo di proteggerli durante le successive fasi di lavorazione. Contengono polvere di zinco metallico, che protegge catodicamente il materiale anche quando il piccolo spessore dello strato applicato, tra 15 e 25 µm, appena sufficiente a coprire la rugosità superficiale, presenta fessurazioni e viene a mancare l'effetto barriera. Per altro aspetto, gli shop primer devono essiccare rapidamente, aderire bene alle superfici, permettere le operazioni di taglio e saldatura senza difficoltà, poter essere sovra-verniciate. Si distingue tra shop primer organici, che sono vernici epossidiche bi-

componenti ad alto tenore di zinco, e shop primer inorganici, costituiti da silicati di zinco; questi ultimi sono spesso preferiti perché emettono meno fumi.

Vernici importanti per l'esercizio economico della nave sono quelle antivegetative; bisogna difatti considerare che uno scafo non protetto può accumulare incrostazioni fino a 150 kg/m² in sei mesi di navigazione e, soprattutto, aumentare sensibilmente la rugosità della carena e quindi la sua resistenza al moto. Queste vernici contengono pigmenti tossici che, dissolvendosi in acqua, impediscono lo sviluppo di incrostazioni marine, vegetali ed animali, sulla carena; esse sono ablativo in forma uniforme e regolare, per cui tali vernici sono autoleviganti (SPC da Self Polishing Copolymer), con evidente vantaggio per quanto riguarda la resistenza al moto. La sostanza tossica tradizionalmente utilizzata fino a pochi anni addietro era il tributilstagno (TBT da Tri-Butyl-Tin); l'accumulo di questa sostanza è però nocivo per certi organismi marini, soprattutto in aree ristrette, e può inserirsi nella catena alimentare umana, per cui essa è oggi bandita. Le attuali vernici antivegetative, dette TBT-free antifouling, contengono ossidi di rame in matrice epossidica, con una tossicità circa mille volte inferiore a quella del TBT, ma sono più costose e meno efficienti di quelle TBT, in particolare il ciclo operativo si è ridotto all'incirca da 5 a 3 anni. In alternativa, ma ancor più costose, sono le biocide-free antifouling, ad azione meccanica: la matrice siliconica è bio-repellente e forma superfici molto levigate; sono costose e la vita operativa è di circa 5 anni.

La superficie esterna dello scafo, in considerazione delle specifiche esigenze, si divide nelle seguenti aree: fondo, bagnasciuga, bordo libero, coperta, sovrastrutture.

Il fondo è continuamente esposto all'aggressione corrosiva dell'acqua di mare ed a quella chimica delle zone alcaline localizzate in prossimità degli anodi di sacrificio; è protetto tipicamente da due o tre strati di vernice anticorrosiva, epossidica bi-componente o catrame epossidico, e da due o tre strati di vernice antivegetativa. Questi strati hanno uno spessore, detto DFT da Dry Film Thickness, di circa 125 µm le anticorrosive, di 150 µm le antivegetative.

Condizioni simili a quelle del fondo si hanno nella zona del bagnasciuga, che inoltre è soggetto ad abrasione meccanica per i contatti con banchine e corpi galleggianti. Perciò il rivestimento è simile a quello del fondo; eventualmente si può ridurre la protezione antivegetativa e si può adottare la gomma clorurata come vernice anticorrosiva.

Il bordo libero è soggetto all'azione delle onde ed all'abrasione meccanica per contatti con corpi estranei; è importante in questo caso l'aspetto estetico. Tipicamente si applicano tre strati di gomma clorurata ed una mano di finitura colorata costituita da resina alchidica.

La coperta è soggetta a corrosione atmosferica, usura, abrasione, urti, aggressione, dei prodotti di pulizia ed eventualmente dei carichi trasportati, ed inoltre deve possedere proprietà anti-sdrucchiolo. Contro la corrosione si utilizzano vernici antiruggine quali gomma clorurata, resina epossidica, resina poliuretana.

La protezione delle sovrastrutture è tipicamente affidata alla mano di shop-primer, ad una mano di antiruggine e ad una o due mani di finitura che soddisfino le esigenze estetiche del caso; si ricorre, ad esempio, a resine poliuretatiche, epossidiche, alchidiche.

La protezione delle superfici interne dello scafo dipende ovviamente dalla destinazione dei compartimenti, in particolare per quanto riguarda le stive e le cisterne del carico. Si riportano due esempi tipici, ma dissimili tra loro. Le casse di zavorra sono protette da due strati di catrame epossidico; possono pure utilizzarsi anodi di sacrificio, ed in tal caso lo spessore del rivestimento può essere ridotto. La protezione delle cisterne di greggio è affidata in gran parte al solo shop-primer; si verniciano solo le superfici più a rischio, cioè fondo, cielo ed eventualmente travi rinforzate a sviluppo orizzontale, sedi di ristagno, condensa e sbattimento; talvolta si ricorre alla protezione catodica.