Capítulo 1

INTRODUÇÃO AO NAVIO

Como o define o Almirante Castro e Silva na sua Arte Naval Moderna [1], navio (*ship*) ou embarcação (*vessel*) é uma construção flutuante destinada a navegar. O objetivo com que navega varia consoante o tipo de navio, podendo ser para transportar carga ou passageiros; pescar; efetuar operações subaquáticas, operações militares; prestar serviços de apoio no mar, em porto ou em rio ou, muito simplesmente, para divertir.

A designação navio é mais ajustada para as embarcações maiores, enquanto a palavra embarcação se utiliza para as mais pequenas. A designação barco (*boat*), algo proscrita da linguagem tradicional da Marinha, é indiscutível no meio da pesca: Vamos ao mar no barco do Tóino!

Algumas expressões, com maior ou menor adesão à sua origem, foram sendo consolidadas na linguagem corrente: paquete (*passenger ship*), para navio de passageiros; baleeira ou salva-vidas (*lifeboat*), designação das embarcações auxiliares que funcionam como meios de salvação nos navios – desenvolve-se no capítulo 5; bote, para qualquer embarcação pequena a remos ou com pequeno motor; lancha (*launch*), pequena embarcação cabinada a motor; chalandra, a pequena embarcação utilizada na pesca de cerco para segurar a ponta da rede e para auxiliar nas manobras e na transferência do pescado; traineira, embarcação tradicional para a pesca de cerco (sardinha, carapau e cavala), construída em madeira, normalmente não excedendo 30 m; escaler, designação antiga genérica de pequena embarcação com popa de painel, diferente das antigas baleeiras que tinham a popa afilada; dóri, pequena embarcação a remos individual que se levava a bordo dos lugres, que se arriava para a água para a faina, utilizada na pesca do bacalhau, com um casco cónico que permitia empilhá-las, uma dentro de outra, para ocupar menos espaço no convés; chata, pequena embarcação com o fundo chato.

Para navegar, o navio necessita de possuir:

- Flutuabilidade (*buoyancy*), capacidade para gerar uma impulsão igual ao seu peso

- Estabilidade (*stability*), a propriedade de se manter direito ou a tendência a regressar a essa posição quando dela desviado
- Manobrabilidade (*manoeuvrability*), a capacidade para evoluir no sentido desejado
- Habitabilidade (*habitability*), a característica para alojar convenientemente as pessoas
- Segurança (*safety*), propriedade de desempenhar as suas funções preservando a vida das pessoas, o valor dos bens e a qualidade do ambiente.

A flutuar, os navios adquirem os seguintes movimentos, simples ou combinados:

- A andar (*under way*), quando em movimento através da água, nem fundeado nem amarrado
- Andar a vante (*going ahead, making headway*) evoluir para a frente
- Andar a ré (*going astern, making sternway)* evoluir para trás
- Guinar (*turning*), deslocamento angular para um bordo, normalmente provocado pela acção do leme
- Rolo ou balanço bombordo estibordo (*roll*)
- Cabeceio, balanço proa popa ou balanço longitudinal (*pitching*). Quando é forte e a proa sai e reentra violentamente na água em chapão, diz-se que o navio caturra (*slamming*)
- Arfar *(heaving),* movimento de sobe e desce segundo o eixo vertical
- Gingar (*yaw*), movimento angular alternado a um e outro bordo em relação ao seguimento. Também se usa esta expressão para referir o movimento de propulsionar um bote com um único remo à popa
- Galear (*surge*), movimento de vaivém linear para vante e para ré; acontece também galeamento, com o navio atracado sob a acção das correntes e o esticar alternado dos cabos de amarração
- Abater (*broad side on*), deslocação transversal, por exemplo, sob ação de uma corrente de través
- À deriva (*adrift*), livre de amarrações sem sistema propulsor.

Estes movimentos dependem da ação dos sistemas propulsor e de governo, da direção do mar e do vento em relação ao navio, e combinam-se entre si.

1.1 Constituintes do navio e terminologia

O navio é constituído pelo casco (*hull*) e pelas superstruturas (*superstructures*), Figura 1.1. O casco é a parte que vai até ao pavimento principal, a que

se dá o nome de **convés** (*main deck*) que é, na maioria dos casos, o pavimento superior exposto ao tempo (*weather deck*). As superstruturas são todas as construções acima do convés. As que se estendem a toda a largura do navio tomam as designações específicas de **castelo de proa** (*forecastle*), **castelo central** (*bridge*) e **castelo de popa** (*poop*), consoante se situam nas partes de vante (frente), central (meio) ou de ré (trás); se o castelo se estende a todo o comprimento do navio, diz-se que é um navio de **castelo corrido** (*flush deck*); as superstruturas que não se estendem a quase toda a largura do navio designam-se por **casotas**. Ao conjunto das superstruturas é costume chamar também **casario**.

À parte do casco que está imersa, isto é, abaixo da linha de água, chama-se **obras vivas** (*hull below waterline*), e ao conjunto do casco emerso e superstruturas, **obras mortas** (*hull and superstructures above waterline*). A flutuar, as obras vivas geram a impulsão que sustenta o navio; as obras mortas devolvem-nos apenas a sua imagem. E se a embarcação for à vela, uma outra imagem nos é devolvida: a **mastreação** (*masts*), o **velame** (*sails*) e as **enxárcias** (*rigging*).

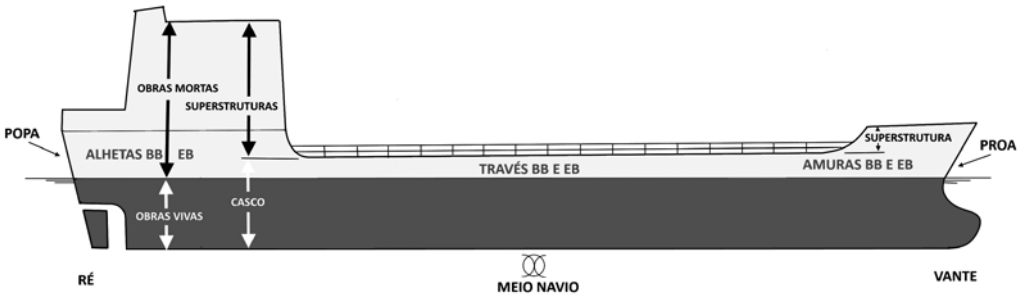

Figura 1.1 Partes do navio (visto de estibordo)

A forma do casco do navio é apresentada no **plano geométrico** (*lines plan*), Figura 1.2, que representa nas vistas horizontal, vertical e seccional as projeções dos vários cortes: os paralelos ao plano do mar definem as chamadas **linhas de água** (*waterlines*) ou **flutuações**; os longitudinais, perpendiculares ao plano da flutuação, definem as **secções longitudinais** (*buttocks*); os transversais, perpendiculares aos anteriores, definem as **secções transversais** (*transverse sections; body plan*). Dado o navio, normalmente[1], ser simétrico, na vista horizontal só se representam as linhas de água de um dos lados, bombordo, e na vista seccional, meias secções, as de ré normalmente do lado esquerdo e as de vante do lado direito. É comum, por economia de espaço (contrariamente ao que está

[1] Certos navios com um único propulsor, porém, têm a popa assimétrica, para otimizar o fluxo da corrente de esteira para o hélice.

na figura), sobrepor o plano de secções na vista longitudinal, naturalmente, na mesma escala, e não representar a totalidade das linhas onde as secções são exatamente iguais, o chamado corpo cilíndrico central (*parallel middle body*). Observam-se os seguintes referenciais: o plano teórico que divide o comprimento do navio a meio chama-se meio-navio (*midships*) e a secção do casco que esse plano corta é a casa mestra ou secção mestra (*midship section*); a linha teórica vertical que passa pelo meio da secção mestra é a linha de centro (*centre line*). Ao plano longitudinal que divide o navio em duas partes simétricas, também chamado plano diametral, chama-se mediania ou meia nau; a linha imaginária horizontal da mediania que passa pela quilha chama-se linha de construção (*base line*) e define o eixo dos XX nos desenhos de construção naval.

O plano geométrico é complementado com uma tabela de meias bocaduras (*half breaths table*) onde se apresentam, para cada secção e a cada linha de flutuação, as cotas transversais do casco em relação à linha de centro; é a forma analítica de definir a forma do casco. Outrora, na construção do navio, era necessário desenhar em verdadeira grandeza as secções correspondentes a cada baliza, para servir de modelo em escala 1:1. Acontecia na chamada sala do risco (*mould loft*) que, para o efeito, apresentava grandes dimensões, e utilizavam-se técnicas de desenho apropriadas para os grandes formatos a produzir. Os técnicos que realizavam esta tarefa eram os traçadores.

Modernamente, representa-se a geometria da carena com auxílio de programas de desenho em 3D que dão uma ideia muito sugestiva da forma, têm recursos para determinar áreas, volumes, centros e todas as particularidades necessárias para os cálculos hidrostáticos e a determinação de pesos estruturais do navio; dão também os parâmetros necessários para as máquinas de controlo numérico produzirem os elementos construtivos do navio.

Outra forma analítica, entenda-se, expressa por um número, de dar uma ideia sobre a forma do casco, é através dos coeficientes de forma (*form coefficients*) e das relações das dimensões (*dimmension ratios*). Os mais utilizados são:

- Coeficiente de finura total (*block coefficient*), $Cb = V / (L \times B \times d)$
- Coeficiente prismático (*prismatic coefficient*), $C_p = V / (L \times A_m)$
- Coeficiente de finura da secção mestra (*midship coefficient*), $C_m = A_m / (B \times d)$
- Coeficiente da flutuação (*waterline coefficient*), $C_w = A_w / (L \times B)$
- Razão boca comprimento (*breadth length ratio*), B / L
- Razão boca calado (*breath draught ratio*), B / d.

Onde os valores se referem normalmente à **ossada** (*moulded dimmensions*) (ver 1.3.1):

- L = comprimento entre perpendiculares (m)
- B = boca (m)
- d = calado (m)
- V = volume da carena (m^3)
- A_m = área da secção mestra (m^2)
- A_w = área da flutuação (m^2)

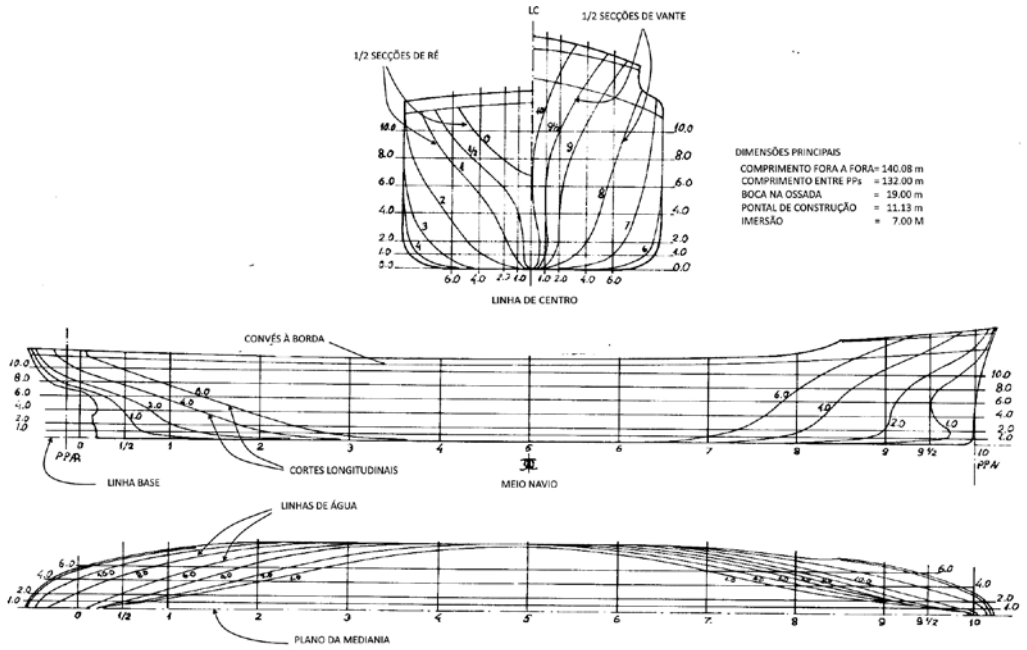

Figura 1.2 Plano geométrico e linhas de referência

Facilmente se depreende que o coeficiente de finura total, ou **coeficiente de bloco**, como também é conhecido, estabelece a relação entre o volume imerso e o volume do paralelepípedo circunscrito: se for elevado quer dizer que a forma da carena difere pouco da de um paralelepípedo – é um navio cheio; se for baixo é o contrário – é um navio fino. O mesmo raciocínio se aplica aos outros coeficientes. O conjunto destes coeficientes e relações apresenta consistência entre os vários tipos de navios e tem utilidade nas previsões de resistência hidrodinâmica.

A extremidade da frente é a **proa** (*bow*), Figura 1.1, ou, mais corretamente, a **roda de proa** (*stem*), a zona da frente, em si, designa-se por **vante** (*forward*)

e as partes laterais do casco a vante tomam a designação de **amuras** (*port / starboard bow*). A extremidade de trás é a **popa** (*stern*), a zona de trás designa-se por **ré** (*aft*) e as partes laterais do casco têm a designação de **alhetas** (*port / starboard quarter*). A parte lateral do casco na zona de meio-navio tem a designação de **través** (*amidships*). As amuras e as alhetas formam os chamados **delgados do navio** e a parte do casco entre eles, o través, que contém, quando existe, o **corpo cilíndrico central**, (*parallel midle body*), a parte do navio em que a secção transversal se mantém constante. Nas pequenas embarcações, normalmente, não existe corpo cilíndrico.

Os lados do navio designam-se por bordos: **bombordo** (*portboard side*), o lado esquerdo ("bom" porque era o lado de onde se avistava terra quando se navegava costa abaixo no tempo das primeiras navegações); **estibordo** (*starboard side*), o lado direito. Em navegação também se designa, por vezes, o bombordo por vermelho e estibordo por verde, por serem essas as cores dos respetivos faróis de navegação.

No sentido longitudinal, designadamente nos navios mais pequenos, o convés tem uma ligeira curvatura ascendente no sentido da proa e da popa, a que se dá o nome de **tosado** (*sheer*), que serve para dotar os extremos do navio de maior volume emerso, logo, maior reserva de flutuabilidade para resistir aos balanços longitudinais. Em certos navios, como os de passageiros, por exemplo, a tendência é de o pavimento superior exposto, por questões estéticas e para melhorar a visibilidade, ter um tosado descendente para a proa.

Visto em corte seccional, o convés costuma ter uma altura máxima na mediania e ser inclinado no sentido dos bordos, para facilitar o escoamento das águas que enxovalhem o convés; à distância vertical entre a chamada **linha reta do vau**, que é uma linha imaginária que une os extremos do convés ao lado a ambos os bordos, e a face superior do convés a meio, chama-se **flecha do vau** (*camber*), Figura 1.3. A flecha do vau também aumenta a resistência do convés às cargas de compressão, pelas razões que veremos quando abordarmos o fenómeno da encurvadura no próximo capítulo.

Quando o costado a partir da linha de água vai abrindo no sentido ascendente, desenhando um V com as pontas lançadas, diz-se que apresenta **espalho** (*flare*); é o caso nas secções de vante, podendo ser mais ou menos pronunciado; a sua existência origina um convés mais enxuto no mar. Quando o costado, a partir da linha de água, curva ligeiramente para dentro, isto é, as secções apresentam a sua maior largura a um nível inferior ao do convés, diz-se que tem o **costado amassado** (*tumblehome*); era o caso das secções mestras nos navios antigos, nas caravelas e em alguns veleiros atuais nas zonas mais a ré.

As seguintes expressões coloquiais exemplificam a utilização da terminologia:

- A navegar com mar a entrar pelo través de bombordo com forte balanço bombordo estibordo e com o mar a enxovalhar persistentemente o convés…
- O mar entrava forte pela alheta de estibordo e o navio balançava vigorosamente bombordo estibordo e proa popa, em estilo parafuso…
- Navegava com mar pela proa, cabeceava e caturrava com a proa a bater violentamente na água criando vibrações que atravessavam o casco…
- Colocámos o navio de capa, com o mar a entrar pela proa e a máquina reduzida, só o suficiente para garantir o governo, evitando castigar o navio na zona da proa…
- Desfizemos a capa e colocámos o navio a correr com o tempo, com a vaga a entrar pela popa e o vento pela alheta de estibordo, a máquina desarvorava com frequência e foi reduzida ao mínimo para garantir o governo e evitar que o navio se atravessasse à vaga…
- A traineira tinha popa de leque, proa lançada e generoso espalho a vante…

1.1.1 Casco

O **casco** do navio pode ser em aço, alumínio, madeira, poliéster reforçado a fibra de vidro (PRFV), materiais compósitos de fibra de carbono, e até em cimento (ferrocimento). Concentrar-nos-emos na construção em aço, retendo que a maioria dos termos se aplicam qualquer que seja o material de construção. E, dentro do aço, consideraremos o **aço soldado** (*welded construction*), já que a antiga forma de ligação das chapas e estruturas por meio de **rebites** (*rivets*), a chamada **construção cravada** (*rivetted construction*), está praticamente extinta e só tem interesse histórico.

O casco é o elemento base do navio, o que o sustenta na água e o que o agrega como estrutura, Figura 1.3.

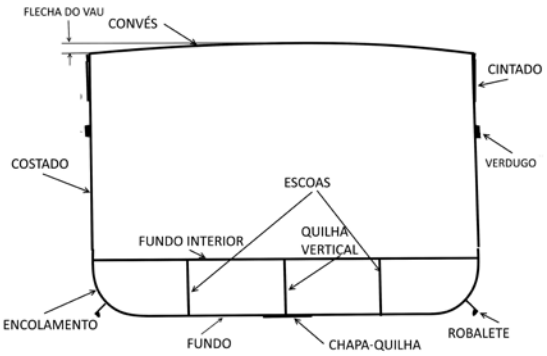

Figura 1.3 Partes do casco e secção mestra

- Certificado Internacional de Arqueação (TONNAGE 69)
- ISM – *International Safety Management Certificate* (SOLAS 74)
- ISSC – *International Ship Security Certificate* (SOLAS 74)
- PSC – *Passenger Ship Safety Certificate* (SOLAS 74)

B. Certificados nacionais (Portugal):
- Licença de estação de embarcação
- Compensação de agulhas
- Certificado de prova do aparelho de carga e descarga
- Certificado de navegabilidade

1.5 Estabilidade

Estabilidade (*stability*) [7] é a propriedade que o navio tem de se manter direito, ou a tendência em regressar a essa posição quando por qualquer causa exterior dela for afastado.

A forma de estudar a estabilidade consiste em induzir ficticiamente uma inclinação ao navio, uma causa exterior, e estudar o equilíbrio das forças em presença. Trata-se de uma abordagem estática que, a cada momento, a cada inclinação, analisa as forças e os momentos gerados tendentes a endireitar o navio ou, seja, a fazê-lo regressar à sua posição de equilíbrio direito. Ignorando, de momento, a ação do vento e outras ações exteriores, as forças em presença são sempre duas e iguais, como nos diz o Princípio de Arquimedes: o peso do navio e a impulsão, seja, o deslocamento (*displacement*), símbolo Δ, expresso em toneladas métricas (t). O peso do navio tem o seu ponto de aplicação no centro de gravidade (*center of gravity*); a impulsão (*buoyancy*) tem o seu ponto de aplicação no centro de carena (*center of buoyancy*) ou centro do volume de água deslocado. Os momentos são o que resulta da multiplicação do deslocamento pela distância das linhas de ação do peso e da impulsão, como se depreende da Figura 1. 28. Essa distância depende das posições que o centro de querena vai assumindo para cada inclinação: observa-se na figura que se vai deslocando mais para a direita à medida que aumenta a inclinação para esse lado. O centro de gravidade mantém-se fixo, só depende da distribuição dos pesos a bordo. A essa distância, GZ, chama-se braço de estabilidade (*stability lever*) ou braço endireitante *(righting lever*).

Aproveitemos a figura para introduzir alguns termos, simbologia e conceitos que nos serão úteis para estudar a estabilidade e estimular a intuição face aos fenómenos físicos envolvidos:

- O ponto B é o **centro de carena** (ou querena), seja, o centro do volume imerso; em termos físicos é o ponto de aplicação da impulsão; KB é a ordenada do centro de carena, designada normalmente por **altura do centro de querena** (*height of the center of buoyancy*) quando o navio está direito. A sua posição depende da geometria do volume imerso, logo, do calado, e as suas coordenadas são calculadas no projeto
- Ao ponto M chama-se **metacentro** (*metacenter*) e é um ponto teórico que resulta da intersecção de duas verticais consecutivas passando pelos respetivos centros de carena. Verifica-se que o metacentro se mantém praticamente fixo para pequenos ângulos, em termos práticos, até aos 15º. É importante reter que a sua posição só depende da geometria da parte imersa, designadamente do volume da carena e da área da linha de água de flutuação, como veremos, no próximo ponto
- BM é o **raio metacêntrico transversal** (*transverse metacentric radius*)
- O seu valor calcula-se no projeto através da expressão:

$$BM = I_T / V$$

Onde:

- I_T = segundo momento de área ou momento de inércia transversal da área de flutuação (m^4)
- V = volume de querena, ou volume imerso (m^3)

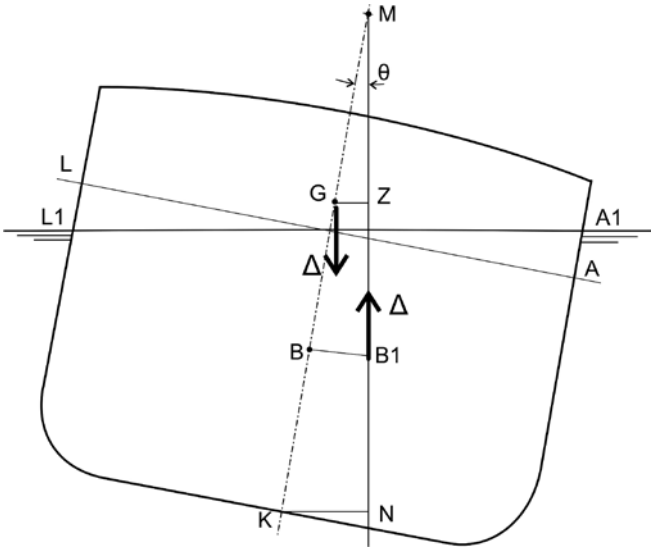

Figura 1. 28 Braço de estabilidade

Para adquirir sensibilidade ao parâmetro BM, imaginemos uma área de flutuação retangular, de comprimento b e largura d. O segundo momento de área do retângulo é dado por: $I_T = b \times d^3 / 12$. O que significa que o raio metacêntrico varia na proporção direta do cubo da largura. Transpondo para o caso da área de flutuação de um navio, depreendemos que o raio metacêntrico de um navio varia em grande proporção com a largura da linha de água, logo, com a boca do navio. Em termos simples, significa que um pequeno aumento na largura do navio origina um significativo aumento no seu raio metacêntrico, logo, mais alto fica o seu metacentro.

- KM é a ordenada do metacentro transversal (*height of metacenter*) ou altura do metacentro transversal: KM = KB + BM. Depende, só, da geometria da parte imersa, em larga medida da geometria da área da flutuação, predominantemente da largura
- Todos os parâmetros acima dependem da geometria da parte imersa do casco, logo, do calado do navio, e constam da sua documentação hidrostática, (*hydrostatic particulars*) apresentada em forma tabular ou gráfica, normalmente, ambas
- A posição do centro de gravidade G depende exclusivamente da distribuição dos pesos a bordo. Em termos físicos é o ponto de aplicação do peso, isto é, do deslocamento. A ordenada do centro de gravidade, designada altura do centro de gravidade (*height of center of gravity*), símbolo KG, calcula-se recorrendo a métodos simples da mecânica
- À distância GM chama-se altura metacêntrica (*metacentric height*); veremos que é expressiva da estabilidade a pequenos ângulos, até 15 º
- Também resulta das leis do equilíbrio da mecânica que qualquer deslocação de um peso a bordo induz um deslocamento paralelo do centro de gravidade do navio dado por:

$GG_1 = p.d/\Delta$

Onde:

- p = peso (t) a bordo que se desloca
- d = distância (m) que se desloca o peso
- Δ = peso total do navio (t), ou deslocamento
- GG_1 = deslocação (m) do centro de gravidade do navio paralela à deslocação d (m)

Resumindo, a estabilidade transversal de um navio depende de:

- Posição do centro de gravidade do navio que é o ponto de aplicação do peso. As suas coordenadas são determinadas pelo peso do navio leve e pela forma como se distribuem os pesos variáveis, e calcula-se por métodos simples da mecânica
- Posição do centro de carena da parte imersa, seja, o centro do volume da parte imersa, ponto de aplicação da impulsão, igual ao peso, a qual vai evoluindo com a inclinação, e que consta da informação hidrostática do navio, que é preparada no projeto e apresentada em forma tabular e/ou gráfica
- Para pequenos ângulos (até 15º), a informação hidrostática do navio direito (KB, BM, KM, etc.) aos vários calados tem a designação de carenas direitas (*hydrostatics*); se for em forma gráfica chama-se gráfico de carenas direitas (*hydrostatic curves*)
- Para ângulos maiores, utilizam-se os braços KN, que definem a linha vertical que passa, a cada momento, pelo centro de querena do navio inclinado a vários ângulos de inclinação, para vários deslocamentos/calados, que são as chamadas carenas inclinadas; se apresentado de forma gráfica, chama-se gráfico de querenas inclinadas (*cross curves of stability*) ou curvas cruzadas de estabilidade

1.5.1 Momento de estabilidade

A estabilidade é expressa analiticamente pelo momento endireitante (*righting moment*) ou momento de estabilidade (*stability moment*), que é dado pela expressão, Figura 1. 29:

$$ME = \Delta.GZ \qquad (1)$$

Em que:

- Δ = deslocamento (t), seja, o peso do navio, que é igual à impulsão
- GZ = braço de estabilidade (m), em cada momento igual à distância entre a linha de ação do peso e a linha de ação da impulsão

Para pequenos ângulos (até 15º), dado o metacentro se manter praticamente fixo, o braço de estabilidade, como se depreende da Figura 1. 28, vem:

$$GZ = GM.sen\Theta$$

Onde:

- GM = altura metacêntrica transversal
- Θ = ângulo de inclinação

Logo, o momento endireitante para pequenos ângulos é dado por:

$$ME = \Delta.GM.sen\Theta \qquad (2)$$

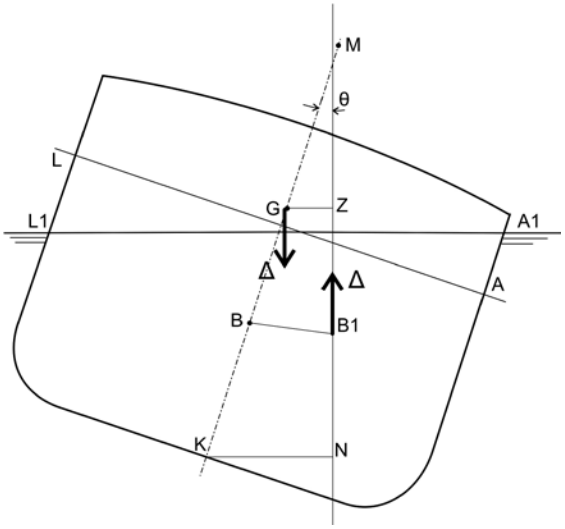

Figura 1. 29 Momento de estabilidade

A altura metacêntrica GM é, portanto, um parâmetro muito relevante para a estabilidade, já que quando o navio está na sua posição de equilíbrio direito quantifica a sua capacidade de se auto-endireitar quando, por qualquer razão, for desviado dessa posição um pequeno ângulo, considerado pequeno até 15º.

Para ângulos maiores, como se ilustra na Figura 1. 29, o momento de estabilidade continua a ser dado pela expressão ME = Δ.GZ, pelo que se terá de conhecer o valor do GZ aos vários ângulos de inclinação. Obtêm-se esses valores para determinado deslocamento a partir do gráfico de querenas inclinadas, que faz parte da informação disponível nos navios, onde se apresentam para os vários deslocamentos do navio, para vários ângulos de inclinação – 10º, 20º, 30º etc. – os valores dos braços KN. Estes braços KN são uma mera construção geométrica, sem significado físico, servem, tão só, para calcular o GZ aos vários ângulos, através da fórmula:

$$GZ = KN - KG \operatorname{sen}\Theta \qquad (3)$$

Resumindo, para se ter a noção da estabilidade de um navio, conhecida a ordenada do centro de gravidade, temos:

- Para pequenos ângulos, a expressão da estabilidade (2), em termos da altura metacêntrica, GM, com os parâmetros obtidos da informação das carenas direitas
- Para os ângulos superiores, a expressão (3), em termos dos braços de estabilidade, GZ, aos vários ângulos, que se calculam com auxílio da informação das carenas inclinadas

- As duas complementam-se para exprimir a estabilidade estática do navio ao longo de toda a gama de estabilidade, isto é, o domínio de ângulos de inclinação em que o navio mantém estabilidade positiva.

A estabilidade a pequenos ângulos tem a designação de **estabilidade inicial** (*initial stability*). Depreende-se da sua formulação que um navio com grande altura metacêntrica (GM) tem muita estabilidade inicial, o que significa que, quando desviado da sua posição de equilíbrio vertical, reage vigorosamente; se tiver uma pequena altura metacêntrica, reage suavemente. A situação ideal é intermédia, isto é, que o navio nem reaja violentamente criando desconforto para tripulantes e passageiros e induzindo cargas dinâmicas acentuadas à estrutura e à carga, nem que reaja com demasiada suavidade, tendendo a adormecer aos bordos, criando justificada desconfiança na sua estabilidade.

1.5.2 Diagrama de estabilidade

Depreendemos que o momento de estabilidade depende diretamente do braço de estabilidade GZ, portanto, para exprimir analiticamente a estabilidade, basta representar o gráfico do braço GZ, retendo que o momento estático de estabilidade, a cada ângulo, é igual ao valor de GZ a esse ângulo multiplicado pelo deslocamento, que é constante em determinada condição de carga. Esse gráfico, representando para uma determinada condição de carga (Δ e KG) os braços de estabilidade a vários ângulos, tem a designação de **diagrama de estabilidade** (*stability diagram*) para essa condição de carga, Figura 1. 30.

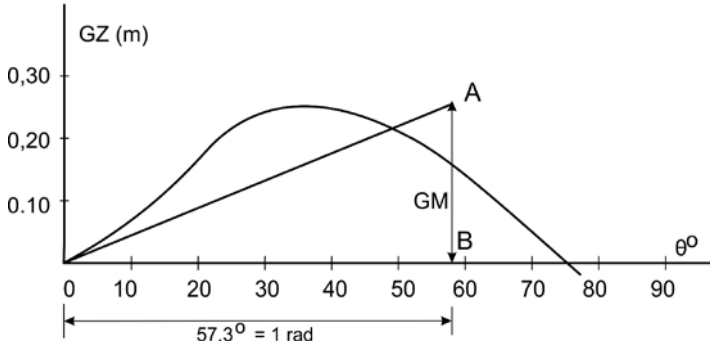

Figura 1. 30 Diagrama de estabilidade

Do diagrama de estabilidade retiram-se as seguintes indicações sobre a estabilidade do navio nessa condição:

- **Gama de estabilidade** (*range of stability*), o domínio de ângulos em que a estabilidade é positiva; na Figura 1. 30, de 0º a 77º

2.1.4 Resistência longitudinal e momentos fletores

Sob o ponto de vista longitudinal, o navio funciona como uma viga oca sujeita à ação combinada do peso e da impulsão, seja, às seguintes cargas distribuídas:

- Peso ao longo do comprimento, W (t/m); a resultante é matematicamente expressa pela área abaixo da curva do peso e é igual ao deslocamento
- Impulsão ao longo do comprimento U (t/m), de baixo para cima, em cada ponto dependente da forma da secção imersa. A resultante é matematicamente expressa pela área abaixo da curva U, também ela igual ao deslocamento, já que o navio a flutuar está em equilíbrio
- A carga distribuída resultante do peso e da impulsão é, efetivamente, a carga que se exerce sobre o navio, é, em cada ponto, w = W - U, Figura 2. 6

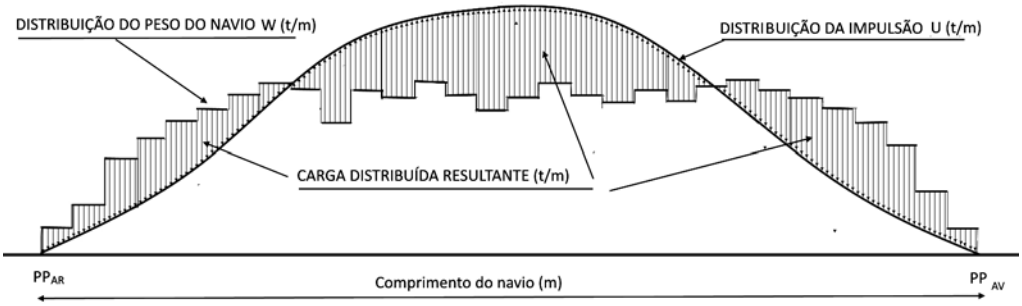

Figura 2. 6 Carga que atua sobre a viga-casco

Tiram-se imediatamente algumas conclusões desta figura:

- A carga que atua sobre o navio, w = W - U, é a sombreada: o somatório das cargas descendentes é igual ao somatório das ascendentes, porque o navio a flutuar está em equilíbrio. Em termos matemáticos, a soma das áreas dos extremos é igual à área da zona mediana.
- Sendo a distribuição do peso do navio fixa, o único fator que pode influenciar a carga sobre o navio é a distribuição da impulsão.
- Nesta figura temos um excesso de impulsão na zona do meio, provavelmente uma onda com a crista a meio. Teríamos uma carga completamente diferente se, em vez de uma crista a meio, tivéssemos uma cava a meio e as cristas nos extremos, porque a distribuição da impulsão teria uma configuração diferente, mais acentuada nos extremos e mais atenuada na zona do meio.

A análise da resistência estrutural do navio parte da curva de carga e estuda três situações, cada uma com uma representação gráfica, Figura 2. 7:

- Navio em água plana
- Navio numa onda padrão, igual ao comprimento, L, altura L/20, crista a meio
- Navio na mesma onda, com a cava a meio e as cristas nos extremos

Por uma questão de economia de espaço e porque as curvas estão todas relacionadas entre si, os gráficos apresentam-se sobrepostos com a carga W-U, a força de corte V e o momento fletor M, cada um com a sua escala, Figura 2. 7.

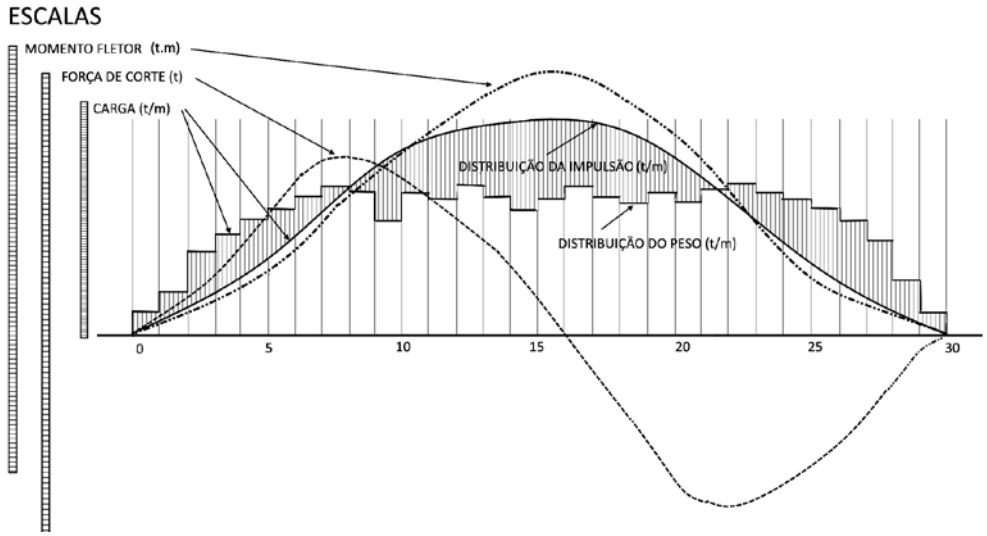

Figura 2. 7 Diagrama da carga, força de corte e momento fletor

Recordemos as relações entre a carga, w = W – U, a força de corte, V, e o momento fletor, M:

- dV/dx = - w(x) – implica que onde w = 0, a força de corte terá um máximo ou mínimo: na figura em x = 8 e x = 21,5
- $V_2 - V_1 = \int w(x)\,dx$. Força de corte = área abaixo da curva de w(x) entre x_1 e x_2
- dM/dx = V – implica que onde V = 0 teremos um máximo no momento fletor: na figura em x = 16
- $M_2 - M_1 = \int V(x)\,dx$. Momento fletor = área abaixo da curva V(x) entre x_1 e x_2

O cálculo e as expressões de W e de U, a consequente força de corte V, e o momento fletor M, ao longo da viga casco, são domínio da engenharia naval e são calculados por programa informático, que inclui como dados de entrada: os pesos a bordo e a respetiva localização; geometria da carena. A configuração gráfica típica está indicada na Figura 2. 7, onde se observam as particularidades já referidas, decorrentes das leis da mecânica e da matemática, que recapitulamos:

1. A área abaixo da curva do peso é igual à área abaixo da curva da impulsão. Isto é, se a curva da carga (diferença entre W e U) fosse representada na base do eixo dos X, a área acima do eixo seria igual à área abaixo. Como era de esperar, porque o peso total é igual à impulsão total
2. Os centros de área da curva do peso e da curva de impulsão estão na mesma vertical. Porque o navio está em equilíbrio estático
3. A área abaixo da curva da carga (diferença entre W e U) é algebricamente igual a zero
4. Os máximos e mínimos na curva da força de corte (não necessariamente os valores mais elevados) ocorrem nos pontos onde a curva da carga é igual a zero, isto é, nos pontos de intersecção de W com U. Lei matemática
5. O momento fletor máximo ocorre no ponto onde a força de corte é igual a zero, isto é, onde a curva V corta o eixo dos X. Lei matemática. No caso dos navios o momento fletor máximo ocorre invariavelmente perto de meio-navio
6. Os pontos de inflexão da curva do momento fletor ocorrem em correspondência com os máximos e mínimos da curva da força de corte. Lei matemática
7. Os valores da força de corte e do momento fletor nos extremos são ambos iguais a zero, porque o navio está em equilíbrio.

2.1.5 Tensões de flexão

Recordemos da resistência de materiais a formulação que exprime as **tensões de flexão** (*bending stresses*) em função do momento fletor:

$\sigma = M/(I/y)$

Onde:

- σ = Tensão de flexão, de tração ou de compressão (kN/mm2)
- M = Momento fletor (kN.m)
- I = Momento de inércia da área seccional resistente (m^2mm^2)
- y = Distância do eixo neutro à fibra em questão (m)
- I/y = Módulo de resistência da secção (m mm^2)
- NB: Nas unidades indicadas ou noutras, desde que consistentes entre si

Depreende-se da fórmula que as tensões máximas ocorrerão nas fibras extremas da secção, onde as distâncias y, ao eixo neutro são maiores. Tratando-se de um navio, são as fibras do convés e do fundo. De facto, as tensões de flexão distribuem-se segundo uma configuração do tipo indicado na Figura 2. 8, com as tensões máximas nas fibras extremas, e nulas no eixo neutro.

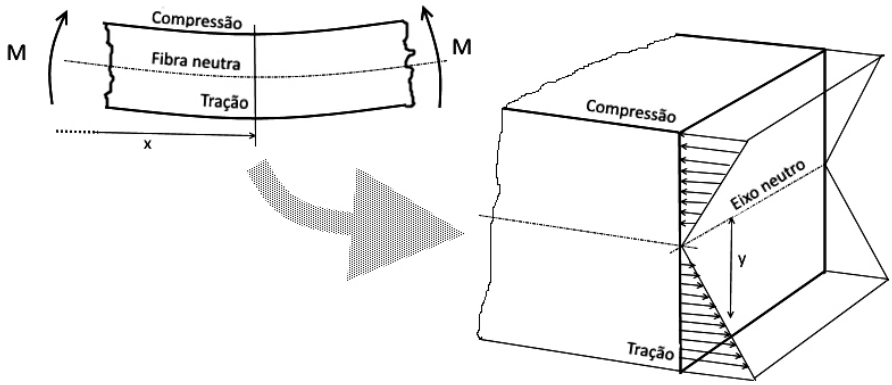

Figura 2. 8 Distribuição das tensões de flexão numa secção

E, ocorrendo o momento fletor máximo na vizinhança de meio-navio, será nessa zona que se desenvolvem as tensões de flexão mais elevadas. É por essa razão que a secção mestra (*midship section*) é a secção do casco mais representativa da resistência longitudinal do navio e é por isso, também, que as sociedades classificadoras exigem que se mantenham as suas características ao longo dos 0,4L a 0,5L nessa zona. O momento de inércia da secção mestra, I, e o seu módulo de resistência, I/y, calculam-se exatamente como se apresentou no exemplo 2.1.1. de 2.1.3.

A análise das solicitações longitudinais ao navio no mar, expressas na Figura 2. 7, é completada simulando a situação do navio equilibrado numa onda trocoidal padrão, de comprimento igual ao comprimento do navio e de altura igual a L/20, em duas situações distintas:

- Com a crista a meio-navio e as cavas nos extremos; e
- Com a cava a meio-navio e as cristas nos extremos

Trata-se de um modelo teórico que procura exprimir as situações mais críticas a que o navio pode estar sujeito. O cálculo é em tudo semelhante, o que varia é a distribuição da impulsão, U, logo, da carga distribuída ao longo do navio, com a consequente variação nos diagramas da força de corte, V, e do momento fletor, M. Constata-se que, com a crista a meio, o momento fletor é claramente de alquebramento (*hogging*), induzindo tensões de tração no convés e de compressão no

fundo, enquanto que, com a cava a meio, o momento fletor é de contra-alquebramento (*sagging*), induzindo tensões de compressão no convés e de tração no fundo.

Resumindo, da análise às solicitações longitudinais à viga casco feita em 2.1.4. resulta:

- O momento fletor depende da distribuição da carga que atua sobre o casco do navio, carga esta que, em cada ponto, é a resultante da carga distribuída do peso e da carga distribuída da impulsão ao longo do comprimento do navio
- A distribuição do peso está na mão do responsável do navio, já que depende da forma como é distribuída a carga no navio
- A distribuição da impulsão depende da forma do casco e do perfil do mar: em água plana, apresenta um padrão só dependente da forma das obras vivas
- Numa onda com a crista a meio-navio e as cavas nos extremos, modela-se teoricamente com uma onda de comprimento igual ao comprimento do navio, L, e altura igual a L/20. Induz um momento de alquebramento
- Numa onda com a cava a meio-navio e as cristas nos extremos, modela-se na mesma onda padrão, mas com a cava a meio e as cristas nas perpendiculares extremas. Induz um momento de contra-alquebramento

Do cálculo do módulo de resistência feito em 2.1.3. e da análise à fórmula das tensões de flexão, resulta:

- A secção resistente da chaparia e dos elementos de reforço com que é solidária contribui decisivamente para o módulo de resistência, logo, para as tensões de flexão: quanto maior o módulo de resistência (I/y), menores serão as tensões
- Quanto maior for a distância ao eixo neutro, maiores serão as tensões de flexão: são máximas nas fibras extremas, no convés, no fundo e nas fiadas superiores e inferiores do costado adjacentes
- As solicitações mais gravosas no que à resistência longitudinal diz respeito são as tensões de tração e de compressão que se alternam em função do momento fletor, e as cargas de compressão que tendem a encurvar a chaparia e que são mais acentuadas nas fibras extremas do fundo e do convés

Estas conclusões servem para nos estimular o raciocínio quando pensamos no problema da resistência longitudinal do navio. Não esqueçamos, porém, que estes métodos são formas teóricas de olhar para o problema, na prática, o navio nunca está estático e direito numa onda, e há fatores dinâmicos e outros, complicativos, que transfiguram a realidade teórica, como veremos nos próximos títulos.

Como se depreenderá, todos os defeitos são pontos suscetíveis de concentração de tensões. A verificação da qualidade recorre aos chamados testes não destrutivos (*non-destructive tests*): radiografia; ultrassons e inspeção visual. O processo mais eficaz para assegurar a qualidade das soldaduras é a formação dos operadores, já que o controlo de qualidade a 100 % por testes não destrutivos só em raros casos acontece (submarinos; patas de plataformas e de gruas). Os soldadores num estaleiro têm de ser certificados por uma Sociedade Classificadora ou por uma entidade pública reconhecida, como o ISQ (Instituto de Soldadura e Qualidade) em Portugal.

A tendência para a existência de fissuras é maior em chapas de grande espessura, onde a dissipação de calor é mais rápida. Por outro lado, a soldabilidade (*weldability*) do aço varia na razão inversa da sua percentagem de carbono, o que significa que a soldadura de aços de alta resistência (com maior percentagem de carbono) tende a ser mais crítica no que respeita a fissuração.

As formas de soldadura mais correntes nas estruturas estão indicadas na Figura 2. 16. São elas:

- Soldadura a topo (*butt weld*), para chapas. Quando há variações apreciáveis de espessura, a boa prática é o desbaste ou espatilhado (*taper*) da aresta da chapa de maior espessura para evitar a descontinuidade, Figura 2. 13. É boa prática considerar um espatilhado ao longo de cerca de 3,5 vezes a diferença das espessuras das duas chapas, como indicado na Figura 2. 13.

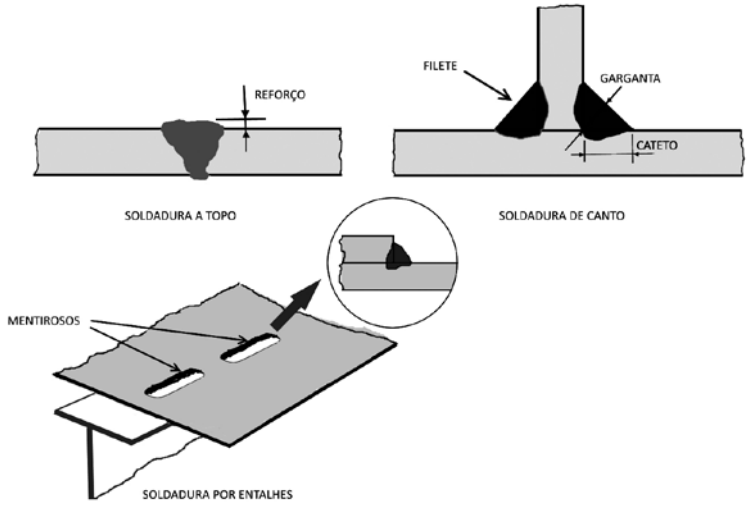

Figura 2. 16 Tipos de ligação soldada

- Soldadura de canto (*fillet weld*), para os perfis e elementos de suporte. A dimensão do cordão exprime-se em termos do cateto (*leg length*) e da garganta (*throat*), na Figura 2. 16 – o primeiro, a medida dos lados do triângulo que forma o cordão; a segunda, a sua altura, isto é, a distância da hipotenusa ao vértice. No caso dos reforços, a soldadura vertical pode ser contínua (*continuous*) ou intermitente (*intermittent*), Figura 2. 17: a primeira, é feita de um lado e do outro, para as ligações que se pretendem estanques e onde se requer maior robustez material; no segundo caso, os filetes, de um lado e do outro, podem estar em fase, na chamada soldadura em cadeia (*chain weld*), desfasados, na soldadura em zig zag (*staggered intermittent*), ou desenvolvidos em todo à volta na soldadura entre boeiras (*scallopped continuous weld*), Figura 2. 17. Define-se o passo (*pitch*) como a distância entre os pontos de início de cada cordão. Normalmente, o passo tem o dobro da dimensão do cordão, isto é, numa soldadura intermitente o comprimento agregado soldado é aproximadamente igual ao comprimento agregado não soldado. Em todos os casos, os topos são soldados continuamente em todo à volta para reduzir as concentrações nesses pontos de descontinuidade.
- Soldadura por entalhes (*slot welding*), Figura 2. 16, como se diz na gíria, os mentirosos, rasgos que se fazem na chapa a soldar, quando não se tem acesso para realizar de outra forma. Método que só se deve utilizar quando estritamente necessário, como é o caso, por exemplo, na soldadura da chapa de um dos lados da porta do leme à sua estrutura interior.

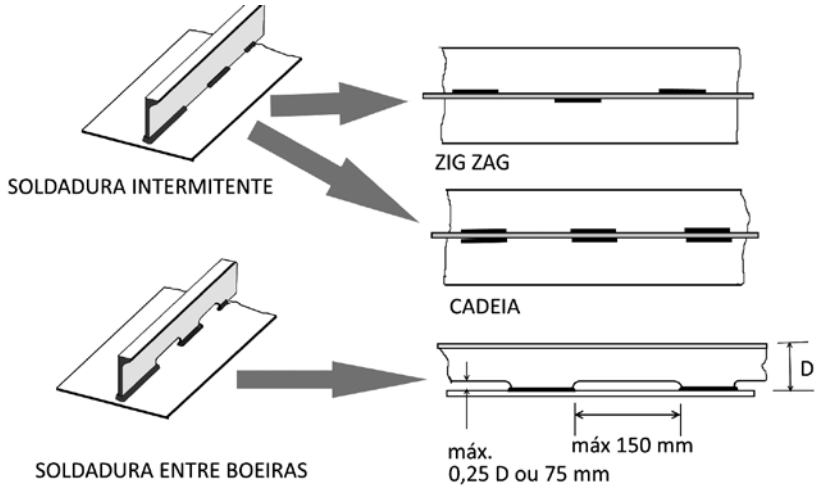

Figura 2. 17 Soldadura dos reforços

Capítulo 9

RESISTÊNCIA DO NAVIO

A **resistência** do navio[7] (*ship resistance*) é a força necessária para o deslocar na água a uma velocidade constante. Pode visualizar-se o conceito imaginando o navio a ser rebocado a uma determinada velocidade: a força exercida pelo cabo de reboque é a resistência que, naturalmente, varia com a velocidade. À potência requerida para vencer a resistência chama-se **potência efetiva** (*effective power*), e é dada por:

$P_E = RV$

Onde:

- R = Resistência (kN)
- V = Velocidade (m/s)
- P_E = Potência efetiva (kW)

Em unidades britânicas, a expressão da potência efetiva tem a forma:

ehp = 6,88 RV

Onde:

- R = Resistência (ton_f)
- V = Velocidade (nós)
- ehp = Potência efetiva (hp)

A navegar, o que se desloca é o navio e o mar mantém-se parado. No entanto, para apreender certos conceitos, se nos facilitar o raciocínio, não há inconveniente em imaginar que é o mar que se desloca através do navio que se mantém parado.

---

7 Este capítulo baseia-se largamente nas lições do Professor **Ian** C. Bridge da Universidade de Strathclyde em Glasgow, Escócia.

9.1 Componentes da resistência

Num fluido perfeito, não viscoso, um corpo mergulhado profundamente não oferece resistência ao movimento, mas vai criando variações de pressão em torno de si mesmo. Se o corpo se deslocar à superfície, estas diferenças de pressão dão origem a ondas de superfície que irão absorver energia à deslocação do corpo.

Num fluido viscoso, o movimento do corpo transmitir-se-á em parte ao fluido por viscosidade: partículas inicialmente em repouso serão animadas de movimento. A força necessária para animar de movimento estas partículas terá, mais uma vez, que ser fornecida pelo corpo a deslocar-se.

Podemos então resumir estas considerações dizendo que um corpo que se desloca à superfície de um fluido está sujeito a dois tipos de força de resistência:

- Uma devida à viscosidade, a **resistência de viscosidade** (*viscosity resistance*), R_v;
- Outra, devida à formação de ondas, a **resistência de onda** (*wave resistance*), R_w, e:
- Resistência total, $R = R_v + R_w$

No caso concreto do navio, há ainda a considerar outras componentes como a **resistência do ar** (*air resistance*), R_a, e a **resistência dos apêndices** (*appendage resistance*) (leme; robaletes, etc.), R_e. Por agora consideraremos apenas a resistência da carena isolada.

9.1.1 Resistência de viscosidade

A característica dominante de um fluido viscoso é a sua tendência para aderir às superfícies com as quais está em contacto. Consideremos a camada líquida entre duas superfícies paralelas, uma estacionária e outra em movimento, à velocidade V.

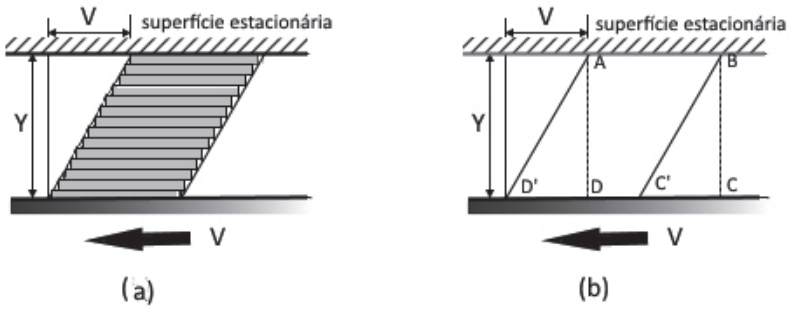

Figura 9. 1 Camada líquida entre superfícies em movimento relativo

Na unidade de tempo, as superfícies movem-se relativamente uma à outra uma distância V, o mesmo acontecendo às camadas líquidas solidárias com estas superfícies. Cada camada intermédia de fluido contribuirá para esta distanciação deslocando-se relativamente à camada vizinha, como se esquematiza na Figura 9. 1. (a). Considerando um número infinito de camadas, Figura 9. 1. (b), o movimento relativo das camadas na unidade de tempo é representado pelas linhas AD' e BC', linhas estas que são a representação gráfica da velocidade relativa do fluido.

Este escorregamento de fluido é resistido por uma força tangencial entre a camada superior e a camada inferior, que é precisamente a resistência ao movimento.

Recordemos da resistência de materiais o caso de um sólido submetido a tensão tangencial, Figura 9. 2:

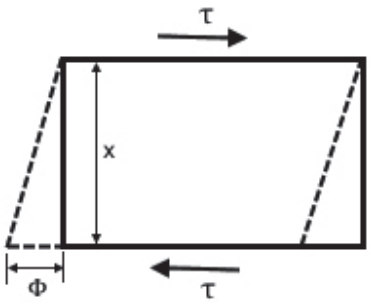

Figura 9. 2 Tensão tangencial num sólido

$$\tau = G \frac{\Phi}{x}$$

Onde:

- τ = tensão tangencial (força tangencial por unidade área)
- $\frac{\Phi}{x}$ = alongamento tangencial
- G = módulo de rigidez do material

De forma semelhante, num fluído:

$$\tau = \mu \frac{V}{y}$$

Onde:

- τ = tensão tangencial (força tangencial por unidade área)
- V/y = alongamento tangencial na unidade de tempo
- μ = coeficiente de viscosidade do fluido

Imaginemos agora que a superfície estacionária é removida, deixando a outra superfície em movimento no fluido estacionário. O movimento relativo das camadas de fluido não termina abruptamente, como no caso anterior, mas sim gradualmente, como se ilustra na Figura 9. 3 (a): a partir de certa distância Y à superfície móvel o fluido mantém-se em repouso. Existe, pois, ao longo da superfície móvel uma camada de espessura finita dentro da qual todas as tensões tangenciais devidas à viscosidade se desenvolvem. A esta camada se chama a camada limite (*boundary layer*).

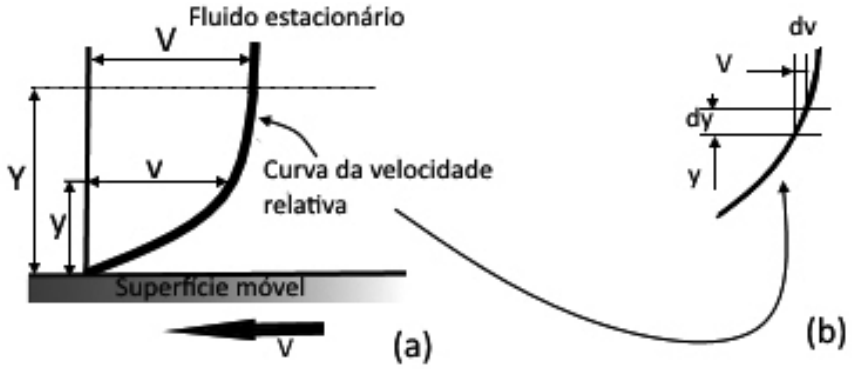

Figura 9. 3 Camada limite

O alongamento tangencial deve agora ser tomado localmente, Figura 9. 3 (b), dv/dy, seja, o gradiente da velocidade. A tensão tangencial entre camadas virá então:

$$\tau(y) = \mu \frac{dV}{dy}$$

A tensão tangencial junto à superfície, para y = 0, representará, portanto, a resistência de viscosidade por unidade de área, oferecida pelo fluido à superfície móvel.

$$\tau_0 = \mu \left(\frac{dV}{dy}\right)_{y=0}$$

Se aplicarmos agora o conceito de camada limite a uma superfície móvel de comprimento finito, depreendemos que a espessura da camada limite não será constante a partir da aresta de ataque, mas irá variando de certa forma a partir de zero, Figura 9. 4.