ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Gustavo Oliveira Silva

Implementação de efeitos de interação hidrodinâmica navio-navio e navio-margem em simuladores de manobras em tempo real

São Paulo

2017

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Gustavo Oliveira Silva

Implementação de efeitos de interação hidrodinâmica navio-navio e navio-margem em simuladores de manobras em tempo real

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de concentração:
Automação e Controle

Orientador:
Prof. Dr. Eduardo Aoun Tannuri

São Paulo

2017

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Gustavo Oliveira

Implementação de efeitos de interação hidrodinâmica navio-navio e navio margem em simuladores de manobras em tempo real / G. O. Silva – versão corr. -- São Paulo, 2017.
109 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos.

1. Simulador de Manobra de Navios I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos. II. t.

Este trabalho é dedicado à minha família.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pela oportunidade de realizar esse trabalho, pois sem ele nada seria possível.

Ao Professor Dr. Eduardo Tannuri, pela orientação brilhante e dedicação exemplar e principalmente pelo exemplo de pessoa, tanto pessoal como profissional.

Ao Professor Dr. Alexandre Simos, pelas valiosas sugestões que auxiliaram grandemente no direcionamento desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Kazuo Nishimoto, pela infraestrutura do laboratório e do simulador de manobras nele presente.

À Petrobras, pelo investimento na pesquisa e no laboratório, os quais foram imprescindíveis para o andamento e desenvolvimento da pesquisa.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de mestrado para a realização desta pesquisa.

Ao Felipe Ruggeri e ao Rafael Watai, que forneceram dados essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

Aos colegas de laboratório, André, Humberto, Rodrigo, e tantos outros não citados, pelo apoio e dedicação.

A todos os meus amigos e colegas pelo apoio.

E finalmente à minha família, em especial à minha mãe, que sempre esteve presente em todas as decisões e escolhas da minha vida.

RESUMO

Modelos de Simulador de Manobras de Navios em Tempo Real vem se tornando cada vez mais comuns e necessários na análise de viabilidade de portos e canais de acesso. O aumento do porte das embarcações, não acompanhado por equivalente aumento das dimensões dos portos, faz com que cada vez mais os efeitos de águas rasas e interação com margens e estruturas portuárias se tornem relevantes durante uma manobra.

Com o intuito de aumentar a gama de aplicação desse tipo de simulador, o presente trabalho aborda uma modelagem matemática para estimar as forças hidrodinâmicas de interação com as margens e outros navios para aplicação em simuladores de manobras. O modelo usa, como base, dados oriundos de um método numérico validado experimentalmente, o Método dos Elementos de Contorno. Baseado nesse método, alguns casos tipo foram selecionados para gerar um banco de dados e um modelo matemático foi desenvolvido para estimar as forças de interação, extrapolando as respostas obtidas para casos não previstos anteriormente. A obtenção das forças através do modelo é baseada em alguns parâmetros de entrada, tais como velocidade de avanço da embarcação e as distâncias relativas entre o navio e o meio. Assim, aplica-se uma série de medidas para determinar geometrias aproximadas do meio e/ou posição de outros navios em um dado instante.

Foi realizada uma verificação do modelo para casos não previstos, avaliando os erros associados à modelagem e sua aplicabilidade. Os erros foram considerados aceitáveis para as condições impostas, visto as aplicações existentes em simuladores de manobras. Além disso, o modelo desenvolvido foi executado no simulador de manobras, no qual foram realizados alguns testes de sensibilidade ao movimento, além de algumas comparações com outros trabalhos, quando possível.

Palavras-Chave: Simulador de manobras, Interação hidrodinâmica, Efeito de margem, Tempo real, Interação entre navios.

ABSTRACT

Real-time Ship Maneuvering Simulator models are becoming more common and necessary in the feasibility analysis of ports and access channels. The constant increase in the length and draught of vessels, not followed by equivalent ports development, makes the effects of shallow water, ship-bank and ship-port interaction with other structures more relevant during a maneuver.

In order to increase the application range of this kind of simulator, the present work develops a mathematical model to estimate ship-bank and ship-ship hydrodynamic interaction forces and moments during a maneuver. The model uses, as a reference, data derived from an experimentally validated numerical method, the Boundary Element Method (BEM). Based on this method, some reference cases were selected to generate a database which would be used by our mathematical model to extrapolate results and estimate the interaction forces for any unexpected scenario. The forces obtained through the model are based on some input parameters, such as the vessel forward speed and the relative distances between the ship and bank and other ships. Thus, a series of measurements were developed to determine approximate geometries of the port and/or position of other ships at a given time slot.

A model verification was performed for some unexpected scenarios, evaluating the errors associated with the model and its application. By taking similar works developed in maritime simulators as a comparison point, the errors obtained in our mathematical model were considered acceptable. The developed model was implemented in the ship maneuvering simulator located at TPN-USP, where some movement sensitivity tests were performed as well as some comparisons with other works, whenever possible.

Keywords: Ship maneuvering simulator, Hydrodynamic interaction, Bank effect, Real-time, Ship-ship interaction.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Simulador de manobras Full Mission (TPN-USP) 1

Figura 2 – Exemplo de variação do parâmetro de distância para interação com margens. 4

Figura 3 – Diferentes configurações de margem..... 6

Figura 4 – Configuração de ressalto na margem 7

Figura 5 – Configuração de margem inclinada submersa (esq.) e o formato curvo da margem vertical (dir.) 8

Figura 6 – Estudo de interação entre navios para avaliação de forças hidrodinâmicas 9

Figura 7 – Ressalto em forma de rampa para vários ângulos..... 10

Figura 8 – Referência de ressalto circular 11

Figura 9 – Seção transversal do canal, visto na direção do movimento 13

Figura 10 – Diagrama de blocos de pilotagem 14

Figura 11 – Influência de um ressalto na margem 16

Figura 12 – Modelo de interação navio-navio para simulador de manobras de navio..... 16

Figura 13 – Sistema de coordenadas global e local (bases ortonormais positivas)..... 19

Figura 14 – Simplificação da influência no domínio de pressões de um navio devido à interação com a margem e outro navio..... 22

Figura 15 – Efeitos da interação entre navio e margem..... 23

Figura 16 – Risco da interação de uma embarcação navegando próxima a margem..... 24

Figura 17 – Resposta do navio ao efeito de aproximação de um ressalto na margem ... 25

Figura 18 – Exemplo de forças de interação atuantes sobre um navio atracado em escala reduzida, para um modelo com T=0,130m, U=0,364m/s e a distância de separação 0,645m .. 26

Figura 19 – Interação entre navios paralelos..... 30

Figura 20 – Interação entre navios não paralelos 31

Figura 21 – Padrão de esforços adotado para dados base do navio atracado (y/L=0,5; h/T=1,1; T_1=T_2 =15,5m)..... 33

Figura 22 – Padrão de esforços adotado para dados base do navio passante (y/L=0,5; h/T=1,1; T_1=T_2 =15,5m) 33

Figura 23 – Curvas normalizadas do caso base (y/L=0,5; h/T=1,1; T_1= T_2=15,5m) 36

Figura 24 – Força de *Surge* normalizada em função da distância (adaptado de Talstra & Bliek, 2014) 36

Figura 25 – Variação dos picos das curvas (Casos 1, 2, 3 e 4). 37

Figura 26 – Efeito corrigido da distância relativa nas curvas de forças F_X e F_Y (Casos 1, 2, 3 e 4) 38

Figura 27 – Variação do parâmetro y/L a partir do caso base (Casos 1, 2, 3 e 4) 43

Figura 28 – Distância mínima entre as linhas de centro dos navios. 43

Figura 29 – Distância mínima ($d_{mín}$) para a condição base (y/L=0,5) 44

Figura 30 – Caso 4 (h = 17,05m, T_1 = T_2 =15,5m; y/L = 1,5) – Navio atracado (acima); Navio passante (abaixo). 45

Figura 31 – Caso 9 (h = 21,70m, T_1 = T_2 =15,5m; y/L = 0,5) – Navio atracado (acima); Navio passante (abaixo). 46

Figura 32 – Caso 13 (h = 17,05m, T_1 = 15,5m, T_2 = 10,0m; y/L = 0,5) – Navio atracado (acima); Navio passante (abaixo) 47

Figura 33 – Caso 48 (h = 21,70m, T_1 = 10,0m, T_2 = 10,0m; y/L = 1,5) – Navio atracado (acima); Navio passante (abaixo) 48

Figura 34 – Caso 18 (h = 19,38m, T_1 = 15,5m, T_2 = 10,0m; y/L = 0,75) – Navio atracado (acima); Navio passante (abaixo) 49

Figura 35 – Caso 3 (h = 17,05m, T_1 = 15,5m, T_2 = 15,5m; y/L = 1,00) – Navio atracado (acima); Navio passante (abaixo) 49

Figura 36 – Comparação da variação do padrão de forças e momento com o efeito do aproamento relativo para o BEM - Caso 1 (y/L=0,5; h/T=1,1; T_1= T_2=15,5m) 51

Figura 37 – Caso base com efeito do ângulo (10°) - Caso 1 (y/L=0,5; h/T=1,1; T_1= T_2=15,5m) 52

Figura 38 – Caso base com efeito do ângulo (20°) - Caso 1 (h/T=1,1; T_1= T_2=15,5m; y/L=0,5) 52

Figura 39 – Caso 48 com ângulo de 10° (h = 21,70m, T_1 = 10,0m, T_2 = 10,0m; y/L = 1,5) 53

Figura 40 – Caso 48 com ângulo de 20° (h = 21,70m, T_1 = 10,0m, T_2 = 10,0m; y/L = 1,5) 54

Figura 41 – Caso 18 com ângulo de 10° (h = 19,38m, T_1 = 15,5m, T_2 = 10,0m; y/L = 0,75) 54

Figura 42 – Caso 18 com ângulo de 20° (h = 19,38m, T_1 = 15,5m, T_2 = 10,0m; y/L = 0,75) 55

Figura 43 – Comparação de picos para o navio atracado (Modelo x BEM) – Casos 0° .. 57

Figura 44 – Comparação de picos para o navio atracado (Modelo x BEM) – Casos 10° 57

Figura 45 – Comparação de picos para o navio atracado (Modelo x BEM) – Casos 20° 57

Figura 46 – Comparação de picos para o navio passante (Modelo x BEM) – Casos 0° . 58

Figura 47 – Comparação de picos para o navio passante (Modelo x BEM) – Casos 10° 58

Figura 48 – Comparação de picos para o navio passante (Modelo x BEM) – Casos 20° 58

Figura 49 – Posição inicial de cada simulação em no simulador de manobras 60

Figura 50 – Movimento do centro de gravidade do navio estacionário. 61

Figura 51 – Movimento do navio inicialmente parado devido ao efeito de interação. 62

Figura 52 – Variação no aproamento do navio inicialmente parado devido ao efeito de interação. 62

Figura 53 – Comparação do movimento do navio, inicialmente estacionário, nas condições de lastro e carregado 63

Figura 54 – Comparação da variação do aproamento para um navio inicialmente estacionário 63

Figura 55 – Interação entre navio e margem paralela 64

Figura 56 – Padrão de esforços obtido pelo BEM (T=15,5m) 67

Figura 57 – Padrão de esforços obtido pelo BEM (T=15,5m) 68

Figura 58 – Ponto de aplicação da força em função da profundidade relativa h/T do navio. 68

Figura 59 – Coeficiente adimensional de força em função da relação calado por folga sob a quilha (para T/B=0,323 e y/B=0,75) - Casos base 1,5,9,13,17 70

Figura 60 – Resultado do modelo em comparação ao resultado obtido numericamente. (para T/B=0,323 e h/T=2,2) - Casos base 13,14,15,16 71

Figura 61 – Resultado do modelo em comparação ao resultado obtido numericamente (para h/T=2,2 e y/B=0,75) - Casos base 13 e 33 72

Figura 62 – Força lateral de sucção em função da distância a margem (T=15,5m). 73

Figura 63 – Força lateral de sucção em função da distância a margem (T=10,0m). 74

Figura 64 – Comparação das forças para os casos simulados do BEM. 75

Figura 65 – Resultados de distâncias para casos y/B=0,75 (esq.), y/B=1 (centro), y/B=1,5 (dir.) 76

Figura 66 – Medição das distâncias à margem a partir da proa e da popa. 77

Figura 67 – Ressalto rampa 79

Figura 68 – Teste do modelo para diferentes distâncias à margem (β=90°). 80

Figura 69 – Teste realizado por Lee e Lee (2008) para diferentes distâncias à margem (β=90°). 80

Figura 70 – Teste do modelo para diferentes distâncias à margem (β=135°). 81

Figura 71 – Teste realizado por Lee (2012) para diferentes distâncias à margem (β=135°). 81

Figura 72 – Teste do modelo para diferentes distâncias à margem (β=45°). 82

Figura 73 – Teste realizado por Lee (2012) para diferentes distâncias à margem (β=45°). 82

Figura 74 – Esforços em regime no caso β=90°. 83

Figura 75 – Tendência dos esforços em x/L=2 para β=45° e β=135°. 83

Figura 76 – Sobreposição do Coeficiente de força para a condição de β=90°. 84

Figura 77 – Posição inicial de cada simulação em no simulador de manobras. 85

Figura 78 – Seguimento do CG do navio para diferentes distâncias à margem. 86

Figura 79 – Força de *sway* e momento de *yaw* atuantes no navio devido à interação com a margem no simulador de manobras. 86

Figura 80 – Trajetória do navio carregado (y/B=1; h/T=1,2). 86

Figura 81 – Desvio da trajetória devido à navegação em uma margem paralela. 87

Figura 82 – Desvio de trajetória do movimento do navio devido ao efeito de interação com a margem para distâncias do costado de 0,1L (esq.), 0,2L (centro) e 0,3L (dir.). 88

Figura 83 – Efeito da margem para diferentes calados e folgas sob a quilha..... 88

Figura 84 – Efeito de um ressalto na margem no desvio da trajetória do CG..... 89

Figura 85 - Diagrama de Blocos – Programa de Integração com dados de Força do BEM para o Simulador SMH-TPN..... 109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do caso "Interação entre navios paralelos". 31

Tabela 2 – Dados dos navios testados para a interação entre navios. 32

Tabela 3 – Parâmetros usados para a simulação do BEM. 32

Tabela 4 – Casos simulados pelo BEM 34

Tabela 5 – Resumo de modelos matemáticos adotados e seus respectivos parâmetros para os esforços de pico atuantes em um navio atracado devido aos efeitos da interação entre navios. 39

Tabela 6 – Casos utilizados para obtenção dos coeficientes de cada parâmetro do modelo. 40

Tabela 7 – Erro médio dos picos para alguns modelos propostos, para o navio atracado. 41

Tabela 8 – Erro médio dos picos para alguns modelos propostos, para o navio passante. 41

Tabela 9 – Coeficientes para o caso base adotado 42

Tabela 10 – Constantes **KFx**, **KFy** e **KMz** para o caso base. 42

Tabela 11 – Variações do coeficiente de correlação e largura da faixa de dados. 59

Tabela 12 – Condições iniciais das simulações 60

Tabela 13 – Dados do caso "Margem vertical com fundo" 65

Tabela 14 – Norma japonesa para mínima folga (*d*) a margem em função do tipo de navio. (OCDI, 2012) 66

Tabela 15 – Parâmetros usados para a simulação do BEM. 66

Tabela 16 – Casos utilizados para determinar os coeficientes das regressões 67

Tabela 17 – Casos utilizados para obtenção dos coeficientes de cada parâmetro do modelo. 70

Tabela 18 – Coeficientes para o caso base adotado 71

Tabela 19 – Variações do coeficiente de correlação e largura da faixa de dados. 75

Tabela 20 – Variações do coeficiente de correlação e largura da faixa de dados. 76

Tabela 21 – Principais dimensões do navio em estudo do trabalho de Lee e Lee (2008) 80

Tabela 22 – Principais dimensões do navio em estudo do trabalho de Lee (2012)..... 81

Tabela 23 – Principais dimensões do navio em estudo do trabalho de Lee (2012)..... 82

Tabela 24 – Condições iniciais das simulações. 85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BEM	*Boundary Element Method*
CFD	*Computational Fluid Dynamics*
CUDA	*Compute Unified Device Architecture*
CG	Centro de Gravidade
CHL	*Coastal and Hydraulics Laboratory*
FHR	*Flanders Hydraulic Research*
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
MARIN	*Maritime Research Institute Netherlands*
MPI	*Message Passing Interface*
MVF	Método dos Volumes Finitos
OCDI	*Overseas Coastal Area Development Institute of Japan*
PIANC	*Permanent International Association of Navigation Congresses*
RANS	*Reynolds Average Navier-Stokes*
SMH	Simulador Marítimo Hidroviário
TPN-USP	Tanque de Provas Numérico da USP
ULCC	*Ultra Large Crude Carrier*
VLCC	*Very Large Crude Carrier*

LISTA DE SÍMBOLOS

B	boca do navio
C_B	coeficiente de bloco
C_F	coeficiente adimensional de força
C_M	coeficiente adimensional de momento
$d_{mín}$	distância mínima
DI	diferença integral
$e(F)$	erro da força do modelo
$\bar{E}(F)$	média do erro das forças
F_X	força de *surge*
F_Y	força de *sway*
F_Z	força de *heave*
h	profundidade efetiva
I_z	momento de inércia em relação à cota z do navio
i, j, k	índices
k_{ij}	coeficientes das curvas de regressão para interação navio-navio
km_{ij}	coeficientes das curvas de regressão para interação navio-margem
K	constantes das curvas de regressão para interação navio-navio
KM	constantes das curvas de regressão para interação navio-margem
L	comprimento do navio
m	massa do navio
m_{ij}	coeficiente de massa adicional
M_X	momento de *roll*
M_Y	momento de *pitch*
M_Z	momento de *yaw*
$\vec{n}$	vetor normal à fronteira do domínio computacional
p	pressão
P_i	ponto de referência
S	área de cada painel
t	tempo
Δt	passo de tempo
T	calado do navio

U	velocidade de avanço do navio
v_x, v_y	componentes da velocidade do navio no referencial local
x	distância longitudinal do navio a outro navio
x_{CG}	posição do centro de gravidade do navio no referencial local
y	distância lateral do navio a margem e/ou outro navio
y_{eq}	distância equivalente do navio a margem
ρ	massa específica da água
φ	função potencial escalar
ψ	Ângulo de aproamento / *yaw*
∂V	superfície de contorno do domínio computacional
$1/r$	fonte de Rankine

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS 1

1.1. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS 3

1.2. METODOLOGIA 4

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 6

2.1. EFEITOS DE INTERAÇÃO COM FRONTEIRAS E OUTROS NAVIOS – MODELOS SEMI-EMPÍRICOS OU HEURÍSTICOS 6

2.2. EFEITOS DE INTERAÇÃO COM FRONTEIRAS E OUTROS NAVIOS – MODELOS NUMÉRICOS .. 9

2.3. SISTEMAS DE SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL *(E COMO LEVAM EM CONTA EFEITOS DE INTERAÇÃO COM MARGEM E OUTROS NAVIOS)* 13

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS 19

3.1. EQUAÇÃO DO MOVIMENTO 19

3.2. INTERAÇÃO ENTRE NAVIOS E MEIO 22

3.2.1. Efeitos de interação com margem 23

3.2.2. Efeitos de interação com outros navios 25

3.2.3. Método dos Painéis de Rankine 27

4. INTERAÇÃO ENTRE NAVIOS 30

4.1. MODELAGEM MATEMÁTICA DA INTERAÇÃO ENTRE NAVIOS 32

4.1.1. Função referente ao coeficiente de curva adimensional 35

4.1.2. Função referente aos picos de forças e momentos 39

4.1.3. Extrapolação para correção do ângulo de aproamento 43

4.2. RESULTADOS 45

4.2.1. Análise geral do modelo 45

4.2.2. Casos de verificação 47

4.2.3. Influência do ângulo do navio atracado 50

4.2.4. Análise de picos de forças e momentos 56

4.3. INTERAÇÃO ENTRE NAVIOS NO SIMULADOR DE MANOBRAS 60

5. INTERAÇÃO ENTRE NAVIO E MARGEM 64

5.1. MODELAGEM MATEMÁTICA DA INTERAÇÃO ENTRE NAVIO E MARGEM 65

5.1.1. Funções referentes aos adimensionais 69

5.2. ANÁLISE GERAL DO MODELO 72

5.3. GENERALIZAÇÃO DO MODELO 77

5.4. CASOS DE VERIFICAÇÃO 79

5.4.1. Ressalto rampa 79

5.5. INTERAÇÃO ENTRE NAVIO E MARGEM NO SIMULADOR DE MANOBRAS 85

6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS 90

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 93

APÊNDICE A – *FORÇAS E MOMENTOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES DO BEM* 99

APÊNDICE B – INTEGRAÇÃO COM SIMULADOR EM TEMPO REAL 108

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A utilização de embarcações de grande porte possui uma importância fundamental no desenvolvimento do transporte marítimo, tendo destaque no comércio internacional, devido à economia de escala obtida em transportar a maior quantidade possível de carga numa única embarcação.

O transporte marítimo apresenta forte crescimento no mundo (e em especial no Brasil), o que não é, na maior parte das vezes, acompanhado pela melhoria das condições de infraestrutura portuária. Navios cada vez maiores são demandados a manobrar em portos que não foram originalmente projetados para eles. Para garantir a segurança da navegação, porém não inviabilizando o transporte, devem-se definir condições especiais para as manobras, tais como janelas de maré, uso redundante de rebocadores, limitar os acessos náuticos para uma única via, etc.

Nesse contexto, simuladores de manobras constituem ferramentas muito importantes, capazes de realizar previsões através da reprodução das condições futuras impostas em projetos que demandam maior aproveitamento da infraestrutura portuária existente. Dentre estes, destacam-se os simuladores de manobra em tempo real, em que a manobra é comandada por um prático num ambiente semelhante a uma ponte de comando, com sistema de imersão visual. Para efeito de análise de engenharia portuária e acessos náuticos, deve-se também garantir que a representação da dinâmica da embarcação sujeita às condições ambientais do porto (corrente, vento, ondas, maré) seja a mais representativa possível. Na Figura 1 é ilustrado um dos simuladores de manobras do laboratório do Tanque de Provas Numérico da Universidade de São Paulo (TPN-USP).

Figura 1 – Simulador de manobras Full Mission (TPN-USP)

A recomendação mais utilizada internacionalmente para projeto portuário (PIANC, 2014) atesta que simulações em tempo real são importantes para dimensionamento e verificação da largura de canais de acesso e bacias de evolução na fase de projeto detalhado, pois permitem incluir o fator humano na análise. A grande desvantagem é que o modelo matemático utilizado deve ser executado em tempo real, o que dificulta o uso de modelagens hidrodinâmicas mais complexas, uma vez que essas exigem um tempo de processamento elevado para serem resolvidas numericamente.

Os simuladores de manobra devem possuir modelos matemáticos acurados para a dinâmica de embarcações flutuantes no meio fluido, sujeita a seus elementos de controle (leme, máquina e rebocadores) e aos efeitos ambientais externos (corrente, ondas e vento). No contexto aqui analisado, com aumento do tráfego portuário e utilização de navios de maior porte, efeitos de interação causados pela presença de obstáculos de qualquer natureza nas proximidades devem também estar modelados, tais como obstáculos fixos (margem) ou móveis (outros navios). Estes geram uma variação na distribuição de pressão no contorno das embarcações, alterando seu comportamento dinâmico.

Contudo, o desenvolvimento de um modelo matemático simples o suficiente para se implementar em um simulador de manobras em tempo real, e ao mesmo tempo representativo para uma análise de engenharia é ainda tópico de pesquisa e desenvolvimento. Ferramentas úteis voltadas para prever o comportamento dinâmico da interação navio-fluido podem ser baseadas no Método dos Elementos de Contorno (*Boundary Element Method – BEM*), capaz de analisar um escoamento potencial, ou no Método dos Volumes Finitos, comumente aplicado em softwares de CFD (*Computational Fluid Dynamics*), que também podem levar em consideração efeitos viscosos. Apesar de obterem respostas acuradas, são métodos de difícil aplicação em simuladores em tempo real, uma vez que requisitam um custo computacional elevado.

Assim, uma metodologia proposta na presente dissertação é utilizar os resultados de um desses métodos para criar modelos matemáticos simplificados, similar às propostas dos trabalhos de Duffy (2008) e Lataire (2014). Foram realizadas simulações usando um modelo numérico para diversas condições de

navegação, e a partir desses resultados e outros trabalhos de referência na área foram desenvolvidos modelos matemáticos que permitem prever os esforços com um número pequeno de variáveis, para a aplicação em tempo real.

1.1. Objetivos e Justificativas

O objetivo desse trabalho é desenvolver modelos de interação navio-navio e navio-margem aplicáveis em simuladores de manobras de navios em tempo real.

O modelo deve demandar poucos dados de entrada para calibração e ajuste de parâmetros, utilizando-se resultados de ensaios numéricos ou experimentais. Com isso, reduz-se o esforço para a modelagem dos cenários de simulação. Além disso, o modelo deve também ser válido para parâmetros (distâncias, calados, folga sob a quilha, etc...) dentro de um conjunto de valores presentes nas configurações e situações em estudo. É fundamental também que o tempo de processamento dos cálculos seja compatível com a simulação realizada em tempo real, considerando-se os recursos computacionais disponíveis. Ao final, objetiva-se que o modelo possua um grau de acurácia conhecido e adequado para o propósito da simulação.

Os fenômenos de interação estão presentes em muitos ambientes portuários, mas nem sempre são de fundamental importância na definição da manobra e no comportamento do navio. É muito importante que estes efeitos estejam presentes nas simulações, a fim de influenciar a ação do prático ou comandante. Entretanto, por não serem os efeitos e forças mais relevantes na manobra, nestes casos admite-se o uso de modelos com grau de acurácia reduzido.

Desse modo, a opção por modelos matemáticos explícitos e mais simples é preferível para cálculos em tempo real, uma vez que determinar a solução completa do escoamento em tempo real ainda são linhas de pesquisa mais avançadas, descritas com mais detalhes no Capítulo 2. Uma alternativa a isso seria montar um banco de dados para cada caso de simulação e interpolá-lo em tempo real, porém seria necessário obter um banco de dados muito extenso para cobrir cada caso, o que demanda muito tempo de preparação, inviabilizando uma aplicação prática.

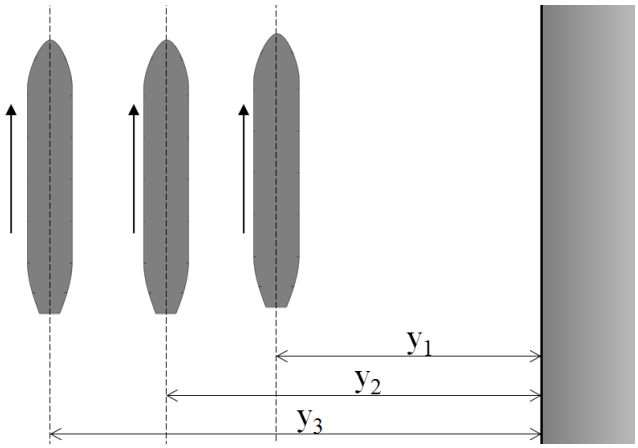
Contudo, a validação do modelo proposto para a aplicação em simuladores de manobras demanda diversos tipos de análise, englobando a verificação do nível aceitável de acurácia e precisão, que não entram no escopo do trabalho.

1.2. Metodologia

A metodologia proposta na presente dissertação é:

(1) Definir a configuração de ensaio base, na qual variam-se os parâmetros relevantes do problema, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2 – Exemplo de variação do parâmetro de distância para interação com margens.



(2) Obter as forças e momentos de interação utilizando-se um método numérico para cada configuração de ensaio base. No presente trabalho, utiliza-se o Método de Elementos de Contorno baseado em fontes de Rankine em desenvolvimento no TPN-USP. Este será denotado simplesmente como BEM (Boundary Element Method).

(3) Propor funções (modelos) que definem a variação das forças e momentos com os parâmetros relevantes usando os casos base. Estas funções devem ser capazes de interpolar e extrapolar o valor dos esforços para diversas combinações dos parâmetros do problema.

(4) Verificar se estes modelos matemáticos possuem validade para combinações de valores dos parâmetros não previstos nos casos base. Além disso, estimar o grau de acurácia e precisão destes modelos, tendo como paradigma resultados de casos de verificação, que também são obtidos pelo BEM, mas

com combinações de parâmetros distintos dos que foram usados para definir o modelo (casos base).

Além disso, foram feitas algumas propostas de adaptação dos modelos gerados para condições de simulações distintas das dos casos base. Por exemplo, para o caso da interação Navio-Navio, propôs-se uma adaptação do modelo base (que considera navios paralelos) para a situação de cruzamento de navios não paralelos (sem deriva). Para o caso Interação Navio-Margem, propôs-se uma adaptação para levar em conta margens com ressaltos. Para esses casos, foi feita uma análise qualitativa e, quando possível, o grau de acurácia destas adaptações também foi verificado.

Ao final, com o intuito de aplicar nos simuladores, foi desenvolvida uma arquitetura de integração para transmitir e receber os dados em tempo real. Algumas simulações no domínio do tempo foram executadas.

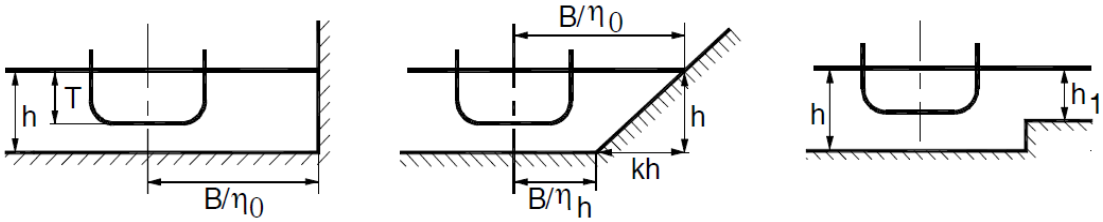
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Simuladores de manobras compreendem um conjunto de modelos matemáticos integrados e resolvidos no domínio do tempo com o intuito de simular o comportamento de navios sob a influência de forças externas, tais como o leme e o propulsor, que são elementos do navio comumente considerados de forma separada no modelo de cálculo hidrodinâmico. Segundo Pawlowski (1996), existem diferentes tipos de modelos matemáticos, sendo eles baseados em formulações semi-empíricas ou problemas de valor de contorno, que são comumente aplicados em métodos numéricos. Nesta seção será feita uma abordagem dos diferentes tipos de modelos utilizados para mensurar a interação entre navios e entre navio e margem.

2.1. Efeitos de interação com fronteiras e outros navios – Modelos semi-empíricos ou heurísticos

No caso de interação com a margem, os primeiros estudos significativos na área são apresentados por Norrbin (1974, 1985), que realizou uma série de experimentos com diferentes configurações de margens para a determinação das forças e momentos resultantes, como apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Diferentes configurações de margem



Fonte: NORRBIN (1985)

Norrbin (1985) definiu expressões base para a consideração do fenômeno da margem, mostrando que a força de *sway* e o momento de *yaw* são aproximadamente inversamente proporcionais à distância do navio a margem, além da consideração da força proporcional ao quadrado da velocidade de navegação.

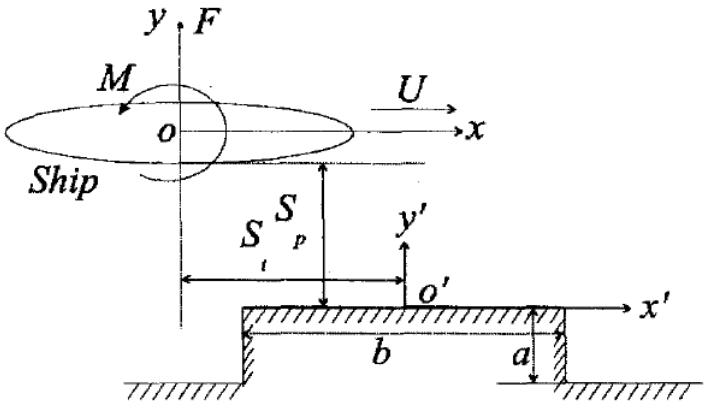
Vantorre (1995) fez comparações de resultados experimentais com modelos empíricos encontrados na literatura, verificando as condições para estimar modelos

aplicáveis em simuladores de manobras. Encontrou relações entre distâncias e profundidades relativas, de modo que para valores de folga sob a quilha muito baixa, o momento de yaw, que sempre tende a afastar da margem a proa do navio, sofre um aumento significativo, podendo ser um fator relevante nas manobras de navios.

Análogo a esse estudo, Li (2000) realizou uma análise estatística sobre alguns resultados experimentais a fim de obter um modelo matemático aplicável a simuladores de manobra, obtendo expressões para a força de *sway* e o momento de *yaw*.

Lee et al. (2001) mostraram um estudo do movimento do navio para um ressalto na margem, variando-se o comprimento do ressalto, conforme apresentado Figura 4, estudando também a resposta ao longo do tempo para uma navegação com controle de leme.

Figura 4 – Configuração de ressalto na margem



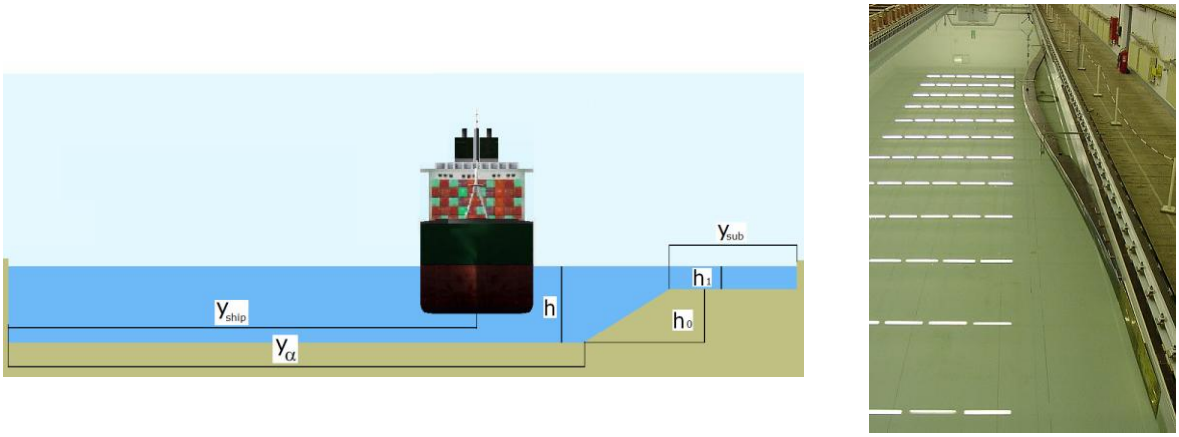
Fonte: LEE ET AL. (2001).

Duffy (2008) em sua tese realizou um estudo detalhado de diversas variáveis relevantes a problemas de interação entre navio-margem e navio-fundo, de modo a desenvolver modelos para as forças de interação, validando-os para geometrias não previstas.

Lataire e Vantorre (2008) aprofundaram o estudo verificando as condições de margem vertical com formato curvo, impondo distâncias variáveis entre o navio e a margem. Diversas inclinações foram estudadas, incluindo casos especiais

mencionados por Norrbin (1985), como o considerado por Lataire e Vantorre (2008) apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Configuração de margem inclinada submersa (esq.) e o formato curvo da margem vertical (dir.)



Fonte: LATAIRE & VANTORRE, 2008.

Lataire et al. (2015) realizaram um estudo sistemático e aprofundado, obtendo um extensivo banco de dados de resultados experimentais (mais de 14.000) possibilitando futuras análises para o fenômeno.

Para os casos de interação entre navios, Wang (1975) apresentou uma das primeiras estimativas de curva como função da posição relativa do navio aplicando o método das faixas, sendo uma referência para esse tipo de interação.

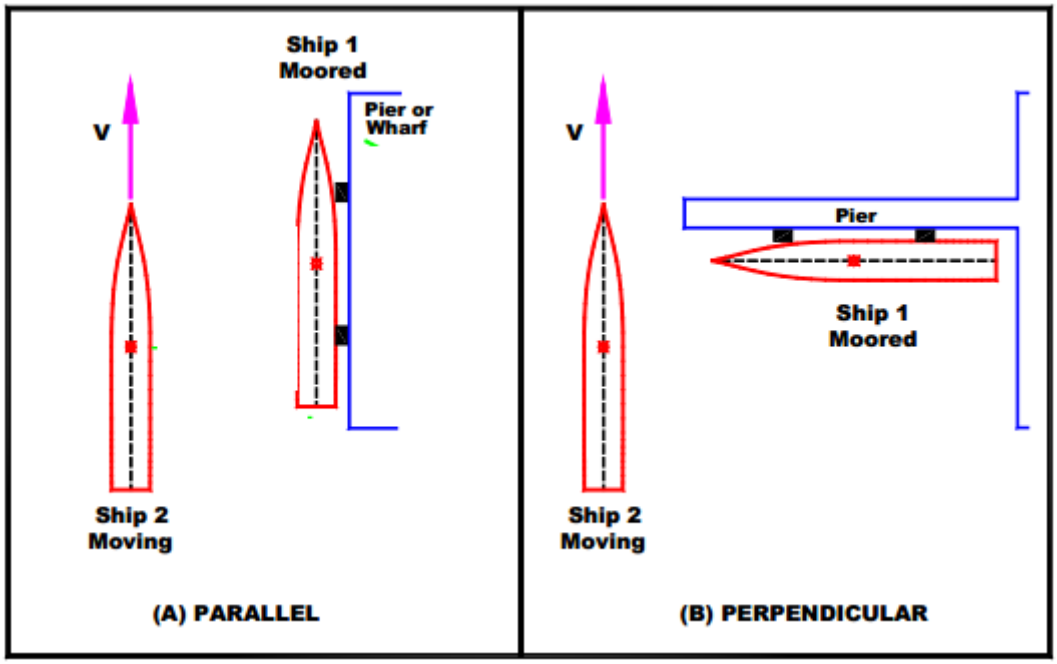
Seelig (2001) propôs a aplicação de fatores de correção para as expressões obtidas por Wang (1975), baseadas em outros trabalhos, relacionando fatores de correção para águas rasas e distância relativa.

O trabalho de Varyani et al (2002) apresentou ensaios em escala reduzida, obtendo expressões matemáticas empíricas de cálculo de forças entre navios para cruzamento em canais.

De forma análoga, Flory (2002) realizou um estudo com modelos empíricos simples para obter as expressões de forças e momentos hidrodinâmicos máximos sobre um navio ancorado da interação entre dois navios, ancorado e passante, navegando paralelamente.

Kriebel (2005) realizou um estudo experimental de interação entre navios semelhante, porém, registrando o histórico dos esforços. Nesse trabalho Kriebel também propõe fatores de correção para os resultados obtidos por Wang (1975). Posteriormente, Kriebel (2010) refinou seu estudo para navios em posições perpendiculares entre si, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Estudo de interação entre navios para avaliação de forças hidrodinâmicas



Fonte: KRIEBEL, 2005.

Varyani & Vantorre (2006) realizaram um estudo similar ao de Wang (1975) e aplicaram coeficientes de correção semi-empíricos para o resultado obtido pelo Método das Faixas.

Lataire et al (2012) apresentou um modelo simples que pode ser calibrado para diferentes navios tipo, considerando apenas parâmetros geométricos das embarcações e de suas profundidades relativas.

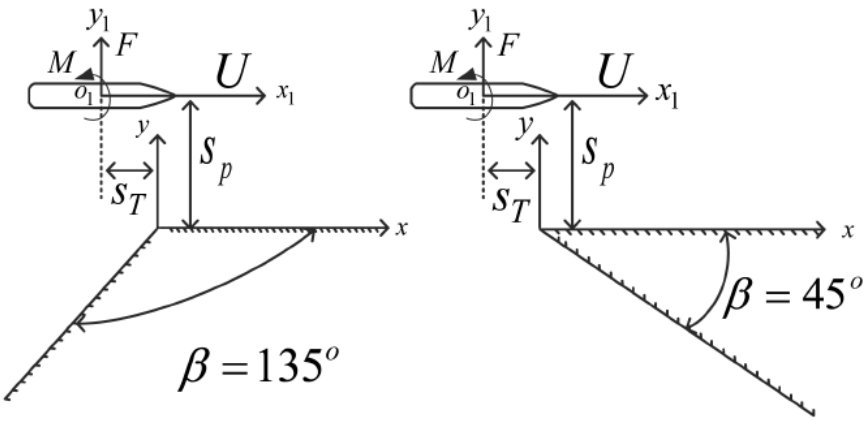
2.2. Efeitos de interação com fronteiras e outros navios – Modelos numéricos

Modelos numéricos baseados em teoria potencial são comumente utilizados em cálculos hidrodinâmicos de interação entre navios e o ambiente, como no caso de Lee e Lee (2007). Neste trabalho foi proposto um modelo potencial para determinar as condições de segurança referente a ventos intensos e ultrapassagem de navios em águas confinadas, determinando o respectivo histórico de forças associados a cada problema, e as condições seguras para se executar as manobras.

No caso de modelos de interação com a margem, existe um número bem limitado de trabalhos que consideram o efeito de margem considerando o histórico dos esforços.

Lee e Lee (2008) realizaram um estudo numérico potencial do comportamento temporal da força de *sway* e momento de *yaw* para um navio se aproximando de uma margem, simulando uma entrada em um canal largo, onde não há influência da margem oposta na dinâmica do navio. Lee (2012) expandiu o estudo para vários ângulos de entrada da margem dos canais, como apresentado na Figura 7.

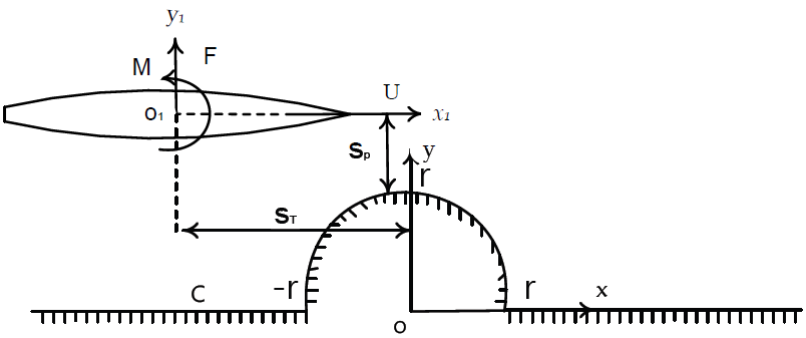
Figura 7 – Ressalto em forma de rampa para vários ângulos.



Fonte: LEE, 2012.

Mais recentemente, Lee et al. (2015) estudaram o comportamento das forças de interação para um caso de navio encontrando um ressalto circular, variando-se os parâmetros geométricos do meio, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Referência de ressalto circular



Fonte: LEE ET AL. (2015)

Seguindo as linhas de estudo de interação com a margem usando modelos numéricos, Sian et al. (2014) realizou um estudo em CFD e comparou com resultados experimentais em escala reduzida para validar os efeitos da interação com a margem em águas rasas, obtendo resultados satisfatórios.

Para modelos de interação entre navios, os trabalhos numéricos mais recentes se baseiam parte em resultados de modelos empíricos e heurísticos de trabalhos mais antigos, e parte realiza novos experimentos para critério de comparação, a fim de verificar o efeito de variáveis hidrodinâmicas pertinentes ao fenômeno mais difíceis de serem capturadas.

Utilizando a regressão obtida por Kriebel (2005), o trabalho realizado por Watai et al (2011) mostra um estudo comparativo entre método numérico (BEM), modelos empíricos, método heurístico (teoria das faixas) e resultados experimentais para a ultrapassagem de navios. O objetivo foi a validação de modelos numéricos, e demonstrou serem capazes de representar o fenômeno, apresentando bons resultados para casos práticos.

A facilidade de se monitorar diferentes grandezas e parâmetros num estudo numérico, comparado a um ensaio experimental, permitiu que diversos tipos de estudos fossem realizados, com diferentes focos e objetivos. No caso de Wang et al. (2000), aplicou-se um Método dos Elementos de Contorno para analisar a hidrodinâmica de navios em águas rasas e restritas, com o intuito de determinar forças hidrodinâmicas induzidas na superfície do casco. Em contrapartida, Tarafder e Suzuki (2006) aplicaram o Método dos Elementos de Contorno para analisar o

padrão de movimento das ondas nas proximidades do contorno do navio navegando em águas rasas.

Pinkster (2004) analisou o efeito da superfície livre sobre o navio atracado, comparando dois modelos potenciais, um baseado no modelo de casco duplo, e outro desenvolvido no trabalho para considerar o efeito de superfície livre, com exceção de efeitos de esteira. O resultado foi uma pequena variação para todos os esforços, desprezível se comparada à ordem de grandeza dos termos inerciais.

Posteriormente, Sutulo & Soares (2008) desenvolveram um modelo numérico potencial para a determinação das forças hidrodinâmicas na presença de qualquer obstáculo (fixos ou móveis).

Eloot e Vantorre (2011) apresentaram um modelo matemático simplificado para a força de sucção obtida através de análise de trabalhos anteriores de “dinâmica dos fluidos experimental” e comparado com trabalhos realizados em CFD, que utilizaram os parâmetros dos experimentos.

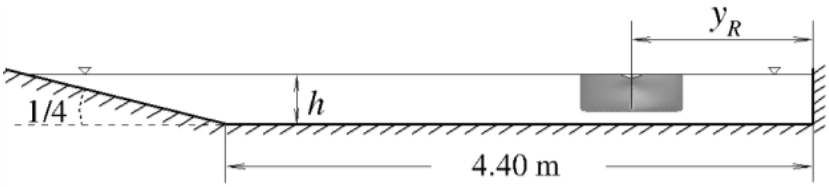
Xiang et al. (2011) apresentaram um estudo de interação entre navios, comparando os resultados de simulações através do Método de Rankine e CFD-RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*), concluindo que os efeitos viscosos não são relevantes na análise, e a aproximação para um escoamento potencial é representativa para navios paralelos.

Bunnik e Toxopeus (2011) apresentaram um método de determinar os efeitos gerados por um navio passante em um navio ancorado com ângulo de deriva em um canal. Para tanto, realizou-se uma comparação de um modelo potencial com casco duplo e um modelo RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*) viscoso. Além disso, foram consideradas as forças provenientes do modelo potencial proposto por Pinkster (2009) que considera efeitos de difração linear, e os resultados foram comparados com um experimento realizado no MARIN (*Maritime Research Institute Netherlands*). Isso permitiu verificar a relevância dos efeitos viscosos do escoamento para casos de navegação com ângulo de deriva maior que 7,5°, que foram considerados aceitáveis. Contudo, para ângulos acima de 15°, os erros são consideráveis para o modelo potencial, enquanto que o modelo viscoso apresenta um resultado aceitável.

Swiegers (2011) realizou um experimento de interação entre navios e fez uma comparação com uma extensa diversidade de referências e um modelo numérico potencial de duplo casco. Os resultados do modelo numérico e dos resultados experimentais foram bem coerentes entre si, o que enfatizava o uso de modelos potenciais.

Com o intuito de detalhar o estudo hidrodinâmico de interação com o meio, Zou et al. (2012) realizaram um estudo em CFD baseado no MVF usando variáveis obtidas de um experimento de interação entre navio e margem realizado pela Flanders Hydraulic Research (FHR - Bélgica), com o intuito de verificar os erros associados aos modelos potenciais com relação a viscosidade. Além disso, utilizando como parâmetros a folga sob a quilha, ao alterar o calado do navio e distância à margem, foi possível estabelecer uma correlação com os efeitos de margem apresentados na Figura 9. Constatou-se que o efeito da superfície livre pode ser negligenciado com base nos resultados do afundamento e do trim, considerando velocidades baixas.

Figura 9 – Seção transversal do canal, visto na direção do movimento

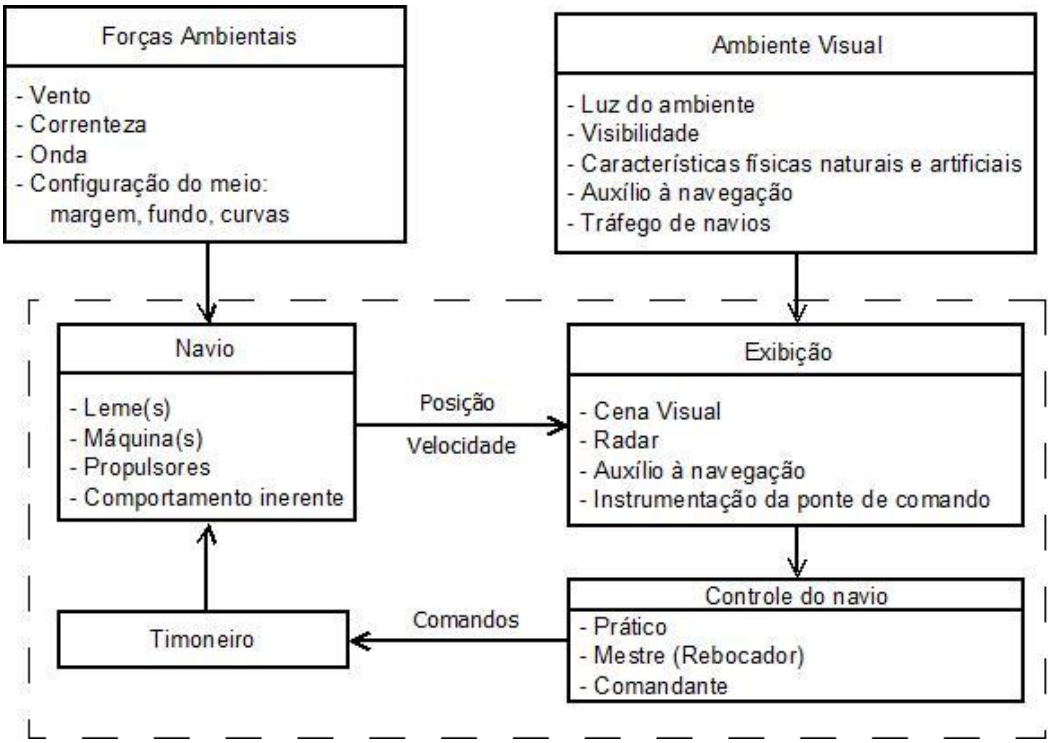


Fonte: ZOU ET AL., 2012.

2.3. Sistemas de simulação em tempo real *(e como levam em conta efeitos de interação com margem e outros navios)*

Segundo Webster (1992), simuladores de manobras de navio em tempo real possuem a estrutura básica de funcionamento apresentada na Figura 10:

Figura 10 – Diagrama de blocos de pilotagem



Fonte: WEBSTER, 1992.

Pode-se ver que o comportamento do navio será o resultado das forças ambientais e externas agindo sobre o mesmo, bem como das ações do prático impostas por meio do leme, máquina, propulsores ou rebocadores (estes últimos não apresentados no diagrama).

Desse modo, a resposta do navio em um simulador de manobras é diretamente dependente do modelo matemático e como são consideradas as relações entre as variáveis. Segundo Santos (1999), podem-se dividir os modelos de manobra encontrados na literatura em dois grandes grupos: os modelos holísticos e os modelos modulares.

Nos modelos holísticos, as equações de movimento do navio são descritas como um sistema completo e fechado, ou seja, as variáveis como casco, leme e propulsor constituem um único módulo e todas as variáveis estão correlacionadas dentro do modelo. Nesse modelo, mudanças no número de variáveis ou em hipóteses do sistema faz com que seja necessário rever completamente o modelo, além da dificuldade de se trabalhar com as variáveis acopladas. Em contrapartida,

os modelos modulares tratam as variáveis de forma independente para posteriormente serem integradas ao modelo. Visto a maior facilidade do emprego dos modelos modulares, esses passaram a ser empregados no desenvolvimento de simuladores de manobras.

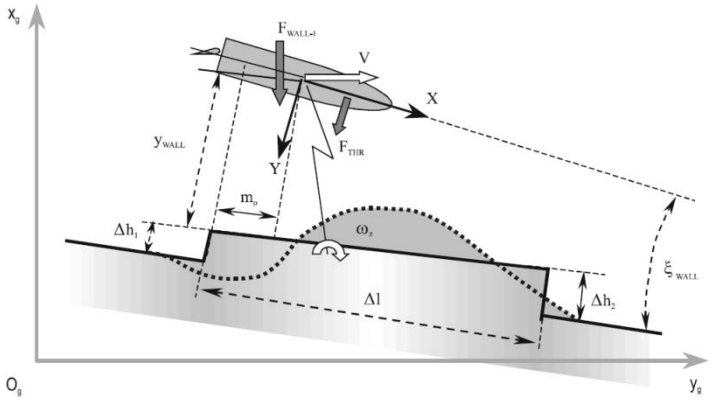
Seguindo a definição apresentada por Santos (1999), o modelo matemático de equações do movimento apresentado por Tannuri et al. (2014), referente ao simulador em análise, segue o padrão de modelo modular, em que efeitos de casco e propulsor são tratados de forma independente. As forças de interação hidrodinâmica navio-navio ou navio-margem, abordadas no presente trabalho, são consideradas, portanto, como agentes externos, assim como ações ambientais (maiores detalhes apresentados no Capítulo 3).

Outros simuladores seguem a mesma linha de aplicação de modelos modulares para a consideração dos efeitos de interação com a margem e com outros navios, visto a facilidade na integração dos fenômenos. Nesta seção, apresenta-se como alguns simuladores de manobras existentes consideram o efeito.

O simulador da empresa TRANSAS (TRANSAS, 2003) possui modelos de interação entre navios e o meio, que definem adimensionais a partir das condições de parâmetros cinemáticos, relações entre dimensões do navio, forma e dimensões da batimetria, todas inseridas nos adimensionais de forças e momentos não sendo detalhados os cálculos visto que não é o escopo do trabalho. Os modelos utilizados em todos os casos são empíricos, conforme apresentado por Brix (1993).

No caso do modelo *navio-parede/ressalto*, a consideração de uma geometria arbitrária é através da aproximação da forma da parede para um ressalto trapezoidal, conforme apresentado na Figura 11.

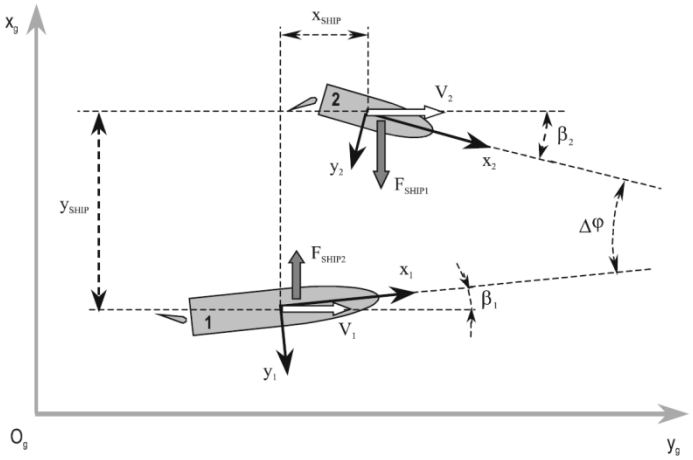
Figura 11 – Influência de um ressalto na margem



Fonte: TRANSAS, 2003.

Outro exemplo é o modelo de interação *navio-navio*, que depende dos parâmetros cinemáticos de ambos os navios, conforme Figura 12.

Figura 12 – Modelo de interação navio-navio para simulador de manobras de navio



Fonte: TRANSAS, 2003.

Outro simulador de manobras é o simulador da *Flanders Hydraulic Research*, descrito por Eloot e Vantorre (2011). No caso de interação com margens, o simulador utiliza um modelo de função peso definido a partir do fator de Norrbin (1974) para caracterizar um coeficiente em uma função matemática de distância a margem. Com isso, é possível determinar a força de sucção equivalente para diferentes configurações como função das distâncias ao fundo e a parede. O cálculo base das forças é similar ao cálculo proposto por Brix (1993), onde as funções de interação são consideradas nos adimensionais de forças e momentos.

Apesar do modelo capturar bem os efeitos de interação de margem, o fato do simulador simplificar as geometrias irregulares ao adotar pontos discretos para uma geometria simplificada causa uma perda de generalidade em sua aplicação uma vez que esse fator é sensível a alterações, segundo os autores. Uma descrição mais detalhada do modelo pode ser encontrada na tese de Lataire (2014).

Para interações entre navios, o simulador considera o modelo desenvolvido por Vantorre et al. (2002). Segundo Vantorre (2003), é possível gerar modelos genéricos acurados de interação entre navios a partir de uma quantidade mínima de resultados experimentais e valores teóricos para as forças e momentos de pico para aplicação em simuladores *Real-Time*, como proposto também por Varyani et al. (1999), que prevê os picos de forças e momentos nesses casos.

Modelos matemáticos com aspectos qualitativos dos efeitos de interação são facilmente programáveis em simuladores em tempo real. Lataire et al. (2011) realizaram testes com modelos em escala de um VLCC sendo ultrapassado por um Aframax, de modo a calibrar parâmetros de uma função matemática de um simulador de manobras em tempo real.

O estudo de Duffy (2002) é adequado para modelos modulares de simuladores de manobras de navios em tempo real, considerando apenas a influencia das variáveis mais relevantes. Duffy (2008) fez um modelo mais detalhado em sua tese, como discutido na seção 2.1 deste capítulo.

Apesar dos modelos modulares serem comumente aplicados em simuladores de manobras para a consideração dos efeitos de interação, existe um novo padrão de simuladores de manobras em desenvolvimento que não segue essa mesma linha. Esses modelos são os modelos numéricos, que por ser uma linha de pesquisa recente ainda carece de estudo para uma aplicação prática, como discutido nos trabalhos de Lindberg et al.(2013) e Pinkster (2016).

Lindberg et al. (2012) apresentou uma metodologia para aplicar um Método de Elementos de Contorno em simulações em tempo real para interação entre navios, desenvolvida para aplicar em simuladores de treinamento, com interação navio-rebocador.

Posteriormente, Lindberg et al. (2013) propôs a aplicação direta do Método dos Elementos de Contorno em tempo real para interação navio-onda, navio-navio e navio-estrutura, com a intenção de substituir modelos matemáticos comumente aplicados em simuladores em tempo real. Para tanto, é realizada uma execução de múltiplos núcleos em paralelo (GPUs – Unidades de Processamento Gráficas) para o processamento com tempo reduzido. Sua implementação é feita em três plataformas distintas, o compilador C/C++, e as plataformas de comunicação de dados em paralelo CUDA e MPI, o que, segundo o autor, permite uma velocidade de processamento mais elevada.

Pinkster (2016) também assume a mesma linha que o grupo de pesquisa de Lindberg, apresentando o progresso no estudo de interação entre navios e navio e margem simultaneamente baseados em modelos potenciais. Para tanto, são necessárias várias GPUs, uma vez que a demanda computacional para a solução em tempo real é muito grande, como verificado pelo autor.

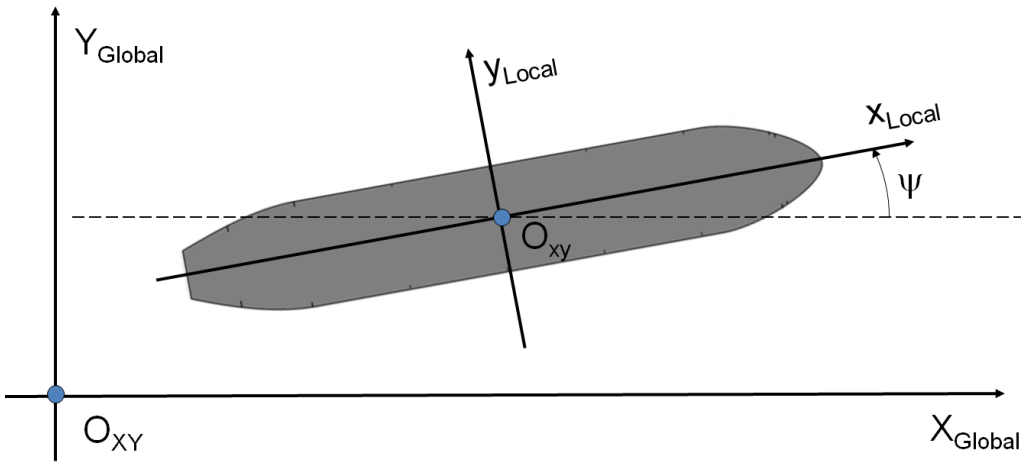
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. Equação do movimento

A modelagem da dinâmica de corpo flutuante é um ponto essencial a ser considerado na criação de um modelo de manobra para representar o comportamento de uma embarcação. Nesta seção, é apresentado um modelo bidimensional para 3 graus de liberdade, uma vez que uma das hipóteses adotadas neste trabalho é que os esforços de interação considerados atuam apenas neste plano.

Adotam-se dois sistemas de coordenadas, global e local, referentes a um referencial fixo em relação à terra (referencial inercial) e móvel (referencial não inercial). O sistema global é o referencial inercial, enquanto o sistema local, com origem no ponto central da meia-nau (ponto O) do navio, possui os eixos das abscissas e ordenadas orientados, respectivamente, para a proa e bombordo do navio, conforme apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Sistema de coordenadas global e local (bases ortonormais positivas)



Segundo o trabalho de Newman (1977), dentre outros autores, aplicando a segunda Lei de Newton a um corpo flutuante, admitindo apenas os movimentos em duas dimensões, encontram-se as equações do movimento do corpo, em que F_x e F_y são, respectivamente, as forças aplicadas pelo escoamento sobre o casco na direção longitudinal (*surge*) e transversal (*sway*) e M_z representa o momento de guinada (*yaw*) atuante sobre o casco em relação à origem da coordenada local. A

distância entre o centro de gravidade e ponto O (medida no eixo x_{local}) é dada por x_{CG}, como mostra a equação a seguir:

$$m\left(\dot{v}_x - v_y\dot{\psi} - \dot{\psi}^2 x_{CG}\right) = F_x(v_x; \dot{v}_x; v_y; \dot{v}_y; \dot{\psi}; \ddot{\psi})$$

$$m\left(\dot{v}_y + v_x\dot{\psi} + \ddot{\psi}x_{CG}\right) = F_y(v_x; \dot{v}_x; v_y; \dot{v}_y; \dot{\psi}; \ddot{\psi}) \qquad (1)$$

$$I_z\ddot{\psi} + m\left(\dot{v}_y + v_x\dot{\psi}\right)x_{CG} = M_z(v_x; \dot{v}_x; v_y; \dot{v}_y; \dot{\psi}; \ddot{\psi})$$

onde m é a massa do corpo, $\mathrm{I_z}$ é o momento de inércia em relação ao eixo vertical que passa pelo polo Oxy, $\mathrm{v_x}$ e $\mathrm{v_y}$ representam as componentes de velocidade do corpo, em relação ao eixo local, e ψ é ângulo de aproamento do navio.

Assim, uma abordagem adotada, inspirada no método potencial que permite uma independência de efeitos, é decompor as forças em componentes de origem potencial e viscosa:

$$F_x\left(v_x; \dot{v}_x; v_y; \dot{v}_y; \dot{\psi}; \ddot{\psi}\right) = F_{x,I}\left(v_x; \dot{v}_x; v_y; \dot{v}_y; \dot{\psi}; \ddot{\psi}\right) + F_{x,R}(v_x; \dot{v}_x; v_y; \dot{v}_y; \dot{\psi}; \ddot{\psi})$$

$$F_y\left(v_x; \dot{v}_x; v_y; \dot{v}_y; \dot{\psi}; \ddot{\psi}\right) = F_{y,I}\left(v_x; \dot{v}_x; v_y; \dot{v}_y; \dot{\psi}; \ddot{\psi}\right) + F_{y,R}(v_x; \dot{v}_x; v_y; \dot{v}_y; \dot{\psi}; \ddot{\psi}) \qquad (2)$$

$$M_z\left(v_x; \dot{v}_x; v_y; \dot{v}_y; \dot{\psi}; \ddot{\psi}\right) = M_{z,I}\left(v_x; \dot{v}_x; v_y; \dot{v}_y; \dot{\psi}; \ddot{\psi}\right) + M_{z,R}(v_x; \dot{v}_x; v_y; \dot{v}_y; \dot{\psi}; \ddot{\psi})$$

na qual o subscrito I denota as componentes de força e momento inerciais, de origem potencial (fluido ideal), enquanto o subscrito R denota as componentes de origem viscosa.

As forças potenciais são caracterizadas por meio das matrizes de massa adicional. Para movimentos em duas dimensões, considerando o navio simétrico com relação ao seu eixo de coordenada x_{local}, os coeficientes m_{12} e m_{16} são nulos. Assim, as forças de origem potencial associadas a um movimento arbitrário no plano, resultam:

$$F_{x,I}\left(v_x; \dot{v}_x; v_y; \dot{v}_y; \dot{\psi}; \ddot{\psi}\right) = -m_{11}\dot{v}_x + m_{22}v_y\dot{\psi} + m_{26}\dot{\psi}^2$$

$$F_{y,I}\left(v_x; \dot{v}_x; v_y; \dot{v}_y; \dot{\psi}; \ddot{\psi}\right) = -m_{22}\dot{v}_y - m_{11}v_x\dot{\psi} - m_{26}\ddot{\psi} \qquad (3)$$

$$M_{z,I}\left(v_x;\dot{v}_x;v_y;\dot{v}_y;\dot{\psi};\ddot{\psi}\right) = -m_{66}\ddot{\psi} + (m_{11} - m_{22})v_x v_y - m_{26}\left(\dot{v}_y + v_x\dot{\psi}\right)$$

Aplicando-se as equações (1) e (3) nas equações em (2), obtemos:

$$(m + m_{11})\dot{v}_x - (m + m_{22})v_y\dot{\psi} - (mx_{CG} + m_{26})\dot{\psi}^2 = F_{X,R}(v_x;\dot{v}_x;v_y;\dot{v}_y;\dot{\psi};\ddot{\psi})$$

$$(m + m_{22})\dot{v}_y + (m + m_{11})v_x\dot{\psi} + (mx_{CG} + m_{26})\ddot{\psi} = F_{Y,R}(v_x;\dot{v}_x;v_y;\dot{v}_y;\dot{\psi};\ddot{\psi}) \qquad (4)$$

$$(I_z + m_{66})\ddot{\psi} + (mx_{CG} + m_{26})\left(\dot{v}_y + v_x\dot{\psi}\right) - (m_{11} - m_{22})v_x v_y = M_{z,R}(v_x;\dot{v}_x;v_y;\dot{v}_y;\dot{\psi};\ddot{\psi})$$

Os termos viscosos são obtidos pelo modelo de Obokata (1987), com modificações para levar em consideração o campo de corrente não uniforme, como proposto por Fucatu e Nishimoto (2004).

Um modelo de manobra voltado para simulação deve considerar também efeitos de outras forças externas, sendo possível adicionar outras componentes externas junto à parcela da componente viscosa, na equação (4), tais como forças de onda, vento, propulsores, rebocadores ou mesmo forças de interação com o meio ou outros navios, conforme a equação (5):

$$(m + m_{11})\dot{v}_x - (m + m_{22})v_y\dot{\psi} - (mx_{CG} + m_{26})\dot{\psi}^2 = F_{x,R} + \sum F_{x,ext}$$

$$(m + m_{22})\dot{v}_y + (m + m_{11})v_x\dot{\psi} + (mx_{CG} + m_{26})\ddot{\psi} = F_{y,R} + \sum F_{y,ext} \qquad (5)$$

$$(I_Z + m_{66})\ddot{\psi} + (mx_{CG} + m_{26})\left(\dot{v}_y + v_x\dot{\psi}\right) - (m_{11} - m_{22})v_x v_y = M_{z,R} + \sum M_{z,ext}$$

A definição dos demais esforços, tais como as forças viscosas, de onda e vento não são discutidas uma vez que o foco são as forças de interação com as margens e outros navios. Nesse trabalho, as considerações dos efeitos de interação navio-margem e navio-navio são feitas conforme a proposta de uma força externa seguindo a modelagem modular, aplicadas no modelo do simulador de manobras apresentado por Tannuri et al. (2014).

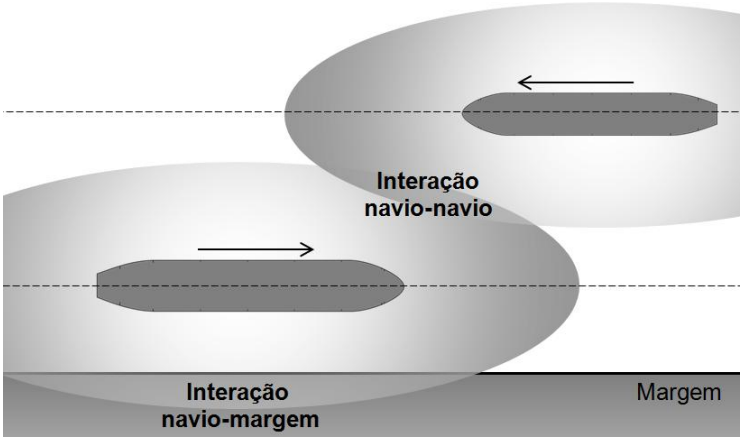
$$\sum F_{ext} = \sum F_{ex}^{atuais} + F_{navio-margem} + F_{navio-navio} \tag{6}$$

As massas adicionais consideradas nos testes são para profundidades médias da área de manobra, e não consideram as mudanças decorrentes da batimetria e alterações devido às margens e proximidade com outros navios, por simplificação. Essa mesma hipótese simplificadora é adotada nos estudos de Lee et al. (2001) para a interação com a margem e Lee e Lee (2007) para interação entre navios.

3.2. Interação entre navios e meio

Um corpo, ao se movimentar em um meio fluido, gera uma alteração no campo de pressões ao seu redor, de modo que o fluido se desloca conforme o deslocamento do corpo. Assim, a interação entre um corpo e o meio pode ser expressa como a interferência de outros obstáculos do meio de qualquer natureza, fixos ou móveis, no campo de pressões gerado pelo movimento do corpo, como apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Simplificação da influência no domínio de pressões de um navio devido à interação com a margem e outro navio.



Assim, a origem do efeito se deve à alteração nas forças e momentos hidrodinâmicos agindo sobre o casco do corpo devido à alteração do campo de pressões. Isso leva a uma alteração no comportamento do navio podendo gerar

problemas graves em algumas ocasiões, do ponto de vista prático, tais como rompimento de cabos de navios atracados e/ou colisões.

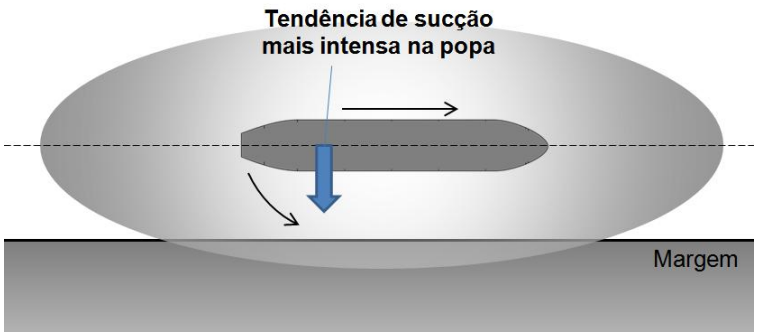
Na prática, o fator de influência depende de outros parâmetros além da distância, conforme discutido no capítulo 2 e também serão levados em consideração.

Desse modo, esta seção apresenta uma revisão sobre alguns dos principais fenômenos relacionados à interação de navios com o meio, especificamente, da interação navio-margem e navio-navio, para identificar as principais características qualitativas dos fenômenos.

3.2.1. Efeitos de interação com margem

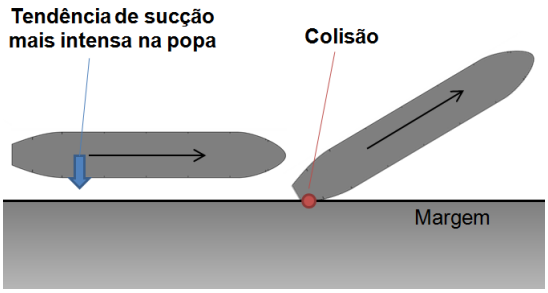
Ao navegar paralelamente à margem, o navio interage com ela gerando um campo de baixa pressão e criando uma tendência de aproximação entre a embarcação e a margem. Além disso, devido à assimetria do casco, um momento é gerado devido a esta força de atração ser mais intensa na popa, conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Efeitos da interação entre navio e margem.



Considerando o movimento subsequente e sem influências de leme e propulsores, uma tendência em baixas velocidades seria similar à apresentada na Figura 16, gerando uma guinada em direção oposta à margem e com risco de colisão da popa (a depender da distância com esta).

Figura 16 – Risco da interação de uma embarcação navegando próxima a margem.

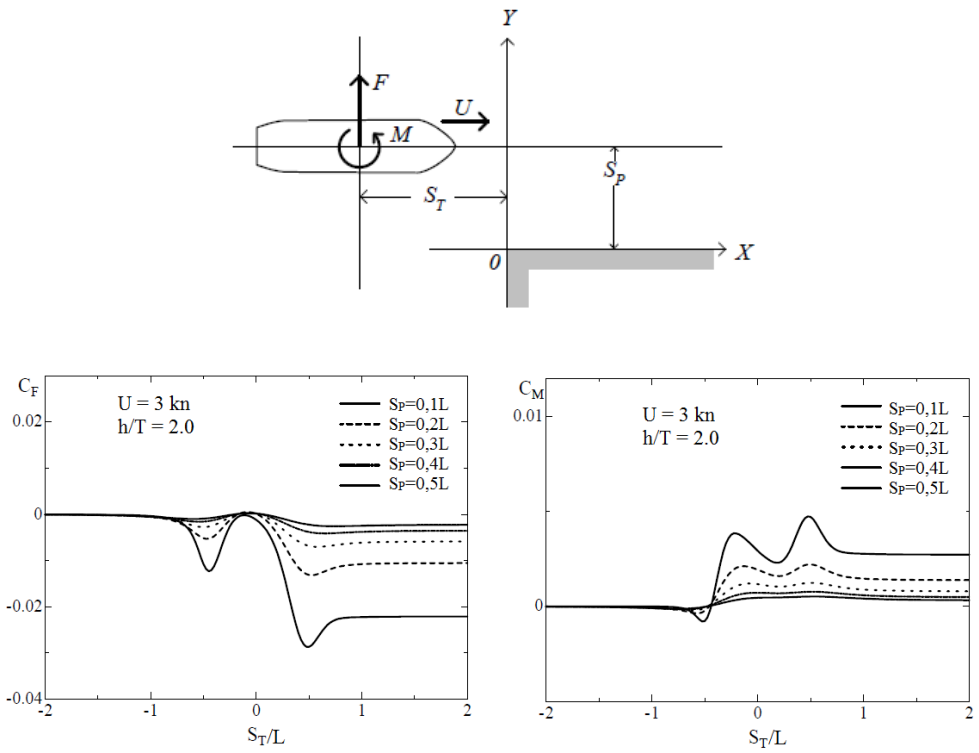


Esse efeito é também chamado de “efeito de margem” (*bank effect*), e consiste na interação entre navio e uma margem paralela, para um navio navegando paralelamente, sem considerar obstáculos na direção do movimento, segundo a definição proposta por Lataire (2014).

Esse trabalho não considera o “efeito colchão”, no qual uma força é gerada para um movimento lateral na direção da margem. Outro efeito desconsiderado são os efeitos de memória hidrodinâmica, relevantes em casos com grandes acelerações e desacelerações.

De modo a verificar o padrão gerado pelo movimento paralelo, estudos como os de Lee e Lee (2008) citados no Capítulo 2 mostram as resposta da força de *sway* e momento de *yaw* no navio devido à margem conforme a configuração apresentada na Figura 17.

Figura 17 – Resposta do navio ao efeito de aproximação de um ressalto na margem



Fonte: LEE & LEE, 2008.

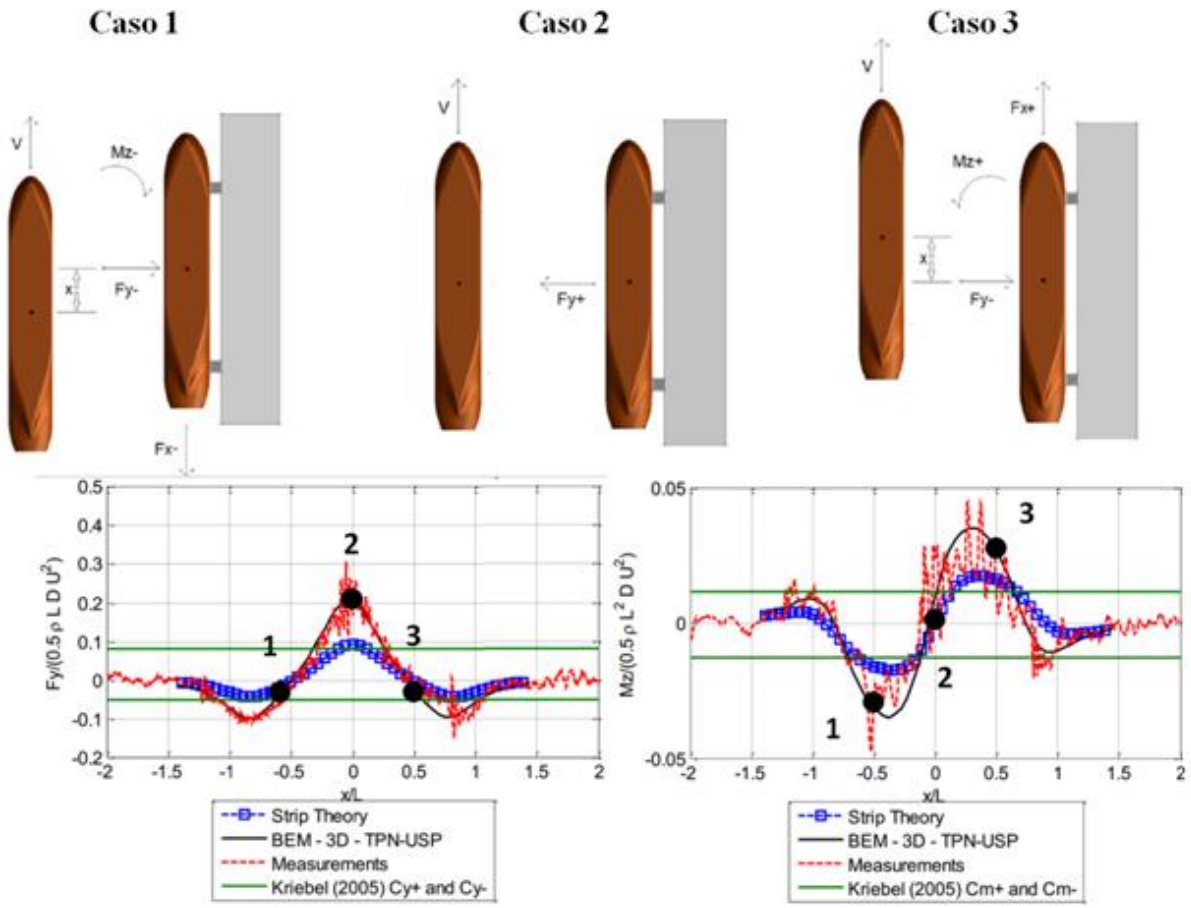
Conforme apresentado na Figura 17, podemos observar que o efeito gerado em um navio navegando próximo a uma margem vertical está diretamente associado a uma força de sucção em direção à margem, mais um momento gerando uma tendência de afastar a proa do navio.

3.2.2. Efeitos de interação com outros navios

A interação entre navios é semelhante à interação com a margem, oriunda do efeito da interferência nos campos de pressão de ambos os navios. Desse modo, essas situações ocorrem em casos como os de ultrapassagens ou cruzamentos de outros navios navegando a pequenas distâncias, ou em passagens próximas de navios inicialmente estacionários. Estes casos são encontrados em alguns portos, como no caso do porto de Santos, em que passagens próximas de navios ancorados são comuns na navegação dentro do canal. No presente trabalho, são considerados apenas os casos de ultrapassagem para navios paralelos com um dos navios ancorados.

Conforme pode ser observado na Figura 18, os esforços em um navio atracado associados à ultrapassagem realizada por outro navio são inicialmente uma força repulsiva e um momento de aproximação da popa. Quando seus centros (meia-nau) estão alinhados horizontalmente, a força, que se tornou de sucção alcança seu pico e o momento é relativamente baixo (aproximadamente nulo). Em seguida, a força de sucção se torna uma força de repulsão novamente e momento ocorre no sentido de aproximação da proa. Esses três casos são enfatizados em grande parte dos estudos por ser a tendência primária do efeito das forças sobre o navio, como no caso do trabalho de Watai et al. (2013) apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Exemplo de forças de interação atuantes sobre um navio atracado em escala reduzida, para um modelo com T=0,130m, U=0,364m/s e a distância de separação 0,645m



Fonte: WATAI ET AL., 2013.

Desse modo, existe sempre uma tendência de aproximação entre navios, sendo a tendência inicial e final de aproximação entre a proa e a popa mais próximas umas das outras devido à atuação principal do momento, e no meio da

ultrapassagem a tendência de aproximação devida principalmente à força de sucção presente em ambos os corpos.

3.2.3. Método dos Painéis de Rankine

Como apresentado no Capítulo 2, o método de Rankine é um método numérico que pode ser utilizado para prever efeitos de interação entre navio e o meio baseado no escoamento potencial ao redor dos corpos. Uma vez que os dados de forças e momentos utilizados no presente trabalho provêm desse método, é feita nesta seção uma breve revisão sobre esse método, incluindo considerações relevantes para o entendimento das hipóteses simplificadoras implícitas no problema.

O método de Painéis com fontes de Rankine, uma vertente do Método dos Elementos de Contorno, foi escolhido para calcular os efeitos de interação entre navios e entre navio margem, conforme aplicado por Korsmeyer et al (1993), Pinkster (2004), Xiang e Faltinsen (2010) e Bunnik e Toxopeus (2011).

Como hipóteses simplificadoras do problema adotam-se o escoamento ao redor do casco do navio como incompressível e irrotacional e o fluido como invíscido e homogêneo. Os efeitos de superfície-livre para velocidades moderadas ($\mathrm{Fr} \leq 0{,}15$) podem ser desprezados, conforme apresentado por Pinkster (2004) e os efeitos viscosos são desprezíveis para ângulos de deriva pequenos, conforme mostrado por Bunnik e Toxopeus (2011). Mediante essas hipóteses, o campo de velocidade pode ser descrito através de uma função potencial de φ e a conservação de massa pode ser convertida na equação de Laplace (7).

$$\nabla^2 \varphi = 0 \tag{7}$$

As equações de conservação podem ser então resolvidas através do balanço de fluxo nas fronteiras através da aplicação da segunda identidade de Green (Korsmeyer et al, 1993), obtendo uma equação integral de Fredholm de segundo tipo.

As condições de contorno adotadas são de compatibilidade de velocidades (impermeabilidade), conforme mostrado nas equações (8) e (9)

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \vec{U} \cdot \vec{n}, \qquad nas\ superfícies\ dos\ corpos \tag{8}$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \qquad na\ superfície - livre \tag{9}$$

onde $\vec{U}$ é a velocidade da superfície sólida ($\|\vec{U}\| = 0$ para parede, fundo e casco de navio atracado e $\|\vec{U}\| = 1\ m/s$ para o casco do navio passante) e $\vec{n}$ é o vetor normal ao painel referente a superfície molhada dos navios e paredes e fundos. A impermeabilidade da superfície-livre é aplicada assumindo a hipótese adicional de baixo número de Froude e, portanto, pequenas deformações desta. Detalhes adicionais sobre o efeito da superfície-livre nesse problema podem ser vistos em Pinkster (2004).

Desse modo, considerando as hipóteses que levam a um escoamento potencial, o método dos painéis é aplicado utilizando a Segunda Identidade de Green para obter a equação integral apresentada em (10), assumindo que os pontos de colocação estejam sempre em regiões regulares do corpo (garantindo resíduo 2π):

$$\oiint_{\partial V - P} \left[\left(\frac{1}{r_{PQ}} \right) \frac{\partial \varphi_Q}{\partial n_Q} - \varphi_Q \frac{\partial}{\partial n_Q} \left(\frac{1}{r_{PQ}} \right) \right] d\partial V_Q = 2\pi \varphi_P, \quad P \in \partial V \tag{10}$$

onde P é o ponto de campo, local em que a equação integral será resolvida, isto é, onde a velocidade ou o potencial será calculado, e Q é o ponto fonte, que contém a distribuição de fontes. A fonte de Rankine $\frac{1}{r_{PQ}}$ é utilizada como função de Green nesse trabalho e ∂V são as superfícies dos corpos (navio, parede, fundo etc.). Essa equação integral é resolvida discretizando o domínio em diversos painéis, conforme mostrado em (11), assumindo o potencial como constante em cada painel.

$$2\pi \varphi_i^t + \sum_{j=1}^{N} \varphi_j^t \iint_{\substack{Pj \\ j \neq i}} \frac{\partial}{\partial n_j} \left(\frac{1}{r_{ij}} \right) dS_j = \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial \varphi_j^t}{\partial n_j} \iint_{\substack{Pj \\ j \neq i}} \left(\frac{1}{r_{ij}} \right) dS_j, \quad i = 1,2,3, \dots N \tag{11}$$

A aplicação da equação integral nos pontos de colocação dos painéis que compõem os corpos (no método desenvolvido sendo o centro geométrico dos painéis) produz um sistema linear determinado. A solução do sistema linear fornece o potencial em cada painel para cada passo de tempo da simulação, permitindo o cálculo da pressão hidrodinâmica, que integrada fornece os esforços atuantes, como mostrado em (12) e (13).

$$\vec{F}^{t+\frac{\Delta t}{2}} = -\rho \sum_{j \in N_{nav}} \frac{\left(\varphi_j^{t+\Delta t} - \varphi_j^{t}\right)}{\Delta t} \vec{n}_j A_j \tag{12}$$

$$\vec{M}_o{}^{t+\frac{\Delta t}{2}} = -\rho \sum_{j \in N_{nav}} \frac{\left(\varphi_j^{t+\Delta t} - \varphi_j^{t}\right)}{\Delta t} \vec{n}_j \wedge \vec{r}_{jo} A_j \tag{13}$$

em que N_{nav} é o conjunto de painéis pertencentes aos navios e A e O são os polos onde os momentos são calculados, A_j é a área de cada painel, Δt o passo de tempo e $\vec{n}_j$ o vetor normal (Watai et al., 2011).

4. INTERAÇÃO ENTRE NAVIOS

Este capítulo destina-se a explicar o procedimento básico para o cálculo das forças hidrodinâmicas de interação entre navios, sem a influência de paredes externas (margem), para aplicação em simulador de manobras.

A implementação dos efeitos de interação entre navios é feita a partir de resultados de alguns casos selecionados e obtidos da aplicação do BEM, associados a regressões matemáticas para definir as forças em função das variáveis do problema.

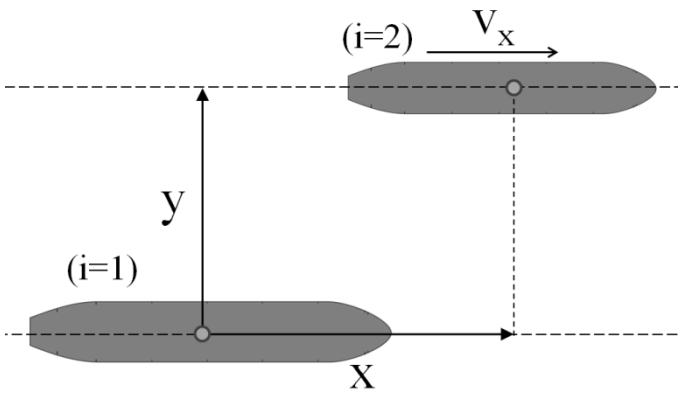
As hipóteses assumidas no presente estudo são:

- Um dos navios possui velocidade nula (navio atracado);
- Ambos os navios possuem dimensões (comprimento e boca) idênticas;
- As forças e momento de interação variam quadraticamente com a velocidade do navio passante.

Caso tipo: Navio passante paralelo

O caso fundamental de estudo corresponde a um navio passante, com aproamento paralelo em relação ao navio atracado, e com a velocidade alinhada na direção proa-popa (sem velocidade de deriva), conforme descrito no capítulo 3. A Figura 19 ilustra a configuração básica do caso.

Figura 19 – Interação entre navios paralelos



Nesse fenômeno, os esforços atuantes considerados preponderantes são as forças de *surge* ($F_{x,i}$) na direção x e de *sway* ($F_{y,i}$) na direção y, e o momento de *yaw*, em torno do eixo z ($M_{z,i}$) para cada navio, atracado ($i = 1$) e passante ($i = 2$).

Os parâmetros e as variáveis do problema são: comprimento dos navios (L), boca (B), calado do navio atracado (T_1), calado do navio passante (T_2), calado médio ($\bar{T} = (T_1 + T_2)/2$), distância longitudinal (x), distância transversal (y), velocidade de avanço (U), profundidade local média (h). Os adimensionais de saída sempre são referentes aos esforços $F_{x,i}, F_{y,i}, M_{z,i}$. A Tabela 1 resume os principais parâmetros e variáveis associadas ao problema.

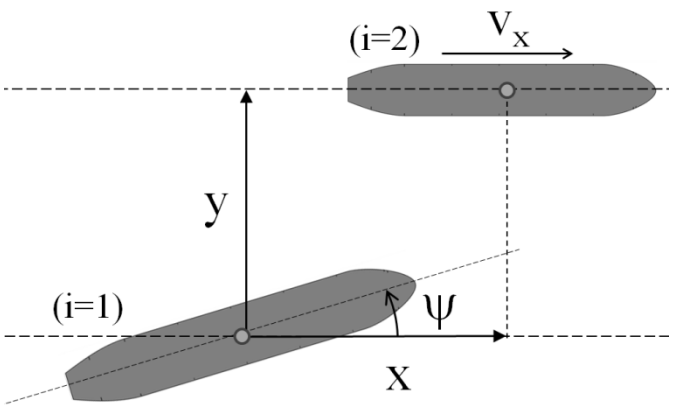
Tabela 1 – Dados do caso "Interação entre navios paralelos".

	Valores Dimensionais	Adimensionais π
Parâmetros de entrada	$L, B, T_1, T_2, x, y, U, h$	$\frac{x}{L}, \frac{y}{L}, \frac{T_1}{B}, \frac{T_2}{B}, \frac{h}{\bar{T}}$
Variáveis de saída	$F_{x,i}, F_{y,i}, M_{z,i}$	$C_{F_x}, C_{F_y}, C_{M_z}$

Caso de Verificação: Navio passante com ângulo

Apesar da validação do modelo para aplicação em simuladores de manobras não ser escopo do trabalho, é necessário realizar uma verificação do modelo para avaliar sua coerência. Desse modo, a verificação é realizada para casos com aproamento relativo entre navios não nulo, modificando o ângulo de aproamento do navio ancorado (estacionário), como apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Interação entre navios não paralelos



Apesar do BEM apresentar erros grandes para ângulos maiores que 15°, conforme exposto por Bunnik e Toxopeus (2011), a proposta inicial de verificação é com relação ao modelo base (BEM), sendo necessário avaliar o modelo, comparando com um método válido para definir o limite de aplicação.

4.1. Modelagem matemática da interação entre navios

A modelagem desenvolvida para esse tipo de interação consiste, como já mencionado, em utilizarem-se os resultados de esforços hidrodinâmicos dos casos tipo obtidos pelo BEM e definir funções para realizar interpolações/extrapolações com baixo consumo computacional em tempo real (SILVA; TANNURI; RUGGERI, 2015).

Para tanto, um modelo base foi considerado no cômputo dos esforços (o índice i que define o navio passará a ser omitido):

$$F_{X_i} = C_{F_{X_i}}\left(\frac{x}{L}, \frac{y}{L}, \frac{h}{\overline{T}}, \frac{T_1}{B}, \frac{T_2}{B}\right) . \frac{1}{2}\rho U_{rel}^2 L^2 \tag{14}$$

$$F_{Y_i} = C_{F_{Y_i}}\left(\frac{x}{L}, \frac{y}{L}, \frac{h}{\overline{T}}, \frac{T_1}{B}, \frac{T_2}{B}\right) . \frac{1}{2}\rho U_{rel}^2 L^2 \tag{15}$$

$$M_{Z_i} = C_{M_{Z_i}}\left(\frac{x}{L}, \frac{y}{L}, \frac{h}{\overline{T}}, \frac{T_1}{B}, \frac{T_2}{B}\right) . \frac{1}{2}\rho U_{rel}^2 L^3 \tag{16}$$

Como mencionado, os navios testados são idênticos e suas características são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados dos navios testados para a interação entre navios.

Dados dos navios	Suezmax (base)
Calado (T) [m]	15,5 (carregado) 10,0 (lastro)
Comprimento total (L) [m]	279
Boca (B) [m]	48

As forças de interação foram calculadas pelo BEM para 48 casos variando-se os parâmetros de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros usados para a simulação do BEM.

T_1(m)	T_2 (m)	h (m)	y/L
10,00	10,00	17,05	0,50
15,50	15,50	19,38	0,75
		21,70	1,00
			1,50

O resultado para $U_{rel} = 1\ m/s$; $y/L = 0{,}5$; $\frac{h}{T} = 1{,}1\ (h = 17{,}05m)$; $T_1 = T_2 = 15.5m$ é apresentado na Figura 21 para o navio atracado e na Figura 22 para o navio passante, em função da distância de passagem x/L. O formato das curvas para diferentes combinações de parâmetros é semelhante, variando-se os valores das forças e momento máximo de interação. Assim, foram simulados 48 casos, apresentados na Tabela 4 (mais detalhes dos esforços de pico no Apêndice A). Pode-se verificar que os esforços no navio atracado são no mínimo uma ordem de grandeza superior aos atuantes no navio em movimento.

Figura 21 – Padrão de esforços adotado para dados base do navio atracado (y/L=0,5; h/T=1,1; T_1=T_2 =15,5m)

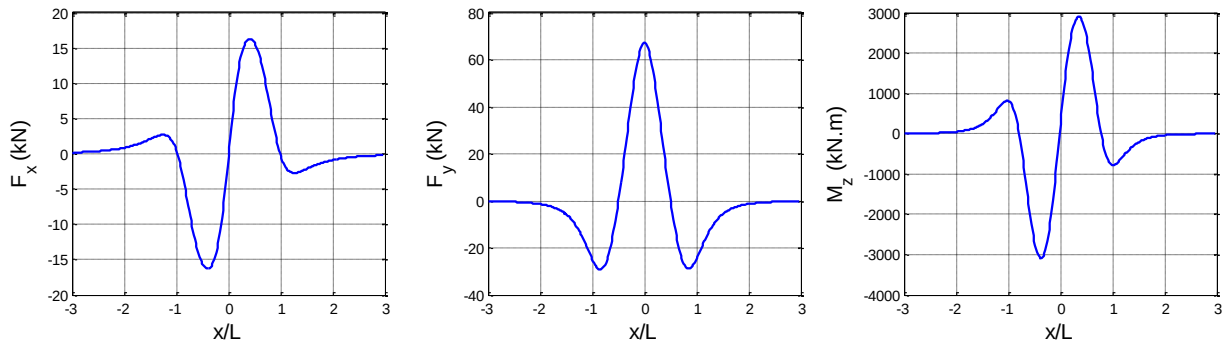


Figura 22 – Padrão de esforços adotado para dados base do navio passante (y/L=0,5; h/T=1,1; T_1=T_2 =15,5m)

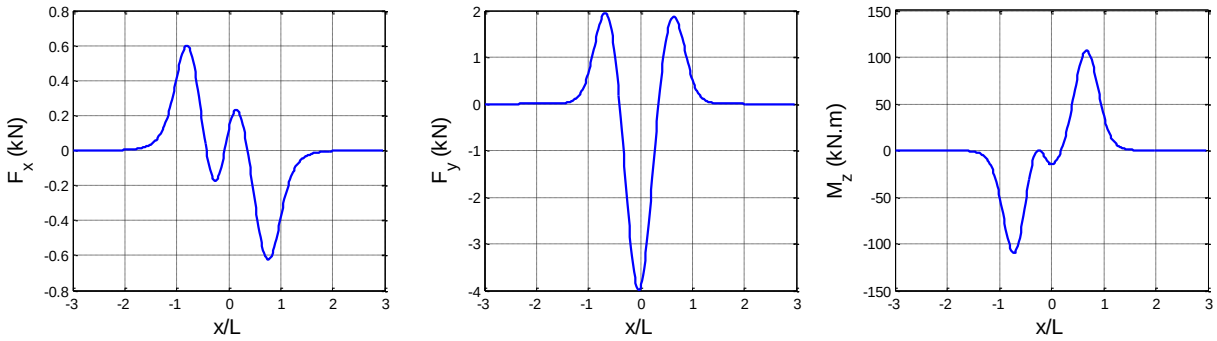


Tabela 4 – Casos simulados pelo BEM

Caso	h/T_1	h/T_2	h (m)	y/L
1	1,10	1,10	17,05	0,50
2	1,10	1,10	17,05	0,75
3	1,10	1,10	17,05	1,00
4	1,10	1,10	17,05	1,50
5	1,25	1,25	19,38	0,50
6	1,25	1,25	19,38	0,75
7	1,25	1,25	19,38	1,00
8	1,25	1,25	19,38	1,50
9	1,40	1,40	21,70	0,50
10	1,40	1,40	21,70	0,75
11	1,40	1,40	21,70	1,00
12	1,40	1,40	21,70	1,50
13	1,10	1,71	17,05	0,50
14	1,10	1,71	17,05	0,75
15	1,10	1,71	17,05	1,00
16	1,10	1,71	17,05	1,50
17	1,25	1,94	19,38	0,50
18	1,25	1,94	19,38	0,75
19	1,25	1,94	19,38	1,00
20	1,25	1,94	19,38	1,50
21	1,40	2,17	21,70	0,50
22	1,40	2,17	21,70	0,75
23	1,40	2,17	21,70	1,00
24	1,40	2,17	21,70	1,50

Caso	h/T_1	h/T_2	h (m)	y/L
25	1,71	1,10	17,05	0,50
26	1,71	1,10	17,05	0,75
27	1,71	1,10	17,05	1,00
28	1,71	1,10	17,05	1,50
29	1,94	1,25	19,38	0,50
30	1,94	1,25	19,38	0,75
31	1,94	1,25	19,38	1,00
32	1,94	1,25	19,38	1,50
33	2,17	1,40	21,70	0,50
34	2,17	1,40	21,70	0,75
35	2,17	1,40	21,70	1,00
36	2,17	1,40	21,70	1,50
37	1,71	1,71	17,05	0,50
38	1,71	1,71	17,05	0,75
39	1,71	1,71	17,05	1,00
40	1,71	1,71	17,05	1,50
41	1,94	1,94	19,38	0,50
42	1,94	1,94	19,38	0,75
43	1,94	1,94	19,38	1,00
44	1,94	1,94	19,38	1,50
45	2,17	2,17	21,70	0,50
46	2,17	2,17	21,70	0,75
47	2,17	2,17	21,70	1,00
48	2,17	2,17	21,70	1,50

Desse modo, os coeficientes adimensionais de forças e momentos foram divididos em duas funções, assumindo como hipótese a independência de certas variáveis. A primeira é dependente apenas de x/L, e é referente ao formato da curva em função desta variável ($C_{F_X}^{curva}$). A segunda função define o pico das forças em função dos demais parâmetros ($C_{F_X}^{pico}$). A formulação adotada é expressa por:

$$C_{F_X}\left(\frac{x}{L},\frac{y}{L},\frac{h}{\overline{T}},\frac{T_1}{B},\frac{T_2}{B}\right) = C_{F_X}^{curva}\left(\frac{x_{eq}}{L}\right).C_{F_X}^{pico}\left(\frac{y_{eq}}{L},\frac{h}{\overline{T}},\frac{T_1}{B},\frac{T_2}{B}\right) \quad (17)$$

$$C_{F_Y}\left(\frac{x}{L},\frac{y}{L},\frac{h}{\overline{T}},\frac{T_1}{B},\frac{T_2}{B}\right) = C_{F_Y}^{curva}\left(\frac{x_{eq}}{L}\right).C_{F_Y}^{pico}\left(\frac{y_{eq}}{L},\frac{h}{\overline{T}},\frac{T_1}{B},\frac{T_2}{B}\right) \quad (18)$$

$$C_{M_Z}\left(\frac{x}{L},\frac{y}{L},\frac{h}{\bar{T}},\frac{T_1}{B},\frac{T_2}{B}\right)=C_{M_Z}^{curva}\left(\frac{x_{eq}}{L}\right).C_{M_Z}^{pico}\left(\frac{y_{eq}}{L},\frac{h}{\bar{T}},\frac{T_1}{B},\frac{T_2}{B}\right) \quad (19)$$

As variáveis x_{eq}/L e y_{eq}/L são variáveis equivalentes das distâncias x/L e y/L para corrigir, respectivamente, a forma das curvas com a distância e o aproamento relativo entre navios. Ambos são descritos com maiores detalhes nas próximas seções.

4.1.1. Função referente ao coeficiente de curva adimensional

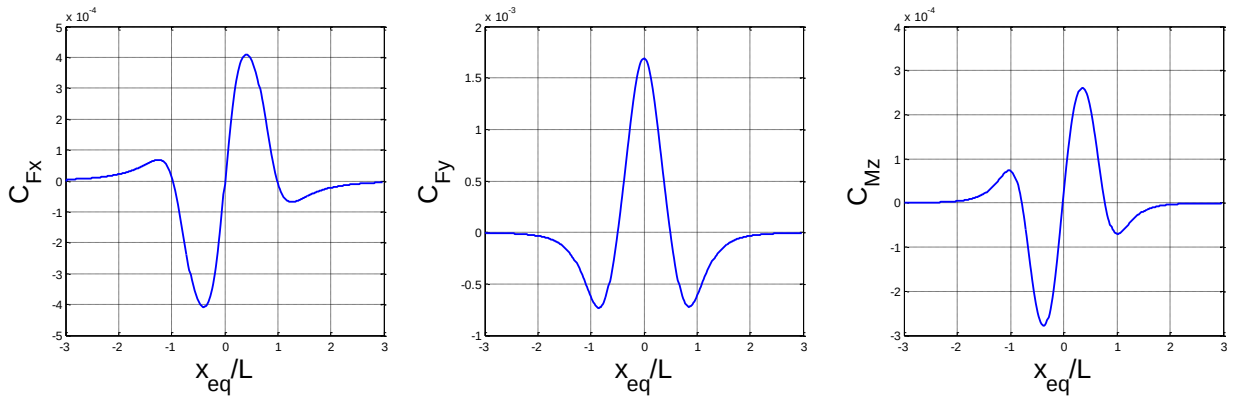
Uma vez que as formas das curvas de forças e momento em função de x/L possuem um padrão típico para todos os casos analisados, escolheu-se o caso 1 (que possui as forças mais intensas) como caso base. Esse é o caso de referência em que a forma da curva obtida da simulação do BEM é armazenada para usar como base de cálculo para diferentes condições de parâmetros. Assim, as funções $C_{F_X}^{curva}$, $C_{F_Y}^{curva}$ e $C_{M_Z}^{curva}$ são obtidas a partir da normalização deste caso base e são dadas na Figura 23 para o navio atracado.

$$C_{F_X}^{curva}\left(\frac{x_{eq}}{L}\right)=\frac{F_X^{base}\left(\frac{x_{eq}}{L}\right)}{\left(\frac{1}{2}\rho U_{rel}^2 L^2\right)_{base}}=\frac{F_X^{base}\left(\frac{x_{eq}}{L}\right)}{3{,}99\,.\,10^4} \quad (20)$$

$$C_{F_Y}^{curva}\left(\frac{x_{eq}}{L}\right)=\frac{F_Y^{base}\left(\frac{x_{eq}}{L}\right)}{\left(\frac{1}{2}\rho U_{rel}^2 L^2\right)_{base}}=\frac{F_Y^{base}\left(\frac{x_{eq}}{L}\right)}{3{,}99\,.\,10^4} \quad (21)$$

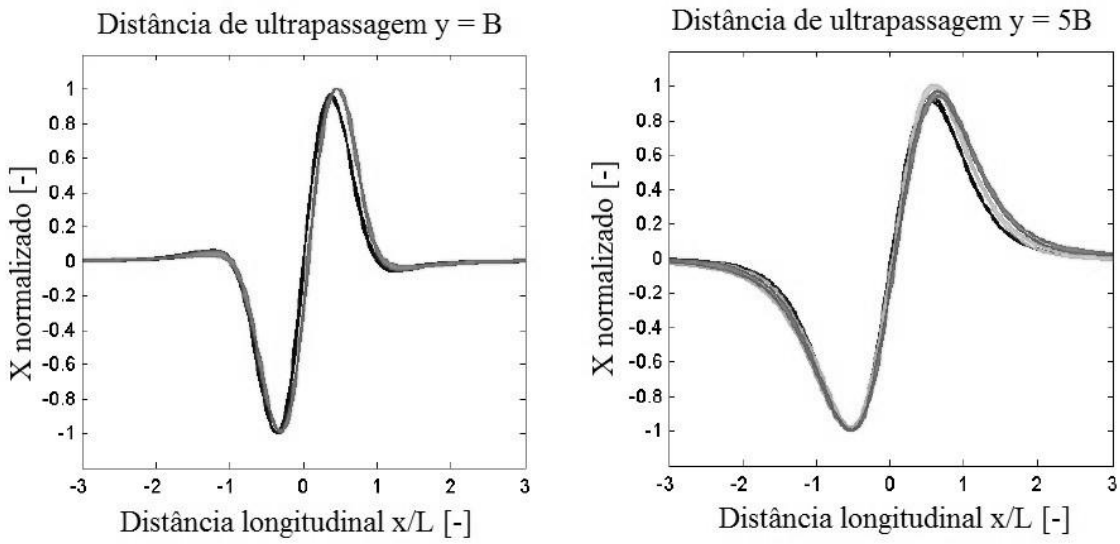
$$C_{M_Z}^{curva}\left(\frac{x_{eq}}{L}\right)=\frac{M_Z^{base}\left(\frac{x_{eq}}{L}\right)}{\left(\frac{1}{2}\rho U_{rel}^2 L^3\right)_{base}}=\frac{M_Z^{base}\left(\frac{x_{eq}}{L}\right)}{1{,}11\,.\,10^7} \quad (22)$$

Figura 23 – Curvas normalizadas do caso base (y/L=0,5; h/T=1,1; T_1= T_2=15,5m)



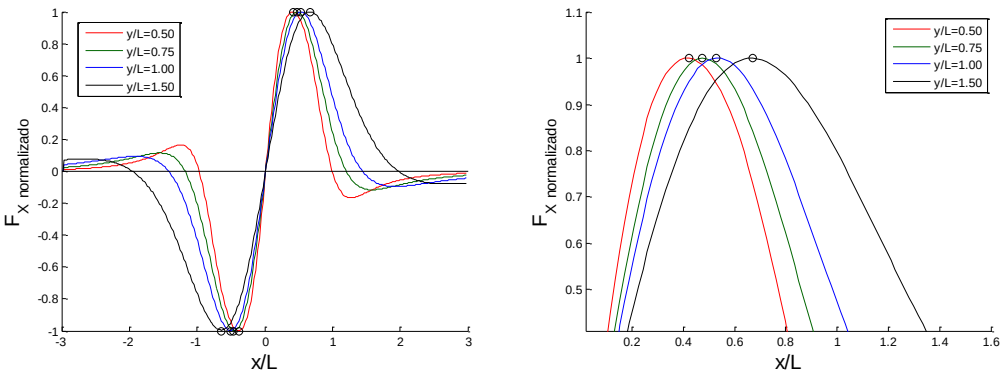
Verificou-se, entretanto, que o formato da curva de variação de força com a distância x/L não é totalmente independente das demais variáveis, contrariando a hipótese adotada inicialmente. A distância lateral relativa (y/L) modifica significativamente o formato destas curvas, “comprimindo” ou “dilatando” as mesmas, tal como apresentado por Talstra & Bliek (2014) (Figura 24) e também obtido numericamente pelo BEM (Figura 25). O trabalho de Talstra & Bliek (2014) prevê essa alteração na curva para diferentes tipos de navio e posicionamento em relação à margem, tanto para um navio atracado em um pier (condição mais próxima da definida nesse trabalho), quanto para um navio em um cais.

Figura 24 – Força de *Surge* normalizada em função da distância (adaptado de Talstra & Bliek, 2014)



Assim, foi proposta a definição da variável equivalente x_{eq}/L, que provém de um ajuste matemático visando melhorar a forma da curva, levando em conta a dependência com a distância transversal y/L. A estimativa desta distância equivalente foi obtida analisando a posição relativa x_{pico}/L dos pontos de máximo e mínimo locais para cada intervalo, conforme apresentado na Figura 25. Estas curvas foram normalizadas pelo valor de pico de cada curva obtida numericamente, para efeito de análise apenas.

Figura 25 – Variação dos picos das curvas (Casos 1, 2, 3 e 4).



Uma vez que o padrão de afastamento da distância de pico x_{pico}/L é aproximadamente linear em relação à distância longitudinal y/L, a função da distância equivalente deve ser tal que a função de deslocamento do ponto seja linear. Desse modo, é possível escrever a função de x_{eq}/L como:

$$\frac{x_{eq}}{L} = \left(\frac{\frac{y_{corr}}{L} + \frac{y_{base}}{L}}{\frac{y_{corr}}{L} + \frac{y}{L}} \right) . \frac{x}{L} \tag{23}$$

Em que y_{corr}/L, é uma constante determinada a partir dos pontos de pico. A constante é a razão entre os coeficientes linear e angular da reta de regressão $x_{pico}/L = f(y/L)$ para os casos 1, 2, 3 e 4, apresentados anteriormente na Tabela 4. No caso, $y_{base}/L = 0{,}5$ e y_{corr}/L depende do esforço em análise, e para o navio atracado, temos:

$$\left(\frac{x_{eq}}{L}\right)_{F_X} = \left(\frac{1{,}606}{1{,}106 + \frac{y}{L}}\right) \cdot \frac{x}{L} \tag{24}$$

$$\left(\frac{x_{eq}}{L}\right)_{F_Y} = \left(\frac{1{,}297}{0{,}797 + \frac{y}{L}}\right) \cdot \frac{x}{L} \tag{25}$$

$$\left(\frac{x_{eq}}{L}\right)_{M_Z} = \left(\frac{1{,}947}{1{,}447 + \frac{y}{L}}\right) \cdot \frac{x}{L} \tag{26}$$

E para o navio passante:

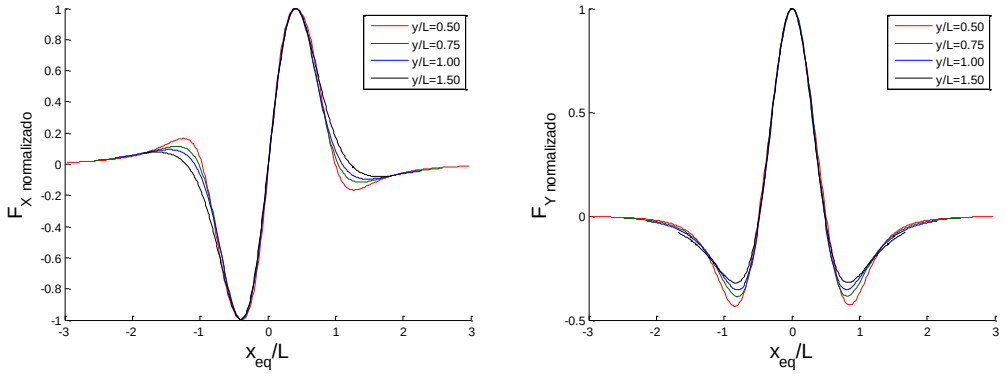
$$\left(\frac{x_{eq}}{L}\right)_{F_X} = \left(\frac{1{,}472}{0{,}972 + \frac{y}{L}}\right) \cdot \frac{x}{L} \tag{27}$$

$$\left(\frac{x_{eq}}{L}\right)_{F_Y} = \left(\frac{1{,}750}{1{,}250 + \frac{y}{L}}\right) \cdot \frac{x}{L} \tag{28}$$

$$\left(\frac{x_{eq}}{L}\right)_{M_Z} = \left(\frac{1{,}528}{1{,}028 + \frac{y}{L}}\right) \cdot \frac{x}{L} \tag{29}$$

É possível verificar a correção gerada pelo modelo proposto de x_{eq}/L, como mostra a Figura 26, para os casos 1, 2, 3 e 4 em relação ao navio atracado.

Figura 26 – Efeito corrigido da distância relativa nas curvas de forças F_X e F_Y (Casos 1, 2, 3 e 4)



4.1.2. Função referente aos picos de forças e momentos

Para selecionar os parâmetros a serem utilizados no modelo matemático que define o pico de força ou momento, foram analisados os modelos propostos em alguns trabalhos, sendo alguns empíricos, como os trabalhos de Wang (1975) e Flory (2002), outros semi-empiricos, como o caso de Seelig (2001), Kriebel (2005), Varyani & Vantorre (2006) e Lataire et al (2012), e numéricos, com validação experimental, como o caso de Swiegers (2011).

Os parâmetros comumente considerados para os modelos são funções da distância lateral relativa y/L e da profundidade relativa h/T. Em alguns casos também é considerado o efeito do calado adimensional T/B. A Tabela 5 apresenta um resumo dos modelos em função dos parâmetros adotados para o problema. Pode-se ver que em geral adotam-se dependências do tipo exponencial, potência ou mista com outras funções matemáticas.

Tabela 5 – Resumo de modelos matemáticos adotados e seus respectivos parâmetros para os esforços de pico atuantes em um navio atracado devido aos efeitos da interação entre navios.

	y/L ou y/B			h/T			T/B		
	F_X	F_Y	M_Z	F_X	F_Y	M_Z	F_X	F_Y	M_Z
Referência	**Tipo**	**Tipo**	**Tipo**	**Tipo**	**Tipo**	**Tipo**	**Tipo**	**Tipo**	**Tipo**
Wang (1975)-Kriebel	$e^{k\frac{y}{B}}$			$e^{k\frac{h}{T}}$			-		
Seelig (2001)	$e^{k\frac{y}{B}}$			$\left(\frac{h}{T}\right)^k$			-	$\left(\frac{T}{B}\right)^k$	
Flory (2002)	misto			$e^{k\frac{h}{T}}$			-		
Kriebel (2005)	$e^{k\frac{y}{L}}$			$e^{k\frac{T}{h}}$			-		
Varyani (2006)	$\left(\frac{y}{L}\right)^k$			$\left(\frac{h}{T}\right)^k$			-		
Swiegers (2011)	$e^{k\frac{y}{L}}$			$\left(\frac{h}{T}\right)^k$			-		
Lataire et al (2012)	$\left(\frac{y}{B}\right)^k$			-			$\left(\frac{T}{B}\right)^k$		

Pode-se verificar que a função exponencial - no caso da profundidade relativa (h/T) - utiliza o fator inverso T/h seguindo as referências de Kriebel (2005) para não gerar uma força nula na extrapolação para um modelo de águas profundas.

O presente trabalho adota os mesmos parâmetros citados na Tabela 5. A obtenção dos coeficientes de cada função é realizada a partir do método dos mínimos quadrados, alterando-se um dos parâmetros enquanto os demais permanecem fixos em relação ao caso base (caso 1). Os casos utilizados para a realização das regressões são apresentados na Tabela 6, selecionados dentre os diversos casos apresentados previamente na Tabela 4.

Tabela 6 – Casos utilizados para obtenção dos coeficientes de cada parâmetro do modelo.

T_1 (m)	T_2 (m)	h (m)	y/L
Caso 1	Caso 1	Caso 1	Caso 1
Caso 25	Caso 13	Caso 5	Caso 2
		Caso 9	Caso 3
			Caso 4

Como hipótese, seguindo o padrão adotado nos trabalhos anteriores citados na Tabela 5, os parâmetros do problema são independentes entre si. Uma vez que o calado costuma ser apresentado como uma função de potência, será adotada esta como função de T/B nesse trabalho, tanto para o navio passante como para o atracado. Desse modo, a função dos picos pode ser descrita como:

$$C_{F_X}^{pico}\left(\frac{y_{eq}}{L},\frac{h}{\overline{T}},\frac{T_1}{B},\frac{T_2}{B}\right)=K_{F_x}.f_{F_X}\left(\frac{h}{\overline{T}},\frac{y_{eq}}{L}\right).\left(\frac{T_1}{B}\right)^{k_{3x}}\left(\frac{T_2}{B}\right)^{k_{4x}} \tag{30}$$

$$C_{F_Y}^{pico}\left(\frac{y_{eq}}{L},\frac{h}{\overline{T}},\frac{T_1}{B},\frac{T_2}{B}\right)=K_{F_y}.f_{F_Y}\left(\frac{h}{\overline{T}},\frac{y_{eq}}{L}\right).\left(\frac{T_1}{B}\right)^{k_{3y}}\left(\frac{T_2}{B}\right)^{k_{4y}} \tag{31}$$

$$C_{M_Z}^{pico}\left(\frac{y_{eq}}{L},\frac{h}{\overline{T}},\frac{T_1}{B},\frac{T_2}{B}\right)=K_{M_z}.f_{M_Z}\left(\frac{h}{\overline{T}},\frac{y_{eq}}{L}\right).\left(\frac{T_1}{B}\right)^{k_{3z}}\left(\frac{T_2}{B}\right)^{k_{4z}} \tag{32}$$

Para selecionar as demais funções f para o modelo matemático a ser adotado, foi analisado o erro médio de cada modelo em relação aos 48 casos calculados pelo BEM. Os coeficientes k dos expoentes foram determinados por modelos de regressão. O erro (e) de cada caso foi calculado como apresentado na equação (33).

$$e(F)=\left|\frac{F_{modelo}^{pico}-F_{Rankine}^{pico}}{F_{Rankine}^{pico}}\right| \tag{33}$$

Em que F é uma variável referente a uma força (F_X ou F_Y) ou momento (M_Z). Desse modo, o erro médio foi determinado pela média de todos os erros.

$$\bar{E}(F) = \sum_{i=1}^{48} e_i(F) \tag{34}$$

Através da comparação dos máximos dos valores absolutos de cada função, obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Erro médio dos picos para alguns modelos propostos, para o navio atracado.

Modelo estudado	$\bar{E}(F_X)$	$\bar{E}(F_Y)$	$\bar{E}(M_Z)$
$f_F\left(\frac{h}{T},\frac{y}{L}\right) = e^{k_1\frac{\bar{T}}{h}}.e^{k_2\frac{y}{L}}$	10,15%	15,30%	14,24 %
$f_F\left(\frac{h}{T},\frac{y}{L}\right) = \left(\frac{h}{\bar{T}}\right)^{k_1}.e^{k_2\frac{y}{L}}$	10,12%	17,05%	15,74%
$f_F\left(\frac{h}{T},\frac{y}{L}\right) = e^{k_1\frac{\bar{T}}{h}}.\left(\frac{y}{L}\right)^{k_2}$	12,43%	24,20%	25,24%
$f_F\left(\frac{h}{T},\frac{y}{L}\right) = \left(\frac{h}{\bar{T}}\right)^{k_1}.\left(\frac{y}{L}\right)^{k_2}$	12,89%	25,85%	26,72%

O mesmo procedimento foi realizado para o navio passante, e os resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Erro médio dos picos para alguns modelos propostos, para o navio passante.

Modelo estudado	$\bar{E}(F_X)$	$\bar{E}(F_Y)$	$\bar{E}(M_Z)$
$f_F\left(\frac{h}{T},\frac{y}{L}\right) = e^{k_1\frac{\bar{T}}{h}}.e^{k_2\frac{y}{L}}$	28,07%	32,33%	33,39%
$f_F\left(\frac{h}{T},\frac{y}{L}\right) = \left(\frac{h}{\bar{T}}\right)^{k_1}.e^{k_2\frac{y}{L}}$	28,99%	35,70%	35,46%
$f_F\left(\frac{h}{T},\frac{y}{L}\right) = e^{k_1\frac{\bar{T}}{h}}.\left(\frac{y}{L}\right)^{k_2}$	30,79%	43,06%	39,73%
$f_F\left(\frac{h}{T},\frac{y}{L}\right) = \left(\frac{h}{\bar{T}}\right)^{k_1}.\left(\frac{y}{L}\right)^{k_2}$	32,57%	45,23%	41,81%

Visto o resultado da Tabela 7 e Tabela 8, foi escolhida a primeira função, que gera o menor erro médio, de modo que os coeficientes de força e momento são expressos por:

$$C_{F_X}^{pico}\left(\frac{y_{eq}}{L},\frac{h}{\bar{T}},\frac{T_1}{B},\frac{T_2}{B}\right)=K_{F_x}e^{k_{1x}\frac{\bar{T}}{h}}.e^{k_{2x}\frac{y}{L}}\left(\frac{T_1}{B}\right)^{k_{3x}}\left(\frac{T_2}{B}\right)^{k_{4x}} \quad (35)$$

$$C_{F_Y}^{pico}\left(\frac{y_{eq}}{L},\frac{h}{\bar{T}},\frac{T_1}{B},\frac{T_2}{B}\right)=K_{F_y}e^{k_{1y}\frac{\bar{T}}{h}}.e^{k_{2y}\frac{y}{L}}\left(\frac{T_1}{B}\right)^{k_{3y}}\left(\frac{T_2}{B}\right)^{k_{4y}} \quad (36)$$

$$C_{M_Z}^{pico}\left(\frac{y_{eq}}{L},\frac{h}{\bar{T}},\frac{T_1}{B},\frac{T_2}{B}\right)=K_{M_z}e^{k_{1z}\frac{\bar{T}}{h}}.e^{k_{2z}\frac{y}{L}}\left(\frac{T_1}{B}\right)^{k_{3z}}\left(\frac{T_2}{B}\right)^{k_{4z}} \quad (37)$$

Os coeficientes das respectivas curvas de regressão são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Coeficientes para o caso base adotado

	Navio Passante			Navio Atracado		
	C_{F_X}	C_{F_Y}	C_{M_Z}	C_{F_X}	C_{F_Y}	C_{M_Z}
h/T	k_{1x} = 1,503	k_{1y} = 2,901	k_{1z} = 2,380	k_{1x} = 0,244	k_{1y} = 1,196	k_{1z} = 1,065
y/L	k_{2x} =-6,000	k_{2y} = -5,900	k_{2z} = -6,741	k_{2x} = -3,009	k_{2y} = -3,090	k_{2z} = -3,752
T_1/B	k_{3x} = 1,861	k_{3y} = 2,125	k_{3z} = 1,848	k_{3x} = 1,041	k_{3y} = 1,844	k_{3z} = 1,696
T_2/B	k_{4x} = 2,072	k_{4y} = 2,897	k_{4z} = 2,700	k_{4x} = 1,053	k_{4y} = 1,071	k_{4z} = 1,051

A partir dos coeficientes das funções de extrapolação, as constantes K_{F_x}, K_{F_y} e K_{M_z} são determinadas segundo as equações (38), (39) e (40), com os parâmetros do caso base:

$$K_{F_x}=\left[e^{k_{1x}\frac{h}{\bar{T}}}.e^{k_{2x}\frac{y}{L}}\left(\frac{T_1}{B}\right)^{k_{3x}}\left(\frac{T_2}{B}\right)^{k_{4x}}\right]_{base}^{-1} \quad (38)$$

$$K_{F_y}=\left[e^{k_{1y}\frac{h}{\bar{T}}}.e^{k_{2y}\frac{y}{L}}\left(\frac{T_1}{B}\right)^{k_{3y}}\left(\frac{T_2}{B}\right)^{k_{4y}}\right]_{base}^{-1} \quad (39)$$

$$K_{M_z}=\left[e^{k_{1z}\frac{h}{\bar{T}}}.e^{k_{2z}\frac{y}{L}}\left(\frac{T_1}{B}\right)^{k_{3z}}\left(\frac{T_2}{B}\right)^{k_{4z}}\right]_{base}^{-1} \quad (40)$$

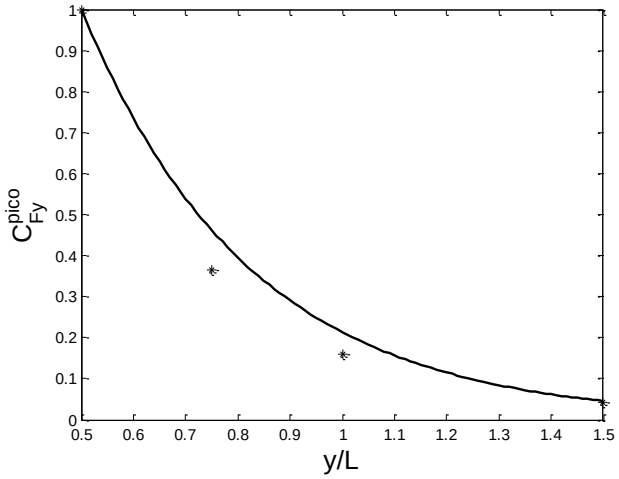
A Tabela 10 apresenta os valores dessas constantes:

Tabela 10 – Constantes K_{F_x}, K_{F_y} e K_{M_z} para o caso base.

Navio Passante			Navio Atracado		
K_{F_x}	K_{F_y}	K_{M_z}	K_{F_x}	K_{F_y}	K_{M_z}
436,59	399,46	571,27	38,46	42,65	55,28

Um resultado para o caso da variação do parâmetro y/L é apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Variação do parâmetro y/L a partir do caso base (Casos 1, 2, 3 e 4)

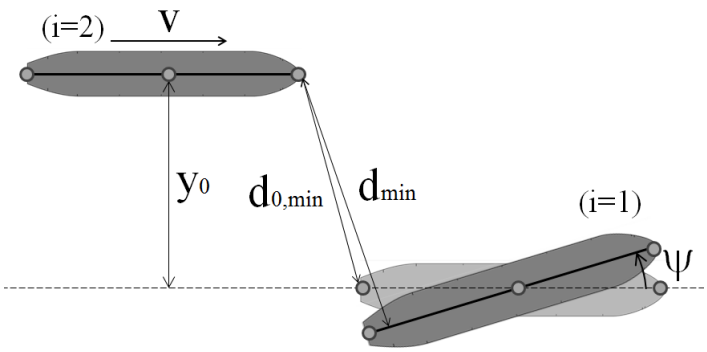


4.1.3. Extrapolação para correção do ângulo de aproamento

Visto que o modelo proposto para definir as forças de atuação não apresenta uma variação na intensidade da força devida a efeitos de ângulo relativo entre as embarcações, foi proposto um modelo de correção para a distância lateral relativa.

Para tanto, considerou-se uma nova variável, que é a mínima distância (d_{min}) entre a linha de centro dos dois navios, como mostra a Figura 28.

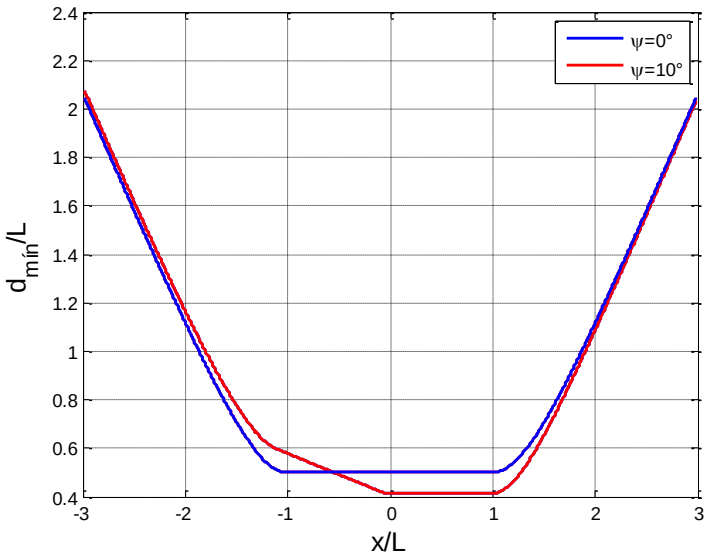
Figura 28 – Distância mínima entre as linhas de centro dos navios.



Para efeito de modelagem matemática, foi calculada a distância mínima de referência ($d_{0,mín}$) entre os navios durante a manobra de ultrapassagem do caso tipo.

Esta foi comparada com a curva de distância mínima para o caso com um ângulo relativo ($d_{mín}$), como apresentado na Figura 28. A comparação das distâncias relativas é apresentada na Figura 29.

Figura 29 – Distância mínima ($d_{mín}$) para a condição base (y/L=0,5)



Considerando a hipótese de que o efeito da angulação gera uma mudança na intensidade das forças sem alterar significativamente seus padrões de resposta para ângulos pequenos, foi aplicado um fator de correção da distância y/L. Como critério para esse modelo, foi estabelecida uma relação direta entre a distância lateral mínima e a distância mínima $d_{mín}$, expressa a seguir.

$$y_{eq} = y_0 + K(d_{mín} - d_{0,mín}) \tag{41}$$

Em que y_{eq} é a distância lateral equivalente de centro a centro e y_0 é a distância lateral de centro a centro para a condição de navios paralelos. Foi introduzida uma constante K para reduzir o efeito da aproximação ou afastamento, uma vez que a direção em que se encontra a distância mínima não condiz com a direção y relativa do navio.

Uma vez que a distância mínima considera os pontos mais próximos e a distância lateral é medida do centro dos navios, foi utilizado o fator $K = 0{,}5$ para compensar qualitativamente o efeito da aproximação para a variável. Desse modo, a distância lateral relativa é dada por:

$$\frac{y_{eq}}{L} = \frac{y_0}{L} + 0{,}5\left(\frac{d_{mín}}{L} - \frac{d_{0,mín}}{L}\right) \tag{42}$$

4.2. Resultados

4.2.1. Análise geral do modelo

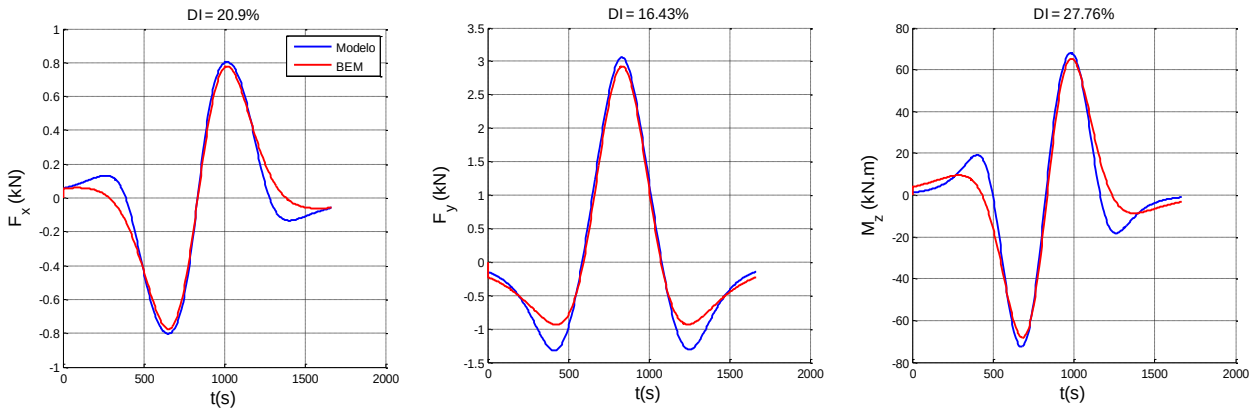
Com o modelo matemático definido, foram realizados alguns testes de verificação e validação. Inicialmente verifica-se a coerência do modelo para casos considerados no processo de regressão dos coeficientes (casos contidos na Tabela 6). A Figura 30 mostra os resultados considerando o parâmetro $\mathrm{y/L} = 1{,}5$, o que difere da curva de referência do caso base, em que $\mathrm{y/L} = 0{,}5$, apresentando boa coerência entre o modelo e o BEM.

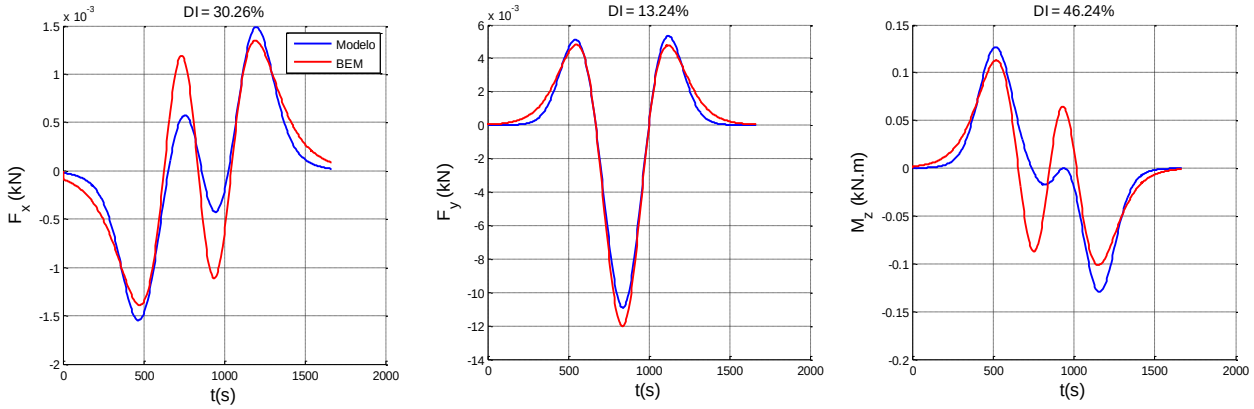
Apresenta-se no título de cada gráfico uma métrica definida para quantificar a diferença "integral" (DI) entre as curvas, definido por:

$$DI = \frac{\int_0^T |F_{modelo} - F_{Rankine}|.\,dt}{\int_0^T |F_{Rankine}|.\,dt} \tag{43}$$

Esta diferença é apresentada para cada esforço em todas as figuras em que há uma comparação entre os casos obtidos pelo modelo desenvolvido nesse trabalho e o BEM.

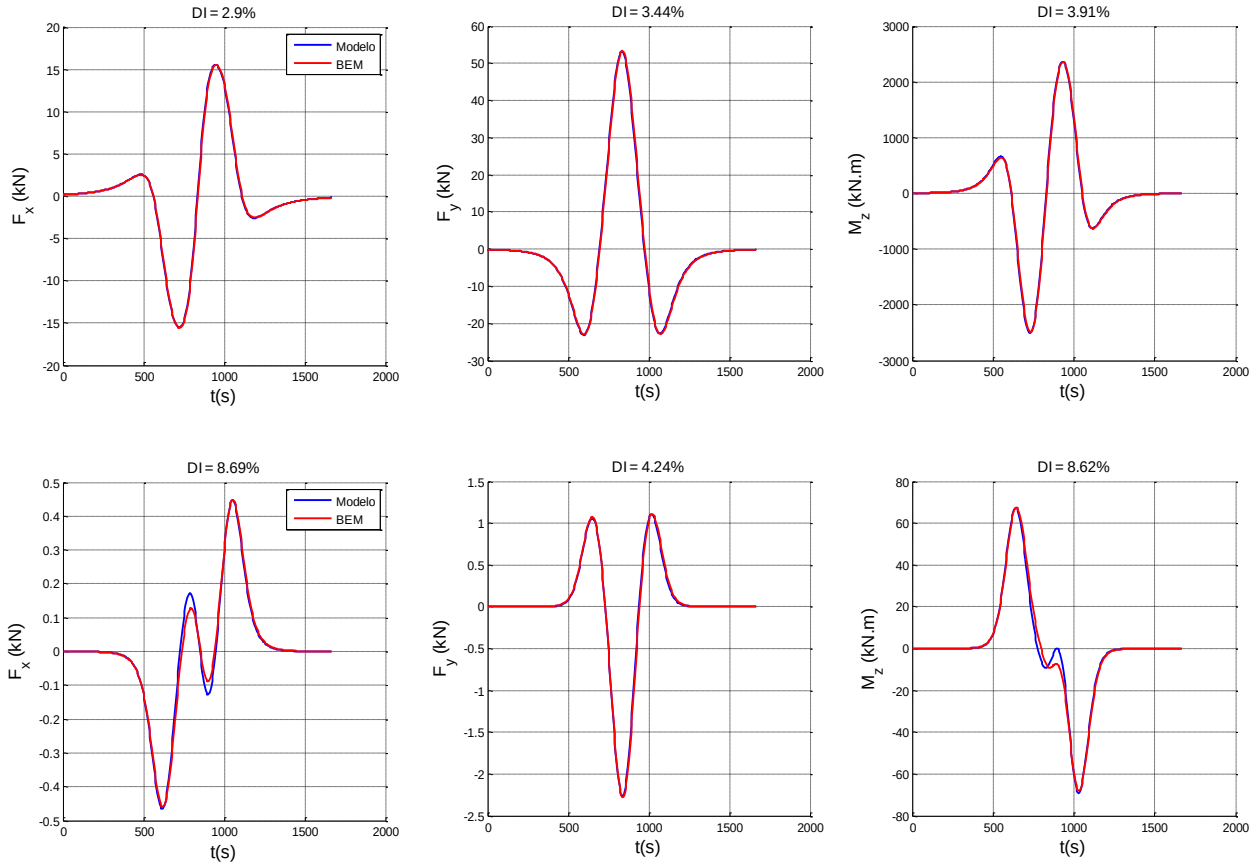
Figura 30 – Caso 4 (h = 17,05m, T_1 = T_2 =15,5m; y/L = 1,5) – Navio atracado (acima); Navio passante (abaixo).





No caso de alteração de profundidade, observamos que os padrões obtidos diretamente do BEM e do modelo proposto são semelhantes, como mostra a Figura 31.

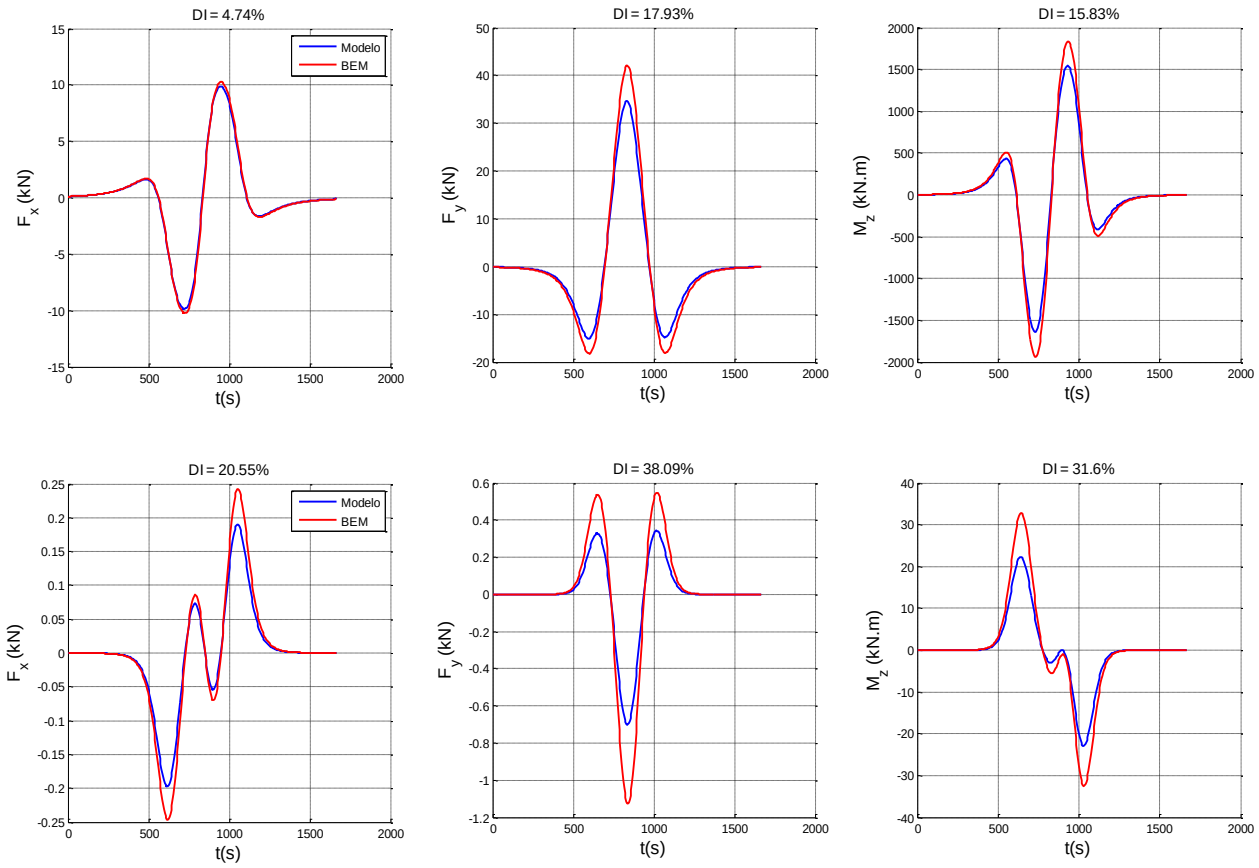
Figura 31 – Caso 9 (h = 21,70m, T_1 = T_2 =15,5m; y/L = 0,5) – Navio atracado (acima); Navio passante (abaixo).



O padrão da curva se mantém para uma variação no calado, como pode ser observado na Figura 32. O resultado é similar ao obtido na Figura 31, conforme

ocorre a ultrapassagem, ocorrendo apenas uma mudança na intensidade dos esforços.

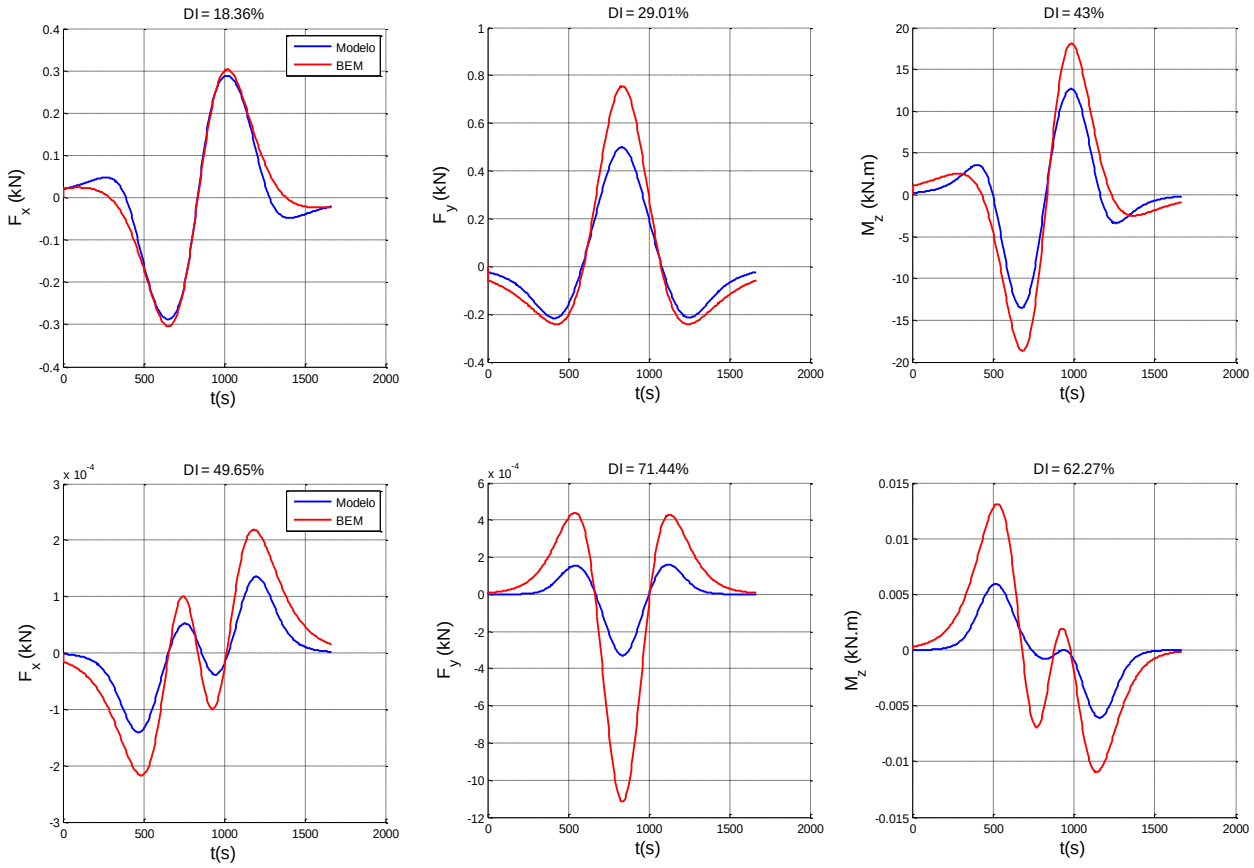
Figura 32 – Caso 13 (h = 17,05m, T_1 = 15,5m, T_2 = 10,0m; y/L = 0,5) – Navio atracado (acima); Navio passante (abaixo)



4.2.2. Casos de verificação

Foram verificados alguns casos, com o intuito de avaliar os desvios das respostas obtidas pelo modelo em relação ao BEM. Nesta seção, o modelo é verificado em casos que não foram utilizados para a regressão dos coeficientes. Alterando-se todos os parâmetros, observa-se um erro de pico maior para todas as curvas como pode ser observado na Figura 33.

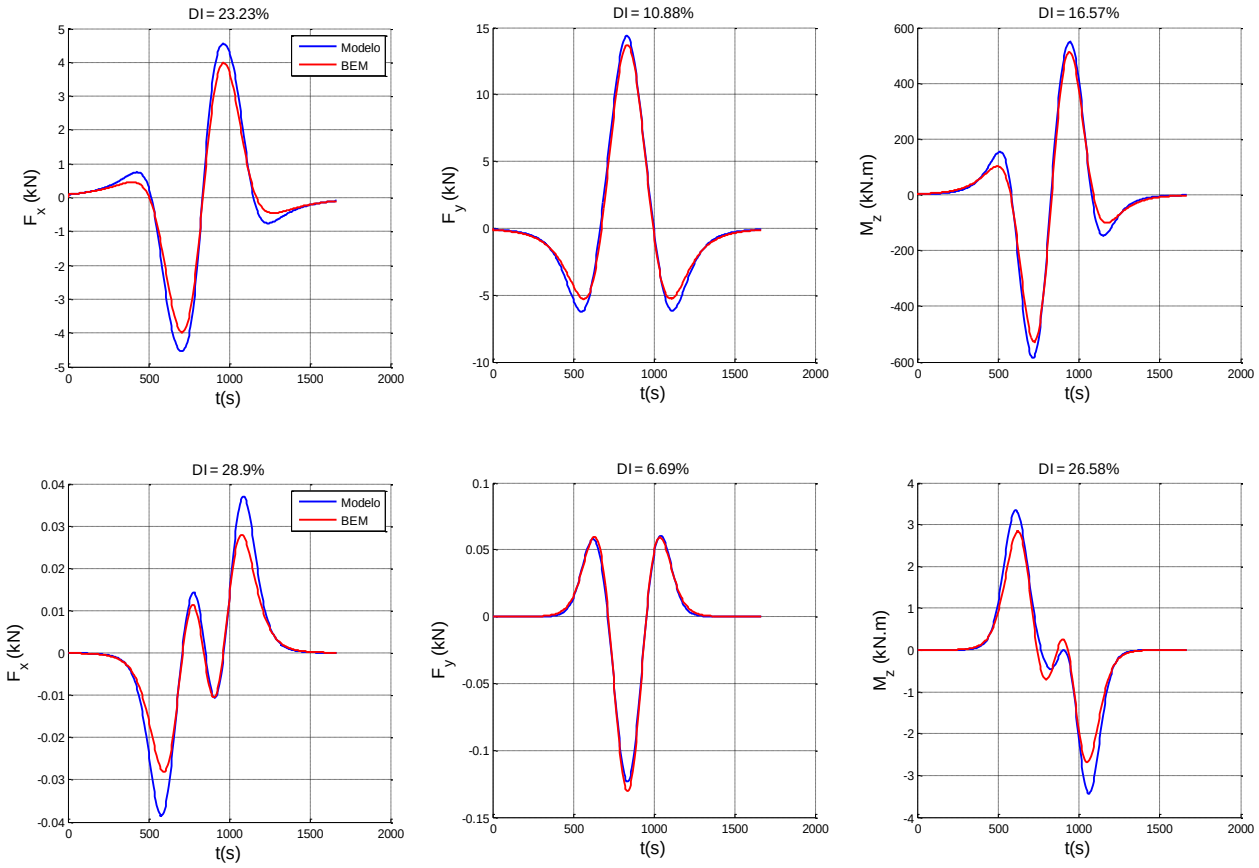
Figura 33 – Caso 48 (h = 21,70m, T_1 = 10,0m, T_2 = 10,0m; y/L = 1,5) – Navio atracado (acima); Navio passante (abaixo)



Os maiores erros são verificados para o navio passante, mas deve-se lembrar que os esforços no mesmo são muito menores do que no navio atracado. Ainda assim, é possível observar que o padrão das curvas se mantém para o navio atracado, com exceção da curva de *sway* F_Y, em que o valor máximo da força de atração não foi bem recuperado pelo modelo. Contudo, ainda é possível obter uma boa representação dos efeitos de forma qualitativa.

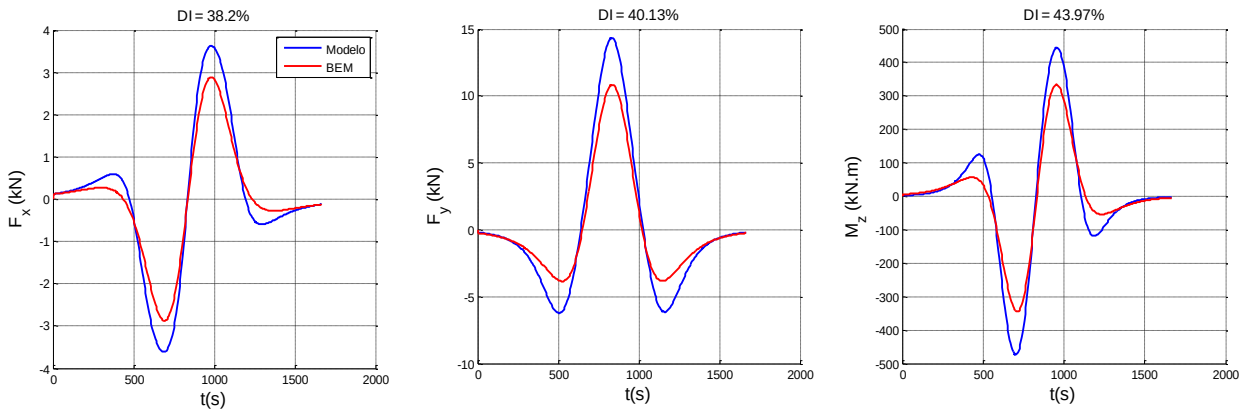
Outro caso selecionado é o caso 18, em que as condições são condições intermediárias ao caso 1 (caso base) e ao caso 48 (condição com as maiores variações dos parâmetros em relação ao caso base), apresentado na Figura 34.

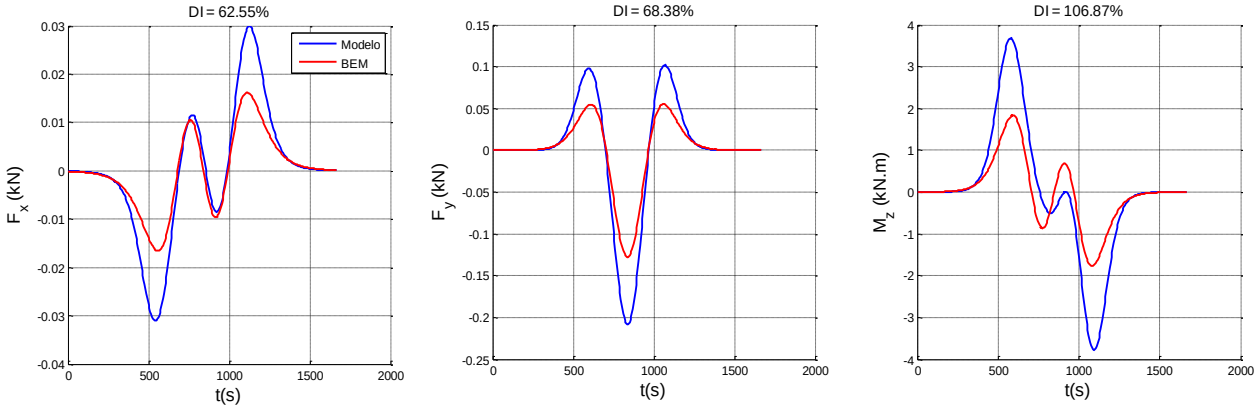
Figura 34 – Caso 18 (h = 19,38m, T_1 = 15,5m, T_2 = 10,0m; y/L = 0,75) – Navio atracado (acima); Navio passante (abaixo)



Por fim, o caso 3 é apresentado na Figura 35, caso este em que também se verificaram erros elevados na comparação dos valores das forças e momentos de pico.

Figura 35 – Caso 3 (h = 17,05m, T_1 = 15,5m, T_2 = 15,5m; y/L = 1,00) – Navio atracado (acima); Navio passante (abaixo)





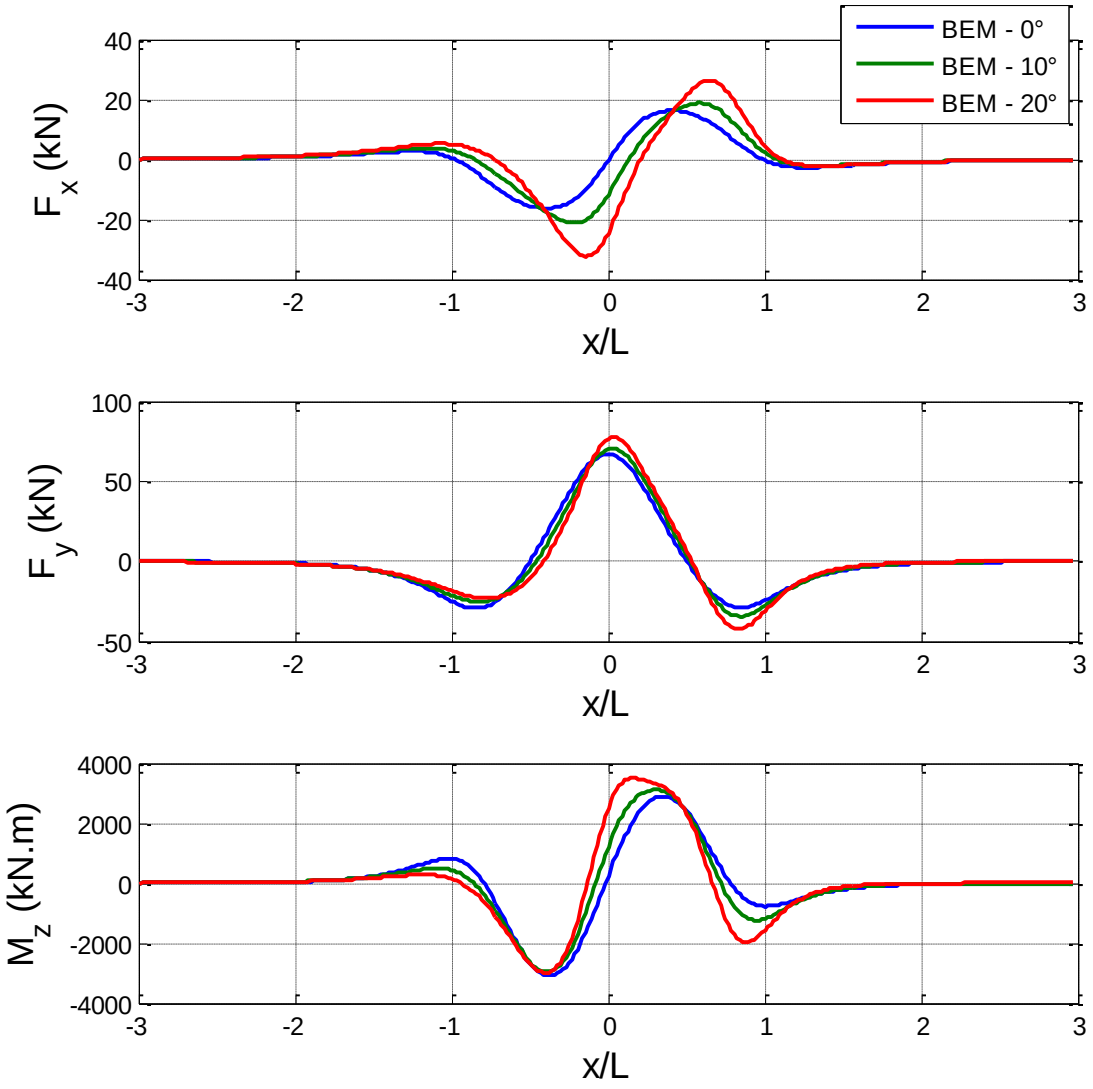
Constata-se que o modelo superestima o valor dos esforços em todos os casos apresentados, mantendo ainda o padrão das curvas. A intensidade dos valores de pico de forças alcança erros de 30% para o navio atracado e um pouco acima de 50% para o navio passante. Uma análise quantitativa mais detalhada dos erros envolvidos na presente modelagem é apresentada na seção 4.2.4.

4.2.3. Influência do ângulo do navio atracado

Para verificar a influência do ângulo relativo entre as forças e a resposta esperada nos respectivos casos, foi realizada uma comparação entre as forças e o momento em um navio atracado para as condições de ultrapassagem a 0°, 10° e 20°, obtidas através do BEM, como mostra a Figura 36.

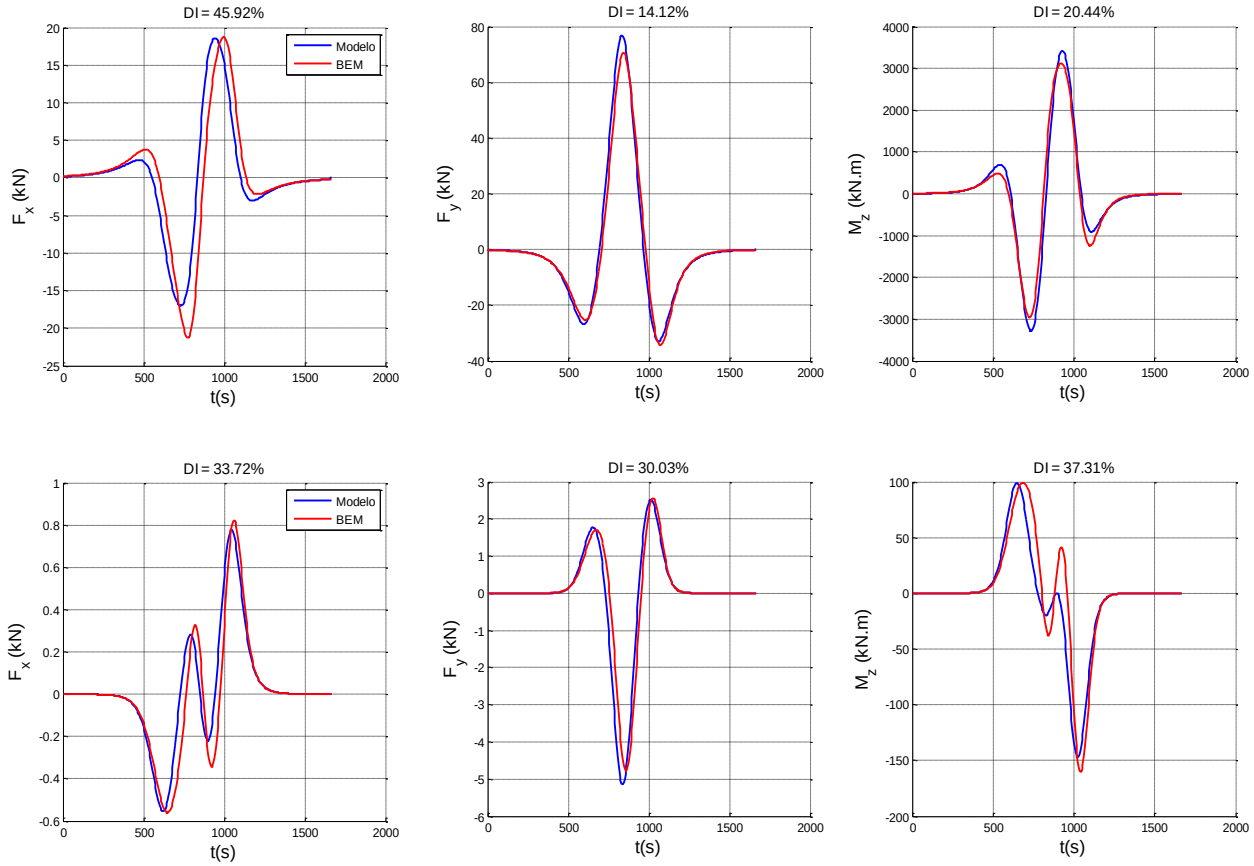
Todos os casos da Tabela 6 foram também calculados usando o BEM para 10º e 20º, a fim de se verificar o modelo proposto.

Figura 36 – Comparação da variação do padrão de forças e momento com o efeito do aproamento relativo para o BEM - Caso 1 (y/L=0,5; h/T=1,1; T_1= T_2=15,5m).



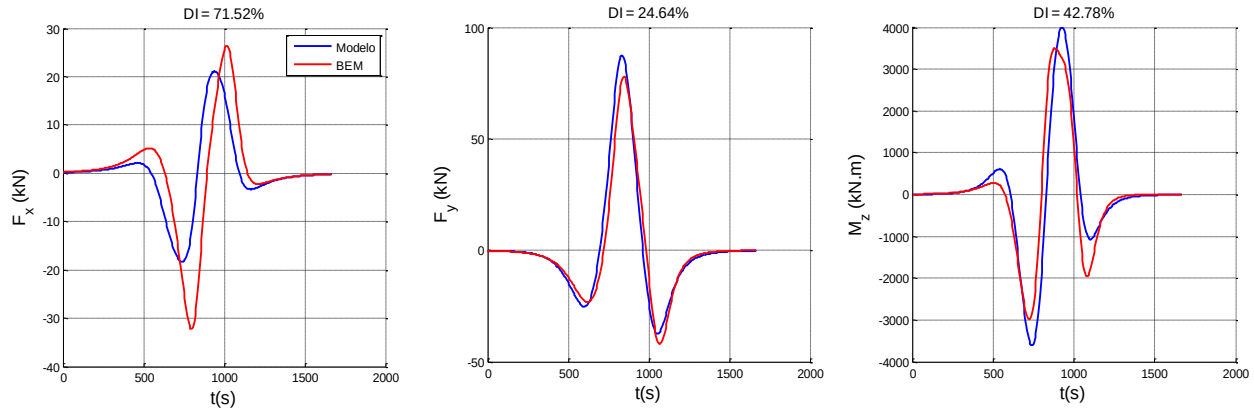
Desse modo, comparando os resultados do BEM para 10° e 20° com a resposta do modelo proposto a 10° e 20°, respectivamente, obtemos os resultados apresentados na Figura 37 e na Figura 38.

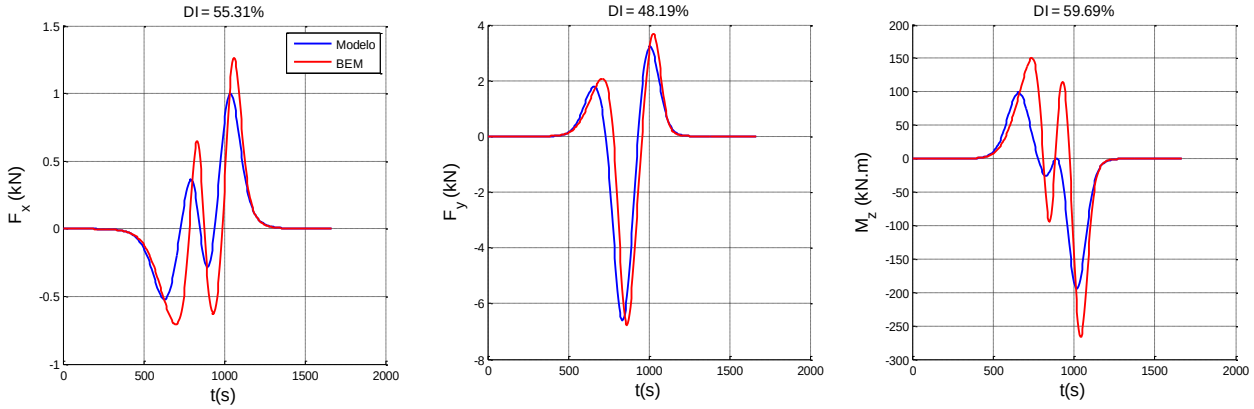
Figura 37 – Caso base com efeito do ângulo (10°) - Caso 1 (y/L=0,5; h/T=1,1; T_1= T_2=15,5m)



Para o caso do ângulo relativo de 10°, foi observada uma boa coerência para a força de *sway* (F_Y) e o momento de *yaw* (M_Z). A força de *surge* (F_X) apresentou uma diferença um pouco mais significativa, contudo, ainda foi considerado que a mesma é bem representativa para o caso exposto.

Figura 38 – Caso base com efeito do ângulo (20°) - Caso 1 (h/T=1,1; T_1= T_2=15,5m; y/L=0,5)





No caso a 20° houve uma maior divergência quanto ao pico, e mantiveram-se maiores discrepâncias para a força de *surge*.

Outro caso foi estudado, proveniente de uma condição diferente das condições testadas previamente em que todos os parâmetros são distintos em relação ao caso base, conforme apresenta a Figura 39 e a Figura 40.

Figura 39 – Caso 48 com ângulo de 10° (h = 21,70m, T_1 = 10,0m, T_2 = 10,0m; y/L = 1,5)

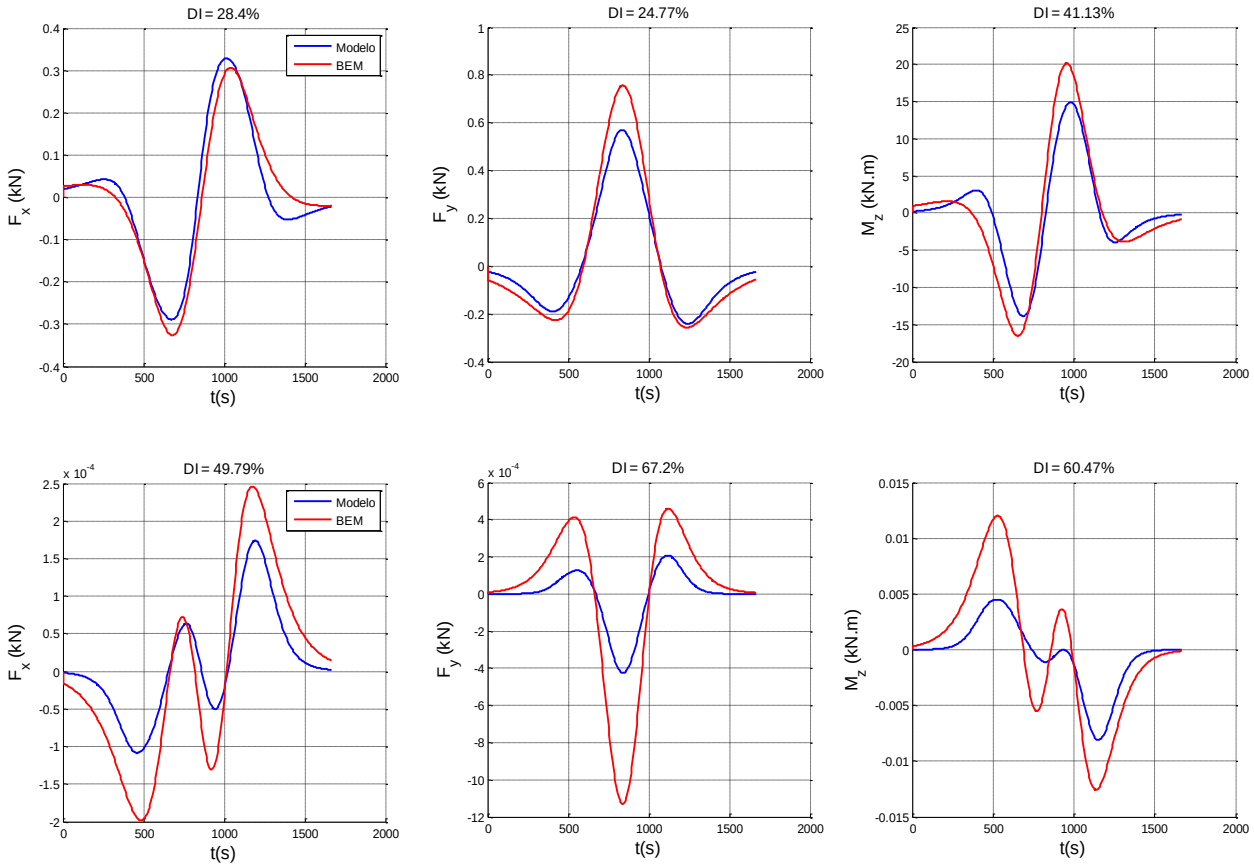
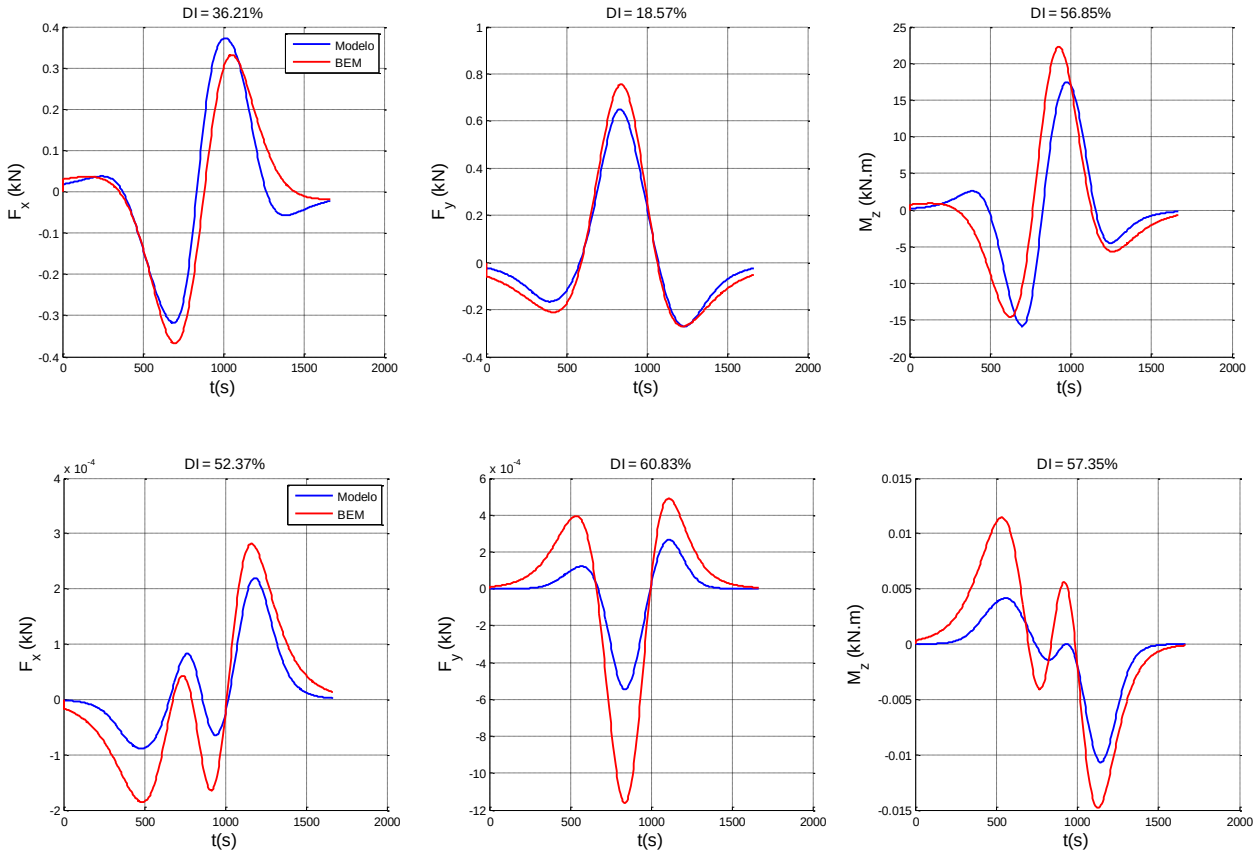
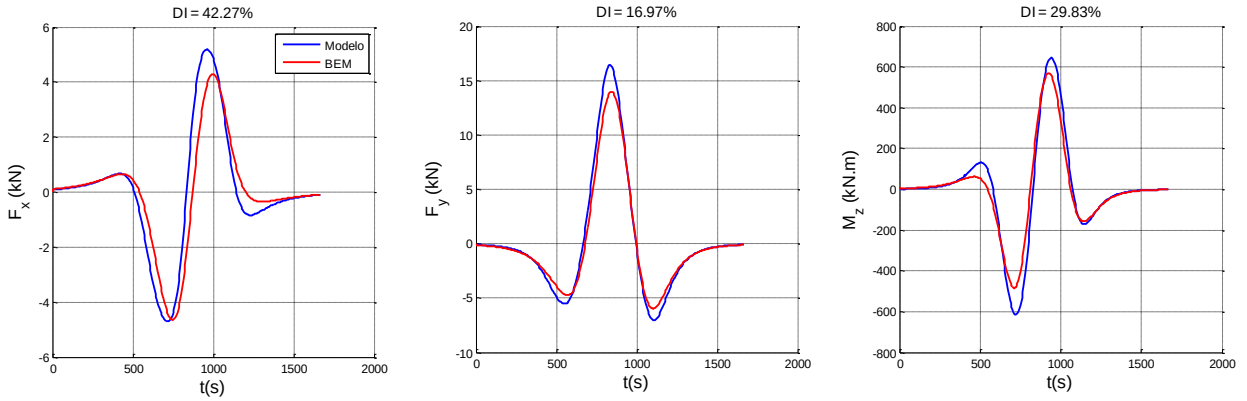


Figura 40 – Caso 48 com ângulo de 20° (h = 21,70m, T_1 = 10,0m, T_2 = 10,0m; y/L = 1,5)



Por fim, outra condição também foi testada e comparada conforme apresentado na Figura 41 e Figura 42.

Figura 41 – Caso 18 com ângulo de 10° (h = 19,38m, T_1 = 15,5m, T_2 = 10,0m; y/L = 0,75)



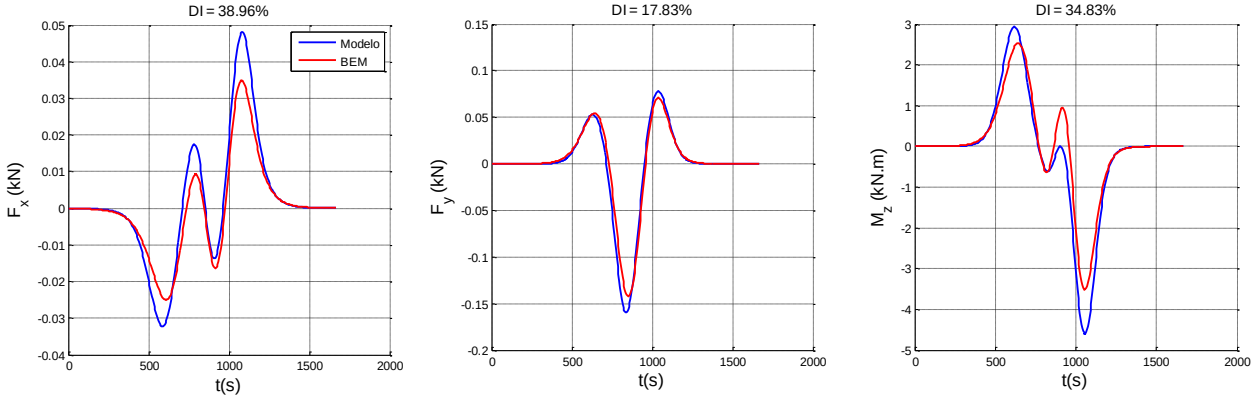
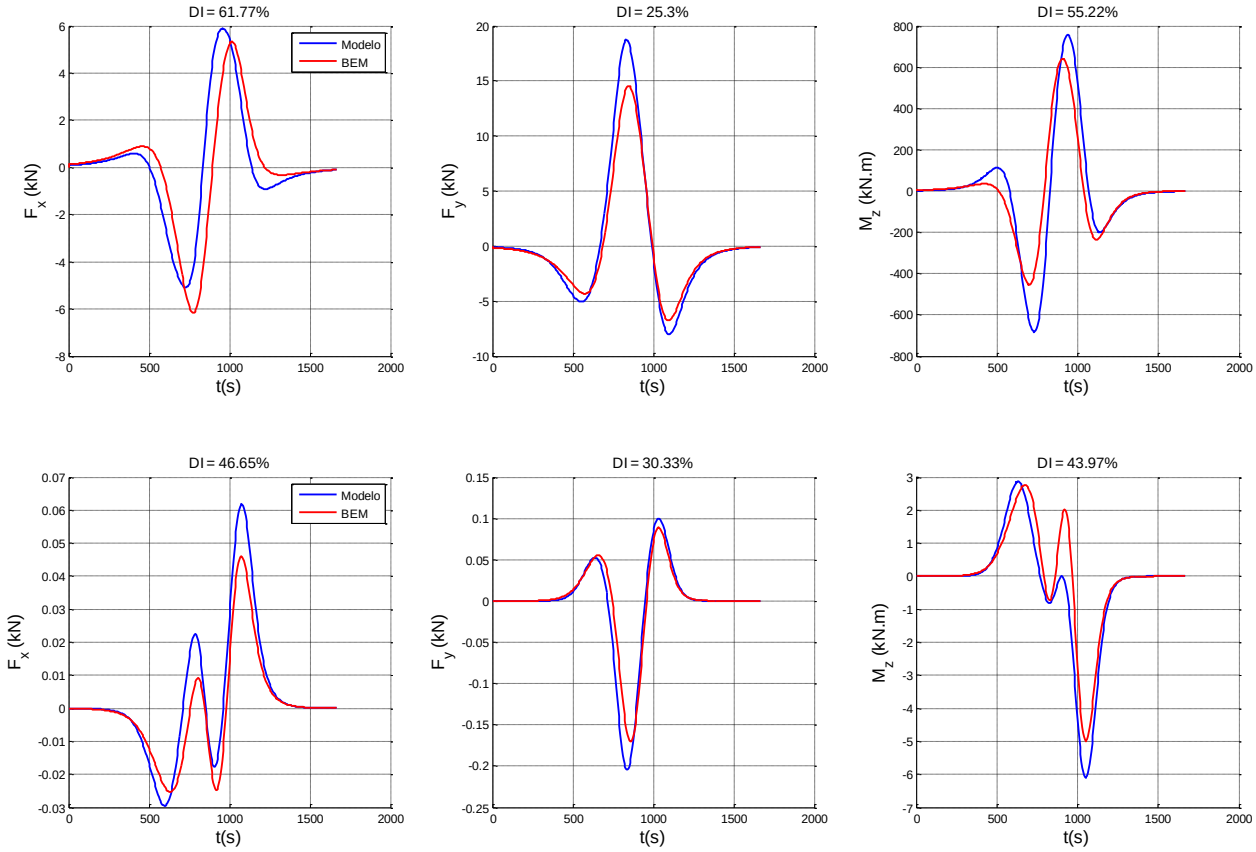


Figura 42 – Caso 18 com ângulo de 20° (h = 19,38m, T_1 = 15,5m, T_2 = 10,0m; y/L = 0,75)



Constata-se que o modelo, em média, superestima o valor dos esforços, mantendo ainda o padrão das curvas. A intensidade dos valores de pico de forças alcança erros de 50% para o navio atracado quando o ângulo de desalinhamento é de até 20°.

No caso da diferença integral, o valor percentual absoluto é altamente influenciado pela diferença de fase das curvas, ou seja, o valor de DI aumenta conforme os instantes de tempo de ocorrência dos picos forem mais afastados. Desse modo, percebe-se um grande aumento no valor de DI conforme aumenta o ângulo relativo entre os navios.

Para os casos em que o navio atracado está paralelo ao passante, a diferença máxima é da ordem de 45% para o atracado e 100% para o passante. Nesses casos, os valores são proporcionais aos erros de pico. Mesmo assim, a ordem de grandeza dos valores médios de DI são inferiores de 20% para o atracado e 60% para o navio passante, o que é bem menor, além de que o efeito real no erro de posicionamento do navio seria muito menor.

Uma análise quantitativa mais detalhada dos erros envolvidos na presente modelagem é apresentada na próxima seção.

4.2.4. Análise de picos de forças e momentos

De modo a generalizar a análise, foi feita uma comparação dos picos de esforços obtidos diretamente pelo BEM e pelo modelo proposto.

Para que fosse possível uma análise mais detalhada para a verificação dos dados, foram comparados 48 casos em que o navio atracado estava com um ângulo de aproamento em relação ao passante. Como foram analisados os ângulos relativos de 0°, 10° e 20°, totalizaram-se 144 casos.

Compararam-se os picos de esforços atuantes em ambos os navios, obtidos pelo modelo matemático (eixo y) e pelo BEM (eixo x). A tendência média dos pontos é apresentada pela reta obtida pelo Método dos Mínimos Quadrados.

A apresentação dos dados foi realizada pelo módulo do logaritmo de cada esforço para garantir uma distribuição mais uniforme destes ao longo do gráfico.

As retas de suporte de inclinação 45° ($y = x \pm 2\sigma$) são apresentadas com um espaçamento de dois desvios-padrões em relação à reta esperada ($y = x$), e servem para auxiliar a avaliação da dispersão dos dados e da reta de regressão, tanto

visualmente como estatisticamente. O valor de 2σ foi adotado no trabalho de Lataire (2014) para verificar a acurácia dos dados. Esse trabalho adota o mesmo critério.

Na Figura 43, Figura 44 e Figura 45 são apresentados os resultados da comparação dos picos para a condição prevista de ultrapassagem em paralelo (0°) com desalinhamento de 10° e 20°, respectivamente.

Figura 43 – Comparação de picos para o navio atracado (Modelo x BEM) – Casos 0°

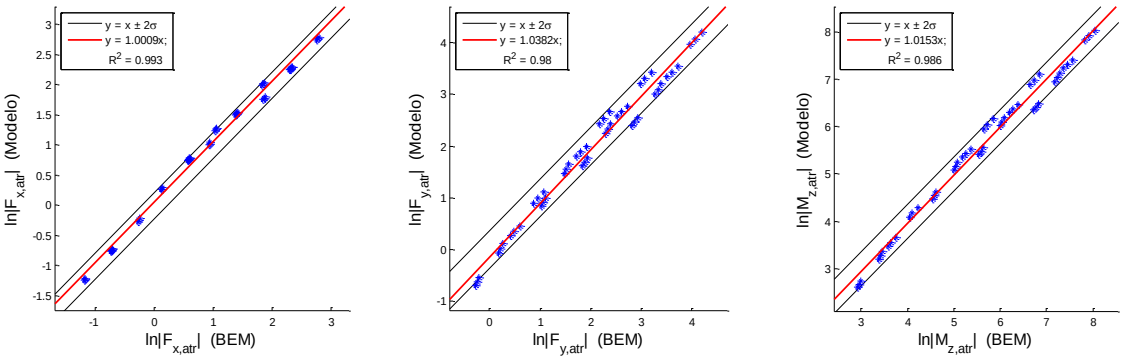


Figura 44 – Comparação de picos para o navio atracado (Modelo x BEM) – Casos 10°

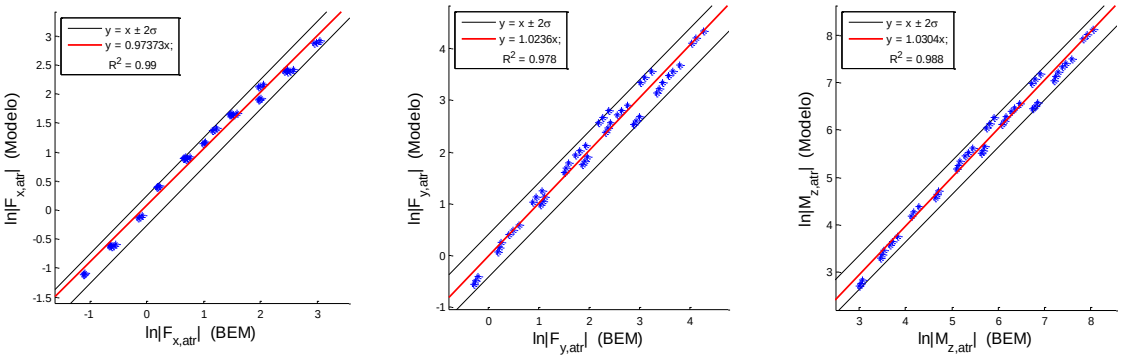
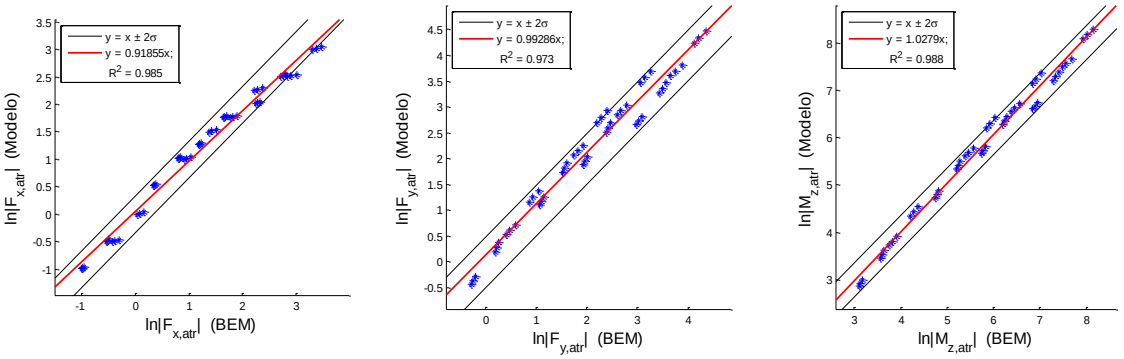


Figura 45 – Comparação de picos para o navio atracado (Modelo x BEM) – Casos 20°



Analogamente, as mesmas análises foram realizadas para o navio passante, apresentadas na Figura 46, Figura 47 e Figura 48.

Figura 46 – Comparação de picos para o navio passante (Modelo x BEM) – Casos 0°

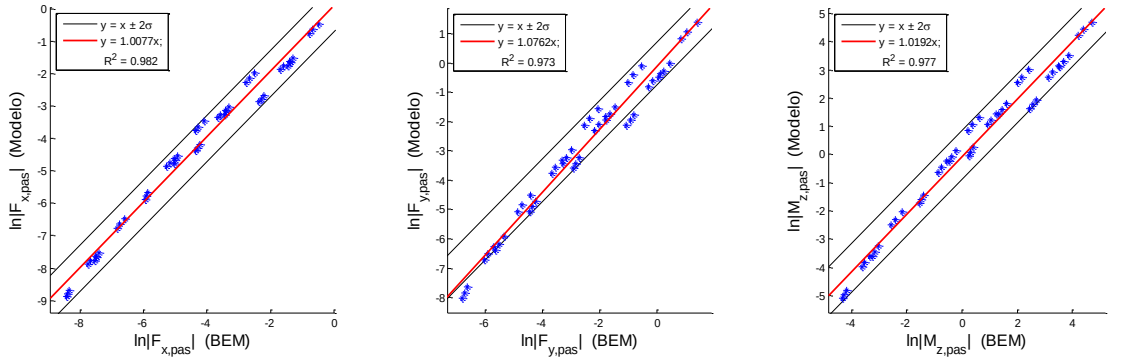


Figura 47 – Comparação de picos para o navio passante (Modelo x BEM) – Casos 10°

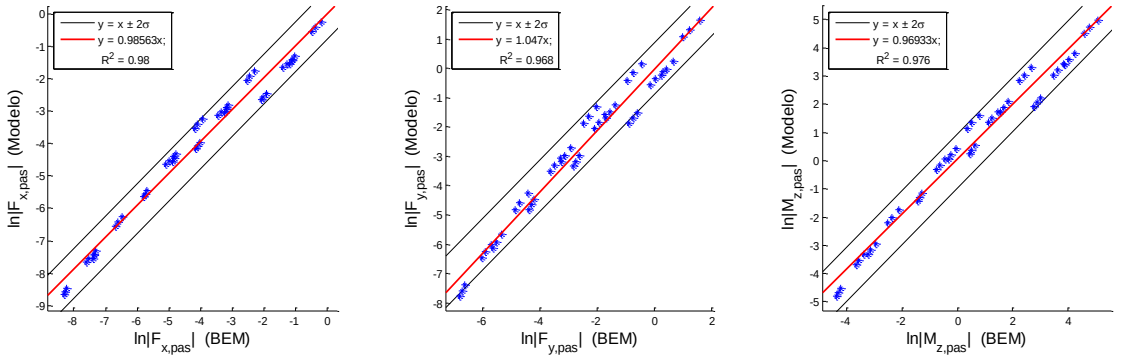
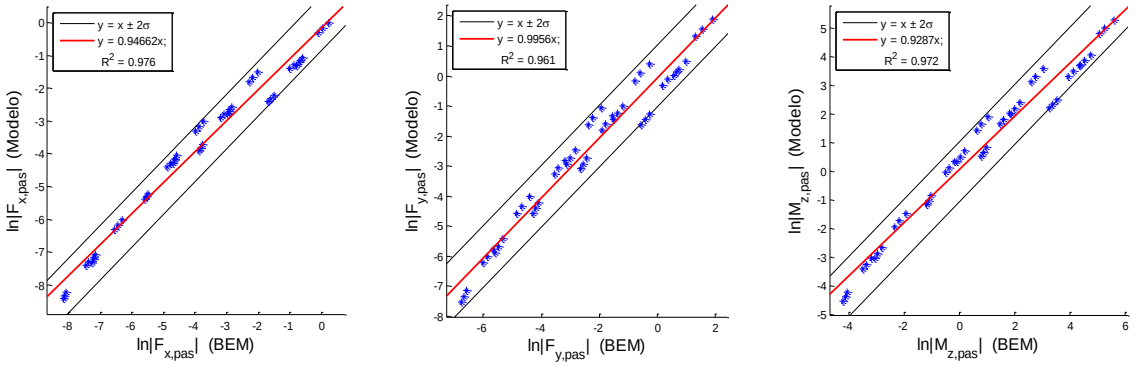


Figura 48 – Comparação de picos para o navio passante (Modelo x BEM) – Casos 20°



Com base nos dados apresentados, podemos verificar que não há variação significativa do coeficiente de correlação para os casos extrapolados de 10° e 20°. Contudo, a largura da faixa de dados, de modo geral, aumenta conforme o ângulo relativo entre navios aumenta. Desse modo, existe uma maior dispersão, ou seja, maiores erros nos esforços.

Analogamente, é possível confirmar que ocorre uma maior divergência dos dados para o navio passante, visto a abertura maior entre retas e os menores coeficientes de correlação, se comparado aos resultados do navio atracado.

Visto isso, ainda é necessário quantificar o erro em termos de valores absolutos, uma vez que a análise das curvas foi proposta para o módulo do logaritmo dos esforços. Desse modo, foram obtidas as médias e os desvios padrões (σ) de cada curva de erro analisada. Os resultados são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Variações do coeficiente de correlação e largura da faixa de dados.

	Geral – 0°, 10° e 20°					
	Navio atracado			Navio passante		
	F_X	F_Y	M_Z	F_X	F_Y	M_Z
Média do erro (μ)	3,90%	5,52%	3,56%	14,31%	-6,05%	11,53%
Desvio padrão do erro (σ)	14,28%	23,01%	18,21%	38,49%	44,96%	47,95%
	0°					
	Navio atracado			Navio passante		
	F_X	F_Y	M_Z	F_X	F_Y	M_Z
Média do erro (μ)	7,28%	-5,60%	-0,33%	11,57%	-19,73%	3,14%
Desvio padrão do erro (σ)	10,64%	17,97%	18,18%	35,49%	35,80%	42,86%
	10°					
	Navio atracado			Navio passante		
	F_X	F_Y	M_Z	F_X	F_Y	M_Z
Média do erro (μ)	7,55%	5,89%	3,00%	15,42%	-4,20%	16,22%
Desvio padrão do erro (σ)	12,68%	20,79%	17,67%	38,19%	43,77%	48,40%
	20°					
	Navio atracado			Navio passante		
	F_X	F_Y	M_Z	F_X	F_Y	M_Z
Média do erro (μ)	-3,13%	16,27%	8,00%	15,93%	5,78%	15,23%
Desvio padrão do erro (σ)	16,45%	24,71%	18,17%	42,16%	51,15%	52,02%

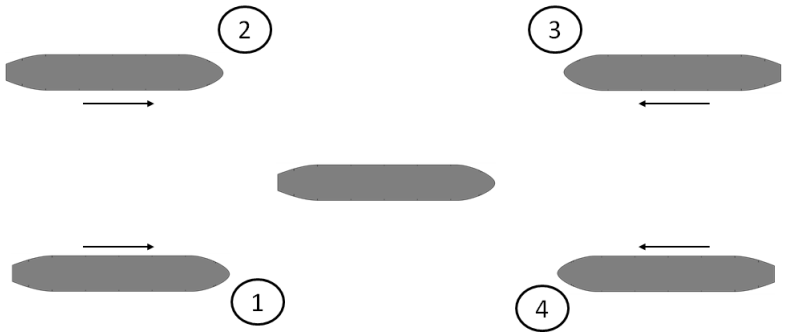
Para o navio atracado, o erro médio é inferior a 20% em todos os casos, com desvio padrão inferior a 25%. Para o navio passante os erros são superiores aos observado no navio atracado, mas as forças são muito menores e não influenciam as simulações, como será mostrado nas simulações Fast-Time que serão apresentadas. Ainda assim existe a necessidade de realizar outros estudos para inferir uma influência reduzida.

Além disso, uma vez que o intervalo de 2σ compreende mais de 95% dos casos e as retas de regressão não apresentam desvio de tendência significativo, o modelo é coerente para a proposta, mas ainda se faz necessário realizar uma validação para uma aplicação em simuladores de manobra.

4.3. Interação entre navios no simulador de manobras

Algumas simulações utilizando o simulador de manobras foram realizadas, a fim de observar o comportamento do navio devido às forças de interação. A arquitetura de integração é apresentada no Apêndice B. Foram realizadas 4 simulações iniciais, nas quais o navio passante ultrapassa o navio atracado paralelamente, cada caso com a posição inicial do navio passante distinta, conforme apresentado na Figura 49.

Figura 49 – Posição inicial de cada simulação em no simulador de manobras



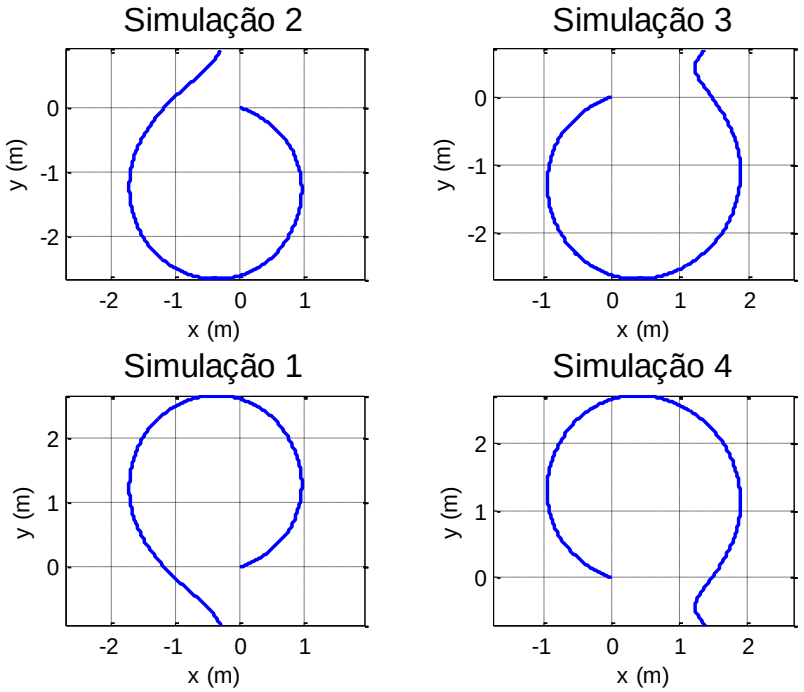
Os parâmetros iniciais utilizados nesses casos são:

Tabela 12 – Condições iniciais das simulações

$V_1\ (m/s)$	$V_2\ (m/s)$	$\Delta\psi\ (°)$	d/B	$h\ (m)$	$T_1, T_2\ (m)$
0	4	0 ou 180	2	30	16

As respostas de movimento (trajetória) do navio inicialmente estacionário são apresentadas na Figura 50, onde a posição inicial é sempre a (x,y)=(0,0).

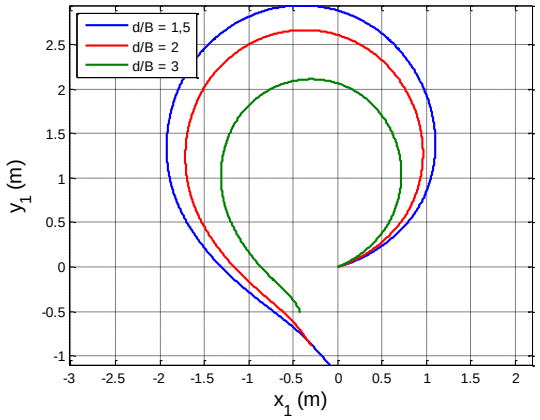
Figura 50 – Movimento do centro de gravidade do navio estacionário.



Da Figura 50 pode-se observar que os padrões de força são idênticos para os pares de simulações 1 e 2, com navios com o mesmo alinhamento, e 3 e 4, com navios com sentidos opostos. Contudo, em termos do modelo matemático, os resultados das simulações 3 e 4 são extrapolações do caso base, uma vez que a ultrapassagem ocorre no sentido oposto, o que gera a diferença no movimento geral. As forças por sua vez geram um movimento condizente com o esperado.

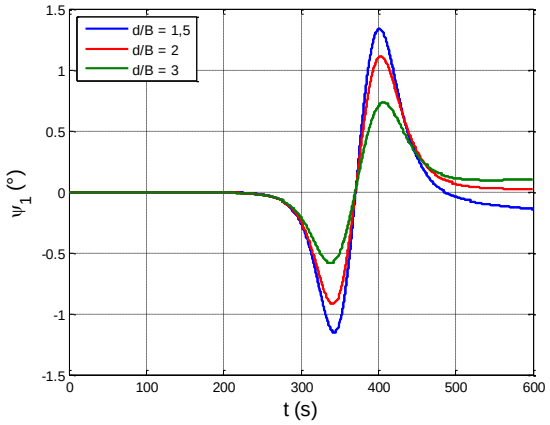
Outros três testes foram realizados, alterando-se a distância lateral relativa (centro a centro) entre navios, o que possibilita comparar as diferentes respostas de movimento. As demais condições de calado e profundidade se mantiveram. O resultado é apresentado na Figura 51.

Figura 51 – Movimento do navio inicialmente parado devido ao efeito de interação.



Outro ponto a ser destacado é a variação no aproamento do navio, que está relacionado diretamente ao efeito do momento gerado pelo efeito de interação. A resposta do aproamento é apresentada na Figura 52.

Figura 52 – Variação no aproamento do navio inicialmente parado devido ao efeito de interação.



Visto que o aproamento sofre pequenas alterações angulares, com uma variação aproximada de ±1°, o efeito de alteração das forças em relação ao caso base é muito pequeno, como estudado anteriormente, e pode-se considerar que os efeitos de interação são semelhantes, o que é comprovado na Figura 51, em que movimentos similares são observados para forças de menor intensidade.

As forças de interação no navio passante são muito baixas, de modo que o efeito mais relevante da interação durante uma ultrapassagem é a mudança de aproamento. No caso mais crítico (navios muito próximos), ocorre uma oscilação

máxima de 0,5°, o que chega a ser quase imperceptível nos testes realizados, bem como durante uma manobra real, uma vez que o efeito é momentâneo. Efeitos fracos de aproamento são mais relevantes quando aplicados continuamente, como o caso de uma interação de navio com a margem durante uma navegação em canais.

Por fim, ao diminuir o calado do navio atracado, reduzindo sua massa e momento de inércia, é possível verificar que as mudanças na tendência geral do movimento são pequenas, uma vez que as forças de interação também diminuem, já que o navio fica menos exposto às forças de interação hidrodinâmicas, como são os casos apresentados na Figura 53 e Figura 54.

Figura 53 – Comparação do movimento do navio, inicialmente estacionário, nas condições de lastro e carregado

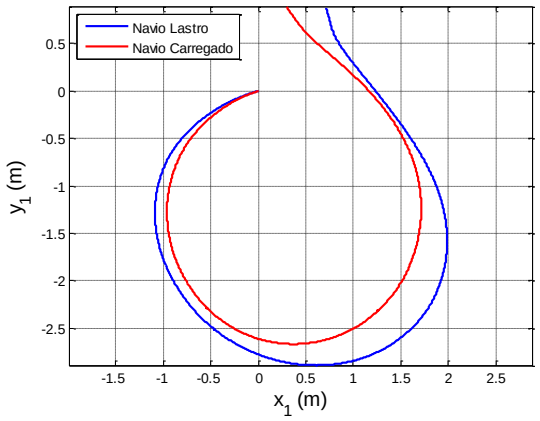
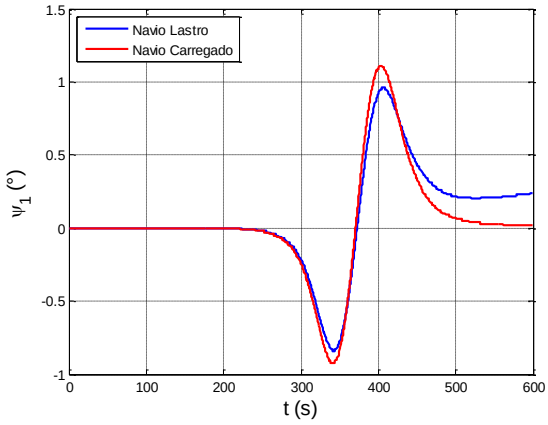


Figura 54 – Comparação da variação do aproamento para um navio inicialmente estacionário



5. INTERAÇÃO ENTRE NAVIO E MARGEM

Essa seção destina-se a explicar o procedimento básico para o cálculo das forças hidrodinâmicas de interação entre navio e margem para aplicação em simulador de manobras.

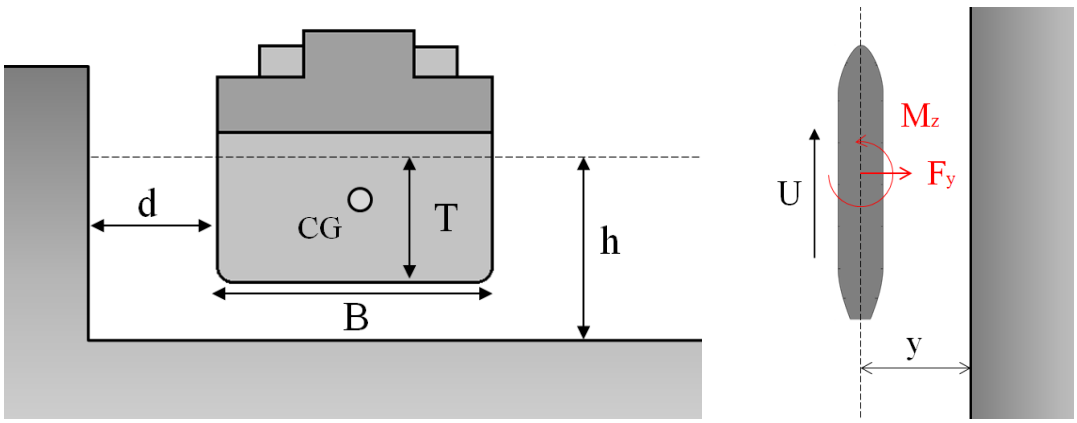
Análogo ao modelo de interação entre navios, os efeitos de interação entre navio e margem são obtidos a partir de resultados de alguns casos selecionados, obtidos da aplicação do BEM, associados a regressões matemáticas para definir as forças em função das variáveis e parâmetros do problema.

Como hipótese, foi assumido no presente estudo que os esforços de interação variam quadraticamente com a velocidade do navio.

Caso tipo: Margem vertical com fundo

O caso fundamental de estudo corresponde a um navio passando paralelamente a uma margem vertical e com a velocidade alinhada na direção proa-popa (sem velocidade de deriva). A Figura 55 ilustra a configuração básica do caso.

Figura 55 – Interação entre navio e margem paralela



Nesse fenômeno, os esforços atuantes no navio considerados preponderantes são a força de *sway* (F_y) e o momento de *yaw* (M_z).

Para selecionar os parâmetros de entrada e variáveis do problema, foram analisados os modelos e experimentos propostos em alguns trabalhos de referência,

como Norrbin (1985), Vantorre (1995), Li (2000), Duffy (2008) e Lataire (2014). Os parâmetros comumente considerados são a distância lateral relativa y/B (em que y é a distância de separação do centro de gravidade do navio à margem) e a profundidade relativa h/T. Nos trabalhos citados, o calado é uma dimensão do navio considerado fixa. Visto isso, como nesse trabalho o calado também é um parâmetro, a adimensionalização da força é feita apenas pelo comprimento, seguindo o critério adotado para interação entre navios, conforme mostram as equações (44) e (45).

$$F_Y = C_{F_Y}\left(\frac{y}{B},\frac{h}{T},\frac{T}{B}\right).\frac{1}{2}\rho U^2 L^2 \tag{44}$$

$$M_Z = C_{M_Z}\left(\frac{y}{B},\frac{h}{T},\frac{T}{B}\right).\frac{1}{2}\rho U^2 L^3 \tag{45}$$

Assim, os parâmetros de entrada são:

- Fixos: comprimento do navio (L), boca (B), gravidade (g) e densidade (ρ);
- Variáveis: calado médio (T), distância lateral (y), velocidade de avanço (U) e profundidade local média (h).

As variáveis de saída sempre são referentes aos esforços F_y e M_z. A Tabela 13 resume as principais variáveis e parâmetros associados ao problema, dimensionais e adimensionais.

Tabela 13 – Dados do caso "Margem vertical com fundo"

	Valores Dimensionais	Adimensionais π
Parâmetros de entrada	$L, B, T, y, h, U, g, \rho$	$h/T, T/B, y/B$
Variáveis de saída	F_y, M_z	C_{F_y}, C_{M_z}

5.1. Modelagem matemática da interação entre navio e margem

A modelagem desenvolvida para esse tipo de interação consiste em utilizar os dados obtidos de cálculos dos esforços nos casos tipo pelo BEM e definir alguns parâmetros para realizar interpolações/extrapolações dos dados e cálculos diretos com baixo consumo computacional em tempo real.

Para definir os valores de distância a serem simulados, foram verificadas as mínimas folgas para evitar o efeito da interação com margem, dependendo das dimensões e da classe dos navios (PIANC, 2014). A Tabela 14 apresenta os valores de distância mínima do costado a margem (d – ver definição na Figura 55) adotados em norma pela organização japonesa OCDI (2012).

Tabela 14 – Norma japonesa para mínima folga (*d*) a margem em função do tipo de navio. (OCDI, 2012)

Navio tipo	$L_{PP}\ (m)$	$B\ (m)$	d	y/B
Navio de Carga	103,0	20,0	17,4	1,37
Conteneiro (Post-Panamax)	283,8	40,0	55,5	1,89
Conteneiro (Panamax)	273,0	32,2	55,2	2,21
Graneleiro (Panamax)	216,0	32,3	41,9	1,80
VLCC	316,0	60,0	49,7	1,33
Tanker pequeno	92,0	20,0	13,8	1,19

Estabeleceu-se que uma distância y máxima de 2B é suficiente para os casos de simulação, acima da qual o efeito de interação com a margem pode ser desprezado. O navio testado foi o Suezmax, também utilizado para a interação entre navios, e suas características são apresentadas na Tabela 2, conforme apresentado no capítulo anterior.

Inicialmente, as forças de interação foram calculadas pelo BEM para 40 casos variando-se os parâmetros de acordo com a Tabela 15. Os 40 casos simulados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 15 – Parâmetros usados para a simulação do BEM.

T (m)	h/T	Distância (y/B)
15,5	1,1	0,75
10	1,25	1
	1,4	1,5
	2,2	2
	∞	

Tabela 16 – Casos utilizados para determinar os coeficientes das regressões

Caso	T (m)	h/T	d/B	Caso	T (m)	h/T	d/B
1	15,50	1,10	0,75	21	10,00	1,10	0,75
2	15,50	1,10	1,00	22	10,00	1,10	1,00
3	15,50	1,10	1,50	23	10,00	1,10	1,50
4	15,50	1,10	2,00	24	10,00	1,10	2,00
5	15,50	1,25	0,75	25	10,00	1,25	0,75
6	15,50	1,25	1,00	26	10,00	1,25	1,00
7	15,50	1,25	1,50	27	10,00	1,25	1,50
8	15,50	1,25	2,00	28	10,00	1,25	2,00
9	15,50	1,40	0,75	29	10,00	1,40	0,75
10	15,50	1,40	1,00	30	10,00	1,40	1,00
11	15,50	1,40	1,50	31	10,00	1,40	1,50
12	15,50	1,40	2,00	32	10,00	1,40	2,00
13	15,50	2,20	0,75	33	10,00	2,20	0,75
14	15,50	2,20	1,00	34	10,00	2,20	1,00
15	15,50	2,20	1,50	35	10,00	2,20	1,50
16	15,50	2,20	2,00	36	10,00	2,20	2,00
17	15,50	∞	0,75	37	10,00	∞	0,75
18	15,50	∞	1,00	38	10,00	∞	1,00
19	15,50	∞	1,50	39	10,00	∞	1,50
20	15,50	∞	2,00	40	10,00	∞	2,00

Os resultados dos esforços de interação atuantes no navio para $U = 1\,m/s$ e $T = 15{,}5m$ são apresentados na Figura 56 e na Figura 57, em função de y/B e h/T, respectivamente. O formato das curvas para diferentes combinações de parâmetros é semelhante, variando-se os valores das forças e momento máximo de interação.

Figura 56 – Padrão de esforços obtido pelo BEM (T=15,5m)

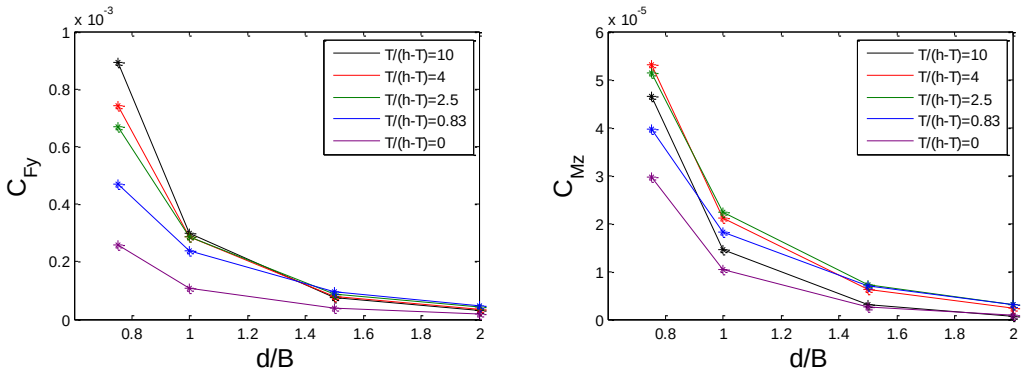
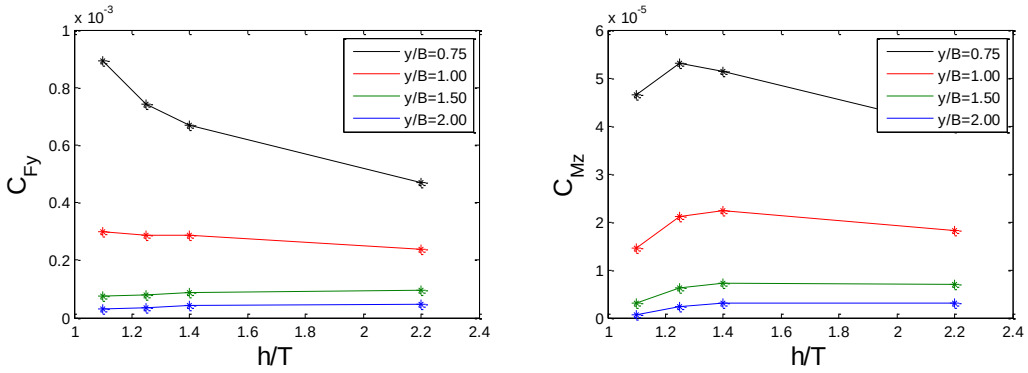


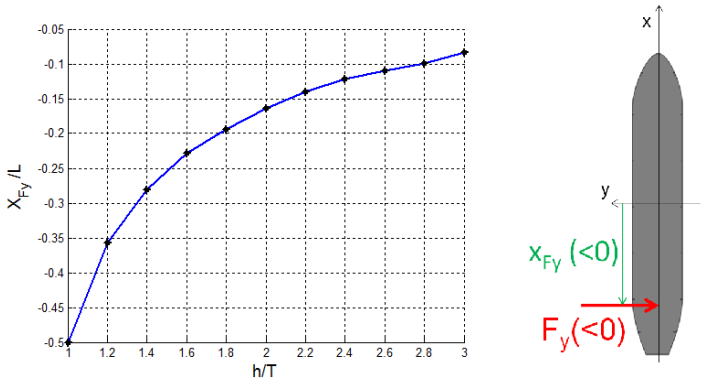
Figura 57 – Padrão de esforços obtido pelo BEM (T=15,5m)



Para este presente problema de interação com margem, verificou-se que os resultados do BEM apresentam erros nos esforços de momento. Este problema também foi discutido por Yuan & Incecik (2016), que apresenta um momento invertido em relação ao esperado. Segundo os autores, a razão da divergência pode ser atribuída ao fato de não considerar parte da força de sustentação devida ao fluxo assimétrico sobre o casco. Foi sugerida como correção pelos mesmos a imposição da condição de Kutta sobre a região da esteira do navio, próxima ao bordo de fuga.

Dessa forma, optou-se por não utilizar os momentos oriundos do BEM, mas apenas as forças laterais (F_y). Para a estimativa do momento, utilizou-se uma regressão apresentada por Lewis (1990), que define o ponto de aplicação da força lateral em relação ao centro de gravidade do navio, como mostra a Figura 58, permitindo assim calcular o momento induzido.

Figura 58 – Ponto de aplicação da força em função da profundidade relativa h/T do navio.



Fonte: LEWIS, 1990.

Baseado nos resultados de Lewis (1990), o momento resultante é obtido segundo a expressão:

$$M_Z = F_Y . x_{F_Y} \tag{46}$$

Sendo F_y obtida numericamente pelo BEM e o momento resultante obtido diretamente da equação (46). Desse modo, a expressão do momento é derivada diretamente das equações (44) e (45), e pode ser expressa por:

$$C_{M_Z}\left(\frac{y}{B},\frac{h}{T},\frac{T}{B}\right) = C_{F_Y}\left(\frac{y}{B},\frac{h}{T},\frac{T}{B}\right).\frac{x_{F_Y}}{L} \tag{47}$$

Análogo ao modelo de interação entre navios, o modelo de regressão utilizado considera que as variáveis do problema não são acopladas diretamente, sendo possível separar as suas respectivas expressões matemáticas, seguindo o mesmo padrão utilizado na maioria dos trabalhos citados. Assim, assume-se que o coeficiente adimensional de força C_{F_Y} pode ser escrito como o produto de três funções independentes, cada um deles expressando a sua dependência com os parâmetros y/B, h/T e T/B, tal como:

$$C_{F_Y}\left(\frac{y}{B},\frac{h}{T},\frac{T}{B}\right) = f_h\left(\frac{h}{T}\right).f_y\left(\frac{y}{B}\right).f_T\left(\frac{T}{B}\right) \tag{48}$$

5.1.1. Funções referentes aos adimensionais

A escolha das funções foi baseada principalmente no trabalho de Duffy (2008), que fez um estudo detalhado de algumas funções matemáticas, similar ao desenvolvido para a interação entre navios. Este é baseado em resultados experimentais, testando funções de potência e exponenciais, determinando a variável com maior correlação e os respectivos desvios dos esforços.

Para a obtenção das curvas, o caso base adotado para o modelo é o caso 13. Os casos utilizados para regressão foram selecionados dos casos apresentados previamente na Tabela 16. Visto o número de parâmetros simulados pelo BEM, para determinar os coeficientes de cada modelo, adotaram-se os casos apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Casos utilizados para obtenção dos coeficientes de cada parâmetro do modelo.

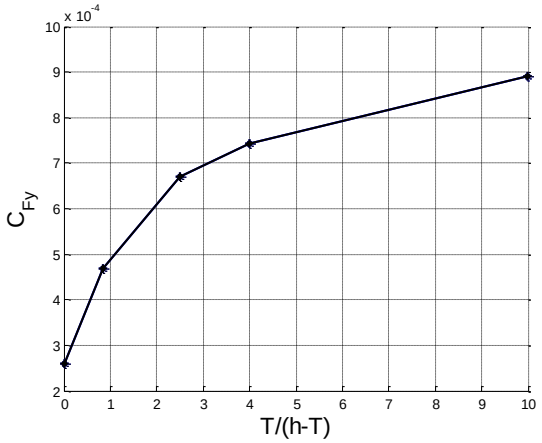
T/B	h/T	y/B
Caso 13	Caso 1	Caso 13
Caso 33	Caso 5	Caso 14
	Caso 9	Caso 15
	Caso 13	Caso 16
	Caso 17	

Para a função de profundidade (f_h), utilizou-se a dependência diretamente obtida pelos casos bases (casos 1, 5, 9, 13 e 17), interpolando entre os valores calculados. Desse modo, a função é dada por:

$$f_h\left(\frac{h}{T}\right) = \frac{F_Y^{base}\left(\frac{h}{T}\right)}{\left(\frac{1}{2}\rho U^2 L^2\right)_{base}} = \frac{F_Y^{base}\left(\frac{h}{T}\right)}{3{,}99\,.\,10^7} \tag{49}$$

A curva é apresentada na Figura 59 em função da relação calado por folga sob a quilha para facilitar a visualização dos pontos.

Figura 59 – Coeficiente adimensional de força em função da relação calado por folga sob a quilha (para T/B=0,323 e y/B=0,75) - Casos base 1,5,9,13,17



Os modelos matemáticos adotados para as demais funções (f_y e f_T) foram funções de potência, uma vez que estas são as funções mais adotadas para a distância de navio a margem na maioria dos trabalhos, por referência ao trabalho de Norrbin (1974), sendo aplicadas regressões simples apenas para representar uma tendência média capturada pelo modelo numérico. Desse modo, a função matemática para o modelo é dada por:

$$f_y\left(\frac{y}{B}\right).f_T\left(\frac{T}{B}\right) = KM_{F_y}.\left(\frac{y}{B}\right)^{km_{2y}}.\left(\frac{T}{B}\right)^{km_{3y}} \quad (50)$$

Os coeficientes são baseados nos termos da regressão linear dos logaritmos das variáveis. Os coeficientes determinados a partir das curvas são apresentados na Tabela 18:

Tabela 18 – Coeficientes para o caso base adotado

	C_{F_Y}
y/B	km_{2y} = -2.342
T/B	km_{3y} = 2.259

A partir dos coeficientes das funções de extrapolação, a constante K_{F_y} é determinada segundo a equação (51), com os parâmetros do caso base:

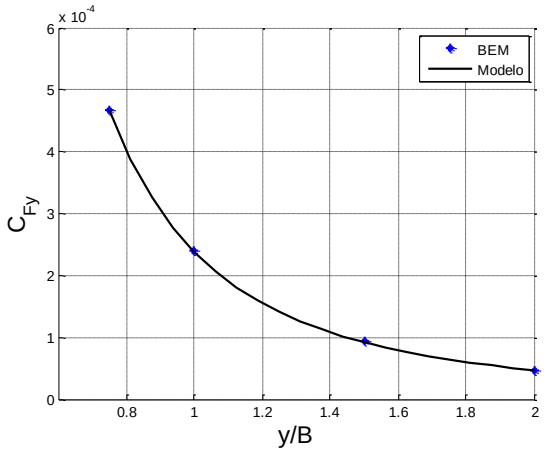
$$KM_{F_y} = \left[\left(\frac{y}{B}\right)^{km_{2y}}.\left(\frac{T}{B}\right)^{km_{3y}}\right]^{-1}_{base} = 6{,}548 \quad (51)$$

Assim, a função geral é dada por:

$$C_{F_Y}\left(\frac{y}{B},\frac{h}{T},\frac{T}{B}\right) = \frac{KM_{F_y}}{3{,}99\,.\,10^7}\,.F_Y^{base}\left(\frac{h}{T}\right).\left(\frac{y}{B}\right)^{km_{2y}}.\left(\frac{T}{B}\right)^{km_{3y}} \quad (52)$$

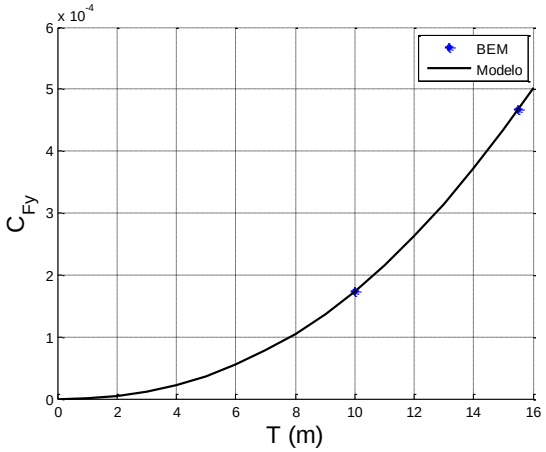
Uma comparação dos resultados do modelo com o BEM é realizada na Figura 60.

Figura 60 – Resultado do modelo em comparação ao resultado obtido numericamente. (para T/B=0,323 e h/T=2,2) - Casos base 13,14,15,16



No caso do calado, também assumiu-se a regressão matemática de potência, mesma função adotada nos trabalhos de Seelig (2001) e Lataire et al (2012), para os casos de interação entre navios. Incluiu-se o ponto de calado nulo, no qual a força deve tender a zero. A relação é apresentada na Figura 61.

Figura 61 – Resultado do modelo em comparação ao resultado obtido numericamente (para h/T=2,2 e y/B=0,75) - Casos base 13 e 33

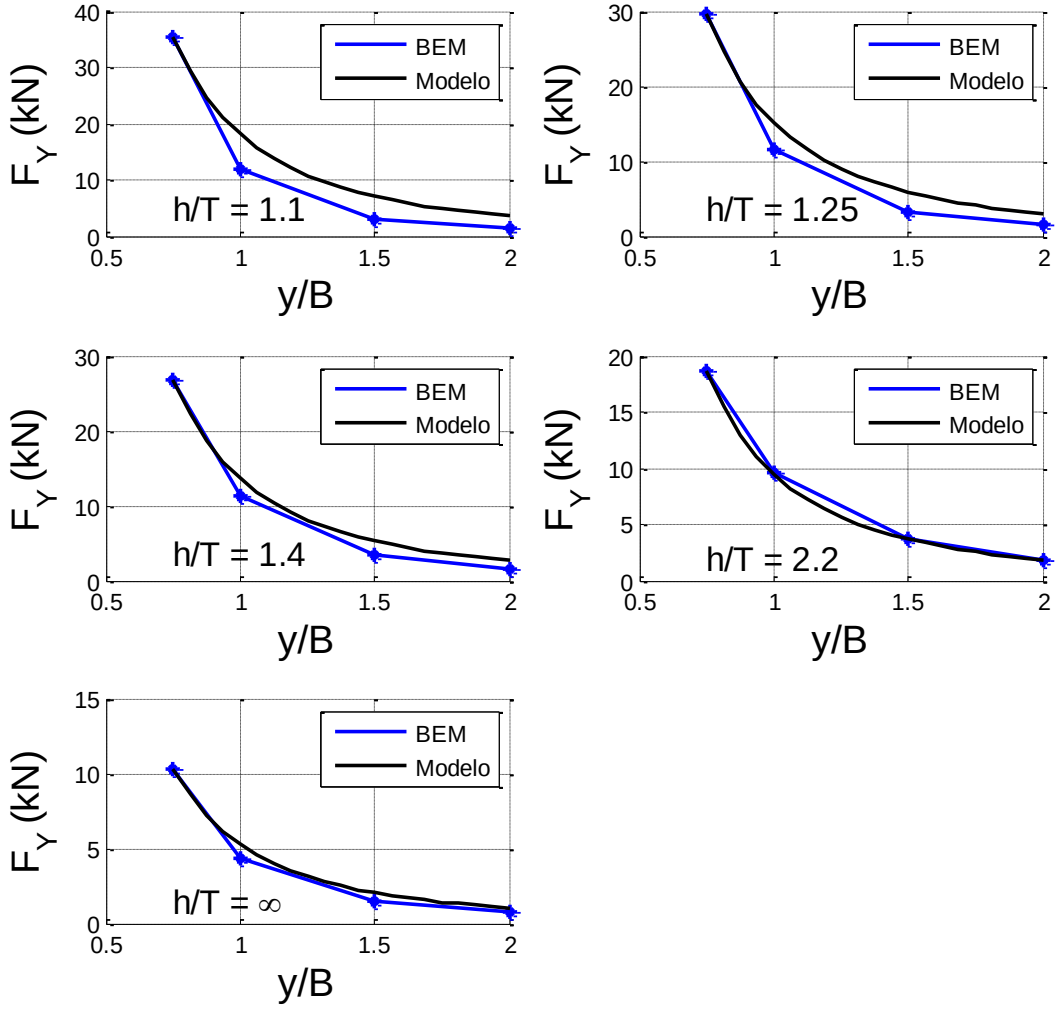


5.2. Análise geral do modelo

Análogo ao caso de interação entre navios, com o modelo matemático definido, alguns testes de compatibilidade do modelo com as curvas obtidas numericamente foram realizados com a finalidade de verificar o grau de desvio entre as respostas para os casos não utilizados para elaborar as regressões. Uma vez que o número de forças é relativamente menor e existe apenas um navio em análise, a verificação é mais simples.

Inicialmente, verifica-se a coerência das curvas de força em função da distância à margem para diferentes parâmetros de calado e profundidade, como mostra a Figura 62.

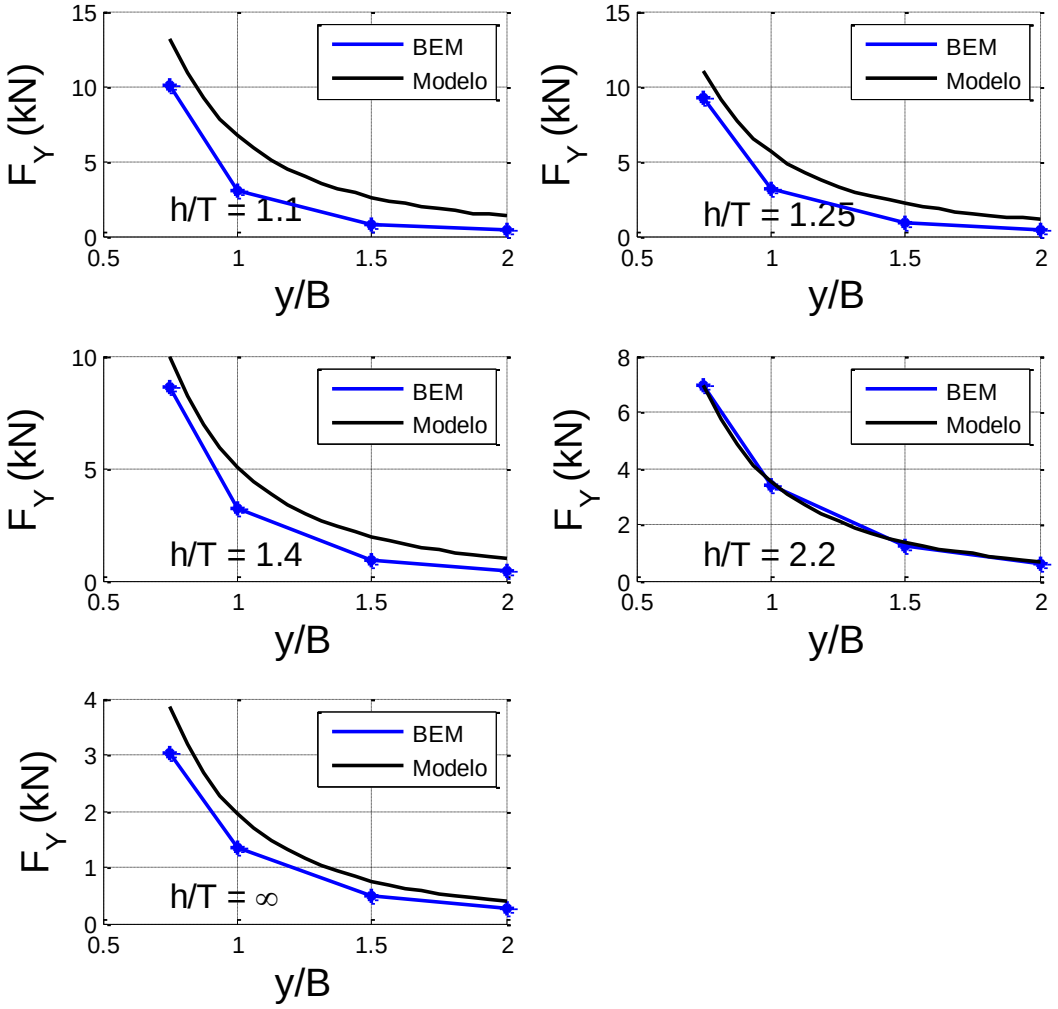
Figura 62 – Força lateral de sucção em função da distância a margem (T=15,5m).



No caso do navio carregado, observamos uma boa concordância dos dados com os resultados do BEM, apenas superestimando a intensidade da força para maiores distâncias da margem, onde os resultados são menos significativos na interação. Não ocorre um erro considerável para uma grande variação da folga sob a quilha.

Para uma análise específica do calado, a Figura 63 apresenta os resultados para o navio em condição de lastro.

Figura 63 – Força lateral de sucção em função da distância a margem (T=10,0m).



Nos casos do navio em lastro percebe-se que os esforços são superestimados na maioria dos casos, principalmente para os casos com baixas folgas sob a quilha. Contudo, a tendência principal da curva é respeitada e o modelo segue a linha de tendência estimada pelo BEM.

Para avaliar melhor o erro encontrado em termos de valores absolutos, é feita uma análise similar de interação entre navios, seguindo o padrão utilizado por Lataire (2014) para a avaliação dos erros.

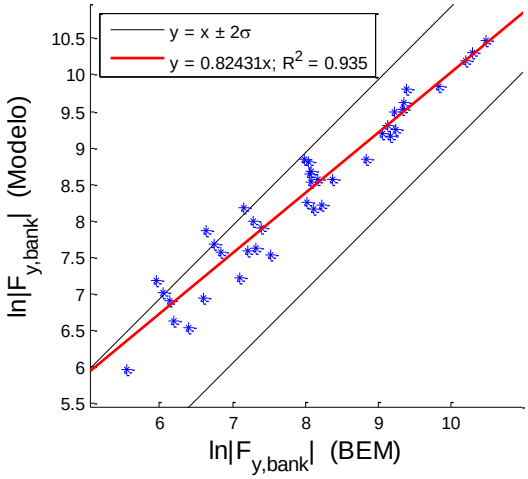
Os resultados da média e do desvio padrão do erro podem ser observados na Tabela 19.

Tabela 19 – Variações do coeficiente de correlação e largura da faixa de dados.

	Geral
	Navio margem
Média do erro (μ)	19,95%
Desvio padrão do erro (σ)	22,60%

A Figura 64 apresenta uma comparação caso a caso para todos os resultados simulados.

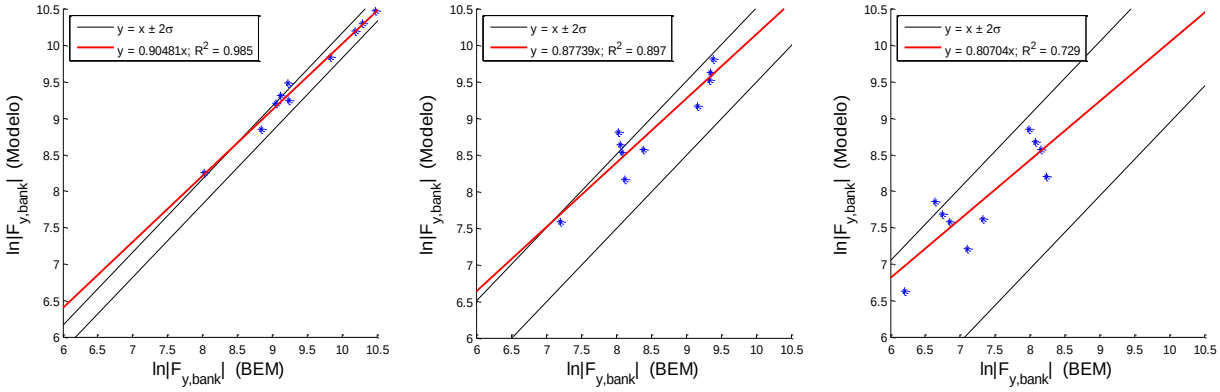
Figura 64 – Comparação das forças para os casos simulados do BEM.



É possível observar que o desvio na estimativa é tanto pior quanto menor o valor de esforço, ou seja, para distâncias em relação à margem maiores, como pôde ser observado previamente na Figura 62 e na Figura 63.

Isso pode ser constatado mais claramente para uma análise individual das distâncias. Selecionando apenas os valores de forças para pontos equidistantes da margem, obtêm-se os resultados apresentados na Figura 65.

Figura 65 – Resultados de distâncias para casos y/B=0,75 (esq.), y/B=1 (centro), y/B=1,5 (dir.)



Pode-se ver que o coeficiente angular da reta de regressão é tanto mais próximo de 1 quanto menor a distância y/B, assim como o valor de R^2, comprovando que o modelo desenvolvido é mais acurado para os casos de menores distâncias com a margem, equivalente a maiores forças.

A média e o desvio padrão dos dados seguem a mesma tendência, perdendo acurácia e precisão para maiores distâncias relativas à margem.

Tabela 20 – Variações do coeficiente de correlação e largura da faixa de dados.

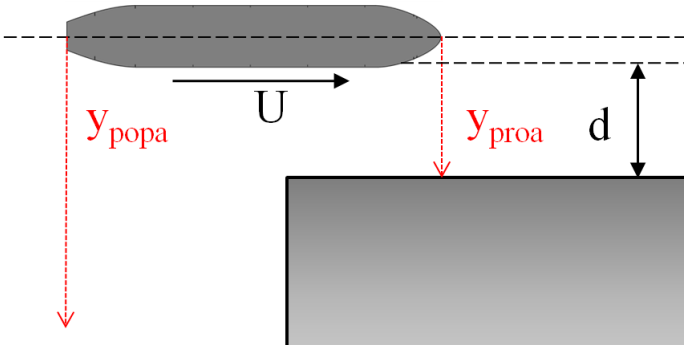
	y/B = 0,75	y/B = 1,00	y/B = 1,50
Média do erro (μ)	3,12%	14,40%	29,49%
Desvio padrão do erro (σ)	4,31%	12,33%	25,70%

5.3. Generalização do modelo

Os casos base apresentam margem vertical, sem variações de inclinação do banco ou de forma ao longo da direção vertical. Além disso, consideraram-se apenas margens retilíneas e paralelas ao eixo longitudinal do navio.

Nesta seção apresenta-se uma proposta de generalização do modelo obtido, considerando casos mais gerais nos quais haja margens não retilíneas ou não paralelas ao eixo do navio. Neste caso, serão consideradas as distâncias de um ponto da proa e um da popa à margem, como apresentado na Figura 66.

Figura 66 – Medição das distâncias à margem a partir da proa e da popa.



A modelagem de esforços adotada para a aplicação em simuladores de manobra foi a escolha de uma distância equivalente para o cálculo das forças. Similar ao modelo adotado por Lataire (2014), a medição das distâncias em relação ao meio são baseadas nas distâncias laterais da proa e da popa. Contudo, o trabalho em questão modela forças aplicadas nesses pontos, enquanto que neste trabalho adotou-se uma distância equivalente para a aplicação das forças e momentos aplicado na meia nau, provenientes dos resultados do modelo desenvolvido previamente.

Uma vez que a distância adotada é lateral ao navio, o efeito de margem não prevê forças geradas por obstáculos a frente do navio. Esse modelo se enquadra na definição apresentada por Lataire (2014) para a consideração do efeito de margem, referido como reações hidrodinâmicas (quasi) estacionárias causadas pela geometria paralela ao curso do navio. Contudo, uma simplificação do trabalho é a não consideração do efeito da força de “surge”, que é relevante na navegação em

canais, uma vez que seria necessária uma análise mais detalhada das condições das margens, além de um estudo considerando os efeitos de fundo e de margem em ambos os lados, definindo um canal de navegação. Uma vez que não foi feito o estudo detalhado das forças de *surge*, manteve-se o padrão adotado na maior parte dos trabalhos, como Kijima e Lee (2002) e Duffy (2008), focando o estudo nas forças de *sway* e no momento de *yaw*.

Baseada nessa medição de distâncias a partir da proa e popa, um modelo qualitativo foi adotado para representar a distância equivalente de interação, dada pela média harmônica das distâncias elevadas a um expoente de correção, como apresentado na equação (53).

$$\left(\frac{1}{y_{eq}}\right)^n = \frac{\left(\frac{1}{y_{proa}}\right)^n + \left(\frac{1}{y_{popa}}\right)^n}{2} \tag{53}$$

Contudo, uma vez que os expoentes são referentes à função de distância, foram adotados os coeficientes das funções de regressão obtidos para todos os esforços.

$$y_{eq} = \left[\frac{2}{\left(\frac{1}{y_{proa}}\right)^{km_{2y}} + \left(\frac{1}{y_{popa}}\right)^{km_{2y}}}\right]^{1/km_{2y}} \tag{54}$$

A escolha da média harmônica se deve ao fato de que o resultado da média gera valores mais próximos aos termos de menor valor, ou seja, a média das distâncias se aproxima dos valores de menores distâncias medidas, gerando esforços hidrodinâmicos mais pronunciados, o que é qualitativamente mais esperado. Desse modo, os esforços são dados por:

$$C_{F_Y}\left(\frac{y}{B},\frac{h}{T},\frac{T}{B}\right) = \frac{KM_{F_y}}{3{,}99\,.\,10^7}\,.\,F_Y^{ase}\left(\frac{h}{T}\right).\left(\frac{y_{eq}}{B}\right)^{km_{2y}}.\left(\frac{T}{B}\right)^{km_{3y}} \tag{55}$$

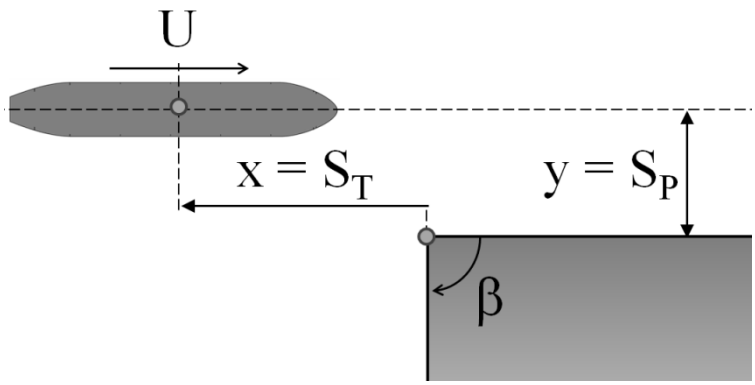
5.4. Casos de Verificação

A verificação do modelo proposto é realizada através da comparação com resultados obtidos em outros trabalhos, conforme descrito nas próximas seções.

5.4.1. Ressalto rampa

A verificação é realizada para uma condição de aproximação do navio a um ressalto na geometria de uma margem paralela, com diferentes ângulos, como apresentado na Figura 67. O ângulo β define a rampa que se apresenta antes do encontro do navio com a margem paralela.

Figura 67 – Ressalto rampa



Os trabalhos de referência para esses casos são os trabalhos do Lee e Lee (2008), com o navio presente na Tabela 21, e o trabalho do Lee (2012), para diferentes valores de β, com o navio tipo usado apresentado na Tabela 22.

De maneira geral, é possível verificar que, apesar dos navios tipo serem distintos, a ordem de grandeza dos esforços é similar, conforme pode ser observado nos padrões da Figura 68 à Figura 73. Uma análise crítica dos resultados é apresentada após a Figura 73.

- Caso Rampa 90° (Ressalto)

Tabela 21 – Principais dimensões do navio em estudo do trabalho de Lee e Lee (2008)

Dados dos navios	-
Comprimento total (L) [m]	98,60
Boca (B) [m]	16,50
Calado (T) [m]	6,94
Coeficiente de bloco (C_B)	0,763

Figura 68 – Teste do modelo para diferentes distâncias à margem (β=90°).

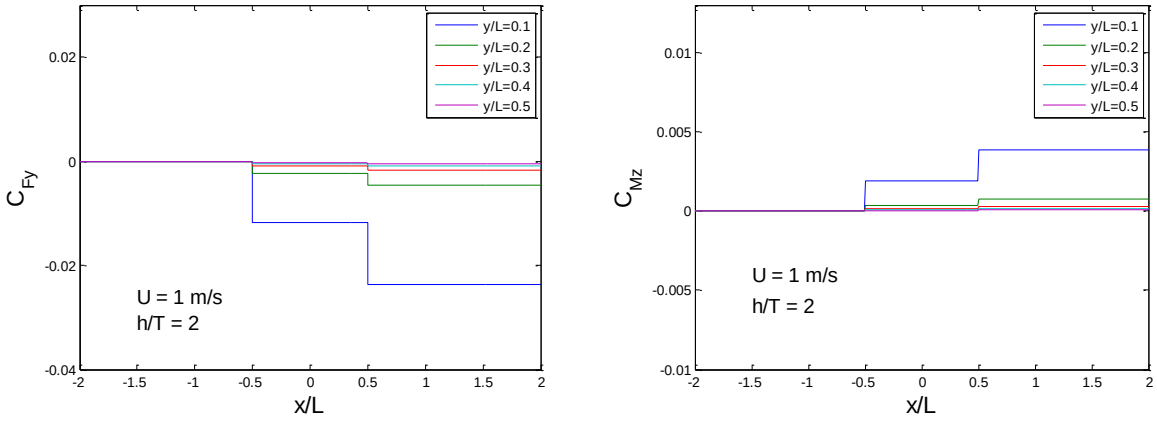
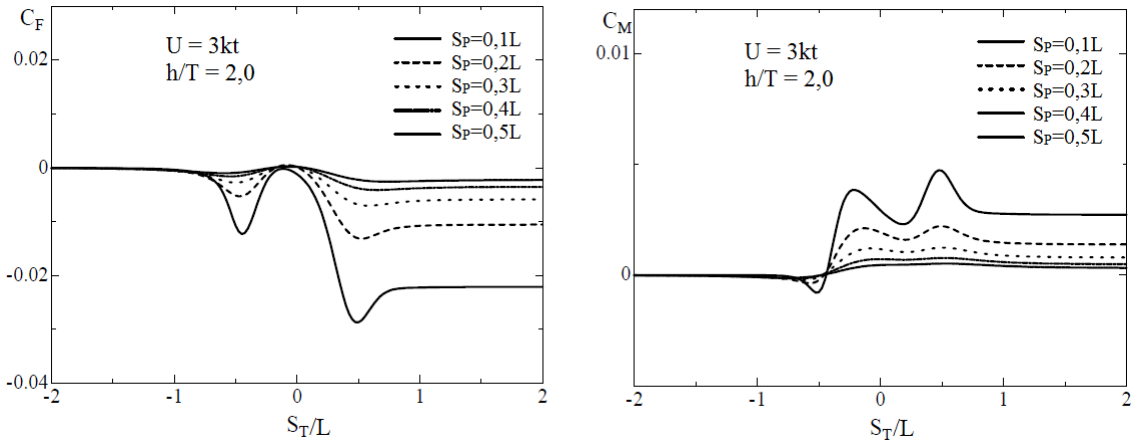


Figura 69 – Teste realizado por Lee e Lee (2008) para diferentes distâncias à margem (β=90°).



Fonte: LEE & LEE, 2008.

➢ Caso Rampa 135°

Tabela 22 – Principais dimensões do navio em estudo do trabalho de Lee (2012)

Dados dos navios	VLCC
Comprimento total (L) [m]	320
Boca (B) [m]	58
Calado (T) [m]	19,3
Coeficiente de bloco (C_B)	0,8018

Figura 70 – Teste do modelo para diferentes distâncias à margem (β=135°).

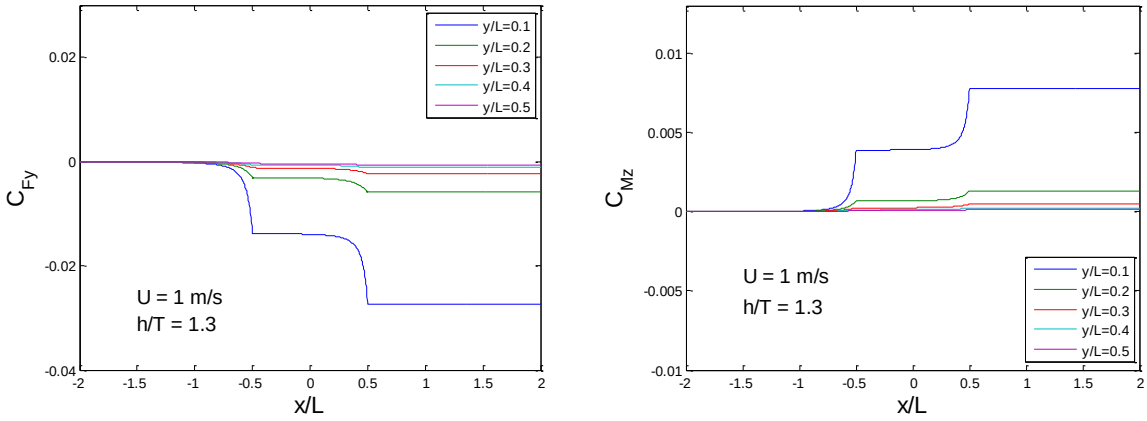
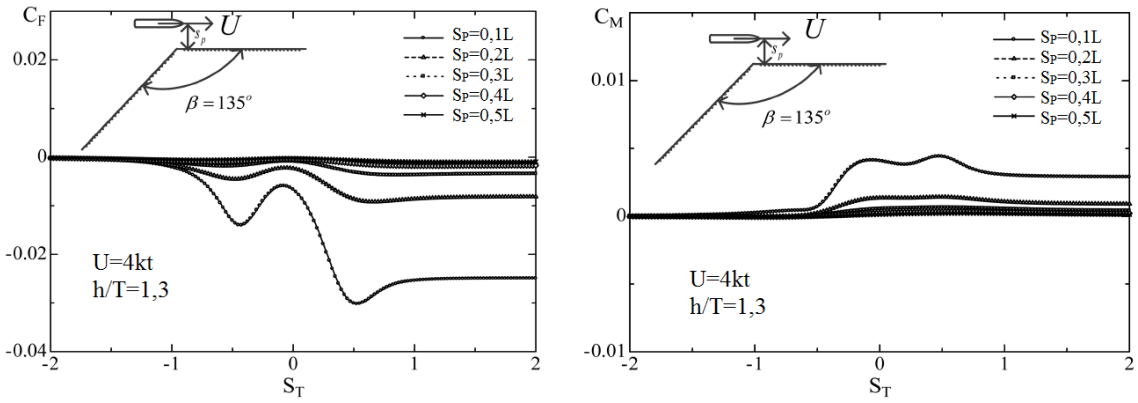


Figura 71 – Teste realizado por Lee (2012) para diferentes distâncias à margem (β=135°).



Fonte: LEE, 2012.

- Caso Rampa 45°

Tabela 23 – Principais dimensões do navio em estudo do trabalho de Lee (2012)

Dados dos navios	VLCC
Comprimento total (L) [m]	320
Boca (B) [m]	58
Calado (T) [m]	19,3
Coeficiente de bloco (C_B)	0,8018

Figura 72 – Teste do modelo para diferentes distâncias à margem (β=45°).

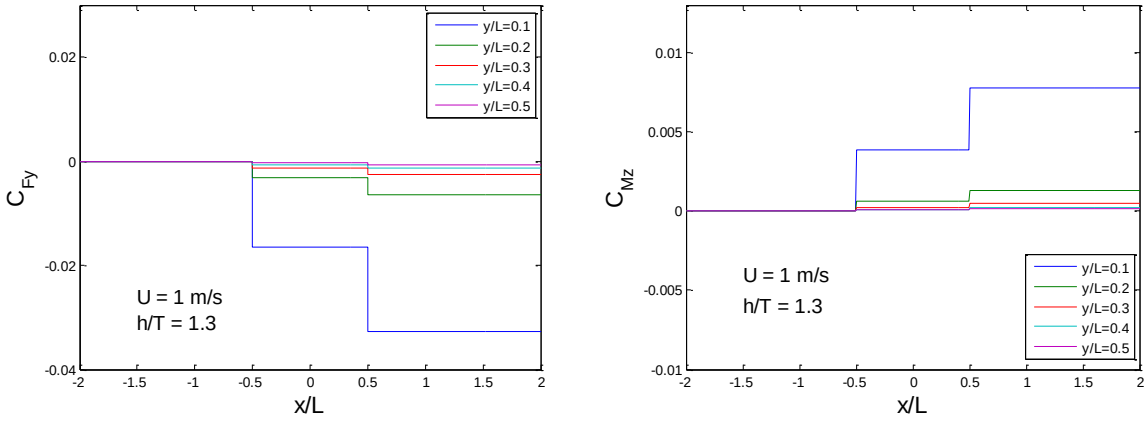
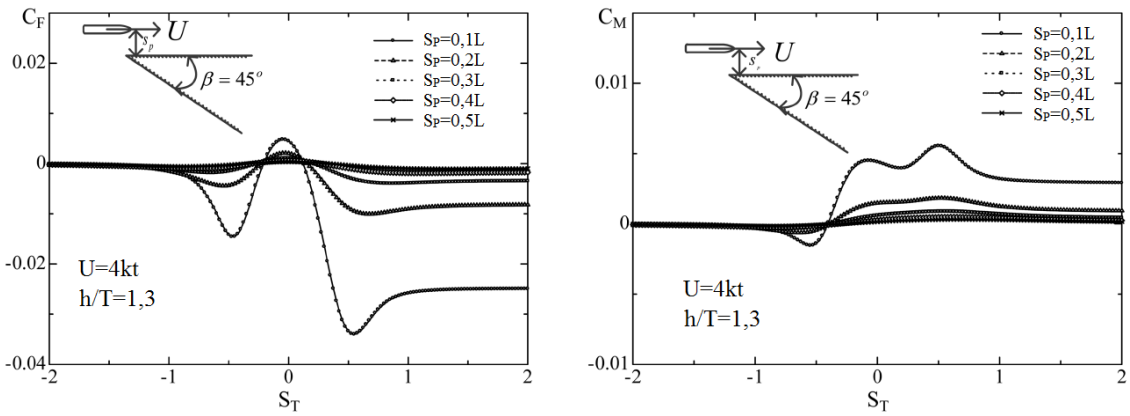


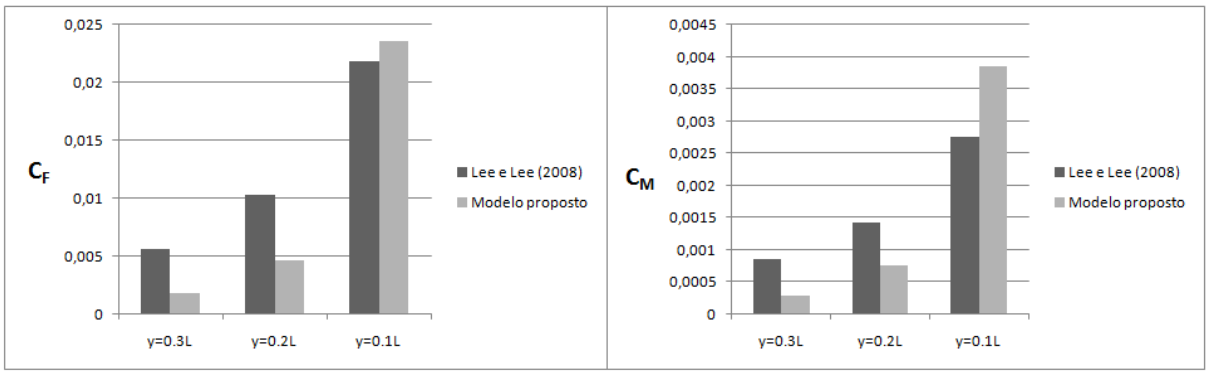
Figura 73 – Teste realizado por Lee (2012) para diferentes distâncias à margem (β=45°).



Fonte: LEE, 2012.

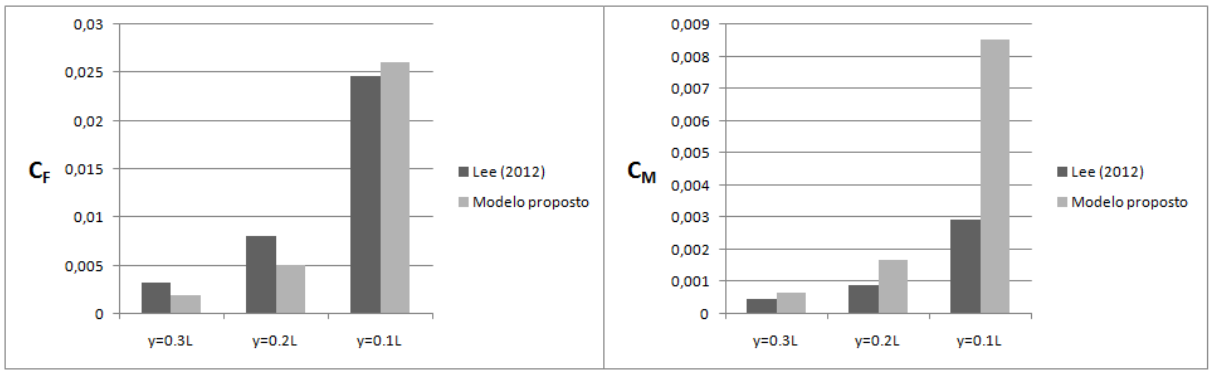
Para os casos de estudo do ressalto com $\beta = 90°$, é possível observar que a ordem de grandeza dos coeficientes é próxima a dos resultados de Lee e Lee (2008), mantendo o mesmo padrão tanto para as forças quanto para o momento. Isso pode ser observado na Figura 74, em que são apresentados os resultados comparando o coeficiente de força de sucção à margem e o coeficiente de momento de guinada, em relação às distâncias à margem para a condição de regime em $x/L = 2$.

Figura 74 – Esforços em regime no caso β=90°.



Nos casos com β no valor de 45° e 135°, as mudanças principais são no navio tipo, no coeficiente de bloco e na relação profundidade por calado, onde o navio encontra-se mais próximo do fundo. Nesses casos, o efeito da força se mantém próximo ao esperado, porém o momento em regime sofre um aumento significativo, como pode ser observado na Figura 75.

Figura 75 – Tendência dos esforços em x/L=2 para β=45° e β=135°.



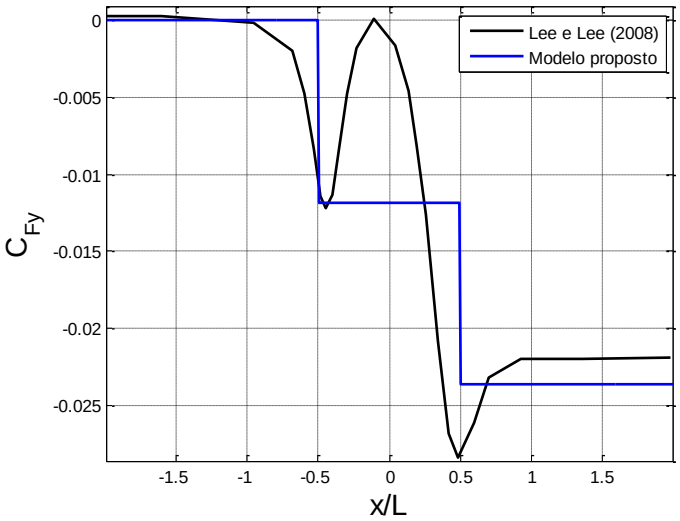
A diferença no momento se deve principalmente à curva de Lewis (1990) não apresentar uma correlação adequada para a força e o momento no caso em

questão. Nesse sentido, é necessário um estudo mais detalhado para prever o momento, e o erro associado ao método vem da aproximação ruim gerada para a curva de Lewis em alguns casos.

O modelo não prevê diferenças nos padrões de força e momento para $\beta \leq 90°$, contudo, uma vez que o modelo é bastante simplificado, essa deficiência era esperada, e a resposta foi considerada boa para os padrões observados. Contudo, é importante ressaltar que uma análise mais detalhada do modelo, considerando critérios de manobrabilidade e controlabilidade são imprescindíveis para validar a aplicação em simuladores de manobras, o que não é o escopo do trabalho.

A aproximação pode ser vista com mais detalhes na Figura 76, onde o coeficiente obtido por Lee e Lee (2008) é comparado com o resultado do modelo desenvolvido neste trabalho.

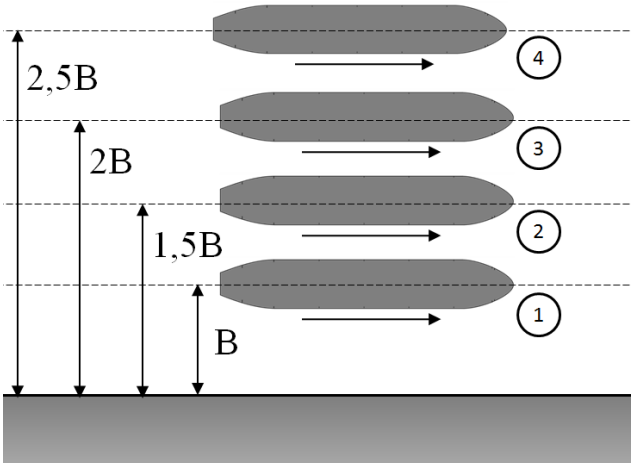
Figura 76 – Sobreposição do Coeficiente de força para a condição de β=90°.



5.5. Interação entre navio e margem no simulador de manobras

Algumas simulações utilizando o simulador de manobras foram realizadas, a fim de observar o comportamento do navio devido às forças de interação com a margem. Nesta seção, foram realizadas algumas simulações, onde o navio navega inicialmente paralelo a uma margem, para diferentes distâncias laterais iniciais (B, 1,5B, 2B e 2,5B), conforme apresentado na Figura 77. Consideraram-se também casos similares aos testados anteriormente, como o ressalto rampa e o ressalto circular.

Figura 77 – Posição inicial de cada simulação em no simulador de manobras.



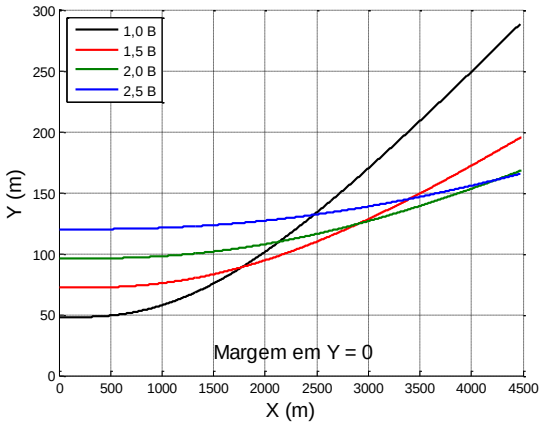
Os parâmetros iniciais utilizados nesses casos são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 – Condições iniciais das simulações.

$V_2\ (m/s)$	$\Delta\psi_0\ (°)$	$h\ (m)$	$T(m)$
4	0	19,2	16

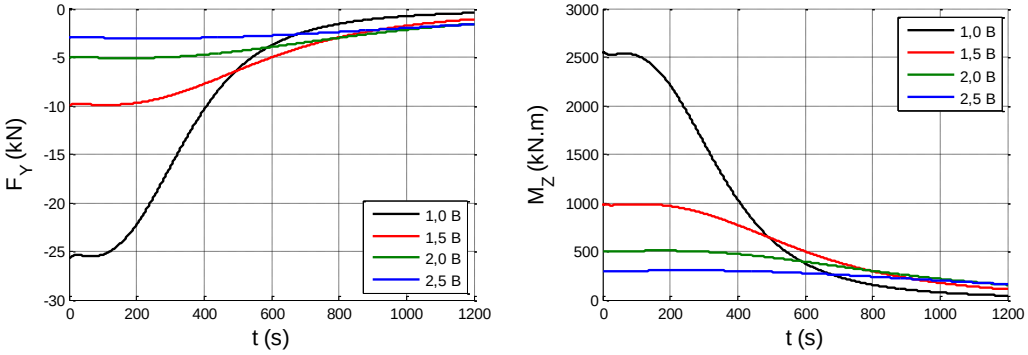
As respostas de movimento dos navios inicialmente navegando paralelamente à margem são apresentadas na Figura 78.

Figura 78 – Seguimento do CG do navio para diferentes distâncias à margem.



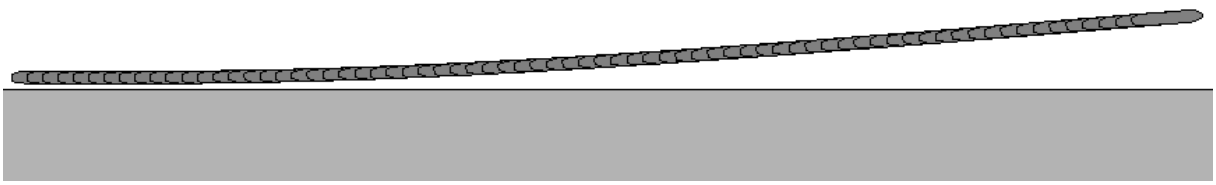
Os esforços desses casos seguem o padrão da Figura 79.

Figura 79 – Força de *sway* e momento de *yaw* atuantes no navio devido à interação com a margem no simulador de manobras.



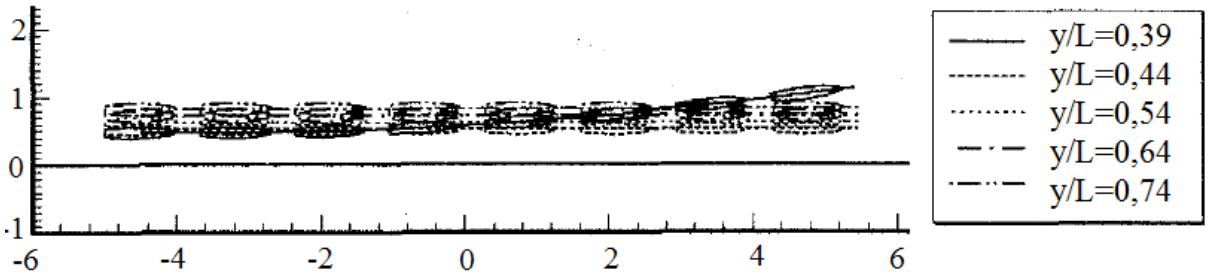
Nos casos testados, o navio não adquire velocidade de deriva relevante, o que faz com que o navio não ocorra uma colisão da popa com a margem, como mostra a Figura 80, no caso mais crítico (maior aproximação). Desse modo, a tendência de afastamento devido à influência de um leve desvio no ângulo de aproamento somada ao movimento de avanço do navio é mais relevante que a de aproximação devido à força de sucção atuante sobre o navio.

Figura 80 – Trajetória do navio carregado (y/B=1; h/T=1,2).



Um estudo semelhante realizado por Kijima e Lee (2002) mostra o comportamento de um navio próximo a uma margem paralela para um experimento com um navio em escala reduzida, conforme mostra a Figura 81. Os adimensionais L/B e T/B são semelhantes ao navio em estudo, com exceção do coeficiente de bloco, que é de 0,698. De qualquer forma, evidencia-se a tendência obtida no simulador de afastamento com a margem, tanto mais intensa quanto mais próxima da mesma é a navegação.

Figura 81 – Desvio da trajetória devido à navegação em uma margem paralela.



Fonte: KIJIMA & LEE, 2002.

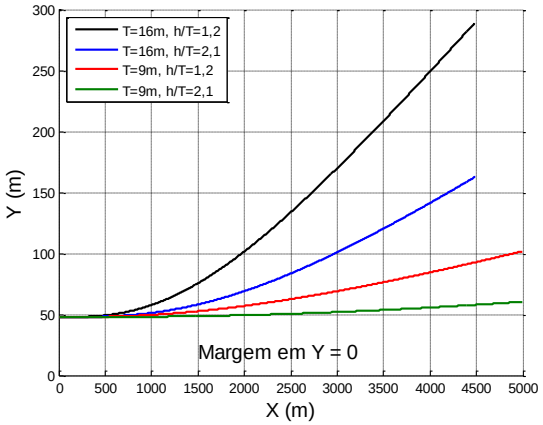
Estudos realizados por Lee e Lee (2008) mostram um efeito semelhante ao observado para o caso apresentado do navio da Tabela 21, em um simulador de manobras. Na Figura 82 é possível observar o efeito de um degrau na margem com um navio se aproximando, para distâncias da meia-nau a margem vertical de 1,10B (esquerda), 1,70B (centro) e 2,29B (direita), sem o uso do leme para a correção da direção do movimento.

Figura 82 – Desvio de trajetória do movimento do navio devido ao efeito de interação com a margem para distâncias do costado de 0,1L (esq.), 0,2L (centro) e 0,3L (dir.).

Fonte: LEE & LEE, 2008.

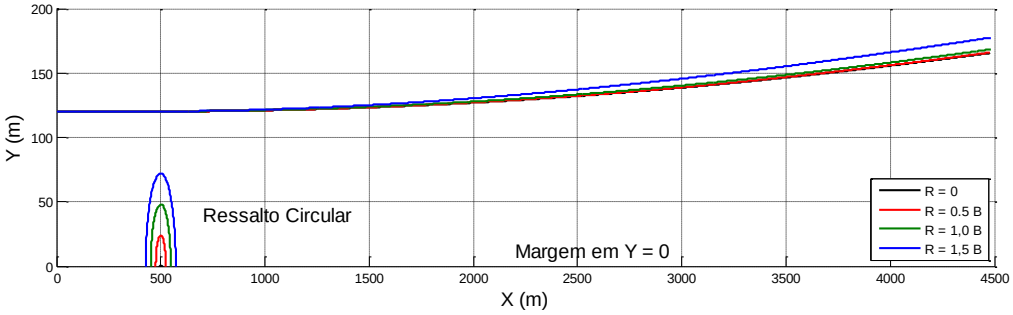
Ao avaliar os parâmetros de profundidade e calado do navio, percebe-se que o efeito de águas rasas intensifica o efeito das forças e momentos. Além disso, o aumento da carga do navio gera um aumento do calado de modo que o efeito da interação se torna mais pronunciado no movimento resultante do navio, como pode ser observado na Figura 83.

Figura 83 – Efeito da margem para diferentes calados e folgas sob a quilha



Para verificar o efeito de um ressalto na margem, a distância a margem foi mantida constante e foi posicionado um ressalto circular, com diferentes raios, com centro na coordenada [x;y]=[500;0], conforme Figura 84 a seguir.

Figura 84 – Efeito de um ressalto na margem no desvio da trajetória do CG.



O máximo desvio angular do aproamento não alcançou 5°, e na situação mais crítica, para desviar mais de 200 metros, seria necessário não utilizar os recursos do navio por 4,5 km, o que seria improvável em uma manobra real.

6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

O presente trabalho realizou estudos relacionados a modelos de interação hidrodinâmica entre navio e outros navios e navio e margem, concentrando-se na análise de modelos matemáticos para aplicação em simuladores de manobra em tempo real.

O foco do trabalho foi apresentar modelos de interação simples, de fácil implementação. Para tanto, foram utilizados os resultados obtidos pelo BEM como experimentos base para calibrar cada modelo matemático. Uma verificação dos resultados usando o próprio método, ou trabalhos similares, foi apresentada para casos não previstos, para averiguar a coerência do modelo para a aplicação em simuladores de manobra de navio. Contudo, a definição do percentual admissível de erro depende de outros fatores, tais como a influência na manobrabilidade do navio, sendo necessário um estudo mais aprofundado para definir sua aplicabilidade.

O modelo proposto no presente trabalho é versátil, uma vez que utiliza apenas alguns ensaios numéricos para a sua calibração. Para a interação entre navios e interação entre navio e margem, são necessários apenas 8 casos simulados do modelo numérico para calibrar o modelo, e ainda assim, o modelo consegue extrapolar os valores das variáveis analisadas de maneira coerente, ou seja, com acurácia aceitável dentro do intervalo de 2 desvios-padrões.

Outra vantagem é a versatilidade no uso dos ensaios de referência, que permite a integração de qualquer ensaio validado para ser usado como base para o modelo matemático proposto. Desse modo, apenas 8 ensaios de cada modelo, que podem ser facilmente obtidos tanto experimentalmente quanto numericamente, são suficientes para desenvolver os modelos completos das interações propostas.

Além disso, o modelo possui uma vantagem de ser uma função matemática simples, de modo que o tempo de processamento do cálculo completo é muito menor que o passo de tempo atual aplicado no simulador de manobras, de modo que é possível trabalhar com o modelo até mesmo em manobras Fast-Time sem qualquer prejuízo.

Em detalhes, os resultados obtidos na modelagem de interação navio-navio foram satisfatórios para os casos em que o ângulo relativo entre navios chega a 10°. Para casos com ângulos de 20°, o modelo começa a apresentar discrepâncias com as curvas de forças e momento obtidos diretamente pelo BEM, porém, permanece a necessidade de avaliação do erro, tanto do modelo numérico para casos em que os ângulos são superiores a 10°, quanto da aplicação em simuladores de manobra.

Para o navio atracado, o erro médio é inferior a 20% em todos os casos, com desvio padrão inferior a 25%. Para o navio passante os erros são maiores, mas as forças são muito pequenas e não influenciam as simulações, como foi mostrado nas simulações Fast-Time. Contudo, é importante verificar os resultados de outras embarcações e suas possíveis combinações para poder aferir o grau de influência.

No caso da interação entre navio e margem, o modelo se apresentou mais acurado para pequenas distâncias, tendendo a elevar o erro conforme o navio se afasta da margem, com taxa de atenuação inferior à esperada. Uma vez que o erro é menor para pequenas distâncias, o mesmo tende a ser coerente para a aplicação em simuladores de manobras.

Para distâncias de até 1B com a margem o erro médio foi menor que 15%, com desvio padrão da mesma ordem de grandeza. Para casos com distância de 1,5B, o erro médio da força é menor que 30%. Contudo, os esforços de interação com a margem possuem uma ordem de grandeza pequena para as ocasiões estudadas, não interferindo de forma significante na manobra para distâncias maiores, em que os erros médios são maiores.

Testes de simulações em tempo real foram realizados e os resultados das manobras responderam às expectativas em termos qualitativos, com aceitável tempo de processamento Os movimentos resultantes estão em acordo com os resultados observados na literatura e na prática, coerentes com a condição estabelecida no caso em estudo.

Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se verificar a influência das massas adicionais nos efeitos de interação estudados, uma vez que, apesar de ser desprezado neste estudo, pode ser um fator determinante em alguns casos.

Como extensão do estudo proposto, é possível verificar as condições para navegação em canais estreitos, e cruzamento e ultrapassagem de navios, com ambos os navios em movimento.

Para o refinamento das soluções propostas, o efeito colchão deve ser considerado em análise de efeitos de interação com a margem, para complementar o efeito da interação.

Visto a finalidade de aplicação em simuladores de manobras, é interessante fazer um estudo mais aprofundado para diferentes geometrias e navios-tipo, facilitando o emprego do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRIX, J. Manoeuvring Technical Manual. Hamburg: Seehafen Verlag, 1993.

BUNNIK, T.; TOXOPEUS, S. Viscous flow effects of passing ships in ports. **Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, Rotterdam, The Netherlands, June 19–24, 2011, 10p.

DUFFY, J. Modelling of Ship-Bank Interaction and Ship Squat for Ship-Handling Simulation. Thesis for Doctorate of Philosophy, **University of Tasmania**, Launceston, Australia, September 2008.

DUFFY, J. T. Prediction of bank induced sway force and yaw moment for ship handling simulator. **Australian Maritime College**, Australia, 2002.

ELOOT, K.; VANTORRE, M. Ship behaviour in Shallow and Confined Water: an Overview of Hydrodynamic Effects through EFD. **In: Assessment of Stability and Control Prediction Methods for NATO Air and Sea Vehicles. NATO. Research and Technology Organisation (RTO)**, 2011. 20p.

FLORY, J. F. **The effect of passing ships on moored ships**. Prevention First 2002 Symposium, California State Lands Commission. California. 2002.

FUCATU, C. H.; NISHIMOTO, K. An Empirical Model of Current Shadow Effect on FPSO-Shuttle Tanker. **The 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, Vancouver, Canada, 2004.

KORSMEYER, F. T.; NEWMAN, J. N.; LEE, C.-H. Computational of Ship Interaction Forces in Restricted Waters. **Journal of Ship Research**, p. 298-306, 1993.

KRIEBEL, D. P. E. **Mooring loads due to parallel passing ships.** United States Naval Academy. Annapolis. 2005.

KRIEBEL, D. P. E. **Mooring loads due to perpendicular passing ships**. United States Naval Academy. Annapolis. 2010.

LATAIRE, E. **Experiment Based Mathematical Modelling of Ship-Bank Interaction.** Thesis for Doctorate of Philosophy, Ghent University, Ghent, Belgium, 2014.

LATAIRE, E.; VANTORRE, M. Ship-Bank Interaction Induced by Irregular Bank Geometries. **27th Symposium on Naval Hydrodynamics**, Seoul, South Korea, October 5-10, 2008. 13p.

LATAIRE, E.; VANTORRE, M.; VANDENBROUCKE, J.; ELOOT, K. Ship to ship interaction forces during lightering operations. **Proceedings of the 2nd International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Ship-to-Ship Interaction**, Trondheim, Norway, 2011.

LATAIRE, E.; VANTORRE, M.; DELEFORTRIE, G.; CANDRIES, M. Mathematical modelling of forces acting on ships during lightering operations **Ocean Engineering**, v.55, 2012, p.101-115.

LATAIRE, E.; VANTORRE, M.; DELEFORTRIE, G. The Influence of the Ship ’s Speed and to an Arbitrarily Shaped Bank on Bank Effects. **34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering,** Saint John's, Canada, June 2015.

LEE, C.-K. Numerical study of hydrodynamic interaction on a vessel in restricted waterways. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, 2012.

LEE, C.-K.; KIJIMA, K.; FURUKAWA, Y.; IBARAGI, H. The Sidewall Effect of the Hydrodynamic Forces Acting on a Vessel. **The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers**, Kyushu, Japan, Vol.103, 2001. p.65-76.

LEE, C.-K.; MOON, S. -B.; OH, J. -S.; LEE, S. -M. Numerical analysis for hydrodynamic interaction effects between vessel and semi-circle bank wall. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, 2015.

LEE, C.-K.; LEE, S.-G. Hydrodynamic Forces between Vessels and Safe Maneuvering under Wind-Effect in Confined Waters. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 2007. p.837-843.

LEE, C.-K.; LEE, S.-G. Investigation of ship maneuvering with hydrodynamic effects between ship and bank. **Journal of Mechanical Science and Technology 22**, 2008. p.1230-1236.

LEWIS, E. V. **Principles of Naval Architecture**. Society of Naval Architects and Marine Engineers, v. III, 1990.

LI, D.-Q. **Development of Mathematical Model for Predicting Bank Effects**. SSPA Research Report No. 114. Göteborg, Sweden. 2000.

LINDBERG, O. BINGHAM, H. B.; ENGSIG-KARUP, A. P.; MADSEN, P. A. Towards Real time Simulation of Ship-Ship Interaction. **The 27th Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies**, 2012.

LINDBERG, O.; GLIMBERG, S. L.; BINGHAM, H. B.; ENGSIG-KARUP, A. P.; SCHJELDAHL, P. J. Real-time simulation of ship structure and ship-ship interaction. **The 3rd International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water**, Ghent, Belgium, June 3-5, 2013.

NEWMAN, J. N. **Marine Hydrodynamics.** [S.I.]: MIT Press, 1977, 402p.

NORRBIN, N. “Bank effects on a ship moving through a short dredged channel”. **10th ONR Symposium on Naval Hydrodynamics**, Cambridge, MA, USA., 1974.

NORRBIN, N. “Bank clearance and optimal section shape for ship canals”. **26th PIANC International Navigation Congress**, Brussels, Belgium, 1985. p.167-178.

OBOKATA, J. On the basic design of single point mooring systems (1st report). **Journal of the Society of Naval Architects of Japan**, v. 161, June 1987.

PAWLOWSKI, J. S. Hydrodynamic modelling for ship manoeuvring simulation. **International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvrability (MARSIM’96)**, Denmark, 1996.

PIANC. “Harbour approach channels design guidelines”, Report of Working Group no. 121, 2014.

PINKSTER, J. A. **The Influence of Passing Ships on Ships moored in Restricted Waters**. Offshore Technology Conference. [S.l.]. 2004.

PINKSTER, J. A. Suction, Seiche and Wash Effects of Passing Ships in Ports. **SNAME Annual Meeting and Expo**, Providence, RI, October 2009.

PINKSTER, J. A. Progress on real-time prediction of ship-ship-shore interactions based on potential flow. **International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water**, Hamburg, Germany, 2016.

SANTOS, E. M. D. Uma Abordagem sobre Modelos Matemáticos para Simulação de Manobras de Navios em Tempo Real. **Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE**, Rio de Janeiro, Brasil, 1999.

SEELIG, W. N. **Passing Ship Effects on Moored Ships**. Naval Facilities Engineering. USA. 2001.

SIAN, A. Y.; MAIMUN, A.; PRIYANTO, A.; AHMED, Y. M. Assessment of Ship-Bank Interactions on LNG Tanker in Shallow Water. **Jurnal Teknologi**, 2014.

SILVA, G. O.; TANNURI, E. A.; RUGGERI, F. Real-Time Prediction of Ship Interaction Forces using Simplified Models. **Proceedings of the ASME 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**, St. John's, NL, Canada, 2015. 10p.

SUTULO, S.; SOARES, C. G. Simulation of the hydrodynamic interaction forces in close-proximity manoeuvring. **Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, Estoril, Portugal, June 10–15, 2008.

SWIEGERS, P. B. **Calculation of the forces on a moored ship due to a passing container ship**, 2011, Master Thesis, Stellenbosch University.

TALSTRA, H.; BLIEK, A. J. Loads on moored ships due to passing ships in a straight harbor channel. **PIANC World Congress**, San Francisco, USA, 2014.

TANNURI, E. A.; RATEIRO, F.; FUCATU, C. H.; FERREIRA, M. D.; MASETTI, I. Q.; NISHIMOTO, K. Modular Mathematical Model for Low-Speed Maneuvering

Simulator. **Proceedings of the ASME 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**, San Francisco, CA, USA, 2014. 10p.

TARAFDER, S.; SUZUKI, K. Computation of free surface flow around a ship in shallow water using a potential based panel method. **International Shipbuilding Progress**, v. 53, p. 33-54, 2006.

OCDI. **Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan**. [s.n.]., Japan, 2012.

TRANSAS. **Navi Trainer 4000 – Mathematical Models Technical Description**. Transas Marine Ltd. Southampton, United Kingdom. 2003.

VANTORRE, M. Experimental study of bank effects on full form ship models. **Mini Symposium on Ship Manoeuvrability: Proceedings of Mini Symposium on Ship Manoeuvrability**, Fukuoka, Japan, 26 May 1995. p.85-101.

VARYANI, K. S.; MCGREGOR, R.; KRISHNANKUTTY, P.; THAVALINGAM, A. New Empirical and Generic Models to Predict Interaction Forces for Several Ships in Encounter and Overtaking Manoeuvres in a Channel. **International Shipbuilding Progress**, v. 49, n. 4, p. 237-262, 2002.

VARYANI, K. S.; VANTORRE, M. New generic equation for interaction effects on a moored containership due to a passing tanker. **Journal of Ship Research, Vol. 50, No. 3**, 2006. p.278-287.

VARYANI, K.; MCGREGOR, R.; WOLD, P. Empirical formulae to predict peak of forces and moments during interactions. **Hydronav'99 – Manoeuvring'99**, Gdansk-Ostróda, p. 338-349, 1999.

WANG, D. J.; BAKOUNTOUZIS, L.; KATORY, M. Prediction of Ship Hydrodynamic Derivates in Shallow and Restricted Waters. **International Shipbuilding Progress**, v. 452, n. 47, p. 379-396, 2000.

WANG, S. Dynamic Effects of Ship Passage on Moored Vessels. **ASCE Ports Proceedings**, California, USA, 1975.

WATAI, R. A. RUGGERI, F.; TANNURI, E. A.; WEISS, J. M. G. Evaluation of empirical and numerical methods on the prediction of hydrodynamic loads involved in the passing ship problem. **Third International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water**, Ghent, Belgium, 2013.

WATAI, R. A.; RUGGERI, F.; TANNURI, E. A. **Simulação de interação entre navio passante e ancorado para avaliação de forças e momentos hidrodinâmicos.** Escola Politécnica da USP. São Paulo, p. 120. 2011. (Relatório Técnico EPUSP/Petrobras)

WEBSTER, W. C. **Shiphandling Simulation:** Application to Waterway Design. Committee on Assessment of Shiphandling Simulation, Marine Board, Commission on Engineering and Technical Systems - National Research Council. National Academy Press, 1992. 172 p. ISBN 0-309-59802-8.

XIANG, X.; FALTINSEN, O. M. Maneuvring of two interacting Ships in calm water. **International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures**, 2010.

XIANG, X.; YANG, H.; MIAO, Q. M.; KUANG; X. Study on the Effects of Unsteady Ship to Ship Interaction by CFD Method. **2nd International Conference on Ship Manoeuvring and Confined Water: Ship to Ship Interaction**, Trondheim, Norway, 2011.

YUAN, Z.-M.; INCECIK, A. Investigation of ship-bank, ship-bottom and ship-ship interactions by using potential flow method. **International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water - 4th MASHCON**, Hamburg, Germany, May 2016.

ZOU, L.; LARSSON, L.; DELEFORTRIE, G.; LATAIRE, E. CFD prediction and validation of ship-bank interaction in a canal. **2nd International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water: Ship to Ship Interaction**, Trondheim, Norway, 2011. p.413-422.

APÊNDICE A – *Forças e momentos obtidos nas simulações do BEM*

Interação Navio-Navio: Forças sobre o navio atracado

Casos	h/T_{atr}	h/T_{pas}	h (m)	y/L	Ângulo navio atracado (°)	$F_{x,max}$ (N)	$F_{y,max}$ (N)	$M_{z,max}$ (N.m)
1	1,10	1,10	17,05	0,50	0	16300,9	67270,8	2901666,4
2	1,10	1,10	17,05	0,75	0	6459,8	24647,8	908288,1
3	1,10	1,10	17,05	1,00	0	2884,7	10837,3	333840,2
4	1,10	1,10	17,05	1,50	0	778,7	2922,7	65255,1
5	1,25	1,25	19,38	0,50	0	15846,7	58607,1	2563257,5
6	1,25	1,25	19,38	0,75	0	6309,8	21722,8	810661,4
7	1,25	1,25	19,38	1,00	0	2823,2	9587,2	299255,6
8	1,25	1,25	19,38	1,50	0	763,1	2592,2	58738,7
9	1,40	1,40	21,70	0,50	0	15545,6	53322,4	2359381,6
10	1,40	1,40	21,70	0,75	0	6212,9	19972,6	753224,5
11	1,40	1,40	21,70	1,00	0	2785,2	8849,0	279166,0
12	1,40	1,40	21,70	1,50	0	754,1	2399,9	54987,6
13	1,10	1,71	17,05	0,50	0	10273,9	42071,2	1831008,2
14	1,10	1,71	17,05	0,75	0	4064,7	15484,4	572732,2
15	1,10	1,71	17,05	1,00	0	1812,8	6807,6	210152,5
16	1,10	1,71	17,05	1,50	0	488,7	1834,4	40995,5
17	1,25	1,94	19,38	0,50	0	10033,1	36917,5	1626085,4
18	1,25	1,94	19,38	0,75	0	3984,0	13709,0	513152,8
19	1,25	1,94	19,38	1,00	0	1779,8	6045,5	189014,8
20	1,25	1,94	19,38	1,50	0	480,3	1632,5	37015,1
21	1,40	2,17	21,70	0,50	0	9849,8	33641,9	1497014,1
22	1,40	2,17	21,70	0,75	0	3927,9	12622,6	477187,9
23	1,40	2,17	21,70	1,00	0	1758,6	5588,9	176547,6
24	1,40	2,17	21,70	1,50	0	475,6	1514,1	34707,6
25	1,71	1,10	17,05	0,50	0	10330,0	29979,7	1379794,8
26	1,71	1,10	17,05	0,75	0	4082,8	10979,0	431446,7
27	1,71	1,10	17,05	1,00	0	1820,4	4820,8	158320,4
28	1,71	1,10	17,05	1,50	0	490,4	1297,7	30866,4
29	1,94	1,25	19,38	0,50	0	10124,6	28069,8	1299660,1
30	1,94	1,25	19,38	0,75	0	4020,8	10400,6	410629,3
31	1,94	1,25	19,38	1,00	0	1796,8	4587,1	151331,8
32	1,94	1,25	19,38	1,50	0	485,0	1239,1	29600,2
33	2,17	1,40	21,70	0,50	0	9950,8	26609,3	1238671,4
34	2,17	1,40	21,70	0,75	0	3968,0	9965,1	395072,4
35	2,17	1,40	21,70	1,00	0	1777,0	4413,0	146180,0

Casos	h/T_{atr}	h/T_{pas}	h (m)	y/L	Ângulo navio atracado (°)	$F_{x,max}$ (N)	$F_{y,max}$ (N)	$M_{z,max}$ (N.m)
36	2,17	1,40	21,70	1,50	0	480,6	1196,0	28684,4
37	1,71	1,71	17,05	0,50	0	6513,2	18785,4	871058,3
38	1,71	1,71	17,05	0,75	0	2569,0	6898,5	272046,2
39	1,71	1,71	17,05	1,00	0	1144,0	3028,3	99660,6
40	1,71	1,71	17,05	1,50	0	307,8	814,5	19391,6
41	1,94	1,94	19,38	0,50	0	6411,5	17699,5	824698,4
42	1,94	1,94	19,38	0,75	0	2538,7	6564,2	259923,6
43	1,94	1,94	19,38	1,00	0	1132,7	2892,5	95582,2
44	1,94	1,94	19,38	1,50	0	305,3	780,3	18653,2
45	2,17	2,17	21,70	0,50	0	6305,8	16800,8	786094,6
46	2,17	2,17	21,70	0,75	0	2508,6	6298,2	250282,4
47	2,17	2,17	21,70	1,00	0	1122,0	2787,2	92444,4
48	2,17	2,17	21,70	1,50	0	303,1	754,6	18105,4
49	1,10	1,10	17,05	0,50	10	18753,4	70490,1	3112879,2
50	1,10	1,10	17,05	0,75	10	7006,3	25111,1	1006901,5
51	1,10	1,10	17,05	1,00	10	3021,5	10908,2	372000,4
52	1,10	1,10	17,05	1,50	10	784,1	2910,3	72533,8
53	1,25	1,25	19,38	0,50	10	17981,4	61407,8	2747001,2
54	1,25	1,25	19,38	0,75	10	6801,9	22154,6	899006,9
55	1,25	1,25	19,38	1,00	10	2948,5	9663,5	333645,0
56	1,25	1,25	19,38	1,50	10	768,3	2584,4	65335,8
57	1,40	1,40	21,70	0,50	10	17468,6	55865,7	2530192,7
58	1,40	1,40	21,70	0,75	10	6675,2	20386,2	835492,9
59	1,40	1,40	21,70	1,00	10	2904,6	8927,8	311286,2
60	1,40	1,40	21,70	1,50	10	759,6	2394,7	61171,1
61	1,10	1,71	17,05	0,50	10	11817,0	44033,9	1966956,4
62	1,10	1,71	17,05	0,75	10	4411,2	15772,9	635449,9
63	1,10	1,71	17,05	1,00	10	1899,5	6852,6	234256,3
64	1,10	1,71	17,05	1,50	10	492,1	1826,7	45570,9
65	1,25	1,94	19,38	0,50	10	11376,7	38659,4	1748350,2
66	1,25	1,94	19,38	0,75	10	4296,9	13981,5	569779,2
67	1,25	1,94	19,38	1,00	10	1859,2	6094,0	210850,0
68	1,25	1,94	19,38	1,50	10	483,6	1627,6	41179,0
69	1,40	2,17	21,70	0,50	10	11065,2	35227,5	1609727,4
70	1,40	2,17	21,70	0,75	10	4221,8	12886,1	529853,1
71	1,40	2,17	21,70	1,00	10	1834,3	5639,0	196952,6
72	1,40	2,17	21,70	1,50	10	479,0	1510,8	38616,5
73	1,71	1,10	17,05	0,50	10	11446,6	31660,0	1482252,7
74	1,71	1,10	17,05	0,75	10	4365,7	11262,4	479444,4
75	1,71	1,10	17,05	1,00	10	1896,7	4881,3	176792,8

Casos	h/T_{atr}	h/T_{pas}	h (m)	y/L	Ângulo navio atracado (°)	$F_{x,max}$ (N)	$F_{y,max}$ (N)	$M_{z,max}$ (N.m)
76	1,71	1,10	17,05	1,50	10	495,8	1298,7	34367,4
77	1,94	1,25	19,38	0,50	10	11178,5	29607,9	1394009,9
78	1,94	1,25	19,38	0,75	10	4295,0	10671,9	456036,8
79	1,94	1,25	19,38	1,00	10	1872,0	4646,4	168922,2
80	1,94	1,25	19,38	1,50	10	490,7	1240,6	32949,3
81	2,17	1,40	21,70	0,50	10	10951,9	28041,3	1329078,9
82	2,17	1,40	21,70	0,75	10	4234,9	10227,2	438697,7
83	2,17	1,40	21,70	1,00	10	1851,7	4471,6	163140,1
84	2,17	1,40	21,70	1,50	10	486,6	1198,0	31924,5
85	1,71	1,71	17,05	0,50	10	7220,1	19818,2	937634,9
86	1,71	1,71	17,05	0,75	10	2748,7	7076,8	302573,7
87	1,71	1,71	17,05	1,00	10	1192,4	3066,2	111328,2
88	1,71	1,71	17,05	1,50	10	311,2	815,2	21592,5
89	1,94	1,94	19,38	0,50	10	7080,4	18658,8	887776,3
90	1,94	1,94	19,38	0,75	10	2713,3	6736,3	289026,7
91	1,94	1,94	19,38	1,00	10	1180,4	2930,2	106750,7
92	1,94	1,94	19,38	1,50	10	308,9	781,4	20767,1
93	2,17	2,17	21,70	0,50	10	6940,9	17695,5	845970,1
94	2,17	2,17	21,70	0,75	10	2678,5	6464,5	278209,0
95	2,17	2,17	21,70	1,00	10	1169,4	2824,7	103218,4
96	2,17	2,17	21,70	1,50	10	306,8	755,9	20153,7
97	1,10	1,10	17,05	0,50	20	26350,3	77912,0	3496379,6
98	1,10	1,10	17,05	0,75	20	8900,1	26071,7	1132843,0
99	1,10	1,10	17,05	1,00	20	3665,1	11017,5	416399,2
100	1,10	1,10	17,05	1,50	20	906,8	2863,9	80027,2
101	1,25	1,25	19,38	0,50	20	24493,1	67722,9	3059321,4
102	1,25	1,25	19,38	0,75	20	8438,6	23054,4	1010970,1
103	1,25	1,25	19,38	1,00	20	3499,4	9787,0	373545,2
104	1,25	1,25	19,38	1,50	20	870,6	2550,9	72118,0
105	1,40	1,40	21,70	0,50	20	23302,2	61508,0	2804318,0
106	1,40	1,40	21,70	0,75	20	8152,2	21248,7	939287,2
107	1,40	1,40	21,70	1,00	20	3401,4	9063,5	348483,5
108	1,40	1,40	21,70	1,50	20	850,2	2369,0	67524,4
109	1,10	1,71	17,05	0,50	20	16546,3	48511,5	2192539,9
110	1,10	1,71	17,05	0,75	20	5603,5	16376,5	715496,8
111	1,10	1,71	17,05	1,00	20	2304,7	6921,2	262325,8
112	1,10	1,71	17,05	1,50	20	569,2	1797,7	50281,9
113	1,25	1,94	19,38	0,50	20	15447,2	42535,4	1942181,4
114	1,25	1,94	19,38	0,75	20	5330,6	14550,9	641611,7
115	1,25	1,94	19,38	1,00	20	2207,0	6173,6	236183,0

Casos	h/T_{atr}	h/T_{pas}	h (m)	y/L	Ângulo navio atracado (°)	$F_{x,max}$ (N)	$F_{y,max}$ (N)	$M_{z,max}$ (N.m)
116	1,25	1,94	19,38	1,50	20	548,1	1606,7	45460,8
117	1,40	2,17	21,70	0,50	20	14715,1	38706,0	1781651,2
118	1,40	2,17	21,70	0,75	20	5156,2	13430,3	596331,5
119	1,40	2,17	21,70	1,00	20	2148,4	5725,9	220577,4
120	1,40	2,17	21,70	1,50	20	536,2	1494,8	42633,6
121	1,71	1,10	17,05	0,50	20	14754,7	35388,1	1666430,5
122	1,71	1,10	17,05	0,75	20	5160,7	11859,9	540594,9
123	1,71	1,10	17,05	1,00	20	2155,5	5000,5	198333,8
124	1,71	1,10	17,05	1,50	20	539,9	1295,0	37975,2
125	1,94	1,25	19,38	0,50	20	14238,4	33003,9	1554424,0
126	1,94	1,25	19,38	0,75	20	5043,5	11246,7	513567,2
127	1,94	1,25	19,38	1,00	20	2117,0	4766,1	189381,1
128	1,94	1,25	19,38	1,50	20	532,1	1239,0	36398,5
129	2,17	1,40	21,70	0,50	20	13804,6	31186,4	1474151,3
130	2,17	1,40	21,70	0,75	20	4949,4	10784,7	493739,4
131	2,17	1,40	21,70	1,00	20	2085,7	4591,7	182824,6
132	2,17	1,40	21,70	1,50	20	525,9	1197,8	35259,9
133	1,71	1,71	17,05	0,50	20	9276,6	22101,3	1047822,7
134	1,71	1,71	17,05	0,75	20	3250,0	7452,3	341454,5
135	1,71	1,71	17,05	1,00	20	1355,4	3141,5	124924,2
136	1,71	1,71	17,05	1,50	20	338,9	812,9	23860,8
137	1,94	1,94	19,38	0,50	20	8988,4	20769,6	987973,3
138	1,94	1,94	19,38	0,75	20	3186,7	7100,5	325940,2
139	1,94	1,94	19,38	1,00	20	1335,3	3006,1	119739,5
140	1,94	1,94	19,38	1,50	20	335,0	780,4	22944,9
141	2,17	2,17	21,70	0,50	20	8723,1	19654,9	937587,7
142	2,17	2,17	21,70	0,75	20	3131,1	6817,7	313465,4
143	2,17	2,17	21,70	1,00	20	1317,4	2901,0	115720,2
144	2,17	2,17	21,70	1,50	20	331,7	755,7	22262,8

Interação Navio-Navio: Esforços atuantes sobre o navio passante

Casos	h/T_{atr}	h/T_{pas}	h (m)	y/L	Ângulo navio atracado (°)	$F_{x,max}$ (N)	$F_{y,max}$ (N)	$M_{z,max}$ (N.m)
1	1,10	1,10	17,05	0,50	0	600,1	1947,3	107080,6
2	1,10	1,10	17,05	0,75	0	80,8	268,1	11208,4
3	1,10	1,10	17,05	1,00	0	16,2	55,1	1833,9
4	1,10	1,10	17,05	1,50	0	1,3	4,8	113,0
5	1,25	1,25	19,38	0,50	0	502,4	1378,5	80733,1
6	1,25	1,25	19,38	0,75	0	69,2	196,1	8663,8
7	1,25	1,25	19,38	1,00	0	14,0	40,8	1431,0
8	1,25	1,25	19,38	1,50	0	1,2	3,6	88,9
9	1,40	1,40	21,70	0,50	0	448,3	1109,4	67479,5
10	1,40	1,40	21,70	0,75	0	62,9	162,2	7422,9
11	1,40	1,40	21,70	1,00	0	12,8	34,0	1237,0
12	1,40	1,40	21,70	1,50	0	1,1	3,0	77,4
13	1,10	1,71	17,05	0,50	0	242,0	547,0	32800,0
14	1,10	1,71	17,05	0,75	0	32,5	75,1	3436,7
15	1,10	1,71	17,05	1,00	0	6,5	15,6	564,7
16	1,10	1,71	17,05	1,50	0	0,5	1,4	35,3
17	1,25	1,94	19,38	0,50	0	203,8	419,4	26445,7
18	1,25	1,94	19,38	0,75	0	28,0	59,5	2835,0
19	1,25	1,94	19,38	1,00	0	5,6	12,5	469,4
20	1,25	1,94	19,38	1,50	0	0,5	1,1	29,5
21	1,40	2,17	21,70	0,50	0	182,2	351,9	22851,9
22	1,40	2,17	21,70	0,75	0	25,5	51,4	2513,5
23	1,40	2,17	21,70	1,00	0	5,2	10,9	419,9
24	1,40	2,17	21,70	1,50	0	0,4	1,0	26,5
25	1,71	1,10	17,05	0,50	0	265,5	767,5	47630,4
26	1,71	1,10	17,05	0,75	0	35,8	105,3	4939,3
27	1,71	1,10	17,05	1,00	0	7,1	21,5	799,2
28	1,71	1,10	17,05	1,50	0	0,6	1,8	48,5
29	1,94	1,25	19,38	0,50	0	244,2	614,5	39503,8
30	1,94	1,25	19,38	0,75	0	33,5	86,7	4207,4
31	1,94	1,25	19,38	1,00	0	6,7	17,8	687,6
32	1,94	1,25	19,38	1,50	0	0,6	1,6	42,1
33	2,17	1,40	21,70	0,50	0	226,7	518,2	34305,3
34	2,17	1,40	21,70	0,75	0	31,8	75,3	3752,8
35	2,17	1,40	21,70	1,00	0	6,4	15,7	619,7
36	2,17	1,40	21,70	1,50	0	0,5	1,4	38,3
37	1,71	1,71	17,05	0,50	0	107,1	215,9	14598,1
38	1,71	1,71	17,05	0,75	0	14,4	29,4	1511,9

Casos	h/T_{atr}	h/T_{pas}	h (m)	y/L	Ângulo navio atracado (°)	$F_{x,max}$ (N)	$F_{y,max}$ (N)	$M_{z,max}$ (N.m)
39	1,71	1,71	17,05	1,00	0	2,9	6,0	245,5
40	1,71	1,71	17,05	1,50	0	0,2	0,5	15,1
41	1,94	1,94	19,38	0,50	0	99,1	187,2	12941,3
42	1,94	1,94	19,38	0,75	0	13,6	26,2	1375,0
43	1,94	1,94	19,38	1,00	0	2,7	5,4	225,2
44	1,94	1,94	19,38	1,50	0	0,2	0,5	13,9
45	2,17	2,17	21,70	0,50	0	92,2	164,5	11615,6
46	2,17	2,17	21,70	0,75	0	12,9	23,8	1269,5
47	2,17	2,17	21,70	1,00	0	2,6	5,0	210,0
48	2,17	2,17	21,70	1,50	0	0,2	0,4	13,1
49	1,10	1,10	17,05	0,50	10	822,1	2554,9	99266,7
50	1,10	1,10	17,05	0,75	10	101,2	321,8	9972,2
51	1,10	1,10	17,05	1,00	10	19,4	63,0	1621,4
52	1,10	1,10	17,05	1,50	10	1,6	5,2	100,0
53	1,25	1,25	19,38	0,50	10	683,3	1796,5	74642,5
54	1,25	1,25	19,38	0,75	10	86,3	234,9	7744,3
55	1,25	1,25	19,38	1,00	10	16,7	46,6	1271,2
56	1,25	1,25	19,38	1,50	10	1,4	3,9	79,1
57	1,40	1,40	21,70	0,50	10	605,2	1435,3	62793,5
58	1,40	1,40	21,70	0,75	10	78,1	193,8	6684,9
59	1,40	1,40	21,70	1,00	10	15,2	38,8	1105,3
60	1,40	1,40	21,70	1,50	10	1,2	3,3	69,1
61	1,10	1,71	17,05	0,50	10	331,2	719,8	30347,7
62	1,10	1,71	17,05	0,75	10	40,7	90,0	3059,2
63	1,10	1,71	17,05	1,00	10	7,8	17,6	499,9
64	1,10	1,71	17,05	1,50	10	0,6	1,5	31,3
65	1,25	1,94	19,38	0,50	10	277,0	548,2	24420,2
66	1,25	1,94	19,38	0,75	10	34,9	71,0	2535,1
67	1,25	1,94	19,38	1,00	10	6,7	14,0	417,4
68	1,25	1,94	19,38	1,50	10	0,5	1,2	26,3
69	1,40	2,17	21,70	0,50	10	245,8	456,2	21239,8
70	1,40	2,17	21,70	0,75	10	31,7	61,2	2263,9
71	1,40	2,17	21,70	1,00	10	6,2	12,2	375,4
72	1,40	2,17	21,70	1,50	10	0,5	1,0	23,8
73	1,71	1,10	17,05	0,50	10	359,8	1012,9	46311,9
74	1,71	1,10	17,05	0,75	10	44,0	125,9	4574,2
75	1,71	1,10	17,05	1,00	10	8,4	24,3	730,6
76	1,71	1,10	17,05	1,50	10	0,7	2,0	44,1
77	1,94	1,25	19,38	0,50	10	328,4	804,6	38516,9
78	1,94	1,25	19,38	0,75	10	41,1	103,5	3914,2

Casos	h/T_{atr}	h/T_{pas}	h (m)	y/L	Ângulo navio atracado (°)	$F_{x,max}$ (N)	$F_{y,max}$ (N)	$M_{z,max}$ (N.m)
79	1,94	1,25	19,38	1,00	10	7,9	20,2	631,3
80	1,94	1,25	19,38	1,50	10	0,6	1,7	38,5
81	2,17	1,40	21,70	0,50	10	302,7	672,9	33491,8
82	2,17	1,40	21,70	0,75	10	38,8	89,7	3503,2
83	2,17	1,40	21,70	1,00	10	7,5	17,7	570,6
84	2,17	1,40	21,70	1,50	10	0,6	1,5	35,1
85	1,71	1,71	17,05	0,50	10	145,1	286,0	14153,6
86	1,71	1,71	17,05	0,75	10	17,7	35,2	1399,4
87	1,71	1,71	17,05	1,00	10	3,4	6,8	224,5
88	1,71	1,71	17,05	1,50	10	0,3	0,6	13,8
89	1,94	1,94	19,38	0,50	10	133,2	245,8	12588,8
90	1,94	1,94	19,38	0,75	10	16,6	31,3	1278,7
91	1,94	1,94	19,38	1,00	10	3,2	6,1	206,8
92	1,94	1,94	19,38	1,50	10	0,3	0,5	12,7
93	2,17	2,17	21,70	0,50	10	122,9	214,2	11316,8
94	2,17	2,17	21,70	0,75	10	15,7	28,3	1184,5
95	2,17	2,17	21,70	1,00	10	3,1	5,6	193,4
96	2,17	2,17	21,70	1,50	10	0,2	0,5	12,0
97	1,10	1,10	17,05	0,50	20	1264,3	3689,5	150361,5
98	1,10	1,10	17,05	0,75	20	134,1	403,3	10788,2
99	1,10	1,10	17,05	1,00	20	24,1	73,5	1664,5
100	1,10	1,10	17,05	1,50	20	1,8	5,7	107,2
101	1,25	1,25	19,38	0,50	20	1040,6	2564,5	112890,4
102	1,25	1,25	19,38	0,75	20	113,9	293,7	8430,9
103	1,25	1,25	19,38	1,00	20	20,7	54,2	1246,3
104	1,25	1,25	19,38	1,50	20	1,6	4,2	73,9
105	1,40	1,40	21,70	0,50	20	911,6	2018,5	93489,6
106	1,40	1,40	21,70	0,75	20	102,7	241,5	7315,5
107	1,40	1,40	21,70	1,00	20	18,8	45,0	1090,9
108	1,40	1,40	21,70	1,50	20	1,4	3,5	63,9
109	1,10	1,71	17,05	0,50	20	507,9	1041,3	45844,8
110	1,10	1,71	17,05	0,75	20	53,9	113,0	3305,8
111	1,10	1,71	17,05	1,00	20	9,7	20,5	487,2
112	1,10	1,71	17,05	1,50	20	0,7	1,6	29,2
113	1,25	1,94	19,38	0,50	20	420,8	784,4	36892,3
114	1,25	1,94	19,38	0,75	20	46,1	89,0	2757,4
115	1,25	1,94	19,38	1,00	20	8,3	16,3	409,0
116	1,25	1,94	19,38	1,50	20	0,6	1,3	24,2
117	1,40	2,17	21,70	0,50	20	369,4	643,1	31566,1
118	1,40	2,17	21,70	0,75	20	41,7	76,4	2475,7

Casos	h/T_{atr}	h/T_{pas}	h (m)	y/L	Ângulo navio atracado (°)	$F_{x,max}$ (N)	$F_{y,max}$ (N)	$M_{z,max}$ (N.m)
119	1,40	2,17	21,70	1,00	20	7,6	14,2	370,4
120	1,40	2,17	21,70	1,50	20	0,6	1,1	21,9
121	1,71	1,10	17,05	0,50	20	554,8	1490,0	74816,3
122	1,71	1,10	17,05	0,75	20	57,9	158,3	5242,8
123	1,71	1,10	17,05	1,00	20	10,3	28,2	743,8
124	1,71	1,10	17,05	1,50	20	0,8	2,1	41,7
125	1,94	1,25	19,38	0,50	20	500,7	1164,2	60840,9
126	1,94	1,25	19,38	0,75	20	53,9	129,7	4493,7
127	1,94	1,25	19,38	1,00	20	9,7	23,4	645,3
128	1,94	1,25	19,38	1,50	20	0,7	1,8	36,5
129	2,17	1,40	21,70	0,50	20	456,2	956,7	51783,6
130	2,17	1,40	21,70	0,75	20	50,7	112,1	4025,1
131	2,17	1,40	21,70	1,00	20	9,2	20,5	585,2
132	2,17	1,40	21,70	1,50	20	0,7	1,6	33,4
133	1,71	1,71	17,05	0,50	20	223,2	422,3	22863,0
134	1,71	1,71	17,05	0,75	20	23,3	44,3	1600,3
135	1,71	1,71	17,05	1,00	20	4,1	7,8	228,3
136	1,71	1,71	17,05	1,50	20	0,3	0,6	13,0
137	1,94	1,94	19,38	0,50	20	202,6	357,1	19897,2
138	1,94	1,94	19,38	0,75	20	21,8	39,3	1465,5
139	1,94	1,94	19,38	1,00	20	3,9	7,0	211,2
140	1,94	1,94	19,38	1,50	20	0,3	0,5	12,1
141	2,17	2,17	21,70	0,50	20	185,0	305,5	17495,1
142	2,17	2,17	21,70	0,75	20	20,6	35,4	1358,7
143	2,17	2,17	21,70	1,00	20	3,7	6,4	198,2
144	2,17	2,17	21,70	1,50	20	0,3	0,5	11,4

Navio-Margem

Caso	T (m)	h/T	y/B	F_y (N)	$M_{z,Lewis}$ (N.m)
1	15,5	1,1	0,75	-35517,4	4245968,1
2	15,5	1,1	1	-11902,6	1422915,5
3	15,5	1,1	1,5	-2930,6	350346,5
4	15,5	1,1	2	-1284,6	153568,5
5	15,5	1,25	0,75	-29659,1	2796707,3
6	15,5	1,25	1	-11457,0	1080335,0
7	15,5	1,25	1,5	-3220,9	303717,2
8	15,5	1,25	2	-1457,2	137406,6
9	15,5	1,4	0,75	-26737,3	2096270,1
10	15,5	1,4	1	-11368,9	891350,6
11	15,5	1,4	1,5	-3512,0	275353,2
12	15,5	1,4	2	-1622,3	127195,3
13	15,5	2,2	0,75	-18652,5	731199,9
14	15,5	2,2	1	-9561,5	374821,4
15	15,5	2,2	1,5	-3752,7	147111,8
16	15,5	2,2	2	-1863,9	73066,8
17	15,5	∞	0,75	-10348,5	241210,9
18	15,5	∞	1	-4372,2	101911,4
19	15,5	∞	1,5	-1511,5	35232,1
20	15,5	∞	2	-738,4	17211,2
21	10	1,1	0,75	-10105,1	1208028,6
22	10	1,1	1	-3084,5	368738,6
23	10	1,1	1,5	-760,2	90877,8
24	10	1,1	2	-383,8	45878,7
25	10	1,25	0,75	-9175,8	865233,2
26	10	1,25	1	-3151,0	297121,5
27	10	1,25	1,5	-850,2	80167,3
28	10	1,25	2	-422,7	39858,2
29	10	1,4	0,75	-8604,8	674639,1
30	10	1,4	1	-3237,9	253860,1
31	10	1,4	1,5	-942,8	73915,6
32	10	1,4	2	-467,3	36640,2
33	10	2,2	0,75	-6932,0	271744,8
34	10	2,2	1	-3368,1	132035,7
35	10	2,2	1,5	-1215,0	47631,3
36	10	2,2	2	-605,0	23716,9
37	10	∞	0,75	-3039,0	70835,3
38	10	∞	1	-1343,0	31303,7
39	10	∞	1,5	-493,8	11510,6
40	10	∞	2	-257,5	6001,8

APÊNDICE B – INTEGRAÇÃO COM SIMULADOR EM TEMPO REAL

Essa seção destina-se a explicar o procedimento básico para realizar a implementação no simulador em tempo real das forças hidrodinâmicas de interação navio-navio e navio-margem.

Com o intuito de integrar no simulador modelo matemático obtido no presente trabalho, uma interface desenvolvida em linguagem *Matlab* foi aplicada para realizar o processo de leitura e envio de dados.

O procedimento consiste em realizar a leitura dos dados constantemente enviados pelo simulador na forma de comandos seriais de rede, processar as informações recebidas de modo a obter as forças e momentos hidrodinâmicos resultantes para a condição determinada a partir do modelo matemático desenvolvido no trabalho, e posteriormente enviá-las de volta para o simulador na forma de um comando serial de rede, como uma variável de força externa.

O programa base é descrito conforme apresentado na Figura 85. Inicialmente recebem-se as informações de todos os navios e as condições relevantes do meio, no caso, as profundidades e as distâncias laterais, para cada embarcação. A partir desses dados, utiliza-se o modelo matemático para determinar as forças de interação. Após o cálculo, a força é enviada ao simulador e, ao completar o intervalo de um passo de tempo, se inicia um novo ciclo. O passo de tempo adotado no simulador de manobras é de 0,1 segundo.

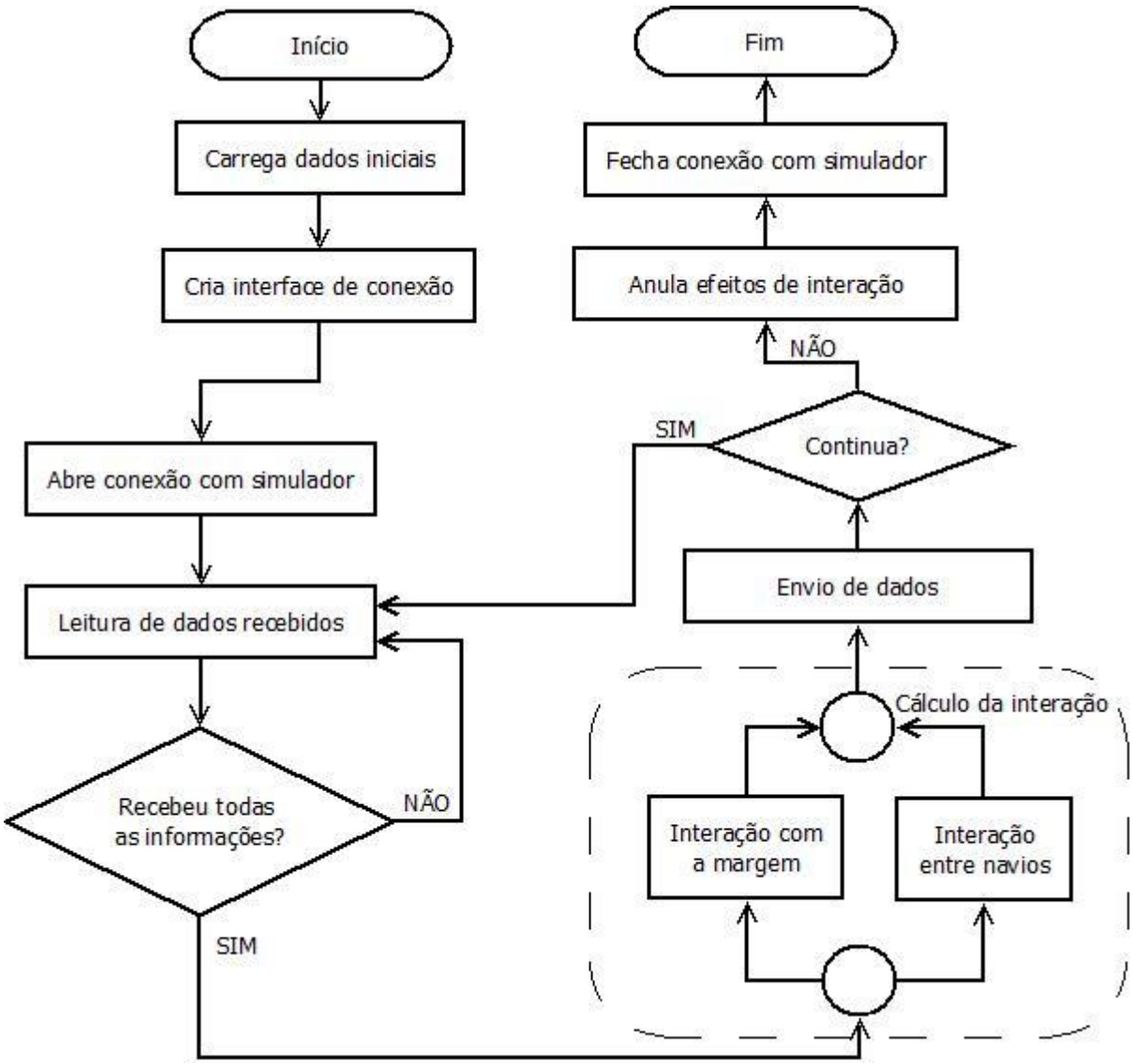



Figura 85 - Diagrama de Blocos – Programa de Integração com dados de Força do BEM para o Simulador SMH-TPN