

**JANINE DO ESPIRITO SANTO**

**MANOBRA DO NAVIO: Análise qualitativa e quantitativa das estabilidades do navio**

Monografia apresentada como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Náutica da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador (a): EDSON MESQUITA DOS SANTOS

Rio de Janeiro

2013

**JANINE DO ESPÍRITO SANTO**

**MANOBRA DO NAVIO: Análise qualitativa e quantitativa das estabilidades do navio**

Monografia apresentada como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas Náutica da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Orientador (a): \_\_\_\_\_

Prof. Edson Mesquita dos Santos, D.Sc.

\_\_\_\_\_  
Assinatura do Orientador

NOTA FINAL: \_\_\_\_\_

A Paulo Sérgio, Carmen Lúcia e Paulo Sérgio Júnior, tudo em minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Antes de tudo, agradeço ao Prof. Dr. Edson Mesquita dos Santos pela paciente orientação desta monografia. Seu direcionamento de pesquisa, suas sugestões e apontamentos para o bom desenvolvimento do trabalho.



*Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo a certeza do seu destino.*

*(LEONARDO DA VINCI)*

Resumo da Tese apresentada à EFOMM como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciências Náuticas

## ANÁLISE QUALITATIVA E QUANTITATIVA DAS ESTABILIDADES DO NAVIO

Janine do Espírito Santo

Rio de Janeiro 2013

Orientador: Edson Mesquita dos Santos

### **RESUMO**

O objetivo deste trabalho é introduzir os conceitos básicos da análise da controlabilidade de um navio e suas diferentes abordagens. De maneira que os resultados desta análise possam conduzir a uma adequação no processo de construção da embarcação para que se assegure um desempenho aceitável de navegação proveniente apenas do seu design.

O material foi organizado de maneira a haver uma progressão de informações começando pelos princípios gerais, seguindo então pelas influências de fatores como o meio ambiente e restrições de canal, a hidrodinâmica dos aparelhos de controle e finalizando com alguns testes e requisitos que devem ser preenchidos pela embarcação na sua performance durante a navegação.

Abstract of Thesis presented to EFOMM as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Nautical Science

## QUALITATIVE AND QUANTITATIVE ANALYSIS OF SHIP'S STABILITY

Janine do Espírito Santo

Rio de janeiro 2013

Advisor: Edson Mesquita dos Santos

### **ABSTRACT**

The goal of this work is to introduce the basics of controllability analysis and its many facets in a manner that will lead to the use of rational design procedures to assure adequate ship controllability.

The subjects are organized to provide an understanding of controllability and for influencing it while interacting with the design of the vessel's hull, machinery and other features. The material is arranged to provide a progression of information starting with general principles, the influences of factors such as environment and channel restrictions, the hydrodynamics of control surfaces and trials and performance requirements.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$F_x, F_y, F_z$  Componentes das forças externas resultantes no sistema solidário.

$F_x, F_y, F_z$  Componentes das forças externas resultantes no sistema inercial.

$I$  Momento de inércia em relação ao centro de gravidade do navio.

$m$  Massa do navio.

$N_{HYD}$  Momento em yaw devido à velocidade relativa entre o fluido e o navio.

$N_{RUD}$  Momento em yaw devido à ação do leme.

$N_v$  Derivada parcial de  $N_{HYD}$  com relação à  $v$ .

$N_{r_{ponto}}$  Derivada parcial de  $N_{HYD}$  com relação à  $r_{ponto}$ , inércia adicional.

$N_{r_r}$  Derivada parcial de  $N_{HYD}$  com relação à  $r$ .

$N_{r_r}$  Componente linearizada do momento  $N_{HYD}$  em função de  $r$ .

$r$  Velocidade em yaw ou razão de guinada.

$r_{\ddot{}}$  Aceleração em yaw.

$r_G$  Vetor posição do centro de gravidade.

$t$  Tempo

$u$  Velocidade linear longitudinal do navio no referencial móvel

$v$  Velocidade linear transversal do navio no referencial móvel.

$u_0$  Velocidade linear longitudinal do navio no referencial fixo

$v_0$  Velocidade linear transversal do navio no referencial fixo.

$u_{\ddot{}}, v_{\ddot{}}$  Acelerações no referencial móvel.

$x, y, z$  Posição no sistema referencial de coordenadas solidário ao navio.

$x_0, y_0, z_0$  Posição no sistema referencial de coordenadas inercial.

$0_0, 0_0, 0_0, G_x, G_y, G_z$  Posição do centro de gravidade no referencial absoluto.



$X$  Força referente ao avanço devido à velocidade relativa entre o fluido e o navio.

$Y$  Força referente ao caimento devido à velocidade relativa entre o fluido e o navio.

$X_u$  Derivada parcial de  $X$  com relação à  $u$ .

$X_{\ddot{u}}$  Derivada parcial de  $X$  com relação à aceleração  $\ddot{u}$ .

$X_{\ddot{v}}$  Derivada parcial de  $X$  com relação à aceleração  $\ddot{v}$ .

$r X_{\ddot{r}}$  Derivada parcial de  $X$  com relação à aceleração  $\ddot{r}$ .

$v Y$  Derivada parcial de  $Y$  com relação à aceleração  $v$ .

$v Y_{\ddot{v}}$  Derivada parcial de  $Y$  com relação à aceleração  $\ddot{v}$ .

$r Y_{\ddot{r}}$  Derivada parcial de  $Y$  com relação à aceleração  $\ddot{r}$ .

$r Y$  Derivada parcial de  $Y$  com relação à aceleração  $r$ .

$Y_{v v}$  Componente linearizada da força  $HYD Y$  em função de  $\beta$ .

$\alpha$  Ângulo de ataque.

$\beta$  Ângulo de deriva, ângulo de ataque do casco em yaw.

$\delta$  Ângulo do leme.

$\Delta$  Incremento de uma variável.

$\rho$  Densidade da água.

$\psi$  Ângulo de yaw da embarcação.

$\psi_{\dot{}}$  Velocidade em yaw, ou razão de guinada ( $r$ ).

$\psi_{\ddot{}}$  Aceleração em yaw. 2 pts

. Derivada em relação ao tempo.

.. Derivada de segunda ordem em relação ao tempo.

max,min (Subscritos) Valores máximos e mínimos.

\_ Função integral.

$\partial$  Derivada parcial.

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>INTRODUÇÃO</b> .....                     | 10 |
| <b>1 EQUAÇÕES DO MOVIMENTO</b> .....        | 12 |
| 1.1 Poluição por água de lastro.....        | 13 |
| 1.1.1 Água de lastro.....                   | 13 |
| 1.1.2 Bioinvasão e água de lastro .....     | 14 |
| 1.2 Poluição por lixo marinho .....         | 15 |
| 1.2.1 Poluição por plástico .....           | 16 |
| 1.2.2 Ilhas de lixo .....                   | 17 |
| 1.2.3 Bioinvasão e lixo .....               | 18 |
| 1.3 Petróleo e derivados.....               | 18 |
| 1.3.1 Comportamento no ambiente .....       | 19 |
| 1.3.2 Poluição por óleo.....                | 20 |
| <b>2 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL</b> .....         | 22 |
| 2.1 Acidentes com derramamento de óleo..... | 22 |
| 2.1.1 Torrey Canyon.....                    | 22 |
| 2.1.2 Exxon Valdez .....                    | 23 |
| 2.1.3 Érika .....                           | 23 |
| 2.1.4 Prestige .....                        | 23 |
| 2.1.5 Deepwater Harizon.....                | 24 |
| <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....           | 41 |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....     | 42 |

# INTRODUÇÃO

Controlabilidade abrange todos os aspectos que regulam a trajetória, velocidade e orientação do navio tanto em mar aberto quanto em águas restritas.

Para uma melhor análise do assunto, este é dividido em três áreas distintas:

1. coursekeeping [steering] – capacidade da embarcação se manter em uma trajetória estável sem que seu rumo seja alterado;
2. maneuvering- mudança controlada na direção do movimento [ curvas ou mudança no rumo];
3. speed changing- mudança controlada na velocidade inclusive as ações de parar e efetuar movimento a ré.

A performance de cada navio varia conforme o ambiente no qual navega, profundidade, restrições do canal e interferências hidrodinâmicas causadas por outras embarcações e obstáculos.

Particularmente, as características relativas à capacidade de manobra ou manutenção do curso do navio são sensíveis ao trim do navio. Para embarcações convencionais, essas duas qualidades tendem a ser excludentes. Ou seja, um navio com uma boa manobrabilidade tende a ter dificuldade em manter um mesmo rumo e aquele que se mantém com facilidade em um mesmo aproamento pode ter dificuldade em manobrar com eficiência e rapidez.

Para a construção de um navio com boa controlabilidade, três aspectos são levados em consideração:

1. Estabelecimento de especificações e critérios para manobras, manutenção do curso e mudança de velocidade;
2. Design do casco, apêndices e sistemas de controle que satisfaçam os requisitos pré-determinados;
3. Condução de testes em diferentes escalas afim de analisar a performance da embarcação e comparar os resultados com os critérios e previsões antes estabelecidos.

Dada esta breve introdução sobre o assunto, propõe-se daqui para frente abordar como tema de análise desta monografia o Estudo da manobra do Navio. Em que, por meio de uma progressão de informações, far-se-á a descrição matemática de como as constantes hidrodinâmicas se relacionam e a análise qualitativa dos resultados das demonstrações.

# **CAPÍTULO 1**

## **EQUAÇÕES DO MOVIMENTO**

### **1.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS**

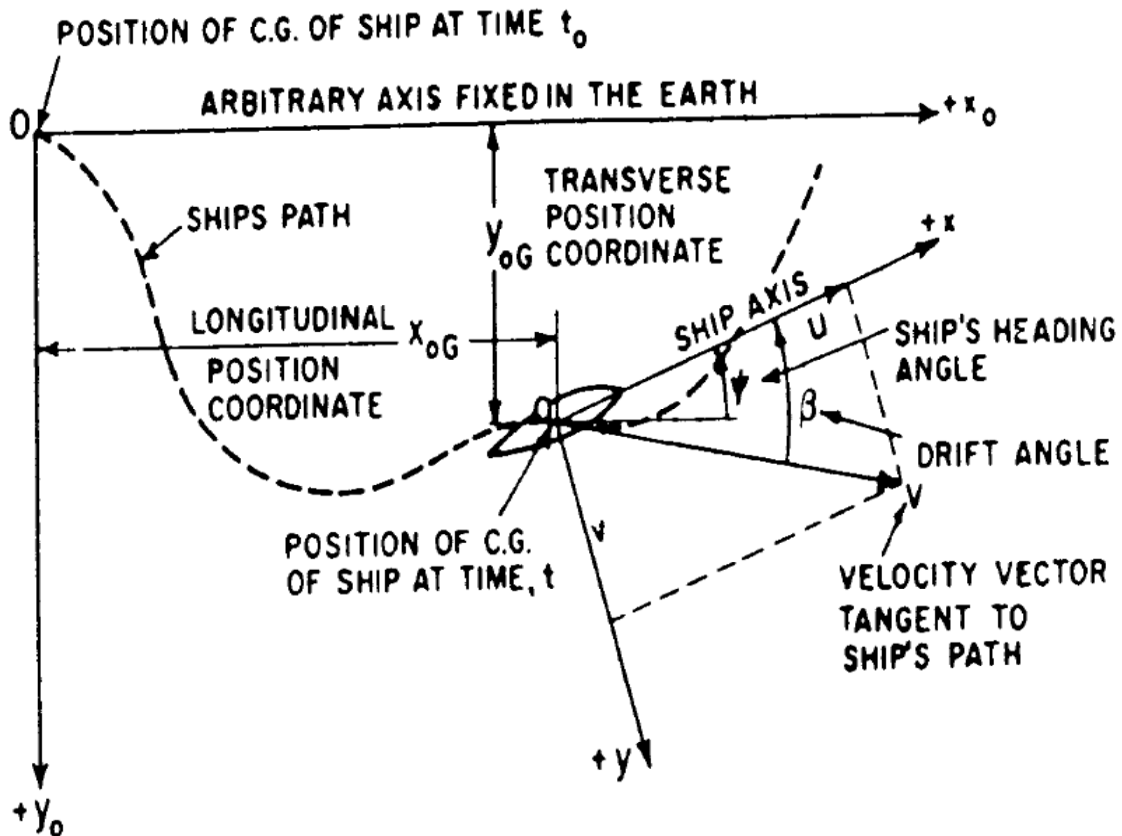
Para embarcações de superfície, a manutenção do curso, a mudança de velocidade e a capacidade de manobra envolvem primordialmente forças, momentos e movimentos que agem em todas as direções no plano horizontal. No caso de submarinos, a terceira dimensão também é levada em consideração.

Forças hidrodinâmicas de movimento e interações no casco, leme e outros apêndices são os aspectos considerados primeiramente. Contudo, não se devem esquecer fatores mecânico, eletrônicos, ambientais e humanos que também influenciam na controlabilidade do navio.

### **1.2 SISTEMA DE COORDENADAS**

A dinâmica básica da manobra e manutenção do curso do navio pode ser descrita e analisada utilizando-se as equações de movimento de Newton. Para que se tenha uma melhor compreensão das equações que regem o movimento do navio, são utilizados dois eixos: o inercial,  $x_0y_0z_0$ , relativo à Terra e o móvel, eixo  $x_0y_0z$ , relativo ao navio.

A figura abaixo representa um sistema de coordenadas que possui eixos fixos e móveis para um determinado navio:



Sendo o caminho percorrido pela embarcação definido pela trajetória do seu centro de gravidade C.G e o rumo definido pelo ângulo  $\psi$  entre os eixos longitudinal e fixo. Denomina-se ângulo de deriva ( $\beta$ ) a diferença entre o aproamento do navio e o seu real curso ou vetor velocidade do C.G que é tangente à trajetória.

Visto que o assunto analisado nesta dissertação relaciona-se à estabilidade direcional do navio, cujo conceito será abordado mais adiante, cabe ressaltar alguns aspectos qualitativos que influenciam neste objeto de estudo. De maneira que existem fatores significativos que relacionam velocidade e trajetória da embarcação como, por exemplo, a mudança de trajetória, caracterizada pela variação do ângulo  $\psi$ , que gera uma mudança involuntária de velocidade devido à variação da força arrasto ou mesmo o controle do impulso gerado em cada propulsor afim de que haja uma influência na trajetória assim como se consegue com mudanças na velocidade.

### 1.2.1 SISTEMA INERCIAL - EIXO FIXO

Voltando ao sistema de coordenadas, tem-se que as direções convencionadas positivas para os eixos  $X_O$ ,  $Y_O$  e  $Z_O$  são respectivamente a direção do movimento, para a direita e para baixo. Enquanto que a origem do sistema, ponto  $O$ , está localizada na interseção do plano da linha d'água com a seção de meio navio e o plano longitudinal que divide o navio em boreste e bombordo.

O movimento do navio no decorrer do tempo é definido pelas coordenadas  $X_{OG}$  e  $Y_{OG}$  e as equações newtonianas que do navio referentes ao eixo fixo na Terra são:

$$X_O = \Delta \ddot{x}_{OG} \text{ [avanço]}$$

$$Y_O = \Delta \ddot{y}_{OG} \text{ [caimento]} \quad [1]$$

$$N = I_z \ddot{\psi} \text{ [cabeceio]}$$

### 1.2.2 SISTEMA SOLIDÁRIO AO NAVIO – EIXO MÓVEL

Apesar da aparente simplicidade das expressões, o movimento do navio é mais convenientemente expresso nas equações que têm por referência os eixos  $x$  e  $y$ . O eixo  $x$  coincide com o eixo longitudinal de inércia o qual, com uma faixa de erro muito pequena, é considerado paralelo à linha de base do navio. A velocidade instantânea, tangente à trajetória percorrida, é representada pelo vetor  $V$  tendo sua orientação dada pelo ângulo  $\beta$ .

Convertendo as equações de [1] do eixo inercial para o eixo fixo no navio teremos as forças  $X$  e  $Y$  expressas em termos de  $X_O$  e  $Y_O$ :

$$X = X_O \cos\psi + Y_O \sin\psi$$

$$Y = Y_O \cos\psi - X_O \sin\psi \quad [2]$$

Analogamente

$$\begin{aligned}\dot{x}_{OG} &= u \cos\psi - v \sin\psi \\ \dot{y}_{OG} &= u \sin\psi + v \cos\psi\end{aligned}\quad [3]$$

o ponto acima dos símbolos indica ser a primeira derivada em relação ao tempo e as letras u e v são componentes do vetor V nos eixos x e y respectivamente. Então:

$$\begin{aligned}\ddot{x}_{OG} &= \dot{u} \cos\psi - \dot{v} \sin\psi - [u \sin\psi + v \cos\psi] \dot{\psi} \\ \ddot{y}_{OG} &= \dot{u} \sin\psi + \dot{v} \cos\psi + [u \cos\psi - v \sin\psi] \dot{\psi}\end{aligned}\quad [4]$$

Substituindo [4] em [1] e inserindo os valores de  $X''$  e  $Y''$  na equação [2] chega-se às expressões:

$$\begin{aligned}X &= \Delta[\dot{u} - v\dot{\psi}] \\ Y &= \Delta[\dot{v} + u\dot{\psi}]\end{aligned}$$

Essas e a terceira equação de [1] representam pertinentemente as equações de movimento do navio no plano horizontal assumindo a embarcação sem estar sob efeito do balanço, caturro ou arfagem. Portanto chega-se ao seguinte conjunto:

$$X = \Delta(u' - v\psi')$$



$$Y = \Delta \dot{v} + \dot{u}(\psi) \quad [5]$$

$$N = I_z \ddot{\psi}$$

A partir daí nota-se a presença de termos como  $\Delta U \dot{\psi}$  na equação de caimento e  $\Delta V \dot{\psi}$  na de avanço que não estavam presentes nas equações de [1]. Tais termos são relativos às forças centrífugas as quais aparecem apenas em eixos móveis e não quando o eixo é fixo à Terra.

As equações de [5] foram desenvolvidas para o caso de a origem dos eixos  $O$  ser localizada onde é o centro de gravidade do navio. Entretanto, freqüentemente é desejável que se mude o local desta origem para fins de simplificação dos cálculos como com submarinos em que a origem é localizada na intersecção dos eixos e com navios de superfície em que se posiciona a origem à meio navio visto que a posição do CG está em constante mudança devido às condições de carregamento. [Neste trabalho assume-se que o LCG e o LCB coincidem]

### **1.3 FORÇAS ATUANTES NO NAVIO DURANTE UMA MANOBRA**

As forças e momento que compõem as equações de movimento citadas anteriormente são compostos dos seguintes fatores:

- a) Forças hidrodinâmicas - atuantes no casco e seus apêndices devido à velocidade e aceleração, deflexões do leme e rotação do propulsor;
- b) Inércia [forças de reação] - causadas pela aceleração do navio;
- c) Meio ambiente – forças causadas pelo vento, ondas e correntes;
- d) Forças externas como as impelidas por rebocadores e thrusters.

Os primeiros dois tipos atuam no plano horizontal e, apesar de ocorrerem efeitos de balanço em embarcações de alta velocidade e hidroaviões, esses envolvem apenas os graus de liberdade: avanço, caimento e cabeceio. As forças hidrodinâmicas dividem-se em duas

categorias básicas: as provenientes da velocidade da água que passa pelo casco [forças de amortecimento] e as provenientes da aceleração do casco em relação à água.

O efeito do leme na guinada é indireto. O movimento do leme produz um momento que causa uma mudança no rumo a fim de adquirir um ângulo de ataque na direção do movimento do CG. Conseqüentemente, forças hidrodinâmicas no casco do navio são criadas as quais, após algum tempo, causam uma mudança no movimento lateral do CG. Esse movimento sofre oposição da força de inércia e, quando o leme é mantido em uma posição fixa, atinge-se uma taxa de guinda estabilizada visto que as forças se equilibram.

A velocidade do vento não é uma variável constante, portanto, forças e momentos causados pelo vento são analisados conforme o tempo avança. Estas forças geralmente são proporcionais à área do casco acima da linha d'água e ao quadrado da velocidade relativa entre o navio e o vento tendo seu valor variado a medida que a direção do vento relativo muda.

O movimento de caturro muda a forma da parte imersa do casco e, portanto, tem um efeito significativo nos coeficientes das equações de movimento particularmente nos mares de proa e de alheta.

Finalmente, rebocadores e thrusters possuem efeito quando utilizados com o navio submetido a baixas velocidades. As forças que esses exercem são tratadas como forças adicionais independentes.

No caso mais simples de análise da controlabilidade do navio, que será objeto de estudo deste trabalho, assumem-se as condições de mar aberto e calmo, sem ventos, ondas, correntes e forças externas.

## **CAPITULO 2 - EQUAÇÕES LINEARES**

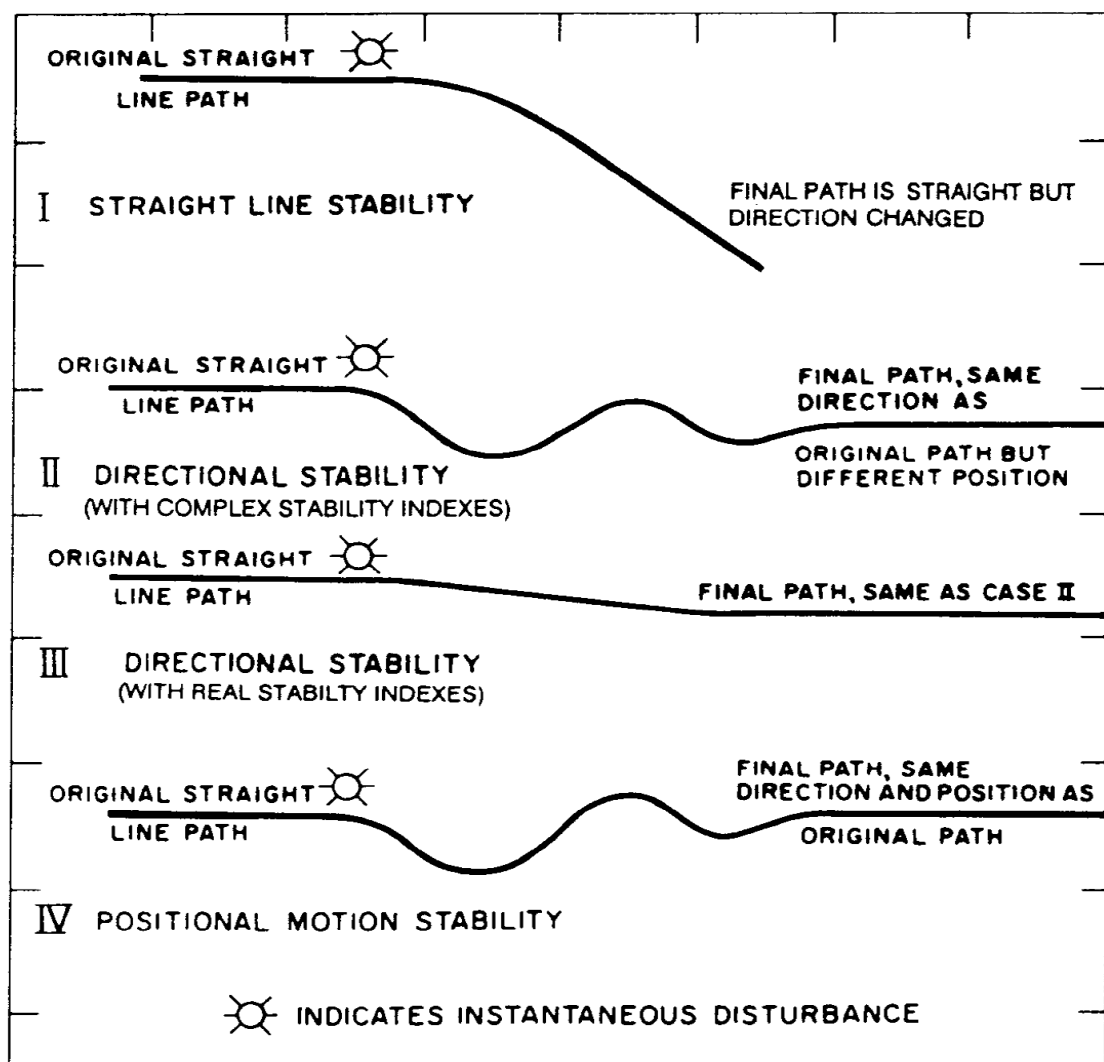
### **2.1 – DEFINIÇÕES**

O conceito de manutenção da trajetória está fortemente relacionado ao conceito de estabilidade direcional e estabilidade dinâmica. Um corpo é dito estável quando, momentaneamente sofre um distúrbio externo, e, após um determinado período de tempo de cessada a perturbação, tende a retornar ao estado de equilíbrio anterior. No caso de se manter uma trajetória, a perturbação externa mais óbvia seria uma onda ou uma rajada de vento e para haver um resultado apreciável seria desejável que o navio retornasse à sua trajetória inicial, após cessado o distúrbio, sem que houvesse intervenção do timoneiro. Se o navio terá este comportamento ou não depende do tipo de estabilidade que esse possui.

### **2.2 ESTABILIDADE DA TRAJETÓRIA COM O APARELHO DE GOVERNO FIXO E ATUANDO**

Os vários tipos de estabilidade associadas aos navios são classificadas pela característica do estado de equilíbrio inicial que permanece na trajetória final da embarcação.

Segue-se abaixo os principais tipos de estabilidade de movimento ao qual o navio pode ficar submetido após uma perturbação considerando o estado inicial ser esse estar viajando a uma velocidade constante e em uma trajetória retilínea:



- I) ESTABILIDADE DINÂMICA : a trajetória final, após cessada a perturbação, mantém a característica retilínea do estado de equilíbrio inicial só que em uma

nova direção. Este tipo depende apenas da forma do casco do navio e da maneira como esse interage com a água.

- II) ESTABILIDADE DIRECIONAL: a trajetória final, após cessada a perturbação, mantém não só a característica retilínea inicial como também a direção.
- III) ESTABILIDADE DIRECIONAL: semelhante ao exemplo acima diferindo apenas no fato do navio não oscilar após sofrer a perturbação externa.
- IV) ESTABILIDADE POSICIONAL: o navio retorna à trajetória original mesmo sofrendo oscilações.

Os casos citados acima formam uma hierarquia ascendente na qual o caso I, estabilidade dinâmica, é o objetivo dos arquitetos navais quando o navio é pilotado manualmente enquanto que os outros casos requerem vários níveis de controle automático.

Geralmente considera-se o aparelho de governo, leme, fixo no ângulo de zero grau, entretanto, os casos também podem ser analisados com o leme atuando. Abaixo, seguem-se alguns exemplos dessas distinções:

- a) um navio navegando em mar calmo possui estabilidade posicional no plano vertical e, portanto, também as estabilidades dinâmica e direcional no mesmo plano, com o leme em um ângulo fixo. Neste caso, forças hidrostáticas e os momentos introduzem um tipo único de estabilidade o qual, apenas seria possível existir sem a presença desses, caso fossem utilizados sofisticados controles automáticos ou manuais. O fato de o operador ou designer não poder garantir a existência desta estabilidade não reduz sua importância.
- b) No plano horizontal, em mar aberto e com propulsão a ré, um navio à propulsão mecânica não pode possuir nem estabilidade direcional nem posicional com o leme fixo porque as mudanças na flutuabilidade, que estabilizam a embarcação no plano vertical, deixam de existir neste caso.
- c) O único caso de estabilidade de movimento possível com navio de propulsão mecânica no plano horizontal e com leme fixo em um determinado ângulo é a estabilidade dinâmica. Na verdade muitos navios não a possuem. Embora seja um tipo de estabilidade desejável, não é obrigatório que o navio a possua.

## 2.3 Análise matemática das variáveis que influenciam na estabilidade

Para cada tipo de estabilidade com leme fixo está associado um número de variáveis que indicam se o navio é estável ou não e a magnitude desta estabilidade. Desta maneira lança-se mão de equações diferenciais de movimento.

Para se entender o impacto dos diferentes tipos de design na controlabilidade do navio é necessário se familiarizar a certos aspectos fundamentais relacionados a estabilidade e ao desenvolvimento e uso das equações lineares de movimento.

Assume-se que as forças  $X$  e  $Y$  e o momento  $N$  sejam compostos de várias variáveis as quais são função da velocidade e da aceleração do navio. Nos casos mais gerais, as variáveis incluem termos que também dependem da orientação do navio relativa ao referencial inercial. De maneira que:

$$\begin{aligned} X &= F_x [u, v, \dot{u}, \dot{v}, \dot{\psi}, \ddot{\psi}] \\ Y &= F_y [u, v, \dot{u}, \dot{v}, \dot{\psi}, \ddot{\psi}] \\ N &= F_\psi [u, v, \dot{u}, \dot{v}, \dot{\psi}, \ddot{\psi}] \end{aligned} \quad [6]$$

Para se obter um índice numérico da estabilidade de movimento, as expressões funcionais mostradas em [6] devem ser reduzidas a fórmulas matemáticas. Isto pode ser feito por meio da expansão de Taylor em que a equação de  $Y$  passa a ser escrita da seguinte maneira:

$$Y = F_y (u_1, v_1, u_1', v_1', \psi_1, \dot{\psi}_1, \ddot{\psi}_1) + (u - u_1) \frac{\partial Y}{\partial u} + (v - v_1) \frac{\partial Y}{\partial v} + \dots + (\ddot{\psi} - \ddot{\psi}_1) \frac{\partial Y}{\partial \ddot{\psi}} \quad [8]$$

Em que o índice 1, agregado às variáveis, indica que os valores referem-se ao estado inicial de equilíbrio e as derivadas parciais também são avaliadas em relação à condição de equilíbrio.

Visto que o estado inicial de equilíbrio é o de estabilidade dinâmica a uma velocidade constante, tem-se que,  $v_1 = \dot{v}_1 = \dot{\psi}_1 = \ddot{\psi}_1 = 0$ . Além disso, sendo a maioria dos navios simétricos em relação ao plano  $xz$ , esses viajam em linha reta com ângulo de ataque zero, o que caracteriza a velocidade  $v_1$  também ser zero. Entretanto, isso não é necessariamente constatado em navios que possuem uma quantidade não comum de propulsores.

De maneira análoga tem-se que  $\delta Y/\delta u = \delta Y/\delta u' = \delta N/\delta u = \delta N/\delta u' = 0$  [variação da força de caimento  $Y$  e momento  $N$  dada uma mudança na variável  $u$  ou  $u'$ ] já que, devido à simetria, mudanças na velocidade e aceleração para vante não produzem forças transversais. Conclui-se então que se o navio encontra-se em uma situação de equilíbrio em que esse navega em linha reta, não se pode ter força  $Y$  atuando nesta condição. Portanto,  $Y = F_y [u_1, v_1, \dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{\psi}_1, \ddot{\psi}_1]$  é também zero. Apenas  $u_1$  não é zero, porem é igual à velocidade resultante  $V$  no estado de equilíbrio inicial. Com estas simplificações as equações da força  $Y$  [caimento] e momento  $N$  [cabeceio] são escritas da seguinte maneira:

$$Y = \frac{\partial Y}{\partial v} v + \frac{\partial Y}{\partial \dot{v}} \dot{v} + \frac{\partial Y}{\partial \dot{\psi}} \dot{\psi} + \frac{\partial Y}{\partial \ddot{\psi}} \ddot{\psi} \quad [9]$$

$$N = \frac{\partial N}{\partial v} v + \frac{\partial N}{\partial \dot{v}} \dot{v} + \frac{\partial N}{\partial \dot{\psi}} \dot{\psi} + \frac{\partial N}{\partial \ddot{\psi}} \ddot{\psi}$$

Os valores  $\delta Y$ ,  $\delta \dot{\psi}$ ,  $\delta Y/\delta \ddot{\psi}$ ,  $\delta N/\delta v$ ,  $\delta N/\delta \dot{v}$  geralmente são pequenos e diferentes de zero porque a maioria dos navios não são simétricos em relação ao plano  $yz$ . Ainda que o plano esteja a meio navio, o formato da proa e popa é bastante diferente.

Em se tratando da força  $X$  relacionada ao avanço, sua equação completa é dada pela equação:

$$X = \frac{\partial X}{\partial u} u + \frac{\partial X}{\partial \dot{u}} \dot{u} + \frac{\partial X}{\partial v} v + \frac{\partial X}{\partial \dot{v}} \dot{v} + \frac{\partial X}{\partial \psi} \psi + \frac{\partial X}{\partial \bar{\psi}} \bar{\psi}$$

Contudo, as derivadas parciais  $\delta X/\delta v$ ,  $\delta X/\delta \dot{v}$ ,  $\delta X/\delta \psi$ ,  $\delta X/\delta \bar{\psi} = 0$  devido à simetria existente no plano xz. Logo a equação de X é escrita:

$$X = \frac{\partial X}{\partial u} u + \frac{\partial X}{\partial \dot{u}} \dot{u}$$

Em que  $\delta u = u - u_1$ .

Igualando [9] e [5] teremos:

$$\Delta(u - v\psi) = \frac{\partial X}{\partial u} u + \frac{\partial X}{\partial \dot{u}} \dot{u}$$

$$\Delta \dot{v} + \dot{u}(\psi) = \frac{\partial Y}{\partial v} v + \frac{\partial Y}{\partial \dot{v}} \dot{v} + \frac{\partial Y}{\partial \psi} \psi + \frac{\partial Y}{\partial \bar{\psi}} \bar{\psi}$$

$$I_Z \dot{\bar{\psi}} = \frac{\partial N}{\partial v} v + \frac{\partial N}{\partial \dot{v}} \dot{v} + \frac{\partial N}{\partial \psi} \psi + \frac{\partial N}{\partial \bar{\psi}} \bar{\psi}$$

Escrevendo as equações acima com uma notação mais simplificada, chegamos ao seguinte conjunto:

$$-X_u [u - u_1] + [\Delta - X_u] \dot{u} = 0$$



$$-Y_{vv} + [\Delta - Y_v] - [Y_r - \Delta u_1]r - Y_r \dot{r} = 0 \quad [10]$$

$$-N_{vv} - N_v \dot{v} - N_{rr} + [I_z - N_r] = 0$$

Todos os termos das duas primeiras equações de [10] tem a dimensão de força enquanto que os termos da terceira tem a dimensão de momento. Portanto, para torná-las adimensionais, o que facilita a análise dessas, divide-se as equações de força por  $[\rho/2]L^2V^2$  e as equações de momento por  $[\rho/2]L^3V^2$ . De maneira que a equação fica:

$$N'_{vv} = \left( \frac{Nv}{[\frac{\rho}{2}]L^3V} \right) \left( \frac{v}{V} \right) = \frac{Nvv}{[\frac{\rho}{2}]L^3V}$$

$$N'_{v\dot{v}} = \left( \frac{N\dot{v}}{[\frac{\rho}{2}]L^4} \right) \left( \frac{\dot{v}L}{V^2} \right) = \frac{N\dot{v}\dot{v}}{[\frac{\rho}{2}]L^3V^2}$$

Desconsiderando a equação do avanço, as formas adimensionais das equações da força Y e do momento são dadas pelas expressões:

$$-Y'_{vv} + (\Delta' - Y'_v)\dot{v}' - (Y'_r - \Delta')r' - Y'_r \dot{r}' = 0$$

$$-N'_{vv} - N'_{v\dot{v}} - N'_{rr} + (I'_z - N'_r)\dot{r}' = 0 \quad [11]$$

Em que a principal diferença, além da diferente notação, é que o termo referente à velocidade longitudinal,  $u_1$ , desaparece visto que  $u_1/V \approx 1$  para pequenas perturbações.

Devido ao fato do termo  $Y^{\ddot{v}}$  estar adicionado ao termo de massa, esse é denominado coeficiente virtual de massa o qual é sempre negativo [  $Y$  atua de maneira a se opor à variação positiva de  $\ddot{v}$  ]. É, portanto, idêntico ao conceito de massa adquirida: a força necessária para acelerar um corpo num fluido é sempre maior que o produto do deslocamento atual vezes a aceleração do navio. Então, esta força acrescida deve ser interpretada como uma força hidrodinâmica que surge devido à aceleração do corpo no fluido.

O termo  $N^{\ddot{r}}$  é definido de maneira análoga sendo também denominado coeficiente virtual de momento de inércia. Esses coeficientes seriam zero caso o formato do casco do navio fosse simétrico em relação ao plano  $yz$ . É também conveniente usar uma notação que indique a origem do termo para que esse seja melhor identificado. Por exemplo, o termo  $Y_{vv}$  é utilizado para se denotar a componente  $y$  da força hidrodinâmica que atua no centro de gravidade do navio decorrente do ângulo de ataque  $\beta$ .

É importante ressaltar que as equações mostradas até agora consideram o ângulo do leme fixo em zero grau. Entretanto, se se quer representar uma trajetória em que os controles estão trabalhando em ângulos distintos, deve-se incluir no segundo membro da equação termos que expressem a deflexão do leme em função do tempo. A componente linear da força criada pela deflexão do leme é dada pelo termo  $Y_{\delta R}$  e a do momento, por  $N_{\delta R}$ . Em que  $R$  é a deflexão do leme em graus, medida a partir do plano  $xz$  do navio para o plano do leme. Uma deflexão positiva corresponde a um giro para bombordo [para lemes localizados a ré].

A força lateral proveniente da deflexão do leme cria um momento que tende a girar o navio e esta ação de girar cria um ângulo de ataque relativo ao movimento do navio pela água.

Os casos estudados são os de pequenas perturbações nos quais apenas pequenas deflexões são admitidas. Com esta restrição, derivadas parciais como  $Y^{\prime}_v$ ,  $N^{\prime}_v$ ,  $Y^{\prime}_r$  e  $N^{\prime}_r$  são analisadas com ângulo de leme zero e assume-se que essas não variam com outros possíveis valores de  $\delta R$ . Além disso, para configurações mais comuns de navios, considera-se  $Y^{\prime \ddot{r}} = N^{\prime \ddot{v}} \approx 0$  visto que a magnitude das perturbações não implicam mudança significativa na taxa de variação de giro ou na aceleração da velocidade transversal da embarcação.

Dadas as considerações feitas acima, seguem-se abaixo as equações de movimento incluindo as derivadas parciais relativas à força e ao momento gerados pelo leme:

Força [caimento]:  $n'_z \dot{r}' - N'_v v' - N'_r r = N'_\delta \delta R$

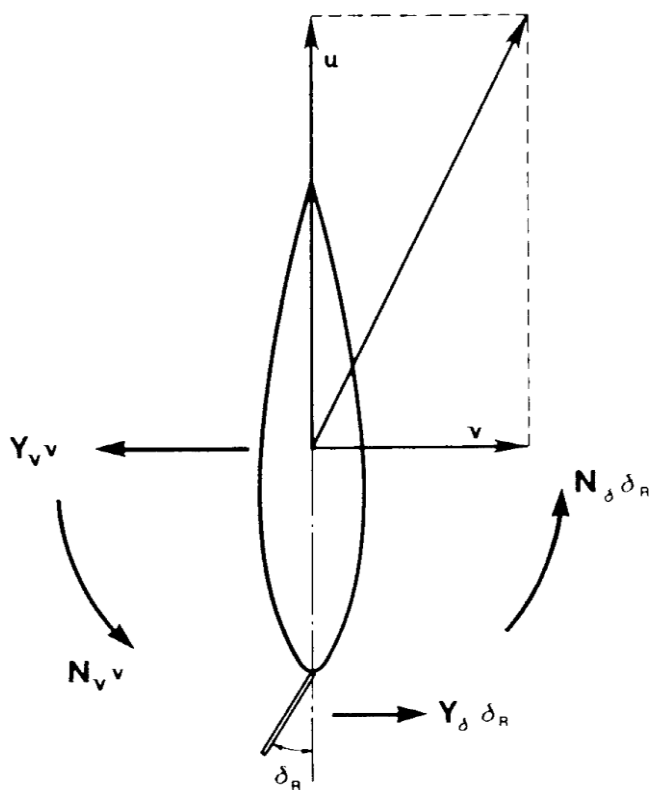
[12]

Momento [cabeceio]:  $\Delta_y \dot{v} - Y'_v v' - (Y'_r - \Delta)r' = Y'_\delta \delta R$

Em que :  $l'_z - N_r \approx 2 l_z$

$$\Delta' - Y'_v \approx 2\Delta'$$

A figura abaixo ilustra a força e o momento induzidos no leme dada uma certa deflecção:



## CAPITULO 3

### ANALISE DA ESTABILIDADE COM CONTROLES FIXOS

#### 3.1 ÍNDICES DE ESTABILIDADE

Utilizando apenas termos lineares, as soluções para as equações de avanço, caimento e cabeceio geram funções lineares que permitem analisar a estabilidade de movimento. Este capítulo desenvolve os índices básicos de estabilidade e descreve a manobra que resulta na curva espiral cujas medidas numéricas apontam as características de estabilidade do navio.

Partiremos da resolução das equações [10] para se fazer a análise qualitativa dos resultados:

$$-X_u [u - u_1] + [\Delta - X_{\dot{u}}] \dot{u} = 0$$

$$-Y_{vv} + [\Delta - Y_v] \dot{v} - [Y_r - \Delta u_1]r - Y_r \dot{r} = 0 \quad [10]$$

$$-N_{vv} - N_v \dot{v} - N_r r + [I_z - N_r] \dot{r} = 0$$

Reescrevendo-as:

$$[X_u + (-\Delta + X_{\dot{u}}) \frac{\partial}{\partial t}] u = 0$$

[a]

$$[Y_v + (-\Delta + Y_{\dot{v}}) \frac{\partial}{\partial t}] v + [(Y_r - \Delta u_1) + Y_{\dot{r}} \frac{\partial}{\partial t}] r = 0$$

[b] [c]

$$[N_v + N_{\dot{v}} \frac{\partial}{\partial t}] v + [N_r + (-I_z + N_{\dot{r}}) \frac{\partial}{\partial t}] r = 0$$

[d] [e]

Colocando-as na forma matricial para facilitar os cálculos, obtemos a matriz Q:

$$Q = \begin{pmatrix} au & 0 & 0 \\ 0 & bv & cr \\ 0 & dv & er \end{pmatrix} = 0 \Rightarrow Q = \begin{pmatrix} a & 0 & 0 & u & 0 \\ 0 & b & c & v & 0 \\ 0 & d & e & r & 0 \end{pmatrix} = 0$$

$$\det Q = a(-1)^2 \cdot (be - dc) = 0$$

$$= a(be - dc) = 0$$

SOLUÇÃO I)  $a = 0$

$$X_u + (-\Delta + X_{\dot{u}}) \frac{\partial}{\partial t} = 0 \quad \therefore u = u_0 e^{\sigma t} \rightarrow \sigma = 0$$

SOLUÇÃO II)  $be - cd = 0$

$$[ Y_v + (-\Delta + Y_{\dot{v}}) \frac{\partial}{\partial t} ] \cdot [ N_r + (-I_z + N_{\dot{r}}) \frac{\partial}{\partial t} ] - [ (Y_r - \Delta u_1) + Y_{\dot{r}} \frac{\partial}{\partial t} ] \cdot [ N_v + N_{\dot{v}} \frac{\partial}{\partial t} ] = 0$$

$$[ (-\Delta + Y_{\dot{v}})(-I_z + N_{\dot{r}}) - Y_{\dot{r}} \cdot N_v ] \frac{\partial^2}{\partial t^2} +$$

[A]

$$[ N_r (-\Delta + Y_{\dot{v}}) + Y_v (-I_z + N_{\dot{r}}) - N_v \cdot Y_{\dot{r}} - N_{\dot{v}} \cdot (Y_r - \Delta u_1) ] \frac{\partial}{\partial t} +$$

[B]

$$[ Y_v \cdot N_r - N_v (Y_r - \Delta u_1) ] = 0 \tag{13}$$

[C]

A expressão acima proveniente do determinante é uma equação característica da forma  $A\sigma^2 + B\sigma + C = 0$  em que  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  são as raízes da equação expressas na solução padrão e possuem a dimensão de  $1/t$  sendo  $t$  o tempo decorrido da manobra.

Visto que se trata de uma equação diferencial de segunda ordem, as soluções padrão para  $v'$  e  $r'$  são dadas pelas seguintes expressões:

$$v' = V_1 e^{\sigma_1 t} + V_2 e^{\sigma_2 t}$$

[14]

$$r' = R_1 e^{\sigma_1 t} + R_2 e^{\sigma_2 t}$$

Em que  $e = 2,718$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $R_1$  e  $R_2$  são constantes de integração. É observado das equações de [13] que se ambos os valores de  $\sigma$  forem negativos,  $v'$  e  $r'$  tenderão a zero à medida que o tempo transcorre, o que significa que a trajetória do navio, após cessada a perturbação, retornará a ser uma linha reta. Esta situação corresponde ao caso I da figura mostrada no capítulo 2.

Caso  $\sigma_1$  ou  $\sigma_2$  for positivo,  $v'$  e  $r'$  tendem a crescer com o tempo o que significa que, após a perturbação, as variáveis que influenciam o movimento transversal e a rotação do navio não cessam, impedindo que esse volte a seguir uma trajetória em linha reta e, a não ser que seja feito o uso do leme para corrigir o rumo, o navio tenderá a entrar em uma trajetória curva estável.

As duas raízes da equação [13], devendo ambas serem negativas para se assegurar a estabilidade com os controles fixos, são:

$$\sigma_{1,2} = \frac{-\frac{B}{A} \pm \left[ \left( \frac{B}{A} \right)^2 - \frac{4C}{A} \right]^{\frac{1}{2}}}{2} \quad [13a]$$

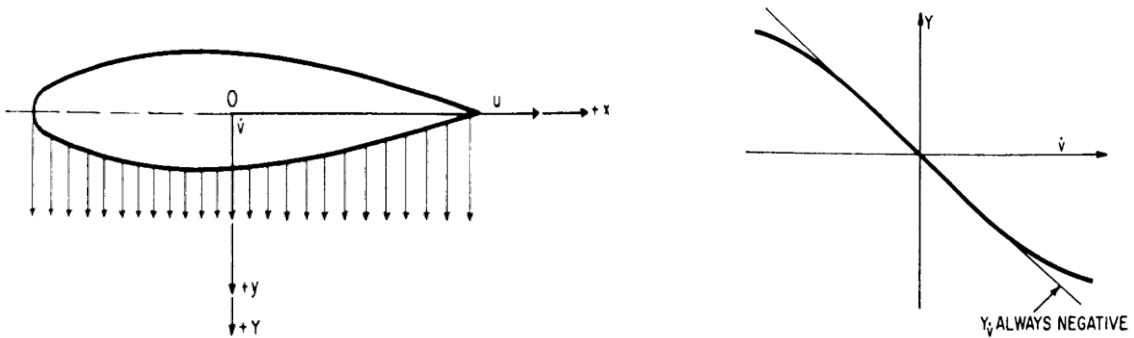
Do ponto de vista prático, apenas  $\sigma_1$  é utilizado como parâmetro para navios de superfície tendo em vista que o valor algébrico de  $\sigma_2$  é menor. Após cessado o distúrbio, a descrição do movimento do navio pelo termo negativo  $\sigma_1$  já é considerada uma boa medida da estabilidade da embarcação.

## 3.2 CRITÉRIOS DE ESTABILIDADE

A equação [13a] mostra que as condições para que  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  sejam negativos e reais são se  $C/A > 0$  e  $B/A > 0$ .

Portanto, visto a impossibilidade de se generalizar o valor das variáveis hidrodinâmicas devido à particularidade de cada navio, far-se-á uma análise qualitativa dessas para se descobrir sob que condições o critério é obedecido:

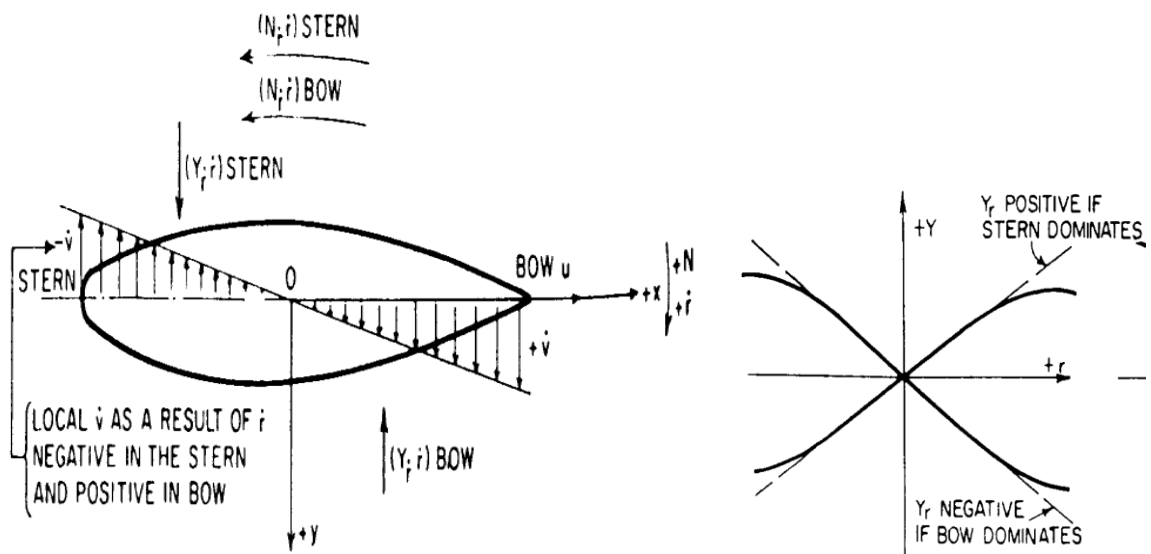
CASO I) Variação da força Y de caimento dada uma velocidade transversal  $v$  ( $Y_v = \frac{\partial Y}{\partial v} v$ )



- $Y_v$  caracteriza-se por um valor grande (somatório das forças ao longo do casco) e negativo (sentidos opostos);
- $Y_v$  possui o mesmo comportamento;
- A magnitude de  $Y_v$  está diretamente relacionada ao volume da carena, ou seja, quanto maior a massa d'água deslocada, maior a força exercida sobre o casco.

CASO II) Variação da força Y de caimento dada uma velocidade rotacional  $r$  ( $Y_r = \frac{\partial Y}{\partial r} r$ )

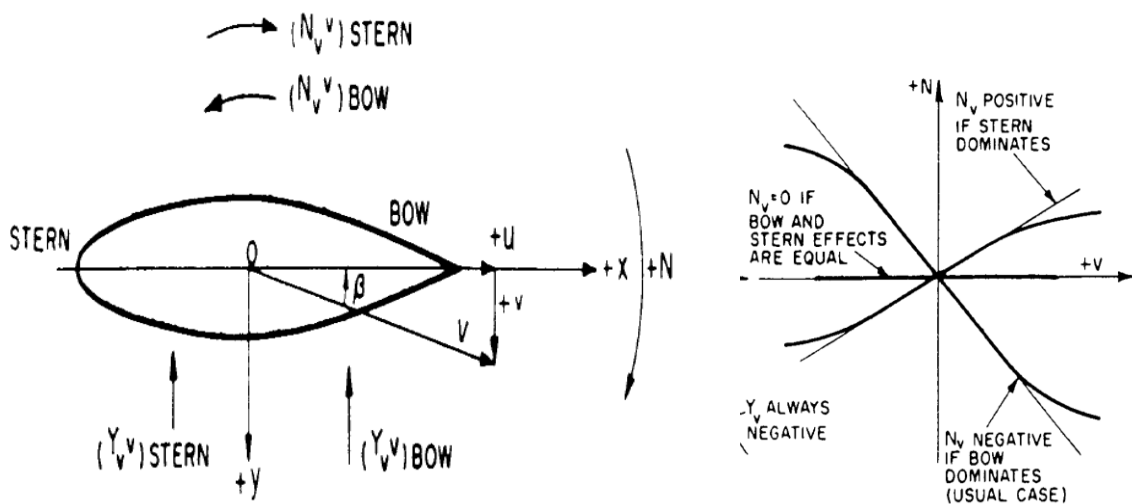




- $Y_r$  caracteriza-se por um valor pequeno (forças da proa e popa em sentidos contrários) e o sinal caso o momento gerado pela popa prevaleça (+) ou pela proa (-);
- $Y^{\dot{r}}$  se comporta de maneira semelhante.

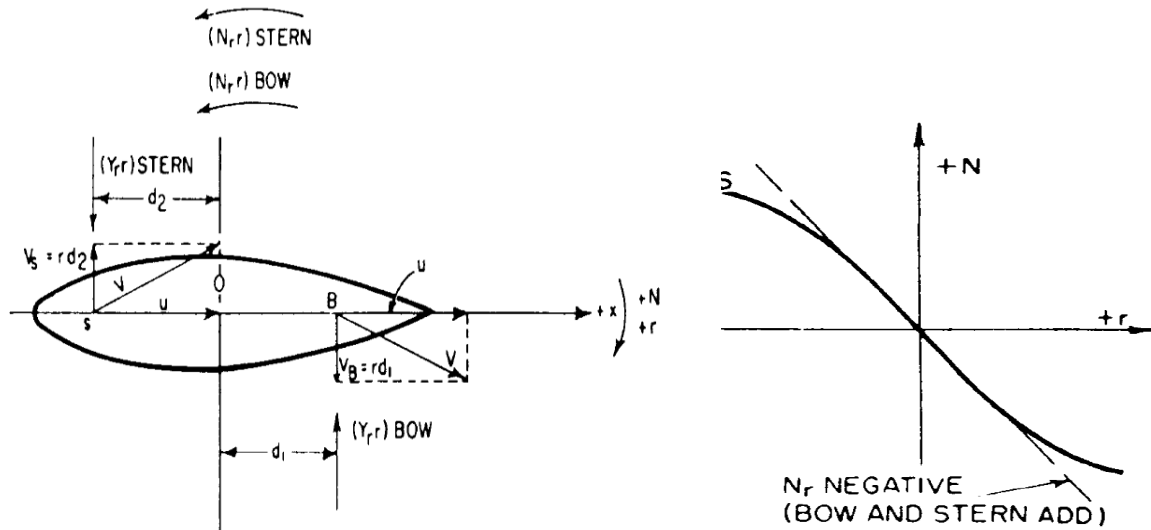
CASO III) Variação da momento  $N$  de cabeceio dada uma velocidade transversal  $v$

$$(Y_v = \frac{\partial Y}{\partial v} v)$$



CASO IV) Variação da momento N de cabeceio dada uma velocidade rotacional r

$$(Y_r = \frac{\partial Y}{\partial r} r)$$



- $N_r$  caracteriza-se por um valor negativo ( sentido contrário ao da rotação) e grande por se somarem;
- $N_r^*$  comporta-se de maneira semelhante.

Analisando as magnitudes e sinais das variáveis das expressões de A e B, conclui-se que:

I)  $A > 0$  e grande

II)  $B > 0$  e grande

III) Sendo  $C = Y_v \cdot N_r - N_v (Y_r - \Delta u_1)$ , para que o critério de estabilidade seja seguido, temos a relação:

$$\frac{N_r}{Y_r - \Delta u_1} > \frac{N_v}{Y_v}$$

$$[p] \quad [q]$$

Portanto: Se  $p \gg q$ , muito estável. Mantém a trajetória em linha reta com facilidade.

Se  $p > q$ , estável, mas é necessário que se aplique leme para que se mantenha o navio em linha reta.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O presente trabalho demonstrou que apesar de a poluição marinha ser um problema antigo e de grande impacto para o ecossistema e, conseqüentemente, para a vida humana, apenas a pouco tempo se tornou uma preocupação efetiva a nível internacional.

Torna-se evidente que a poluição não fica estática, que uma área afetada, afeta outras através das correntes marinhas, por isso é importante que novas convenções e regulamentos sejam produzidos e que os países cheguem a acordos a respeito da troca de informações concernente ao assunto.

Evidenciou-se nesse trabalho, o papel fundamental da Marinha Mercante nesse processo, e espera-se que nos trabalhos que se seguem a esse o panorama ambiental seja melhor do que o atual.

Foram mostrados alguns projetos e instituições que tentam combater o assunto, mas é fundamental que exista uma consciência global a respeito do tema, pois sem essa consciência, muitos dos projetos existentes como o mapeamento de lixo em diferentes regiões ou a coleta manual, tornam-se altruístas.

Fica a esperança de que em breve, tenhamos a consciência efetiva sobre o impacto das nossas atividades na natureza e de que respostas mais eficientes sejam aplicadas aos possíveis incidentes futuros.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

LEWIS, EDWARD V. – Principles of Naval Architecture, SNAME (The Society of Naval Architects and Marine Engineers) Vol. III (3ª Edição: 1988/1989).

CRENSHAW, RUSSEL SYDNOR – Naval Shiphandling (4ª Edição: 1975).  
Chapter 2 – Forces Affecting the Ship



**MARINHA DO BRASIL**

**CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA**

**CURSO DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE**



**JANINE DO ESPIRITO SANTO**



# **MANOBRA DO NAVIO**

**RIO DE JANEIRO**

**2013**