

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE ESFORÇOS EM UM ACOPLAMENTO ENTRE  
EMPURRADOR E BARCAÇA

por

Eduardo Bered Fernandes Vieira

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2012

METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO DE ESFORÇOS EM UM ACOPLAMENTO ENTRE  
EMPURRADOR E BARCAÇA

por

EDUARDO BERED FERNANDES VIEIRA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr Arnaldo Ruben Gonzalez  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Co-Orientador: Msc. André Schaan Casagrande

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Letícia Fleck Fadel Miguel

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Dr. Édson Hikaro Aseka

Porto Alegre, 3 de dezembro de 2012.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve a colaboração de diversas pessoas. Portanto, agradeço:

Ao grande mestre, Msc. André Schaan Casagrande pela oportunidade e pelos tantos ensinamentos e conselhos durante grande parte do meu período de graduação;

Ao meu professor orientador, Prof. Dr. Ignácio Iturrioz pelos ensinamentos, disponibilidade e atenção concedidos;

Ao Luis, pelos conselhos no início da jornada;

Ao Basso, pelas dicas sempre precisas;

Ao Stumpf pelo tempo, atenção e opiniões concedidas;

Ao Augusto pela pesquisa;

Ao Joaquim, pelos desenhos;

À minha família, por me dar condições de tornar isto realidade;

Aos colegas de curso, pelo convívio e amizade;

Aos meus amigos, que de certa forma fazem parte desta conquista.

Este trabalho contou com o apoio das entidades abaixo:

MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos

Navegação Guarita S.A.

NOTAq – Projeto ACOPLA

**VIEIRA, E. B. F., Metodologia para determinação de esforços em um acoplamento entre empurrador e barcaça**, 2012. 19f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

## **RESUMO**

O sistema de navegação por comboios vem sendo utilizado na navegação interior em diversas regiões do mundo. No sul do Brasil, ainda pouco utilizado, vem ganhando espaço diante de suas vantagens em comparação ao modelo da embarcação autopropulsada. A vinculação entre as duas embarcações pode ser feita através de cabos ou de acoplamentos mais sofisticados. O tipo de sistema de acoplamento utilizado depende das solicitações devido às condições ambientais que se apresentam na localidade da navegação.

No presente trabalho se apresentam diversas formas de avaliar os esforços sofridos por um acoplamento entre um empurrador e uma barcaça. As embarcações estão sendo construídas e terão operação na Lagoa dos Patos, utilizando o sistema de acoplamento chamado ATB, que libera a rotação relativa na direção longitudinal. A condição geográfica da Lagoa dos Patos, contida na Bacia do Sudeste, possui características únicas, devido à proximidade com o oceano, gerando condições de navegação diferenciadas. Portanto, torna-se importante uma análise do comportamento do comboio perante solicitações ambientais. Cabe salientar que este trabalho está relacionado com um projeto FINEP que tem como objetivo a construção do dito acoplamento.

**PALAVRAS-CHAVES:** (comboio, acoplamento, navegação interior, solicitações).

## **ABSTRACT**

The pusher-barge navigation system has been used in inland navigation in various regions of the world. In southern Brazil, yet underutilized, has gained ground on its advantages in comparison to the self-propelled model. The connection between the two vessels may be made via cables or more sophisticated couplers. The type of the coupling system used depends on the requests due to environmental conditions that are present at the location of navigation.

This work presents several ways to evaluate the forces acting on a coupling between a tug and barge. The vessels are being built and will have operations in the Lagoa dos Patos, using the coupling system called ATB, which releases relative rotation in the longitudinal direction. The geographical condition of the Lagoa dos Patos, contained in the Bacia do Sudeste, has unique characteristics because of the proximity to the ocean, generating different navigation conditions. Therefore, it becomes important to analyze the behavior of the convoy against environmental solicitations. It should be emphasized that this work is related to a project FINEP that aims the construction of the coupler.

**KEYWORDS:** (convoy, coupling, inland navigation, solicitations )

<b>ÍNDICE</b>	<b>Pág.</b>
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Objetivos .....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	2
2.1. Tipos de acoplamentos mecânicos .....	2
3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA .....	3
3.1. Embarcações analisadas .....	3
3.2. Sistema de acoplamento utilizado .....	3
4. DETERMINAÇÃO DOS ESTADOS DE CARGA CONSIDERADOS .....	4
4.1. Forças de arrasto .....	5
4.2. Forças geradas em manobras do comboio .....	6
4.3. Força decorrente da posição de acoplamento .....	7
4.4. Força devido às ondas .....	8
4.5. Transmissão das forças para o acoplamento .....	9
4.6. Cálculo da força total atuando sobre o pino .....	11
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	11
5.1. Forças aplicadas nas embarcações .....	11
(i) Forças de arrasto .....	11
(ii) Forças geradas em manobras do comboio .....	13
(iii) Força decorrente da posição de acoplamento .....	13
(iv) Força devido às ondas .....	13
5.2. Casos Analisados .....	13
6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	15
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	15
ANEXO A – Glossário .....	16
ANEXO B – Obtenção dos coeficientes utilizados nos cálculos de força de arrasto – Método UFC .....	17
APÊNDICE A – Estudo do amortecimento e sua relação com as forças referentes às ondas ..	19

<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	Pág.
Figura 2.1 – (A) Esquema do conceito articulado (fonte: Intercon), (B) ilustração da rotação que não é restringida no sistema ATB (fonte: Intercon) .....	3
Figura 3.1 – Detalhe do sistema de acoplamento Pushpin. ....	4
Figura 4.1 – Embarcações acopladas e seus eixos de coordenadas.....	4
Figura 4.2 – Empurrador acoplado à barça e eixos de coordenadas referentes ao sistema de acoplamento.....	4
Figura 4.3 – Ilustração dos ângulos de incidência de vento e corrente.....	5
Figura 4.4 – Componentes da força normal no leme e seu respectivo ângulo.....	7
Figura 4.5 – Guia do pino e popa da barça.....	7
Figura 4.6 – Divisão do volume submerso em seções.....	8
Figura 4.7 – Ilustração do modelo dinâmico. ....	9
Figura 4.8 – Parâmetros das funções de transferência.....	10
Figura 5.1 – Forças de arrasto de vento e corrente no empurrador, (a) transversais, (b) longitudinais. ....	12
Figura 5.2 – Força de arrasto longitudinal na barça, (a) devido ao vento, (b) devido à água. 12	
Figura 5.3 – Força de arrasto transversal na barça, (a) devido ao vento, (b) devido à água. 12	
Figura 5.4 – Força no acoplamento devido às ondas, (a) barça carregada, (b) barça leve.....	13
Figura A1 - (a) Proa, popa e meia nau; (b) estrutural do casco; (c) embarcação sendo construída no estaleiro .....	16
Figura A2 – Nomenclatura de movimentos de uma embarcação.....	16
Figura B1 – Variação da força em função do amortecimento. ....	19

<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	Pág.
Tabela 3.1 – Principais características das embarcações. ....	3
Tabela 4.1 – Equações para o cálculo das forças de arrasto.....	6
Tabela 4.2 – Parâmetros que definem as forças de arrasto. ....	6
Tabela 4.3 – Funções de transferência das embarcações.....	10
Tabela 4.4 – Parâmetros das funções de transferência.....	11
Tabela 4.5 – Cenários estudados para a determinação de esforços nos pinos. ....	11
Tabela 5.1 - Forças exercidas no empurrador devido à manobra (soma dos dois lemes) .....	13
Tabela 5.2 – Forças atuantes no empurrador, em kN.....	14
Tabela 5.3 – Forças atuantes na barça, em kN. ....	14
Tabela 5.4 – Força nos pinos, em kN. ....	14
Tabela A1 – Propriedades dos fluidos. ....	17
Tabela A1 – Coeficientes de arrasto longitudinal.....	17
Tabela A2 – Valores recomendados de $\theta_x$ .....	17
Tabela A3 – Coeficientes experimentais, C. ....	18

## 1. INTRODUÇÃO

Há muitos anos a navegação interior no Rio Grande do Sul vem sido praticada, predominantemente, com uso de navios autopropulsados. O crescimento projetado dos volumes transportados com aumento de produção no polo petroquímico da região, ampliação das plantas de celulose em Guaíba e refinaria em Canoas e, criação do Polo Naval do Jacuí, relacionados com a atual situação econômica que vive o Brasil, oportuniza um momento de retomada da construção de novas embarcações de navegação interior. Com isso surge espaço para se repensar os conceitos e modelos adotados, aparecendo o modelo combinado como um paradigma ao modelo predominante. O novo modelo consiste, basicamente, em uma unidade propulsora (empurrador) e uma unidade não propulsada (barcaça) formando um comboio. O número de barcaças reduzido a apenas uma, diferentemente do normalmente encontrado em bacias como do Mississipi, está relacionado às condições severas de navegação com ondas e ventos que exigem sistemas resistentes de conexão entre as embarcações. Essas foram conclusões de estudos técnicos realizados juntamente com a universidade e empresas privadas.

Apesar dessa restrição, o emprego de comboios se mostra interessante pela dinâmica da unidade propulsora e tempos e movimentos dos conjuntos na região. Tendo em vista que as unidades propulsoras e de armazenagem são separadas é possível uma operação de forma que a unidade propulsora seja aproveitada com o menor tempo de parada nos terminais possível, aumentando a produtividade e diluindo custos de construção, tripulação, etc. Enquanto uma barcaça é carregada ou descarregada o empurrador pode se direcionar até outra barcaça já pronta para partir, aproveitando melhor o tempo. Comparando economicamente esta opção com o sistema autopropulsado, somente o custo de construção (capital) de quatro barcaças e dois empurradores, para uma distância entre terminais de 180MN<sup>1</sup> (333 km) e uma determinada prancha de carregamento e descarregamento (300m<sup>3</sup>/h), se torna 16% inferior ao custo de quatro autopropulsados. Esta diferença no custo aumenta, com o aumento do número de embarcações.

Entretanto, a solução de uso de comboios requer, na Bacia do Sudeste, obrigatoriamente, o uso de um sistema de acoplamento mecânico para garantir segurança na navegação quando em condições desfavoráveis de tempo, onde o aparecimento de ondas é frequente e impõe movimentos relativos entre as embarcações que não são suportados pelos cabos tradicionalmente adotados na amarração dos comboios. Esse acoplamento entre o empurrador e a barcaça possui uma variedade de tipos, modelos, marcas, nacionalidade (nenhum nacional) dependendo das características das embarcações e da aplicação. Na navegação interior, em geral, as solicitações ambientais são extremamente reduzidas comparadas às marítimas, não sendo necessário sistemas tão resistentes. Porém, analisando a Lagoa dos Patos nota-se que, devido a sua localidade geográfica, apesar de não ser mar aberto, possui uma similaridade com o mesmo, resultando em condições mais severas que na maioria dos rios. Sendo assim, há grande dificuldade de encontrar sistemas apropriadamente dimensionados para aplicações especiais como as encontradas nessa região, o que acaba na prática utilizando sistemas superdimensionados como marítimos.

Nesse sentido foi proposto à FINEP um projeto de desenvolvimento e construção de um sistema de acoplamento mecânico adequado à Bacia do Sudeste, utilizando prioritariamente peças e equipamentos nacionais, no qual está inserido este trabalho. Para tanto, o dimensionamento dos esforços é fundamental. No presente trabalho será apresentada uma metodologia para a determinação dos esforços em um acoplamento entre um empurrador e uma barcaça. Serão analisados quais são as solicitações pelas quais o acoplamento está sujeito, para a operação do comboio na Bacia do Sudeste, mais precisamente na Lagoa dos Patos em condições de ventos em ondas.

---

<sup>1</sup> MN: Milhas náuticas (1MN = 1,852 km).

No anexo A é possível encontrar um glossário com terminologia naval para auxiliar no entendimento de alguns termos utilizados no trabalho.

## 1.1. Objetivos

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para o cálculo dos esforços que um acoplamento entre empurrador e barçaça característicos para a Baía do Sudeste está submetido. As embarcações estudadas estão, atualmente, sendo construídas e com previsão de término de construção e iniciação de operação para fevereiro de 2013. As análises dos esforços serão realizadas considerando diversas condições de navegação na Lagoa dos Patos, buscando obter a situação em que ocorre a máxima solicitação no acoplamento. Serão utilizadas metodologias para determinação de esforços impostos por ventos, correntes, ondas e situações de manobra do comboio e seus efeitos na união entre as duas embarcações.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Tipos de acoplamentos mecânicos

Os diversos sistemas de acoplamento mecânico existentes podem ser agrupados em quatro grandes grupos: por cabos, articulados, integrados e biarticulados. Cada um destes tipos possui suas vantagens e são projetados para a utilização em condições específicas de navegação.

**Acoplamento por cabos:** É o mais simples e barato para ser utilizado. Este sistema não fixa nenhum grau de liberdade, pois a elasticidade dos cabos acaba permitindo certos movimentos relativos e quando a navegação se torna severa os movimentos aumentam e acabam por gerar excessivos esforços nos cabos ou nos cabeços<sup>2</sup> que a partir de certos valores rompem gerando riscos incalculáveis e prejuízo considerável. Portanto, é recomendada a utilização desse sistema apenas em situações amenas de navegação.

**Acoplamentos integrados (ITB – integrated tug-barge):** Este conceito tem como objetivo a restrição de todos os graus de liberdade entre o empurrador e a barçaça. Para navegação em mar aberto, com condições severas e determinadas proporções entre as embarcações, este sistema é o recomendado. Similar ao sistema articulado, dois pinos são extraídos do empurrador. A diferença está no terceiro pino que é extraído da proa do empurrador que restringe a rotação que é liberada no ATB. Portanto as duas embarcações tem comportamento como se fossem apenas uma.

**Acoplamentos articulados (ATB – articulated tug-barge):** O sistema articulado tem o objetivo de permitir o movimento relativo entre as embarcações em apenas um grau de liberdade de rotação (pitch). Isso diminui os esforços no acoplamento em relação ao ITB. É um sistema mais robusto que o acoplamento por cabos, porém, em determinadas condições de navegação, com grandes ondas, pode gerar uma rotação excessiva no empurrador, gerando desconforto aos tripulantes. Num dos modelos existentes desse conceito, o acoplamento acontece através de dois pinos que são extraídos do casco do empurrador (um a bombordo e outro a boreste) e inseridos em orifícios situados na popa da barçaça. Em casos que ocorre grande variação no calado da barçaça, por estar carregada ou descarregada, é necessário ter orifícios em diversas alturas, possibilitando o acoplamento em diferentes situações de calado. Na figura 2.1 está ilustrado este tipo de acoplamento, mostrando também o grau de liberdade de rotação que não é restringido, onde em azul está ilustrada a proa do empurrador, com seus dois pinos, e em vermelho a popa da barçaça.

---

<sup>2</sup> Cabeço: acessório de convés utilizado para fixação e amarração de embarcações com cais ou outras embarcações.

**Acoplamento biarticulado:** Esse conceito apresenta uma configuração com duas articulações entre o empurrador e a barça. Isto resulta em dois graus de liberdade que não são restringidos: uma rotação (pitch) e translação vertical (heave). A vantagem desse sistema está na redução dos esforços gerados por ondas, o que seria ideal para situações como da Bacia do Sudeste. Porém, não foram encontrados fabricantes desse conceito para as aplicações pretendidas e seu desenvolvimento é muito mais complexo quando consideradas possibilidades de ondas não paralelas aos eixos das embarcações, pois gera movimentos diversos entre embarcações, principalmente de giro (roll).

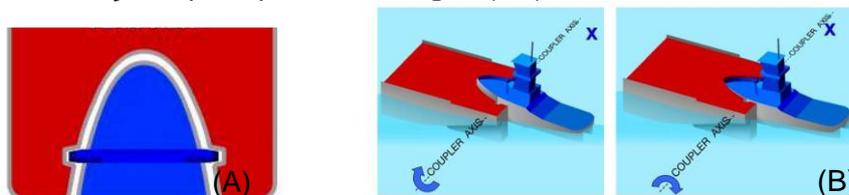


Figura 2.1 – (A) Esquema do conceito articulado (fonte: Intercon), (B) Ilustração da rotação que não é restringida no sistema ATB (fonte: Intercon).

### 3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

#### 3.1. Embarcações analisadas

As embarcações analisadas neste trabalho são: um empurrador e uma barça para transporte de derivados de petróleo, já em construção com finalização prevista para fevereiro de 2013. Características principais das embarcações se encontram na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Principais características das embarcações.

	Barça	Empurrador
Comprimento total	94,1 m	26,60 m
Comprimento entre perpendiculares	93,91 m	23,28 m
Boca moldada	15,5 m	10,00 m
Pontal moldado	6,70 m	5,00 m
Calado de projeto	4,5 m	2,70 m
Calado leve	0,95 m	-
Volume total dos tanques de carga	5160 m <sup>3</sup>	-
Deslocamento leve	1071 t	-
Deslocamento carregado	5400 t	-
Deslocamento total	-	430 t
Tração estática	-	20 t
Velocidade de operação	8 nós	8 nós

#### 3.2. Sistema de acoplamento utilizado

O conceito utilizado no projeto deste comboio foi o sistema articulado, pois, devido às condições de navegação, se torna o mais atrativo. O sistema adotado para o comboio estudado no presente trabalho foi o Pushpin, da empresa Acomarin. Esta empresa, de origem finlandesa, se concentra na produção de sistemas de acoplamento entre empurrador e barça. Uma ilustração do pino é mostrada na figura 3.1. Em branco encontra-se a estrutura que sustenta o pino. O pino está ilustrado em azul. Suas dimensões são: 250 mm de diâmetro e 225 mm de comprimento.

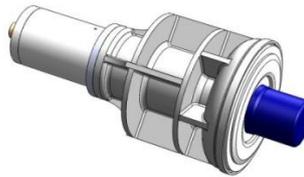


Figura 3.1 – Detalhe do sistema de acoplamento Pushpin.

#### 4. DETERMINAÇÃO DOS ESTADOS DE CARGA CONSIDERADOS

Para o cálculo dos esforços atuantes no acoplamento primeiramente são realizadas análises das solicitações individualmente. Através de diversos métodos são estimadas as forças relativas ao arrasto, ondas, manobras e deslocamento inicial do pino. Após o cálculo destas sobre as embarcações é realizada uma análise de como as forças são transmitidas para o acoplamento, obtendo assim a solicitação no mesmo.

Após o cálculo destes estados de carga são analisados 10 casos de navegação, onde os ditos estados de carga são combinados. A análise dessas situações de navegação diferentes busca a obtenção da situação na qual ocorre o máximo esforço no pino.

No cálculo das forças de arrasto são consideradas as forças referentes ao vento e à corrente. São considerados diversos ângulos de incidência e analisados seus efeitos nas embarcações. No estudo referente ao efeito das ondas no acoplamento é feito um modelo de sistema massa mola amortecedor, com excitação harmônica simulando ondas regulares. Na análise referente à manobra são considerados três casos, sendo um deles com a velocidade reduzida e ângulo de leme máximo, simulando manobras para atracação, outro com velocidade de cruzeiro e ângulo de leme reduzido, simulando curva na navegação, e o último simulando a situação de ventos e correnteza elevados, sendo necessário um ângulo maior de leme, para a navegação em velocidade de cruzeiro. Para a determinação da força gerada pela diferença de altura entre o pino e o orifício foi considerado o deslocamento máximo vertical do pino, ou seja, a máxima diferença de altura entre o pino e o orifício. Outra situação analisada ocorre quando o comboio navega em velocidade de cruzeiro e é colocada toda a potência do motor a ré, ou seja, o motor aplicando uma força oposta ao movimento com toda a sua capacidade, visando frenagem. Foram definidos: um eixo de coordenadas global ( $X_G$ ,  $Y_G$ ,  $Z_G$ ), dois eixos de coordenadas situados nos centros de gravidade do empurrador ( $X_E$ ,  $Y_E$ ,  $Z_E$ ) e da barcaça ( $X_B$ ,  $Y_B$ ,  $Z_B$ ), estes ilustrados na figura 4.1, e dois eixos situados na localização dos dois pinos do acoplamento, ilustrados na figura 4.2.

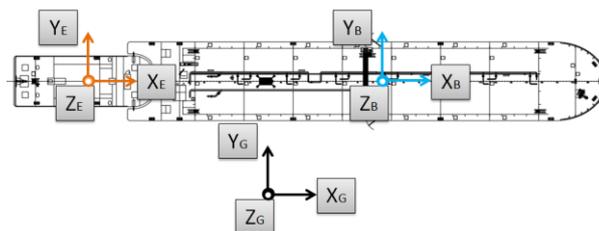


Figura 4.1 – Embarcações acopladas e seus eixos de coordenadas.

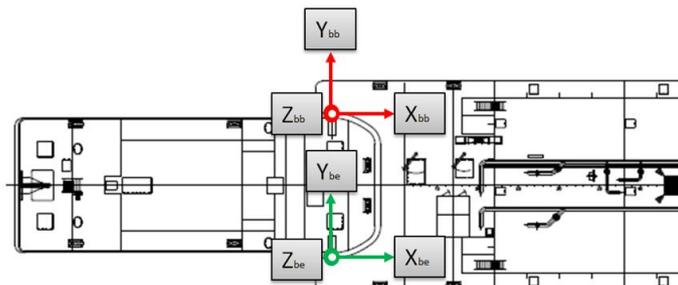


Figura 4.2 – Empurrador acoplado à barcaça e eixos de coordenadas referentes ao sistema de acoplamento.

#### 4.1. Forças de arrasto

Durante a navegação, o comboio está sujeito a diversas forças externas atuantes, como ventos, correntes e ondas. O acoplamento deve ser capaz de resistir às condições mais adversas da localidade para a qual foi estabelecida a operação. Com relação à Lagoa dos Patos a velocidade de vento de 14 m/s é considerada elevada para a navegação, segundo Toldo, 1986, e a velocidade de corrente máxima é de 1,03 m/s [Roteiro Costa Sul, 1994]. Estes parâmetros foram utilizados como dados de entrada nos cálculos realizados. Considerou-se o cálculo de forças nas duas embarcações separadamente, com a hipótese que a presença da outra embarcação não interfere na sua resposta perante aos carregamentos.

A força de arrasto aplicada nas embarcações se divide em duas, pois a embarcação sofre a ação de resistência de dois fluidos diferentes: a parte submersa sofre com a resistência da água, enquanto o restante sofre com a resistência do ar. Para uma dada velocidade de operação do comboio, sem a ação de ventos e corrente, a força de arrasto é constante. Porém, com a ação de ventos e correntes essa força varia, dependendo do ângulo de incidência dos mesmos. Foram definidos o ângulo de incidência do vento  $\alpha$  e o ângulo de incidência da corrente  $\beta$ . É importante salientar que os ângulos de incidência de vento e corrente não necessariamente são iguais, pois ocorrem rajadas de vento em direções aleatórias, enquanto a corrente permanece a mesma. A figura 4.3 ilustra a posição dos ângulos. As setas azuis representam esquematicamente a ação da corrente em um ângulo qualquer. Definiu-se também que a força longitudinal é a força aplicada no sentido de  $X_G$ , força transversal é a força aplicada no sentido de  $Y_G$  e força vertical é a força aplicada no sentido de  $Z_G$ . A ocorrência da ação de vento ou corrente em um determinado ângulo provoca, portanto, uma força de arrasto que possui uma componente transversal e outra longitudinal.

Para a realização do cálculo da força de arrasto presente nas duas embarcações foi utilizado o método fornecido pelo documento UFC (2005) (Unified Facilities Criteria). Trata-se de um documento da Marinha dos Estados Unidos que fornece critérios de planejamento, projeto, construção, manutenção e modernização de embarcações. São apresentadas no Anexo B as propriedades da água e do ar, utilizadas na determinação da força de arrasto.

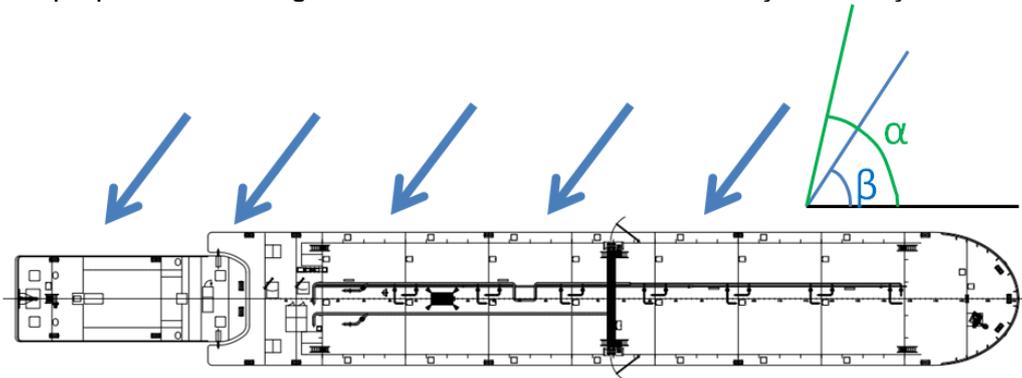


Figura 4.3 – Ilustração dos ângulos de incidência de vento e corrente

Segundo o método utilizado, as componentes longitudinal e transversal da força de arrasto atuante nas embarcações podem ser calculadas pelas seguintes equações, mostradas na tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Equações para o cálculo das forças de arrasto.

Componente da força	Equações
Força de arrasto longitudinal do ar	$F_{xv} = 0,5 \cdot \rho_v \cdot V_{xv}^2 \cdot A_x \cdot C_{xv} \cdot f_{xv}(\alpha)$ (1)
Força de arrasto transversal do ar	$F_{yv} = 0,5 \cdot \rho_v \cdot V_{yv}^2 \cdot A_y \cdot C_{yv} \cdot f_{yv}(\alpha)$ (2)
Força de arrasto transversal da água	$F_{yc} = 0,5 \cdot \rho_c \cdot V_{yc}^2 \cdot L_{ld} \cdot C_{yc}$ (3)
Força de arrasto longitudinal da água	$F_{xc} = F_{xforma} + F_{xatrito} + F_{xpropulsão}$ (4)
	$F_{xforma} = 0,5 \cdot \rho_c \cdot V_{xc}^2 \cdot B \cdot T \cdot C_{xcb}$ (5)
	$F_{xatrito} = 0,5 \cdot \rho_c \cdot V_{xc}^2 \cdot B \cdot T \cdot C_{xca}$ (6)
	$F_{xpropulsão} = 0,5 \cdot \rho_c \cdot V_{xc}^2 \cdot A_p$ (7)

Os significados de cada parâmetro apresentado nas expressões 1-7 estão mostrados na tabela 4.2 e a obtenção dos coeficientes utilizados está apresentada no Anexo B.

Tabela 4.2 – Parâmetros que definem as forças de arrasto.

Parâmetro	Significado	Parâmetro	Significado
$\rho_v$	Densidade do ar	$\rho_c$	Densidade da água
$V_{xv}$	Componente longitudinal da soma vetorial entre a velocidade da embarcação e a velocidade do vento	$V_{xc}$	Componente longitudinal da soma vetorial entre a velocidade da embarcação e a velocidade da corrente
$A_x$	Área transversal projetada da embarcação;	$B$	Boca moldada da embarcação;
$C_{xv}$	Coefficiente de arrasto longitudinal do ar;	$T$	Calado da embarcação;
$f_{xv}(\alpha)$	Função de forma para força longitudinal;	$C_{xcb}$	Coefficiente de arrasto longitudinal da água;
$V_{yv}$	Componente transversal da velocidade do vento;	$C_{xca}$	Coefficiente de atrito entre a água e o casco da embarcação;
$A_y$	Área longitudinal projetada da embarcação;	$A_p$	Área projetada do propulsor;
$C_{yv}$	Coefficiente de arrasto transversal do ar;	$L_{ld}$	Comprimento da embarcação na linha d'água;
$f_{yv}(\alpha)$	Função de forma para força transversal;	$C_{yc}$	Coefficiente de arrasto transversal da água.

## 4.2. Forças geradas em manobras do comboio

A força responsável pela manobra do comboio é gerada através do posicionamento do leme em uma característica, tal que gere um arrasto com uma componente transversal e uma componente longitudinal. A componente transversal é o que gera o movimento de curva do comboio. Para obter as componentes longitudinal e transversal da força no leme primeiramente é calculada a força normal aplicada no mesmo. Este cálculo é realizado através da equação (8). A força normal é decomposta em relação ao ângulo do leme e assim são encontradas as forças longitudinal e transversal. Na figura 4.4 se apresenta um esquema das forças geradas pelo leme. O empurrador analisado no presente trabalho possui dois lemes, portanto se tem dois conjuntos de forças. São analisados três casos: primeiro considerando o comboio na velocidade de cruzeiro e os lemes na posição de 10°, ângulo usualmente utilizado na dada velocidade. Também se analisa a situação de manobra para atracação, onde a velocidade é reduzida a 3 nós e lemes na posição de 35°, ângulo máximo do leme. Apesar de ser utilizado normalmente um ângulo de 10°, para a maioria das embarcações na velocidade de cruzeiro, no caso de ventos e correntes fortes o leme pode ser acionado com um ângulo maior, visando equilibrar o comboio, evitando um desvio de rota. Portanto, também se analisa a situação de força normal máxima, onde por ventura fosse necessário utilizar um ângulo de 35° na velocidade operacional.

$$F_n = 0,035 \cdot A_l \cdot V_{xc}^2 \cdot \theta \quad (8)$$

Onde:

$A_l$  = Área do Leme;  
 $\theta$  = Ângulo do leme, em graus.

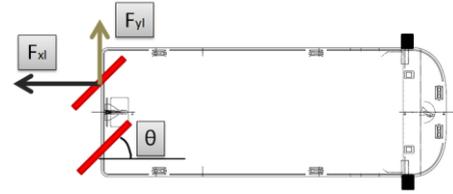


Figura 4.4 – Componentes da força normal no leme e seu respectivo ângulo.

### 4.3. Força decorrente da posição de acoplamento

Devido à diferença de calado entre o empurrador e a barça, é possível que ocorra uma diferença de altura entre o pino e o orifício de entrada. Para que ocorra o acoplamento, existem guias que levam o pino até a posição correta do orifício. As guias estão mostradas na figura 4.5, juntamente com a popa da barça. O deslocamento vertical do pino gera uma rotação no empurrador, o que gera por sua vez uma força vertical no pino referente à força de restauração do mesmo. A guia possui uma distância entre furos de 300 mm. Observando as guias percebe-se que o pino pode se movimentar tanto para cima quanto para baixo. Assim, a força terá sentidos opostos, se o deslocamento for positivo ou negativo. Como a barça tem peso muito superior ao do empurrador considerou-se que a barça não se movimenta na operação de acoplamento.

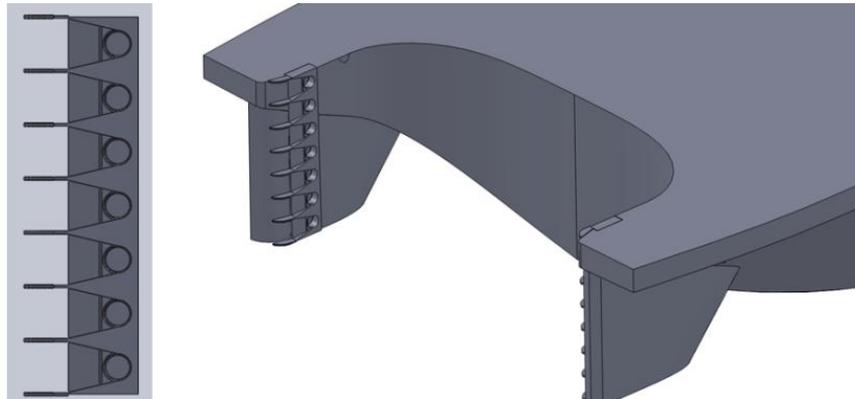


Figura 4.5 – Guia do pino e popa da barça.

Para o cálculo desta força é realizado um modelo, onde o empurrador é modelado como uma viga rígida apoiada em diversas barras que simulam a água. A sua compressão simula a força de empuxo. Para tanto, é utilizado o software Mastan<sup>®</sup>. Utilizando o modelo tridimensional do empurrador feito no software Solidworks<sup>®</sup> é feita uma divisão em seções ao longo do comprimento obtendo o volume submerso de cada uma delas. Assim é igualada a força de empuxo de cada seção à força que cada barra necessita exercer, quando aplicado uma deformação referente ao calado do empurrador. O parâmetro adotado para variar nas barras é de área da seção transversal das mesmas. Abaixo é mostrada a equação da área da seção transversal das barras. A figura 4.6 mostra a divisão do volume submerso do empurrador em seções.

$$A_i = \frac{\rho_c \cdot V_i \cdot g \cdot L}{E \cdot T} \quad (9)$$

Onde:

$V_i$  = Volume submerso da seção;  
 $E$  = Módulo de elasticidade referente ao material da barra;  
 $L$  = Altura da barra;  
 $T$  = Calado.



Figura 4.6 – Divisão do volume submerso em seções.

O peso e o centro de gravidade do empurrador são inseridos na viga. Na situação onde não ocorre ação de forças além do peso próprio se tem um deslocamento equivalente em todas as barras, com forças diferentes, dependendo da rigidez. É colocado então um deslocamento prescrito na posição do pino e se analisa a reação vertical na referida posição. Esta reação é a força vertical aplicada nos pinos, para que ocorra o acoplamento. Caso o deslocamento prescrito seja positivo ocorre um alívio de forças das molas da proa e um aumento nas forças na popa, devido a um maior afundamento desta região. Na situação oposta acontece o alívio de forças na popa e aumento na região próxima à proa.

#### 4.4. Força devido às ondas

O cálculo das forças relativas às ondas que passam pelo comboio é realizado através de um modelo simplificado bidimensional feito no software Working Model<sup>®</sup>. Este modelo consiste em considerar uma embarcação como uma viga rígida apoiada em diversas molas e amortecedores que simulam a flutuação na água, similar ao método para o cálculo da força devido à posição de acoplamento. Para simular as ondas é atribuída uma rigidez para a mola variável no tempo, variando assim a força exercida pela mesma. A variação da força exercida pela mola na viga simula a variação da força aplicada nas embarcações devido à passagem das ondas. Nas regiões onde a rigidez da mola aumenta é gerada uma força vertical que atua na embarcação.

Para modelar as ondas são consideradas algumas hipóteses. Segundo a classificadora “Det Norske Veritas” (DNV), para simulações simplificadas de ondas, as mesmas podem ser consideradas regulares e lineares, ou seja, com período, altura e comprimento constantes. A água por sua vez é considerada como um fluido invíscido e incompressível. Em relação à forma da onda, esta pode ser aproximada por uma senóide, segundo a Teoria de Airy. Como condições de entrada altura e o período da onda foram considerados respectivamente como:  $A = 1,0$  m;  $T = 4,8$  s. Estes dados foram retirados de Toldo (1986). A equação da onda, na sua forma geral é retirada de Halliday (2010) e está mostrada abaixo. Considera-se que a onda se propaga no eixo  $x$  e tem variação na altura no eixo  $y$ .

$$y = A * \text{sen}(kx - wt) \quad (10)$$

Onde:

$y$  = Altura, em um determinado instante de tempo e em uma determinada posição  $x$ ;  
 $A$  = Amplitude da onda;  
 $k$  = Número de onda;  
 $x$  = Posição;  
 $w$  = Frequência angular =  $2\pi/T$ .

Para a inserção dessa equação no modelo em questão é adicionado um termo constante somando a altura da mola referente ao calado da embarcação sem a aplicação de ondas. Quando a amplitude da onda é nula o comprimento da mola terá o valor do calado. A equação adaptada ao modelo está mostrada abaixo.

$$y_i = T + A * \text{sen}\left[\left(2 * \frac{\pi}{\lambda}\right) * (v * t + x_i)\right] \quad (11)$$

Onde:

$i$  = Número da mola;

$y_i$  = Altura da mola, em um determinado instante de tempo;

$\lambda$  = Comprimento da onda;

$v$  = Velocidade da onda;

$x_i$  = Posição da mola.

São realizados dois modelos, considerando as duas situações de carregamento da barça. A velocidade de encontro que é considerada entre a embarcação e as ondas é a mesma usada no cálculo da força de arrasto da água. As duas embarcações, modeladas como corpos rígidos, que são conectados por uma articulação, simulando o acoplamento. A figura 4.7 ilustra o modelo. É considerada a massa adicional como a massa de água deslocada, somada com a massa total das embarcações. Os graus de liberdade restringidos são os mesmos do acoplamento real.

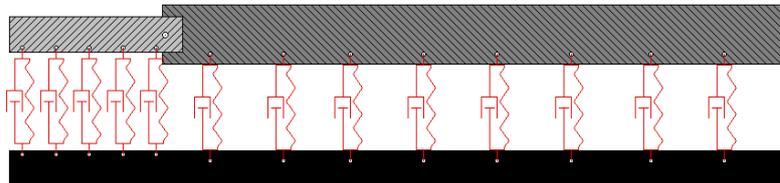


Figura 4.7 – Ilustração do modelo dinâmico.

Em virtude da dificuldade de determinação de valores para o amortecimento, a calibração é realizada com a utilização da regra classificadora “Bureau Veritas” (BV). Neste documento está definida a aceleração radial máxima de uma embarcação, no sentido de pitch, permitida (no Anexo A, se encontra nomenclatura dos movimentos de embarcações). Por processo iterativo, se encontra o valor de amortecimento para o qual o resultado de aceleração máxima seja igual ao valor definido pela regra classificadora, e este valor é adotado no presente trabalho.

Devido à limitação do modelo, torna-se impossível o cálculo dos esforços referentes aos ângulos de incidência diferentes de  $0^\circ$ . Mesmo sabendo que as ondas possuem mesmo sentido de propagação dos ventos, e que os resultados de forças para outros ângulos podem ser superiores, neste trabalho é definido que os resultados do presente modelo são considerados para qualquer ângulo de incidência que por ventura seja analisado.

#### 4.5. Transmissão das forças para o acoplamento

Após a realização do cálculo das forças atuantes nas embarcações é analisada a transmissão para os pinos. Dependendo da direção e posição de aplicação das forças na embarcação o pino pode sofrer solicitações diferenciadas. Foi feita uma matriz de transferência, que relaciona a força aplicada nas embarcações com a força transmitida ao acoplamento. As funções de transferência são definidas como funções que multiplicam as forças nas embarcações resultando na força que o pino está sendo solicitado.

$$F_{pino,i} = f \cdot F_i \quad (12)$$

Onde:

$F_{pino,i}$  = Força transmitida ao pino, na direção x, y ou z;

$f$  = Função de transferência;

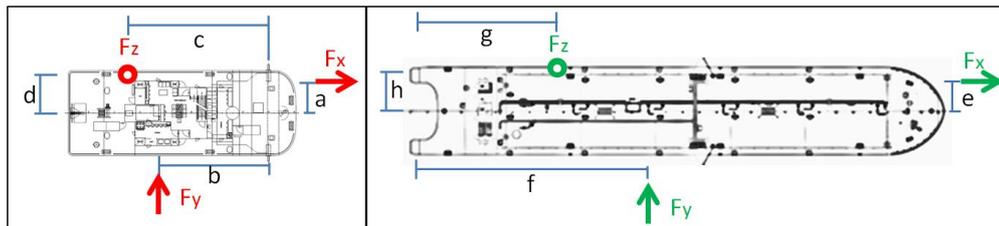
$F_i$  = Força na embarcação, na direção x, y ou z.

A tabela 4.3 mostra as funções de transferência das forças das embarcações para os pinos.  $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$  são as forças aplicadas nas embarcações. Estas tabelas são válidas para forças pontuais aplicadas nas embarcações. A obtenção das funções de transferência para os eixos x e y foi feita através de princípios da estática. Para as solicitações no eixo Z, utilizando o modelo do Mastan de barras, foi feita uma análise, com a aplicação de forças unitárias em diferentes posições do eixo X. Foi analisada a reação na posição do pino, para cada ponto de aplicação da força.

BB e BE são forças transmitidas aos pinos a bombordo e boreste respectivamente e suas três componentes, de acordo com seus sistemas de coordenadas apresentados na figura 4.8 (ver Anexo A). É importante salientar que é necessário determinar a posição de aplicação das forças nas embarcações antes de utilizar as funções de transferência. Com relação ao cálculo de forças devido às ondas, como o método utilizado tem como resposta a força no pino diretamente, não se faz necessária a utilização das funções de transferência no referido caso. A força total aplicada nos pinos será o resultado da contribuição do empurrador e da barcaça. A figura 4.8 ilustra os parâmetros utilizados nas funções de transferência, e a tabela 4.4 os explica. As funções mostradas consideram a aplicação de força transversal a boreste, por isso a reação no eixo y ocorre a bombordo. Caso a força fosse aplicada a bombordo o pino solicitado na direção y seria o localizado a boreste.

**Tabela 4.3 – Funções de transferência das embarcações.**

		BBx	BBy	BBz	BE <sub>x</sub>	BE <sub>y</sub>	BE <sub>z</sub>
Empurrador	$F_x$	$\left(\frac{1}{2} + \frac{a}{l}\right)$	-	-	$\left(\frac{1}{2} - \frac{a}{l}\right)$	-	-
	$F_y$	$-\left(\frac{b}{l}\right)$	-1	-	$\frac{b}{l}$	-	-
	$F_z$	-	-	$-\left(\frac{1}{2} + \frac{d}{l} + 0,39.c\right)$	-	-	$-\left(\frac{1}{2} - \frac{d}{l} + 0,39.c\right)$
Barcaça	$F_x$	$\frac{1}{2} + \frac{e}{l}$	-	-	$\frac{1}{2} - \frac{e}{l}$	-	-
	$F_y$	$-\left(\frac{f}{l}\right)$	-1	-	$\frac{f}{l}$	-	-
	$F_z$	-	-	$\left(\frac{1}{2} + \frac{h}{l} - 0,067.g\right)$	-	-	$\left(\frac{1}{2} - \frac{h}{l} - 0,067.g\right)$



**Figura 4.8 – Parâmetros das funções de transferência.**

Tabela 4.4 – Parâmetros das funções de transferência

Parâmetro	Significado
a	Distância em Y entre o ponto de aplicação de força no empurrador no eixo X e o eixo de simetria do mesmo
l	Distância entre os dois pinos
b	Distância em X entre o ponto de aplicação de força no empurrador no eixo Y e a posição dos pinos
c	Distância em X entre o ponto de aplicação de força no empurrador no eixo Z e os pinos
d	Distância em Y entre o ponto de aplicação de força no empurrador no eixo Z e o eixo de simetria do mesmo
e	Distância em Y entre o ponto de aplicação de força na barcaça no eixo X e o eixo de simetria da mesma
f	Distância em X entre o ponto de aplicação de força na barcaça no eixo Y e a posição dos pinos
g	Distância em X entre o ponto de aplicação de força na barcaça no eixo Z e os pinos
h	Distância em Y entre o ponto de aplicação de força na barcaça no eixo Z e o eixo de simetria da mesma

#### 4.6. Cálculo da força total atuando sobre o pino

Utilizando os métodos descritos e a transmissão de esforços para os pinos é possível analisar diferentes casos de navegação. As situações são analisadas visando obter os casos onde o pino é mais solicitado. Em todos os casos onde ocorre ação do vento, corrente ou onda são considerados os valores máximos de velocidade e altura. Foi considerada a velocidade de cruzeiro de 8 nós. São listados, na tabela 4.5 os casos analisados:

Tabela 4.5 – Cenários estudados para a determinação de esforços nos pinos.

CASO A	Navegação em linha reta, com o máximo deslocamento inicial do pino, sem ação de vento, corrente e onda
CASO B	Navegação em linha reta, com o máximo deslocamento inicial do pino com ação de vento, corrente e ondas no ângulo de incidência de 0°
CASO C	Navegação em linha reta, com o máximo deslocamento inicial do pino com ação de vento, corrente e ondas no ângulo de incidência de 45°
CASO D	Navegação em linha reta, com o máximo deslocamento inicial do pino com ação de vento, corrente e ondas no ângulo de incidência de 90°
CASO E	Navegação em curva, com o máximo deslocamento inicial do pino com ação de vento, corrente e ondas no ângulo de incidência de 0°
CASO F	Navegação em curva, com o máximo deslocamento inicial do pino com ação de vento, corrente e ondas no ângulo de incidência de 45°
CASO G	Navegação em curva, com o máximo deslocamento inicial do pino com ação de vento, corrente e ondas no ângulo de incidência de 90°
CASO H	Navegação em linha reta, com força toda a ré, com o máximo deslocamento inicial do pino com ação de vento, corrente e ondas no ângulo de incidência de 0°
CASO I	Navegação em linha reta, com força toda a ré, com o máximo deslocamento inicial do pino com ação de vento, corrente e ondas no ângulo de incidência de 45°
CASO J	Navegação em linha reta, com força toda a ré, com o máximo deslocamento inicial do pino com ação de vento, corrente e ondas no ângulo de incidência de 90°

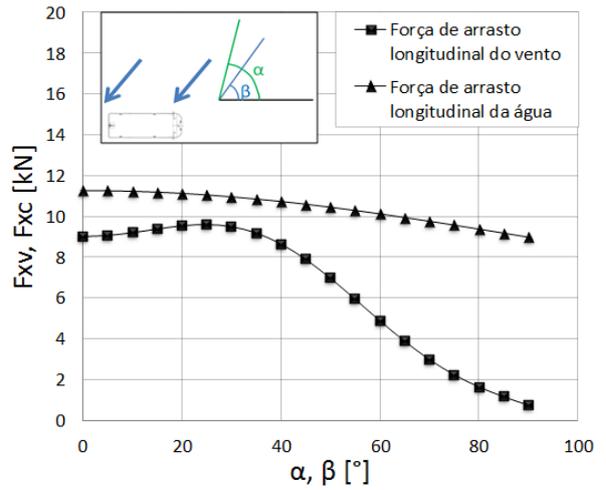
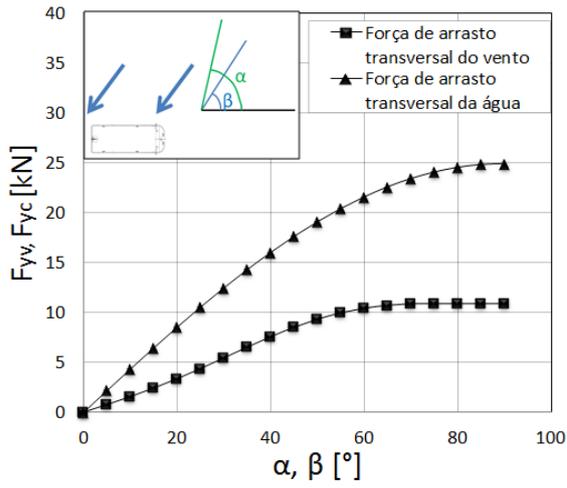
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. Forças aplicadas nas embarcações

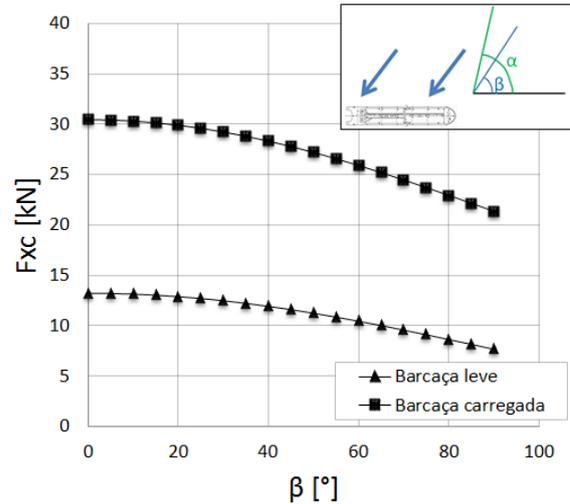
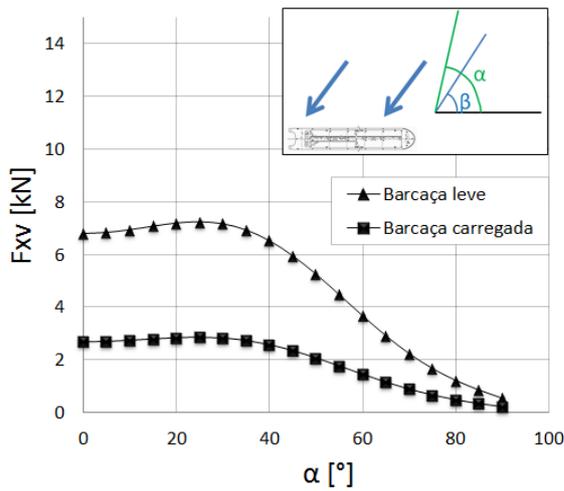
#### (i) Força de arrasto

Os resultados da força de arrasto atuante no empurrador e na barcaça estão mostrados nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3. Foram obtidas soluções para diversos ângulos de incidência, gerando assim gráficos que relacionam a força com o ângulo. Os resultados são aplicados no centro de massa do empurrador e da barcaça.

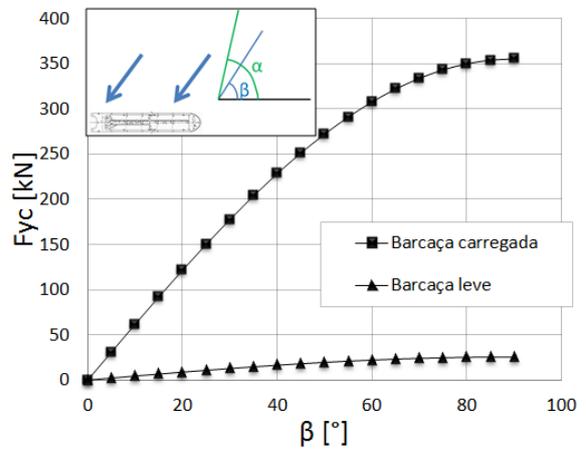
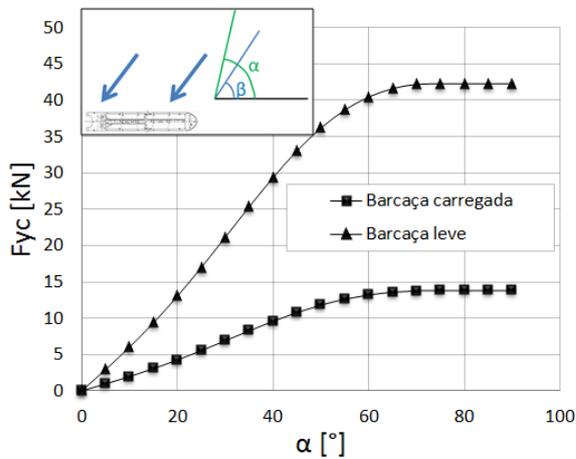
O empurrador mostrou-se com grande participação na força de arrasto total tanto do ar quanto da corrente (figura 5.1 (b)). Na força longitudinal, devido à grande estrutura vertical fora da água, a força referente ao ar se aproxima consideravelmente da força da água.



(a) (b)  
**Figura 5.1 – Forças de arrasto de vento e corrente no empurrador, (a) transversais, (b) longitudinais.**



(a) (b)  
**Figura 5.2 – Força de arrasto longitudinal na barçaça, (a) devido ao vento, (b) devido à água.**



(a) (b)  
**Figura 5.3 – Força de arrasto transversal na barçaça, (a) devido ao vento, (b) devido à água.**

Analisando os resultados para a barça, nota-se que o vento tem maior participação na barça leve (figuras 5.2(a) e 5.3(a)). Isto se deve ao fato de que uma área muito maior está exposta ao vento nessa ocasião, quando o calado é reduzido. Na barça carregada, a maior parte do casco está submerso, aumentando a contribuição da força de arrasto da água. (figuras 5.2(b) e 5.3(b)). Como a densidade da água é consideravelmente maior que a do ar a força de arrasto total se torna superior na situação em que a barça se encontra carregada.

## (ii) Forças geradas em manobras do comboio

Utilizando a equação (8) foram encontradas as forças normais nos lemes, para as três situações citadas. Como era o esperado, a força normal foi maior no caso em que ocorre navegação em velocidade de cruzeiro e um ângulo do leme de 35°. Portanto, esta foi a situação de manobra utilizada posteriormente no cálculo dos esforços nos pinos. Na tabela 5.1 estão mostrados os resultados obtidos.

**Tabela 5.1 - Forças exercidas no empurrador devido à manobra (soma dos dois lemes).**

(a) Leme a 35°, velocidade de 3 nós	(b) Leme a 10°, velocidade de 8 nós:	(c) Leme a 35°, velocidade de 8 nós
$F_{xna} = -0,017 \text{ kN}$ $F_{yna} = 0,024 \text{ kN}$	$F_{xnb} = -0,019 \text{ kN}$ $F_{ynb} = 0,108 \text{ kN}$	$F_{xnc} = 0,221 \text{ kN}$ $F_{ync} = 0,316 \text{ kN}$

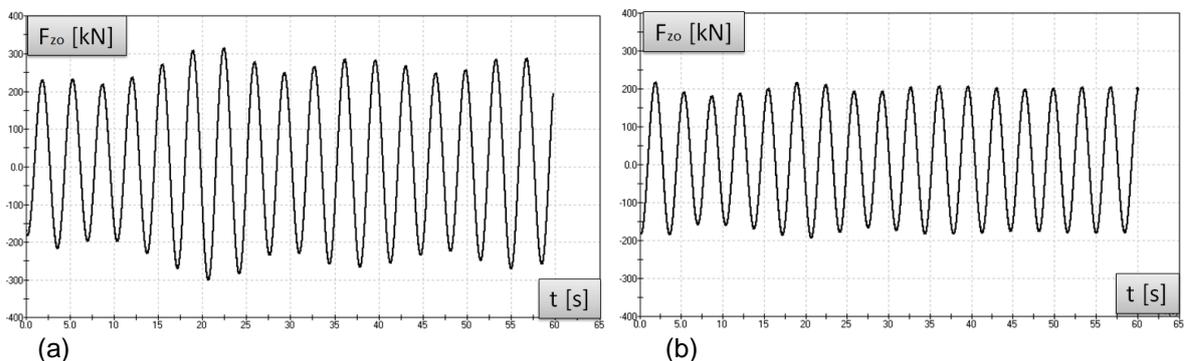
## (iii) Força decorrente da posição de acoplamento

A força obtida, para o máximo deslocamento vertical inicial do empurrador foi de:

$$F_{zpos} = \pm 67,80 \text{ kN}$$

## (iv) Força devido às ondas

Para analisar o amortecimento, o mesmo foi variado no intervalo de [0,200N.s/m] e foram encontrados vários valores de força máxima no acoplamento. O valor adotado para o amortecimento foi de 10 N.s/m, por ser o valor, para o qual a aceleração se aproxima da aceleração calculada segundo a regra classificadora. Este assunto merecerá um estudo mais detalhado, que sai do escopo do presente trabalho. As forças máximas obtidas foram de 314 kN para a barça carregada e 211 kN com a barça leve. As figuras 5.4 e 5.5 mostram resultados de força no pino.



**Figura 5.4 – Força no acoplamento devido às ondas, (a) barça carregada, (b) barça leve.**

## 5.2. Casos Analisados

Os resultados obtidos para forças atuantes nas embarcações estão mostrados nas tabelas 5.2 e 5.3. A força devido à onda não aparece nas referidas tabelas, pois o método tem como resposta diretamente a força no pino.

Tabela 5.2 – Forças atuantes no empurrador, em kN.

	Arrasto Água		Arrasto Ar		Curva		Posição	Força a ré
	$F_{xc}$	$F_{yc}$	$F_{xv}$	$F_{yv}$	$F_{xn}$	$F_{yn}$		
CASOA	-8,98	-	-0,75	-	-	-	-136	-
CASOB	-11,26	-	-9,02	-	-	-	-136	-
CASOC	-10,59	17,6	-7,89	8,48	-	-	-136	-
CASOD	-8,98	24,9	-0,75	10,86	-	-	-136	-
CASOE	-11,26	-	-9,02	-	-0,02	0,11	-136	-
CASOF	-10,59	17,6	-7,89	8,48	-0,02	0,11	-136	-
CASOG	-8,98	24,9	-0,75	10,86	-0,02	0,11	-136	-
CASOH	-11,26	-	-9,02	-	-	-	-136	-196,2
CASOI	-10,59	17,6	-7,89	8,48	-	-	-136	-196,2
CASOJ	-8,98	24,9	-0,75	10,86	-	-	-136	-196,2

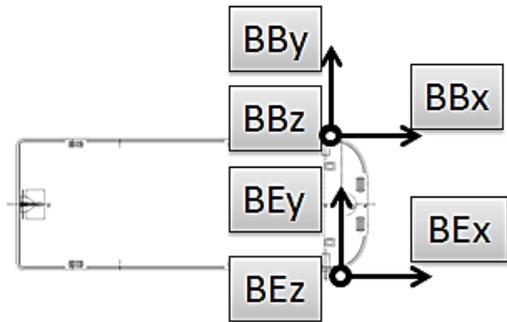
Tabela 5.3 – Forças atuantes na barçaça, em kN.

	Barçaça Carregada				Barçaça leve			
	Arrasto Água		Arrasto Ar		Arrasto Água		Arrasto Ar	
	$F_{xc}$	$F_{yc}$	$F_{xv}$	$F_{yv}$	$F_{xc}$	$F_{yc}$	$F_{xv}$	$F_{yv}$
CASOA	-21,36	-	-0,22	-	-7,66	-	-0,55	-
CASOB	-30,44	-	-2,69	-	-13,21	-	-6,79	-
CASOC	-27,78	72,43	-2,35	10,78	-11,59	18,07	-5,94	33,02
CASOD	-21,36	105,95	-0,22	13,79	-7,66	25,56	-0,55	42,26
CASOE	-30,44	-	-2,69	-	-13,21	-	-6,79	-
CASOF	-27,78	72,43	-2,35	10,78	-11,59	18,07	-5,94	33,02
CASOG	-21,36	105,95	-0,22	13,79	-7,66	25,56	-0,55	42,26
CASOH	-30,44	-	-2,69	-	-13,21	-	-6,79	-
CASOI	-27,78	72,43	-2,35	10,78	-11,59	18,07	-5,94	33,02
CASOJ	-21,36	105,95	-0,22	13,79	-7,66	25,56	-0,55	42,26

Em virtude da magnitude das forças da barçaça carregada ser maior, estas foram transmitidas aos pinos, juntamente com as forças atuantes no empurrador. Abaixo, na tabela 5.4 estão apresentados os resultados obtidos de solicitações nos pinos.

Tabela 5.4 – Força nos pinos, em kN.

	BBx	BBy	BBz	BE <sub>x</sub>	BE <sub>y</sub>	BE <sub>z</sub>
CASO A	-10,79	0	225	-10,79	0	225
CASO B	-16,565	0	225	-16,565	0	225
CASO C	-37,885	-54,83	225	7,755	0	225
CASO D	-42,08	-81,05	225	20,5	0	225
CASO E	-16,808	0	225	-16,302	0	225
CASO F	-38,128	-54,83	225	8,018	0	225
CASO G	-42,323	-81,05	225	20,763	0	225
CASO H	98,1	0	225	98,1	0	225
CASO I	75,28	-54,83	225	120,92	0	225
CASO J	66,81	-81,05	225	129,39	0	225



O caso mais solicitado foi o CASO J, pois apresenta a maior força resultante nos pinos. O pino a boreste sofre a maior solicitação de cisalhamento, entre todos os casos analisados. Todavia, caso as forças transversais tivessem sido aplicadas à bombordo seria o respectivo pino o mais solicitado. A força resultante no pino BE foi de 259,5 kN.

## 6. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou uma metodologia e realizou os cálculos dos esforços em um acoplamento para um empurrador e uma barçaça que estão sendo construídos. Foram consideradas condições de navegação referentes à Lagoa dos Patos. Através de diversos métodos, foram calculadas solicitações referentes aos ventos, correntes, ondas e aspectos operacionais. A análise de diversos casos de estudo foi abordada, chegando-se ao resultado da maior solicitação no pino de 259,5 kN. Este resultado foi considerado coerente, considerando as análises realizadas. Porém, acredita-se em valores mais elevados se considerados ângulos de incidência de ondas diferentes.

O método de cálculo das forças de arrasto se mostrou muito eficiente, sendo possível a obtenção de forças considerando diversos ângulos de incidência. O método que calculou a força normal no leme é considerado muito simples e se recomenda avaliar estas forças levando em conta a hidrodinâmica envolvida na interação entre o leme e a água.

O método de cálculo de força devido à posição de acoplamento que representa o empuxo da água utilizando-se barras mostrou-se adequado. Considerando pequenos deslocamentos, ele se mostrou simples e rápido de ser realizado, gerando resultados coerentes.

No cálculo das forças referentes às ondas, o método se mostrou simples, podendo ser utilizado para estimar a força para o ângulo de incidência de 0°. Apesar disto, este método ainda necessita de calibração mais precisa levando em conta os amortecimentos aos quais o sistema está submetido. O aprofundamento nas análises de ondas em diferentes ângulos de incidência é fortemente indicado para trabalhos futuros, sendo, deste modo, necessária a criação de modelos tridimensionais.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Toldo, E.E., **Wave Prediction Along Lagoa dos Patos**, 1986

**Unified Facilities Criteria**, 2005

**Roteiro Costa sul**, 1994

Blagoveshchensky, S. N., **Theory of Ship Motions**, 1954

Volpini, J.H., **Análise de Carregamento hidrodinâmico em Estruturas Flutuantes - DNV**, 2012

Halliday, D., **Fundamentos de Física 2 – Gravitação, Ondas, Termodinâmica**, 2010

Veritas, B., **Rules for the Classification of Inland Navigation Vessels**, 2009

<http://www.intercon.com>

<http://www.acm-trading.fi>

<http://www.mastan2.com>

<http://www.solidworks.com>

<http://www.design-simulation.com>

## ANEXO A – Glossário

Para facilitar a compreensão do leitor, abaixo tem-se uma lista de nomenclaturas utilizadas na área naval, que foram mencionadas no presente trabalho:

**Corpo paralelo:** parte da embarcação que apresenta a seção mestra de forma repetitiva, leva da proa a popa passando pela meia nau, a área útil de carga costuma estar totalmente inserida nesta parte da embarcação.

**Meia Nau:** Ponto médio da embarcação, marcado no casco de forma externa através de um símbolo:

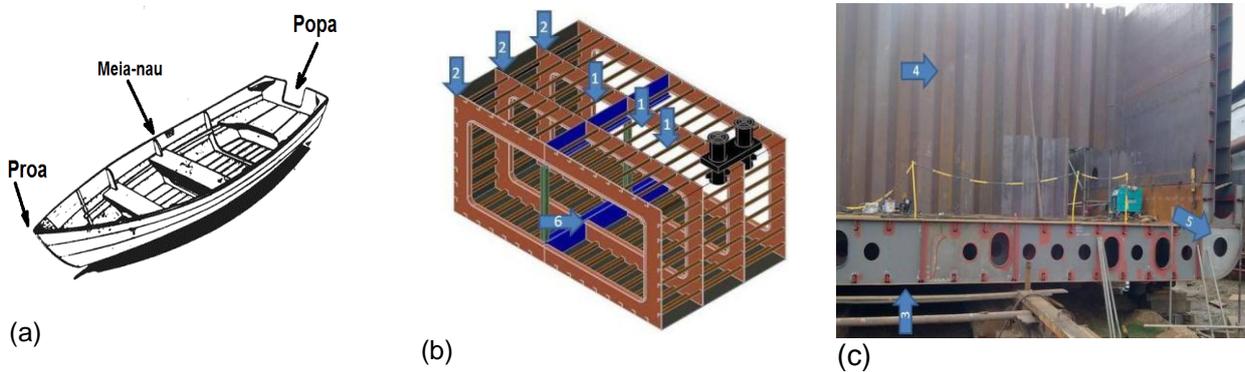


Figura A1 - (a) Proa, popa e meia nau; (b) estrutural do casco; (c) embarcação sendo construída no estaleiro

**Linha d'água:** Intersecção da superfície moldada do casco com qualquer plano paralelo ao plano de base.

**Costado:** Invólucro do casco acima da linha d'água em situação de carga plena. Em arquitetura naval, durante a construção do navio, quando ainda não está traçada a linha d'água, costado é o revestimento do casco acima do bojo.

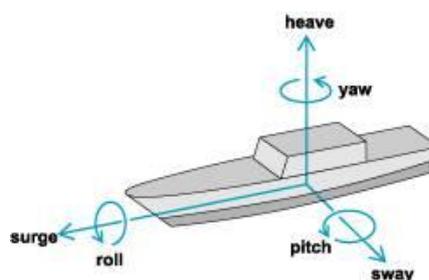


Figura A2 – Nomenclatura de movimentos de uma embarcação.

**A vante ou ré:** Diz-se que qualquer coisa é de vante ou está a vante (AV), quando está próximo à proa, e que é de ré ou está à ré (AR), quando está próximo à popa.

**Superestrutura:** Construção feita sobre o convés principal, estendendo-se ou não de um a outro bordo e cuja cobertura é, em geral, ainda um convés.

**Velocidade de Cruzeiro:** Velocidade de operação da embarcação.

## ANEXO B – Obtenção dos coeficientes utilizados nos cálculos de força de arrasto – Método UFC

A tabela B1 apresenta as propriedades do ar e da água, utilizadas nos cálculos.

**Tabela B1 – Propriedades dos fluidos.**

	Água, a 15°	Ar, 20° ao nível do mar.
Densidade, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	999	1.22
Peso específico, $\gamma$ [N/m <sup>3</sup> ]	9797	119.682
Viscosidade Cinemática, $\nu$ [m <sup>2</sup> /s]	1.14E-06	1.50E-05

O coeficiente de arrasto longitudinal do ar,  $C_{xv}$ , é dependente de características da embarcação. Ele é obtido utilizando-se a tabela B2:

**Tabela B2 – Coeficientes de arrasto longitudinal (fonte: UFC).**

Tipo da embarcação	$C_{xv}$
Casco dominante	0.4
Normal	0.7
Petroleiros com superestrutura central	0.8
Grande superestrutura	0.7

A função de forma para força longitudinal de vento,  $f_{xv}(\alpha)$  depende da localidade da superestrutura. O cálculo é realizado utilizando a expressão (13).

$$f_{xv}(\alpha) = \cos(\xi) \quad (13)$$

Onde:

$$\xi = \left(\frac{90^\circ}{\theta_x}\right)\alpha \quad (14)$$

O parâmetro  $\theta_x$  está relacionado com o ângulo no qual a força de arrasto longitudinal muda de sinal. Este parâmetro depende da localidade da superestrutura. A tabela B3 apresenta alguns exemplos deste parâmetro utilizados no método.

**Tabela B3 – Valores recomendados de  $\theta_x$  (fonte: UFC).**

Localização da Superestrutura	$\theta_x$ [°]
A vante da meia nau	100
Na meia nau	90
A ré da meia nau	80
Casco dominante	60

O coeficiente de arrasto transversal do ar  $C_{yv}$  é obtido com a utilização da equação (15)

$$C_{yv} = C \cdot \left[ \left( \frac{0.5(h_s + h_h)}{h_r} \right)^{\left(\frac{2}{7}\right)} A_s + \left( 0.5 \cdot \frac{h_h}{h_r} \right)^{\left(\frac{2}{7}\right)} A_h \right] / A_y \quad (15)$$

Onde:

- $C$  = Coeficiente experimental, retirado da tabela B4;  
 $A_h$  = Área longitudinal não submersa do casco.  
 $h_s$  = Altura da superestrutura;  
 $h_h$  = Altura média do casco.  
 $h_r$  = Altura de referência, adotada como 10m pelo método;  
 $A_h$  = Área longitudinal não submersa do casco.

**Tabela B4 – Coeficientes experimentais, C (fonte: UFC).**

Embarcação	C
Casco dominante	0.82
Típica	0.92
Superestrutura extensa	1.02

A função de forma para força transversal de vento é obtida com a equação (16):

$$f_{yv}(\alpha) = \frac{\text{sen}(\alpha) - 0.05\text{sen}(5\alpha)}{0.95} \quad (16)$$

O coeficiente de arrasto transversal da água é calculado pela equação (17):

$$C_{yc} = C_0 + (C_1 - C_0) \cdot \left(\frac{T}{d}\right)^k \quad (17)$$

Onde:

- $C_0$  = Coeficiente de arrasto para  $T/d=0$ , calculado por  $C_0 = 0.22 \cdot X^{0.5}$ ;  
 $X$  = Parâmetro adimensional da embarcação =  $L_{ld}^2 \cdot \frac{A_m}{B \cdot V}$   
 $A_m$  = Parte submersa da área da seção transversal da meia nau  
 $A_h$  = Área longitudinal não submersa do casco.  
 $C_1$  = Coeficiente de arrasto para  $T/d=1$ . O método recomenda utilizar o valor de 3.2;  
 $d$  = Profundidade da água, na via de navegação;  
 $k$  = Coeficiente experimental, sendo recomendado pelo método o valor de 2.

O coeficiente de atrito entre a água e o casco,  $C_{xca}$ , da embarcação é calculado segundo a expressão (x). Com relação ao coeficiente de arrasto longitudinal da água, este é adotado o valor de 0,1 pelo método.

$$C_{xca} = 0.075 / ((\log(R_N)) - 2)^2 \quad (18)$$

Onde:

$$R_N = \text{Número de Reynolds, definido como: } (V_c \cdot L_{ld} \cdot \cos(\beta)) / \nu \text{ ;} \quad (19)$$

## APÊNDICE A – Estudo do amortecimento e sua relação com as forças referentes às ondas

Utilizando o modelo dinâmico criado no Working Model foi feita uma análise, variando o valor de amortecimento e observando sua relação com a força máxima no acoplamento. A tabela X mostra a variação da força em função do valor de amortecimento. A força tende a um valor próximo de 150 kN para um amortecimento elevado. Na situação sem nenhum amortecimento a força máxima tem o valor de 340 kN.

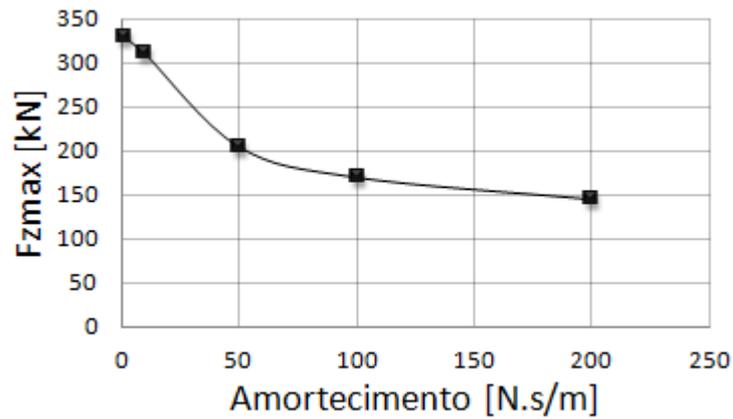


Figura B1 – Variação da força em função do amortecimento.