

1

Introdução

Nas últimas décadas desenvolveram-se cascos de grandes navios petroleiros, navios para transporte de *containeres*, plataformas de petróleo, navios de transporte de automóveis, navios com dragas e até mesmo navios com grandes guindastes. Há navios que chegam a ter 500 mil toneladas de peso seco. Com este avanço tecnológico, houve uma necessidade de criar novas normas e regulamentos, exigindo e incentivando práticas de segurança marítima e segurança ambiental.

Este crescimento rápido também ocorre na PETROBRAS e, com isto, há a necessidade de desenvolvimento de novas plataformas pelo CENPES, Centro de Pesquisas da PETROBRAS. Para estas novas plataformas, decidiu-se que seriam adotadas práticas de segurança mais rigorosas, seguindo a tendência mundial.

É importante para uma embarcação que seu modelo atenda sua utilidade, mas também às restrições de flutuação, velocidade, potência, estabilidade e que seja manufaturável e economicamente viável.

O modelo de uma unidade flutuante deve prover a flutuação adequada, mas isto não é suficiente. Deve-se garantir que esta embarcação flutue em seu calado correto de operação, com a inclinação correta, desde uma condição vazia até uma condição carregada, inclusive durante os processos de carga e descarga.

Este trabalho trata das considerações utilizadas para avaliar a estabilidade estática de um navio, estando ou não sujeito a forças externas, podendo apresentar avarias ou inundações em alguns de seus tanques.

Estabilidade de unidades flutuantes, como navios e plataformas, é um requisito fundamental em um projeto naval. Para aprovar um projeto naval é necessário satisfazer a vários critérios, como a obtenção da posição de equilíbrio da unidade quando submetida às situações de carregamento, a avaliação satisfatória dos cálculos das solicitações de vento, a avaliação satisfatória da curva de estabilidade limite e a avaliação satisfatória dos planos de borda livre da unidade.

Esses critérios têm por objetivo certificar a capacidade que uma embarcação tem, em uma dada condição, de suportar um momento de emborcamento¹ dentro de limites aceitáveis de inclinação e afundamento, os quais dependerão da finalidade da embarcação.

Uma embarcação pode ser utilizada como navio cargueiro, plataforma, draga, navio de cruzeiro e assim por diante. Neste trabalho, as unidades flutuantes consideradas serão embarcações petrolíferas.

Os fatores que afetam o equilíbrio de uma unidade flutuante são:

- Distribuição de carga na embarcação.
- Geometria submersa e emersa.
- Deslocamentos de pesos na embarcação: avaria, içamento e descarte de pesos, peso solto no convés, etc.
- Ações do meio ambiente: ventos, ondas e correntes marítimas.

1.1.

Objetivos e organização da tese

Na avaliação de um modelo, é necessário simular várias situações de carregamento e operação. Neste trabalho, as tarefas de certificação de qualidade de um modelo são divididas em quatro passos distintos, cada um dos quais dependente do seu antecessor:

1. Definição automática de carregamento ótimo.
2. Cálculo das solicitações de vento usando espaço de imagem.
3. Definição da curva de estabilidade limite.
4. Definição integrada dos planos de borda livre e integridade estanque do casco.

Este trabalho tem por objetivo explicar os critérios e algoritmos inerentes a cada um desses passos.

O primeiro passo consiste em como simular, em teoria, uma situação de carregamento em que este modelo pode se encontrar na vida real, caso ele venha a entrar em operação. Este trabalho partiu de um algoritmo, desenvolvido inicialmente por Anderson Pereira e Maffra et al[14], para distribuição e carregamento automático dos tanques, na determinação da carga necessária para

1-Momento de emborcamento é um momento que tende a tirar a embarcação da sua condição de equilíbrio e que pode ter origem externa (vento, onda, abaloamento) ou interna (deslocamento, descarte ou acréscimo de pesos).

se atingir a condição de carregamento desejada. Uma explicação detalhada deste algoritmo assim como a contribuição deste trabalho para sua extensão, será apresentada no Capítulo 3.

Alguns critérios de avaliação exigem o teste do modelo sujeito às forças de vento e de corrente. Neste trabalho foi dada continuidade ao desenvolvimento de um algoritmo, iniciado por Maffra et al[12], para se estimar as forças e seus pontos de aplicação, dados o calado, a inclinação e a velocidade do vento a que a embarcação está submetida. Estes itens estão descritos no capítulo 4.

Dentre os critérios de avaliação de uma embarcação, está a sua curva de estabilidade, calculada a partir de todas as situações de carregamento criadas para o modelo. Foi desenvolvido um algoritmo para a geração automática desta curva, desde que as condições de carregamento estejam corretamente definidas e seus critérios devidamente selecionados. O capítulo 5 descreve este desenvolvimento original.

As linhas de praia de uma plataforma são retas estabelecidas como limites numa determinada cota (altura) de uma plataforma (num plano xy), que servem para classificar as aberturas existentes naquela cota. Um algoritmo, descrito no capítulo 6, foi criado neste trabalho para delimitar as linhas de praia numa cota especificada e para automaticamente classificar todas as aberturas da unidade.

Dentre as normas adotadas e utilizadas para este trabalho, tem-se como principais referências as normas da Organização Marítima Internacional (IMO) e do Departamento Marítimo da Noruega (NMD), dois órgãos que se tornaram padrões de referência mundial.

Todos os algoritmos descritos neste trabalho foram implementados no programa Sstab [1], um programa de estabilidade de unidades marítimas, desenvolvido numa parceria entre o Tecgraf/PUC-Rio e o CENPES. O capítulo 2 faz uma descrição resumida do Sstab.

1.2.

Definições, Termos e Nomenclaturas Utilizados no Trabalho

Nesta seção, apresentam-se os principais termos utilizados na descrição deste trabalho. A Figura 1.1 mostra como uma plataforma se subdivide.

As principais seções de uma plataforma são ilustradas na Figura 1.2. A seção mestra fica localizada no centro longitudinal da plataforma. Já a linha de centro fica localizada no centro transversal da plataforma. O plano de base é paralelo ao plano xy e fica localizado na altura da quilha.

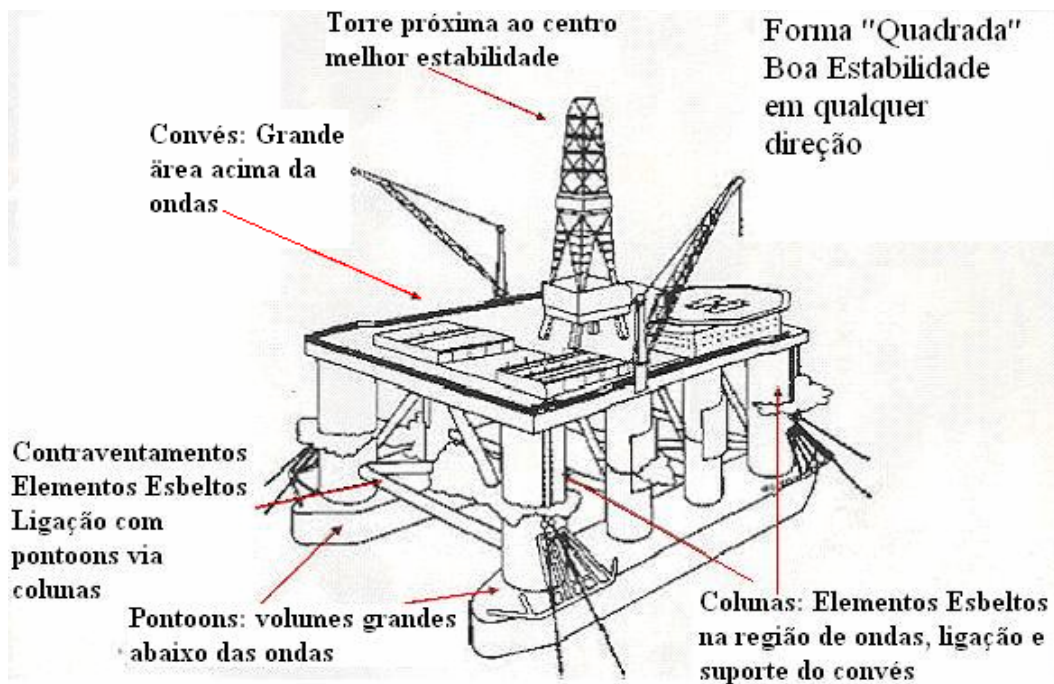


Figura 1.1 – Partes de uma plataforma

Cota é a altura dada em coordenadas locais da plataforma em relação à quilha. Quando se diz que um objeto está a uma cota de 10 metros, isto quer dizer que há uma distância em z de 10 metros entre o objeto e a quilha, ou seja, é o valor da coordenada z do objeto.

Calado é a altura em que a linha d'água do mar corta o eixo z nas coordenadas locais.

1.2.1. Movimentos e Inclinações

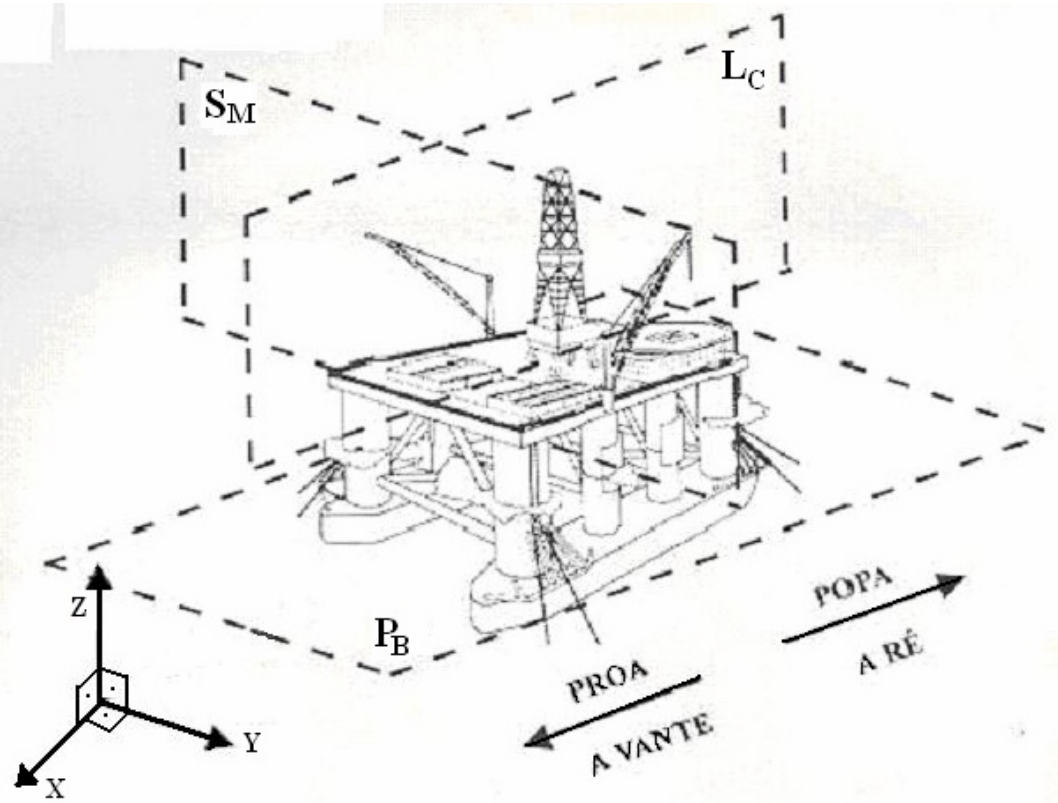
Uma unidade flutuante possui 6 graus de liberdade de movimento, sendo 3 de translação (linear) e 3 de rotação em torno de um eixo (angular). As nomenclaturas para estes 6 graus de liberdade estão representadas na Figura 1.3.

Os deslocamentos (lineares e angulares) de uma plataforma semi-submersível são causados basicamente por ventos e ondas incidindo sobre a mesma e podem ser divididos em dois grupos:

- avanço (*surge*), deriva (*sway*) e guinada (*yaw*): estes movimentos sofrem restrição do sistema de ancoragem da unidade que deve ser projetado para limitá-los a valores aceitáveis;

- Balanço (*Roll*), arfagem (*pitch*) e afundamento (*heave*): estes movimentos sofrem pouca influência do sistema de ancoragem e são limitantes para a operação da unidade. Os parâmetros determinantes para que a unidade apresente movimentos de *roll*, *pitch* e *heave* dentro dos limites operacionais especificados, considerando as condições de vento e onda do local onde irá operar, são as formas das colunas e *pontoons* e a distribuição de massa.

Os movimentos de *roll* e *pitch* são cíclicos (transientes), porém a plataforma também apresenta inclinações permanentes que dependem do seu carregamento. Inclinações permanentes no sentido proa-popa são chamadas de *trim* e terão a mesma convenção de sinais das coordenadas longitudinais, ou seja, se a convenção for positivo a vante, o *trim* será positivo se a proa tiver mais afundada que a popa. Inclinações permanentes no sentido bombordo (BB) boreste (BE) são chamadas de banda e terão a mesma convenção de sinais das coordenadas transversais, ou seja, se a convenção for positivo a BE, a banda será positiva se BE estiver mais afundado que BB. Isto é mostrado na Figura 1.4.



S_M	Seção Mestra
L_C	Linha de centro
P_B	Plano de base
x	Eixo longitudinal de coordenada local x
y	Eixo transversal de coordenada local y
z	Eixo vertical de coordenada local z

Figura 1.2 – Seções principais de uma plataforma

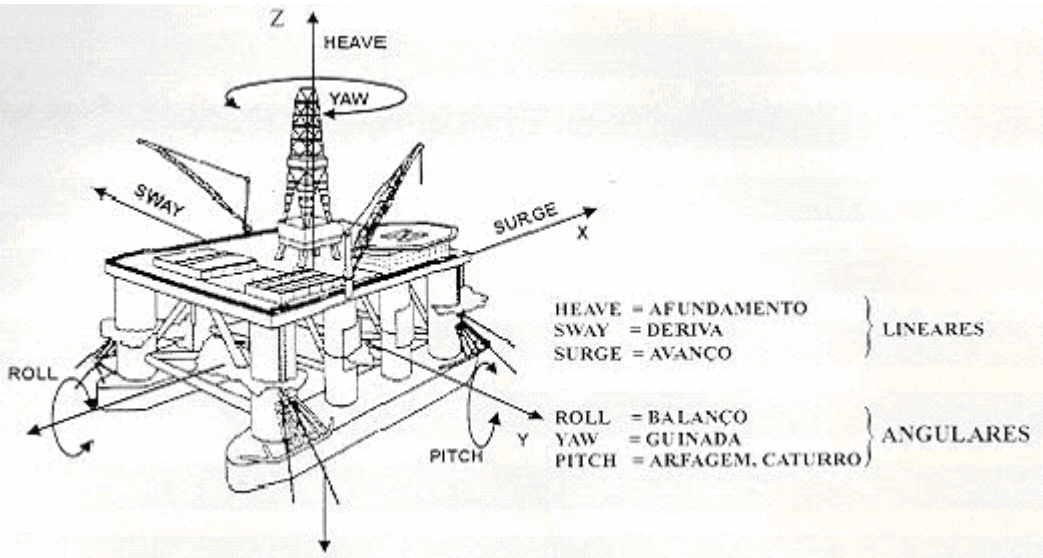


Figura 1.3 – Graus de liberdade de uma unidade flutuante

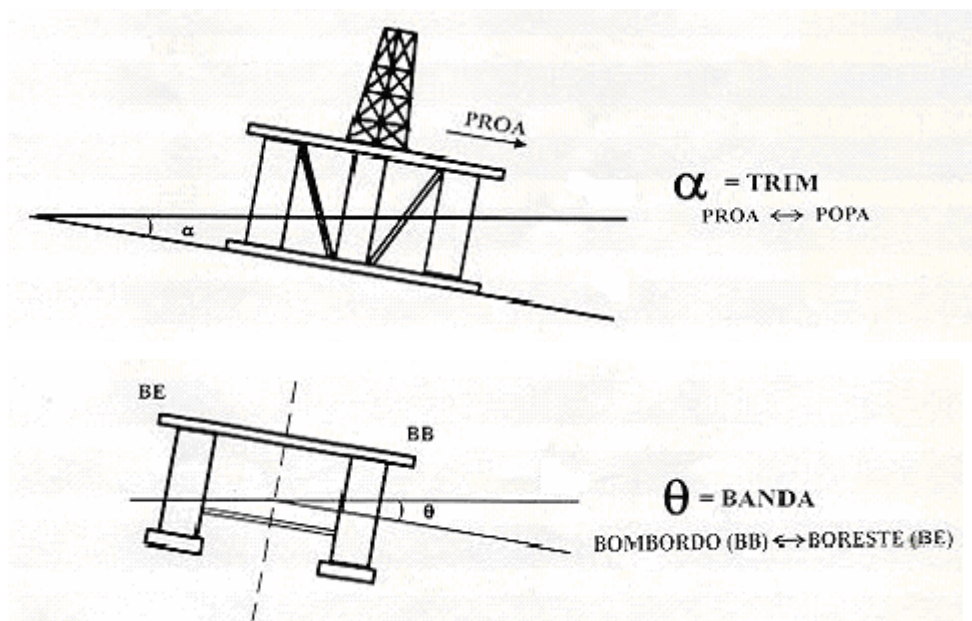


Figura 1.4 – Inclinações de banda e trim

1.3. Empuxo

O valor do empuxo, que atua em um corpo mergulhado em um líquido, é igual ao peso do líquido deslocado pelo corpo. Esta força vertical é o motivo pelo qual uma embarcação continua flutuando.

Pelo princípio de Arquimedes, sabemos que o empuxo é igual ao peso do líquido deslocado ou como mostrado na equação 1.1:

$$B = \rho_L V_L g \quad (1.1)$$

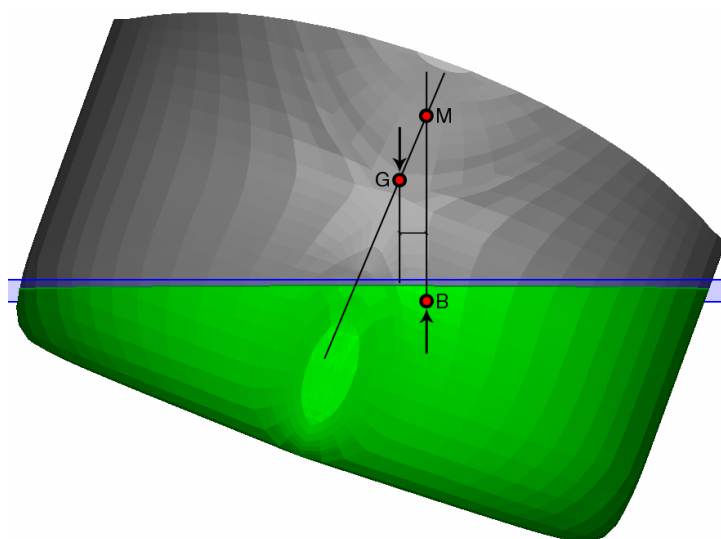
B Valor do empuxo

ρ_L Densidade do líquido

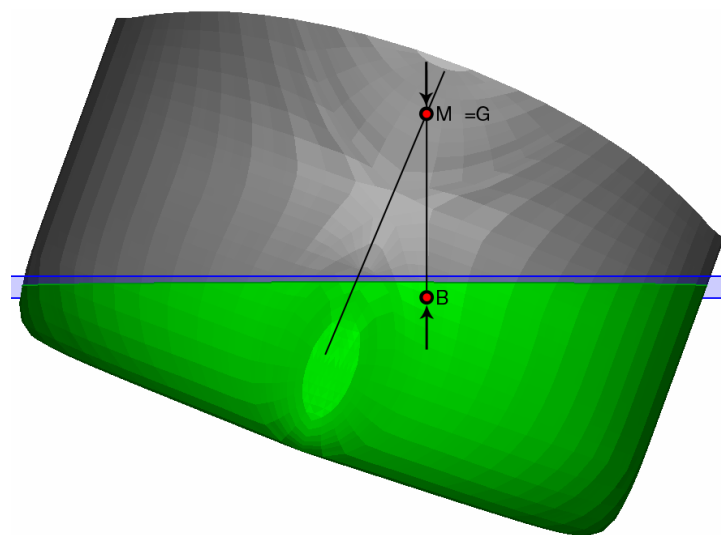
V_L Volume de líquido deslocado

g Aceleração da gravidade

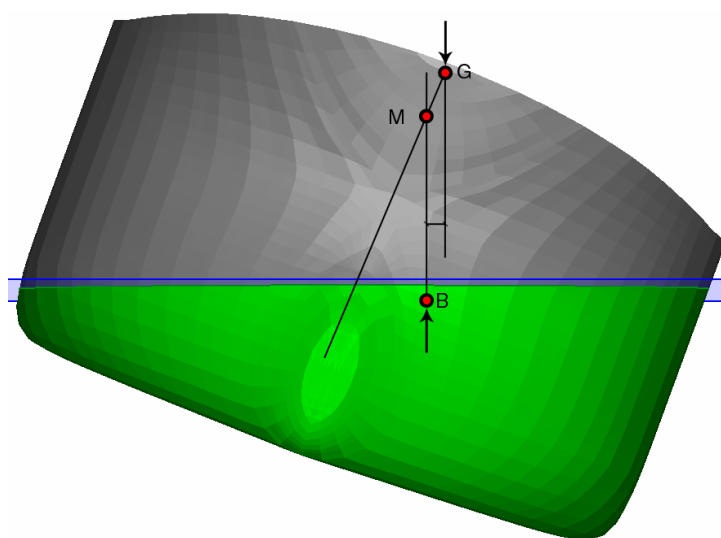
Se um corpo em equilíbrio está totalmente mergulhado em um líquido, seu peso é igual ao empuxo que ele está recebendo. Neste caso, será nula a resultante destas forças e o corpo ficará em repouso na posição em que foi abandonado. É isto que acontece com um submarino submerso, em repouso, a uma certa profundidade.



(a) estável



(b) indiferente



(c) instável

Figura 1.5 – Tipos de equilíbrio em uma embarcação

Quando o valor do empuxo é menor do que o peso do corpo, neste caso, a resultante destas forças estará dirigida para baixo e o corpo afundará, até atingir o fundo do recipiente. É isto o que acontece quando, por exemplo, se abandona uma pedra dentro d'água.

Quando o valor do empuxo é maior do que o peso do corpo, neste caso, a resultante destas forças estará dirigida para cima e o corpo sobe no interior do líquido. É isto o que acontece quando, por exemplo, se abandona um bloco de madeira no interior de um líquido. O bloco de madeira irá submergir até que a resultante das forças se iguale. Nesta posição o corpo flutuará em equilíbrio.

Destas considerações pode-se concluir que, quando um navio está flutuando em equilíbrio, ele está recebendo um empuxo cujo valor é igual ao seu próprio peso, isto é, o peso do navio está sendo equilibrado pelo empuxo que ele recebe da água.

1.4. Equilíbrio e Metacentro

Uma unidade flutuante se encontra em estado de equilíbrio enquanto as condições internas (carregamento) e externas (vento, ondas, etc.) não se alterarem. Quando um ou mais destes parâmetros mudarem, a unidade também irá mudar para uma nova condição de equilíbrio e lá permanecer até que algum parâmetro mude novamente. Portanto, o estudo da estabilidade é o estudo da condição de equilíbrio na qual a embarcação se encontra.

O tipo de equilíbrio de um corpo flutuante, ou seja, a estabilidade, será definido pela forma como variam as forças que atuam sobre este corpo quando é deslocado da sua posição inicial. Como as principais forças que atuam sobre um corpo flutuando são o peso e empuxo, são estas que precisam ser analisadas. A Figura 1.5 apresenta os três tipos de equilíbrio em uma embarcação.

Analisando-se mais atentamente a Figura 1.5 (a), nota-se que há duas forças que agem sobre a embarcação: força de peso atuando em G e força de empuxo atuando em B. Nesta figura o equilíbrio é estável, porque a força de empuxo está desalinhada da força de peso causando um momento de retorno. Considerando que o casco do navio está submerso na água, o volume deslocado está gerando a força de empuxo cujo ponto de aplicação B está à direita de sua linha de centro.

Se a altura de G aumentar até que as duas forças se alinhem, mantendo-se a embarcação na mesma posição submersa, o ponto é o metacentro (M), que representa um equilíbrio indiferente mostrado na Figura 1.5 (b). Havendo um metacentro e conhecendo-se a posição de G é possível determinar o braço de retorno (GZ) e o momento de retorno por simples trigonometria. A Figura 1.5 (c) mostra o tipo de equilíbrio instável, porque o momento causado pelo desalinhamento das forças de empuxo e peso faria o navio inclinar ainda mais.

1.4.1. Método dos Pequenos Ângulos Para Cálculo do Metacentro

A existência do metacentro M, ou seja, um ponto fixo por onde sempre passe a vertical do empuxo para qualquer ângulo de inclinação só ocorrerá de fato para um volume submerso que tenha uma forma mais simples, como por exemplo, um cilindro flutuando, considerando o giro em torno do seu eixo longitudinal. Apesar disto, constata-se que mesmo para formas submersas complexas a trajetória de B se assemelha a um arco de círculo para uma certa faixa de pequenos ângulos. A faixa efetiva de ângulos na qual a aproximação é válida será maior quanto mais o volume submerso se assemelhar a um cilindro, na direção de inclinação em questão. O metacentro é então o centro de curvatura, para inclinações infinitamente pequenas, da curva que o centro de carena descreve para pequenas variações do ângulo de inclinação.

A Figura 1.6 representa graficamente como é feito o cálculo do metacentro de B, quando a embarcação está inclinada, de acordo com o método dos pequenos ângulos. Assume-se que B gira em torno de um ponto fixo e calcula-se o raio metacêntrico (BM) para aquela posição de B, conforme mostrado na equação 1.2. Com as coordenadas de B e o raio metacêntrico (BM), sabe-se as coordenadas do metacentro (M). Com a posição de M determinada, calcula-se o braço de retorno (GZ), mostrado na Figura 1.6. A equação 1.3 mostra o cálculo do braço de retorno (GZ) e a equação 1.4 mostra o cálculo do momento de retorno (Mr).

$$BM = \frac{I}{\nabla} \quad (1.2)$$

$$GZ = GM \cdot \sin \theta \quad (1.3)$$

$$Mr = \Delta \cdot GM \cdot \sin \theta \quad (1.4)$$

I	Momento de inércia
∇	Volume total submerso
BM	Raio metacêntrico
θ	ângulo de adernamento da embarcação
GM	distância entre o M e o CG
GZ	braço de retorno
Δ	Peso total da embarcação
Mr	Momento de retorno ou de restauração

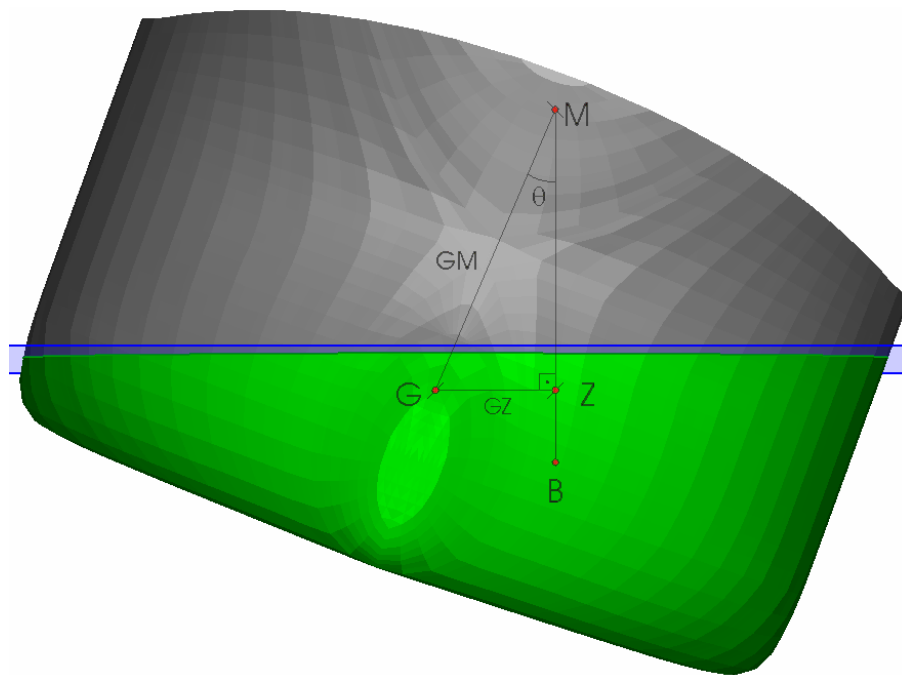


Figura 1.6 – Método dos pequenos ângulos para o cálculo do momento de retorno

O momento de inércia I é matematicamente definido, para a área de linha d'água, como sendo o somatório do produto de cada porção desta área pelo quadrado da sua distância até o eixo de giro da área como um todo. A inércia da área de linha d'água quantifica o montante desta área e o seu grau de afastamento do eixo de giro, ou seja, o quanto o volume em torno da linha d'água se modifica e o centro de empuxo deste volume se desloca lateralmente quando a unidade inclina.

1.5.

Organizações internacionais de Segurança Marítima [9]

As entidades estatutárias são órgãos legislativos cujas regras, critérios e procedimentos devem ser atendidos por força de lei. Elas certificam as embarcações. No âmbito marítimo internacional estas entidades estão agrupadas da seguinte forma:

- *País de Registro*: Toda embarcação é registrada num país, denominado “Bandeira” desta embarcação, cujos regulamentos devem ser atendidos.
- *Área de operação*: São entidades governamentais responsáveis pela fiscalização das embarcações operando em suas águas territoriais e visam basicamente segurança, tráfego e poluição.
- *Acordos Internacionais*: Acordos efetuados entre países que registram plataformas ou abrigam atividades offshore. A principal é a International Maritime Organization (IMO), braço da ONU, que elabora e revisa regulamentos específicos para embarcações móveis engajadas em atividades petrolíferas, e do qual o Brasil é signatário.

Sociedades Classificadoras são entidades privadas e independentes que podem classificar e certificar o projeto, a construção e operação de embarcações. Têm a função de avalista para as seguradoras e controle de qualidade para o armador.

Dentre as entidades estatutárias e sociedades classificadoras, são estas cujos critérios podem ser usados por uma condição de carregamento, implementadas no Sstab:

- DNV 2001 (Det Norske Veritas)
- IMO/MODU 2001
- ABS 2004 (American Bureau of Shipping)
- NMD1992 (Norwegian Maritime Directorate, Amendment March 1999)
- IMO/A18-Res 749 General Criteria
- IMO/A18-Res 749 Weather Criteria
- Marpol 73/78 Regulation 25^a (Damaged) [10]

Isto significa que cada condição de carregamento estará sujeita a uma ou mais destas normas.

1.5.1. Critérios de Estabilidade Intacta e em Avaria

O conceito de estabilidade remete a “limites aceitáveis de inclinação e afundamento”. Estes limites estão bem definidos pelas organizações descritas anteriormente e serão aplicados em função dos diferentes critérios das normas citadas. Estes critérios podem ser agrupados em:

- *Estabilidade Intacta*: é a análise da estabilidade da embarcação apenas sob a ação do vento (Capítulo 4).
- *Estabilidade em Avaria*: é a análise da estabilidade da embarcação após ter sofrido uma avaria (Item 5.1) com conseqüente embarque de água (ou perda de empuxo) mais a ação do vento.

Na prática isto significa que os critérios para uma condição de carregamento intacta são diferentes dos de uma condição de carregamento avariada.

1.5.2. Classificação por Tipo de embarcação

Nas análises de estabilidade executadas com o programa Sstab, são utilizados quatro tipos distintos de embarcação:

- barcaça
- estabilizada por coluna
- auto-elevatórias
- navios

Os critérios utilizados regulamentam apenas estes quatro tipos de embarcação e foram deixados de fora qualquer outro tipo. Obviamente, cada tipo de embarcação está sujeita a um conjunto diferente de critérios.

1.5.3. Filosofia dos Regulamentos

O IMO-MODU tem regras de estabilidade relativamente simples e que são a base das regras das Sociedades Classificadoras.

As regras, tanto da IMO-MODU quanto das Sociedades Classificadoras, direcionam os regulamentos segundo parâmetros indicativos dos riscos operacionais, conforme resumido a seguir.

Local de operação:

- *Irrestrito*: Prevê a operação em qualquer local dentro das áreas petrolíferas comumente exploradas. Considera que o risco é maior do que em locais de operação restritos, pois engloba regiões com condições ambientais severas como Mar do Norte e o Golfo do México.
- *Restrito*: Prevê a operação apenas em uma região definida, por exemplo, a Bacia de Campos, e considera o risco específico da região, limitado a um patamar mínimo.

Está implícito nas regras que condições operacionais permanentes e transitórias, e os calados a elas associados, implicam em níveis de risco e critérios diferenciados, ou seja:

- Calado ou condição permanente: calados nos quais a unidade vai passar a maioria da sua vida útil e, portanto, vai estar sujeita a maiores riscos. Também chamado de calados principais, usualmente: operação, trânsito, sobrevivência, etc.
- Calado ou condição temporária: calados e que a unidade atinge temporariamente, quando passa de uma condição principal para outra. O risco assumido é bem menor. Ex: Passar do calado de trânsito para o de operação.