

Instituto Panamericano de Ingeniería Naval

Instituto Pan-americano de Engenharía Naval Pan-american Institute of Naval Engineering

> XI CONGRESO PANAMERICANO DE INGENIERIA NAVAL, TRANSPORTE MARITIMO E INGENIERIA PORTUARIA.

DESENVOLVIMENTO E APLICACAO DE UN SIMULADOR DE MANOBRAS

EM BAIXAS VELOCIDADES

PAPER N° 16

HERNANI LUIZ BRINATI
Profesor Assistente Doutor da EPUSP
BRASIL

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE UM SIMULADOR DE MANOBRAS EM

BAIXAS VELOCIDADES

Souza Junior, J.D.A.R. (*)
Brinati, H.L. (**)

RESUMO

Este trabalho apresenta a descrição da configuração desenvolvida para um simulador de manobras de navios, baseado no uso de microcomputador.

O simulador foi desenvolvido para o estudo de manobras em baixa velocidade, considerando efeitos de águas rasas e a ação de ventos, correntes e rebocadores.

É feita uma descrição sucinta dos modelos matemáticos representando o movimento da embarcação e a ação dos elementos ambientais e de controle.

A aplicação do simulador é ilustrada através da realização de manobras de atracação e desatracação de navio em um terminal.

ABSTRACT

This paper describes the development of a micro-computer based ship manoeuvring simulator.

The simulator has been developed aiming the study of low speed ship manoeuvres assisted by tugs, taking into account shallow water, wind and current effects.

A brief description of the mathematical models representing ship dynamics and the influence of environmental and control elements is presented.

The use of the simulador is illustrated by a case study in which several manoeuvres have been performed.

- (*) Jessé D'Assunção Rebello de Souza Junior, Auxiliar de Ensino da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Naval.
- (**) Hernani Luiz Brinati, Professor Assistente Doutor da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, De partamento de Engenharia Naval.

1. INTRODUÇÃO

O emprego de simuladores de movimento tornou-se fre quente a partir da década de 70 como instrumento para ava liar as características de manobrabilidade de navios e adequação das instalações e equipamentos portuários. A $i\underline{n}$ trodução desse recurso na área naval ocorreu muito depois dos simuladores de vôo largamente empregados pela indústria aeronáutica. Pode-se afirmar que um dos fatores motivaram a aplicação dos simuladores foram os acidentes de consequências altamente prejudiciais ocorridos vios, devidos predominantemente a falhas humanas bém a características inadequadas de manobrabilidade navio. O uso da técnica de simulação é especialmente reco mendado para manobras de navios em canais e na aproxima ção dos portos, condições em que os riscos de acidentes são maiores.

Existem, atualmente em uso diferentes tipos de simuladores, desde os mais simples até os mais sofisticados. A característica comum a todos eles é a determinação através de computador digital da trajetória e demais parâmetros do movimento do navio. O que distingue os simuladores entre si é a forma empregada para representar o movimento do navio podendo-se inclusive recorrer a telas e projetores cinematográficos para se alcançar uma sensação mais real do movimento.

O simulador apresentado neste trabalho constitui a versão inicial de um sistema desenvolvido para fins de pesquisa e utiliza o monitor de um microcomputador para representação do movimento do navio. Este simulador tem como objetivo específico o estudo de manobras do veículo em baixas velocidades e em águas rasas.

Inicialmente é feita uma descrição dos modelos matemáticos utilizados para representação do movimento do navio. Em seguida é mostrada a concepção geral do simulador e depois ilustra-se o emprego do sistema no estudo de manobras no terminal de Alemoa do Porto de Santos. Finalmente, são discutidas as conclusões deste estudo e os usos potenciais do simulador.

2. MODELOS MATEMÁTICOS

Para simular o movimento de um veículo oceânico é ne cessário conhecer uma representação matemática de seu com portamento. A obtenção dos chamados modelos matemáticos decorre da aplicação das leis de Newton à embarcação e do conhecimento dos esforços a que ela está sujeita.

A estrutura adotada para a representação da dinâmica do navio é constituída por um conjunto de equações diferenciais, relacionando as variáveis de posição e velocida

de do navio com o tempo.

O modelo adotado é não linear, uma vez que a própria dinâmica do navio como corpo rígido e, em especial, suas propriedades hidrodinâmicas, apresentam comportamento fortemente não linear. Além disso, os esforços externos também exigem equações não-lineares para a sua correta representação.

Outra simplificação usual, admitida em todos estudos de manobrabilidade, é a concentração de parâmetros, ou se ja, o navio é considerado como corpo rígido que se desloca com um número finito de graus de liberdade. Esta hipótese, totalmente justificável, permite que as equações diferenciais do modelo sejam ordinárias e não parciais, simplificando sobremaneira a sua solução.

Admitiu-se também que não existe acoplamento entre o movimento do veículo no plano horizontal e movimento no plano vertical. Assim, são três os graus de liberdade do navio.

Considerando-se o local em que se realizam as manobras de atracação e desatracação, admitiu-se desprezível o efeito das ondas.

SISTEMA DE COORDENADAS

Para estudo do movimento do navio no plano horizontal considerou-se os sistemas de coordenadas indicados na figura 1. Nesta figura S X Y é um sistema de referência fixo na Terra, e G x y é um sistema de eixos solidário ao na vio.

As diversas variáveis que caracterizam o movimento do veículo também estão ilustradas na figura 1. Assim , tem-se:

- \mathbf{X}_{G} , \mathbf{Y}_{G} são as coordenadas do centro de gravidade do veículo em relação ao sistema fixo na Terra;
- UG é a velocidade de translação do navio;
- u e v são, respectivamente, as componentes de UG nas direções dos eixos Gx e Gy; u é chamada velocidade de avanço e v é a velocidade de deriva;
- ψ angulo formado pelos eixos Gx e SX, é chama-do de angulo de aproamento do veículo.
- r velocidade de rotação em relação ao eixo per pendicular ao plano Gxy em G, chamada de velocidade de guinada.

- δ é o ângulo de deflexão do leme em relação ao eixo Gx;
- n é a velocidade de rotação do hélice.

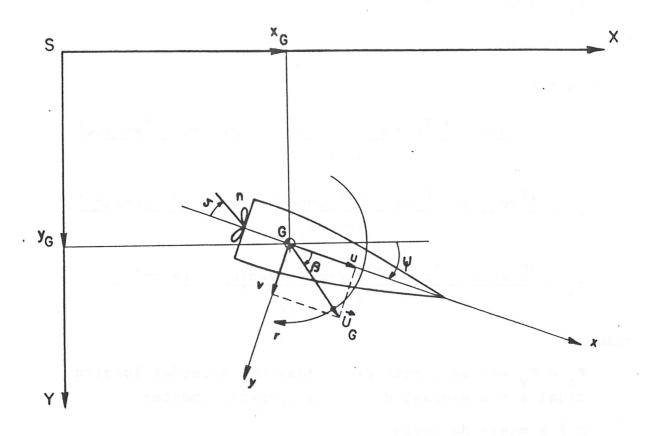


Figura 1 - Sistemas de Coordenadas

EQUAÇÕES DE ESTADO

As equações de estado para o movimento do navio como corpo rigido no plano horizontal são expressas, em sua forma geral, por:

$$\dot{x} = f[x(t)]$$
 (I.1)

onde:

x é o vetor de estado, dado por

$$x = [X_{G}, Y_{G}, \psi, u, v, r]^{t},$$

e f é um vetor coluna de funções não lineares nas variá-

veis de estado.

O vetor de funções f inclui a dinâmica própria do $n\underline{a}$ vio e os esforços externos (ambientais e de controle) que atuam sobre ele. Assim, estas funções têm a forma:

$$f_{1} = u \cos \psi - v \sin \psi$$

$$f_{2} = u \sin \psi + v \cos \psi$$

$$f_{3} = r$$

$$f_{4} = \frac{(F_{xcasco} + F_{xprop} + F_{xleme} + F_{xvento} + F_{xreboc})}{(m + m_{x})}$$

$$f_{5} = \frac{(F_{ycasco} + F_{yprop} + F_{yleme} + F_{yvento} + F_{yreboc})}{(m + m_{y})}$$

$$f_{6} = \frac{(N_{casco} + N_{prop} + N_{leme} + N_{vento} + N_{reboc})}{I_{zz} + J_{zz}}$$

onde:

 F_x e F_y são as forças projetadas nas direções longit \underline{u} dinal e transversal do navio, respectivamente;

m é a massa do navio;

m_x e m_y são as massas adicionadas para os movimentos
de avanço e deriva, respectivamente;

N $\acute{\rm e}$ o momento em torno do eixo vertical passando pe lo centro de gravidade;

 ${
m I}_{{
m ZZ}}$ é o momento de inércia do navio em relação ao ei-xo vertical passando pelo seu centro de gravidade;

 $\mathbf{J}_{\mathbf{Z}\mathbf{Z}}$ é o momento de inércia adicionada para o movimento de guinada.

MODELOS DOS COMPONENTES

CASCO

O modelo matemático do casco foi desenvolvido especificamente para o movimento do navio em baixas velocidades, grandes ângulos de deriva e águas rasas (1,2). Contém assim

termos de amortecimento não lineares de até 5ª ordem e seleciona, com base na razão profundidade/calado, um conjunto de parâmetros para águas profundas (razão > 2,0) ou para águas rasas (razão \leq 2,0). O modelo incorpora a ação de correnteza, suposta uniforme, através da utilização de velocidades relativas navio-água.

PROPULSOR

O propulsor é modelado apenas no seu empuxo, calculado a partir da velocidade relativa navio-água. O modelo fornece o coeficiente de empuxo do propulsor para operação em qualquer quadrante velocidade-rotação e não inclui cor reções específicas para águas rasas (3).

LEME

A atuação do leme é reproduzida a partir do cálculo da sua força de sustentação, normal à direção do fluxo sobre o leme. Este cálculo incorpora os efeitos da aceleração do escoamento pelo propulsor, e da queda do coeficiente de sustentação para grandes ângulos de ataque (4).

VENTO

São calculados os esforços de arrasto devidos a ação do vento sobre a superestrutura e áreas expostas do casco, utilizando-se a velocidade relativa navio-ar (5).

REBOCADORES

A modelagem da ação dos rebocadores durante as manobras é realizada pela definição em tempo real do vetor for ça representativo da atuação de cada rebocador. Assim sen do, a partir da indicação de N_B pontos de aplicação de forças, correspondentes as buzinas do navio, o modelo recebe ao longo da manobra os dados de módulo e direção das forças aplicadas por cada um dos rebocadores, decompondo-as nas direções longitudinal e transversal do navio e soman do-as para obter os esforços totais para cada movimento.

No apêndice são apresentadas as equações dos modelos de cada componente .

O SIMULADOR

FLUXOGRAMA GERAL DO SISTEMA

O sistema de simulação de manobras consiste em um simulador de manobras e um subsistema de animação de manobras.

O simulador de manobras é composto pelos seguintes

programas:

- a) DADOS
- b) DYSYSRK

No seu conjunto, estes programas atendem as seguintes finalidades:

- Receber todas as informações necessárias para a definição completa da manobra a ser realizada;
- Realizar a simulação da manobra, permitindo a intervenção do operador ao longo da mesma;
- Apresentar a evolução da manobra de forma prática , facilitando a tomada de decisões por parte do opera dor.

O sub-sistema de animação de manobras é composto pelo programa SIMULA, cuja finalidade é realizar uma reprodução das manobras em velocidade acelerada e com possibilida de de controle do fluxo de tempo em qualquer sentido.

O fluxograma geral do sistema é mostrado na figura 2.

BREVE DESCRIÇÃO DOS PROGRAMAS

Uma breve descrição dos programas e dos arquivos por eles manipulados e relatório gerado é apresentada a seguir:

i) Função dos programas

O programa DADOS efetua a entrada de dados, tanto com putacionais quanto da manobra. O programa DYSYSRK efetua a simulação propriamente dita da manobra e o SIMULA realiza a animação de uma monobra já executada.

- ii) Arquivos gerados e utilizados
- O programa DADOS gera, a partir de dados fornecidos pelo usuário, quatro arquivos:
 - DYSYS.ARQ, contendo o código da manobra a ser simu lada.
 - APRESENT. código , contendo os dados necessários $p\underline{a}$ ra a montagem da tela de apresentação da manobra $p\underline{a}$ ra o programa SIMULA.
 - MANOB.código, contendo os dados computacionais da manobra, tais como instante inicial, instante final, intervalo de integração, etc.

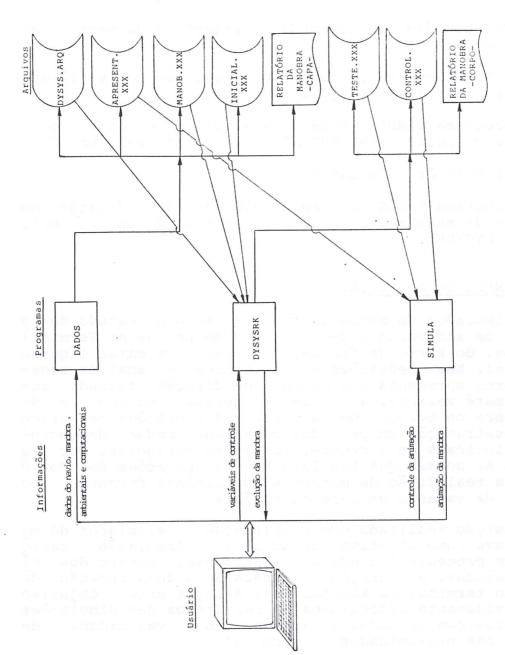


Figura 2. Fluxograma Geral do Sistema de Simulação

 INICIAL.código, contendo dados iniciais que definem a manobra, tais como tipo de navio, tipo de manobra, rebocadores disponíveis, condições ambientais, etc.

O programa DYSYSRK lê os quatro arquivos gerados pelo DADOS e cria dois arquivos ao final da manobra:

- TESTE.código, contendo a trajetória do navio ao longo da manobra.
- CONTROL.código, contendo a evolução das variáveis de controle ao longo da manobra.

O programa SIMULA lê os dois arquivos gerados pelo DYSYSRK e o arquivo APRESENT.código, gerado pelo DADOS.

iii) Relatório da manobra

O programa DADOS imprime a folha de identificação do relatório da manobra. O corpo do relatório é impresso pelo programa DYSYSRK.

4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

O simulador de manobras foi utilizado no estudo de operações de atracação e desatracação de navios no Terminal de Alemoa, do Porto de Santos, que opera com carga líquida inflamável. Nas imediações deste terminal o canal de acesso ao porto apresenta uma mudança de direção, fazendo com que, em maré vazante, as correntes geradas incidam a 45 graus sobre os berços. Desta forma, as operações de atracação e desatracação em períodos de vazante podem, dependendo da velocidade de corrente, tornar-se perigosas. Por esta razão as normas que regulamentam as operações do Porto proibem a realização de manobras no terminal durante os períodos de vazante em maré de sizígia.

O estudo realizado com a aplicação do simulador de ma nobras teve como objetivo fundamental a formulação racio nal de um procedimento que sistematizasse, dentro dos $n\bar{1}$ veis desejados, a operação de atracação e desatracação de navios no terminal de Alemoa. Para atingir este objetivo foram devidamente articulados os resultados das simulações de manobras com os dados levantados sobre velocidade de corrente nas proximidades do terminal.

Foi realizado um grande conjunto de manobras com a finalidade de estabelecer os valores limites de velocidade de corrente que tornam inviável a operação de atracação e desatracação. A partir dos testes executados concluiu-se que, empregando os rebocadores especificados pelas normas, as manobras não devem ser efetuadas quando a velocidade de

corrente em maré vazante for superior a 0,25 m/s.

Esta conclusão, associada aos resultados do levanta mento de corrente, permite formular um procedimento consistente para estabelecer horários restritos de manobra. Com efeito, conhecendo-se a limitação de velocidade, basta determinar os horários durante o período de vazante em que a velocidade de corrente excede este limite.

A partir dos dados experimentais coletados foram esta belecidas as seguintes correlações:

- Velocidade máxima de corrente em vazante em função da amplitude de maré;
- Variação da velocidade em relação a seu valor máximo durante o período de baixamar.

Com estas correlações e com a limitação da velocidade de corrente para a operação segura de atracação e desatracação, foi construída a tabela l que é uma recomendação para horários restritos à realização de manobras.

Tabela 1 - Horários Restritos à Realização de Manobras

| Amplitude de Maré Prevista para o dia | Período Restrito tir da preamar | o contado a par- teórica (h) |
|--|--|--|
| (m) | Navio Pequeno | Navio Grande |
| 1,60 1,50 1,40 1,30 1,20 1,10 1,00 0,95 0,90 | De 1:45 a 6:15 De 1:45 a 6:15 De 1:50 a 6:10 De 1:55 a 6:05 De 2:05 a 6:00 De 2:30 a 5:40 De 3:00 a 4:55 De 3:10 a 4:30 Nenhum | De 1:45 a 6:15 De 1:45 a 6:15 De 1:50 a 6:10 De 1:50 a 6:00 De 2:00 a 5:50 De 2:20 a 5:35 De 2:50 a 4:35 De 3:10 a 4:10 Nenhum |

Um exame desta tabela mostra que, mesmo para os maiores valores da amplitude de maré, que correspondem aos dias de maré de sizígia, há horários em que se pode realizar operações de atracação e desatracação durante o período de vazante. Convém ressaltar que no procedimento utilizado para determinação das restrições foi utilizado um coeficiente de segurança.

Os resultados do estudo serão submetidos à apreciação da Capitania do Porto de Santos para se modificar as nor mas de operação, com o objetivo de aumentar a operacional \underline{i}

dade do terminal.

CONCLUSÕES

O simulador de manobras desenvolvido para estudo de navios em baixas velocidades revelou-se de valiosa importância no problema examinado. Constatou-se através dos tes tes realizados que é possível reduzir o período restrito para as manobras de atracação e desatracação, o que contribuirá para aumentar a operacionalidade do Terminal de Alemoa.

O simulador de manobras pode ser utilizado em inúmeros outros problemas de interesse prático:

- Determinação de características (força de tração, potência) requeridas de rebocadores;
- Determinação de área mínima de bacias de evolução junto aos terminais portuários;
- Avaliação de traçados alternativos em canais de acesso a terminais portuários.

BIBLIOGRAFIA

- (1) TAKASHINA, J. Ship maneuvering motion due to tugboats and its mathematical model. Naval Architecture and Ocean Engineering, Tokyo, 25:93-104, 1987.
- (2) FUJINO, M. & ISHIGURO, T. A study of the mathematical model describing maneuvering motions in shallow water: shallow water effects on rudder-effectiveness parameters. Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Tokyo, 156:180-92, 1984.
- (3) VAN LAMMEREN, W.P.A.; VAN MANEN, J.D.; OOSTERVELD, M. W.C. The Wageningen B-screw series. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers, New York, 77:269-317, 1969.
- (4) KOSE, K. On a new mathematical model of maneuvering motions of a ship and its applications. International Shipbuilding Progress, Rotterdam, 29 (336):205-20 Aug. 1982.
- (5) LLOYD'S REGISTER OF SHIPPING. Rules for the construction and classification of mobile offshore units. London, 1972. 37p.

APÊNDICE

São apresentadas neste apêndice as equações dos modelos dos componentes.

CASCO

$$\begin{aligned} & F_{\text{xcasco}} = X_{\text{u}} \cdot \text{u} + X_{\text{vr}} \cdot \text{v.r} + (\text{m} + \text{m}_{\text{y}}) \cdot \text{v.r} \\ & F_{\text{ycasco}} = Y_{\text{v}} \cdot \text{v} + Y_{\text{vvv}} \cdot \text{u}^{3} + Y_{\text{vvvvv}} \cdot \text{v}^{5} + \\ & + Y_{\text{ur}} \cdot \text{u.r} + Y_{\text{ur}|r|} \cdot \text{u.r.}|r| + \\ & + Y_{\text{v}|r|} \cdot \text{v} \cdot |r| - (\text{m} + \text{m}_{\text{x}}) \cdot \text{u.r} \\ & N_{\text{casco}} = N_{\text{v}} \cdot \text{v} + N_{\text{uv}} \cdot \text{u.v} + N_{\text{vvv}} \cdot \text{v}^{3} + \\ & + N_{\text{uvvv}} \cdot \text{u.v}^{3} + N_{\text{r}} \cdot \text{r} + N_{\text{r}|r|} \cdot \text{r} \cdot |r| + \\ & + N_{\text{uv}|r|} \cdot \text{u.v.}|r| + N_{\text{vvr}} \cdot \text{v}^{2} \cdot \text{r} \end{aligned}$$

onde: X_i, Y_i, N_i, são as derivadas hidrodinâmicas do casco

PROPULSOR

$$F_{xprop} = T.(1 - t)$$
, onde

$$T = C_{T}. \left[\sqrt{J.n.D'} + \sqrt{0.7.\pi.n.D'} \right]. \rho D^{2} \frac{\pi}{8}$$

para o hélice de passo fixo, ou

$$T = C_{m}^{\prime} \cdot \rho \cdot n^{2} \cdot D^{4}$$

para o hélice de passo variável

 C_{T}^{\prime} é calculado por um polinômio de sexto grau em J e P/D.

 \mathbf{C}_{T} é calculado por uma série trigonométrica de 20 termos em J.

Nestas equações:

T é o empuxo do propulsor

t é o coeficiente de redução de força propulsora

 C_{T} e $C_{\mathrm{T}}^{\, \prime}$ são os coeficientes de empuxo

J é o coeficiente de avanço

n é a rotação do propulsor

D é o diâmetro do propulsor

ρ é a densidade da água

P/D é a razão passo/diâmetro do propulsor

Fyprop e Nprop são nulas

LEME

$$F_{\text{xleme}} = - L.sen \beta_1$$

$$F_{\text{xleme}} = (1 + a_h) \cdot L \cos \beta_1$$

$$N_{leme} = (1 + a_h) \cdot x_{leme} \cdot L \cdot \cos \beta_1$$
, onde

$$L = \frac{1}{2} \rho A_{leme} U^{2}_{ef.leme} C_{L} sen \alpha_{1}$$

 β_{1} é o ângulo efetivo de deriva do leme, dado por:

$$\beta_1 = \text{sen}^{-1} (v_{\text{leme}} / U_{\text{ef.leme}}), \text{ onde}$$

$$v_{leme} = v + x_{leme}$$
 . r

$$U_{\text{ef.leme}} = V_{A}.\zeta. \sqrt{\frac{1+8.K.T}{\pi \rho V_{a}^2.D^2}}$$

 α_1 é o ângulo efetivo de ataque no leme, dado por: α_1 = δ - σ . β_1 , onde δ é o ângulo do leme.

Nestas equações:

L é a força de sustentação produzida pelo leme A_{leme} é a área lateral do leme,

Uef.leme é a velocidade total e efetiva com que a água incide sobre o leme, considerado o efeito de aceleração do escoamento pelo propulsor.

C_{T.} é o coeficiente de sustentação do leme

Va é a velocidade de avanço do navio, dada por Va = u.(1-w), sendo w o coeficiente de esteira do casco

 a_h , ζ , K , σ são coeficientes experimentais

VENTO

$$F_{x \text{ vento}} = \frac{1}{2} \rho_{AR} A_{x} \frac{U_{\text{vento}}}{|U_{\text{vento}}|} U_{\text{vento}}^{2} \cdot C_{\text{vento}}$$

$$F_{y \text{ vento}} = \frac{1}{2} \rho_{AR} A_{y} \frac{V_{\text{vento}}}{|V_{\text{vento}}|} V_{\text{vento}} c_{\text{vento}}$$

$$N_{y \text{ vento}} = \frac{1}{2} \rho_{AR} A_{y \text{ |} V_{\text{vento}} |} V_{\text{vento}}^2 \cdot C_{\text{vento}} X_{\text{A vento}}$$

Nestas equações:

 ρ_{AB} é a densidade do ar

Uvento e Vvento são as componentes longitudinal e transversal da velocidade relativa navio-ar, dadas por:

 $U_{\text{vento}} = Vel_{\text{vento}} \cos (\psi_{\text{vento}} - \psi) - u$

 V_{vento} = Vel_{vento} sen $(\psi_{\text{vento}} - \psi) - v$

onde: Vel_{vento} é a velocidade do vento

 ψ_{vento} é a direção do vento, referida a mesma direção base do rumo ψ , qual seja o eixo X fixo à Terra.

A e A são as áreas vélicas normais às dire ções x e y do navio, respectivamente

C_vento_x e C_vento_y são os coeficientes de arras_to aerodinâmico das áreas $v\underline{\acute{e}}$ licas

X vento é a distância longitudinal entre o centro geométrico da área vélica A e o CG do navio

REBOCADORES

$$F_{x \text{ reboc}} = \sum_{i=1}^{N_B} T_{\text{reboc}_i} \cdot \cos\theta_{\text{reboc}_i}$$

$$F_{y \text{ reboc}} = \sum_{i=1}^{N_B} T_{\text{reboc}_i} \cdot \sin\theta_{\text{reboc}_i}$$

$$N_{\text{reboc}} = \sum_{i=1}^{N_B} [-F_{x \text{ reboc}} \cdot Y_{Bi} + X_{Bi}]$$

Nestas equações:

N_B é o número de pontos de aplicação de forças de rebocadores ou empurradores

 T_{reboc} é cada uma das trações de rebocador ou empur

é o ângulo formado entre cada força e a dire ção longitudinal do navio, positivo no sentido BB-BE

X_{Bi} e Y_{Bi} são as coordenadas longitudinal e transversal, respectivamente, de cada ponto de aplicação de forças.