

MECÂNICA DO NAVIO (Arquitetura Naval) (ESTÁTICA DO NAVIO)

1 – Introdução

Esta publicação tem o propósito de apresentar os conceitos e ferramentas básicas da disciplina Arquitetura Naval aos estudantes de Engenharia Mecânica para uma ênfase em assuntos da Engenharia Naval. A necessidade de consulta relativamente freqüente a outras publicações demonstra a abrangência do assunto desta disciplina, tornando praticamente impossível conseguir em uma única obra todo o conhecimento necessário sobre a matéria.

1.1 – Conhecimentos Prévios

A Arquitetura Naval, ou Mecânica do Navio, é uma aplicação dos princípios da Física, Mecânica Racional e Mecânica dos Fluidos ao navio. O navio é uma estrutura flutuante, e das maiores construídas atualmente. Como em qualquer estrutura, há necessidade de estabelecer a sua resistência mais adequada e manter a preocupação com a estabilidade. Deve-se, porém, ter em mente que o meio no qual permanece o navio é tal que as condições de estabilidade precisam estar rigorosamente estabelecidas. Por outro lado, as grandes estruturas com que lidam outros ramos de engenharia dificilmente são dotadas de propulsão, como é o caso dos navios (a não ser algumas plataformas auto-elevatórias que possuem pequenos sistemas de propulsão para posicionamento). Assim, os que iniciam o estudo desta matéria deverão ter conhecimentos prévios de Matemática, Física, Mecânica e Hidrodinâmica.

1.2 – Sistemática de Abordagem

Nas disciplinas mencionadas, em geral procura-se estabelecer condições nas quais os fenômenos são regidos por equações cuja solução matemática é possível. Na Arquitetura Naval isto não é necessariamente usual; as formas do navio podem ser representadas por curvas suaves, mas que nem sempre são representadas por equações matemáticas. Grande esforço tem sido desenvolvido para se obter uma formulação para estas curvas, embora sem resultados definitivos. Nas condições acima é usual efetuar integrações de áreas e volumes por métodos aproximados, visto não serem conhecidas expressões matemáticas das curvas. É comum também fazer uso de métodos de aproximação sucessiva, e representar graficamente curvas que descrevem certa característica do navio, como é o caso das curvas de comprimento alagável.

Na parte de dinâmica, é comum lançar mão dos resultados de ensaios em tanques de prova, uma vez que a teoria que aborda a resistência à propulsão do navio tem limitações que não permitem ainda abrir mão destes ensaios para um conhecimento completo do problema.

Estas ponderações são efetuadas aqui para que o estudante sinta que irá aplicar conceitos de ciências básicas relativamente puras a um corpo flutuante dotado de propulsão e governo, mas que estes conceitos são aplicados com certas limitações inerentes à situação tecnológica atual.

Em algumas fases o leitor pensará que a quantidade de trabalho “manual” (cálculos laboriosos e traçados de curvas) tornará o assunto relativamente cansativo. É preciso lembrar, porém, que a utilização dos computadores digitais simplificou enormemente este trabalho, desde que se disponha de programas adequados.

Alguns autores fazem uma analogia da Arquitetura Naval com a Termodinâmica, o que é razoável. Em Termodinâmica são usados conceitos básicos de Matemática e Mecânica para desenvolver os fundamentos nos quais repousam os conhecimentos dos engenheiros mecânicos. Na Arquitetura Naval algumas ciências básicas são aplicadas ao navio para desenvolver os conceitos indispensáveis aos que lidam com navios, de modo que se pode dizer que esta disciplina representa, para todos que têm contato com navio, o mesmo papel que a Termodinâmica para os que tratam com máquinas.

2 – Flutuação.

2.1 - Condições de Equilíbrio

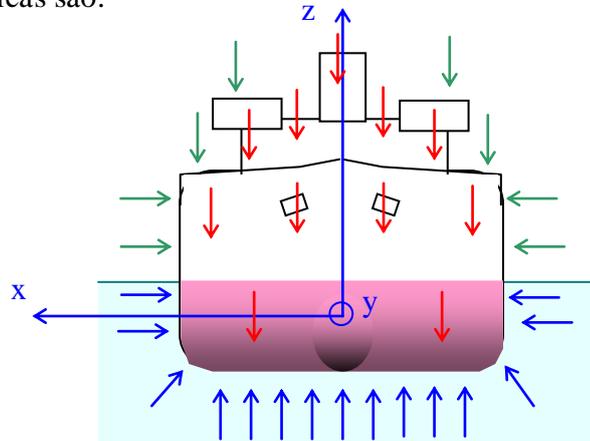
Sabe-se que as condições necessárias para que qualquer corpo fique em repouso são:

- Soma das forças agindo sobre o corpo igual a zero.
- Soma dos momentos das forças que sollicitam o corpo igual a zero.

E que expressões analíticas são:

$$\begin{aligned}\sum F_x &= 0 \\ \sum F_y &= 0 \\ \sum F_z &= 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sum M_x &= 0 \\ \sum M_y &= 0 \\ \sum M_z &= 0\end{aligned}$$



(Fig.1- Forças que agem num navio flutuando em águas tranquilas.)

Para este estudo os eixos são considerados nas seguintes condições:

- x – no sentido da boca
- y – no sentido do comprimento.
- z – na vertical.

No caso de um corpo flutuante as forças que agem sobre o mesmo, em águas paradas, são:

- **Peso**;
- **Força da pressão atmosférica**;
- **Força da pressão da água**;

A soma das componentes das forças de pressão na direção dos eixos dos ‘x’ e dos ‘y’ é nula (porque em caso contrário o corpo flutuante estaria acelerando para um dos bordos ou para vante ou para ré). Logo:

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0$$

A mesma afirmação pode ser feita com relação às componentes das forças na direção do eixo ‘z’, mas é importante verificar quais as forças existentes nesta direção; são elas:

- O peso flutuante, agindo para baixo, aplicado no centro de gravidade ‘G’ do flutuante;
- A força resultante da pressão atmosférica agindo para baixo no flutuante (no caso de um navio, nas chamadas obras mortas: superestruturas, convés principal, etc).
- A força resultante da pressão hidrostática da água agindo para cima sobre o flutuante (no caso de um navio, nas chamadas obras vivas: costado, fundo, apêndices, etc).

Esta última pressão, estudada nos cursos de Mecânica dos Fluidos através da equação fundamental da hidrostática ($p = p_o + \rho gh$), pode ser dividida em duas parcelas: aquela devido à pressão atmosférica ‘ p_o ’ e a outra devida à profundidade ‘z’ da coluna líquida de peso específico ‘ ρg ’ (pressão manométrica). As duas parcelas de força decorrentes da pressão atmosférica, agindo de cima para baixo e de baixo para cima, se anulam. Restam então duas forças iguais e de sentido contrário:

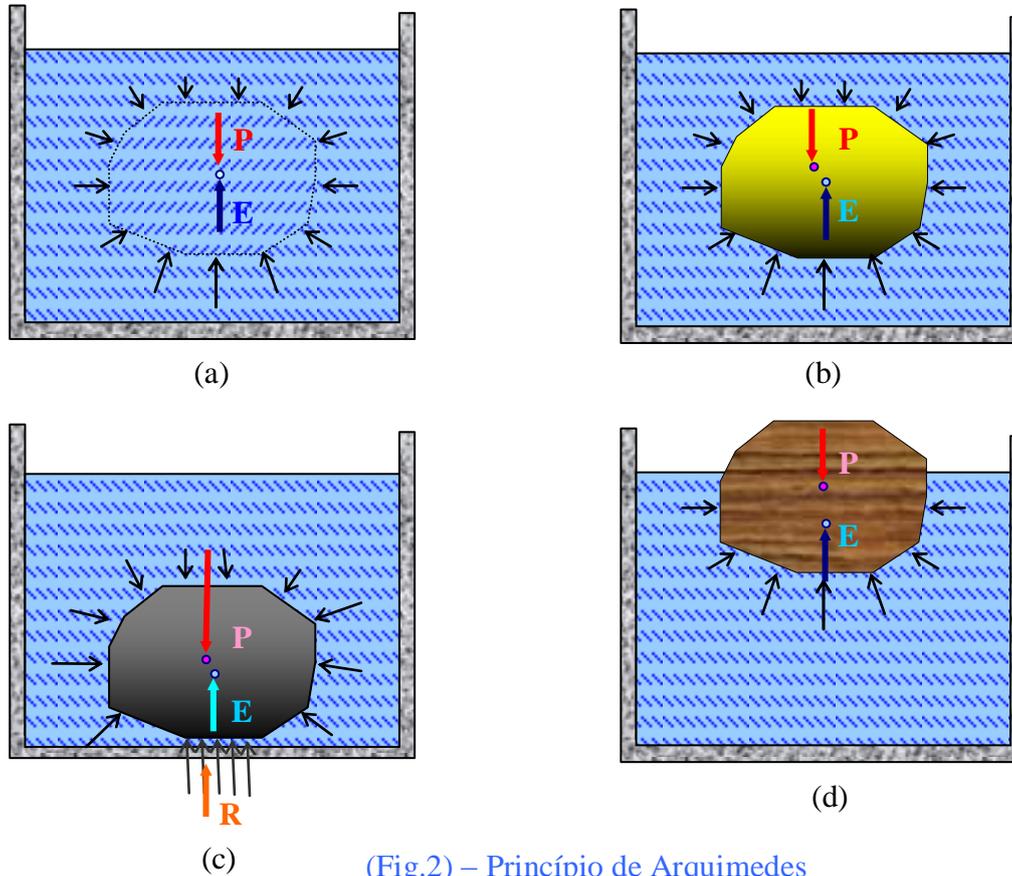
- O peso do flutuante e
- A força devido à pressão manométrica da água, força chamada de “Empuxo”.

É importante ter em conta que essas forças só serão iguais se o flutuante não estiver acelerado. Caso o corpo esteja mergulhando no fluido (como por exemplo, um submarino) o peso será maior que o empuxo.

2.2 - Princípio de Arquimedes

Segundo o *Princípio de Arquimedes*, o valor da força empuxo exercida pelo fluido sobre o corpo nele imerso é igual ao peso do volume de fluido pelo corpo deslocado.

A veracidade de tal afirmativa pode ser constatada ao considerarmos um fluido em repouso e analisarmos uma porção desse mesmo fluido, limitada por uma superfície fechada imaginária, também em repouso (Fig.2 –a).



(Fig.2) – Princípio de Arquimedes

As forças que atuam sobre esta porção de fluido estagnada são:

- O peso P da porção de fluido;
- A resultante das forças de pressão sobre a superfície de separação da porção (E);

Estas forças são iguais e opostas, tendo ponto de aplicação coincidentes, no centróide do volume limitado pela superfície hipotética citada.

Caso o fluido, que ocupa o interior de tal superfície, pudesse ser substituído por outro corpo de mesma forma exterior (Fig. 2 – b), fica evidente que a resultante das forças de pressão, chamada empuxo E (exercida pelo fluido sobre a superfície que envolve o corpo), continuará a ser igual ao peso do fluido que teria sido “deslocado” pela ocupação do corpo, com mesmo ponto de aplicação.

Caso o peso do corpo seja diferente (ou a distribuição de densidades implique em outra posição para o CG) o corpo se movimentará, emborcando até que o CG esteja na mesma vertical da linha de empuxo, afundando, se mais denso que o fluido, até tocar o fundo, aparecendo uma reação R para equilibrar as forças (Fig. 2 –c) ou boiando, se menos denso que o fluido, até que o peso do diminuído volume deslocado (E) iguale o peso do objeto.

Até aqui vimos as decorrências da primeira exigência, ou seja, do somatório nulo das forças. A outra condição, somatória de momentos nula, também precisa ser encarada.

Os momentos das forças, com relação aos eixos dos ‘x’ e dos ‘y’, são obviamente nulos:

$$\sum M_x = 0 \text{ e } \sum M_y = 0$$

Para que tais condições sejam atendidas é necessário que os pontos de aplicação das duas forças que agem paralelamente ao eixo dos ‘z’, o Peso e o Empuxo, estejam na mesma vertical.

É sabido que o ponto de aplicação do peso chama-se Centro de Gravidade (representado normalmente pela letra G). O ponto de aplicação do empuxo é chamado de Centro de Carena ou Centro de Empuxo (representa-se normalmente pela letra B). Assim, para que as condições $\sum M_x = 0$ e $\sum M_y = 0$ sejam atendidas é necessário que ‘G’ e ‘B’ estejam na mesma reta vertical.

2.3 – Variação de Calado

2.3.1 – Flutuante com formas geométricas simples.

No caso de um flutuante com formas geométricas simples, como por exemplo o de uma barçaça em forma de caixa (comprimento L, boca B, pontal D, calado H e peso total P), é fácil verificar como variará o calado, quando não há banda ou trim. Conhecido o peso total do flutuante e sua carga, sabe-se que o mesmo será equilibrado pelo empuxo, igual ao peso do volume de líquido deslocado.

Para o exemplo representado na figura 3a, o volume de deslocamento será o produto da área da base do prisma (área da linha d’água – L x B) pelo calado H:

$$\nabla = L \times B \times H = \text{volume deslocado pelo flutuante.}$$

O empuxo valerá:

$$E = \gamma \nabla \text{ sendo } \gamma = \rho g \text{ o peso específico do líquido}$$

Assim, no caso em análise teremos:

$$P = L.B.H.\gamma, \text{ e portanto : } H = P / L.B.\gamma.$$

Admitindo um peso total para a barçaça e sua carga como sendo 1.500 ton* e que flutue em água doce (com peso específico de valor 1,000 ton*/m³, – sendo ton* a tonelada métrica, medida de peso, em tf = 1.000 kgf = 9.810 N = 9,81 kN), teremos:

$$H = 1.500 / 50 \times 10 \times 1,000 = 3\text{m. A borda livre seria de } 4 - 3 = 1\text{m}$$

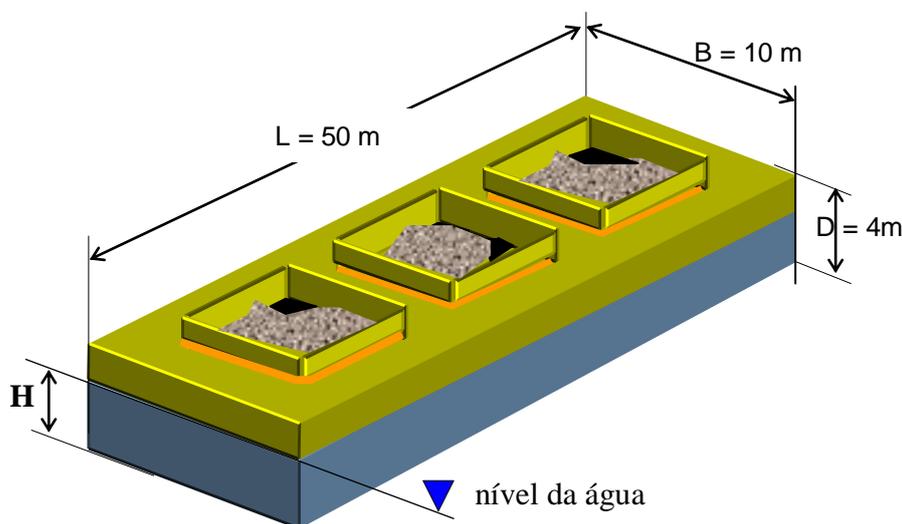


Fig. 3 a – Barçaça em forma de caixa – Comprimento – 50 m; Boca – 10 m; Pontal - 4 m; Deslocamento: carregada: 1500 toneladas métricas.

Como um segundo exemplo, seja o caso de um flutuante com as dimensões mostradas na figura 3b, flutuando sem banda ou trim em água salgada ($d = 1,026$), tendo submergida a metade da extensão dos dois cilindros flutuadores, confeccionados em aço ($d = 7,8$) com chapas de 2 mm de espessura. O pranchão servindo como convés (de $3 \times 5 \text{ m}^2$) é confeccionado com ripas

de madeira maciça ($d = 0,85$) com uma espessura equivalente de 40 mm. Pede-se estimar o peso W da carga estivada sobre o flutuante para um tal calado.

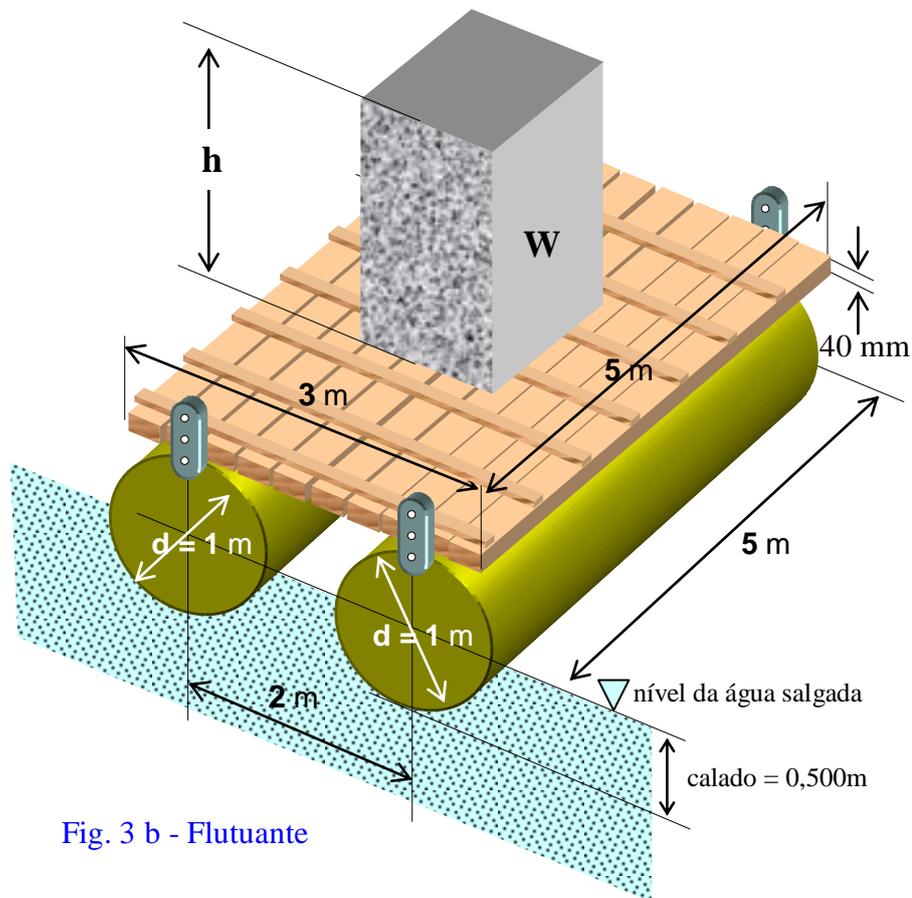


Fig. 3 b - Flutuante

SOLUÇÃO

O peso de cada cilindro flutuador de aço, com diâmetro $d = 1$ m, comprimento $L = 5$ m, em chapa de espessura $e = 2$ mm pode ser estimado como sendo:

$$p = [2 \pi d^2/4 + \pi d L] e \rho g = [2 \times \pi \times 1^2/4 + \pi \times 1 \times 5] \times 0,002 \times 7,8 \times 1000 \times 9,81 = 2.644 \text{ N} = 269,5 \text{ kgf}$$

O peso do pranchão de madeira de $3 \times 5 \times 0,040$ valerá algo em torno de:

$$(3 \times 5 \times 0,040) \times 0,85 \times 1000 \times 9,81 = 5003 \text{ N} = 510 \text{ kgf}$$

O peso total do flutuante (o pranchão do convés + os dois cilindros flutuadores) valerá:

$$P = 2 \times 269,5 + 510 = 1.049 \text{ kgf} = 10,29 \text{ kN}.$$

O volume de água salgada deslocada correspondente aos dois semicilindros submersos terá um peso dado por:

$$\Delta = 2 \times \frac{1}{2} (\pi 1^2 / 4) \times 5 \times 1,026 \times 1000 \times 9,81 = 39,53 \text{ kN} = 4.029 \text{ kgf}.$$

Portanto, o peso W da carga valerá : $4.029 - 1.049 = 2.980 \text{ kgf} \approx 3,0 \text{ ton}^*$.

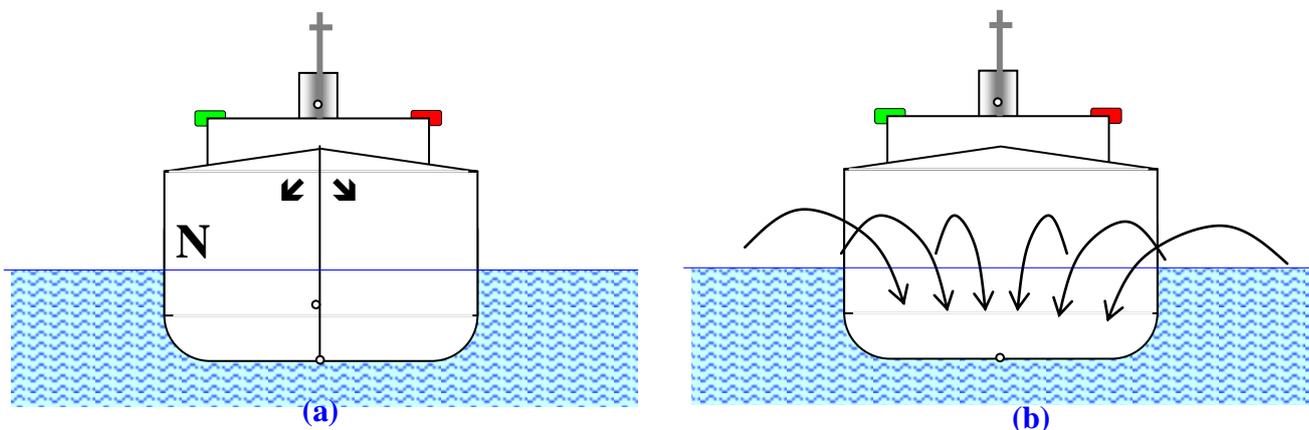
(ton* - tonelada métrica)

2.3.2 – Flutuante com forma de Embarcação

De modo geral, as embarcações não têm forma geométrica de definição fácil com um prisma, cilindro, esfera, etc. Neste caso, a abordagem que se fez antes também é válida, com uma pequena diferença.

Supõe-se que o navio 'N' está flutuando em águas paradas (fig.4 a); posteriormente supõe-se que o navio é retirado da água (condição 2). Evidentemente, a água enche imediatamente

o local deixado livre pelo navio; a superfície da água na qual estava o navio permanecerá inalterada, e o sistema de forças que agia sobre o navio será o mesmo que passa a agir sobre a massa líquida que ocupava o espaço deixado pelo navio. Volta-se a ter uma igualdade de forças representadas pelo peso do flutuante e pelo peso do volume de água deslocada.



(Fig. 4 – Flutuante com forma de embarcação)

Obviamente, o que se verifica é nova aplicação do princípio de Arquimedes, como não poderia deixar de ser, visto que o princípio se aplica a qualquer flutuante, independente de sua forma. O que se procurou esclarecer, porém, foi o fato de não se ter uma relação fácil entre o calado e a variação do peso.

No caso das embarcações, procura-se estabelecer qual o volume das obras vivas para diferentes calados, por métodos que serão abordados depois, e traça-se uma curva que representa esta variação. Conhecido o peso específico da água onde está o navio, fica fácil estabelecer qual o calado da embarcação para diferentes condições de carregamento, visto que os princípios já vistos devem sempre se aplicar.

2.3.3 – Corpo Submerso

As afirmações anteriores se aplicam a um corpo submerso em meio fluido; o corpo sofre a ação de uma força vertical para cima decorrente do volume do fluido deslocado. A intensidade desta força vertical para cima (Empuxo) é igual ao peso do fluido deslocado.

Um corpo totalmente submerso pode ter peso superior ou inferior ao peso do líquido deslocado.

Quando um corpo está totalmente submerso, e não está em contato com o fundo, permanece estacionário e em equilíbrio apenas quando seu peso é exatamente igual ao do líquido que desloca.

2.4 – Sistemas de Unidades

De modo geral os estudantes brasileiros já se acostumaram com o **sistema internacional** no qual as unidades fundamentais são: *Comprimento: metro [m]; Massa: quilograma [kg]; Tempo: segundo [s]*

Nesse sistema, algumas unidades derivadas são: Massa específica: [kg/m³]; Peso específico: [N/m³]

Força: Newton [N] – força capaz de conferir à massa de 1kg a aceleração de 1m/s².

Quando a segunda Lei de Newton é escrita de modo genérico 'F = k.m.a', o coeficiente "k" terá neste sistema o valor: k = 1[N/kg].[s²/m]

Vale a pena observar que no SI a massa específica da água doce é 1000 kg/m³ e o peso específico é 9810 N/m³.

Em problemas práticos muitas vezes se encontram os chamados **sistemas técnicos** que se caracterizam por terem quatro 'unidades fundamentais', a saber:

Comprimento: metro [m]; Massa: quilo [kg]; Tempo: segundo [s]; Força: quilograma força [kgf]

Neste sistema a segunda Lei de Newton também pode ser escrita de modo genérico:

$$F = k.m.a = (P/g) a \quad (1)$$

Mas deve-se observar que a constante dimensional 'k' não tem valor unitário e sim:

$$k = (1 / 9,81) [kgf/kg].[s^2/m] \quad (2)$$

Os chamados ‘sistemas técnicos com quatro unidades fundamentais’ se caracterizam pelo fato de que o número que mede a massa de um corpo em kg (massa) é o mesmo que mede o peso em kgf nas condições normais de gravidade. Para que esta condição se verifique, torna-se necessária a utilização do fator ‘k’ com o valor acima, visto que a expressão da segunda Lei de Newton neste caso se apresenta necessariamente sob a forma:

$$F = m.a / 9,81 \quad (3)$$

Deve-se notar que o valor 9,81 **não tem** significado de aceleração; trata-se de uma constante **dimensional** que possibilita o uso destes sistemas de unidades chamados ‘técnicos’; com esta constante dimensional é possível ter a característica já citada de que o número que mede a massa mede também o o peso ‘P’. um corpo de massa ‘m’ num local onde a aceleração da gravidade tem valor ‘g’ será:

$$P = m.g / 9,81 \quad (4)$$

Como na grande maioria das aplicações pode-se considerar o valor $g = 9,81$, verifica-se da equação (4) que ‘P’ e ‘m’ serão numericamente iguais (respectivamente em kgf e em kg).

De modo geral, a equação (3) pode ser escrita sob a forma: $F = (1 / g_0).m.a$, ou seja:

$$k = (1 / g_0) \text{ [kgf.s}^2\text{/kg.m]}, \text{ de maneira que a equação (4) se torna:}$$

$$P = m.g / g_0$$

Caso sejam usadas **unidades inglesas** temos:

Comprimento: pé [ft]; Massa: libra (massa) [lbm]; Tempo: segundo [sec]; Força: libra (força) [lbf];

Neste caso a constante ‘k’ que aparece na equação (1) torna-se:

$k = 1 / g_0 = (1 / 32,17) \text{ [lbf.sec}^2\text{ / lbm.ft]}$ e o número que mede a massa de um corpo em libra massa é o mesmo que mede o peso em libra força.

Vimos que, quando se usa o chamado ‘sistema técnico com quatro unidades’ **métricas fundamentais**, a massa específica da água doce é de 1000 kg/m^3

Se for usado o ‘sistema técnico com quatro unidades’ **inglesas fundamentais**, a massa específica da água doce é $62,4 \text{ lbf/ft}^3$ e o peso específico é de $62,4 \text{ lbf/ft}^3$.

É prudente lembrar que há sistemas com três unidades fundamentais que também são chamados ‘sistemas técnicos’ por alguns autores. Empregando-se unidades métricas encontramos as seguintes unidades fundamentais:

Comprimento: metro [m]; Tempo: segundo [s]; Força: quilograma força [kgf];

Nesse sistema a unidade de força é o peso de um quilograma padrão, e a unidade de massa é uma **unidade derivada** caracterizada com a que adquire a unidade de aceleração quando solicitada pela unidade de força deste sistema. Esta unidade é chamada em alguns livros de ‘utm’ (unidade técnica de massa), e uma comparação com o SI nos mostra que é 9,81 vezes maior do que o quilograma padrão.

Esta conclusão é inteligível quando lembramos que o quilograma padrão é acelerado pelo quilograma com a aceleração de $9,81 \text{ m/s}^2$ ao passo que o ‘utm’ só recebe do quilo força a aceleração de 1 m/s^2 .

Caso as unidades sejam inglesas o ‘sistema técnico’ com três unidades tem as seguintes unidades fundamentais:

Comprimento: pé [ft]; Tempo: segundo [sec]; Força: libra força [lbf];

A unidade de massa é uma unidade derivada, conhecida como ‘slug’, que é definida como a massa que recebe da libra força a aceleração de 1 ft/sec^2 . De modo análogo como fizemos para o ‘utm’ concluímos que o ‘slug’ é 32,17 vezes maior do que a libra massa.

Alguns autores preferem não dar nomes à unidade de massa destes dois ‘sistemas técnicos’, de modo que:

-em vez de ‘utm’ a unidade seria: $\text{kgf.s}^2 / \text{m}$

-em vez de ‘slug’ a unidade seria: $\text{lbf.sec}^2 / \text{ft}$

Parece interessante observar que para estes dois ‘sistemas técnicos’, a segunda Lei de Newton fica melhor escrita sob a forma: **$F = (P/g) a$** (a “massa” não é cogitada: só o “peso”)

2.5 - Regras de Integração

Regras aproximadas de integração são necessárias na Arquitetura Naval para o cálculo de áreas, volumes, posição de centróides, etc, porque as curvas encontradas normalmente nos navios ainda não foram expressas por fórmulas matemáticas.

Antes de utilizar as regras aproximadas será oportuno efetuar uma pequena revisão das expressões matemáticas gerais usadas para determinar a área sob uma curva entre limites conhecidos, ou outras propriedades desta área como momento estático, de momento de inércia, etc.

Há algumas regras aproximadas de integração, quase todas do conhecimento daqueles já cursados em Cálculo Numérico: regra trapezoidal, 1ª regra de Simpson, regra 5 – 8 e a de Tchebicheff.

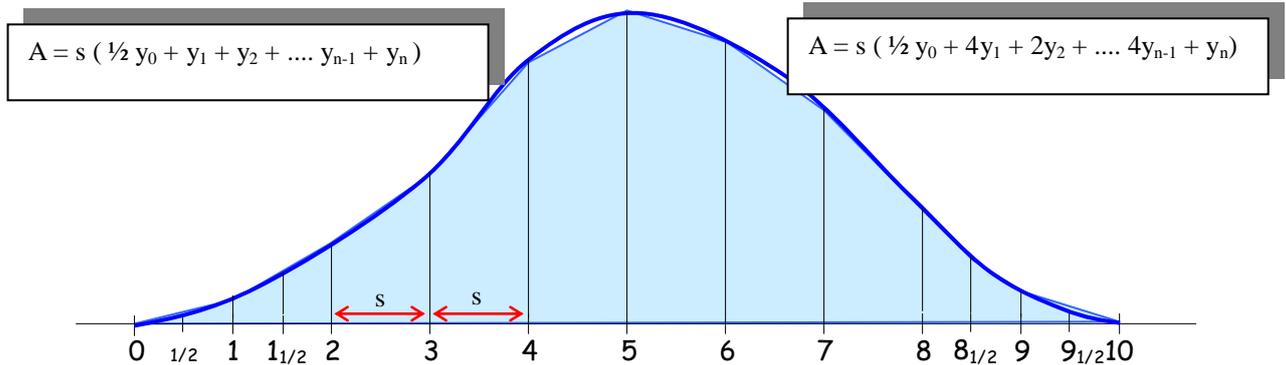


Fig.1 – Regras de Integração aproximadas. Uso das meias ordenadas

Cada regra aproximada tem sua melhor aplicação neste ou naquele caso, embora teoricamente qualquer delas possa ser usada na determinação de uma área sob certa curva.

No caso de 1ª regra de Simpson o artifício conhecido como “meias ordenadas” permite aumentar a precisão do resultado quando a curvatura nas extremidades da curva é diferente daquela do meio. Deve-se sempre lembrar que “meia ordenada” não significa ordenada com metade do comprimento e sim uma ordenada levantada a meio do espaçamento entre duas ordenadas.

É possível organizar os cálculos de maneira tabular buscando evitar repetições e tornando a apresentação objetiva e de fácil verificação. Cada pessoa deve procurar organizar os cálculos de acordo com a tabulação que mais lhe agrada.

Há várias propriedades de certa área que podem ser determinadas por regras aproximadas: momento estático, momento de inércia, etc. Para fazer uso da regra aproximada pode-se traçar uma curva auxiliar onde as ordenadas são os elementos aos quais serão aplicados o tratamento previsto na regra aproximada.

Assim, quando se determina o *momento de inércia* de uma área sob certa curva C, em relação à linha de base Ox, ($I = 1/3 bh^3$) expressão matemática geral é:

$$I_x = (1/3) \int y^3 dx, \text{ sendo os limites de } 0 \rightarrow A.$$

Pode-se traçar uma curva cujas ordenadas sejam y^3 e ampliar a esta nova curva a regra aproximada para determinar a área sob a curva, cujo valor dará o momento de inércia. A construção da curva auxiliar não é indispensável.

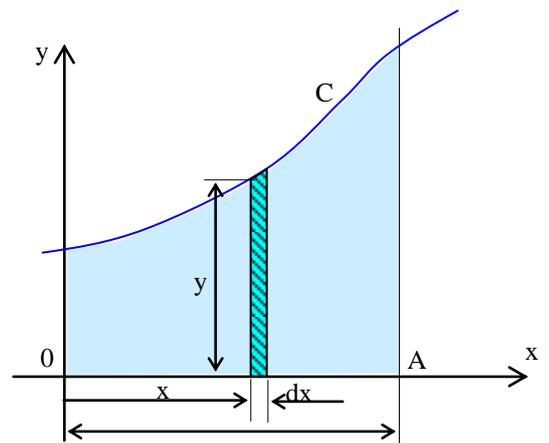


Fig.2 – Momento de Inércia de uma área sob curva

Tudo o que foi mencionado com relação à obtenção de propriedades de áreas pode ser aplicado a volumes. É possível a obtenção do volume de um sólido aplicando uma regra de integração aproximada às áreas das seções transversais do sólido.

São feitas, com freqüência, comparações entre as regras de integração e para se ter uma idéia completa destas comparações sugere-se consulta às referências (A), (B), (C) e (I).

O planímetro e o integrador são dois equipamentos mecânicos que podem ser usados para obter alguns valores dados por regras de integração.

Os computadores se prestam muito à solução dos problemas de integração por meio de regras aproximadas.

2.6 - Curvas Hidrostáticas

Dá-se este nome a um conjunto de curvas que representam várias características do navio flutuando em repouso e em águas paradas.

São conhecidas também pelo nome “Curvas de Forma”, porque sua obtenção depende unicamente das formas da carena; uma vez estabelecido o plano de linhas, é possível calcular e traçar as curvas hidrostáticas.

(Os livros americanos chamam de “displacement and other curves”)

Estas curvas são de grande importância para o estudo da estática do navio.

- Curvas Usuais

Constam normalmente do conjunto de Curvas Hidrostáticas as seguintes:

- A_{WL} – área das linhas d’água.
- TCI – toneladas por centímetro de imersão (em inglês: T.P.I. – “tons per inch of immersion”).
- LCF – posição longitudinal do centro de flutuação.
- Δ_s e Δ_d - deslocamento em água salgada e deslocamento em água doce.
- KB – posição vertical do centro de carena.
- LCB – posição longitudinal do centro de carena.
- KM – posição vertical do metacentro.
- MT 1 – momento para alterar o trim de 1 cm (ou de 1 polegada).
- Área de balizas.
- Correção do deslocamento devida a Trim.

Alguns representam também na mesma folha o perfil do navio, em relação ao qual é traçada a curva de área de balizas ou curva de “áreas seccionais”.

De modo geral, a referência para todas as curvas é o calado do navio, representado nas ordenadas. Nas abscissas há uma escala única (cm ou polegada). Há algumas curvas onde constam 2 escalas: em cm (ou in) na parte inferior e em toneladas na superior.

Na medida que formos nos aprofundando no assunto, cada um dos nomes das curvas vai adquirir significado.

- Outras Curvas

Algumas vezes são representadas, no mesmo conjunto, curvas que indicam a variação com o calado dos coeficientes de forma: C_P , C_B , C_X , C_{WL} .

Há também possibilidade de representar a curva de superfície molhada juntamente com as curvas hidrostáticas.

Outro conjunto de curvas que é obtido é o das chamadas “Curvas de BONJEAN”, as quais podem ser representadas separadamente das demais, ou não.

Oportunamente explicaremos o significado destas últimas curvas.

2.6.1 – Maneira de Representar

Como mencionado, é usual representar no eixo de ordenadas das “Curvas Hidrostáticas” o calado do navio. Podem ser usados o calado moldado e o calado máximo; quando consta um só calado, é usado o moldado (todos os cálculos são efetuados a partir do plano de linhas usando-se o calado moldado). Representa-se no desenho a inclinação da linha de base quando a embarcação tem trim de construção.

Cada uma das curvas listadas no item 2 representa a variação de uma característica da carena (deslocamento, KB, KM, A_{WL} , etc) com o calado. Assim, é usual estabelecer uma escala adequada ao traçado de cada curva e escrever o nome da curva e a respectiva escala no desenho ao longo da curva em questão.

A figura a seguir é um esboço das curvas hidrostáticas de um navio com as características: L=243'; B=40'; D=20'; Calados 16' (carregado) e 8' (leve), correspondentes aos deslocamentos $\Delta_s = 3160$ ton (carregado) e $\Delta_s = 1360$ ton (leve), para um porte bruto de 1800 ton.
Para um calado de 16', obtivemos (use o zoom para maiores detalhes):

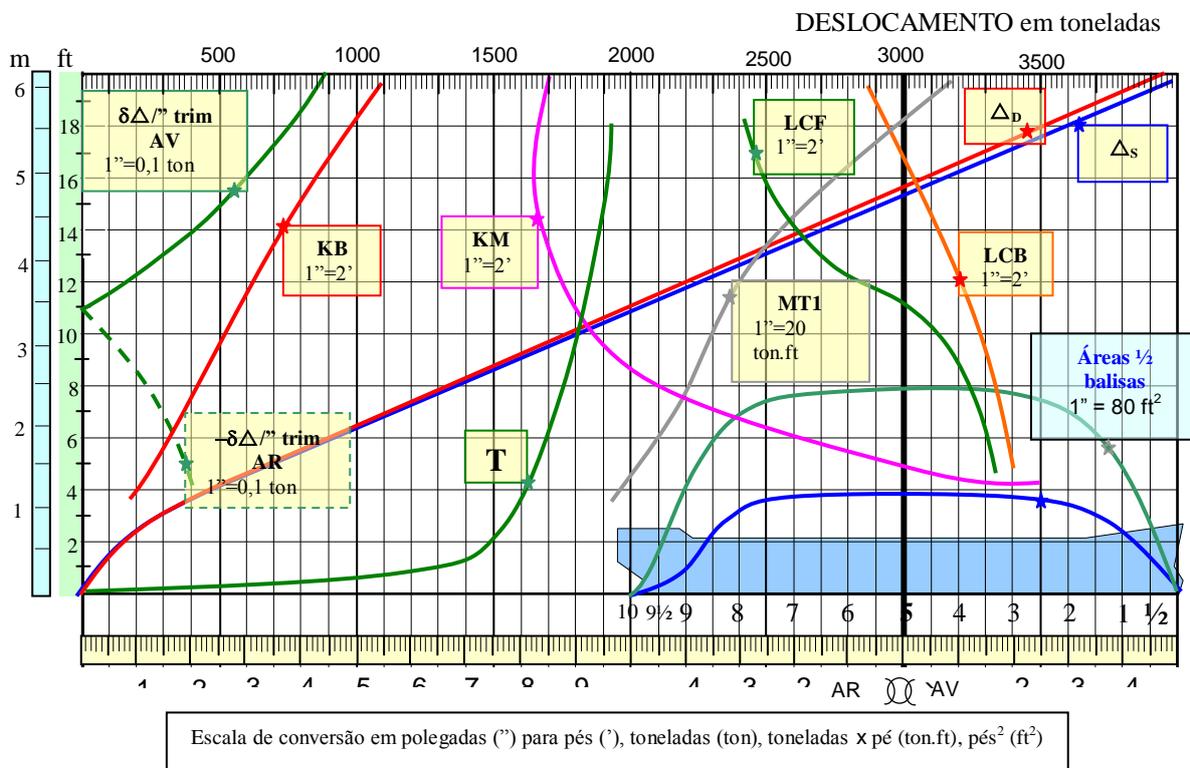


Fig. 4 – Curvas Hidrostáticas

Supondo que os calados medidos AV e AR sejam: 16' (4,88 m) , pede-se verificar a correção dos valores extraídos das curvas e cálculos efetuados:

- Deslocamento em água salgada: $\Delta_s = 3.160$ ton - $\square = 3160 \times 35 = 111 \times 10^3$ ft³
- Deslocamento em água doce: $\Delta_s = 3.080$ ton - $\square = 3080 \times 36 = 111 \times 10^3$ ft³
- KM $\rightarrow 8,3'' \rightarrow 8,3 \times 2 = 16,6'$
- KB $\rightarrow 4,3'' \rightarrow 4,3 \times 2 = 8,6'$
- LCF $\rightarrow 2,6''$ AR $\rightarrow 2,6 \times 2 = 5,2'$ AR da ∞
- LCB $\rightarrow 0,2''$ AV $\rightarrow 0,2 \times 2 = 0,4'$ AV da ∞
- MT1" $\rightarrow 12,4''$ (escala em " com 0 à esquerda) $\rightarrow 12,4 \times 20 = 248$ ton x ft / trim de 1"
- TPI_S $\rightarrow 9,6'' \rightarrow 9,6 \times 2 = 19,2$ ton por in (") de imersão em água salgada.

Área da linha d'água - $A_{WL} = TPI_S / \gamma_S \times (1'') = 19,2 / (1/35)(1/12) = 8.064$ ft²

Áreas das 1/2 Balizas (calado de 16')

Balizas	1	2	3	5	7	8	9
Leitura (")	2,3	3,5	3,8	3,9	3,8	3,4	2,0
Área (ft ²)	184	280	304	312	304	272	160

Área da baliza 5 (seção a meia-nau)
 $A_x = 2 \times 312 = 624$ ft²

- Coefficiente de Bloco - $C_B = 110.600 / 245 \times 40 \times 16 = 0,705$
- Coefficiente de seção a meia nau - $C_x = 624 / 40 \times 16 = 0,975$
- Coefficiente da área de linha d'água - $C_{WL} = 8.064 / 245 \times 40 = 0,823$
- Coefficiente prismático longitudinal - $C_p = 110.600 / 245 \times 624 = 0,723$
- Coefficiente prismático vertical - $C_{PV} = 110.600 / 8.064 \times 16 = 0,857$

2.6.2 – Cálculos para o traçado das Curvas

Algumas curvas são calculadas a partir das linha d'água e outras a partir das balizas. De modo geral, usam-se as Regras de Integração de maneira sistematizada. Começaremos com as curvas que são calculadas a partir das linhas d'água.

É usual escolher 5 (cinco) valores de calado para os quais são feitos todos os cálculos. A escolha dos calados fica a critério do projetista, sendo que o calado de projeto normalmente é um valor escolhido. Uma faixa de valores de calados poderia, por exemplo, ser: 0,25H; 0,50H; 0,75H; 1,25H.

Nestas condições serão calculados, por exemplo, valores de ICF, TCI, KB, KM, Δ_s , Δ_d , MT 1, etc. para cada um dos calados escolhidos. Assim, a primeira providência que o calculista deve tomar é selecionar os valores de calado para os quais os cálculos serão efetuados.

Cálculos de A_{WL} , TCI, LCF, I_x e I_L

- Cálculo de A_{WL}

As áreas das linhas d'água correspondentes a diferentes calados são calculadas usando-se uma das Regras de Integração.

Conhecendo-se as meias bocas (a partir do plano de linhas ou da Tabela de Cotas) das linhas d'água correspondentes aos calados pré-selecionados, pode-se calcular A_{WL} pela regra preferida pelo calculista.

Embora o conhecimento dos valores de A_{WL} seja muito importante, nem sempre a curva de $A_{WL} \times H$ é representada no conjunto de curvas hidrostáticas.

- Cálculo de TCI

TCI são iniciais de uma característica do casco conhecida por “TONELADAS POR CENTÍMETRO DE IMERSÃO”. Esta propriedade indica quantas toneladas de carga devem ser adicionadas ao navio para que o calado aumente de 1 cm.

Caso se considere que a área da linha d'água não muda de modo significativo com variação de 1 cm no calado, o cálculo da TCI limita-se a calcular o peso de água deslocado por um prisma cuja base é A_{WL} e a altura é de 1 cm. Assim:

$$\text{Volume do prisma} = A_{WL} \cdot h \quad \text{onde } h = 1 \text{ cm} = 1/100 \text{ m}$$

$$\text{Volume} = A_{WL}/100 \text{ m}^3;$$

A densidade da água salgada é 1,026, ou seja: cada m^3 de água salgada pesa 1,026t quando se usa o sistema TÉCNICO.

$$\text{Logo: TCI} = A_{WL}/100 \times 1,026 \text{ toneladas para cada centímetro de imersão.}$$

Caso se use o S.I. deve-se fazer a transformação para unidade de força correspondente (kN).

No sistema Inglês os números são um pouco diferentes. Se A_{WL} está calculada em ft^2 , a altura do prisma será:

$h = 1'' = 1/12 \text{ ft}$ e seu volume = $A_{WL} \times 1/12 \text{ ft}^3$. Logo, o cálculo do número de toneladas dará:

$$\text{TPI} = A_{WL}/12 \text{ ft}^3 \times 1/(35 \text{ ft}^3/\text{t}) \text{ ou } \text{TPI} = A_{WL}/420 \text{ toneladas longas para cada polegada de imersão.}$$

Uma vez que se tenha calculado os valores de A_{WL} para os diferentes calados pré-escolhidos, pode-se calcular valores de TCI (ou TPI) para os mesmos calados.

- Cálculo de LCF

LCF são iniciais usadas para identificar a posição LONGITUDINAL DO CENTRO DE FLUTUAÇÃO. O Centro de Flutuação é o centróide do plano de linhas d'água. É importante conhecer as posições do Centro de Flutuação porque ele interfere diretamente no estudo do TRIM ou compasso do navio.

Para se determinar a posição do Centro de Flutuação, deve-se lembrar que a **LC** é a linha de simetria do plano de linha d'água, de modo que o Centróide da área estará sobre **LC**. Deste modo, basta conhecer a distância longitudinal do Centro de Flutuação com relação a alguma referência, a qual, em geral, é a seção mestra.

O método de cálculo consiste em determinar o Momento estático de A_{WL} com relação à seção mestra e a seguir dividir este momento pela área que já foi determinada previamente. Assim:

$$LCF = M_{WL} / A_{WL}, \text{ onde:}$$

M_{wl} = Momento estático da linha d'água com relação à seção mestra. Os valores de LCF (em metros, ou em pés) são representados nas Curvas Hidrostáticas usando-se escala adequada.

O centro de Flutuação poderá estar avante ou a ré da Seção Mestra de modo que o valor de LCF poderá ser positivo ou negativo; assim, é costume traçar uma certa ordenada indicando o valor nulo de LCF e mostrar nitidamente os valores positivos e os negativos.

2.6.3 – Cálculo de Momentos de Inércia

Há dois momentos de Inércia da área linha d'água que são calculados, embora seus valores não sejam representados nas “Curvas Hidrostáticas”. Como os valores destes momentos de inércia são função apenas das meias-bocas, os cálculos são efetuados juntamente com os outros referentes às linhas d'água.

O momento de inércia da linha d'água com relação à seção mestra é representado por I_x . Para seu cálculo devemos lembrar as expressões já vistas.

Cálculo de I_{LC}

O momento de Inércia da linha d'água com relação à **LC**, representado por I_{LC} , também é calculado sem ser representado nas “Curvas Hidrostáticas”. Posteriormente servirá para o cálculo de outra característica da carena.

As áreas das balizas podem ser determinadas por instrumentos mecânicos ou por cálculos. Os instrumentos mecânicos já mencionados podem fornecer a área de cada baliza (no caso do planímetro), e também a posição do Centro de Gravidade da baliza no caso de uso de integradores.

As balizas podem ainda ter suas áreas determinadas diretamente por computadores em instalações modernas dotadas de número razoável de elementos periféricos.

Outro modo de obter a área das balizas é através do cálculo, usando-se uma das Regras de Integração que foi abordada. Uma regra que se adapta bem ao cálculo das áreas de balizas é a trapezoidal; as balizas têm variação da área maior nas linhas d'água próximas ao plano de base de modo que se pode usar um espaçamento menor nesta região é aumentar o espaçamento nas linhas d'água mais altas.

A posição do centróide da área da baliza estará definida quando ficar conhecida a Cota acima da Linha de Base, visto que a baliza é simétrica com relação ao plano central longitudinal e o centro de gravidade estará, pois, neste plano.

Se for usada a regra trapezoidal para obtenção das áreas, obtem-se a posição do centro de gravidade de cada trapézio e, a seguir, vai-se compondo um a um de modo a determinar a posição do centro de gravidade da baliza para cada linha d'água usada no cálculo das curvas hidrostáticas.

2.6.4 - Curva de áreas e centróides das balizas

Uma vez obtida as áreas das diferentes balizas até a linha d'água de projeto é possível traçar uma curva que aparecerá juntamente com as curvas hidrostáticas, e representa a distribuição das áreas das seções ao longo do comprimento do navio.

Nem todas as curvas hidrostáticas têm esta representação; quando ela aparece, é comum que seja traçada juntamente com o perfil do navio.

2.6.5 - Curvas de BONJEAN

As curvas de *BONJEAN* são um conjunto de curvas que mostram a variação da área das balizas com o calado, havendo uma curva para cada baliza.

É mais comum encontrar as Curvas de *Bonjean* representadas separadamente das Curvas Hidrostáticas, mas há quem coloque as Curvas de *Bonjean* na mesma folha onde aparecem as hidrostáticas.

Tanto a Curva de Áreas de Seções quanto as de *Bonjean* podem ser facilmente traçadas, uma vez que se tenha concluído os cálculos já indicados.

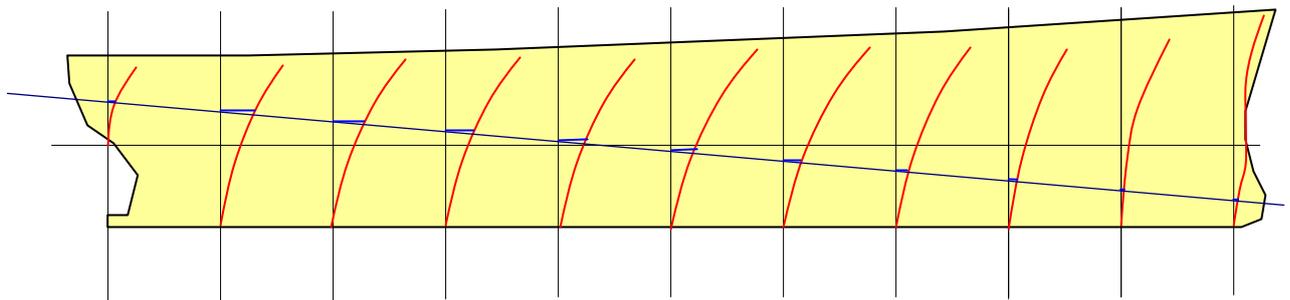


Fig.5 – Curvas de BONJEAN

2.6.6 - Cálculos de volume ∇ , deslocamento Δ , KB, LCB

Cálculos de ∇ , Δ

Os cálculos de ∇ (volume de deslocamento) e Δ (deslocamento) são efetuados a partir das áreas das balizas; para tanto, basta lembrar que se, para qualquer calado, for traçada uma curva de área das balizas, tendo por base o comprimento do navio, a área sob esta curva representa o volume da carena.

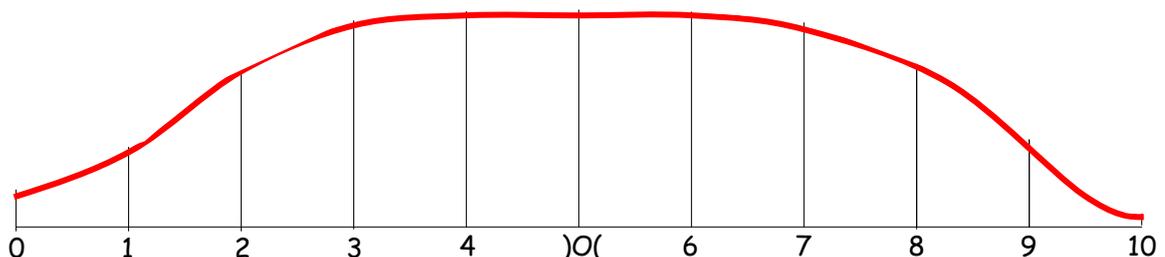


Fig.6 – Curva da distribuição

Cálculos de KB e LCB

Os símbolos de KB e LCB designam respectivamente a cota e a posição longitudinal do centro da carena. A posição vertical (cota) é medida acima do plano de base, e a posição longitudinal geralmente é medida com relação à seção mestra. Assim como o LCF o valor de LCB poderá ser positivo ou negativo, de modo que o traçado da curva LCB x CALADO nas “curvas hidrostáticas” deverá receber os mesmos cuidados, ou seja: a indicação clara da condição de estar o ponto B avante ou a ré da seção mestra.

Os cálculos de KB e LCB são bem fáceis, desde que se disponha dos valores das áreas das balizas e seus momentos com relação à linha de base.

Para o cálculo de KB considera-se que a carena está dividida por um certo número de “FATIAS” transversais, tendo cada uma delas uma baliza como seção média. A integração da curva de MOMENTO de cada baliza até o calado considerado dará o MOMENTO DE VOLUME DA CARENA com relação à linha de base.

Exemplo:

3. ESTABILIDADE INICIAL

3.1– Introdução

Estabilidade é uma propriedade importante em qualquer instalação fixa ou móvel. No caso de embarcações a estabilidade é imperiosa, devendo ser o primeiro aspecto a ser verificado. Sejam quais forem as características de uma embarcação, por mais sofisticadas que sejam, elas não terão valor algum se houver carência de estabilidade.

O professor George Manning, autor da REF (A), tem uma frase eloqüente sobre o assunto que o leitor deverá guardar: “Não há imaginação por mais fértil que seja capaz de fazer de uma embarcação sem estabilidade algo útil.”

Estas observações são feitas neste estágio para que o leitor se conscientize da importância do assunto. A falta de estabilidade leva a perda da embarcação e de vidas humanas. A história está cheia de exemplos de embarcações que se perderam por carência de estabilidade; infelizmente o Brasil não é uma exceção.

Estabilidade é um assunto que afeta todos os que lidam com embarcações sendo responsabilidade de: projetistas, calculistas, construtores, operadores, reparadores, etc.... Não importa em que estágio da vida do navio cada um deles entre em contato com a embarcação: a estabilidade é necessariamente a principal preocupação.

A palavra estabilidade na realidade é um tanto abrangente porque ela pode ser:

- transversal ou longitudinal
- estática ou dinâmica

e ainda pode ser aplicada a corpos inteiramente flutuantes ou parcialmente flutuantes.

Nestas condições vemos a conveniência de subdividir o assunto. Neste capítulo veremos os principais conceitos de estabilidade estática transversal e longitudinal. Nos capítulos seguintes abordaremos a estabilidade dinâmica e as características do navio que afetam a estabilidade, os efeitos da mudança de peso, de superfície livre e estabilidade de corpos parcialmente flutuantes.

3.2 – Revisão

Antes de iniciar os aspectos referentes à estabilidade estática transversal parece interessante uma pequena revisão de assuntos básicos.

Como sabemos, há três condições de equilíbrio: estável, instável e indiferente.

- *Estável*: quando um corpo tem tendência a voltar à posição inicial quando afastado de sua posição;
- *Instável*: quando um corpo não tem tendência a voltar à sua posição de equilíbrio quando afastado dela;
- *Indiferente*: quando qualquer posição é uma posição de equilíbrio.

O cone é o sólido que permite o exemplo das três condições de equilíbrio:

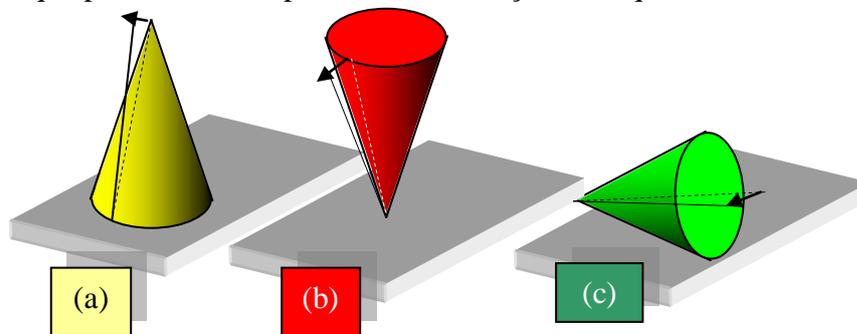


Fig 5 – Condições de equilíbrio

- (a) *Estável*: quando apoiado sobre a base
- (b) *Instável*: quando apoiado sobre o vértice
- (c) *Indiferente*: quando apoiado sobre a geratriz

Definição: Somente os corpos em condições de equilíbrio estável têm estabilidade. Assim a estabilidade pode ser definida como a propriedade dos corpos que têm equilíbrio estável.

Equilíbrio dos corpos apoiados solidamente

Observemos o caso de um prisma retangular homogêneo, apoiado sobre uma superfície plana. O corpo está em equilíbrio estável porque, se for deslocado de sua posição, voltará à posição inicial de repouso com relação ao plano.

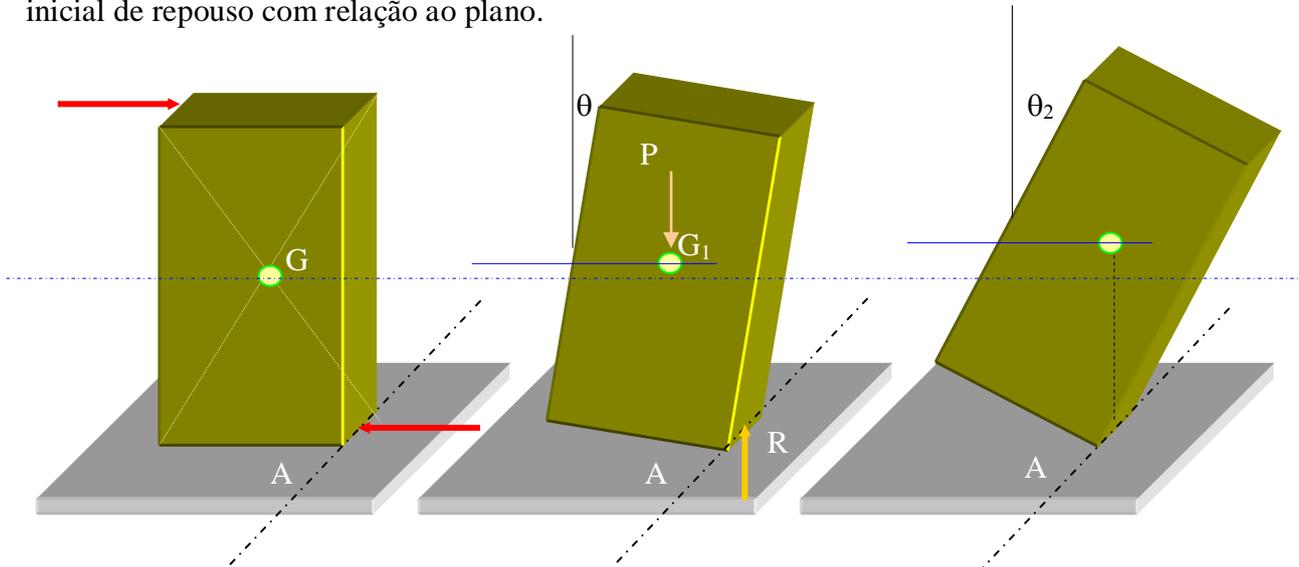


Fig.6 – Estabilidade do equilíbrio de corpos apoiados solidamente.

Para inclinar o prisma, é necessário aplicar uma força que provoca um momento com relação a um eixo A do plano onde está apoiado o prisma.

Se a força é retirada, surge um MOMENTO RESTAURADOR igual ao peso p multiplicado pela distância do centro de gravidade à vertical que passa pelo eixo de rotação ao sólido.

O Momento restaurador é chamado CONJUGADO DE ENDIREITAMENTO, e o braço deste conjugado, BRAÇO DE ENDIREITAMENTO.

Quando o peso é constante, como neste caso, a relação entre os braços de endireitamento e os conjugados de endireitamento é a mesma. A grandeza que mede efetivamente a estabilidade é o conjugado de endireitamento, mas neste caso, em que o peso é constante, o braço de endireitamento também é uma medida da estabilidade.

- Estabilidade estática e dinâmica

O centro de gravidade do prisma na posição inclinada (θ) está em G_1 que está acima de G : isto quer dizer que, na posição inclinada, o corpo possui uma energia potencial igual ao produto $P \times GG_1$; se não há resistência oferecida pelo eixo A em torno do qual o corpo girou, esta energia é igual ao trabalho realizado para inclinar o corpo até o ângulo θ . A energia potencial do corpo na posição inclinada, comparada com a energia potencial na posição de equilíbrio estável, é a ESTABILIDADE DINÂMICA. Esta energia também mede a tendência do corpo para voltar à posição de equilíbrio.

Há, pois, 2 maneiras de medir a ESTABILIDADE de um corpo em equilíbrio estável:

- O MOMENTO DE ENDIREITAMENTO, que mede a estabilidade estática, e
- A ENERGIA POTENCIAL ACUMULADA quando na posição inclinada, que mede a estabilidade dinâmica.

- Limite de estabilidade

Na figura 6 vê-se que, quando se aumenta a inclinação do paralelepípedo, o centro de gravidade do corpo estará na mesma vertical que o eixo A, onde está aplicada a reação R (que, como sabemos, é igual a P). Nesta condição, é claro que o “Conjugado de Endireitamento” é nulo, porque o braço torna-se nulo.

Evidentemente, este é o ângulo que estabelece o “limite de estabilidade”. Caso haja inclinações maiores que θ_2 , o corpo não retornará mais à sua posição anterior de equilíbrio, ou em outras palavras: perderá a estabilidade.

- **Nomenclatura**

Há necessidade de ser empregada neste estudo uma nomenclatura exata (já vista na introdução), de modo que alguns termos serão definidos, embora possa haver alguns casos certa repetição.

- **Centro de carena**

É o centro de gravidade do líquido deslocado pela carena; pode-se considerar que, neste ponto, está aplicada a força de empuxo hidrostático. Como já vimos este ponto é o CENTRO GEOMÉTRICO da CARENA, donde o seu nome.

Os símbolos para o centro de carena podem ser CC ou, mais comumente, B.

Quando o navio flutua sem banda, o centro de carena está no plano de simetria do navio, sendo sua posição estabelecida se as posições vertical e longitudinal estiverem estabelecidas.

A força de EMPUXO de um corpo flutuante em águas paradas atua verticalmente: sua direção é normal à superfície de água, que é horizontal.

- **Centro de gravidade**

A posição do centro de gravidade de um corpo depende da forma e da distribuição de pesos do mesmo. No caso de embarcações (que são parcialmente “ocas”) a localização do centro de gravidade depende da posição do centro de gravidade do navio leve e da carga do mesmo. O símbolo é G.

Após um movimento de pesos a bordo, o centro de gravidade do navio pode não estar na mesma localização longitudinal que o centro de carena, ocorrendo uma instabilidade. Quando G e B têm afastamentos diferentes com relação a um plano de referência qualquer (que muitas vezes é a seção mestra) cria-se um conjugado que faz o navio girar, em torno de um eixo transversal que passa pelo Centro de Flutuação, (F) até que G e B ocupem a mesma posição vertical. Em geral os afastamentos de G e B, a partir da seção mestra, não são muito diferentes e os valores de trim não são grandes.

A posição vertical de G é quase sempre mais alta do que a do centro de carena, porque a estrutura se estende acima da linha d'água; além disso, é mais fácil colocar qualquer item nas partes altas do navio do que no fundo dos porões.

É relevante lembrar que a posição do centro de gravidade do navio varia quase constantemente, porque é função de itens que são consumíveis ou removíveis de bordo. Assim esta a posição só tem significado para condições específicas de carregamento.

- **Metacentro**

A posição do centro de carena B só é fixa, com relação às linhas do navio, quando o mesmo permanece em repouso.

Quando o navio sofre pequenas bandas, o centro de carena descreve uma curva que tem centro fixo. O centro de curvatura do lugar geométrico dos centros de carena para pequenos ângulos de banda é o METACENTRO TRANSVERSAL.

O METACENTRO TRANSVERSAL pode também ser definido como a posição limite para a qual tende a interseção do vetor empuxo como o vetor PESO quando a inclinação tende para zero.

- **Raio Metacêntrico**

RAIO METACÊNTRICO é a distância entre B e M. A razão deste nome decorre da própria definição do METACENTRO. Quando há possibilidade de confusão, deve-se escrever:

BM = raio metacêntrico

BM_L = raio metacêntrico longitudinal

Cálculo de BM (Raio Metacêntrico).

Os valores de BM (transversal e longitudinal) são dados pelas expressões:

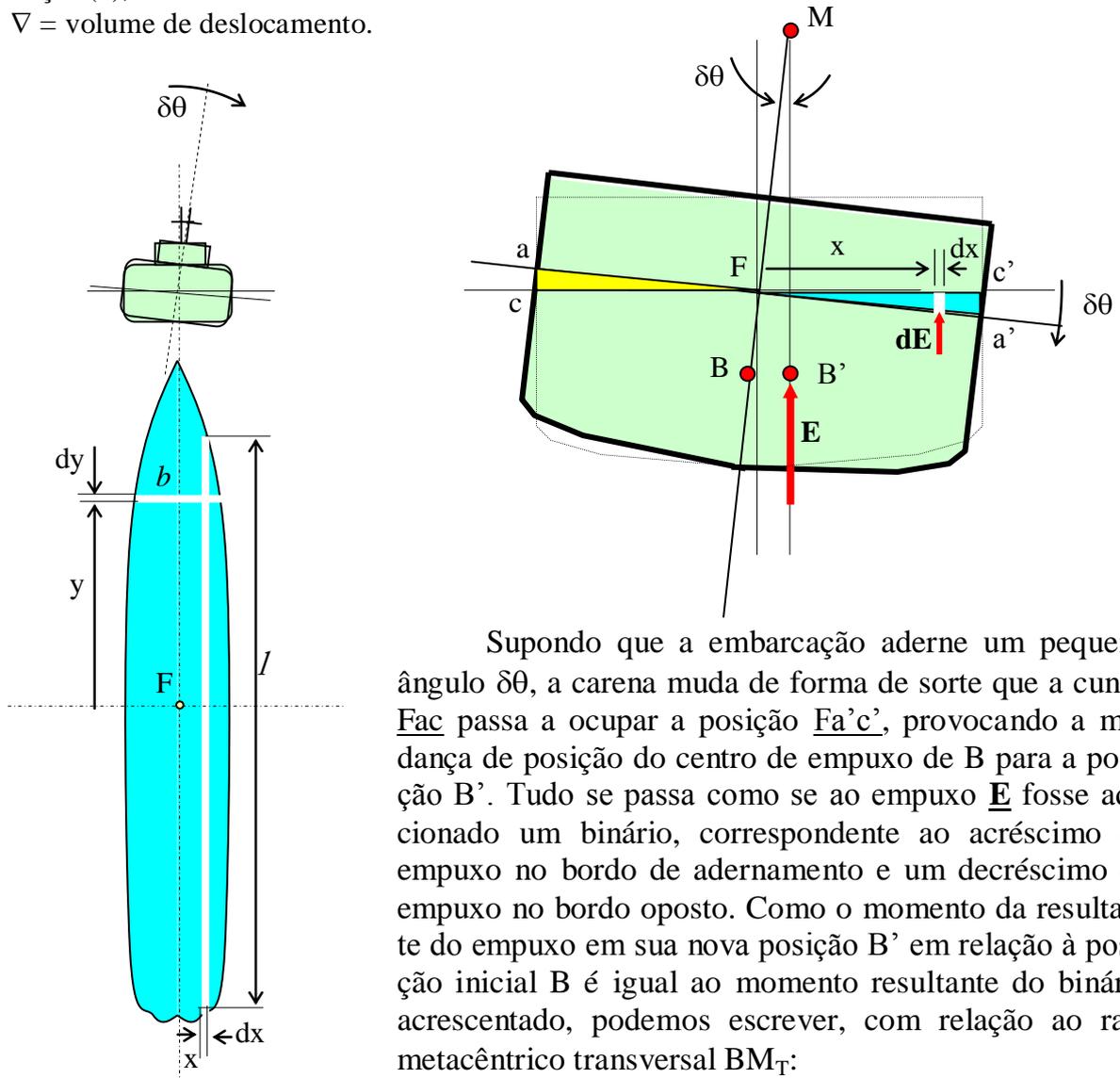
$$\mathbf{BM}_T = \mathbf{I}_{LC} / \nabla$$

$$\mathbf{BM}_L = \mathbf{I}_L / \nabla$$

onde I_{LC} = momento de inércia da área de linha d'água em relação à linha de centro longitudinal;

I_L = momento de inércia da área de linha d'água em relação ao eixo transversal passando pelo centro de flutuação (F);

∇ = volume de deslocamento.



Supondo que a embarcação aderne um pequeno ângulo $\delta\theta$, a carena muda de forma de sorte que a cunha Fac passa a ocupar a posição Fa'c', provocando a mudança de posição do centro de empuxo de B para a posição B'. Tudo se passa como se ao empuxo E fosse adicionado um binário, correspondente ao acréscimo de empuxo no bordo de adernamento e um decréscimo de empuxo no bordo oposto. Como o momento da resultante do empuxo em sua nova posição B' em relação à posição inicial B é igual ao momento resultante do binário acrescentado, podemos escrever, com relação ao raio metacêntrico transversal \mathbf{BM}_T :

Fig. 7 – Raio metacêntrico

$$E \cdot \mathbf{BM}_T \cdot \text{sen } \delta\theta = \int \rho g (l \, dx) x \cdot \text{tg } \delta\theta \cdot x$$

Levando em conta que $E = \rho g \nabla$ e que o ângulo $\delta\theta$ é pequeno (para o qual se pode tomar $\text{sen } \delta\theta = \text{tg } \delta\theta = \delta\theta$) teremos:

$$\nabla \cdot \mathbf{BM}_T = \int (l \, dx) x^2 = \int x^2 (dA) = \mathbf{I}_{LC}$$

A dedução feita para a determinação do raio metacêntrico transversal (\mathbf{BM}_T) pode ser repetida para se determinar a expressão para o raio metacêntrico longitudinal (\mathbf{BM}_L), admitindo que o navio sofra um pequeno ângulo $d\phi$ de compasso (trim), obtendo-se:

$$\nabla \cdot \mathbf{BM}_L = \int (b \, dy) y^2 = \int y^2 (dA) = \mathbf{I}_L$$

- **Altura Metacêntrica** é a distância vertical entre o centro de gravidade e o metacentro; em geral, para evitar confusão, usa-se:

\mathbf{GM} = altura metacêntrica;

GML = altura metacêntrica longitudinal.

Caso se conheça a posição vertical o centro de gravidade, pode-se escrever:

$$GM = KM - KG \text{ ou}$$

$$GM = KB + BM - KG$$

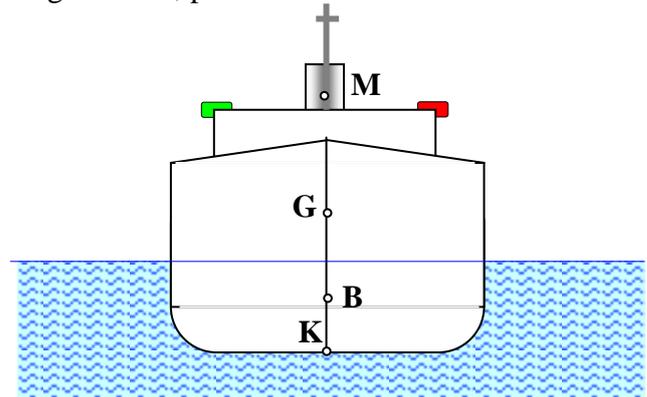


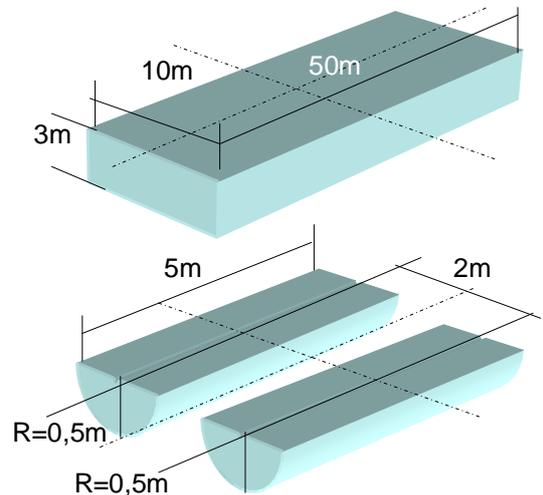
Fig. 8 – Altura Metacêntrica

A figura 8 ilustra esta situação. É aconselhável guardar esta relação, que será muito usada.

É importante não confundir *raio metacêntrico* e *altura metacêntrica*; o primeiro, BM, depende de propriedades geométricas de carena. A segunda GM, depende não só destas propriedades, como das condições de carregamento do navio.

No exemplo da barcaça em forma de caixa da Fig. 3(a):
 $KB = \frac{1}{2} H = \frac{1}{2} (3,0) = 1,5 \text{ m};$
 $BM_T = I_{LC} / \nabla = (LB^3/12) / \nabla = (50 \times 10^3/12) / 1500 = 2,78 \text{ m}$
 $BM_L = I_C / \nabla = (BL^3/12) / \nabla = (10 \times 50^3/12) / 1500 = 69,4 \text{ m}$
 $KM_T = 1,5 + 2,78 = 4,28\text{m}; \quad KM_L = 1,5 + 69,4 = 70,9 \text{ m}.$

No exemplo do flutuante Fig. 3(b):
 $KB = R - 4R/3\pi = 0,5 - 4(0,5) / 3\pi = 0,288 \text{ m}$
 $BM_T = I_{LC} / \nabla = 2[(5 \times 1^3/12) + 5 \times 1 \times 1^2] / 2 \times \frac{1}{2} (\pi^2/4) \times 5 = 2,76 \text{ m}$
 $BM_L = I_C / \nabla = 2(1 \times 5^3/12) / 2 \times \frac{1}{2} (\pi^2/4) \times 5 = 5,31 \text{ m}$
 $KM_T = 0,288 + 2,76 = 3,048 \text{ m}; \quad KM_L = 0,288 + 5,31 = 5,598 \text{ m}.$



3.3 – ESTABILIDADE DOS CORPOS FLUTUANTES

3.3.1. –Condições iniciais

Vimos que as condições para equilíbrio de uma embarcação são:

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0 & \Sigma M_x &= 0 \\ \Sigma F_y &= 0 & \Sigma M_y &= 0 \\ \Sigma F_z &= 0 & \Sigma M_z &= 0 \end{aligned}$$

No caso em consideração, as únicas forças que estão em cogitação são o peso do navio e as forças de pressão do líquido na carena.

As componentes de forças na direção do eixo y se anulam porque os 2 lados a carena em cada bordo do plano central são iguais, de modo que estas forças só agem no sentido de comprimir a carena. Uma consideração simples mostra que não há momentos com relação aos eixos y e z. Afirmção análoga pode ser feita com relação às forças que agem na direção do eixo x.

As forças verticais são o peso do navio Δ , aplicado em G, e o empuxo E, aplicado em B.

Como já vimos, o empuxo provém da ação das forças de pressão, sendo que as forças decorrentes da pressão atmosférica se anulam.

Enquanto o peso e o empuxo estiverem agindo na mesma vertical, a resultante será nula e não haverá momentos; daí pode-se ter o 1º CONCEITO sobre equilíbrio de embarcações:

- * “Para que uma embarcação esteja em equilíbrio, G e B devem estar na mesma vertical”.

3.3.2. – Condições adicionais

Uma vez estabelecida a condição anterior, vemos que, se o corpo for deslocado de sua posição de repouso, a condição para que volte à posição inicial é a existência de um CONJUGADO DE ENDIREITAMENTO, como no caso dos sólidos, visto no item 2.

No caso de um corpo totalmente imerso e em equilíbrio num fluido em repouso (como um balão suspenso no ar, ou um submarino mergulhado no mar) a condição que deve ser satisfeita para que o equilíbrio seja estável é que o centro de empuxo esteja acima do centro de gravidade.

Tal condição não ocorre no caso de um navio flutuando já que o centro de empuxo comumente se posiciona abaixo do centro de gravidade.

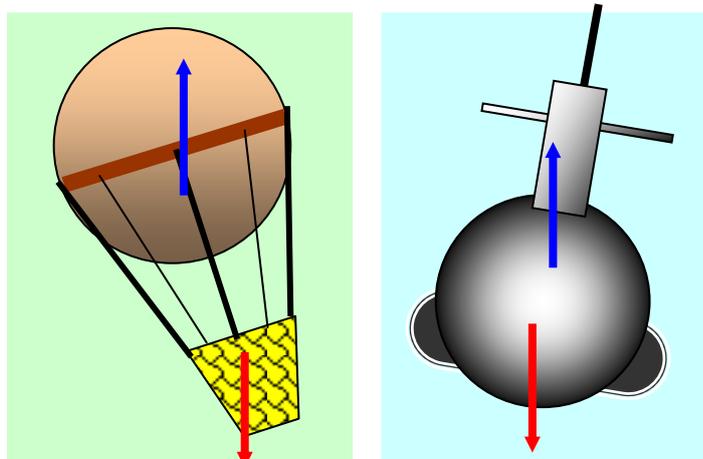


Fig. 9 – Corpo totalmente imerso

É o caso representado na figura 10(a). O navio cuja seção está traçada ali atuava inicialmente na linha d’água L.A; ele sofre uma banda pequena θ , de modo que a forma da carena é alterada e o centro de carena muda da posição inicial B para a posição B₁. O empuxo E e o peso Δ continuam agindo na vertical e formam um conjugado, cujo braço é GZ que tende a endireitar o navio, ou seja: fazê-lo flutuar novamente na linha d’água LA.

Como há um CONJUGADO DE RECUPERAÇÃO OU DE ENDIREITAMENTO na condição adernada vemos que o navio tem estabilidade positiva quando a banda é θ porque sua tendência é voltar para a posição de equilíbrio.

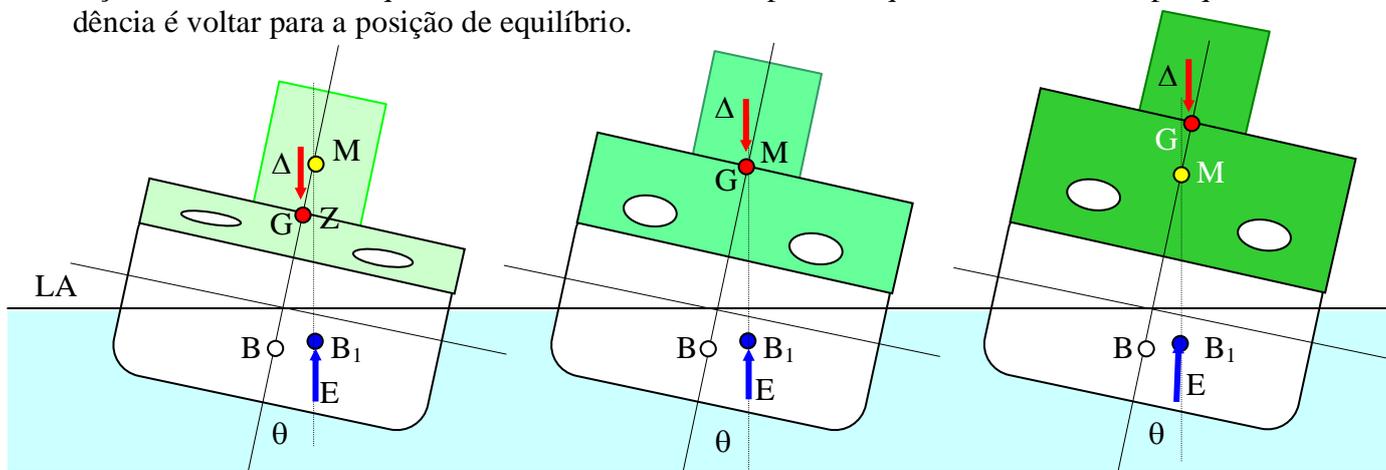


Fig. 10 – Equilíbrio de um corpo flutuante – (a) estável –(b) praticamente instável (c) instável

A Fig. 10(b) mostra um navio em posição mais alta para G, tal que o braço de endireitamento é nulo, logo o conjugado de recuperação é nulo. Qualquer pequena perturbação o tirará des-

sa posição. Já na Fig. 10(c) vemos um navio sem conjugado de endireitamento: as forças Δ e E formam um conjugado que tende a emborcar o navio ainda mais.

Verifica-se que os dois pontos que definem a existência ou não de conjugado de endireitamento positivo são G e M . Pode-se tirar a segunda condição para equilíbrio de corpos flutuantes:

** “Quando o METACENTRO está acima do centro de gravidade a embarcação é estável, para pequenos ângulos”. Diz-se que ela TEM ESTABILIDADE INICIAL.

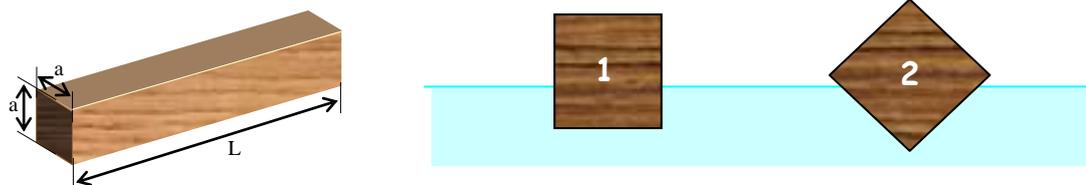
Se G estiver acima de M , a embarcação pode estar flutuando normalmente, mas, qualquer distúrbio que provoque uma alteração na posição de equilíbrio fará com que a mesma tome uma banda permanente. A embarcação adernará de modo tal que a forma da carena mude e a posição do METACENTRO passe a ser acima da posição do Centro de Gravidade. Trata-se de um navio flutuando em equilíbrio instável.

Destas condições adicionais podemos obter um conceito que deve ser guardado:

- Segundo conceito

Quando M está acima de G a altura metacêntrica é considerada positiva. Um navio estável tem altura metacêntrica positiva; se $GM = 0$ ou $GM < 0$, o navio é instável.

Tarefa: Mostre que uma barra homogênea, de seção quadrada, não poderá flutuar em água na posição (1) mostrada, adotando necessariamente a posição (2), caso sua densidade relativa esteja compreendida entre os valores 0,788 e 0,212.



Tratando-se de um navio, pode ser ele instável, quando flutuando em sua linha d'água normal, mas ser estável quando tiver uma certa banda. Neste caso o navio passa rapidamente de uma banda a BE para outra a BB: procura uma posição na qual M fique acima de G . Tal comportamento é uma indicação segura de falta de estabilidade quando o navio está flutuando sem banda.

3.3.3. – Conjugado de endireitamento (ou de recuperação)

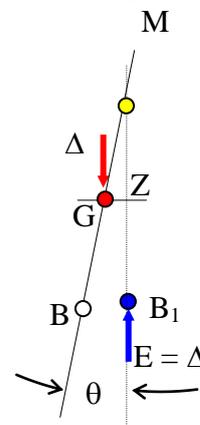
No caso dos navios estáveis, de formas usuais, a posição do METACENTRO para ângulos de até cerca de 7° ou 8° pode ser considerada constante. Nestas condições, a fig. 10(a) (detalhe repetido) mostra que o braço do conjugado de endireitamento é GZ ; da mesma figura vemos que:

$$GZ = GM \times \text{sen } \theta$$

De modo que o conjugado de endireitamento ou de recuperação é dado por:

$$\text{C.R.} = \Delta \times GM \times \text{sen } \theta$$

Ou: a estabilidade INICIAL para um deslocamento determinado é proporcional à altura metacêntrica.



No caso da estabilidade longitudinal, podemos dizer que as inclinações (longitudinais) quase sempre são pequenas; deste modo, o conjugado de endireitamento longitudinal é dado por:

$$C.R. = \Delta \times GM_L \text{ sen } \varphi$$

Sendo:

GM_L = altura metacêntrica longitudinal

φ = ângulo de inclinação longitudinal

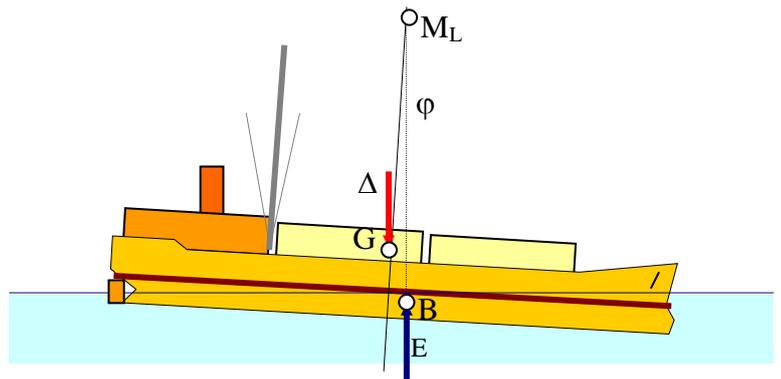


Fig.11 – Metacentro Longitudinal

3.3.4 – Conjugado emborcador

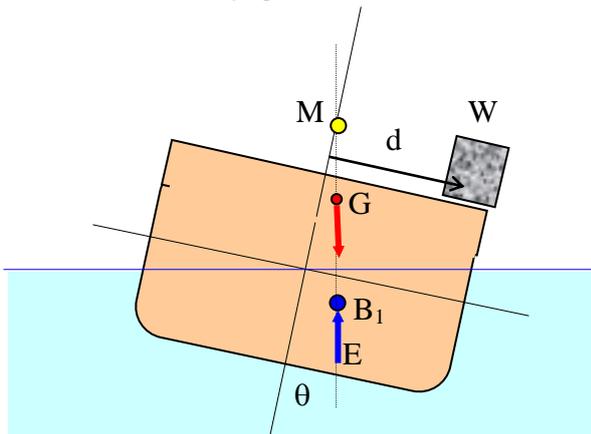


Fig.12– Conjugado emborcador

Se um navio estável fica em equilíbrio em posição adernada, há um CONJUGADO DE RECUPERAÇÃO OU DE ENDIREITAMENTO tentando fazê-lo retornar à posição de equilíbrio sem banda, cuja expressão foi vista acima. Logicamente, para que o navio permaneça com ângulo de banda, deve haver uma conjugado numericamente igual e oposto ao Conjugado de Recuperação; este outro conjugado é conhecido como CONJUGADO ENBORCADOR.

Podemos supor que o conjugado emborcador é provocado pelo deslocamento de um peso W a uma distância d. Como o navio toma uma inclinação, podemos ver da figura 12 que o conjugado emborcador é dado por:

$$C.E. = W \times d \times \cos \theta$$

Uma vez que ficou claro que os Conjugados Emborcador e de Endireitamento precisam ser iguais para que o navio permaneça com a banda θ , podemos escrever:

$$\Delta \times GM \times \text{sen } \theta = W \times d \times \cos \theta$$

Já para o caso de movimentação do peso no sentido longitudinal, teremos

$$\Delta \times GM_L \times \text{sen } \varphi = W \times d_L \times \cos \varphi$$

sendo: d_L = distância longitudinal na qual o peso foi deslocado.

A 1ª. Expressão acima é muito usada, inclusive nas experiências de inclinação, como veremos posteriormente.

No caso de inclinações longitudinais, os ângulos em geral não excedem 1 ou 2 graus. Nestas condições vimos (na apresentação das curvas hidrostáticas) que é mais usual determinar o conjugado conhecido como MOMENTO PARA ALTERAR O TRIM de 1cm (ou 1 polegada): MT1

Da segunda expressão acima obtemos:

$$W \times d_L = \Delta \times GM_L \times \text{sen } \varphi / \cos \varphi = \Delta \times GM_L \times \text{tg } \varphi$$

Como estamos tratando de um momento que irá alterar o trim de 1cm, a $\text{tg } \varphi$ é dada por: $\text{tg } \varphi = (1\text{cm}) / L$, se L for medido em cm já que a tangente precisa ser um numero adimensional. É razoável colocar o comprimento L em metros e o trim em cm, de modo que a expressão passa a ser: $\text{tg } \varphi = 1 / 100 L$

Feitas estas conversões, verificamos que a expressão do MT 1 passa a ter a forma já conhecida quando são usadas as unidades do sistema métrico "técnico".

$$MT\ 1 = W \times d_L = \Delta \times GM_L / 100 \times L$$

É importante observar a diferença que se encontra caso se usem unidades inglesas. Neste caso, ou seja usando o "sistema inglês", a expressão de MT 1'' (momento para alterar o trim em 1 in) será: $tg\ \phi = 1'' / L$, se L for medido em polegada. Como L é geralmente medido em pés, a tg ϕ deve ser adimensional e $1'' = 12''$, a expressão para MT 1'' é:

$$MT\ 1'' = \Delta \times GM_L / 12 \times L$$

É necessário lembrar que, neste caso, Δ é medido em toneladas (longas), GM_L e L são medidos em pés.

No exemplo da barçaça em forma de caixa da Fig. 3(a):

$$MT\ 1 = \Delta \times GM_L / 100 \times L$$

Supondo que o CG da barçaça carregada esteja a uma altura $KG = 2,0$ m (metade do pontal), sendo $\Delta_D = 1500$ tf. e como

$$KB = \frac{1}{2} H = \frac{1}{2} (3,0) = 1,5\text{ m};$$

$$BM_L = I_C / \nabla = (BL^3/12) / \nabla = (10 \times 50^3/12) / 1500 = 69,4\text{ m}$$

$$KM_L = 1,5 + 69,4 = 70,9\text{ m}, \text{ e } GM_L = 70,9 - 2,0 = 68,9\text{ m}.$$

$$MT1 = 1500 \times 68,9 / 100 \times 50 = 20,7\text{ tf} \times \text{m} / \text{cm}$$

No exemplo do flutuante Fig. 3(b):

$$MT\ 1 = \Delta \times GM_L / 100 \times L$$

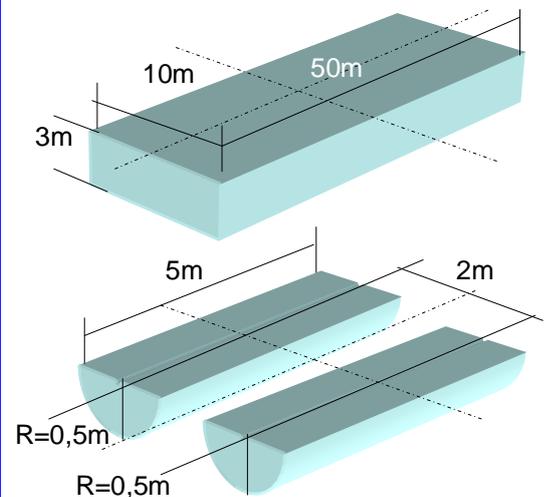
Supondo que o CG do flutuante e sua carga esteja a uma altura $KG = 2,0$ m (depende da altura h), sendo $\Delta_S = 4.029$ kgf. e como

$$KB = R - 4R/3\pi = 0,5 - 4(0,5) / 3\pi = 0,288\text{ m}$$

$$BM_L = I_C / \nabla = 2(1 \times 5^3/12) / 2 \times \frac{1}{2} (\pi \cdot 1^2/4) \times 5 = 5,31\text{ m}$$

$$KM_L = 0,288 + 5,31 = 5,598\text{ m} \text{ e } GM_L = 5,598 - 2,0 = 2,598\text{ m}$$

$$MT1 = 4029 \times 2,598 / 100 \times 5,0 = 20,93\text{ kgf} \times \text{m} / \text{cm}$$



3.4 - DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO VERTICAL DO CENTRO DE GRAVIDADE

3.4.1 – Importância da determinação

Os dois exemplos vistos, quando se utilizou a equação: $GM = KB + BM - KG$, mostram como é fundamental que se estabeleça a posição de G para que se conheçam as características da estabilidade inicial de um corpo flutuante.

Para conhecer o GM já vimos como determinar KB e BM; resta saber como conhecer KG, o que será objeto deste item.

De um modo geral pode-se afirmar que existem 2 métodos para estabelecer valores de KG: pelo cálculo e por meio de uma experiência conhecida como Experiência de Inclinação.

O cálculo é efetuado em qualquer projeto de navio novo, ou em estudos de grandes modificações.

A Experiência de Inclinação é realizada nos navios que estão em construção e já se acham quase prontos. Quando há uma série de navios idênticos, construídos no mesmo estaleiro, muitas vezes só é efetuada a experiência no primeiro navio da série. Após grandes modificações efetuadas em navios já existente a Experiência de Inclinação é extremamente necessária.

Para qualquer navio existente é possível efetuar a experiência de inclinação. Deve-se observar que é conveniente efetuar esta experiência desde que paire qualquer dúvida sobre as características de estabilidade de qualquer navio.

3.4.2 – Cálculo da posição do centro de gravidade

- Princípio básico

Quando um navio está sendo projetado é possível obter de seus desenhos o peso e a posição (vertical e longitudinal) do centro de gravidade de cada componente previsto no projeto. Assim sendo, no caso da estrutura, por exemplo, poderá ser efetuada uma verificação de cada elemento componente, de seu peso, e da posição do centro de gravidade de cada elemento.

$$KG = \frac{\sum p_i \times z_i}{\sum p_i}$$

Os produtos do peso de cada elemento pela distância ao plano de base (ou à seção mestra) darão os momentos estáticos verticais (ou longitudinais) destes pesos. Depois de consignados todos os elementos, são somados os pesos, obtendo-se o chamado DESLOCAMENTO LEVE. A seguir, são somados os momentos verticais e longitudinais destes pesos. Dividindo-se o somatório dos momentos verticais dos pesos pelo deslocamento leve, obtém-se a posição do centro de gravidade no navio leve, acima do plano de base, ou seja, KG.

O quociente do somatório dos momentos longitudinais dos pesos pelo deslocamento leve dará a posição longitudinal do centro de gravidade do navio leve com relação à seção mestra, ou seja: LCG.

É claro que a escolha das referências para o cálculo dos momentos fica a critério do calculista; é comum usar o plano de base para cálculos de momentos verticais porque o resultado já será o KG; quanto aos momentos longitudinais, usa-se com frequência a seção mestra, porque neste caso são empregados números menores, mas por outro lado, é preciso ter sempre em mente que haverá braços de momento positivos, a vante da seção mestra e braços negativos a ré da mesma. É claro que poderia ser usada como referência uma posição extrema do navio e todos os momentos teriam o mesmo sinal; após a determinação da posição longitudinal do centro de gravidade com relação a esta extremidade, a mesma seria convertida em L.C.G. com relação à seção mestra.

3.4.3 – Comentários

Após a descrição do método usado para o cálculo da posição do centro de gravidade o leitor deve tê-lo identificado com o mesmo método usado para determinar a posição do centro de gravidade de qualquer conjunto ou sistema formado de grande número de componentes.

Como primeiro exemplo seja calcular a posição vertical do CG do flutuante apresentado na fig. 3.b, supondo que sua carga seja um bloco homogêneo de altura $h = 2,0\text{m}$. Dos valores adotados (pág. 5):

Item	Identificação	Peso (kgf)	Altura KG(m)	Momento $P \times KG$ (kgfxm)
1	Cilindro BE	269,5	0,500	134,75
2	Cilindro BB	269,5	0,500	134,75
3	Pranchão Convés	510,0	1,020	520,2
4	Carga W	2.980	2,040	6079,2
Total	Flutuante + Carga	4.029	1,705	6868,9

Teremos portanto:

$$KB = R - 4R/3\pi = 0,5 - 4(0,5)/3\pi = 0,288 \text{ m}$$

$$BM_T = I_{LC} / \nabla =$$

$$= 2[(5 \times 1^3/12) + 5 \times 1 \times 1^2] / 2 \times \frac{1}{2} (\pi \cdot 1^2 / 4) \times 5 = 2,76 \text{ m}$$

$$KM_T = 0,288 + 2,76 = 3,048 \text{ m};$$

$$GM_T = 3,048 - 1,705 = 1,343 \text{ m}$$

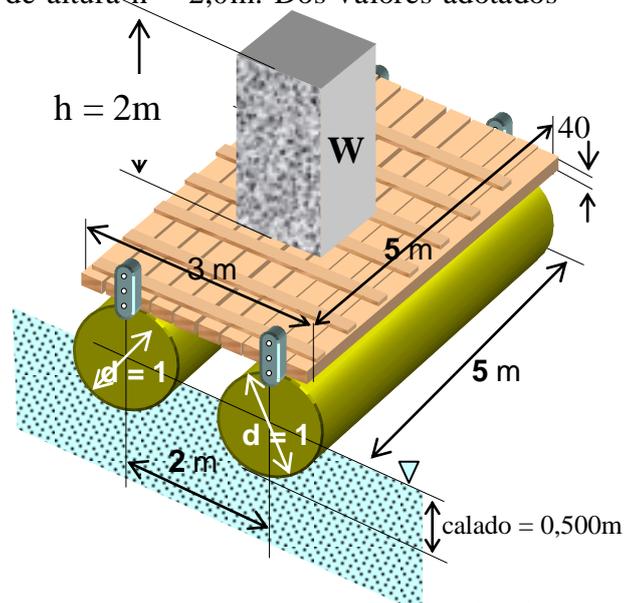


Fig. 3 b - Flutuante (bis)

Uma vez que o navio é composto de um número enorme de itens pode-se imediatamente focalizar as dificuldades inerentes a este cálculo. Por esta razão, alguns autores são um tanto céticos quanto ao resultado desses cálculos. É certo que algumas dessas opiniões são procedentes, mas o cálculo de pesos e da posição de KG e de LCG é por demais importante, razão pela qual são feitos os comentários seguintes.

É preciso não esquecer porém as limitações do cálculo de peso, entre as quais pode-se mencionar as seguintes:

- o calculista faz um elenco enorme de itens, de modo que poderá esquecer itens pertinentes e relevantes sem se aperceber, o que limitará a qualidade do cálculo;
- o calculista baseia seu trabalho em valores teóricos dos pesos das chapas, perfilados, equipamentos, etc.; na prática, estes pesos são diferentes dos valores reais por várias razões, de modo que, na construção, tanto o peso quanto a posição do centro de gravidade serão diferentes;
- a quantidade de cálculos a efetuar é enorme, de modo que a possibilidade de erro é grande, embora se possa dispor de programas de cálculos por planilhas (EXCEL).

Apesar das limitações acima, e de outras que podem ser apontadas, o cálculo do peso é muito necessário, ou até mesmo IMPRESCINDÍVEL. Ele deverá ser de preocupação constante do projetista desde as fases iniciais do projeto até o final da construção.

Para alguns tipos de estruturas ou máquinas, o conhecimento do peso e da posição do centro de gravidade pode ser importante mas não imprescindível. No caso do navio, porém, nós já vimos que não há condições de se encarar um navio sem estabilidade como algo aceitável; já vimos também que, para um conhecimento das características de estabilidade inicial é preciso conhecer o GM, e, para tanto, é necessário estabelecer a posição do centro de gravidade do navio, daí ser necessário efetuar o cálculo.

É verdade que a Experiência de Inclinação dará uma indicação bastante precisa da posição de G, mas esta experiência só é efetuada após estar o navio com sua construção bastante avançada, de modo que não há como alterar algumas características que poderiam melhorar a estabilidade, o que pode e deve ser feito, caso o cálculo de peso indique valores inadequados de KG ou LCG.

3.4.4 – Experiência de Inclinação

1. – Introdução

Já foi dito que, além do cálculo, é possível determinar a posição do centro de gravidade por meio de uma experiência. Vimos também que esta experiência é efetuada em navios em construção, ou após grandes alterações, quando os mesmos já estão em uma fase adiantada da obra. Geralmente a experiência é feita na fase de acabamento. Vimos também que navios prontos podem sofrer a experiência de inclinação, sempre que se tornar necessário verificar suas condições de estabilidade.

Vamos agora apreciar, rapidamente, qual a teoria por trás da experiência e como é ela efetuada.

2. – Teoria

Vimos que um navio com estabilidade positiva, adernado de um ângulo θ , tem um conjugado de recuperação dado por:

$$CR = \Delta \times GM \times \text{sen}\theta$$

Caso a banda do navio seja provocada pelo deslocamento de um peso W , movido transversalmente da distância d , como na Fig. 12, o conjugado de emborcamento será dado por:

$$CE = W \times d \times \text{cos}\theta$$

O ângulo de equilíbrio será alcançado quando:

$$CR = CE, \text{ ou seja, quando: } \Delta \times GM \times \sin\theta = W \times d \times \cos\theta$$

$$GM = W \times d / \Delta \times \operatorname{tg} \theta$$

Pode-se, então, deslocar um peso conhecido de uma distância determinada, medir o ângulo de equilíbrio e, por meio da equação acima, estabelecer GM. Como o calado do navio é conhecido, é possível estabelecer Δ e KM das Curvas Hidrostáticas; Δ é usado na equação acima e KM é combinado com GM para ser estabelecido o valor de KG do navio nas condições da experiência.

A experiência consiste, pois, em usar um certo peso W, deslocá-lo a bordo do navio de uma distância d, e medir, por meio de um sistema de pêndulos, a $\operatorname{tg} \theta$; com a equação acima obtém-se o valor de GM.

3. – Execução

Para a Experiência de Inclinação há necessidade, em geral, de três fases distintas: preparação, execução e cálculos dos valores e análise dos resultados.

A preparação é necessária para que se possa efetuar a experiência com sucesso, sem ser necessário repeti-la; a experiência é muito simples, a teoria em que se baseia extremamente acessível (com vimos), mas requer o emprego de mão de obra do estaleiro, uso de guindaste, preparação de pesos e outros materiais e a paralisação de operações no cais de acabamento e do próprio navio. Isto tudo representa custo, de modo que é necessário aproveitar a oportunidade.

Os seguintes passos são sugeridos para a preparação:

1º - Leitura cuidadosa de instruções detalhadas para realização de experiência de inclinação; na Marinha do Brasil há instruções da Diretoria de Engenharia Naval.; alguns livros de Arquitetura Naval apresentam instruções bastante detalhadas.

2º - Escolha do local onde será efetuada a experiência: deve ser abrigado, não sujeito a ventos e marolas, e, sempre que possível, equipado com guindaste para a movimentação de pesos. O ideal é efetuar a experiência dentro de um dique.

3º - Estudar os planos do navio (e o próprio navio) para estabelecer onde serão colocados os pêndulos (com prumos e cubas) que servirão para indicar o ângulo de banda a ser medido.

4º - Resolver quantos pêndulos serão usados e suas localizações; sempre que possível deverão ser usados um AV, um a ré, e outro a meio navio.

5º - Estabelecer qual o meio para fazer a leitura de calado; esta leitura é da maior importância, uma vez que será usada para estabelecer as características hidrostáticas do navio (Δ e KM).

6º - Estabelecer como será determinada a densidade da água em que flutua o navio.

7º - Estabelecer como serão efetuadas as comunicações entre o pessoal que guarnecerá cada um dos pêndulos, guindaste, movimentação de pesos, etc.

8º - Estudar os cálculos já existentes do navio para estimar qual a ordem de grandeza dos pesos a serem usados; de modo geral, procura-se obter uma inclinação cerca de 1,5° a 3°. Procura-se, portanto, estabelecer um valor aproximado de GM, calcula-se a $\operatorname{tg} 3^\circ$ e verifica-se qual a ordem de grandeza do peso W e da distância d (que não deve exceder ¼ da boca).

9º - Procurar estabelecer qual o comprimento mais adequado para cada pêndulo, de modo que seu deslocamento lateral permita a determinação da $\operatorname{cotg} \theta$. Cada pêndulo será dotado de um peso razoável instalado na sua extremidade, sendo que este peso se desloca em uma cuba cheia de óleo, que servirá para amortecer o movimento do pêndulo, abreviando o tempo para a obtenção da leitura. Assim sendo, deverão ser previstas a obtenção de pêndulos, cubas, escalas de aço, etc., para efetuar as medidas que determinarão $\operatorname{tg} \theta$.

10º - Estabelecer a sistemática para a determinação EXATA de todos os itens que estarão a bordo do navio por ocasião da experiência de inclinação.

11º - Estabelecer se haverá a bordo tanques com superfície livre, e procurar, tanto quanto possível, eliminá-las na ocasião da experiência.

12º - Estabelecer como serão medidos os pesos que serão deslocados lateralmente para provocar a banda.

13º - Estabelecer as normas para a divulgação de todos os detalhes da prova para todos aqueles envolvidos na prova.

Como dissemos após a preparação há necessidade de executar a prova, discutir os resultados e aplicar os valores obtidos.

4 – Comentário Final

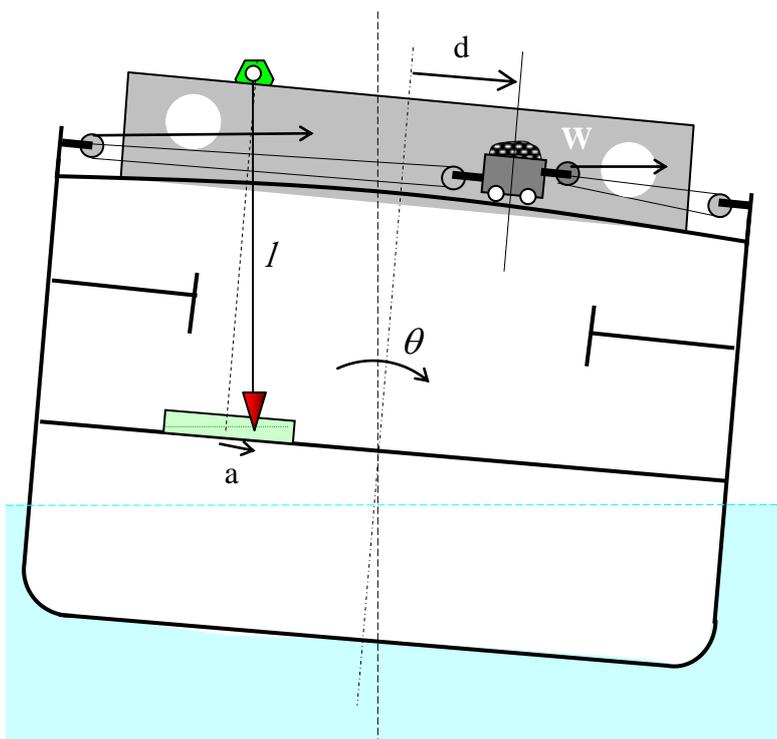
Desde o princípio deste item verificou-se que seria necessário determinar KG para se obter GM por meio da expressão.

$$GM = KM - KG$$

Posteriormente viu-se que há um meio de determinar diretamente o valor de GM, através da Experiência de Inclinação. Poder-se-ia julgar que é inútil toda a preocupação com a determinação de KG por meio de cálculo uma vez que a experiência dá diretamente o valor de GM.

Acontece que da experiência obtem-se o valor do GM para uma certa condição de carga e apenas uma; o que importa, na realidade, é determinar uma posição exata de KG, para a condição de carregamento do navio no momento da experiência. Após ser obtida a posição de G com exatidão, pode-se calcular qualquer outra posição, desde que sejam conhecidos os pesos acrescentados e retirados de suas respectivas posições: KGi e LCGi.

Por esta razão vemos que o propósito da experiência de inclinação é a obtenção de KG e não de GM. Pela mesma razão fica clara a necessidade de que a condição EXATA DO CARREGAMENTO DO NAVIO na ocasião da experiência fique estabelecida com rigor. Sem este conhecimento exato não será útil a determinação de KG, porque não se saberá para qual condição de carregamento do navio foi estabelecido. É muito importante esta observação. A Experiência de Inclinação só dará resultados passíveis de uso ao longo da vida do navio quando ela fornecer o valor de KG para UMA CONDIÇÃO DE CARREGAMENTO muito bem definida. Caso contrário a experiência dará apenas um valor de GM para uma condição de carregamento inespecífica, o que não tem grande valor.



Como exemplo, vamos supor que o navio de 245 pés de comprimento, 40 ft de boca e 19 ft de pontal, cujas curvas hidrostáticas são mostradas às fls. __, seja submetido à experiência de inclinação na condição leve, em dique de mar abrigado, flutuando sem trim ou banda, com um **calado de 8 pés**.

Para tal condição extrai-se das curvas hidrostáticas:

$$\Delta = 1360 \text{ ton}; KM = 10,5 \times 2 = 21 \text{ ft.}$$

Estimando uma altura para KG de cerca de 70% do pontal = 13ft, teríamos $GM_e = 21 - 13 = 8\text{ft}$. Assumindo uma distância d para o deslocamento do peso de cerca de 10ft (1/4 da boca), e um ângulo $\theta = 2^\circ$, pode-se estimar o valor do peso W a ser operado:

$$W_e = GM_e \Delta \operatorname{tg} \theta / d = 8 \times 1360 \times 0,0349 / 10 = 38 \text{ ton.}$$

Admitindo que se tenha adotado o peso $W = 38$ ton, que seja deslocado para BB de 10 ft e que se obtenha as medidas apresentadas na tabela abaixo:

Pêndulo	Localização	Comprimento (in)	Deslocamento horizontal (in)	tg θ	θ (°)
1	AV, a BE	120	3,6	0,0300	1,72
2	a meio navio	158	5,1	0,0323	1,85
3	AR, a BB	180	5,7	0,0317	1,82
Médias	x	x	x	0,0313	1,79

Dos valores calculados tiramos: $GM_{Leve} = W \times d / \Delta_L \text{ tg } \theta = 38 \times 10 / 1360 \times 0,0313 = 8,9$ ft

$$KG_{Leve} = 21 - 8,9 = 12,1 \text{ ft.}$$

O conhecimento deste valor permitirá a determinação de KG para outras condições de carregamento.

3.5 – ESTABILIDADE TRANSVERSAL

3.5.1 – INTRODUÇÃO

Até agora verificamos as características de estabilidade inicial do navio e estabelecemos o conceito de que o indicador da estabilidade a pequenos ângulos (até cerca de 8°) é a altura metacêntrica GM.

É claro, porém, que tanto os engenheiros quanto os utilizadores do navio não podem se satisfazer apenas com as características de estabilidade inicial. É preciso saber qual o comportamento do navio, sob o aspecto da estabilidade, quando os ângulos de banda são grandes.

Sabemos que, nestas condições ($\theta > 7^\circ$ ou 8°), o metacentro não tem mais “posição fixa”; a forma submersa da carena varia bastante, de modo que a posição de M também varia com θ , sendo preciso estabelecer métodos de cálculo para determinar o conjugado de recuperação quando θ é grande. Este é o assunto que será apreciado agora.

- Curva de estabilidade

De modo geral, a forma de representar as características de estabilidade de um navio a grandes ângulos de inclinação é através de curvas cujas abscissas representam os ângulos de banda (θ) e as ordenadas o **Braço do Conjugado de Endireitamento**. Podem ser traçadas várias curvas de estabilidade de um mesmo navio, variando-se valores de deslocamento e de KG.

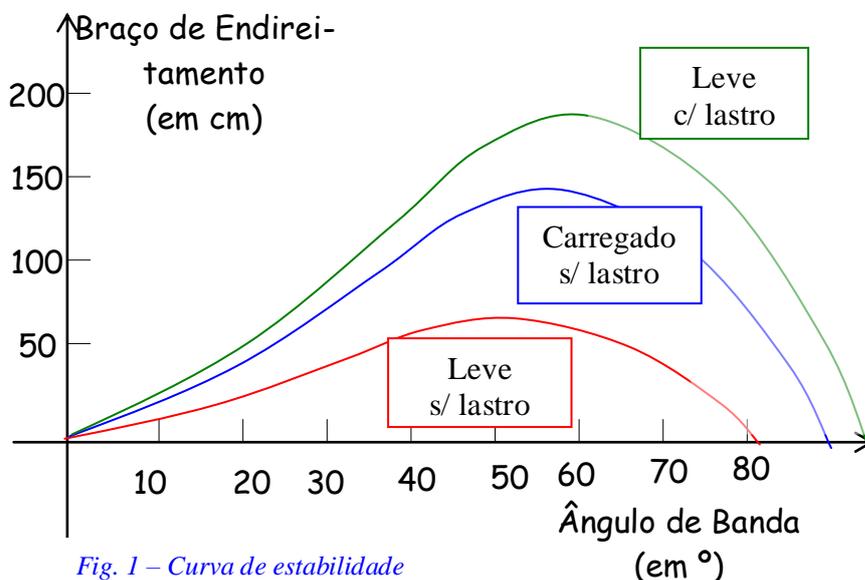
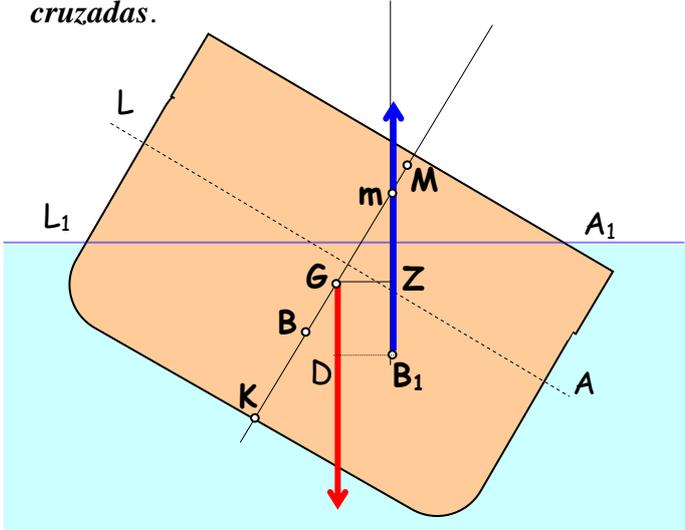


Fig. 1 – Curva de estabilidade

Os métodos para obtenção destas curvas serão analisados a seguir; alguns deles dão valores aproximados, havendo, porém, um método de cálculo que é geral, chamado *método das curvas cruzadas*.



Vimos que quando um navio está com banda grande, como mostra a fig. 2 a nova linha d'água L_1A_1 não cruza a linha d'água correspondente à flutuação sem banda (LA) no plano de simetria; além disso, os vetores referentes ao EMPUXO na condição de flutuação sem banda e com banda não se cruzam mais no METACENTRO INICIAL, M , mas em outro ponto m , de modo que o braço do conjugado de endireitamento GZ **não é mais:**

$$GZ = GM \times \text{sen } \theta.$$

Fig. 2– Navio com banda elevada

3.5.2 – Curvas Cruzadas de Estabilidade

O método mais divulgado para a abordagem do problema da estabilidade a grandes ângulos é o das “Curvas Cruzadas”, também conhecidas como “Curvas Isóclinas”.

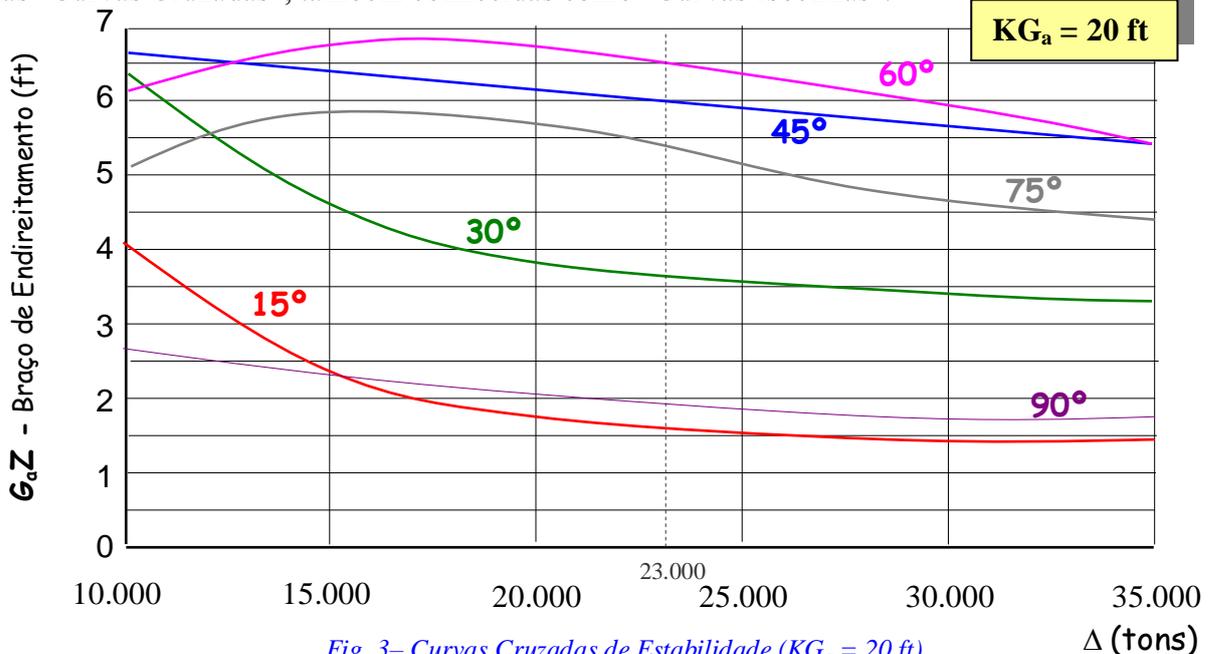


Fig. 3– Curvas Cruzadas de Estabilidade ($KG_a = 20 \text{ ft}$)

Para a obtenção destas curvas são usadas as Balizas já empregadas no Plano de Linhas e Regras de Integração já discutidas. A REF (C) tem uma explicação detalhada do assunto.

Em primeiro lugar, deve-se selecionar alguns valores de deslocamento (conseqüentemente de calado) e de ângulos de banda para os quais serão calculados os BRAÇOS DE ENDIREITAMENTO.

Os ângulos poderão ser, por exemplo, 10° , 15° , 30° , 45° , 60° , 75° etc.

Para cada ângulo são escolhidos cerca de 5 ou 6 calados para o cálculo de GZ . De modo geral procura-se uma faixa tal que abranja os valores de deslocamento passíveis de serem encontrados na operação do navio.

Considera-se que o Centro de Gravidade do navio está numa certa posição assumida (G_a); pode ser, por exemplo, a posição G mostrada na FIG 2. Quando o navio está com banda, a parte da baliza que está imersa é aquela abaixo da linha d'água L_1A_1 .

Usa-se como referência um plano vertical longitudinal passando pela posição G adotada arbitrariamente para o centro de gravidade. O traço deste plano é a reta GD.

- Para cada valor de ângulo de banda determina-se:

- (a) uma curva de áreas de balizas com relação ao comprimento do navio;
- (b) uma curva de momentos estáticos das balizas com relação ao plano de referência GD.

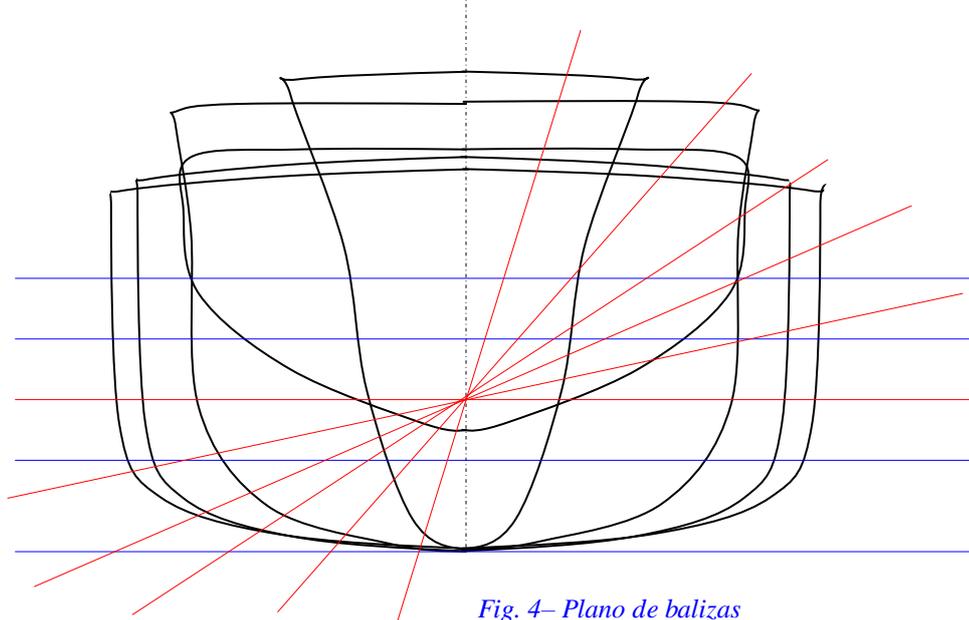


Fig. 4– Plano de balizas

As duas curvas são traçadas com relação ao comprimento do navio.

As áreas sob as duas curvas acima darão o volume de deslocamento sob a linha d'água inclinada e o momento deste volume com relação ao plano de referência GD. O resultado da divisão do momento pelo volume dará a distância do Centro de Carena ao plano de referência.

Esta distância é exatamente $B_1D = GZ$, isto é, o braço de endireitamento do conjugado de recuperação do navio no deslocamento estabelecido e no ângulo de banda (θ) para os quais o cálculo foi feito e para a posição do Centro de Gravidade que foi adotada arbitrariamente.

Repete-se a mesma operação acima para todos os valores de deslocamento que foram previamente selecionados.

Pela descrição efetuada vê-se que cada cálculo realizado fornecerá os seguintes resultados: um valor de braço de endireitamento GZ para um valor de Δ em cada inclinação θ , em função de certa posição adotada arbitrariamente para G.

Nestas condições, pode-se efetuar uma representação gráfica dos braços de endireitamento em função do deslocamento, para valores constantes de θ , obtidos com a posição assumida G_a , como mostra a figura 3. Estas são as Curvas Cruzadas de Estabilidade. Estas curvas também são chamadas curvas isóclinas porque os valores de braços de endireitamento são obtidos em função de Δ , para valores constantes da inclinação.

Trata-se de uma informação muito valiosa para o navio. Com auxílio destas curvas será possível traçar curvas de estabilidade para qualquer condição de carga e posição do centro de gravidade do navio.

Dificuldades que cercam a obtenção das CURVAS CRUZADAS

A preparação das Curvas Cruzadas é de grande importância para o conhecimento do navio, mas há algumas dificuldades para sua obtenção; a maior delas reside na grande quantidade de cálculos.

Suponhamos que se queira obter uma curva como a da Fig. 3 com seis (6) valores de banda; para cada valor de θ serão necessários 6 deslocamentos diferentes, o que representa um total de 36 pontos. Desde que cada ponto é obtido como descrito, haverá necessidade de determinar 10 áreas de seções e seus respectivos momentos estáticos; isto significa que será necessário obter 360 áreas de balizas e 360 momentos estáticos.

Deve-se observar que não há necessidade de ser traçada efetivamente a curva de áreas de seções e a curva de momentos; basta que se faça a integração das áreas e a dos momentos, dividindo-se os resultados. Certos calculistas traçam as curvas de áreas de momentos para detectar algum cálculo errado que possa ser mostrado pela forma da curva, mas este procedimento não é necessário.

3.5.3 – Uso de Instrumentos e computadores para a obtenção das CURVAS CRUZADAS

Caso se disponha de um planímetro ou de um integrador, as áreas de cada baliza e seus momentos (para cada θ e cada Δ) podem ser obtidas por meio destes instrumentos. Caso negativo, estes valores deverão ser obtidos por cálculos.

Desde que a obtenção das curvas cruzadas exige muitos cálculos, torna-se claro que há campo para uso de computador. De fato, existem alguns programas de computador elaborados especificamente com o propósito de se obter curvas cruzadas. É necessário que se tomem as precauções já mencionadas para os outros campos onde o computador se aplica:

1º) Verificar se há disponibilidade de “Manual do Programa” descrevendo as características básicas do mesmo: qual a teoria usada na elaboração do programa, para que tipo de carena o programa foi desenvolvido, se há limitações do programa, etc.;

2º) Qual a natureza e o formato de apresentação dos dados de entrada e dos resultados obtidos;

3º) Quais os limites de aplicação que o programa exige tal como faixa de valores de deslocamento e ângulos de banda;

4º) Como o programa leva em consideração os limites de estanqueidade do casco, etc.

Caso seja usado um programa inadequado para certo tipo de navio, os resultados podem ser desastrosos.

3.5.4 – CORREÇÃO PARA A POSIÇÃO EXATA DO CENTRO DE GRAVIDADE

Já vimos que todos os cálculos para a determinação das curvas cruzadas são baseados na hipótese de que o centro de gravidade do navio está numa posição assumida arbitrariamente (G_a).

Supondo que as curvas cruzadas da fig. 2 correspondam a um $KG_a = 20$ ft, para um deslocamento de, por exemplo 23.000 ton, obteríamos das curvas os valores:

$$\theta = 15^\circ, GZ = 1,6'; \theta = 30^\circ, GZ = 3,6'; \theta = 45^\circ, GZ = 6,0'; \theta = 60^\circ, GZ = 6,5'; \theta = 75^\circ, GZ = 5,3'; \theta = 90^\circ, GZ = 1,9'.$$

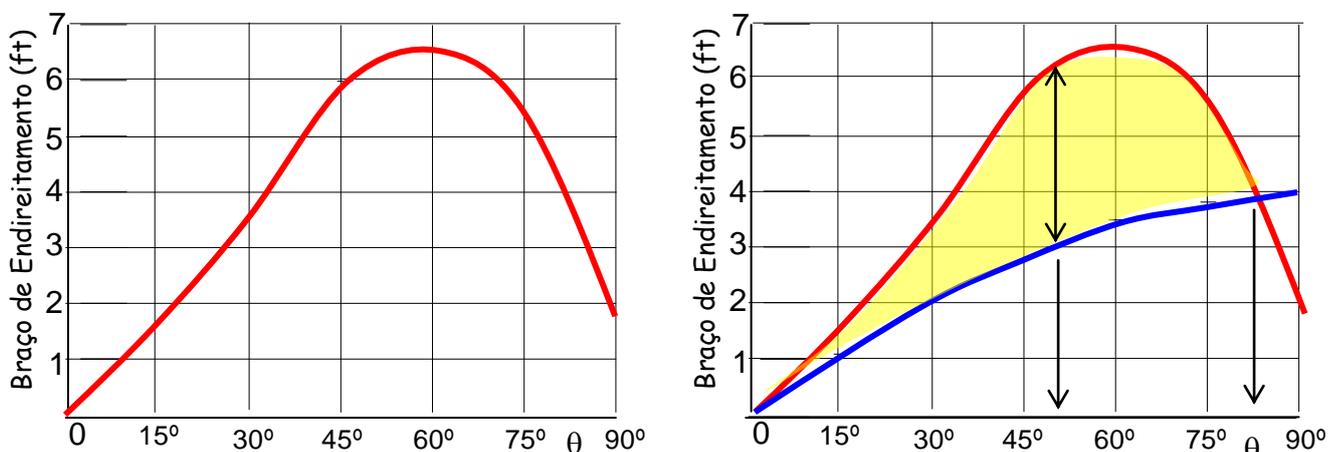


Fig. 5– (a) Curva de Estabilidade ($\Delta=23000t - KG_a = 20$ ft);

(b) Correção para $KG = 24$ ft

Após serem obtidos os valores do braço de endireitamento GZ , é preciso corrigir este valor para a posição exata do centro de gravidade caso este centro no navio real não esteja na posição adotada para o cálculo, como é o caso mais frequente.

Considerando a figura 6, temos:

LA – linha d’água antes da banda

L_1A_1 – linha d’água após a banda

θ – ângulo de banda

G_a – posição adotada arbitrariamente para o centro de gravidade para o cálculo das Curvas Cruzadas.

G – posição real do centro de gravidade na condição de carregamento do navio.

O valor que se obtém das Curvas Cruzadas, uma vez conhecido o deslocamento é $G_a Z_a$, mas sabendo que a posição exata do centro de gravidade é G , vê-se que o braço de endireitamento na realidade é GZ , e não $G_a Z_a$; da figura ao lado vê-se que:

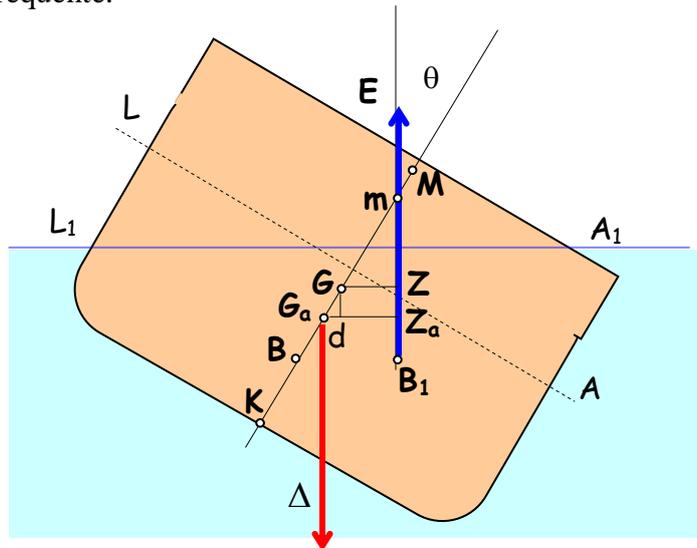


Fig. 6– Correção devido à posição de G

$$GZ = G_a Z_a - Gd \text{ ou seja, } GZ = G_a Z_a - (G G_a \times \text{sen } \theta)$$

Conhecendo-se a altura do centro de gravidade do navio acima da posição adotada, a obtenção do braço de endireitamento real é fácil. Observe-se que, se a posição exata do centro de gravidade real for abaixo da posição adotada, a correção será positiva.

Na fig. 5 (b) é mostrada a correção feita para a curva de estabilidade supondo que a altura real do CG do navio fosse $KG = 24$ ft, e não 20 ft como assumido para a elaboração das curvas cruzadas. No gráfico observa-se que o máximo ângulo de banda será em torno de 87° , que o máximo braço de endireitamento será de cerca de 2,2 ft, ocorrente quando a banda for em torno de 50° .

Para evitar possíveis enganos, alguns calculistas adotam a posição arbitrária do centro de gravidade em K , na linha de base. O eixo de referência para todos os cálculos passa a ser KD , e o braço de endireitamento obtido das Curvas Cruzadas será KZ .

Pelas razões que acabamos de ver, fica claro que é IMPRESCINDÍVEL que nas Curvas Cruzadas fique registrado claramente qual a POSIÇÃO ADOTADA para G , no cálculo das mesmas; de outro modo o uso das Curvas Cruzadas será inviável.

3.6 – CURVA DE ESTABILIDADE

3.6.1. – GENERALIDADES

Já vimos que a Curva de Estabilidade é um gráfico de (BRAÇO DE ENDIREITAMENTO) x (BANDA) ou, usando os símbolos do item anterior, uma representação de $GZ \times \theta$ como consta da FIG. 5a.

Trata-se de uma representação IMPORTANTÍSSIMA para o navio porque estabelece condições para se afirmar se o navio tem ou não características adequadas de estabilidade, quando os ângulos de banda são grandes.

Da discussão efetuada, podemos verificar que para se obter uma Curva de Estabilidade a partir das Curvas Cruzadas, é necessário conhecer o deslocamento e a posição vertical do centro de

gravidade ou seja o valor de KG. Há uma Curva de Estabilidade para cada par de valores de deslocamento e KG.

3.6.2 – OBSERVAÇÕES SOBRE A CURVA DE ESTABILIDADE

Deve-se notar que as Curvas Cruzadas são caracterizadas e determinadas exclusivamente pelas formas de carena, ao passo que a Curva de Estabilidade é típica de uma condição de carregamento do navio definida pelos valores Δ e KG.

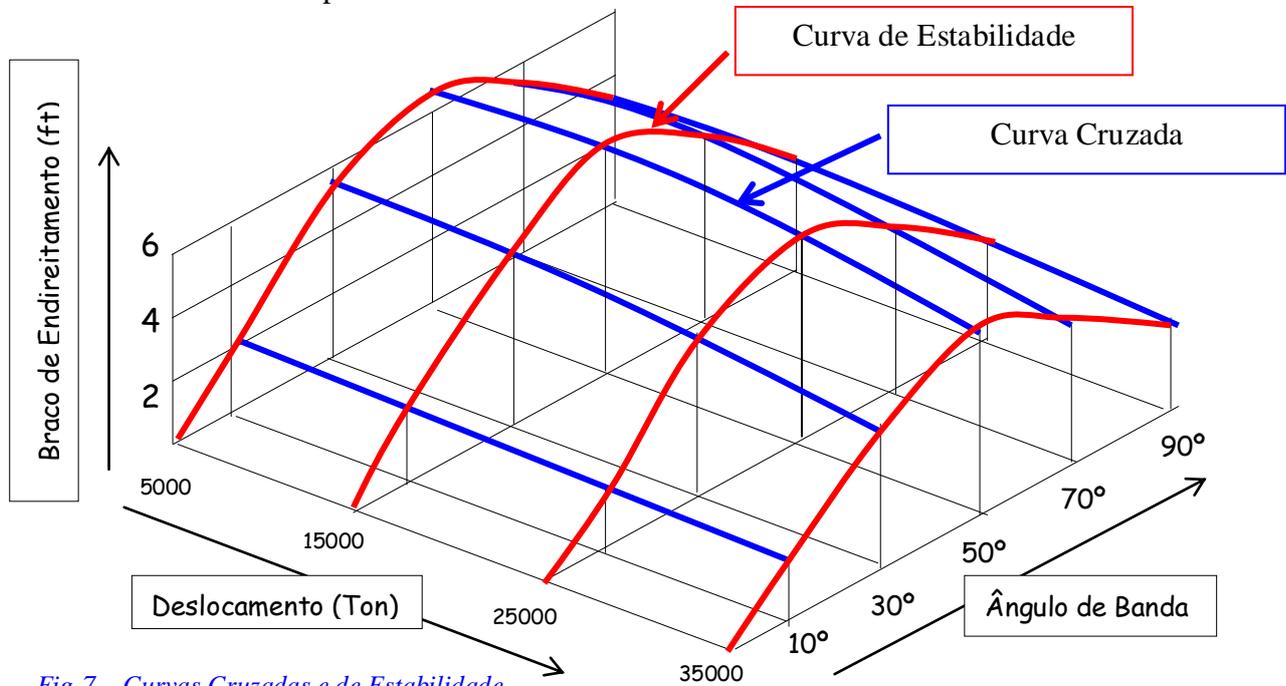


Fig-7 – Curvas Cruzadas e de Estabilidade

A figura 7 acima auxilia o entendimento do que acabou de ser afirmado, as Curvas Cruzadas são aquelas representadas na cor azul, como mostrado. Elas são obtidas em função das formas de carena. Já para a definição das Curvas de Estabilidade (em vermelho) é necessário saber o valor do Deslocamento do navio.

Outra observação importante é que para um determinado navio só há uma Curva Cruzada porque esta só depende da forma da carena. Para qualquer navio porém há um grande número de Curvas de Estabilidade, visto que estas dependem dos valores de deslocamento e KG do navio.

Nestas condições, a designação Curva de Estabilidade de um navio é muito limitada, ou mesmo destituída de significado; ela só adquire significado quando vier acompanhada da informação de Deslocamento e KG, que caracterizam a condição específica de carregamento do navio à qual esta Curva de Estabilidade está vinculada.

3.6.3 – OUTRAS INFORMAÇÕES OBTIDAS DA CURVA DE ESTABILIDADE

Há algumas outras informações fornecidas pela Curva de Estabilidade que serão abordadas a seguir.

- **Limite de Estabilidade**

É o maior ângulo de banda θ_L para o qual o braço de endireitamento é positivo.

- **Braço Máximo**

É o maior braço de endireitamento que a curva mostra $(GZ)_{MAX}$; a este braço corresponde um ângulo de banda θ_M , o qual às vezes é chamado de ângulo de maior braço de endireitamento.

- **Tangente à Curva na Origem**

A curva de estabilidade dá o valor de GZ em função de θ . Considerando a figura 6 vemos que é possível escrever: $GZ = (Gm) \times \text{sen}\theta$. Derivando com relação a θ :

$$d(GZ)/d\theta = Gm \times \cos\theta + \text{sen}\theta \times d(Gm)/d\theta$$

porque Gm e $\text{sen}\theta$ são ambos função de θ ; caso se considere $\theta = 0^\circ$ temos: $(Gm) = (GM)$
 Como $\cos 0 = 1$ e $\text{sen } 0 = 0$, a equação acima se transforma na seguinte:

$$[d(GZ)/d\theta]_{\theta=0} = GM$$

Este resultado nos informa que a tangente na origem à Curva de Estabilidade indica o valor de GM do navio na condição de carregamento representativa daquela Curva de Estabilidade. Isto quer dizer que se tivermos uma curva de estabilidade, para conseguir o valor de GM procede-se da seguinte maneira:

- 1º) Traçar a tangente à origem da curva;
- 2º) Levantar uma ordenada para o valor de θ igual a $57^\circ, 3$ (1 radiano);
- 3º) A medida desta ordenada quando intercepta a tangente traçada na origem da curva é o GM .

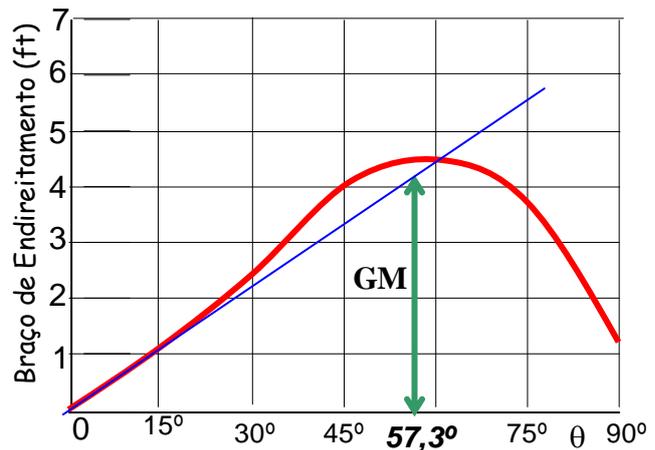


Fig. 8 – Tangente à curva de estabilidade. GM inicial.

3.6.4 - INFORMAÇÕES REAIS OBTIDAS DA CURVA

Já vimos que a Curva de Estabilidade dá os braços de endireitamento em função de θ . Não devemos, porém, considerar todas as informações obtidas da Curva de Estabilidade como as que ocorrerão efetivamente na prática, ou na vida do navio.

Caso o limite de estabilidade de certo navio, dado pela Curva de Estabilidade para certa condição de carga, seja de 65° , por exemplo, não quer dizer que o navio com banda até 65° voltará sempre à posição vertical. É sabido que no emprego prático do navio uma série de fatores influirão tais como: deslocamento de líquidos, paralisação de motores, movimentação de carga, queda de tripulantes e outros que impedirão a volta do navio à posição vertical.

O que importa é que a curva de estabilidade dá elementos para se comparar o navio em estudo com outros navios cujo comportamento no mar é reconhecidamente satisfatório. Assim, é possível estabelecer critérios que dirão se o navio em estudo é ou não adequado para o fim a que se destina. Assim surgiram os chamados Critérios de Estabilidade. O conhecimento, o estudo e a aplicação destes critérios são obrigações básicas do Engenheiro Naval, mas devem ser também uma preocupação do utilizador do navio.

Antes de encerrar este item é bom esclarecer que aquilo que foi mencionado acima é referente ao navio na sua vida real em função das limitações apontadas: movimentos de líquidos, de carga, queda de pessoal, etc.... Caso se tenha, porém, um modelo do navio que reproduza em escala exatamente as condições de carregamento a Curva de Estabilidade dará uma indicação exata do comportamento do modelo em todos os aspectos:

- braço de endireitamento em função da banda;
- limite de estabilidade;
- ângulo de máximo valor de braço de endireitamento, etc....

O que foi dito acima poderá ser facilmente constatado com um modelo testado num tanque destinado a verificação da estabilidade estática.

3.6.5. – FOLHETO DE ESTABILIDADE

Trata-se de um pequeno livreto preparado para todos os navios após a construção ou grandes alterações. Cada folha deste livreto é relativa a certa condição de carregamento, de modo que cada folha registra:

- o peso do navio leve e a posição vertical e longitudinal do Centro de Gravidade;
- a relação exata dos tanques, paióis, porões, e outros compartimentos que estarão carregados e de que maneira, com indicação da posição do Centro de Gravidade de cada um deles.

Com estes elementos é possível estabelecer exatamente a condição de carregamento, ou seja o Deslocamento, o KG e o LCG que caracterizam a referida condição. Deste modo consta de cada folha uma Curva de Estabilidade.

Dependendo do tamanho e do tipo do navio poderá haver cerca de 12 a 15 folhas no folheto de Estabilidade cobrindo uma gama razoável de condições de carregamento.

A preparação do Folheto de Estabilidade deve ser uma atribuição dos responsáveis pela construção ou grande alteração do navio. O utilizador deve ter conhecimento do Folheto e saber como passar de uma condição de carregamento descrita no mesmo para qualquer outra através da adição e subtração de peso em diferentes locais do navio. O método para esta operação será descrito a seguir.

É necessário conhecer a estabilidade do navio não só para pequenos ângulos com também para os grandes. Esta segunda fase é conseguida por meio da Curva de Estabilidade, a qual é uma curva que dá os braços do conjugado de recuperação em função dos ângulos de banda. Para o cálculo dos braços do conjugado podem ser usados métodos aproximados ou as Curvas Cruzadas de Estabilidade.

Exemplo

3.7 - Estabilidade Dinâmica

No início do Capítulo dissemos que há necessidade de estudar tanto a estabilidade estática como a dinâmica. A primeira foi objeto dos itens anteriores, de modo que passaremos à verificação das características mais relevantes da Estabilidade Dinâmica.

Ficou claro no item 3.2 que, para os sólidos apoiados em superfícies rígidas, também há os conceitos de estabilidade estática e dinâmica.

Voltemos, pois, a encarar a figura 6 e o corpo ali representado; na primeira posição o prisma está em equilíbrio estável; na segunda foi afastado da posição de equilíbrio recebendo uma inclinação θ . Comparando-se as figuras, pode-se ver que o centro de gravidade sofreu uma elevação. Em outras palavras: em decorrência da inclinação, o corpo recebeu energia potencial igual a seu peso multiplicado pela distância vertical GG_1 , ou seja: $E_p = \Delta \times GG_1$.

Considerando nula a resistência oferecida ao prisma para que ele adquira a inclinação θ , pode-se dizer que o trabalho efetuado para inclinar o prisma é igual à energia potencial na posição inclinada.

O aumento da energia potencial na posição de inclinação θ , comparada com a energia potencial na posição inicial, é a chamada estabilidade dinâmica.

Como dito, há duas maneiras de medir a estabilidade de um corpo: pelo momento de recuperação e pela Estabilidade Dinâmica. A primeira é medida por um momento de uma força e a segunda pela energia potencial armazenada.

3.7.1 - Estabilidade Dinâmica e a Curva de Estabilidade

O trabalho (W) realizado por um conjugado que gira de um ângulo θ é medido pelo produto de seu momento (M) pelo ângulo de giro.

$$W = (\text{momento}) \times (\text{ângulo})$$

Nestas condições a estabilidade dinâmica (energia U armazenada na forma potencial gravitacional) de uma embarcação adernada, medida até um valor determinado de ângulo θ de banda, terá a expressão:

$$U = \int_0^\theta M \cdot d\theta, \text{ sendo } M \text{ o conjugado de recuperação da embarcação, onde } M = f(\theta).$$

Podemos escrever também que $M = b \times \Delta$, sendo: Δ o deslocamento (que é constante) e b o braço de endireitamento (uma função de θ), de modo que a expressão de U passa a ser:

$$U = \int_0^\theta \square \cdot b \cdot d\theta = \square \cdot \int_0^\theta b \cdot d\theta$$

Ora, a integral $\int_0^\theta b \cdot d\theta$ mede a área sob a Curva de Estabilidade Estática do navio em questão até o ângulo θ . Assim, a equação acima (que dá o valor de U) nos diz que existe uma relação entre a estabilidade dinâmica de um navio e sua Curva de Estabilidade Estática; essa relação representa a afirmação de que a estabilidade dinâmica é medida pela integral da curva de estabilidade estática.

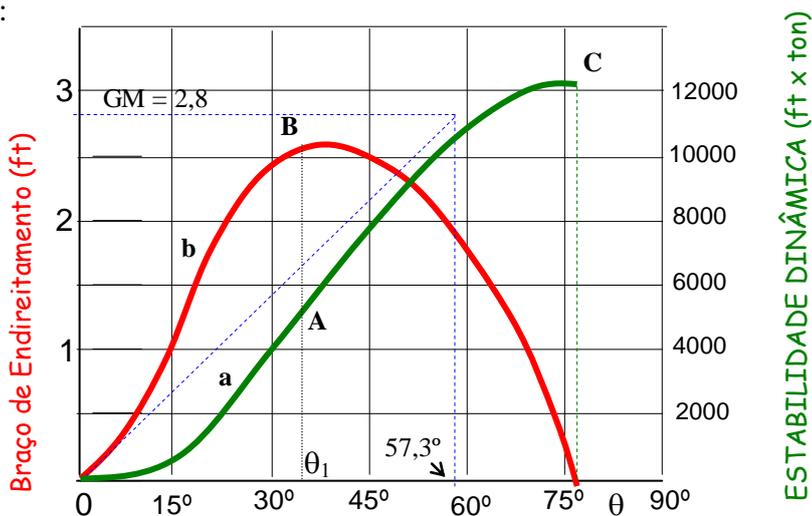


Fig. 9 -(Relação entre as curva de Estabilidade Estática e Dinâmica).

Considerando a figura 9, onde está representada a curva de estabilidade estática de um navio, vemos que a ordenada $\theta_1 A$ da curva OaAC é igual a área sob a curva ObB θ_1 . De modo análogo-

go qualquer ordenada da curva OaAC, para qualquer valor de θ , mede a estabilidade dinâmica do navio por meio da integração da curva de estabilidade estática até o valor de θ em questão.

Nestas condições, dispomos de uma sistemática bastante geral para a determinação da estabilidade dinâmica de um navio. Obtida a curva de estabilidade estática, é possível efetuar a integração, até qualquer valor de θ , (por meio de uma regra aproximada) e obter a estabilidade dinâmica do navio até aquele valor de θ .

Deve-se observar que a estabilidade dinâmica também será estabelecida para uma condição específica de carregamento (definida por valores de deslocamento e KG fixos) visto que é obtida de uma curva de estabilidade estática que só é definida para tal condição.

3.7.2 - Estabilidade Dinâmica dos Navios

Consideremos a Fig. 10(a) na qual distinguimos um navio cuja seção está representada e é solicitado por um vento de través cuja velocidade é \underline{V} . São conhecidas a curva de conjugados de recuperação (endireitamento) para a estabilidade estática do navio e a curva que indica os conjugados de emborcamento devidos ao vento de través (Fig 10 b). Nas fórmulas que se seguem \underline{A} é a área da superfície lateral do navio e \underline{H} o seu calado. Na figura identificamos inicialmente as seguintes curvas:

- Curva Oaeh = curva de estabilidade estática (conjugados de recuperação) de um navio para certo deslocamento e determinado valor de KG;
- Curva dacf = curva de conjugados de emborcamento provocados por vento constante. Note-se que as ordenadas da 1ª curva são conjugados em vez de braços, o que não altera a forma da curva de estabilidade, a qual terá as ordenadas multiplicadas por uma constante, uma vez que: $CR = \Delta \times (\text{braço})$

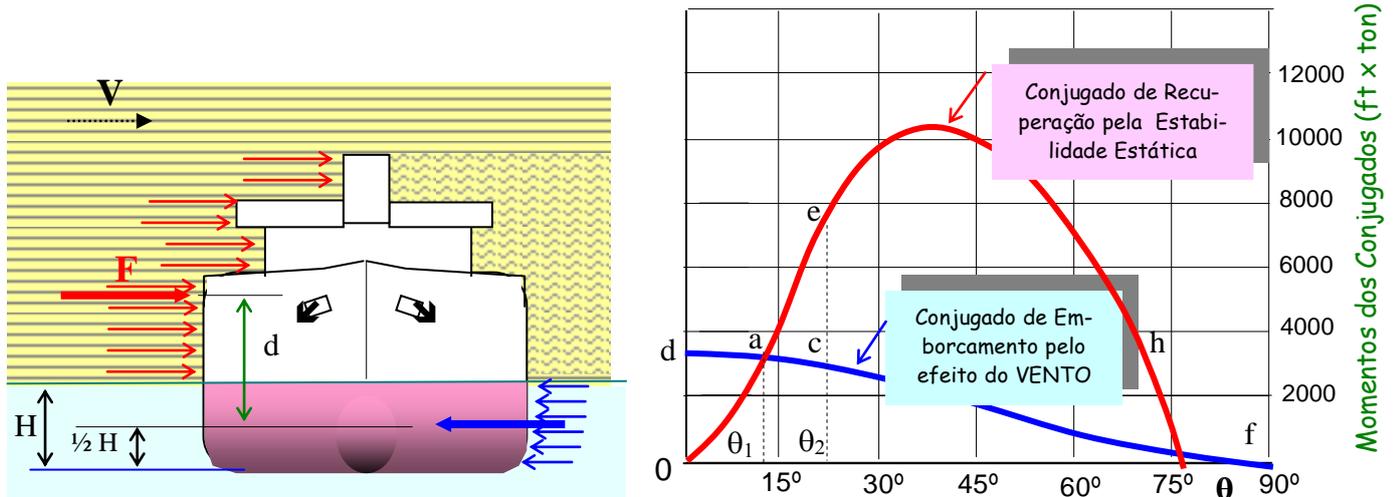


Fig. 10 – (a) Ação do vento de través sobre o navio. (b) Curva de estabilidade estática (CONJUGADOS)

A curva de conjugado de emborcamento, devido à ação do vento, é função de $\cos^2 \theta$, porque:

$$CE = F \times d, \text{ para } \theta = 0^\circ.$$

sendo d = distância do ponto de aplicação de F ao ponto de resistência (às vezes considerado como $H/2$ - ver fig.10 a)

Como $F = k \times A \times V^2 \rightarrow$ Lei de Newton para a força sobre uma superfície que se desloca num fluido com velocidade V , sendo k = um coeficiente função da forma da superfície e da densidade do fluido, verifica-se que, sob a ação do vento, o navio aderna e:

- Braço do conjugado de emborcamento = $d \times \cos\theta$
- Força do conjugado de emborcamento = $k \times (A \times \cos\theta) \times V^2$

Logo, o conjugado de emborcamento é função do quadrado do cosseno do ângulo de banda. Assim, o conjugado de emborcamento tem o valor máximo quando $\theta = 0^\circ$ e valor nulo quando $\theta = 90^\circ$. Uma vez estabelecidas estas condições podemos analisar o efeito do vento sobre o navio em duas situações: aplicação gradativa e aplicação repentina do esforço.

- Condição de Equilíbrio com Aplicação Gradativa da Força do Vento

Se a força decorrente da ação do vento é aplicada gradativamente, o conjugado de emborcamento irá atingir um valor tal que equilibrará o navio no ângulo da banda θ_1 quando este conjugado for igual ao conjugado de recuperação. O ângulo θ_1 será dado pelo cruzamento da curva de estabilidade estática com a curva de conjugados de emborcamento (ponto a na [fig 10b](#)), ou seja, quando: $CR = CE$.

- Condição de Equilíbrio com Aplicação Repentina da Força do Vento

Suponhamos que o navio seja submetido a uma rajada forte e repentina de vento, que produz um conjugado de emborcamento representado pela curva $dacf$. Admitamos que a aplicação da força do vento é tão repentina que o navio recebe toda esta força antes mesmo de se inclinar.

Quando o navio atinge a banda θ_1 tem energia potencial, em função desta banda, representada pela área $Oa\theta_1$. O trabalho efetuado pelo vento é representado pela área $Oda\theta_1$, maior do que a anterior. Assim os 2 conjugados são iguais em θ_1 mas o trabalho efetuado pelo vento é maior do que a energia acumulada pelo navio, o qual continua a se inclinar até que a energia potencial acumulada pelo navio se torne igual ao trabalho efetuado pelo vento. Estas afirmações presumem que não haja perda de energia neste movimento.

A inclinação do navio aumenta até θ_2 , onde as áreas $Oaec\theta_2$ e $Odac\theta_2$ são iguais. Note-se que a área $Oac\theta_2$ é comum às duas áreas, de modo que θ_2 ocorre quando $\Delta (aec) = \Delta (Oda)$, já que as figuras em questão são quase triangulares (o símbolo Δ aqui não se refere a deslocamento).

Acontece porém que, quando a banda é θ_2 o conjugado de endireitamento é maior do que o de emborcamento, ou seja, a banda θ_2 não é uma posição de equilíbrio. O navio volta a se mover procurando diminuir a banda e retomar sua posição de flutuação normal. Se não houvesse resistências a vencer, o navio efetuaria oscilações em torno da banda θ_1 . Na realidade existem resistências que amortecem o movimento oscilatório e após algum tempo o navio se estabiliza na banda θ_1 .

É importante notar que quando a força do vento for aplicada sob a forma de rajada (repentinamente), o ângulo de banda θ_2 que o navio atinge pode ser substancialmente maior do que quando se aplica a mesma força gradualmente.

- Estimativa da Banda para uma Força Aplicada Repentinamente

- Caso em que se dá a Estabilização

Para estimar o ângulo de inclinação provocado por um conjugado aplicado repentinamente, deve-se efetuar a integração das curvas de conjugado de emborcamento e de conjugado de recuperação. A integração da 1ª curva representa o trabalho efetuado pelo conjugado de emborcamento; a da 2ª curva, a energia potencial acumulada pelo navio ao adernar. Na [figura 11](#) a curva OPA representa a *integral* da curva de estabilidade estática (a estabilidade dinâmica); a curva OPB representa a integral da curva de momentos de emborcamento dados pela curva $dacf$ ([Fig.10](#)).

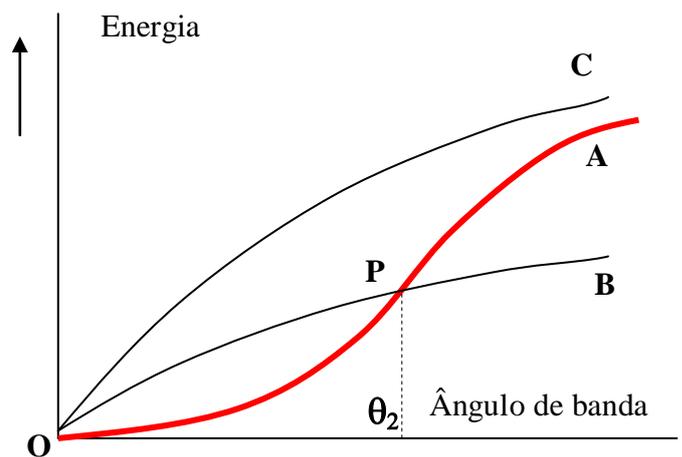


Fig. 11 – Energias dos Conjugados (CR e CE)

O movimento do navio cessará (energia cinética nula) quando a energia potencial adquirida pelo navio for igual ao trabalho efetuado pelo conjugado de emborcamento, ou seja, no cruzamento das curvas OPA e OPB. O ângulo em que se dá “a parada momentânea” é θ_2 , que logicamente coincide com aquele comentado anteriormente. Nesta banda, as duas quantidades de energia são iguais e haverá o que poderíamos chamar de um “equilíbrio momentâneo”, ou melhor, uma “parada momentânea”; na verdade, o navio irá atingir a banda máxima θ_2 devido ao fato do conjugado im-

posto pela força do vento ter sido aplicado repentinamente; o equilíbrio final se dará na banda θ_1 , como já exposto.

- Caso em que NÃO se dá a Estabilização

Pode acontecer que um navio venha emborcar em decorrência de uma rajada de vento que provoca um momento emborcador que seria suportado pelo navio, caso fosse aplicado em condições estáticas. A explicação para este fato está nas características de estabilidade dinâmica.

Suponhamos que um vento atue sobre o navio impondo um conjugado emborcador que está representado pela curva ghi na *figura 12*. Caso este conjugado emborcador seja aplicado gradativamente (ou seja, o vento aumentando de intensidade aos poucos), o navio ficará em equilíbrio na banda θ_1 indicada pelo ponto h.

Caso, porém, se faça a integral da curva ghi teremos a curva OC (*Fig. 11*); como se vê, a curva OC não cruza a curva OPA.

A comparação das curvas OPA e OC mostra que o trabalho efetuado pelo momento emborcador do vento (curva OC) é maior do que a energia potencial acumulada pelo navio, até que seja atingido o limite de estabilidade do navio.

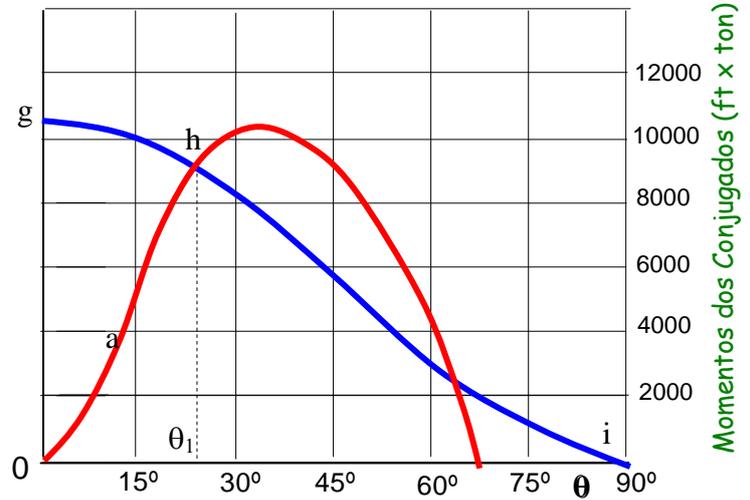


Fig. 12 – Caso em que NÃO há equilíbrio.

A conseqüência é que o navio emborcará quando receber uma rajada deste vento, embora não emborcasse se o mesmo vento atuasse sobre o navio crescendo gradativamente.

- Outros tipos de Conjugados de Emborcamento

O exemplo do vento atuando sobre o navio é de fácil entendimento e foi usado por esta razão. Há porém, outras formas de conjugados que podem ser aplicados de modo bastante súbito.

Um caso é o que ocorre quando uma embarcação, em alta velocidade V, dá uma guinada brusca.

Quando é repentinamente dado todo-leme para um bordo (BE por exemplo) aparece uma força sobre o leme (na popa, abaixo da linha d'água) com componente para BB e que provoca não só o momento que faz o navio guinar como também um conjugado em relação ao eixo longitudinal, tendendo a aderná-lo inicialmente para o bordo da guinada (BE). Quando a curva se inicia, começa a aparecer um conjugado em sentido contrário (devido à ação centrífuga, proporcional a V^2/R , sendo R o raio da curva). Este conjugado provoca o adernamento para o bordo oposto ao da guinada (BB), que poderá gerar o emborcamento da embarcação, caso sua estabilidade dinâmica seja pequena.

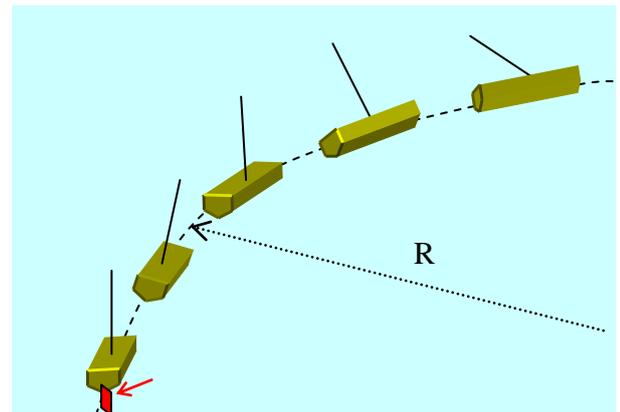


Fig. 13 – Guinada brusca

Outro exemplo comum para um navio de guerra é uma explosão repentina em um compartimento abaixo da linha d'água. A água invade o compartimento avariado de modo tão rápido que o conjugado de emborcamento pode ser considerado como se fosse aplicado subitamente.

Em geral, pode-se dizer que o valor aproximado do ângulo de banda que o navio toma nestas condições é duas vezes maior do que a banda que ocorreria se a água fosse embarcada gradativamente no mesmo compartimento.

4.0 - CARACTERÍSTICAS DO NAVIO QUE AFETAM A ESTABILIDADE

De modo bastante geral poderíamos dizer que quase todas as características do navio afetam a estabilidade. Vimos que as formas da carena determinam as curvas cruzadas de estabilidade e que para a obtenção da curva de estabilidade estática é necessário caracterizar uma condição de carregamento, de modo que o plano de linhas, a posição do centro de gravidade e o deslocamento, afetam diretamente a estabilidade. Estas ponderações poderiam levar o leitor a considerar desnecessário este item. Acontece que a curva de estabilidade estática de qualquer navio tem aspectos que são afetados diretamente por algumas características do navio; deste modo, vamos encarar inicialmente quais as características ideais para as curvas de estabilidade estática e, a seguir, apreciar a influência de algumas características do navio sobre a curva.

4.1 - Características Ideais da Curva de Estabilidade

Algumas características consideradas desejáveis para a curva de estabilidade são mencionadas aqui.

1ª) Inclinação na origem pequena e bem definida.

Já vimos que a inclinação da curva de estabilidade na origem permite a determinação de GM e que este é o indicador da estabilidade a pequenos ângulos, o que poderia levar à conclusão de ser aconselhável dotar qualquer navio de GM elevado.

Acontece, porém, que GM tem uma relação direta com o período de oscilação (jogo) do navio, de modo que uma inclinação pequena da curva de estabilidade proporcionará um jogo suave. Realmente: para pequenos ângulos de giro ($\sin \theta \sim \theta$), a equação da dinâmica da rotação permite escrever:

$I_L d^2\theta/dt^2 = - \Delta GM \theta$, sendo I_L o momento de inércia de massa em relação a um eixo baricêntrico longitudinal. O movimento oscilatório (harmônico) resultante terá como pulsação

$\omega = (\Delta GM / I_L)^{1/2}$. Este tipo de jogo é importante para o conforto de passageiros e tripulantes, assim como para a segurança da carga. No caso de navios de combate e porta-aviões o jogo suave permitirá uma plataforma de tiro (ou de pouso) mais estável, o que é desejável.

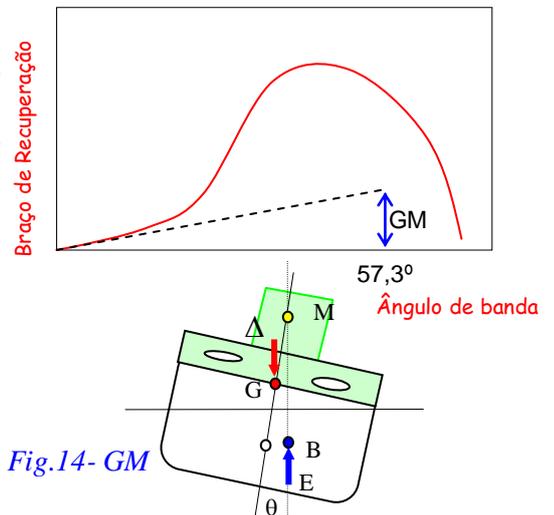


Fig.14- GM

2ª) Conjugado de endireitamento máximo de valor elevado, ocorrendo em ângulo de banda também elevado.

Com esta característica o navio terá capacidade de voltar à posição de banda nula mesmo depois de sofrer uma inclinação elevada. Nestas condições vemos que embora o valor de GM não deva ser necessariamente elevado, ou seja, que a estabilidade inicial não precise ser grande, é muito interessante que a estabilidade a ângulos da ordem de 35° a 40° seja caracterizada por conjugados de recuperação tão grandes quanto possível.

Pode parecer que estas duas características estejam invertidas porque o navio é mais solicitado durante a vida com pequenos ângulos de banda do que com grandes, de modo que pareceria lógico ter uma estabilidade inicial elevada (para resistir ao maior número de solicitações encontradas na vida útil). Ocorre que a estabilidade inicial elevada traz consigo os inconvenientes já apontados e, o que é o mais importante, cada vez que ocorrerem grandes bandas é indispensável que o navio tenha condições para recuperar a posição de equilíbrio. Se não houver conjugado de recuperação elevado, ocorrendo a ângulos de banda altos, pode não haver a volta ao ângulo de banda nulo. Além disto as considerações feitas com relação a estabilidade dinâmica mostram a necessidade destes conjugados.

3ª) Limite de estabilidade grande.

Esta característica da curva de estabilidade não precisa ser comentada visto ser evidente que quanto mais alto o limite de estabilidade melhor será a condição do navio.

Antes de concluir é preciso esclarecer que as condições acima são desejáveis para qualquer navio; não se deve pensar, porém, que se uma embarcação não tiver todas aquelas características estará necessariamente condenada. O que vai estabelecer as condições de aceitação ou não da embarcação é a aplicação dos *Crítérios de Estabilidade*, assunto que abordaremos em outra oportunidade.

4.2 - Análise sumária da influência de características do navio sobre a estabilidade.

Veremos neste item algumas influências que certas características do navio exercem sobre a forma da curva de estabilidade. Abordaremos em princípio o efeito do GM, da borda livre, do calado e formas das balizas.

4.2.1 - Efeito do GM sobre a curva de estabilidade:

Já vimos que para pequenas bandas o conjugado de recuperação é dado pela expressão:

$$CR = \Delta \times GZ = \Delta \times GM \times \text{sen}\theta$$

Isto quer dizer que, para certo deslocamento, a estabilidade inicial depende inteiramente de GM; em outras palavras, a estabilidade inicial depende de KG visto que para um deslocamento determinado o valor de KM fica estabelecido.

A *figura 15* facilita a demonstração de como um navio, com o mesmo deslocamento, terá curvas de estabilidade diferentes quando o valor de KG sofre variações. Além da influência na estabilidade inicial a variação do GM tem efeito sobre:

- a grandeza do máximo conjugado de recuperação;
- a estabilidade dinâmica.

Deve-se notar que a curva “D” mostra braços de endireitamento negativos para $\theta < 25^\circ$: o navio tomará uma banda permanente de aproximadamente 25° , isto é, indica que o navio não tem estabilidade inicial. Para ângulos de banda maiores do que 25° os braços de endireitamento são positivos, embora $(GM)_{\theta=0} < 0$. Verificamos da *figura 15* o que dissemos em item anterior, ou seja, que os valores de GM influem na estabilidade de um navio, embora não constituam o único indicador de estabilidade desde que se considere toda a faixa de abrangência da Curva de Estabilidade.

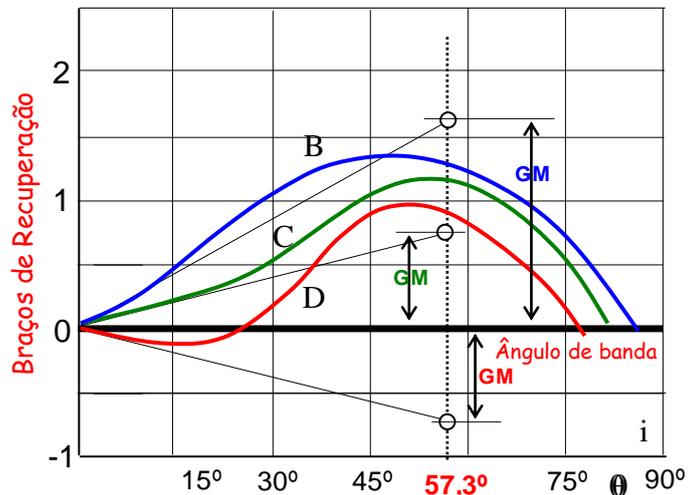


Fig. 15– Influência de GM sobre a estabilidade

Deve-se notar que se um navio tiver a curva de estabilidade como a curva “D” da *figura 15* tornará banda permanente de cerca de 25° . Para inclinações maiores o navio tem estabilidade, de modo que só flutuará sem banda em equilíbrio instável. Todas as vezes que uma embarcação estiver flutuando e tomar espontaneamente uma banda permanente para um bordo ou para o outro há uma indicação nítida de que a situação é análoga à da curva “D”: O GM é negativo para banda nula e o navio aderna até um ângulo no qual haja braço de endireitamento positivo. Fazer-se um deslocamento lateral de pesos para tentar eliminar uma tal banda é providência inaceitável, pois gerará a produção de uma banda para o outro bordo, e ainda maior.

4.2.2 - Efeito da borda-livre sobre a estabilidade

A *figura 16* auxilia a observação deste efeito; ela mostra a diferença entre dois navios semelhantes com bordas-livres diferentes. O navio da curva I tem borda-livre maior do que o da curva II. As curvas coincidem até bandas cerca de 20° (ponto a); isto está de acordo com o item anterior, porque para bandas pequenas são outras as características do navio que influem.

Pode-se dizer que a borda-livre não influi na estabilidade inicial, embora seja necessária uma certa cautela nesta afirmação devido à influência da borda-livre sobre o valor de KG.

A borda-livre influi na curva de estabilidade em duas características:

- limite de estabilidade;
 - ângulo de máximo braço de endireitamento;
- A figura 16 mostra esta condição.

Conclui-se que a borda-livre elevada ajuda muito a melhorar características de estabilidade de navios que tenham um mesmo GM. Cumpre observar que navios com borda-livre grande têm tendência a aumentar o KG, por duas razões:

- o centro de gravidade da própria estrutura estará elevado;
- os equipamentos instalados acima do convés de borda-livre terão uma altura elevada acima da linha de base;

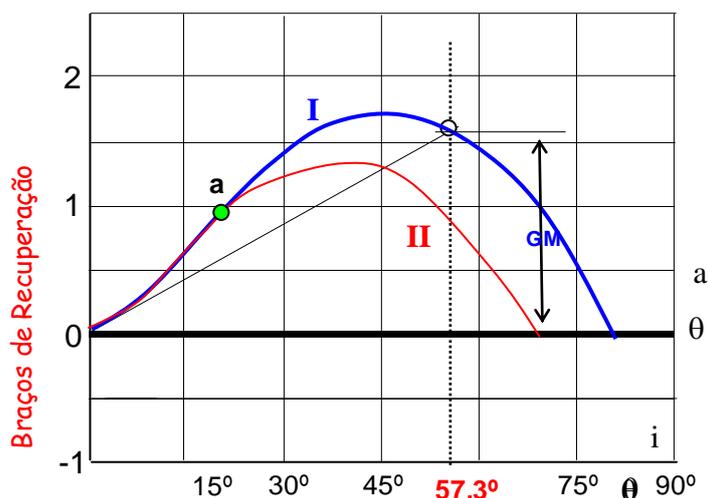


Fig. 16– Influência da borda-livre sobre a estabilidade

Assim sendo, embora a borda-livre normalmente contribua para melhorar as características da Curva de Estabilidade, é preciso considerar todos os efeitos do aumento da borda-livre, principalmente a elevação do centro de gravidade que diminuirá GM, prejudicando as características de estabilidade inicial.

Como foi dito, a maior influência da borda-livre é na faixa de estabilidade, o que leva à conclusão de que ela também afeta a estabilidade dinâmica. A borda-livre é controlada por Convenções Internacionais, que serão objeto de abordagem em outra oportunidade.

4.2.3 - Efeitos de outros elementos da forma

Para analisar estes efeitos podemos lançar mão da figura 17, onde estão representadas cinco seções de navios com igualdade das seguintes características:

- mesma altura metacêntrica;
- mesma borda-livre;
- mesmo deslocamento.

Na figura estão representadas as cinco curvas de estabilidade correspondentes a cada um dos navios, de modo a podermos compará-las.

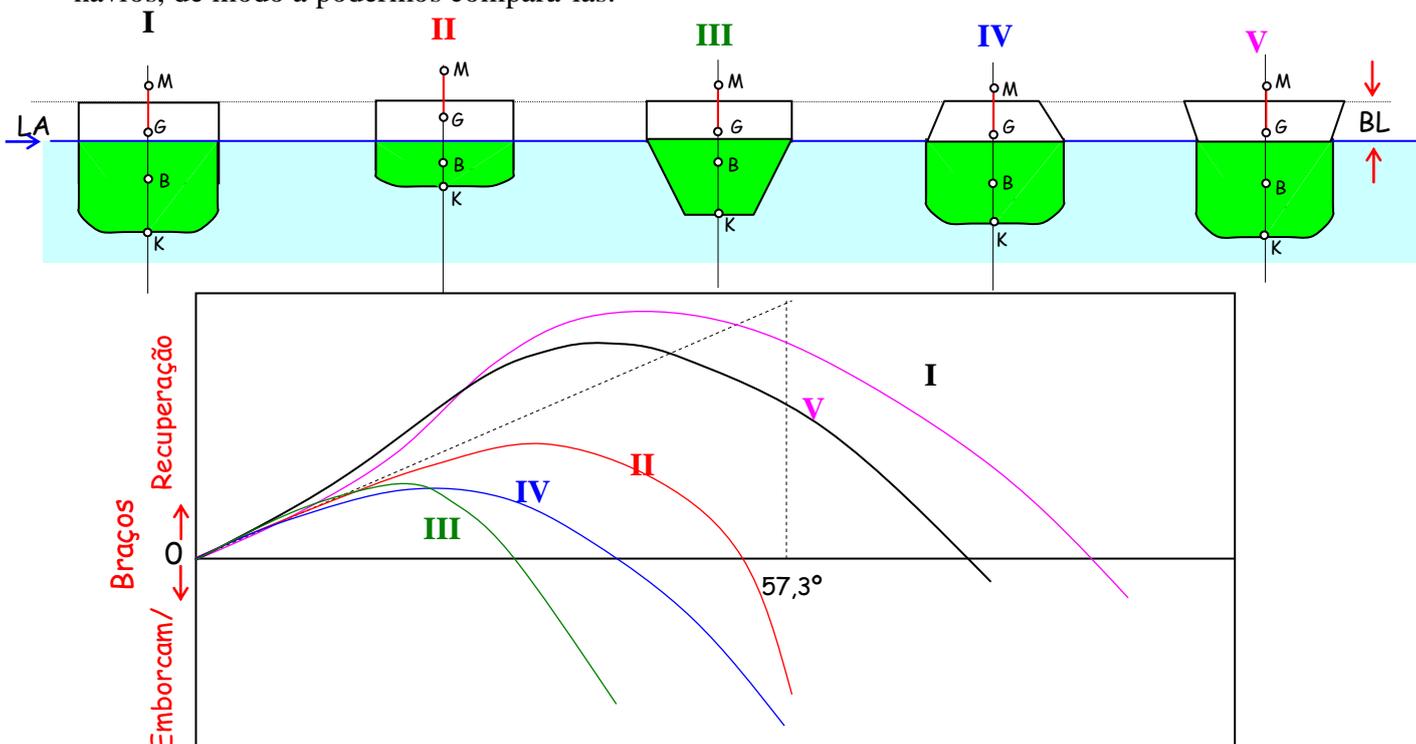


Fig. 17 – Efeitos de elementos de forma na estabilidade.

Efeito do Calado

O navio II tem calado inferior ao navio I; a curva de estabilidade do navio II mostra uma redução no limite de estabilidade e no maior braço de endireitamento porque para bandas grandes o bojo emerge de modo que os braços do conjugado de recuperação diminuem mais rapidamente do que os do navio I.

Efeito das Formas das Balizas.

O navio I tem balizas em forma de “U” ao passo que o navio III tem balizas em “V”. Embora a estabilidade inicial dos dois seja a mesma, o navio III tem curva de estabilidade estática com limite de estabilidade baixo e conjugado máximo de emborcamento também baixo. Isto acontece porque a forma das balizas faz com que os braços do conjugado de recuperação sejam pequenos. Quando lembramos qual o método usado para a obtenção das Curvas Cruzadas de Estabilidade é fácil entender o porque da afirmação anterior.

Adelgaçamento e Alargamento.

Estas são duas características que quase não se encontram mais. Quase todos os mercantes atuais têm os costados verticais; alguns navios de combate podem ter um pequeno alargamento para proporcionar maior área de convés (caso de porta-aviões) e algumas embarcações que foram construídas para operar em flotilhas poderão ter um pequeno adelgaçamento para facilitar as atracções a contra-bordo. Assim mesmo, se houver tais características, elas serão razoavelmente discretas e nunca nas proporções mostradas na [figura 17](#) onde as condições foram propositalmente exageradas para facilidade de acompanhamento. O navio V terá sua curva de estabilidade com maiores braços de recuperação e maior limite de estabilidade porque quando há bandas elevadas suas seções transversais aumentam, crescendo assim o braço do conjugado obtido na Curva Cruzada de Estabilidade. Já o navio IV tem condição exatamente oposta, por razões análogas àquelas apresentadas para o navio V.

4.2.4 -Alguns métodos para melhorar a estabilidade

Dadas certas condições de um determinado navio, podemos dizer, em princípio, que boas características de uma curva de estabilidade vão depender de:

- Borda-livre adequada;
- Valor moderado de altura metacêntrica inicial;

Para navios que não podem ter uma borda-livre muito grande (ex.: petroleiros e encouraçados) é necessário ter altura metacêntrica maior do que a que seria desejável para uma curva de estabilidade ideal.

É preciso lembrar também que o aumento da borda-livre pode acarretar elevação nos centros de gravidade de quase todos os itens, de modo que há possibilidade de que o aumento na borda-livre redunde em redução no GM. Como as duas características influem nos braços de endireitamento, o ganho em virtude do aumento na borda-livre pode ser menor do que a perda decorrente da elevação do centro de gravidade com o conseqüente decréscimo de GM. Desta maneira é importante considerar todos os aspectos que afetam o problema. Não parece haver uma fórmula ou orientação única que permita afirmar que, uma vez adotada esta ou aquela providência, a curva de estabilidade será melhorada.

Face ao que se disse no início deste item parece claro que, se for possível aumentar a borda-livre sem elevar a posição do centro de gravidade, haverá melhora na curva de estabilidade.

Antes de passar ao assunto seguinte é razoável um pequeno comentário. Alguns livros afirmam que, em decorrência do aumento de KG, que sempre acompanha a elevação da borda-livre, o recurso mais usual para melhorar a curva de estabilidade é aumentar a altura metacêntrica. Esta afirmação deve ser esmiuçada um pouco: é preciso saber que estágio da vida do navio se está considerando. Se o projeto do navio já está de tal modo avançado que não é mais possível alterar características principais, a afirmação é certa; caso contrário, seria mais lógico aumentar a boca e a borda-livre, ao mesmo tempo em que se mantém um controle rigoroso dos pesos e seus centros de gravi-

dade. O aumento da boca aumenta KM e conseqüentemente GM, e o aumento da borda-livre aumentará o limite de estabilidade.

Se o navio já for existente, é claro que o único recurso será abaixar pesos e eliminar superfícies livres, quando então se aplica a afirmação inicial.

4.2.5 - Análise mais detalhada

Uma vez que verificamos que há situações nas quais é necessário aumentar altura metacêntrica para melhorar as características de estabilidade, convém analisar quais os métodos disponíveis para tal.

Sabemos que:

$$GM = KB + BM - KG$$

- **KB**: dada uma forma de carena e um valor determinado de coeficiente prismático, KB é uma fração do calado. Uma vez estabelecido o calado, KB não pode variar muito, de modo que procurar alterar KB não é prático para aumentar o valor de GM.

- **KG**: aumentar GM pela diminuição da altura de G é desejável; muitas vezes, porém, pouco pode ser feito por este processo porque o engenheiro naval não tem liberdade de mudar a posição do armamento, dos guindastes, e de outros itens elevados. O GM, às vezes, é uma fração do pontal. De qualquer modo, alguma redução se consegue por meio de um estudo cuidadoso das distribuições de pesos. Estas observações devem ser encaradas com o devido cuidado pelo operador do navio. Uma vez que o navio já está em operação, os tripulantes só podem afetar o valor de GM interferindo no valor de KG, porque um navio construído tem os valores de KB e KM estabelecidos para um determinado deslocamento.

Assim a grande preocupação do operador deve ser no sentido de baixar o valor de KG e eliminar superfícies livres.

- **BM**: esta é a parcela sobre a qual o engenheiro naval pode exercer uma ação mais efetiva, se estiver na fase de projeto. Já sabemos que:

$$BM = I_c / \nabla,$$

de modo que há possibilidade de alterar, na fase de projeto, tanto I_c quanto ∇ .

A referência (1) tem considerações sobre a influência de BM no valor de GM que reproduzimos aqui.

Inicialmente podemos escrever que, em geral: $I_c = n \times B^3 \times L$

Para um certo navio, pode-se tentar avaliar a influência da boca no GM, considerando comprimento e deslocamento constantes e desprezando pequenas variações no coeficiente de linha d'água, teremos:

$BM = I_c / \nabla = (n \times B^3 \times L) / \nabla$, ou seja, $d(BM) = (3 \times n \times B^2 \times L) \times (dB / \nabla)$ e portanto:

$$[d(BM) / BM] = 3 \times dB / B \quad \leftarrow (a)$$

Por outro lado, na equação, $GM = KB + BM - KG$, podemos afirmar que uma pequena variação na boca não influencia a altura de G ou B, de modo que a diferenciação desta equação dá:

$$d(GM) = d(BM) \quad \leftarrow (b)$$

Associando as equações (a) e (b) teremos:

$$d(BM) = BM \times 3 \times dB / B \quad \text{e então:} \quad \delta(GM) = BM \times 3 \delta B / B$$

Mecânica do Navio – Estática – Parte III

Consideremos, por exemplo, um navio com as características seguintes:

$$BM = 20' \quad \text{e} \quad B = 100'$$

Para uma variação de 2' na boca, 1 ft de cada bordo, ($\delta B = 2'$), teremos:

$$\delta(GM) = (20 \times 3 \times 2 / 100) = 1,20 \text{ ft}$$

Assim verifica-se que uma variação de 2% no valor da boca possibilita (nas condições em que foram obtidas as equações) um aumento de 20% no valor de GM.

É preciso notar, porém, que aumentando exclusivamente a boca haverá uma diminuição do ângulo no qual ocorre o maior braço de endireitamento. Isto ocorre porque este braço é função do ângulo de imersão do convés já que, quando o convés imerge, as meias bocas diminuem e o momento da área imersa com relação ao eixo de referência (no cálculo das Curvas Cruzadas) também irá diminuir.

Para evitar a diminuição do ângulo correspondente ao braço máximo com o aumento da boca é necessário aumentar também a borda-livre, de modo que voltamos aqui a uma conclusão já tirada antes.

Exemplo

Capítulo 5 - EFEITOS DE MUDANÇAS DE PESOS E DE SUPERFÍCIE LIVRE.

5.1 – Introdução

Até este estágio o estudo de estabilidade pressupõe um navio com deslocamento constante; quase sempre consideramos também KG constante.

Nas próximas páginas serão estabelecidas as conseqüências de mudanças de pesos a bordo. A necessidade disto se torna evidente quando lembramos que um navio dificilmente fica em condição de carregamento constante; durante a viagem há gasto de combustível lubrificante, água, etc., de modo que é imperioso saber como um navio irá se comportar ao ser alterada a quantidade deste itens a bordo.

5.2 – Princípios Gerais

1a. Condição: Adição de peso – “Se a um sistema de pesos se adiciona novo peso, o centro de gravidade do conjunto se acha na linha que une o centro de gravidade do sistema original e o do peso adicionado, entre estes pontos, a uma distância daquele igual ao momento do peso adicionado em relação à posição original do CG, dividido pelo peso total”.

Considerando a fig. 1(a) vemos que a expressão que traduz esta condição é:

$$GG_1 = W \cdot (gG) / (\Delta + W)$$

- G = centro de gravidade do sistema original
- g = centro de gravidade do peso adicionado
- G₁ = centro de gravidade do sistema resultante
- G₁ → está na reta gG entre g e G
- Δ = peso do sistema original
- W = peso adicionado

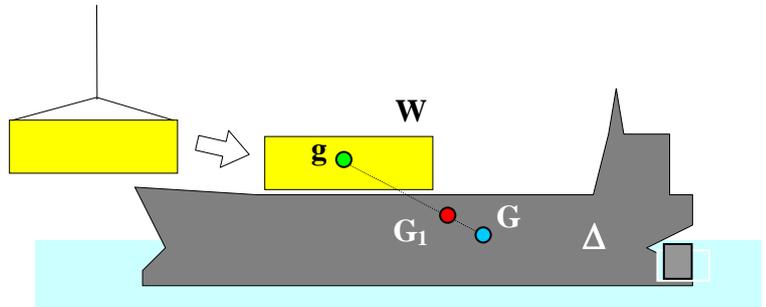


Fig. 1 (a) Adição (remoção) de pesos.

2a. Condição: Remoção de Pesos – “Se um peso é removido de um sistema de pesos, o centro de gravidade do sistema resultante estará no prolongamento da reta que passa pelo centro de gravidade do sistema original e pelo do peso removido, e a uma distância igual à obtida pela divisão do momento do peso removido em relação à posição original do CG, pelo peso resultante”.

Considerando ainda a figura 1(a) vemos que a remoção de peso pode ser considerada como a “colocação” de um peso NEGATIVO. Assim a expressão anterior pode ser usada considerando sinal (-) para W.

$$GG_1 = - W \cdot (g G) / (\Delta - W)$$

3a. Condição: Movimentação de pesos – “Quando um peso de um sistema é movido (Fig. 1 b), o centro de gravidade do sistema se move paralelamente à trajetória do peso movido, de uma distância igual ao momento do peso movido em relação à sua posição original, dividido pelo peso do sistema”.

A expressão algébrica que traduz esta condição é:

$$GG_1 = W \cdot gg_1 / \Delta$$

sendo que a reta GG₁ é paralela a gg₁.

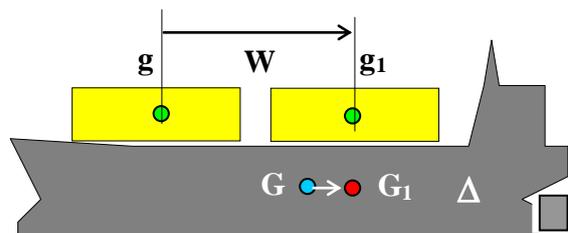


Fig. 1 (b) Movimentação de pesos.

Aplicação geral ao navio

De modo geral os três enunciados vistos podem ser aplicados ao navio com afirmações como as seguintes:

- *Um peso adicionado à parte de vante do navio desloca o centro de gravidade do navio para vante.*
- *A remoção de um peso em posição baixa faz subir o centro de gravidade do navio.*

5.3 – Método de Aplicação aos Navios

A discussão fica simplificada se for dividida em duas etapas:

- a) adição de um peso; b) movimentação do peso a bordo

a) Adição de Pesos

O efeito mais evidente na adição de um peso a um navio é a alteração no deslocamento, a qual acarreta mudança das formas das obras vivas, o que envolve:

- mudança na posição vertical e longitudinal de B (mudança de KB e LCB);
- possível mudança transversal de B; e
- mudança em BML e BMT

Haverá, pois, mudança em GM_T e GM_L mesmo se não houver modificação da posição do centro de gravidade: caso o g do peso adicionado coincida com o G do navio.

No caso mais geral haverá mudanças nos elementos acima e também modificação na posição do centro de gravidade do navio. O resultado final só pode ser determinado pelo exame cuidadoso dos efeitos componentes.

Ao se analisar o efeito decorrente da adição de peso, podemos presumir que a operação ocorre em uma série de etapas; esta não é a maneira mais simples, que será vista depois, mas a melhor para efeito da compressão.

Afundamento Paralelo

Vamos admitir que o navio está flutuando sem banda ou trim, e que o centro de gravidade do peso a ser adicionado não estará, na condição final, no mesmo plano horizontal ou vertical que o G do navio. Admitamos inicialmente, porém, que o peso adicionado tem o centro de gravidade g na mesma altura do G do navio e de forma a que o único efeito seja forçá-lo a afundar para uma nova linha d'água paralela à linha d'água inicial do navio, sem causar modificação no KG do navio. Esta discussão deve ser acompanhada com a figura 2.

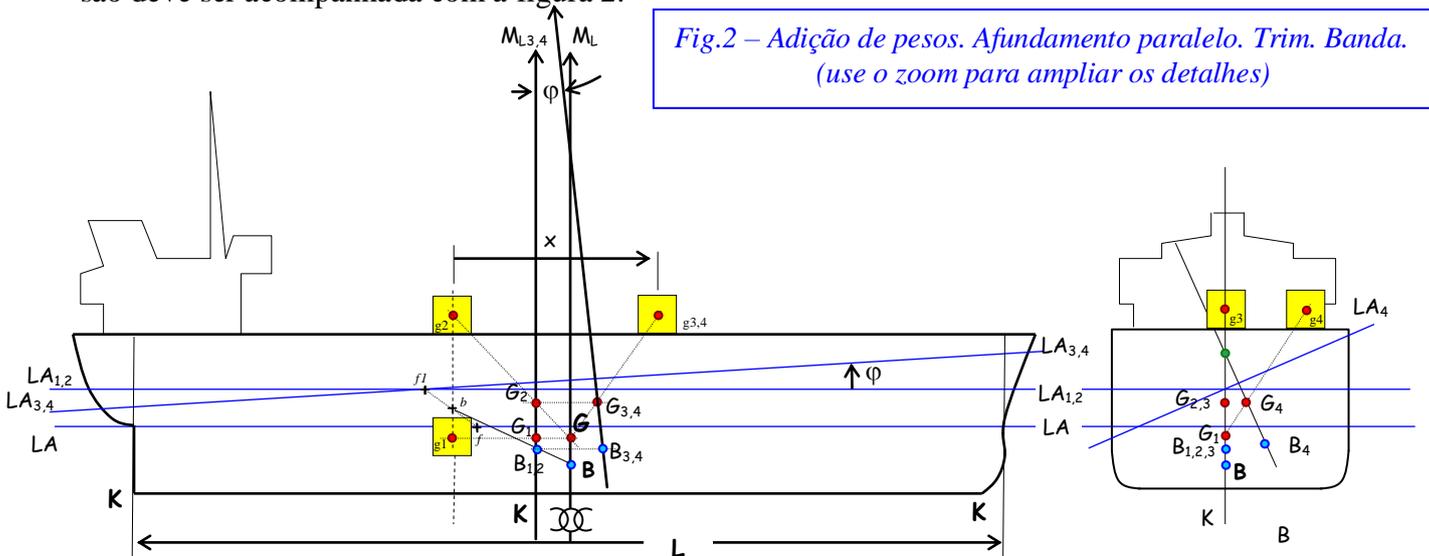


Fig.2 – Adição de pesos. Afundamento paralelo. Trim. Banda. (use o zoom para ampliar os detalhes)

Seja o cg do peso adicional colocado em g_1 , na altura dada por KG, e no plano central longitudinal, e na seção transversal que passa por um certo ponto “b”, tal que o afundamento se dê paralelamente.

Se o peso é pequeno, a flutuação adicional é pequena e o centro de gravidade da flutuabilidade adicional está no CF da linha d'água LA (f). Se o peso e a flutuabilidade adicional forem conside-

ráveis, comparados com o deslocamento na linha d'água LA, deve-se determinar a posição longitudinal do centro de gravidade da flutuabilidade adicional.

Se a trajetória do CF das linhas d'água LA e L_1A_1 for admitida como reta e se a diferença entre as áreas não é grande, pode-se considerar que o centro de gravidade desta "camada" está no ponto médio da reta que une os CF das duas linhas d'água (a saber, f e f_1). Esta é a posição do mencionado ponto "b" onde o peso adicional seria colocado para provocar o afundamento de maneira paralela. Caso contrário será preciso determinar a posição do centro de gravidade na "camada" por um dos métodos já vistos. Na figura 2 o centro de gravidade da "camada" entre LA e L_1A_1 está a meio de ff_1 , reta que une os CF de LA e L_1A_1 ; - fica no mesmo plano transversal do que \underline{b} . O navio passa a flutuar numa linha d'água paralela à inicial; não há mudança de trim porque os momentos longitudinais do peso adicionado e da flutuabilidade adicionada são iguais.

O calado aumenta uniformemente. O aumento de deslocamento provoca, porém, mudança nas características da carena em função deste aumento. Após o afundamento paralelo, o centro de gravidade da "camada" entre LA e L_1A_1 está a ré de \underline{B} , de modo que a nova posição B_1 estará a ré de \underline{B} ; deverá estar também acima de B porque \underline{b} está acima de B. B estará na reta Bb , e a distância BB_1 pode ser calculada pela equação dada para a "1a. Condição", mencionada no item 2.

Os valores de BM_T e BM_L não são os mesmos para as duas linhas d'água LA e L_1A_1 visto que variaram tanto a área da linha d'água como seu momento de inércia e seu volume de deslocamento.

Já vimos que não há variação de KG, mas o valor de LCG varia, porque o peso não foi colocado na posição longitudinal de G e sim mais a ré. GG_1 é uma reta horizontal e seu comprimento, calculado pela equação da 1ª Condição é igual ao da componente horizontal de BB_1 . Isto é necessário porque já dissemos que não há TRIM (o afundamento é paralelo) e, neste caso, a vertical que passa por G passa também por B.

- **Alteração em KG**

Vimos como o afundamento paralelo não alterou KG mas mudou o calado, as posições de B (KB e LCB) e a posição longitudinal de G.

Deslocaremos agora o peso verticalmente para sua posição g_2 ; o efeito principal desta mudança é a alteração de KG; G move-se verticalmente da posição G_1 para G_2 . G_1G_2 é paralela a g_1g_2 e o comprimento G_1G_2 pode ser medido pela equação da 3ª Condição vista no item 2.

É claro que GM_T e GM_L também são afetados.

- **Alteração no TRIM**

Suponhamos que o peso é agora deslocado de g_2 para g_3 . O centro de gravidade do navio também se move de G_2 para G_3 . G_2G_3 pode ser calculado pela equação da 3ª Condição, vista no item 2. O centro de gravidade do navio estaria em G_3 e o de carena em B_2 , de modo que o navio gira em torno de um eixo horizontal sob a ação de um MOMENTO DE TRIM dado pelo produto: (deslocamento) \times (distância longitudinal $B_2 G_3$). O movimento do navio se dará até que B_3 esteja verticalmente abaixo de G_3 .

- **Caso de trim pequeno**

Se a alteração em trim não for excessiva, pode ser calculada dividindo-se o MOMENTO DE TRIM pelo MT_1 correspondente ao deslocamento Δ_1 .

Deve-se observar que a alteração de trim é aplicada às extremidades do navio na proporção de suas distâncias ao centro de flutuação da linha d'água L_1A_1 . Esta afirmação ficará mais clara no próximo item.

- **Caso de trim elevado**

Se o trim for excessivo (principalmente se uma extremidade sair da água, ou se a água atinge o convés) haverá necessidade de efetuar uma nova integração das balizas do navio, usando-se as curvas de BOJEAN e determinar ∇ , Δ e LCB. Poderá ser necessário um processo de aproximações sucessivas, com diferentes linhas d'água inclinadas (traçadas nas curvas de BONJEAN) de modo que venha a ser determinado um valor no qual LCB seja igual à distância B_3 e ao mesmo tempo o deslocamento obtido desta integração seja igual a Δ_1 , correspondente ao calado do navio na linha d'água L_1A_1 .

- **Alteração na banda**

Vamos admitir agora que o peso seja movido transversalmente de g_3 para g_4 . O centro de gravidade do navio move-se paralelamente a g_3g_4 de G_3 para G_4 , e a distância G_3G_4 pode ser calculada da maneira indicada na 3ª Condição, item 2.

Se o navio estiver em equilíbrio sob a ação do momento de emborcamento $W \times (g_3g_4) \cdot \cos\theta$, girará em torno de um eixo longitudinal até que B_4 esteja verticalmente abaixo de G_4 .

- **Banda Pequena**

Se a banda for pequena o conjugado de endireitamento será dado por:

$$\Delta \cdot G_3M_2 \cdot \sin\theta \text{ e o conjugado de emborcamento dado por: } W \cdot g_3g_4 \cdot \cos\theta.$$

Da igualdade dos conjugados teremos a equação já conhecida, que permite determinar a banda:

$$\text{tg } \theta = W \cdot g_3g_4 / \Delta \cdot G_3M_2$$

- **Banda Elevada**

Se o cálculo do ângulo de banda indicar valores maiores do que 8° a solução gráfica deverá ser usada:

- traça-se uma curva dos valores do conjugado $W \cdot g_3g_4 \cdot \cos\theta$ e determina-se a interseção com a curva de estabilidade estática do navio, obtida para valores de Δ_1 e KG_3 ; a interseção das duas curvas indicará a banda como vimos.

5.4 – Aplicação Prática do Método

O método de determinação de trim e banda, apresentado no item anterior, pode ser razoável quando se analisam as conseqüências de embarque e movimentação de um único item. Na prática, a situação é diferente porque o navio pode consumir vários itens (combustível, lubrificantes, víveres, etc.) ou embarcar carga ou lastro em diferentes locais. Seria, pois muito cansativo aplicar o método descrito anteriormente, abordando item por item.

A maneira de simplificar a aplicação do método descrito é sistematizar os cálculos através de uma tabulação, na qual sejam enfocados todos os itens que foram consumidos, adicionados ou movimentados a bordo. A tabela mostrada a seguir é uma tabulação que pode ser usada. Não é demais lembrar que se trata de uma possível tabulação e não necessariamente da única e nem mesmo da melhor. Seu uso é explicado aqui.

	V Volume (m ³)	γ Peso Específ. (ton/m ³)	W Peso (ton)	VCG Posição Vertical do CG (m)	MV Momento Vertical (ton.m)	LCG Posição longitud. do CG (m)	ML Momento Longitud. (ton.m)	TCG Posição transvers. do CG (m)	MT Momento Transvers. (ton.m)	M.I. Sup.Livre (ton.m)
ITEM	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)
Deslocamento Leve	-	-	1900	3,10	58.900	+1,0	1.900	0	0	-
Tanque 1										
Porão 2										
Lastro F										
			Σ_3		Σ_5		Σ_7		Σ_9	Σ_{10}

$$\Delta_{CARREG} = \Sigma W = \dots\dots; \text{ Calado Médio} = \dots\dots; LCB = \dots\dots; LCF = \dots\dots; KM = \dots\dots; MT1 = \dots\dots;$$

$$\text{Correção GM (Sup. Livre)} = \dots\dots; (KG) = \Sigma (\text{MOM. VERT.}) / \Delta_{CARREG} = \dots\dots;$$

$$GM = KM - KG = \dots\dots; (GM)_{CORRIGIDO} = \dots\dots; LCG = \Sigma (\text{MOM. LONG.}) / \Delta_{CARREG} = \dots\dots;$$

$$(BG)_{CARREG} = (LCB)_{CARREG} - (LCG)_{CARREG} = \dots\dots;$$

$$\text{MOM. de TRIM} = \Delta_{\text{CARREG}} \times (\text{BG})_{\text{CARREG}} = \dots\dots\dots; \text{TRIM} = \text{MOM. de TRIM} / \text{MT1} = \dots\dots\dots;$$

$$(\text{H}_{\text{AV}})_{\text{CARREG}} = (\text{H}_{\text{F}})_{\text{C}} + (\text{L}/2 - \text{LCF}) \times \text{TRIM} / \text{L} = \dots\dots\dots$$

$$(\text{H}_{\text{AR}})_{\text{CARREG}} = (\text{H}_{\text{F}})_{\text{C}} - (\text{L}/2 - \text{LCF}) \times \text{TRIM} / \text{L} = \dots\dots\dots$$

Para emprego desta tabela, inicia-se com uma condição de carregamento conhecida; esta condição é definida pelo deslocamento e pela posição do centro de gravidade, a saber: posições vertical, longitudinal e transversal do centro de gravidade do navio nesta condição.

É necessário estabelecer planos de referência para o uso da tabulação, os quais podem ser:

- referência horizontal: em geral é o plano de base;
- referência longitudinal: em geral é a Seção Mestra: - Neste caso os momentos longitudinais serão positivos ou negativos conforme sua colocação a vante ou a ré da seção mestra.
- referência transversal em geral é o plano central longitudinal (momentos + a BE e – a BB).

Em cada linha da tabela entra-se com o peso a ser acrescentado (ou removido) e os braços com relação aos planos de referência.

Assim é que na 1ª linha da tabulação mostrada como exemplo temos a condição de deslocamento leve, 1900t, a posição vertical do centro de gravidade, VCG, de 3,1m acima do plano de base e também a posição longitudinal, LCG, de 1,0m a vante da seção mestra. O centro de gravidade está no plano central de modo que TCG = 0.

As diversas colunas da tabulação são auto-explicativas, como se vê:

- Coluna(1) – volume de um tanque ou porão;
- Coluna(2) – peso específico do produto existente naquele tanque ou porão;
- Coluna(3) – peso do item = Coluna(2) × Coluna(1);
- Coluna(4) – posição vertical do centro de gravidade do item;
- Coluna(5) – momento vertical = Coluna(3) × Coluna(4);
- Coluna(6) – posição longitudinal do centro de gravidade do item;
- Coluna(7) – Momento longitudinal = Coluna(3) × Coluna(6);
- Coluna(8) – posição transversal do centro de gravidade do item;
- Coluna(9) – Momento transversal = Coluna(3) × Coluna(8);
- Coluna(10) – Efeito de superfície livre (será abordado posteriormente).

Uma vez identificadas as colunas vemos que, a partir da condição de carregamento conhecida, pode-se preencher tantas linhas quantas forem os itens acrescentados ou retirados de bordo; é necessário conhecer o peso de cada item e a posição do centro de gravidade do mesmo. Caso se trate de um líquido deve-se conhecer o volume e o peso específico.

Concluída a listagem de todos os itens e efetuados os produtos necessários ao preenchimento das colunas (5), (7) e (9) passa-se aos cálculos indicados no pé da tabela .

A soma dos valores da Coluna (3) dá o deslocamento “carregado”, ou seja o deslocamento que se obtém a partir da condição inicial seguida de todas as retiradas e colocações dos diferentes itens relacionados.

Com este valor de deslocamento “carregado” obtem-se das curvas hidrostáticas os valores dos itens relacionados na tabulação: calado médio, KB, LCF, KM e MT1.

A seguir pode-se calcular KG, como indicado na tabulação: faz-se a soma dos momentos verticais (soma dos elementos da Coluna 5) e divide-se pelo deslocamento “carregado”. O valor de GM é obtido por meio da expressão já conhecida (KB + BM – KG).

O cálculo de LCG é feito de modo análogo: somam-se os momentos longitudinais (coluna 7) e divide-se pelo deslocamento “carregado”.

Temos então condições para calcular o braço para momento de trim, ou seja: BG, o qual é a diferença entre LCB (obtido das curvas hidrostáticas) e LCG, calculado como acabamos de indicar.

O momento que provoca o trim é o produto do deslocamento carregado pelo braço BG.

O Trim é obtido dividindo-se o momento de trim pelo MT1, lido das curvas hidrostáticas. Note-se que pode ser positivo ou negativo.

Caso o LCF seja nulo (o que corresponde à posição do centro de flutuação na seção mestra) o trim se divide igualmente a vante e a ré, somando-se metade do trim em cada extremidade. No caso mais geral LCF é diferente de zero, de modo que os calados a vante e a ré são obtidos de acordo com as expressões constantes do pé da tabulação.

Para entendimento destas expressões é suficiente acompanhar a figura 3. Supõe-se o navio flutuando em quilha paralela com calado H_1 e um embarque de peso que provoca um afundamento para o calado H_2 . Em seguida há um deslocamento do peso embarcado para ré de modo que o calado a ré ($B'R$) se torna maior do que o de vante ($B'V$). Na fig. 3 BB' representa a linha da quilha. A reta VV' é paralela a BB' , de modo que o segmento $V'R = T$ mede o trim (que é a diferença total entre o calado a ré e o calado a vante), e conseqüentemente: **$tg \alpha = \text{trim} / L$** .

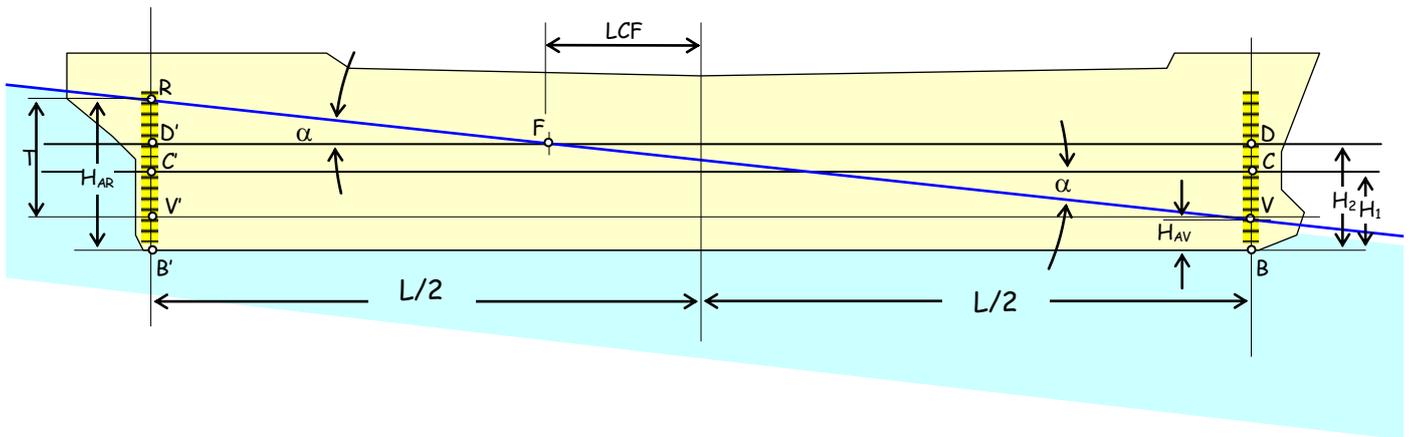


Fig.3 – Calados AV e AR após embarque de pesos a bordo.

Nestas condições temos: $H_{AR} = RB' = H_2 + RD'$, onde: $H_2 = H_F =$ calado no CF após o embarque do peso;

Como: $RD' = RF \times tg \alpha = (L/2 - LCF) \times tg \alpha = (L/2 - LCF) \times TRIM/L \therefore$

$$H_{AR} = H_F + (L/2 - LCF) \times (TRIM) / L$$

Do mesmo modo podemos escrever:

$$H_{AV} = VB = H_2 - DV$$

$DV = FV \cdot tg \alpha = (L/2 + LCF) \cdot tg \alpha = (L/2 + LCF) \cdot (TRIM) / L$

$$H_{AV} = H_F - (L/2 + LCF) \cdot (TRIM) / L$$

Uma vez determinados os valores de calado pode-se estimar a banda do navio após a alteração de pesos a bordo. Caso o somatório da coluna (9) seja diferente de zero temos uma situação na qual o centro de gravidade do navio, após as alterações, não está no plano central longitudinal. Como vimos no item 3 a banda (para valores pequenos) poderá ser determinada pela expressão:

$$tg \alpha = \frac{\Sigma(\text{MOM. TRANSV.})}{\Delta_{CARR} \cdot G_1 M_1}$$

onde: $\Sigma(\text{MOM. TRANSV.}) =$ soma da Coluna (9);

$\Delta_{CARREG} =$ deslocamento “carregado” = soma da Coluna (3);

$G_1 M_1 =$ valor da altura metacêntrica após a alteração de pesos.

5.5 – Efeito de Superfície Livre

5.5.1 – Introdução

Vamos verificar a seguir como um tanque parcialmente cheio afeta a estabilidade de um navio.

Procuraremos mostrar que:

- a posição do tanque a bordo *não influi*.
- a densidade do líquido no tanque *influi*.

Este efeito conhecido como “EFEITO DE SUPERFÍCIE LIVRE”, até certo ponto é intuitivo. A observação de uma viatura em uma rodovia, contendo carga móvel nos mostra que a mesma toma inclinações bem acentuadas quando efetua curvas. Exemplos típicos são os ônibus de passageiros, ou caminhões com carga suspensa, ou mesmo navios com carga estivada sem peação.

Procuraremos indicar quais os efeitos mais importantes da Superfície Livre e como calcular este efeito.

5.5.2 – Efeito na Estabilidade Inicial

Até este ponto, o estudo da estabilidade admitiu que todos os pesos de bordo permaneciam na mesma posição para qualquer banda do navio. Quando há carga geral, composta de itens sólidos com boa peação, é possível garantir esta situação. Já, considerando tanques parcialmente cheios, a hipótese não é necessariamente válida.

A causa fundamental que faz com que um tanque com superfície livre afete a estabilidade do navio é o fato de que, quando o navio recebe uma inclinação, o centro de gravidade do líquido não permanece na mesma posição em que estava com o navio sem banda. Ele se move.

É claro que quando o tanque está completamente cheio, a posição do centro de gravidade do líquido não muda. A presença de líquidos em tanques parcialmente cheios é que proporciona a aparição do “*Efeito de Superfície Livre*”. As conseqüências na estabilidade serão vistas neste item.

Consideremos a Fig. 4(a) onde certo tanque, considerado propositalmente fora do plano central, tem superfície livre. Nesta fase vamos supor que a banda seja pequena.

Quando o navio aderna, a superfície do líquido permanece horizontal: toma a posição $\omega_1 l_1$. O centro de gravidade do líquido desloca-se de b para b_1 . Observe-se que bb_1 é paralela a gg_1 .

Quando o navio estava sem banda, o líquido no tanque exercia um momento de emborcamento igual a seu peso multiplicado pela distância transversal ao plano central. Na posição adernada este momento de emborcamento aumenta; o aumento do conjugado de emborcamento, devido à propriedade do líquido de alterar a posição relativa de sua superfície é dado pelo produto:

Peso do líquido $\times (br)$, sendo

br é a barra paralela a W_1L_1 e $\omega_1 l_1$

Chamemos de:

W_ω = peso do líquido no tanque;

V_ω = volume do líquido no tanque;

N = volume específico do meio de flutuação
(ft^3/t ou m^3/t);

γ = relação entre o peso específico do líquido no tanque e o do meio de flutuação.

$$\text{Deste modo: } W_\omega = V_\omega / (N / \gamma) = \gamma (V_\omega / N)$$

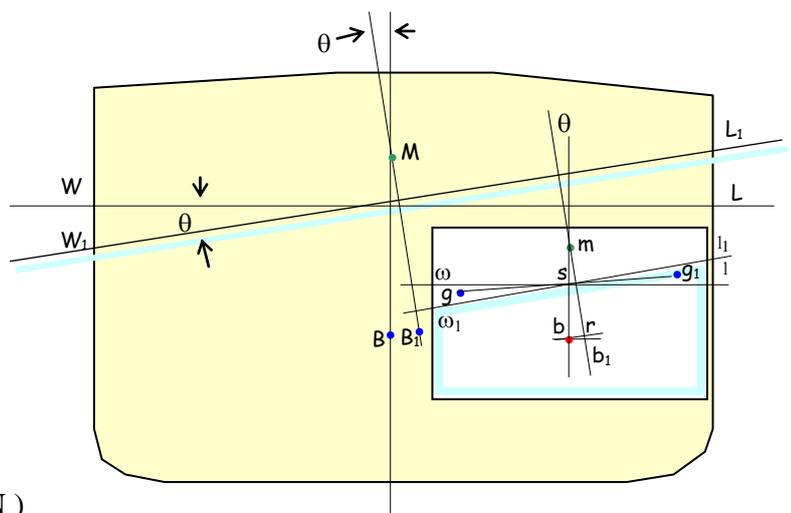


Fig. 4 (a) – Efeito de Superfície Livre

Assim sendo a variação no conjugado de emborcamento do líquido é dada por: $W_\omega \cdot (br)$

Esta variação é igual ao momento da cunha ($l s l_1$) com relação ao centro de gravidade da cunha ($\omega s \omega_1$), pois o líquido foi deslocado da posição ($\omega s \omega_1$) para a posição ($l s l_1$). Os volumes destas cunhas são iguais porque não há variação de volume no tanque.

Para uma banda pequena a variação do MOMENTO DO VOLUME do líquido é medida pela seguinte expressão:

$$\int_0^C (h/2) \cdot (h \operatorname{tg} \theta) \cdot dx \cdot (4/3)h = \operatorname{tg} \theta \int_0^C (2/3)h^3 dx$$

onde:

h = meia largura do tanque – variável em função de x

C = comprimento do tanque (limite para a integração)

A expressão acima se justifica pelo seguinte:

Área \underline{A} da base triangular ($\omega s \omega_1$) = $(1/2) \cdot h \cdot \omega_1 \omega$;

mas $\omega_1 \omega = h \operatorname{tg} \theta$;

Logo a ÁREA $\underline{A} = (1/2)h(h \operatorname{tg} \theta)$

Deste modo o volume elementar $dV = (1/2) h (h \operatorname{tg} \theta) \cdot dx$; ao mesmo tempo devemos lembrar que: $gg_1 = (4/3)h$

Como o Momento Elementar = (Volume Elementar) . (gg_1) fica justificada a integral indicada acima. Por outro lado, chamando de \underline{i} o Momento de Inércia da área da superfície do líquido em relação a um eixo longitudinal passando pelo centróide da superfície livre tanque temos:

$$i = \int_0^C (2/3)h^3 dx$$

Logo, a Variação do Momento do Volume = $V\omega \cdot (br) = i \cdot \operatorname{tg} \theta$

Já vimos que a variação no conjugado de emborcamento devida ao movimento do líquido é medida pelo produto: $W\omega \cdot (br)$

Mas vimos também que: $W\omega = \gamma \cdot V\omega / N$, de modo que a variação do conjugado vista acima passa a ser:

$$W\omega \cdot (br) = \gamma \cdot V\omega \cdot (br) / N \dots\dots\dots (I)$$

Mas vimos ainda que o produto $V\omega \cdot (br)$ se mede por:

$$V\omega \cdot (br) = i \cdot \operatorname{tg} \theta$$

de modo que a integração (I) se torna:

$$W\omega \cdot (br) = \gamma i \cdot \operatorname{tg} \theta / N = \text{variação no conjugado de emborcamento}$$

Por outro lado, a variação no braço de endireitamento (GZ) devida ao efeito de superfície livre é igual a: MOMENTO TRANSVERSAL / deslocamento, de modo que podemos escrever:

$$\delta(GZ) = W\omega \cdot (br) / \Delta = \gamma i \cdot \operatorname{tg} \theta / \nabla \dots\dots\dots (II)$$

uma vez que: $\Delta \cdot N = \nabla$.

Quando a banda é pequena podemos escrever:

$$GZ = GM \cdot \operatorname{sen} \theta \text{ e considerando um certo } \theta \text{ temos: } \delta(GZ) = \operatorname{sen} \theta \cdot \delta(GM) \dots\dots\dots (III)$$

Igualando as equações (II) e (III), temos:

$$\operatorname{sen} \theta \cdot \delta(GM) = \gamma i \cdot \operatorname{tg} \theta / \nabla. \text{ Como } \theta \text{ é pequeno } \operatorname{sen} \theta = \operatorname{tg} \theta, \text{ logo:}$$

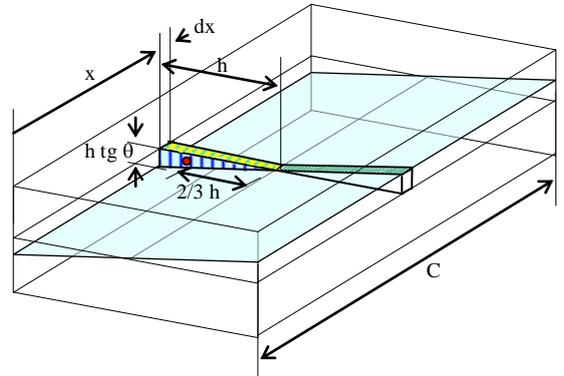


Fig. 4 (b) – Efeito de Superfície Livre

$$\delta(GM) = \gamma \cdot i / \nabla$$

Já sabemos que $GM = KM - KG$. Se $\nabla = \text{cte.}$ e $KM = \text{cte.}$ teremos: $\delta(GM) = -\delta(KG)$

$$GG_{\nabla} = -\delta(KG) = \gamma \cdot i / \nabla \dots\dots\dots (IV)$$

O efeito da superfície livre no tanque é o mesmo que existiria se o centro de gravidade do navio estivesse em G_{∇} , situado acima de G , isto é: o efeito seria equivalente àquele produzido pela elevação do ponto G para uma posição virtual G_{∇} . (*)

(*) *Trata-se de uma elevação virtual porque, na realidade, o centro de gravidade do navio não muda de posição. O que acontece é que o efeito da superfície livre do tanque na estabilidade pode ser equiparado a uma elevação do ponto G , sendo esta a maneira usual de abordar o problema, embora se saiba que o centro de gravidade tenha permanecido no mesmo lugar.*

A EQ. (IV) mostra que, para deslocamento constante, a grandeza da elevação virtual de G depende de:

- i = momento de inércia da área da superfície livre com relação ao eixo longitudinal que passa pelo centróide da superfície;
- γ = relação entre a densidade do líquido e a do meio em que o navio flutua;
- ∇ = volume da carena

A equação (IV) mostra também que a elevação virtual do centro de gravidade não depende da posição do tanque a bordo do navio.

5.5.3 – Conseqüências da Superfície Livre

É evidente que a conseqüência da superfície livre, provocando uma condição análoga à elevação do centro de gravidade, é a diminuição do GM de uma grandeza igual a GG_{∇} .

Se houver vários tanques com superfície livre o efeito de cada um deles é computado separadamente, de tal modo que:

$$G_{\nabla}M = GM - \Sigma (GG_{\nabla}), \text{ onde: } \Sigma (GG_{\nabla}) = \Sigma (\gamma \cdot i) / \nabla \text{ sendo:}$$

GM = altura metacêntrica sem superfície livre, para as mesmas condições de carregamento.

$G_{\nabla}M$ = altura metacêntrica existente quando há vários tanques com sup. livre

O leitor deve observar que na tabulação apresentada no item 4 deste capítulo a última coluna é referente ao efeito da superfície livre. Assim, se algum item da tabulação representa um tanque com superfície livre deve-se lançar na coluna 10 da tabulação o momento de inércia da superfície com relação a um eixo longitudinal. Conhecendo os valores de i pode-se calcular os valores de GG_{∇} para os diversos tanques por meio da Equação (IV) e somá-los como indicado acima. Este procedimento possibilitará o cálculo da “CORREÇÃO DE GM (sup. livre)” indicada no pé da tabulação do item 4.

Conseqüência na Experiência de Inclinação

Quando vimos a preparação para esta Experiência foi lembrado que havia necessidade de precauções com os líquidos nos tanques.

A subida virtual de G por causa da superfície livre é que provoca a necessidade da experiência de inclinação sem superfície livre nos tanques; caso não seja possível eliminar a superfície livre, é preciso fazer com que os tanques que tenham líquido fiquem com o nível a cerca de 50% de modo que se possa computar claramente a correção necessária.

Consequência da forma irregular da superfície

Se a forma da superfície onde o líquido está livre for de tal natureza que haja regiões onde apareçam objetos protundindo, deve-se efetuar uma correção no efeito. O exemplo típico é o de uma praça de máquinas alagada até certo nível, na qual fiquem aparecendo equipamentos que excluem água de certos trechos da superfície. Neste caso usa-se o valor ($\mu_s \cdot i$) em vez de (i), onde μ_s é chamada permeabilidade superficial e representa a relação entre a área efetiva e a área total do compartimento.

Resultado da subdivisão dos tanques

A intensidade do efeito da superfície livre de um tanque pode ser diminuída pela redução do momento de inércia da superfície livre do tanque, dividindo-se a superfície do tanque por uma ou mais anteparas longitudinais.

No caso da fig. 5, se houver uma antepara H separando os dois tanques o efeito da superfície livre será soma dos 2 efeitos, ou:

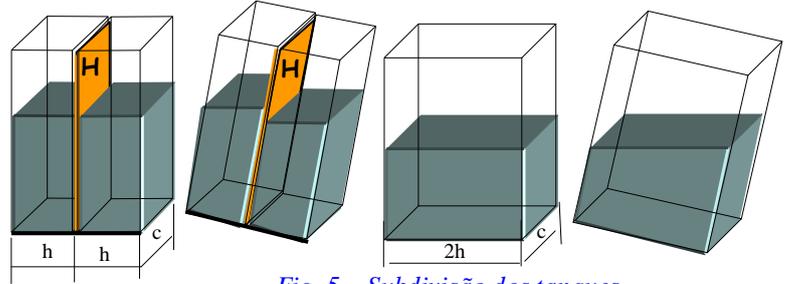


Fig. 5 – Subdivisão dos tanques

$$i_1 = 2 \times [(1/12) h^3 n] = (1/6) h^3 n$$

Caso não haja a antepara, ou seja feita nela uma abertura, o efeito será o de uma superfície única, ou:

$$i_2 = (1/12) \cdot (2h)^3 \cdot n = (8/12) h^3 n \therefore i_2 = 4i_1$$

A subida virtual do centro de gravidade no 2º caso é quatro vezes maior do que quando existe a antepara.

A condição se aplica igualmente no caso da Fig. 6. Se a válvula V for aberta, em vez de termos duas superfícies livres, agindo em cada tanque, teremos uma única cujo momento de inércia deve ser computado com relação ao eixo central longitudinal. É claro que o efeito será análogo ao que foi avaliado acima, com auxílio da Figura 5.

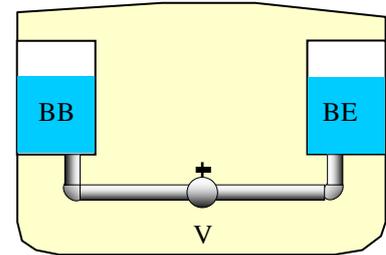


Fig. 6 – Efeito de dois tanques interligados

5.5.4 – Influência da Superfície Livre na Curva de Estabilidade Estática

- **Inclinação na origem**

O primeiro efeito é diminuir a inclinação da curva na origem devido à diminuição de GM, a qual é igual à elevação virtual GG_V .

- **Bandas elevadas**

Não é correto diminuir todos os braços de endireitamento GZ, para valores altos de banda, como se a elevação virtual GG_V fosse uma elevação real, decorrente da mudança efetiva de um peso conhecido. O procedimento é outro.

Em qualquer condição de carregamento na qual são conhecidos os tanques com superfície livre, calcula-se a redução do braço de endireitamento decorrente da influência de cada um deles. Obtem-se a redução total e subtraí-se este valor do braço de endireitamento na mesma inclinação. Obtem-se, assim, a curva de estabilidade estática para o navio na condição especificada de carregamento, incorporando-se o efeito da superfície livre.

Podem parecer que a descrição do procedimento feita acima conduzirá exatamente a um mesmo valor GG_V , já que o efeito de superfície livre só depende do momento de inércia da área da superfície livre e do peso específico do líquido. Acontece porém que se os tanques estiverem razoavelmente cheios ou vazios a forma da superfície muda quando a banda é elevada, e o valor do momento da inércia varia, de modo que a elevação virtual do ponto G também será afetada.

Quando em determinada condição de carregamento todos os tanques têm cerca de 50% da capacidade este efeito não ocorre e a correção devida à superfície livre pode não ser muito diferente quando a banda é elevada. Mesmo nesta situação é importante que os responsáveis pelo estudo das alterações impostas pela superfície livre à Curva de Estabilidade analisem as formas de cada tanque buscando saber se haverá ou não variação sensível no valor do momento de inércia da área da superfície livre para condições de banda elevada.

O efeito descrito acima é chamado por alguns de “embolsamento”. Em função da possibilidade de ocorrer o “embolsamento” é que se recomenda que na Experiência de Inclinação os tanques fiquem com 50% da carga, caso não seja possível eliminar toda a superfície livre.

Quando um tanque está com menos de 5% ou mais do que 95% de sua capacidade é usual desprezar o efeito da superfície livre, em decorrência do que foi mencionado acima.

5.5.5 – Efeitos Dinâmicos

Quando um navio joga, o líquido é movimentado e no fim de cada movimento choca-se com a estrutura produzindo um efeito análogo a martelo hidráulico. Para diminuir este efeito são implantadas anteparas com grandes aberturas, chamadas Anteparas Diafragma, que têm a finalidade de atenuar a intensidade do choque do líquido contra a estrutura. As anteparas diafragma têm apenas este propósito. Elas não afetam a subida virtual do centro de gravidade, ou seja, não atenuam o efeito de superfície livre.

5.5.6 – Cargas Móveis e Suspensas

As cargas tais como grãos, granéis etc., podem correr com o jogo do navio. Eles não provocam um efeito análogo à do líquido com superfície livre, mas podem provocar banda permanente, caso sofram deslocamento. Por esta razão os navios que transportam estas cargas devem incorporar em sua estrutura condições para atenuar o possível deslocamento de carga. Caso o navio não seja dotado deste recurso é possível completar o carregamento dos porões com sacos contendo grãos para dificultar o movimento da carga.

As cargas suspensas são consideradas como se tivessem o centro de gravidade no ponto de onde estão penduradas. Assim uma carga apoiada no convés tem o centro de gravidade pouco acima do mesmo; caso esta carga seja içada por um pau de carga considera-se (para efeito de estudo de estabilidade) que o centro de gravidade foi transferido para a extremidade do pau de carga do qual pende a carga.

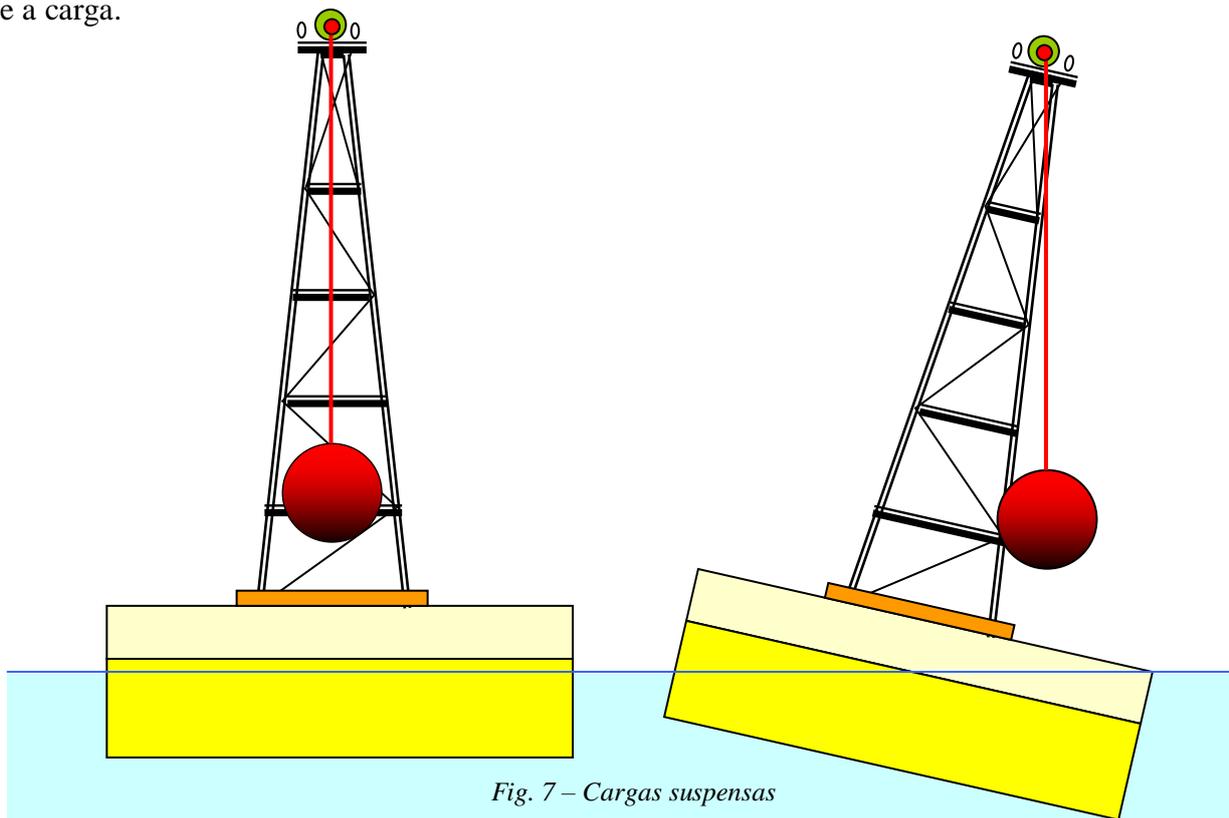


Fig. 7 – Cargas suspensas

6. – EQUILÍBRIO DE CORPOS PARCIALMENTE FLUTUANTES.

6.1. – INTRODUÇÃO

Até agora consideramos o equilíbrio de corpos que estavam inteiramente flutuantes. Acontece que há ocasiões em que o navio está com seu peso parcialmente equilibrado por certa quantidade de líquido que desloca e parcialmente por contato com uma superfície sólida resistente. Pode-se dizer que neste caso o navio está em condição PARCIALMENTE FLUTUANTE porque, em parte, seu equilíbrio depende da flutuabilidade e em parte da reação do apoio no qual toca. Na prática, esta situação ocorre quando o navio está encalhado, assentado junto ao cais na baixa da maré, ou está sendo docado (após a entrada ou antes da saída do dique) e no lançamento. Veremos apenas as características mais significativas deste problema.

6.2. – CASO PARTICULAR: FORÇA DE REAÇÃO DE ENCALHE NO PLANO CENTRAL.

Suponhamos um navio parcialmente flutuante em contato com o solo em toda a extensão do fundo. As forças que atuam no navio são:

o peso Δ – aplicado em G

o empuxo E – aplicado em B

a reação R – aplicada em K

Para que haja equilíbrio é preciso

que a seguinte equação seja satisfeita:

$$\Delta = E + R$$

sendo $E = \Delta_1$ a força do empuxo quando

o navio está com a linha d'água $L_1 A_1$

(após o encalhe).

$$\Delta - (\Delta_1 + R) = 0 \text{ ou: } R = (\Delta - \Delta_1)$$

Para efeito de raciocínio, suponhamos que um peso igual a R seja *retirado* de bordo; o navio voltaria a flutuar normalmente, sem contato com o fundo, na linha d'água $L_1 A_1$.

Segundo este raciocínio podemos considerar que o “peso” do navio está dividido em 2 parcelas:

- a primeira, igual a $(\Delta - \Delta_1)$, tendo ponto de aplicação no plano central, no ponto K , que é o ponto de aplicação da reação R do solo;
- a segunda parcela, igual a Δ , que terá seu ponto de aplicação em G_v .

Como K está abaixo de G , G_v deverá estar acima de G . Nota-se que G é a posição do centro de gravidade do navio antes de ter tocado no solo; esta posição *não* mudou pelo fato do navio haver tocado no solo.

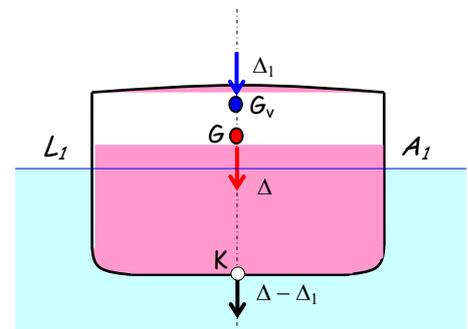
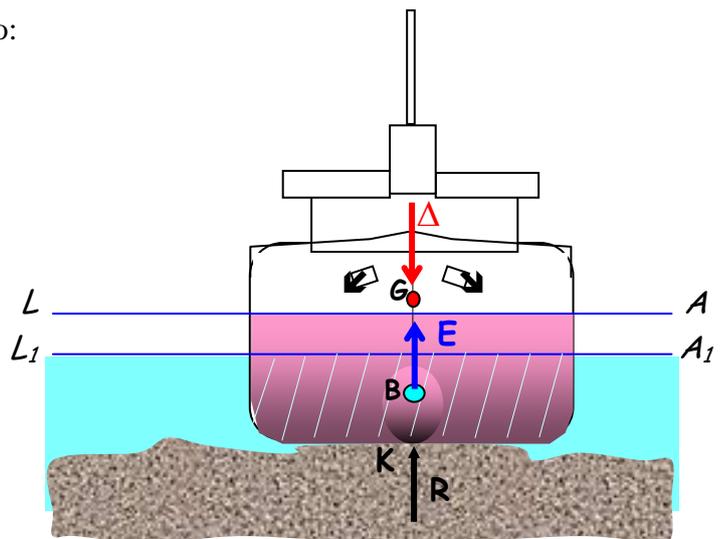


Fig. 1 – Encalhe no plano central. Elevação virtual de G devida ao encalhe.

Após esta divisão hipotética do peso do navio em 2 parcelas, teremos aplicadas em K duas forças iguais e opostas: R e $(\Delta - \Delta_1)$, as quais se anulam para efeito de análise. A altura KG_v pode ser obtida calculando-se o somatório de momentos estáticos com relação a K:

$$\Delta \cdot KG = \Delta_1 \cdot KG_v \text{ e então:}$$

$$KG_v = \Delta \cdot KG / \Delta_1 \dots\dots\dots (I)$$

Sendo M_1 o metacentro do navio na linha d' água L_1A_1 tem-se para valor da altura metacêntrica: $G_vM_1 = KM_1 - KG_v$ e, portanto:

$$G_vM_1 = KM_1 - \Delta \cdot KG / \Delta_1 \dots\dots\dots (II)$$

Na equação (I) o numerador da fração é constante e o denominador Δ_1 diminui com o decréscimo do calado, aumentando o valor de KG_v . Quando KG_v iguala KM_1 , G_vM_1 será nulo e o navio fica instável; poderá emborcar com um pequeno esforço a menos que haja uma sustentação lateral (importante quando na docagem em dique seco).

CONCLUSÃO: O navio parcialmente flutuante se comporta como um navio do qual houvesse sido retirada da linha de base, um peso R igual à reação do solo sobre o navio.

6.3. – CASO MAIS GERAL: FORÇA DE REAÇÃO DE ENCALHE FORA DO PLANO CENTRAL

Se a força de reação de apoio não estiver na mesma vertical do centro de gravidade, haverá um deslocamento virtual do ponto G nos sentidos transversal e longitudinal. Haverá uma inclinação real do navio no sentido transversal e longitudinal. A banda e o trim dependem dos valores do momento de emborcamento e do momento do trim.

Vamos analisar estas duas condições. Consideramos a fig.2, na qual temos as seguintes grandezas:

y_p = distância transversal do ponto de aplicação da reação de apoio no fundo ao plano central;

y_v = distância transversal do ponto G_v , ao plano central;

y = distância do centro de gravidade do navio ao plano central; - (não mostrada na figura, já que é nula se o navio estava inicialmente ereto - apumado);

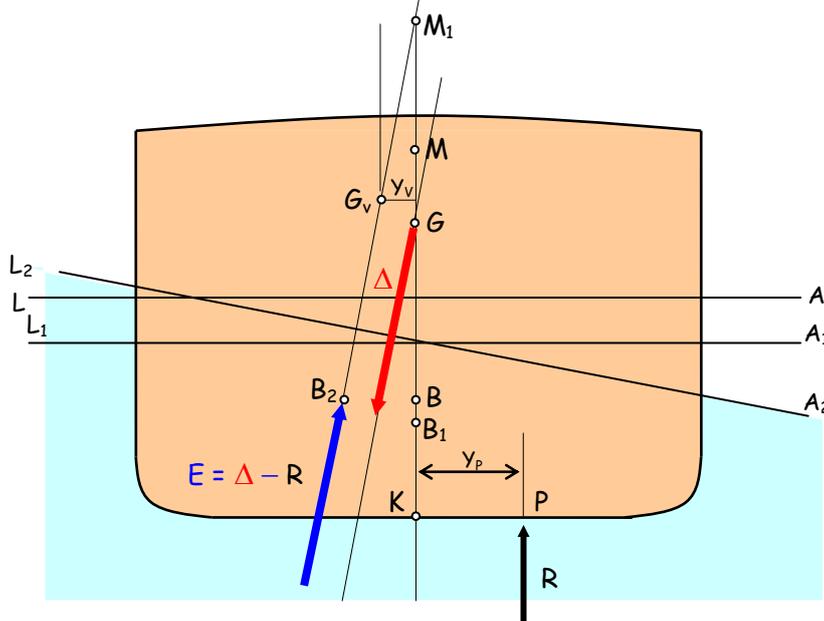


Fig. 2 – Conseqüência da reação de apoio fora do plano central.

Considerando positivas as distâncias a BE e negativas aquelas a BB e lembrando que o momento resultante é igual à soma dos momentos componentes, podemos escrever a equação abaixo, com auxílio da Fig.2:

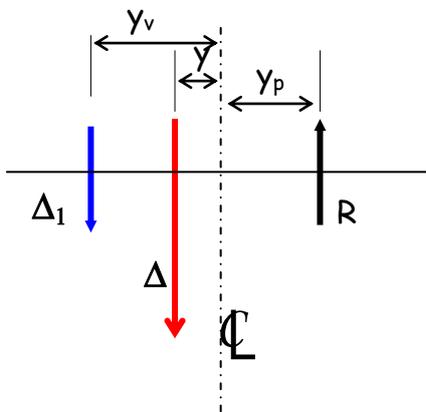
$$\Delta \cdot y = (\Delta - \Delta_1) \cdot y_p + (\Delta_1 \cdot y_v) \dots\dots\dots (a)$$

Realmente: a figura mostra que o peso do navio Δ ficou equilibrado por duas forças:

----- R = $(\Delta - \Delta_1)$ aplicada no ponto P, afastado y_p do plano diametral e

----- Δ_1 aplicado no ponto G_v , afastado y_v do plano diametral.

Deste modo, se o peso do navio Δ estava, antes do encalhe, aplicado a uma distância y do plano diametral, fica-se com a disposição mostrada abaixo:



Como (MOM. RESULT.) = (Σ MOM. DAS COMP.)

$$\Delta_1 \cdot y_v = \Delta \cdot y - R \cdot y_p \dots$$

$$\Delta \cdot y = \Delta_1 \cdot y_v + R \cdot y_p \dots$$

$$\Delta \cdot y = \Delta_1 \cdot y_v + (\Delta - \Delta_1) \cdot y_p$$

que reproduz a equação (a).

Dela se obtém:

$y_v = [\Delta \cdot y - (\Delta - \Delta_1) y_p] / \Delta_1$

O efeito da reação do solo fora do plano diametral é equivalente a um movimento virtual do Centro de Gravidade no sentido transversal igual a y_v .

Caso de Bandas Pequenas

O valor aproximado do ângulo de inclinação, para pequenas bandas, pode ser obtido da seguinte igualdade:

$$\Delta_1 \cdot (G_v M_1) \cdot \text{sen}\theta = \Delta_1 \cdot y_v \cdot \text{cos}\theta \dots$$

$\text{tg } \theta = y_v / G_v M_1$	onde: $G_v M_1 = KM_1 - KG_v$
-------------------------------------	-------------------------------

sendo KM_1 = altura do metacentro acima da linha de base correspondente ao deslocamento Δ_1 , altura esta que pode ser obtida das Curvas Hidrostáticas.

Observa-se que Δ_1 é o deslocamento quando o navio flutua na linha d'água $L_1 A_1$.

Observar que, da fig.2, o Conjugado de Emborcamento é:

$$CE = R \cdot \text{cos}\theta \cdot y_p$$

Como $R = (\Delta - \Delta_1)$, temos $CE = (\Delta - \Delta_1) \cdot y_p \cdot \text{cos}\theta$

A equação (a) mostra que quando $y = 0$, ou seja, quando o navio não tem banda antes do encalhe, $|(\Delta - \Delta_1) \cdot y_p| = |\Delta_1 \cdot y_v|$ de modo que o valor do Conjugado de Emborcamento pode ser dado pela expressão:

$$CE = R \cdot y_p \cdot \cos\theta = (\Delta - \Delta_1) \cdot y_p \cos\theta = \Delta_1 \cdot y_v \cdot \cos\theta$$

Para o Conjugado de Recuperação temos expressão geral: $CR = \Delta \cdot GM \cdot \text{sen}\theta$

Como após o encalhe: deslocamento = Δ_1 e $GM = G_v M_1$ passamos a ter:

$$CR = \Delta_1 \cdot (G_v M_1) \cdot \text{sen}\theta$$

Igualando as expressões de CR e CE temos:

$$\Delta_1 \cdot y_v \cdot \cos\theta = \Delta_1 \cdot (G_v M_1) \cdot \text{sen}\theta \quad \therefore$$

$$\text{tg}\theta = y_v / G_v M_1$$

Caso de Bandas Elevadas

Se o valor da banda obtido da forma acima indicada for maior que 8° , o ângulo de inclinação poderá ser determinado por meios gráficos. Traça-se a Curva de Estabilidade para o deslocamento Δ_1 e altura KG_v e, a seguir, a curva que representa o momento de emborcamento, o qual é dada pela expressão:

$$(M.E) = \Delta_1 \cdot y_v \cdot \cos\theta$$

A interseção das duas curvas dará o ângulo de banda no qual o navio parcialmente flutuante irá permanecer.

Avaliação dos Valores do Trim

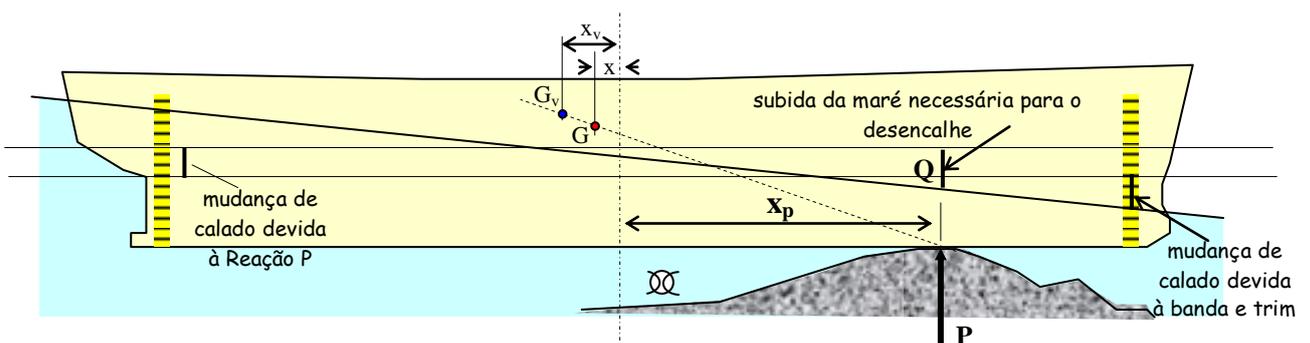


Fig. 3 – Variação de trim devido ao encalhe.

Caso de Trim Pequeno

Consideremos a Fig.3, com auxílio da qual podemos definir:

x = distância do centro de gravidade do navio à seção mestra;

x_p = distância da reação de apoio P à seção mestra;

x_v = distância do ponto G_v à seção mestra;

Considerando positivas as distâncias a vante da seção mestra e negativas aquelas a ré, podemos igualar o momento longitudinal do peso do navio à soma dos momentos componentes e escrever:

$$\Delta \cdot x = (\Delta - \Delta_1) \cdot x_p + \Delta_1 \cdot x_v$$

Esta equação presume as seguintes condições (bastante parecidas àquelas vistas no item 6.2):

- O peso total Δ do navio está aplicado no ponto G, a uma distância x da seção mestra;
- A reação de apoio P, que é igual a $(\Delta - \Delta_1)$, está aplicada a uma distância x_p da seção-mestra;
- O navio tem o deslocamento Δ_1 quando flutua na linha d'água L_1A_1 após o encalhe, e a força Δ_1 , está aplicada no G_v , a uma distância x_v da seção mestra.

- Da expressão obtida acima podemos escrever a equação que dá o valor da x_v :

$$x_v = [\Delta \cdot x - (\Delta - \Delta_1) \cdot x_p] / \Delta_1$$

O procedimento a ser seguido para a aplicação desta equação é o seguinte:

- (a) com o deslocamento Δ_1 obtem-se das Curvas Hidrostáticas o valor de $(LCB)_1$ e de $(MT1)$;
- (b) Calcula-se então a mudança aproximada de trim por meio da razão:

$$TRIM = (\text{Momento de Trim}) / MT1$$

Caso de Trim Elevado

Se o trim calculado como descrito for suficientemente grande para que o convés mergulhe ou o fundo emerja, é necessário usar as curvas de BONJEAN, traçar uma série de linhas d'água inclinadas e efetuar integrações para obter um volume LCB_1 , tal que B_1 fique na mesma vertical do que G_v .

6.4 – ESTABILIDADE DURANTE A DOCAGEM

- Docagem Normal

PORTA BATEL -dique alagado - porta flutua - porta retirada da soleira - navio entra no dique - porta lastrada assenta na soleira e batentes- dique esgotado - navio assenta nos picadeiros - dique seco

Quando um navio é docado, repousa sobre uma fileira de blocos de madeira alinhados ao longo da quilha; se o navio se apóia em toda sua extensão nos blocos, a reação de apoio pode ser considerada na mesma vertical do que o centro de gravidade do navio. Não há banda nem trim.

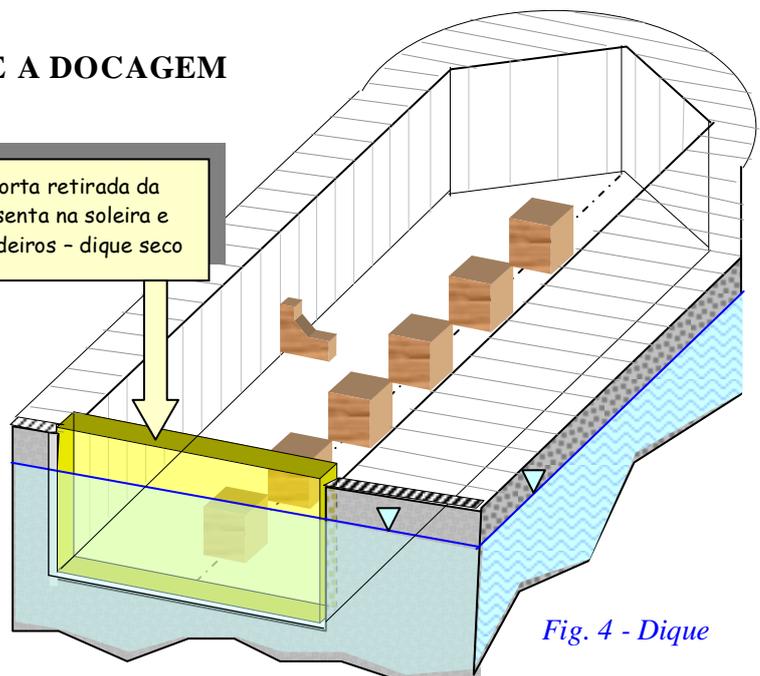


Fig. 4 - Dique

Mesmo no caso ideal, o navio fica instável antes de deixar de ser um corpo parcialmente flutuante e ficar somente apoiado no picadeiro; isto quer dizer que, num calado menor do que aquele no qual foi docado, o valor de $(G_v M_1)$ torna-se nulo e num valor de calado ainda menor poderá ter valor negativo.

Se o navio tiver as formas de um mercante usual, podem ser instaladas fileiras de blocos paralelos àqueles destinados a suportar a quilha, e não haverá problema.

Se o navio tiver forma afilada, como no caso de navios rápidos de combate, só se usa, normalmente, uma fileira de blocos de madeira ao longo da quilha. Nestas condições, na ocasião em que $G_v M_1$ for nulo, o navio poderá emborcar com esforços transversais pequenos; assim, é necessário colocar escoras laterais ou blocos de madeira com a mesma forma da carena, em ambos os lados da fileira central de picadeiros.

Uma prática possível é calcular o valor de $G_v M_1$ a intervalos de calado de ordem 30 a 50 cm e fazer um gráfico dos valores de $G_v M_1$, em função do calado, determinando-se o valor de H para o qual $G_v M_1 = 0$, ou seja, qual o calado no qual o navio ficará instável. Os apoios laterais deverão ser instalados antes de se ter este calado.

Se o navio a ser docado *tem* trim, encosta inicialmente no ponto de maior calado; enquanto a água é bombeada para fora do dique, o navio gira sobre o ponto de contato até encostar toda a quilha na fileira central de blocos.

Se o trim é grande, a reação no ponto de contato pode atingir valores tais que o navio se torne instável ($G_v M_1 = 0$) antes da quilha se apoiar inteiramente sobre a fileira de blocos de docagem. Para evitar isto, é usual reduzir o trim para menos de 1% do comprimento antes de iniciar a docagem.

6.5 – ENCALHE

Se o navio encalha ao longo de toda a quilha, a reação do apoio R é normalmente considerada diretamente abaixo do centro da gravidade do navio; as condições são consideradas análogas às de um navio docado.

É necessário calcular a variação de $(G_v M_1)$ com a mudança de maré, o que se faz como indicado no item 6.2.

Casos mais Complexos

Os casos usuais de encalhe são mais complexos do que aqueles descritos acima. Em geral a reação R está à vante ou à ré do ponto G e não está no plano central de modo que haverá banda e trim.

Há necessidade de soluções rápidas porque uma solução aproximada obtida rapidamente é melhor do que outra mais exata, mas cujo resultado seja obtido após o sinistro.

Hipóteses Simplificadoras

(1ª) – O Centro de Flutuação está na seção mestra de modo que o trim será distribuído igualmente à vante e à ré;

(2ª) – A alteração em Δ devida ao trim é desprezível;

(3ª) – As mudanças nos valores de MT1 e TPI entre Δ e Δ₁ são desprezíveis.

Usando estas hipóteses simplificadoras poderemos empregar um método de cálculo aproximado, com auxílio da figura 3, na qual a reação de apoio devida ao encalhe, P, está à vante da seção mestra. As seguintes expressões são obtidas:

- Variação no calado médio em virtude de P; $\delta H_m = P / TPI$ (A)

- Momento de trim = $P \cdot x_p$

- Variação total de trim = $(P \cdot x_p) : MT1''$

- Variação de calado devido ao trim no ponto de encalhe:

$$\delta H^T = (x_p/L) \cdot (P \cdot x_p) / MT 1'' = P \cdot (x_p)^2 / L \cdot MT 1'' \dots\dots\dots (B)$$

A variação total do calado no ponto de encalhe é Q, ou seja, igual à variação na maré necessária para a ocorrência do desencale, como mostra a fig.3. Esta grandeza é igual à variação no calado médio em virtude de P (valor A) somada à variação no calado devida ao trim (valor B), de modo que podemos escrever:

$$Q = (P/TPI) + P(x_p)^2 / L.MT 1'' \text{ ou seja: } P = Q / [(1 / TPI) + (x_p)^2 / L.MT 1''],$$

Conhecido o valor de P, calcula-se KG_v e G_vM₁, com as equações (I) e (II) do item 6.2. Com estes valores verifica-se a necessidade de reduzir o KG do navio. Pode-se ainda estimar H_{AV} e H_{AR} e verificar a possibilidade da água atingir o convés.

Caso o ponto do encalhe esteja fora do plano central, precisamos considerar também o efeito da banda, o que se faz da maneira indicada a seguir:

Chamando y_p a distância da força P ao plano central temos:

- Conjugado de Emborcamento: (C.E) = $P \cdot y_p \cdot \cos\theta$

- Conjugação de Recuperação: (C.R) = $\Delta \cdot GM \cdot \text{sen}\theta$

Na posição de equilíbrio os dois conjugados são iguais: (C.E) = (C.R), o que nos leva à equação:

$$\text{tg } \theta = P \cdot y_p / \Delta \cdot GM$$

Uma banda θ provoca uma redução de calado no ponto de encalhe igual a y_p.senθ ; se y_p estiver em pés (ft), a redução em polegadas (in) será: 12 y_p . senθ .

Considerando uma banda suficientemente pequena para que senθ possa ser tomado igual a tgθ, tem-se para a variação de calado devido à banda:

$$\delta H^b = 12 \cdot y_p \cdot \text{sen}\theta = 12 \cdot y_p \cdot \text{tg}\theta = 12 \cdot y_p \cdot (P \cdot y_p / \Delta \cdot GM) = 12 \cdot P \cdot y_p^2 / \Delta \cdot GM$$

Se levarmos agora em consideração, simultaneamente, os dois efeitos decorrentes de trim e de banda, podemos igualá-los à variação da maré no ponto de encalhe:

$$Q = (P/TPI) + [P (x_p)^2 / L.MT 1''] + (12 \cdot P \cdot y_p^2 / \Delta.GM) \text{ de onde se obtém:}$$

$$P = \frac{Q}{\frac{1}{TPI} + \frac{x_p^2}{L \cdot MT 1''} + \frac{12 \cdot y_p^2}{\Delta \cdot GM}}$$

Após conhecer P determinam-se (KG_v) e (G_vM_1). Pode-se a seguir substituir o valor de (G_vM_1) na equação acima e obter um valor mais preciso para P. Eventualmente pode-se efetuar uma 3ª iteração. Com o último valor calculado obtém-se:

- H_{AV} e H_{AR} ;
- o ângulo de BANDA;
- Valor mínimo de G_vM_1 (correspondente ao nível mais baixo da maré);
- possibilidade do navio ficar instável;
- possibilidade da água atingir o convés.

Note-se que o método aproximado descrito acima, procura dar condições para o cálculo da força de encalhe \underline{P} quando se conhece a altura \underline{Q} . Este valor \underline{Q} pode ser observado no costado do navio comparando a posição da linha d'água, próxima ao ponto de encalhe, antes do encalhe e depois do mesmo, após a baixa da maré. Caso o calculista precise se antecipar à baixa da maré (por haver suspeita de risco para a embarcação) o valor \underline{Q} pode ser considerado como a variação total da maré no local do acidente, dada por uma tábua de marés.

A expressão acima para o valor de P é adequada ao uso no sistema inglês de unidades. O leitor deverá escrever a equação adequada ao uso do sistema métrico.

6.6 - LANÇAMENTO

6.6.1 - Objetivo – colocar o navio na água após parte da fabricação. O lançamento é feito num momento que depende da programação de projeto e dos recursos do estaleiro.

6.6.2 - Tipos - por carreiras ou em diques
- lateral.

O navio é construído sobre blocos de quilha especiais e, para o lançamento é feito tocar nas pistas (através do berço).

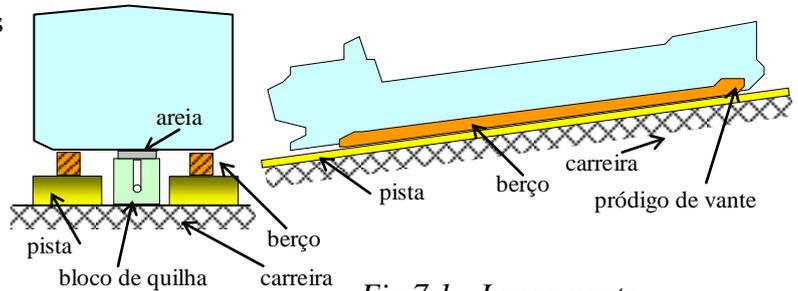


Fig 7.1 - Lançamento

6.6.3 - Pista – a pista consta de um arco de círculo, de raio R, comprimento l e flecha c sendo:

$$AE \times EB = (DE)^2 = (CE)^2; C \times (2R - C) = \left(\frac{l}{2}\right)^2$$

Como $C \ll R$ $2RC = \frac{l^2}{4}$ $R = \frac{l^2}{8C}$

Para a construção da carreira é importante saber-se a ordenada de cada ponto da pista em função da distância.

Da semelhança entre os triângulos DE_1B e A_1E_1C vem:

$$\frac{A_1E_1}{DE_1} = \frac{E_1C}{E_1B} \quad F_1C = x, E_1B = 2R - A_1E_1$$

$$DE_1 = l - x \quad A_1E_1 = (l - x) \frac{x}{2R - A_1E_1}$$

Desprezando A_1E_1 em presença de $2R$

$$A_1E_1 = \frac{x(l - x)}{2R} = \frac{4Cx(l - x)}{l^2}$$

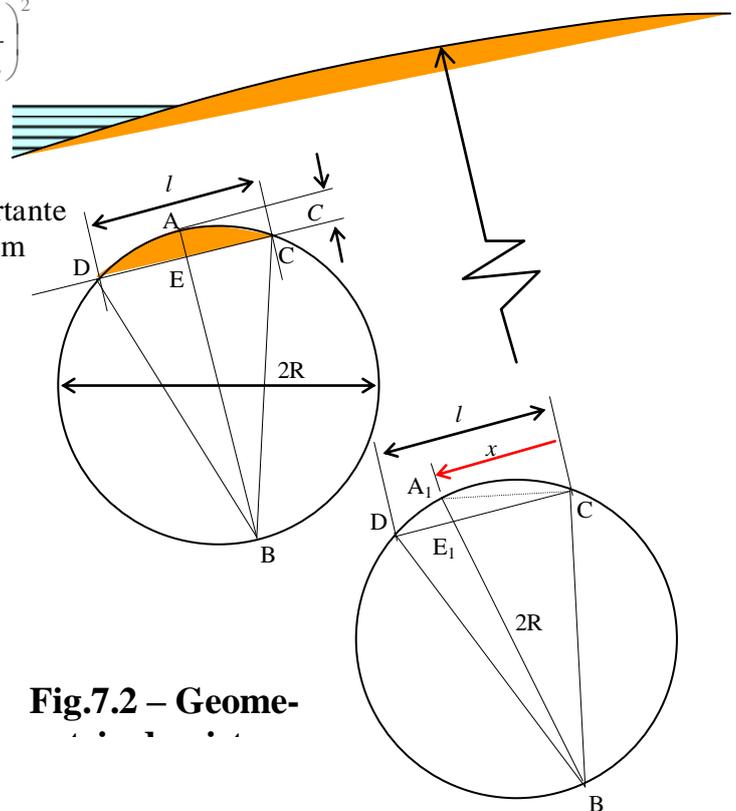


Fig.7.2 – Geome-

6.6.4 -Fases do lançamento

1ª fase → “Correndo no seco” – o navio é acelerado pela gravidade atritando o berço nas pistas.

2ª fase → a partir do momento em que a popa toca a água e até o momento do giro, em que o navio se apruma.

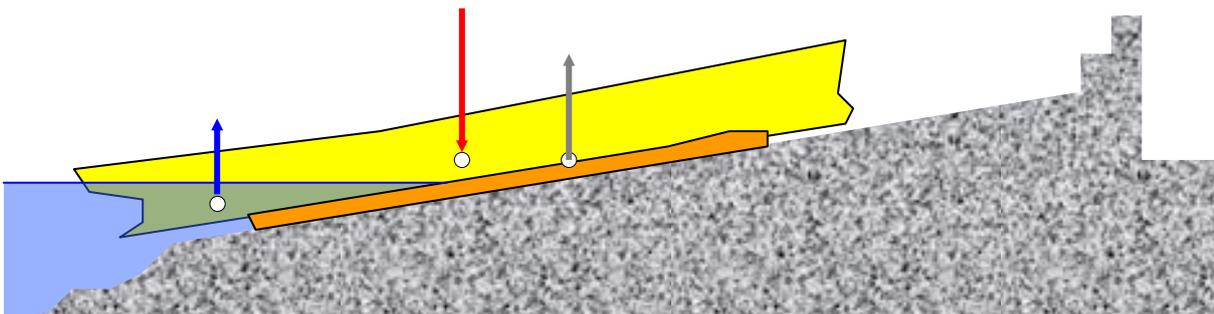


Fig. 7.3 – Fases do lançamento

Por ocasião do giro, a força no bérço é concentrada no pródigo de vante.

$$KG_v = \frac{\Delta \times KG}{\Delta_1}$$

O instante do giro é o crítico sob o aspecto da estabilidade. Nesse momento,

Pelas curvas de Bonjean podemos tirar Δ_1 e daí KM_1 . É preciso que por ocasião do giro $G_v M_1 = KM_1 - KG_v$ seja maior que zero.

Quando o momento da resultante do empuxo decorrente da crescente flutuabilidade igualar o momento do peso em relação ao pródigo de vante, o navio começa a girar.

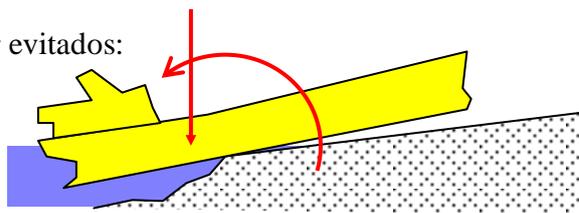
A força no pródigo de vante será:

$$F = \Delta - (\Delta_1)_{giro}$$

Dois acidentes que podem ocorrer devem ser evitados:

a) Tombamento (“*Tipping*”)

Quando o navio chega ao final da carreira e não há flutuabilidade suficiente, o navio gira em torno do final da carreira.



b) Queda (“*Dipping*”)

Ocorre quando o navio chega ao fim da carreira e ainda não girou ou se $H < H_{\Delta}$.

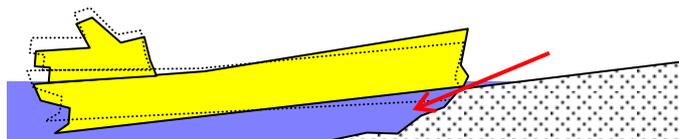
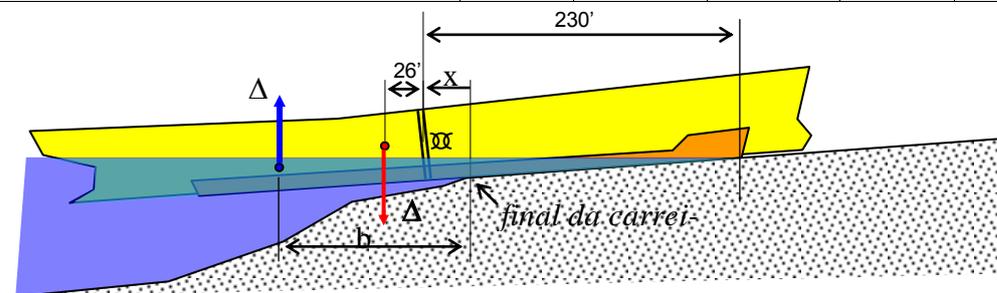


Fig.7.4 – Acidentes no lançamento: (a) tombamento; (b) queda

3ª fase → O navio está livre na água. Quando necessário, usam-se desaceleradores para frear o navio.

Exemplo: Um navio é lançado com um peso de 5.800 ton e LCG 26’ AR).(O pródigo de vante está a 230’ AV)(tendo-se os seguintes dados:

Distância (x) da AR ao final da carreira (ft)	0	20	40	60	80
Empuxo em tons (Δ_1)	2560	3190	3840	4530	5330
LCB AR do final da carreira (b) (ft)	131	143	158	173	185



Pede-se

- a distância da AR do final da carreira no momento de giro.
- a força no pródigo de vante no momento de giro.
- o momento mínimo contra o tombamento.

Solução:

$$M_{\Delta} = 5800 \cdot (230 + 26) = 1485.000 \text{ ton pé}$$

$$(M_{\Delta})_1 = 2560 \cdot (230 + 131 - 0) = 925.000 \text{ ton pé}$$

$$(M_{\Delta})_2 = 3190 \cdot (230 + 143 - 20) = 1.127.000 \text{ ton pé}$$

$$(M_{\Delta})_3 = 3840 \cdot (230 + 158 - 40) = 1.339.000 \text{ ton pé}$$

$$(M_{\Delta})_4 = 4530 \cdot (230 + 173 - 60) = 1.555.000 \text{ ton pé}$$

$$(M_{\Delta})_5 = 5330 \cdot (230 + 185 - 80) = 1.789.000 \text{ ton pé}$$

Plotando os valores no gráfico ao lado tiramos:

$$(\Delta_1)_{\text{giro}} = 4300 \text{ ton} \text{ e } F = 5800 - 4300 = 1500 \text{ ton}$$

O momento de tombamento para cada valor de x será: $M_T = \Delta \cdot (26 + x)$

$$(M_T)_1 = 5800 \cdot (26 + 0) = 151.000$$

$$5800 \cdot (26 + 20) = 267.000$$

$$5800 \cdot (26 + 40) = 382.000$$

$$5800 \cdot (26 + 60) = 498.000$$

$$5800 \cdot (26 + 80) = 615.000 \text{ ton x pé}$$

O momento contra o tombamento será: $(M_{CT}) = \Delta_1 \times b$

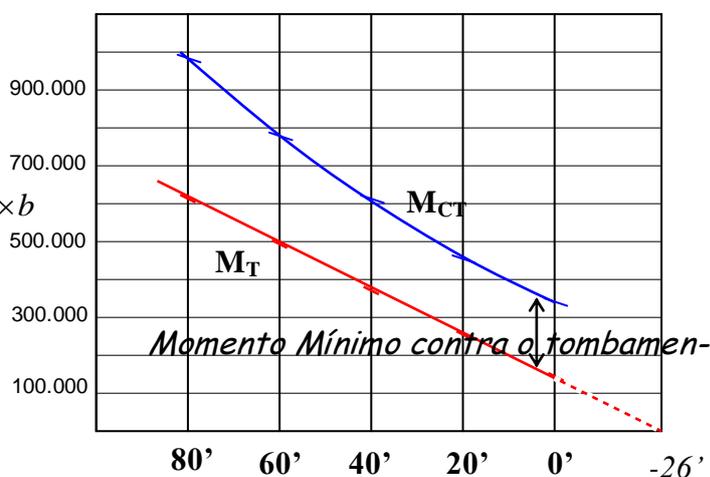
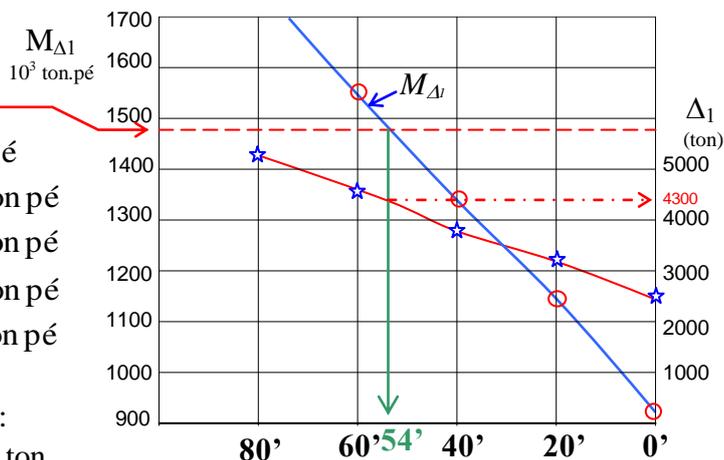
$$(M_{CT}) = 2560 \times 131 = 336.000$$

$$(M_{CT}) = 3190 \times 143 = 456.000$$

$$(M_{CT}) = 3840 \times 158 = 606.000$$

$$(M_{CT}) = 4530 \times 173 = 785.000$$

$$(M_{CT}) = 5330 \times 185 = 986.000 \text{ ton x pé}$$



Problema proposto: Um navio de 500 pés é lançado com um peso de 5000 ton. A carreira prolonga-se 250 pés para dentro d'água. O CG está na seção mestra e o pródigo de vante está a 250 pés AV da seção mestra, tendo-se os seguintes dados:

POSIÇÃO	1	2	3	4	5	6
EMPUSO (ton)	500	1000	2000	3000	4000	5000
Distância de B ao final carreira (em pés)	100(I)	50(I)	0	100(F)	180(F)	200(F)
Distância de G ao final carreira (em pés)	300(I)	200(I)	100(I)	0	100(F)	200(F)

Os índices (I) -> sobre a carreira

(F)-> fora da carreira

Pergunta-se:

- Qual a força sobre a carreira na posição 3?
- Em que ponto o navio gira ?
- Haverá tombamento?
- Qual a força no pródigo de vante nas posições 5 e 6
- O navio cairá no final da carreira?
- Se a pressão no pródigo de vante no momento do giro for muito alta, quais as providências que poderiam ser tomadas?

6.6.5 - Balanço de Energias

Os efeitos dinâmicos por ocasião do lançamento podem alterar os cálculos.

Quando o navio toca a água, forma-se uma onda aumentando a flutuabilidade. O navio gira antes do momento calculado podendo quebrar a carreira (que foi calculada para um outro momento de giro).

O espaço a ser percorrido pelo navio após o lançamento (inércia) pode ser limitado.

Precisa-se portanto ter uma idéia do quanto o navio se movimentará até parar.

É necessário saber-se como varia a velocidade do navio em função da distância percorrida.

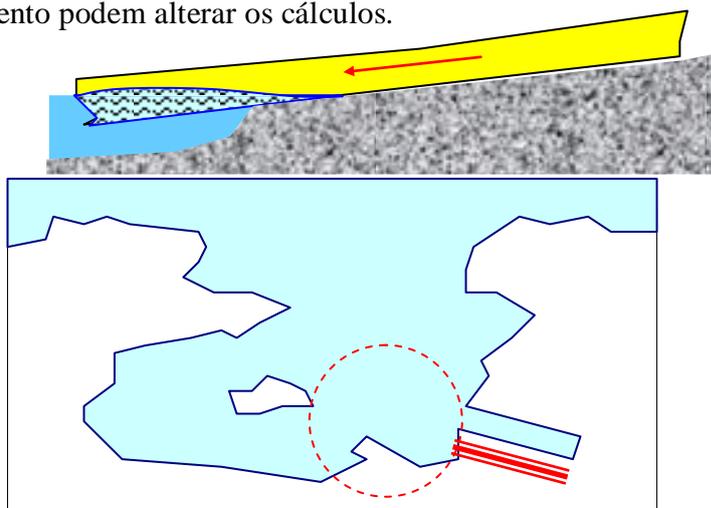


Fig. 7.5 – Efeitos dinâmicos

Analisemos as forças que atuam no navio durante o seu lançamento.

F_1 -> força que acelera o navio no lançamento. $F_1 = \Delta \text{sen } \theta$

Forças que se opõem:

$F_2 = B \text{sen } \theta$ (do empuxo)

Atrito na carreira: $F_3 = \mu (\Delta - B) \text{cos } \theta$

Resistência da água $F_4 = K v^2$

Temos portanto:

$F = F_1 - F_2 - F_3 - F_4$ onde:

$F_1 = w \text{sen } \theta$ (peso) $F_2 = B \text{sen } \theta$ (empuxo)

$F_3 = \mu (w - B) \text{cos } \theta$ (atrito na carreira)

$F_4 = \alpha v^2$ (atrito na água) .

$$\begin{aligned} F_1 - F_2 - F_3 &= w \text{sen } \theta - B \text{sen } \theta - \mu (w - B) \text{cos } \theta = \\ &= (w - B) \text{sen } \theta - \mu (w - B) \text{cos } \theta = \\ &= (w - B)(\theta - \mu) \end{aligned}$$

já que θ é muito pequeno e $\text{sen } \theta \sim \theta$, bem como $\text{cos } \theta \sim 1$, portanto:

$$F = (w - B)(\theta - \mu) - \alpha v^2$$

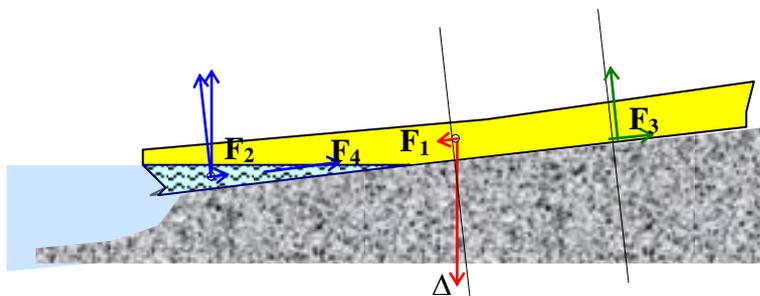
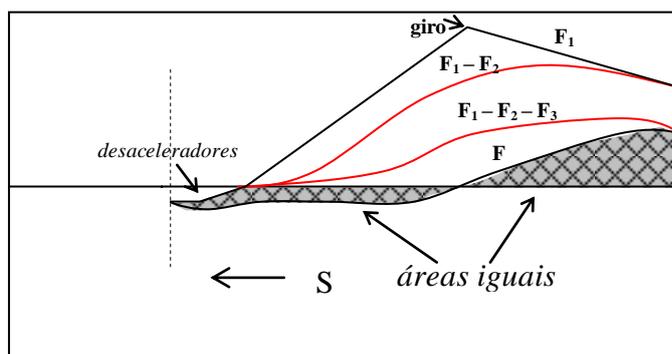


Fig. 7.6 – Forças que atuam no lançamento



Vamos determinar a curva de variação das velocidades com o espaço percorrido.

A equação da dinâmica nos dá:

$$F - \frac{w}{g} \cdot a = 0$$

logo:

$$\frac{w}{g} \cdot a = (w - B)(\theta - \mu) - \alpha v^2 \text{ onde: } a = \frac{dv}{dt}$$

Fazendo: $a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{ds} \times \frac{ds}{dt} = v \frac{dv}{ds}$, obtemos: $\frac{w}{g} \cdot \frac{dv}{ds} v = (w - B)(\theta - \mu) - \alpha v^2$ e,

multiplicando por 2:

$$\frac{w}{g} \cdot \frac{d}{ds}(v^2) = 2(w-B)(\theta - \mu) - 2\alpha v^2, \text{ ou seja: } \frac{d}{ds}(v^2) + \frac{2\alpha g}{w}(v^2) = \frac{2g}{w}(w-B)(\theta - \mu)$$

equação diferencial do tipo:

$$\frac{d}{ds}(v^2) + P(v^2) = Q$$

onde P e Q são funções de s. A solução dessa equação será:

$$v^2 e^{\int P ds} = \int Q e^{\int P ds} ds + C$$

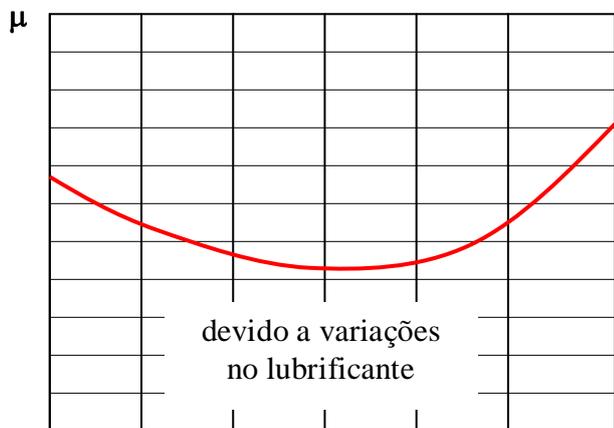
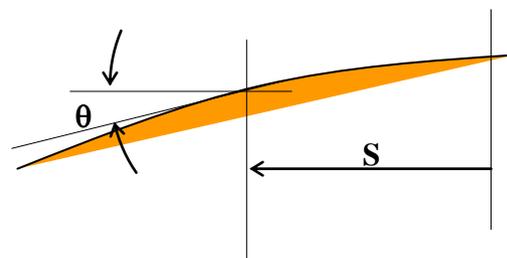
Como para s=0 v=0, obtemos C=0 e

$$v^2 = \frac{\int Q e^{\int P ds} ds}{e^{\int P ds}} =$$

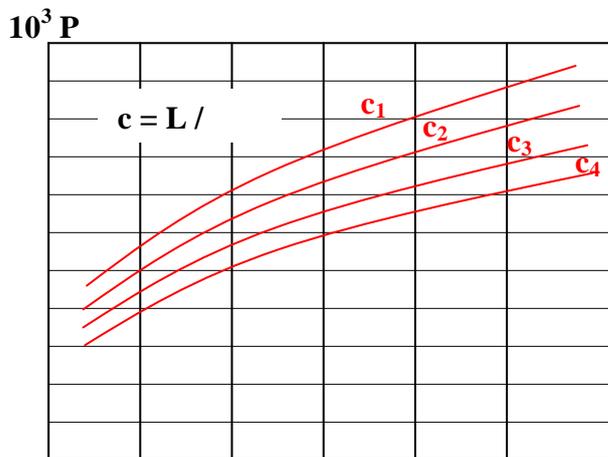


A obtenção dos resultados é feita da seguinte forma:

S (em pés)			0	50	100	...
θ	1	$\theta = f(s)$ (fig ^a)	θ_1	θ_2	θ_3	...
μ	2	$\mu = f(s)$ (fig ^b)	μ_1	μ_2	μ_3	...
$\theta - \mu$	3	(1)-(2)				
B	4	Pelas curvas de Bonjean				
$\frac{2g}{w}(w-B)$	5					
Q	6	(3)x(5)				
$10^3 P$	7	$\alpha = f(s)$ (fig ^c)				
$\int P ds$	Integrações numéricas feitas por computador					
$e^{\int P ds}$						
$Q e^{\int P ds}$						
$\int Q e^{\int P ds} ds$						



S/L



B
empuxo

7.0 – Estabilidade em Avaria. Alagamento

Quando um navio sofre uma avaria nas obras vivas, pode ocorrer um alagamento (“água aberta”) e, com isso, aumentar de calado, adquirir banda e trim.

Dois problemas vitais podem ocorrer: perda de estabilidade ou afundamento de convés não estanque e o conseqüente embarque de mais água.

A análise desse problema pode ser feita por um de dois métodos: o método de adição de pesos e o método de perda de flutuabilidade.

7.1 - Método de adição de Pesos

Uma avaria num compartimento como o (1) provoca seu total alagamento. Se se conhece o volume do compartimento e dos aparelhos estanques em seu interior temos:

$$V_{\text{água}} = V_{\text{comp}} - V_{\text{ap}} = \mu V_{\text{comp}}$$

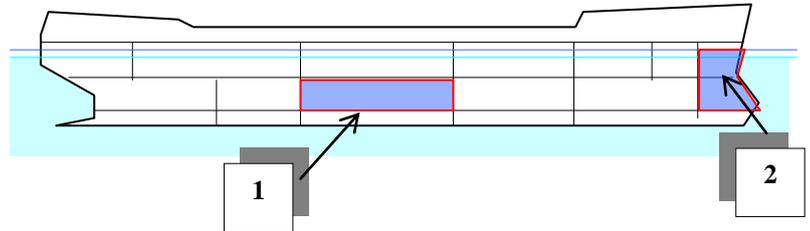


Fig 7.1 – Alagamento. .

onde $\mu \rightarrow$ é a permeabilidade do compartimento. As estruturas (vigas, longarinas, sicordas, pés de carneiro, etc) ocupam cerca de 3 a 5% do volume total do compartimento.

O embarque de água (analisada como adição de peso) provoca a variação do deslocamento e da posição de G. Com isso há variação na estabilidade.

A comparação das curvas de estabilidade, no entanto, não traria resultados pois a estabilidade está ligada ao **momento** e não ao **braço** de endireitamento.

Um caso mais crítico para a utilização desse método seria o de uma avaria em um compartimento como o (2). Haveria um alagamento parcial, conseqüentemente trim AV, embarque de mais água, novo trim, e assim por diante.

A determinação do peso da água embarcada só seria possível por aproximações sucessivas. Não se pode deixar de considerar o efeito de superfície livre na avaliação da estabilidade.

Nesses casos usa-se o método que se segue:

7.2 - Método de Perda de Flutuabilidade

Imagina-se que o navio “perde” flutuabilidade ao ter o compartimento inundado. O navio fluava na LA1 e tem o compartimento C alagado, passando a flutuar na LA2. Deixou de deslocar o volume V1 () passando a deslocar um volume igual V2 (), sem variar seu deslocamento. Ou seja: o navio afunda, deslocando A₂ e A₃, deixando de deslocar A₁, tal que:

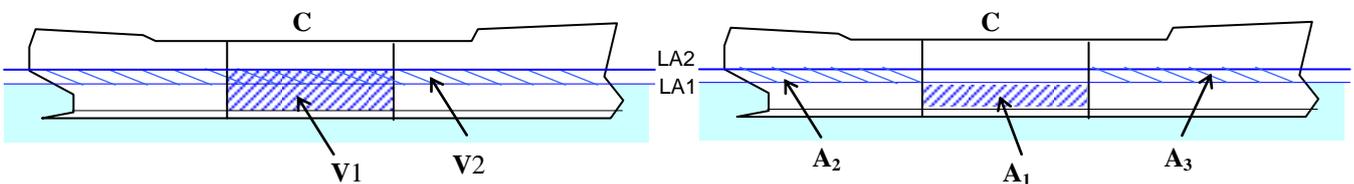
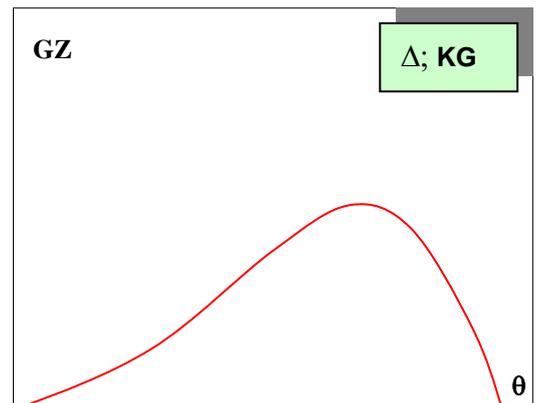


Fig. 7.2 – Perda de flutuabilidade

$$A_1 = A_2 + A_3$$

O deslocamento não varia, portanto o volume de deslocamento (∇) também permanece constante, simplesmente muda de forma (as curvas de forma portanto são variadas).

Mas como tanto Δ quanto KG não variam, os braços de endireitamento podem ser comparados, já que os gráficos de $GZ = f(\theta)$ são obtidos para dados valores de Δ e de KG.



Se definirmos uma “permeabilidade de superfície” (μ_s), no caso de um afundamento paralelo teremos:

$$\mu V = (A - \mu_s a)(H_1 - H)$$

onde:

μ – permeabilidade

V – volume do compartimento

A – área do plano de flutuação (A_w)

μ_s – permeabilidade de superfície (média)

a – área do compartimento avariado

H_1 – calado após avaria

H – calado inicial

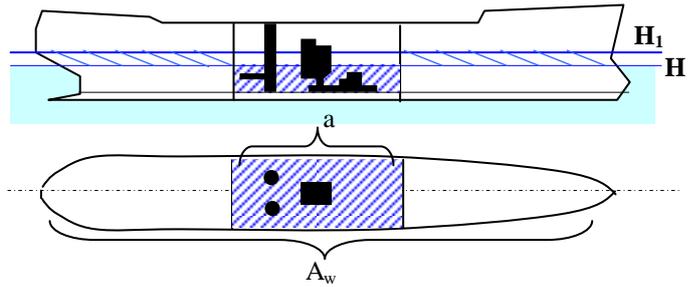
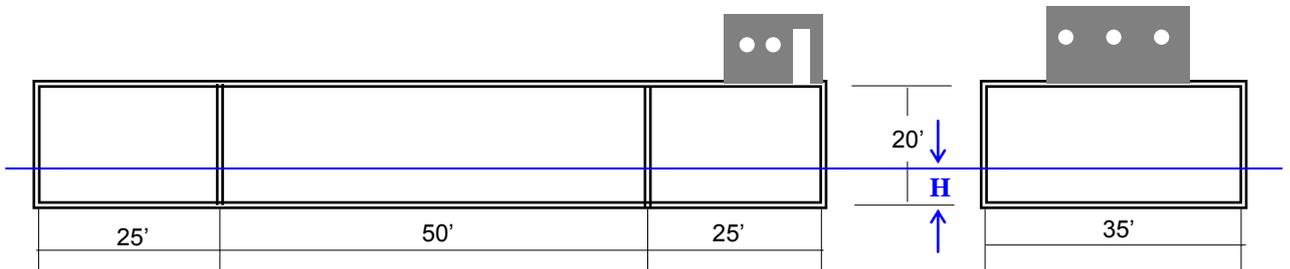


Fig. 8.3 – Permeabilidade de superfície

Exemplo: Uma barçaça em forma de caixa (L = 100', B= 35', D = 20', $\Delta = 500$ ton, com KG = 8') sofre uma avaria e seu compartimento central é alagado. Examinar a estabilidade (afundamento paralelo) ($\mu = \mu_s = 1$) utilizando os métodos de adição de peso e de perda de flutuabilidade.



Na condição intacta a barçaça terá um calado $H = (500 \times 35) / 100 \times 35 = 5$ pés

1º) Adição de pesos – após a avaria, a embarcação terá seu deslocamento aumentado e flutuará num calado maior (H_1). O peso W de água adicionada valerá:

$$W_{\text{água}} = \frac{50 \times 35 \times H_1}{35} = \text{à variação de deslocamento} =$$

$$= \partial \Delta = \frac{100 \times 35 (H_1 - 5)}{35}$$

donde tiramos o novo calado $H_1 = 10'$

Antes da avaria	Após a avaria
$\nabla = 100 \times 35 \times 5$	$\nabla = 100 \times 35 \times 10$
$\Delta = \frac{\nabla}{35} = 500 \text{ ton}$	$\Delta = 1000 \text{ ton}$

O peso embarcado foi de 500 ton (KG_1 a 5')

$$G_v M_1 = KB_1 + B_1 M_1 - KG_1 - G_1 G_v$$

|---> superfície livre

Nesta fórmula temos:

$$KB_1 = \frac{H_1}{2} = 5'; \quad B_1 M_1 = \frac{I}{\nabla_1} = \frac{100 \times 35^3}{12 \times 1000 \times 35} = 10,2'$$

$$KG_1 = \frac{\Delta \times KG + w \times K_{g_w}}{\Delta_1} = \frac{500 \times 8 + 500 \times 5}{1000} = 6,5'; \quad G_1 G_v = \frac{50 \times 35^3}{12 \times 1000 \times 35} = \frac{i}{\nabla} = 5,1'$$

Portanto:

$G_v M_1 = 5 + 10,2 - 6,5 - 5,1$; $G_v M_1 = 3,6'$ e, finalmente:

$$\Delta \times G_v M_1 = 3600 \text{ ton pé (conjugado inicial)}$$

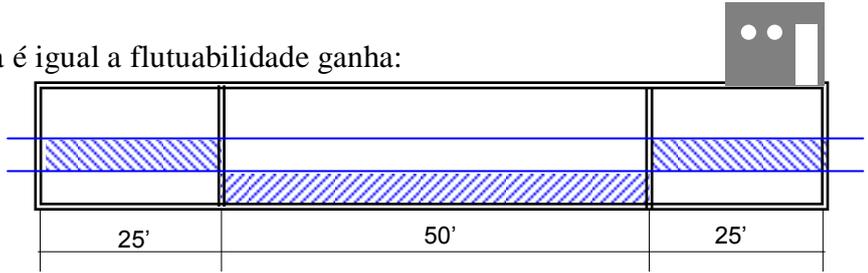
2º) Perda de flutuabilidade

Vimos que a flutuabilidade perdida é igual a flutuabilidade ganha:

$$50 \times 35 \times 5 = 50 \times 35 (H_1 - 5) \quad \therefore H_1 = 10'$$

$$\nabla = 100 \times 35 \times 5 = 17.500 \text{ pés}^3$$

$$\Delta = 500 \text{ ton (não varia o deslocamento)}$$



$$G_1 M_1 = K B_1 + B_1 M_1 - K G \quad (\text{não há efeito de superfície livre a ser descontado})$$

$$K B_1 = \frac{H_1}{2} = 5' ; B_1 M_1 = \frac{I}{\nabla} = \frac{2 \times 25 \times 35^3}{12 \times \nabla} = 10,2'$$

$K G = 8'$ (não varia)

$$G_1 M_1 = 5,0 + 10,2 - 8,0 ; G_1 M_1 = 7,2'$$

$$\Delta \times G_1 M_1 = 500 \times 7,2 = 3600 \text{ pés ton (conjugado inicial)}$$

Vemos que esse alagamento (avaria) produziria emborcamento se $K G = 15,2'$

Nesse caso

$$G_v M_1 = G_1 M_1 = \text{zero}$$

adição de pesos perda da flutuabilidade

7.3 - Efeitos do Alagamento na altura metacêntrica transversal

AFUNDAMENTO PARALELO

Seja uma avaria e um alagamento como mostrado. A altura metacêntrica final será:

$$G M_1 = G M + M M_1$$

$$M M_1 = K M_1 - K M = K B_1 + B_1 M_1 - K B - B M =$$

$$= B B_1 - B_1 M_1 - B M$$

$$G M_1 = G M + B B_1 + B_1 M_1 - B M$$

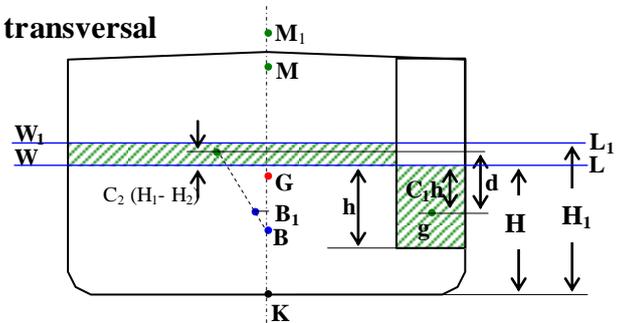


Fig. 7.4 – Afundamento paralelo

Nesta equação:

$G M \rightarrow$ conhecido (condição intacta)

$B B_1 \rightarrow$ componente vertical de deslocamento de B sendo: $\nabla \times B B_1 = (\mu V) \times d$.

Como $d = C_1 h + C_2 (H_1 - H)$ onde C_1 é um parâmetro que leva em conta a forma e a distribuição da permeabilidade do tanque e C_2 leva em conta a forma do navio.

Portanto:

$$B B_1 = \frac{\mu V_1}{\nabla} [C_1 h + C_2 (H_1 - H)]$$

$B_1M_1 \rightarrow$ raio metacêntrico após a avaria

$$B_1M_1 = \frac{I_1''}{\nabla} \text{ onde } I_1'' \text{ é o}$$

momento de inércia da área do plano de flutuação em relação ao eixo longitudinal.

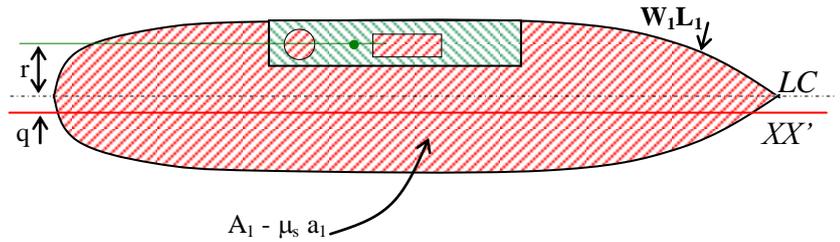


Fig.7.5 – Raio metacêntrico após a avaria

$$I_1'' = I_1 + q^2 A_1 - [\mu_s i + \mu_s a_1 (r + q)^2]$$

| | | | raio de giração

| | | | momento principal de inércia da área $\mu_s a_1$

| | | raio de giração

| | | momento de inércia da área $W_1 L_1$ em relação ao eixo longitudinal (Linha de Centro)

Mas como XX' passa pelo CG da área $(A_1 - \mu_s a_1)$ temos:

$$q = \frac{(\mu_s a_1) r}{A_1 - \mu_s a_1} \text{ que levado na equação acima permite escrever:}$$

$$I_1'' = I_1 - \mu_s i - \frac{\mu_s a_1 A_1 r^2}{A_1 - \mu_s a_1} \text{ sendo } B_1 M_1 = \frac{I_1''}{\nabla}$$

$$BM \rightarrow \text{é conhecido da condição intacta: } BM = \frac{I}{\nabla}$$

ficamos então com:

$$GM_1 = GM + \frac{\mu V_1}{\nabla} [C_1 h + C_2 (H_1 - H)] + \frac{I_1 - I}{\nabla} - \frac{\mu_s i}{\nabla} - \frac{\mu_s a_1 A_1 r^2}{\nabla (A_1 - \mu_s a_1)}$$

7.4 - Efeito do Alagamento na Altura metacêntrica longitudinal

TRIM

Pelo mesmo raciocínio obtemos:

$$GM_{1L} = GM_L + BB_1 - \frac{\mu_s i_L}{\nabla} - \frac{\mu_s a_1 A_1 r_L^2}{\nabla (A_1 - \mu_s a_1)}$$

Haverá um momento de trim:

$$M_T = \Delta \times (B_1 G)_L = \Delta \times GM_{1L} \text{tg}\theta$$

$$\text{tg}\theta = \frac{(B_1 G)_L}{GM_{1L}}$$

$$M_T = \frac{\mu V_1 (r_L + q)}{n}, \text{ sendo } n = 1/\rho$$

$$\text{tg}\theta = \frac{\mu V_1 (r_L + q)}{\nabla \times GM_{1L}}$$

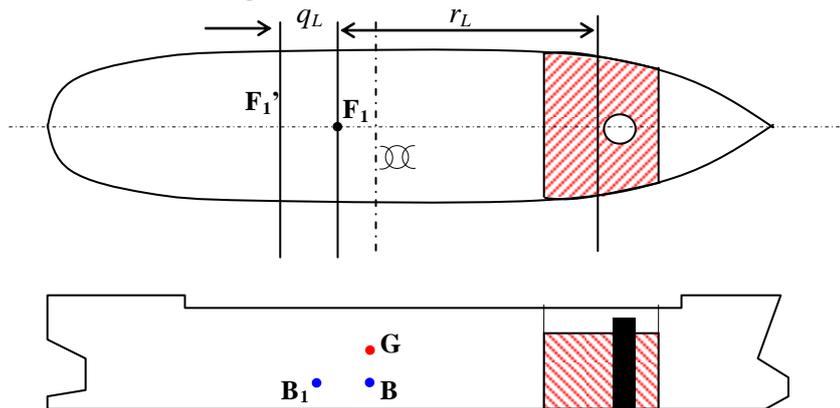


Fig. 7.6 – Efeito do alagamento no trim.

fórmula análoga do processo de adição de pesos (pois o produto $\nabla GM_{1L} = \nabla_1 G_1 M_{1L}$ é igual nos dois métodos).

A distribuição do trim é feita com (CF+q)

7.5 - Efeito transversal do alagamento

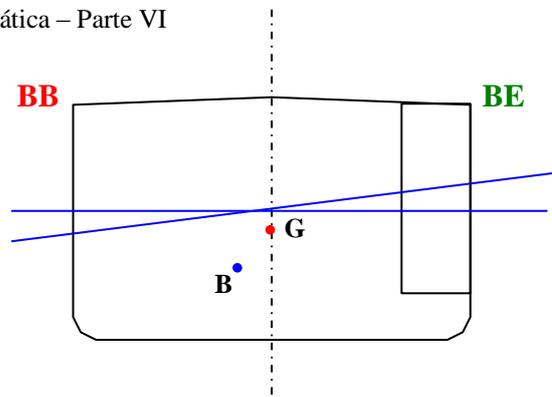
O momento para o adernamento valerá:

$$M_B = \Delta(B_1G)_T = \Delta GM_1 \operatorname{tg} \vartheta$$

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{(B_1G)_T}{GM_1}$$

$$M = \frac{\mu V_1}{n} (r_g + q)$$

$$\operatorname{tg} \vartheta = \frac{\mu V_1 (r_{gL} + q)}{\nabla \times GM_1}$$



Os calados a BE e a BB valerão: $\delta H_{BE} = \left(\frac{1}{2} B + q\right) \operatorname{tg} \vartheta$; $\delta H_{BB} = \left(\frac{1}{2} B + q\right) \operatorname{tg} \vartheta$

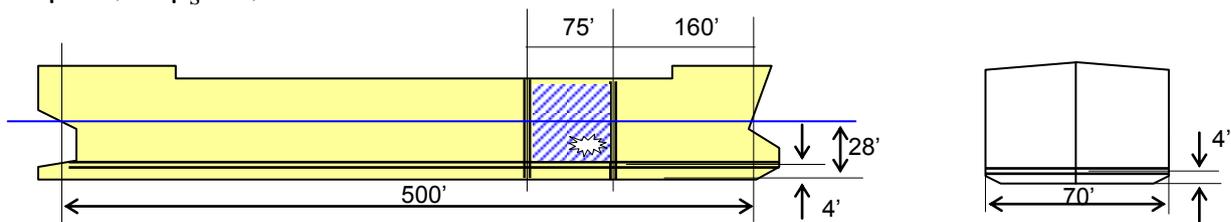
Exemplo: Um navio de $\Delta=17.500$ ton L=500' B=70' H=28' (uniforme) sofre um alagamento num porão. Este porão tem 75' de comprimento e sua antepara de vante está a 160' AR da PPAV. O teto do duplo fundo fica a 4' acima da linha de base.

O porão fica no corpo paralelo médio do navio e nesta região os lados do navio acima do duplo fundo são verticais. Para o calado de 28' são conhecidos:

$$\Delta_w = 22800 \text{ pés}^2 ; KB = 15,5' ; KM = 29,4' ; CF = 12' \text{ AR} \text{ } \textcircled{\times} ; LCB = 1,8' \text{ AR} \text{ } \textcircled{\times} ; KG = 27,8' \text{ } \textcircled{\times} ; GM_L = 630'$$

Calcular a altura metacêntrica e os calados após a avaria.

Adotar $\mu = 0,65$ $\mu_s = 0,65$



1º) **Afundamento paralelo**

a) *Flutuabilidade perdida:*

$$\mu V_1 = 0,65 \times 75 \times 70 \times (28 - 4) = 82.000$$

b) *Flutuabilidade ganha*

Supondo A_w constante (corpo paralelo grande)

$$(A_1 - \mu_s a_1)(H_1 - H) \text{ onde } A_1 = 22800 ; \mu_s = 0,65 ; a_1 = 75 \times 70 ; H = 28$$

Igualando a perda e o ganho de fluabilidade tiramos:

$$H_1 = 32,2'$$

c) *Altura metacêntrica*

$$GM_1 = GM + BB_1 + B_1 M_1 - BM$$

$$GM = KM - KG = 29,4' - 27,8' = 1,6'$$

$$BB_1 = \frac{\mu V_1 [C_1 h + C_2 (H_1 - GH)]}{\nabla} = \frac{0,65 \cdot (75 \times 70 \times 24) \left[\frac{1}{2} \times 24 + \frac{1}{2} 4,2 \right]}{17.500 \times 35}$$

$$C_1 = \frac{1}{2} \quad C_2 = \frac{1}{2} \text{ pois } \mu_s \text{ e } \mu \text{ são constantes. Portanto: } BB_1 = 1,89'$$

$$B_1 M_1 - BM = \frac{I_1 - I}{\nabla} - \frac{\mu_s i}{\nabla} - \frac{\mu_s a_1 A_1 r^2}{\nabla (A_1 - \mu_s a_1)}$$

Como o alagamento é simétrico $r = 0$ e como $A_{w1} = A_w$, $I_1 = I$, teremos:

$$B_1M_1 - BM = \frac{-\mu_s i}{\nabla} = \frac{-0,65 \times 75 \times 70^3}{12 \times 17500 \times 35} = -2,28'$$

$$GM_1 = 1,60 + 1,89 - 2,28$$

$$GM_1 = 1,21'$$

d) *Altura metacêntrica longitudinal.*

$$GM_{1L} = GM_L + BB_1 + B_1M_{1L} - BM_L$$

$$GM_L = 630' ; BB_1 = 1,89'$$

$$B_1M_{1L} - BM_L = \frac{I_{1L} - I_L}{\nabla} - \frac{\mu_s i_L}{\nabla} - \frac{\mu_s a_1 A_1 r_L^2}{\nabla(A_1 - \mu a_1)}$$

$$I_{1L} = I_L$$

$$r_L = 12' + 250 - \left(160 + \frac{75}{2}\right) = 64,5'$$

$$a_1 = 75 \times 70 \quad A_1 = 22800 \text{ pés}^2 \quad \nabla = 17.500 \times 35 \quad \mu_s = 0,65$$

$$B_1M_{1L} - BM_L = \frac{-0,65 \times 75^3 \times 70}{12 \times 17500 \times 35} - \frac{0,65 \times 75 \times 70 \times 22800 \times 64,5^2}{17500 \times 35(22800 - 0,65 \times 75 \times 70)} = -2,61' - 27,4'$$

Portanto

$$GM_{1L} = 630 + 1,89 - 2,61 - 27,4 =$$

$$GM_{1L} = 601,88'$$

e) *Novos Calados*

$$\text{tg}\theta = \frac{M_T}{\Delta GM_{1L}} ; M_T = \frac{\mu V_1}{N} (r_{gL} + q_L)$$

$$r_{gL} = r_L \text{ (tanque vertical)}$$

$$q_L = \frac{\mu_s a_1 \times r_L}{A_1 - \mu_s a_1} = \frac{0,65 \times 75 \times 70 \times 64,5}{22800 - 0,65 \times 75 \times 70} = 11,4'$$

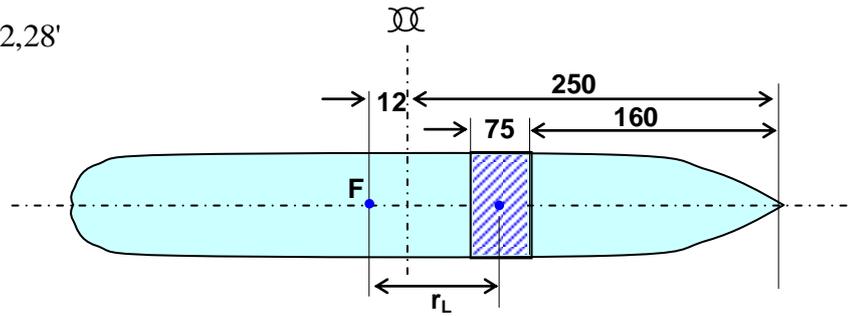
$$M_T = \frac{0,65 \times 75 \times 70 \times 24(64,5 + 11,4)}{35}$$

$$\text{tg}\theta = \frac{M_T}{\Delta GM_{1L}} = 0,0168$$

$$\text{tg}\theta = \frac{t}{L} = \frac{\delta H_{AR}}{250 - (12 + 11,4)} = \frac{\delta H_{AV}}{250 + (11,4 + 12)}$$

$$H_{AV} = 28' + 4,2' + 4,6' = 36,8'$$

$$H_{AR} = 28' + 4,2' - 3,8' = 28,4'$$



7.6 - Compartimentagem

7.6.1 – Introdução - A compartimentagem dos navios tem como objetivo a sua segurança, pela utilização de anteparas, subdividindo-o em espaços estanques.

A primeira a ser utilizada foi a anteparas de colisão AV, restringindo ao compartimento de vante o alagamento decorrente de uma choque de proa. Depois passou a ser utilizada a anteparas de ré (para evitar infiltrações pelo eixo e pela madre do leme), sendo posteriormente empregadas as anteparas para separar o espaço de máquinas do restante.

A convenção de 1854 estabeleceu essas 4 anteparas estanques como obrigatórias.

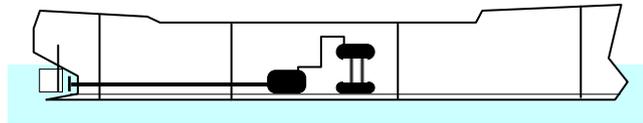


Fig. 7.7 – Anteparas de colisão (AV e AR); anteparas da praça de máquinas

Outras convenções surgiram definindo:

1866 – navios de um compartimento alagável

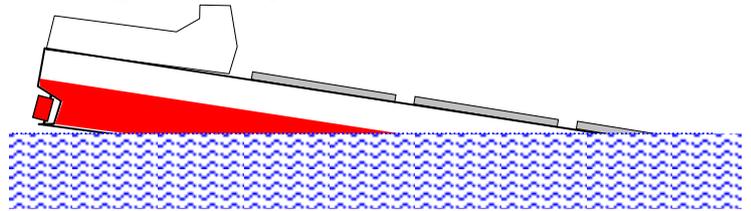
1897 – Curva de comprimento alagável

1912 – (após o naufrágio do “TITANIC”) outras exigências, as quais veremos mais adiante.

Há dois tipos de naufrágio:

1º) *Por afundamento paralelo e trim*

O navio é alagado, adquire grande calado, o convés é imerso, embarca água pelas aberturas, e o navio afunda lentamente;



2º) *Por perda de estabilidade* (embarcamento). O embarque da água faz o navio perder estabilidade, emborcar e afundar (rapidamente).

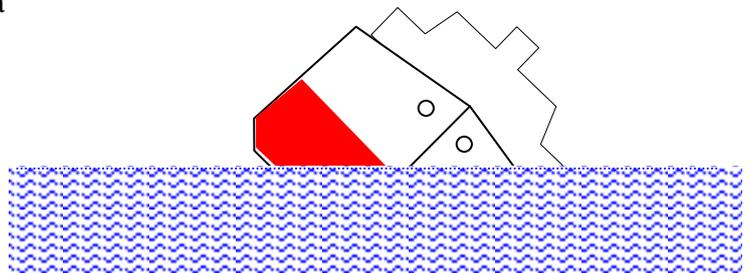


Fig. 7.8 – Tipos de naufrágio: afundamento paralelo e trim; instabilidade

A **permeabilidade** dos compartimentos é importante nesses casos. Ela é variável com o tipo de carga e para o tipo de espaço.

Ex: porão vazio $\mu = 90\%$; tanque cheio $\mu = 0\%$

$$\text{espaço de máquinas: } \mu = 80 + 12,5 \left(\frac{a - c}{v} \right) \text{ ou } \mu = 63 + 35 \left(\frac{a}{v} \right) ; \mu = 85 + 10 \left(\frac{a - c}{v} \right)$$

onde $a \rightarrow$ volume dos espaços de passageiros

$c \rightarrow$ volume de combustível fora do espaço de máquinas

$v \rightarrow$ volume total abaixo da linha dos convezes das anteparas estanques.

Uma **flutuabilidade intacta** (parte que ainda desloca água) pode ser benéfica em alguns casos, em outros não.

Uma flutuabilidade intacta que se estenda acima das linhas d'água em que o navio flutua após a avaria é benéfica tanto sob o ponto de vista de afundamento paralelo (pois se afundar mais não vai ser alagado) como o da estabilidade.

Realmente:

$$GM_1 = GM + BB_1 + B_1M_1 - BM$$

Vemos que BB_1 será menor do que se essa parte fosse alagada, porém B_1M_1 será maior pois $B_1M_1 = \frac{I_1}{\nabla}$, no caso da flutuabilidade intacta, I será maior. O efeito de B_1M_1 prepondera sobre o de BB_1 .

Se, porém, a flutuabilidade intacta não se estende até a linha d'água de avaria (duplo fundo por exemplo), sob o ponto de vista de afundamento paralelo é benéfica, mas para a estabilidade não.

B_1M_1 não se altera pois a área do plano de flutuação é a mesma, e BB_1 será menor em relação ao valor de BB_1 caso tivesse o duplo fundo alagado.

Por isso GM_1 será menor, comprometendo a estabilidade.

Em decorrência desse fato, quando se pesquisa a estabilidade, considera-se o duplo fundo como **NÃO** alagado (caso mais desfavorável)

- . quanto à estabilidade – considerados intactos (afundamento rápido)
- . quanto ao afundamento paralelo – considerados alagados (afundamento lento)

7.6.2 – Navios de 1, 2, ... compartimentos. Avaria-Padrão

Define-se como “navio de **um** compartimento” aquele cuja compartimentagem é tal que o alagamento de um de seus compartimentos faz com que o navio mergulhe e passe a flutuar numa linha d'água tangente a “linha marginal” (linha definida como uma paralela à linha dos conveses das anteparas estanques, situada 3 polegadas abaixo dela).

Esse tipo de compartimentagem não permite uma avaria no costado na altura da antepara, pois alagaria 2 compartimentos, acarretando o naufrágio.

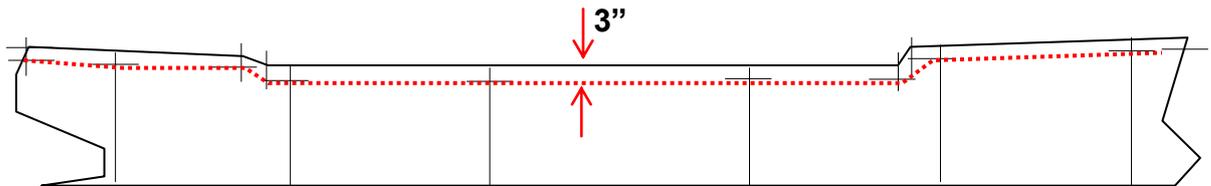
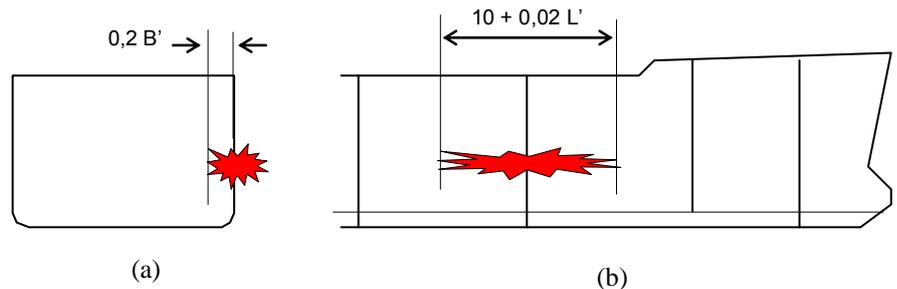


Fig. 7.10 - Linha marginal – situada 3” abaixo da linha superior do chapeamento do convés

Da mesma forma são definidos os navios de 2, 3, etc. compartimentos. Para esses tipos de compartimentagem são definidas as “**avarias-padrão**”.

Para navios de 2 compartimentos:

- profundidade*
 $0,2 \times (BOCA)(pés)$
- comprimento*
 $(10 + 0,02L)(pés)$



Para os de 3 compartimentos, o comprimento é o dobro, a profundidade a metade.

Fig. 7.11 – Avarias-padrão.(a) profundidade; (b) comprimento

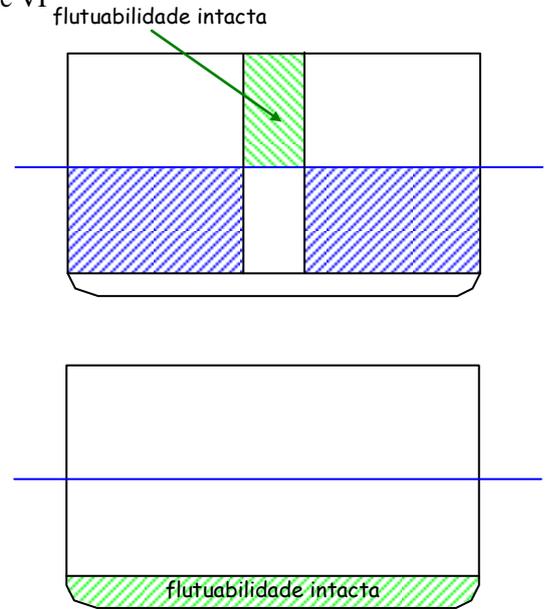


Fig. 7.9 –Influência da flutuabilidade intacta

7.6.3 - Curvas de Comprimento alagável

Levando em conta o *afundamento paralelo e trim*, por alagamento simétrico, pode-se construir (método de Sirokauer) uma curva que fornece os valores máximos de comprimento dos compartimentos que, alagados, fazem com que o navio passe a navegar numa linha d'água tangente à linha marginal.

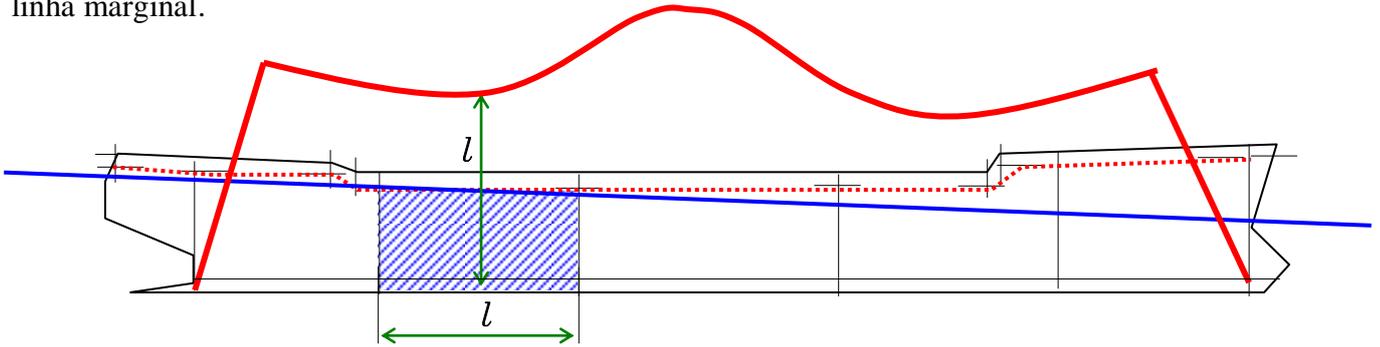


Fig. 7.12 – Curva de Comprimento Alagável para afundamento paralelo e trim

Levando em conta a *estabilidade* ter-se-ia outra curva de comprimento alagável (comprimento dos compartimentos que, quando alagados, fazem com que, após a avaria, o navio afunde por ficar com o GM_1 nulo (ou igual a um GM residual mínimo, estabelecido em função da boca).

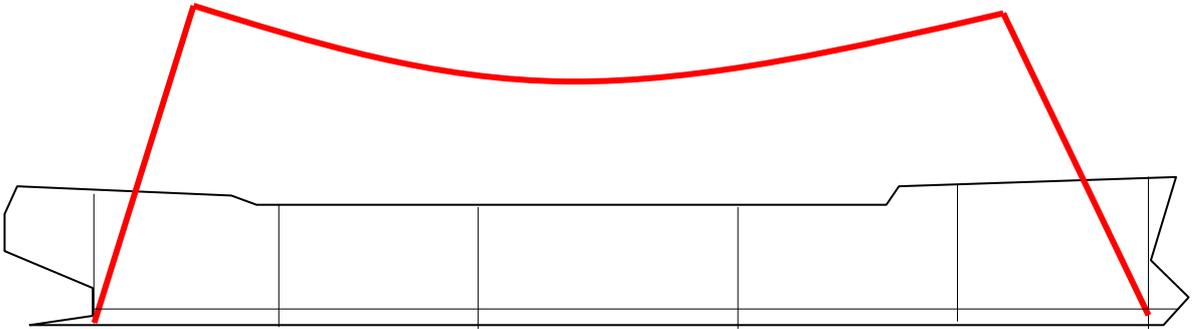


Fig. 7.13 – Curva de Comprimento Alagável para perda da estabilidade

Para o traçado dessa curva é utilizado o plano de linhas (suposto o duplo fundo intacto) e determinados os l pela fórmula:

$$GM_1 = GM + BB_1 + B_1M_1 - BM$$

É evidente que a curva de comprimento alagável a ser adotada será a mostrada abaixo:

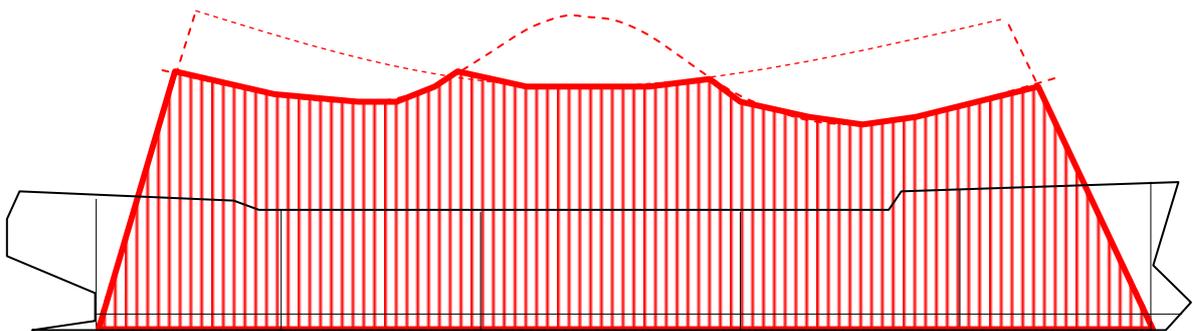
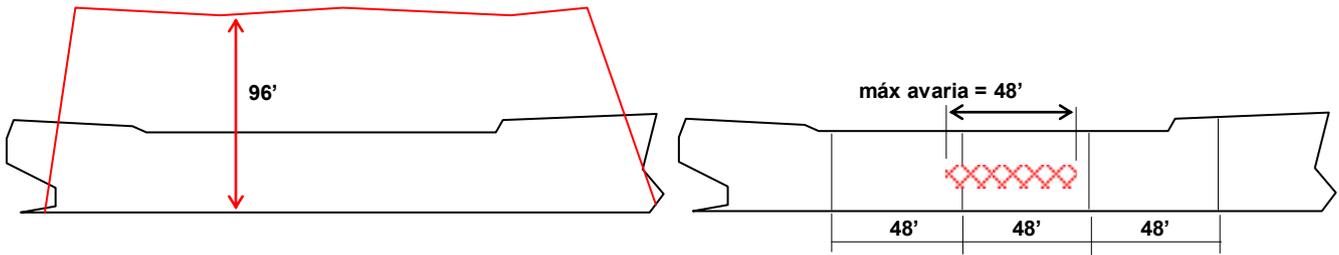
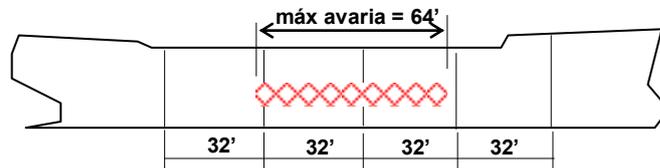


Fig. 7.14 – Curva de Comprimento Alagável para perda da estabilidade, afundamento paralelo e trim

Exemplo: Seja um navio cuja curva de comprimento alagável possa ser considerada praticamente constante, em torno de 96 pés. Se as anteparas forem espaçadas de 48 pés, o navio será de 2 compartimentos e a máxima extensão de avaria será de 48’.



Sendo diminuídas as distâncias entre as anteparas (para 40’, por exemplo, ficando a máxima extensão da avaria em 40’ e assim por diante), até que a distância entre as anteparas atinja 32 pés, o navio passaria a ser de 3 compartimentos e a máxima extensão de avaria passaria a ser de 64’.



Uma crítica pode ser feita à adoção do maior comprimento para a distância entre anteparas:

- 1º) O raciocínio para sua obtenção é teórico
- 2º) Se a permeabilidade μ for diferente da admitida o navio pode afundar
- 3º) Flutuar na linha marginal pode ser perigoso

Diante disso, estabelece-se o comprimento permissível máximo como sendo:

$$L_P = L_{ALAGÁVEL} \times f_s$$

sendo f_s um “fator de subdivisão”, função do comprimento do navio e do tipo de serviço.

f_s varia entre A e B
 sendo

$$A = \frac{190}{L - 198} + 0,18 \text{ (cargueiros)}$$

$$B = \frac{100}{L - 138} + 0,18 \text{ (passageiros)}$$

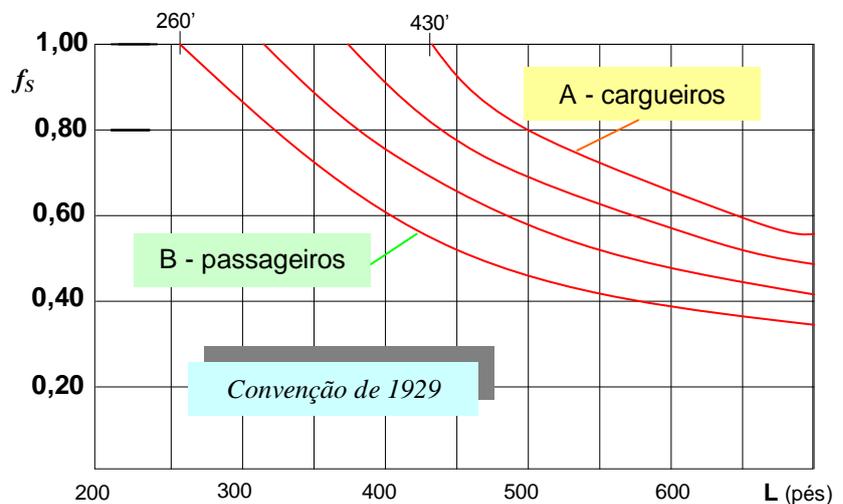


Fig. 7.15 – Fator de subdivisão

Como vimos, a curva de comprimento alagável é função do calado de projeto.

Se plotarmos a curva dos comprimentos permissíveis, ficará correspondendo um calado chamado “*calado de subdivisão*”. Ao se determinar os calados para o posicionamento do disco de Plimson, se um deles for maior que o de subdivisão, não será ele nem pintado no costado.

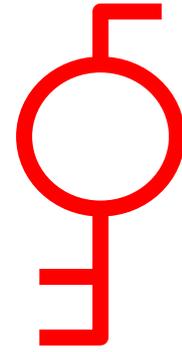


Fig. 7.16 – Disco de Plimson

Resumindo: - o valor de GM desejável é função de três fatores:

- 1º) máxima extensão da avaria
- 2º) Qual o GM mínimo requerido após a avaria.
- 3º) Qual a banda máxima aceitável

Sob o ponto de vista de segurança o GM deve ser o maior possível.

Quanto ao conforto, deve ser o menor possível.

Para aumentar GM, pode-se eliminar flutuabilidades intactas baixas (lastrar) ou reduzir o GM residual necessário, evitando momentos de emborcamento devido a alagamentos assimétricos, interligando tanques, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Fundamentos de Teoria de Arquitetura Naval - George C. Manning
2. Principles of Naval Architecture - Henry E. Rossel & Lawrence B. Chapman
3. Principles of Naval Architecture - John Comstock
4. Statics and Dynamics of the Ship - V. Seminov - Tyan-Shansky
5. Projeto de Normas - Terminologia - Arquitetura Naval - ABNT
6. Arte Naval - Maurílio Fonseca
7. Arquitetura Naval para Oficiais de Náutica - CLC Carlos R. Caminha
8. Mecânica do Navio. Estática. - CMG(EN) Pedro Paulo Charnaux Sertã