

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA OCEÂNICA

ANÁLISE PROBABILÍSTICA DO ESFORÇO DE AMARRAÇÃO EM ESTRUTURAS
PORTUÁRIAS

por

Pedro Henrique Sanches Florencio

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, dezembro de 2017.

ANÁLISE PROBABILÍSTICA DO ESFORÇO DE AMARRAÇÃO EM ESTRUTURAS PORTUÁRIAS

Por

Pedro Henrique Sanches Florencio

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (PPGEO) da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Área de Concentração: Engenharia Costeira

Orientador: Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira

PPGEO/FURG

Prof. Dr. Antônio Marcos de Lima Alves

EE/FURG

Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães

IFRS – Campus Rio Grande

Prof. Dr. Liércio André Isoldi

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica

Rio Grande, 20, dezembro de 2017

**"ANÁLISE PROBABILÍSTICA DO ESFORÇO DE AMARRAÇÃO EM ESTRUTURAS
PORTUÁRIAS"**

Pedro Henrique Sanches Florêncio

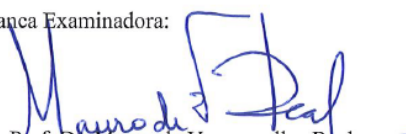
Esta declaração foi julgada adequada para obtenção do título de:

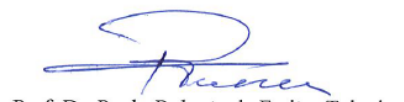
MESTRE EM ENGENHARIA OCEÂNICA

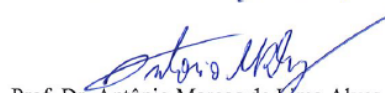
Tendo sido aprovada em sua forma final pela Coordenação de Pós Graduação em Engenharia Oceânica

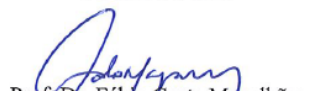

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coordenador do PPGEQ / FURG

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real
Orientador – PPGEQ / FURG


Prof. Dr. Paulo Roberto de Freitas Teixeira
PPGEQ / FURG


Prof. Dr. Antônio Marcos de Lima Alves
FURG


Prof. Dr. Fábio Costa Magalhães
Membro Externo – IFRS - RG

AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Rio Grande (FURG) por proporcionar a minha formação profissional e acadêmica.

Ao Professor Mauro Vasconcellos Real pelo conhecimento, apoio e voto de confiança concedidos a mim.

Aos meus pais, responsáveis pela educação, incentivo e suporte sempre emitido.

Aos meus familiares e amigos, que de alguma maneira contribuíram para o meu crescimento até o presente momento.

RESUMO

O objetivo deste trabalho consiste na comparação dos esforços de amarração segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira Registrada extinta 9782:1987 - Ações em Estruturas Portuárias, Marítimas ou Fluviais, Normatização Britânica 6349-1:2000 Parte 1: Código de Prática para critérios gerais (British Standard 6349-1:2000 Part 1: Code of practice for general criteria), com última correção realizada no dia 24 de Julho de 2003, onde o Reino Unido é o país de origem, e por fim, o Critério Unificado de Facilidades 4-159-03:2005 Projeto: Amarração (*Unified Facilities Criteria* 4-159-03:2005 Design: Mooring), com última correção realizada no dia 23 de Junho de 2016, sendo a norma proveniente do Estados Unidos da América. A comparação é realizada para o estudo de caso do Terminal de Contêineres do Porto do Rio Grande – TECON, e foi separada em duas etapas. A primeira etapa consiste na aplicação do Método de Monte Carlo para todas as normativas de modo a obter os esforços transversais, longitudinais e resultantes de cálculo, analisando por meio de parâmetros estatísticos os resultados obtidos. Já a segunda etapa, consiste na verificação da confiabilidade das normativas perante os valores de projetos calculados, analisando a probabilidade dos valores calculados (denotados por pontos de projeto) serem excedidos. Os resultados obtidos demonstram variações nos esforços longitudinais, transversais e resultantes perante as normativas estudadas, onde na análise dos esforços resultantes a norma Brasileira (NBR 9782,1987) apresenta o maior valor obtido por meio do Método de Monte Carlo, seguida pela norma Britânica (BS 6349-1:2000) e Americana (UFC 4-159-03:2005), tendo estas duas últimas normas citadas valores muito próximos. Porém, apesar de apresentar o maior valor, a norma Brasileira possui no geral uma probabilidade de falha maior, seguida pelas normas Britânica e Americana, o que torna a norma Americana para os esforços resultantes a mais confiável dentre todas para o referido estudo de caso. Em relação a comparação entre os pontos de projeto e valores obtidos segundo o Método de Monte Carlo, os esforços resultantes apresentam probabilidade de falha para as normas Brasileira, Britânica e Americana iguais a 3,6292%, 5,0968% e 3,1330% respectivamente.

Palavras-chaves: Monte Carlo, Amarração, NBR 9782:1987, BS 6349-1:2000 e UFC 4-159-03:2005.

ABSTRACT

The objective of this work is to compare the results obtained between the mooring efforts according to the Brazilian Association of Technical Standards, Registered Brazilian Standard extinct 9782: 1987 - Actions in Port, Maritime or Fluvial Structures, British Standardization 6349-1: 2000 Part 1: Code of Practice for general criteria, last amended on 24 July 2003, where the United Kingdom is the country of origin, and lastly, the Unified Facilities Criteria 4-159-03: 2005 Design: Mooring, with the last correction carried out on June 23, 2016, being provided by the United States of America. The comparison is made for the case study of the Container Terminal of the Port of Rio Grande - TECON, and was carried out in two stages. The first one by applying the Monte Carlo Method to all the calculation criteria in order to obtain the transversal, longitudinal and resulting efforts, analyzing through statistical parameters the results obtained. The second step is evaluate the reliability of the regulations against the calculated design values, analyzing the probability of the calculated values (denoted by design points) being exceeded. The results obtained show a variation in the longitudinal, transversal and resultant efforts in terms of normatives studied, where NBR 9782:1987 presents the highest value obtained through the Monte Carlo Method, followed by the British Standard (BS 6349-1: 2000) and American (UFC 4-159-03: 2005), the latter two standards being very close. However, despite having the highest value, NBR 9782:1987 is the norm that has the highest values of probability of failure, followed by British and American Standards, where an American standard is the one that presents a greater reliability among norms studied for the case study adopted. In relation to the comparison between the project points and values obtained according to the Monte Carlo Method, the results efforts present a probability of failure for Brazilian, British and American standards equal to 3.6292%, 5.0968% and 3.1330% respectively.

Keywords: Monte Carlo Method, Mooring, NBR 9782:1987, BS 6349-1:2000 and UFC 4-159-03:2005.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Justificativa e motivação	19
1.2. Estado de arte	20
1.3. Objetivos	21
1.4. Organização do texto.....	22
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1. Classificação e tipos das estruturas portuárias	24
2.2. Ações sobre estruturas portuárias.....	30
2.2.1. Ações provenientes das ondas.....	31
2.2.2. Ações provenientes das correntes	31
2.2.3. Ações provenientes dos ventos	32
2.2.4. Ações causadas por embarcações sobre as estruturas portuárias	33
Esforços causados por atracação	35
Esforços causados por amarração	36
Esforços causados pela própria estrutura	39
Esforços provenientes do lado terrestre	40
2.3. Roteiro de cálculo	40
2.3.1. Forças devido aos ventos (NBR 9782:1987)	41
2.3.2. Forças devido as correntes (NBR 9782:1987)	42
2.3.3. Fluxograma para a obtenção dos esforços de amarração (NBR 9782:1987).....	43
2.3.4. Forças devido aos ventos (BS 6349-1:2000)	43
2.3.5. Força devido as correntes (BS 6349-1:2000).....	49
2.3.6. Fluxograma para a obtenção dos esforços de amarração (BS 6349-1:2000).....	52
2.3.7. Forças devido aos ventos (UFC 4-159-03:2005)	53
Grupo I – Superestrutura de navio com pequena área vélica.....	58
Grupo II – Navio com grande área vélica, superestrutura distribuída	59
2.3.8. Forças devido as correntes (UFC 4-159-03:2005).....	59
2.3.9. Fluxograma para a obtenção dos esforços de amarração (UFC 4-159-03:2005).....	65
2.4. Teoria das probabilidades e confiabilidade estrutural	67
2.4.1. Variáveis aleatórias e seus principais parâmetros	67
2.4.2. Distribuições de Probabilidade e geração de números aleatórios	71
Distribuição uniforme	71

Distribuição normal.....	72
Distribuição de eventos extremos gumbel tipo I.....	72
2.4.3. Determinação de distribuições e parâmetros de dados observados	73
2.4.4. Confiabilidade na engenharia.....	76
2.4.5. Análise probabilística de estruturas e o Método de Monte Carlo	78
3. METODOLOGIA	81
3.1. Estudo de caso.....	81
3.2. Ações e parâmetros estatísticos adotados.....	82
3.2.1. Parâmetros da NBR 9782:1987.....	82
Parâmetros relacionados as embarcações (NBR 9782:1987)	83
Parâmetros relacionados aos esforços ambientais (NBR 9782:1987)	90
3.2.2. Parâmetros da BS 6349-1:2000.....	92
Parâmetros relacionados as embarcações BS 6349-1:2000	92
Parâmetros relacionados aos esforços ambientais externos BS 6349-1:2000.....	94
3.2.3. Parâmetros da UFC 4-159-03:2005	94
Parâmetros relacionados as embarcações UFC 4-159-03:2005	95
Parâmetros relacionados aos esforços ambientais externos UFC 4-159-03:2005	98
4. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO	99
5. PONTOS DE PROJETO.....	101
5.1. Velocidades de projeto	102
5.1.1. Velocidades de projeto do vento de acordo com a NBR 9782:1987.....	102
5.1.2. Velocidades de projeto do vento de acordo com a BS 6349-1:2000.....	102
5.1.3. Velocidades de projeto do vento de acordo com a UFC 4-159-03:2005.....	104
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	108
7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	118
8. REFERÊNCIAS.....	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Desprendimento dos cabeços de amarração (Fonte: BLT Bollard Load Test, visto em: http://bollardloadtest.com/examples-and-consequences-of-failed-bollards/).	19
Figura 2.1 - Tipos de estruturas portuárias (Fonte: Adaptado de Mason, 1981).	24
Figura 2.2 - Fingers píers de granéis líquidos localizado no canal de Houston. (Fonte: http://www.lanier-engineers.com/projects/marine-liquid-terminals/page2.html).	26
Figura 2.3 - Porto de Paranaguá, projeto do novo terminal de grãos (COREX), píer “T” (Fonte: Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina – APPA).	26
Figura 2.4 - Terminal teluk rubian, localizado no estreito de Malacca, píer em formato de “L” (Fonte: http://www.vale.com.my/business/?lang=en/?&lang=en).	27
Figura 2.5 - Tipos de estruturas portuárias (Fonte: Tsinker, 2004).	27
Figura 2.6 - Terminal de combustíveis marítimos do açúcar, TECMA, São Sebastião da Barra- RJ (Fonte: https://www.bp.com/pt_br/brazil/o-que-fazemos/combustiveis-maritimos.html).	28
Figura 2.7 - LNG terminal de gás natural liquefeitos, localizado na cidade de Aqaba, Jordânia. (Fonte: https://www.baminternational.com/en/projects/aqaba-new-lique).	28
Figura 2.8 - Os dois tipos básicos de estruturas de atracação (Fonte: Adaptada de Thoresen, 2014).	29
Figura 2.9 - Tipo de estruturas de atracação (Fonte: Adaptada de Thoresen, 2014).	30
Figura 2.10 - Principais ações em estruturas acostáveis. (Fonte: Adaptada de Thoresen, 2014).	30
Figura 2.11 - Efeito da folga entre a quilha das embarcações e o fundo. (Fonte: Adaptada de Thoresen, 2014).	32
Figura 2.12 - Definição das dimensões da embarcação (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).	34
Figura 2.13 - Calado aéreo (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).	34
Figura 2.14 - Graus de liberdade da embarcação (Fonte: Adaptado Gaythwaite, 2014).	38
Figura 2.15 - Decomposição da velocidade de vento incidente e áreas de exposição aos ventos longitudinais e transversais (Fonte: Mason, 1981).	39
Figura 2.16 - Áreas de exposição das correntes longitudinais e transversais (Fonte: Mason, 1981).	39
Figura 2.17 - Ângulo formado pela direção do vento com o eixo longitudinal do navio. (Fonte: NBR 9782:1987).	41
Figura 2.18 - Fluxograma para obtenção dos esforços de amarração para a NBR 9782:1987 (Fonte: Autor).	43
Figura 2.19 - Coeficientes de força devido ao vento para navios de carga seca e pequenos petroleiros (Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).	45
Figura 2.20 - Coeficientes de força devido ao vento para grandes petroleiros com superestrutura à ré (Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).	46
Figura 2.21 - Coeficientes de força devido ao vento para navios de contêineres típicos (Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).	47
Figura 2.22 - Área projetada acima do nível d'água para navios petroleiros. (Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).	48
Figura 2.23 - Área projetada acima do nível d'água para navios de contêineres (Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).	48
Figura 2.24 - Coeficientes de Força de arrasto devido a corrente para águas profundas (Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).	50
Figura 2.25 - Fator de correção da profundidade da água para esforços laterais devido a corrente (Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).	51
Figura 2.26 - Fator de correção da profundidade da água para esforços longitudinais de corrente sobre navios de contêineres (Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).	51
Figura 2.27 - Fluxograma para a obtenção dos esforços transversais e longitudinais devido ao vento	

para a norma BS 6349-1:2000 (Fonte: Autor).	52
Figura 2.28 - Fluxograma para a obtenção dos esforços transversais e longitudinais devido a corrente para a norma BS 6349-1:2000 (Fonte: Autor).	52
Figura 2.29 - Sistema de coordenadas das embarcações (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).	54
Figura 2.30 - Definição dos termos utilizados no cálculo dos esforços devido aos ventos (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).	55
Figura 2.31 - Função de forma para força transversal (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).	56
Figura 2.32 - Relação entre T e d. (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).	60
Figura 2.33 - Coeficientes de arrasto (Cyc) (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).	62
Figura 2.34 - Fluxograma para a obtenção do esforço estático transversal devido ao vento para a norma UFC 4-159-03:2005 (Fonte: Autor).	65
Figura 2.35 - Fluxograma para a obtenção do esforço estático longitudinal devido ao vento para a norma UFC 4-159-03:2005 (Fonte: Autor).	66
Figura 2.36 - Fluxograma para a obtenção do esforço estático transversal devido a corrente para a norma UFC 4-159-03:2005 (Fonte: Autor).	66
Figura 2.37 - Fluxograma para a obtenção do esforço estático longitudinal devido a corrente para a norma UFC 4-159-03:2005 (Fonte: Autor).	67
Figura 2.38 - Probabilidade representada como área. (Fonte: Walpole, et.al, 2009).	69
Figura 2.39 - Probabilidade diferente para o mesmo comprimento (Fonte: Walpole, et.al, 2009).	70
Figura 2.40 - Curvas de distribuição de probabilidade normal. (Fonte: Devore,2005).	72
Figura 2.41 - Relação entre frequência acumulada teórica e experimental. (Fonte: Ang e Tang, 2007).	75
Figura 2.42 - Relação entre resistência (R) e solicitação (S) (Fonte: Autor).	78
Figura 2.43 - Fluxograma do Método de Monte Carlo (Fonte: Grant,1978 adaptado por Real,2000).	79
Figura 3.1 - Imagem do cais do TECON Rio Grande (Fonte: http://www.conexaomaritima.com.br/index.php?option=noticias&task=detalhe&Itemid=22&id=2110).	81
Figura 3.2 - Embarcações atracadas no terminal de containeres TECON (Fonte: http://www.teconline.com.br/Terminais/Forms/NavioProgramacaoConsultar.aspx).	83
Figura 3.3 - Porte da embarcação. (Fonte: https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:3808776/mmsi:255805854/vessel:MSC%20JEONGMIN).	84
Figura 3.4 - Testes de Goodness of fit para os valores de DWT (Fonte: Autor).	84
Figura 3.5 - DWTxAlc. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014)	86
Figura 3.6 - DWTxAll. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014)	86
Figura 3.7 - DWTxAtc. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014)	87
Figura 3.8 - DWTXAtl (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014)	87
Figura 3.9 - DWTxDmáx. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014)	88
Figura 3.10 - DWTxLbp. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).	88
Figura 3.11 - DWTxW. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014)	89
Figura 3.12 - Testes de Goodness of fit para os dados de velocidade do vento do ano de 2015 obtidos junto a praticagem da Barra do Rio Grande (Fonte: Autor).	90
Figura 3.13 - DWT x d_m (Fonte: Ramos, 2016, baseado nos dados da BS 6349-1:2000).	92
Figura 3.14 - Função para obtenção do C_{CT} (Fonte: Adaptado BSI 6349-1:2000).	93
Figura 3.15 - Função para obtenção do C_{CL} (Fonte: Adaptado BSI 6349-1:2000).	93
Figura 3.16 - DWT x B (Fonte: Adaptado Thoresen,2014).	96
Figura 3.17 - DWT x Loa (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014)	96

Figura 3.18 - Lbp x BL	(Fonte: Chame,2014, baseado nos dados do International Convention on load lines,1966).....	97
Figura 5.1 - Embarcação	San Lorenzo	
(Fonte https://www.marinetraffic.com/pt/ais/details/ships/shipid:297177/mmsi:255805699/vessel:C		
AP%20SAN%20LORENZO)		101
Figura 5.2 - Relação entre valores extremos de 1 e 50 anos (Fonte: Beck & Corrêa,2012)		103
Figura 6.1 - Média móvel das forças longitudinais de cálculo (Fonte: Autor)		108
Figura 6.2 - Média móvel das forças longitudinais de cálculo somente para as normativas estrangeiras (Fonte: Autor)		108
Figura 6.3 - Média móvel das forças transversais de cálculo (Fonte: Autor)		109
Figura 6.4 - Média móvel das forças resultantes de cálculo (Fonte: Autor)		109
Figura 6.5 - Média móvel do desvio padrão das forças longitudinais de cálculo (Fonte: Autor)		110
Figura 6.6 - Média móvel do desvio padrão das forças longitudinais de cálculo somente para as normativas estrangeiras (Fonte: Autor)		110
Figura 6.7 - Média móvel do desvio padrão das forças transversais de cálculo (Fonte: Autor)		111
Figura 6.8 - Média móvel do desvio padrão das forças resultantes de cálculo (Fonte: Autor)		111
Figura 6.9 - Probabilidade acumulada de ocorrência dos esforços longitudinais de cálculo (Fonte: Autor)		113
Figura 6.10 - Probabilidade acumulada de ocorrência dos esforços longitudinais de cálculo somente para as normativas estrangeiras (Fonte: Autor)		114
Figura 6.11 - Probabilidade acumulada de ocorrência dos esforços transversais de cálculo (Fonte: Autor)		115
Figura 6.12 - Probabilidade acumulada de ocorrência para os esforços resultantes de cálculo (Fonte: Autor)		116

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Escala de Beaufort de velocidades de vento (Fonte: Adaptada de Thoresen, 2014). ...	32
Tabela 2.2 - Coeficientes de fricção entre embarcações e defensas (Fonte: Adaptado Tskiner, 2004).	36
Tabela 2.3 - Valores aproximados do coeficiente de forma. (Fonte: NBR9782:1987)	42
Tabela 2.4 - Propriedades de engenharia do ar e da água (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005). ..	53
Tabela 2.5 - Valores amostrais dos coeficientes de ventos para embarcações (C) (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).....	55
Tabela 2.6 - Valores recomendados de C_{xwB} e C_{xwS} (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).....	58
Tabela 2.7 - Valores recomendados para θ_x . (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005)	58
Tabela 2.8 - Valores da taxa adimensional para hélices (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005) ...	65
Tabela 2.9 - Incertezas (Fonte: Borges, 2004).....	76
Tabela 2.10 - Etapas analíticas e computacionais para aplicação da simulação de Monte Carlo (Fonte: adaptado de AYYUB e MCCUEN, 1998).	79
Tabela 3.1 - Parâmetros de navios porta contêineres (Fonte: Adaptado Thoresen,2014).....	85
Tabela 5.1 - Tipos de serviços de amarração. (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005.)	104
Tabela 5.2 - Critérios de projeto de instalações para os tipos de serviços de amarração. (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).....	105
Tabela 6.1 - Parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias de entrada (Fonte: Autor)	112
Tabela 6.2 - Parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias saída (Fonte: Autor).	112

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Romanos

a, b	Limites inferior e superior da distribuição uniforme de probabilidade
A_L/A_y	Área longitudinal da embarcação, projetada acima da linha d'água [m ²]
A_{lc}	Área longitudinal com embarcação carregada
A_{ll}	Área longitudinal com embarcação em lastro
A_{tc}	Área Transversal com embarcação carregada
A_{tl}	Área Transversal com embarcação em Lastro
A_T/A_x	Área da seção transversal do navio acima do nível d'água
A_H	Área de vento longitudinal do casco
A_s	Área de vento longitudinal da superestrutura
A_m	Área submersa da seção transversal de meia nau da embarcação
A_p	Área da lâmina expandida da hélice
A_{Tpp}	Área total projetada da hélice
A_R	Taxa adimensional para hélices
A^2	Valor de Anderson Darling
A^*	Valor corrigido de Anderson Darling
B	Largura da embarcação [m]
BL	Bordo Livre
C_b	Coeficiente de Bloco
C_m	Coeficiente de meia nau
C_{LW}	Coeficiente de força de vento longitudinal
C_{TW}	Coeficiente de força de vento transversal frontal ou de ré
C_{TC}	Coeficiente da força de arraste transversal de corrente frontal ou de ré
C_{LC}	Coeficiente de ação de arraste de corrente longitudinal
C_{CT}	Fator de correção da profundidade para ações de correntes transversais;
C_{CL}	Fator de correção da profundidade para ações de corrente longitudinal
CDF	Função densidade de probabilidade acumulada (<i>cumulative density function</i>)
C_{yc}	Coeficiente de arraste para força transversal de corrente
C'	Coeficiente empírico
C_{xw}	Coeficiente de arraste da força longitudinal do vento
C_{xwB}	Coeficiente de arraste da força longitudinal do vento para proa

C_{xws}	Coeficiente de arraste da força longitudinal do vento para popa
C_{yc}	Coeficiente de arraste para força transversal de corrente
C_1	Coeficiente de arraste para força transversal devido a corrente em águas rasas
C_0	Coeficiente de arraste para forças transversal devido a corrente em águas profundas
C_{xcb}	Coeficiente de arrasto de forma da corrente longitudinal
C_{xca}	Coeficiente de fricção longitudinal de pele
C_{PROP}	Coeficiente de arrasto de hélice
C_{yw}	Coeficiente de arraste de força transversal de vento
c_α	Valor crítico de Anderson Darling para a distribuição assumida
$c_{1-\alpha,f}$	Valor crítico de chi-quadrado
C	Confiabilidade
d	Profundidade natural do canal (altura do nível d'água no local)
$D_{m\acute{a}x}$	Calado Máximo da embarcação
$D_{m\acute{i}n}$	Calado Mínimo da embarcação
d_m/T	Calado médio da embarcação
D_n	Discrepância máxima no teste de Komolgorov-Smirnov
D_n^α	Discrepância limite no teste de Kolmolgorov-Smirnov a um nível de significância α , e tamanho da amostra n
DWT	Porte da Embarcação
$E_{m\acute{a}x}$	Energia máxima de atracação
f	Grau de liberdade
$f_{yw}\{\theta_w\}$	Função de forma para força transversal
$f_{xw}\{\theta_w\}$	Função de forma para força longitudinal
$F_{atracac\acute{o}e}$	Força de atracação atuando sobre a estrutura
F_{LW}	Força longitudinal de vento de acordo com BS 6349-1:2000
F_{TW}	Força transversal de vento frontal (forward) ou de ré (aft) de acordo com a BS 6349-1:2000
F_{TC}	Força transversal de corrente frontal ou de ré de acordo com a BS 6349-1:2000
F_{LC}	Força longitudinal de corrente de acordo com a BS 6349-1:2000
F_{yw}	Força estática transversal do vento de acordo com o UFC 4-159-03:2005
F_{xw}	Força estática longitudinal de vento de acordo com o UFC 4-159-03:2005

F_{yc}	Força estática transversal de corrente de acordo com o UFC 4-159-03:2005
F_{xc}	Força estática longitudinal devido as correntes de acordo com o UFC 4-159-03:2005
F_{xFORM}	Força estática longitudinal de arraste de forma devido as correntes
$F_{xFRICTION}$	Força estática longitudinal de atrito devido as correntes
F_{xPROP}	Força estática longitudinal correspondente ao propulsor de hélice das embarcações devido as correntes
H	Altura da onda
h	Altura de medição da velocidade do vento
h_s	Altura da superestrutura acima do nível d'água
h_H	Altura média do casco de navio
h_R	Altura de referência
K	Exponente adimensional obtido através de dados de laboratório com modelagem de navios
k_c	Coefficiente de forma da corrente
k_w	Coefficiente de forma do vento
L_{oa}	Distância total da embarcação
L_{bp}	Distância entre perpendiculares da embarcação
L_{wl}	Distância sob o nível d'água da embarcação
L_s	Largura da superestrutura
n	Tamanho da Amostra
N'	Número de simulações
P	Probabilidade
P_f	Probabilidade de falha
R	Capacidade do sistema
R_n	Número de Reynolds
R_c	Força devido a corrente de acordo com a NBR 9782:1987
R_w	Força devido ao vento de acordo com a NBR 9782:1987
S	Demanda pelo sistema
S'	Área da superfície molhada (m ²)
S_n	Valores da distribuição de frequência observadas no teste de Komolgorov-Smirnov
S_1	fator de correção topográfico

S_3	fator de correção estatístico
VEL	Velocidade de serviço da embarcação
V	Volume submerso do navio
V_c	Velocidade da corrente marítima
$V_{c,NBR}$	Velocidade de projeto da corrente de acordo com a NBR 9782:1987
$V_{c,BSI}$	Velocidade de projeto da corrente de acordo com a BS 6349-1:2000
$V_{c,UFC}$	Velocidade de projeto da corrente de acordo com o UFC 4-159-03:2005
V_w	Velocidade do vento
$\overline{V_p}/V_{w,NBR}$	Velocidade de projeto do vento de acordo com a NBR 9782:1987
$V_{w,BSI}$	Velocidade de projeto do vento de acordo com a BS 6349-1:2000
$V_{w,UFC}$	Velocidade de projeto do vento de acordo com o UFC 4-159-03:2005
v_o	Velocidade básica do vento
V_{3s}	Velocidade média do vento para rajada de vento de 3s
V_{30s}	Velocidade média do vento para rajada de vento de 30s
V_{1min}	Velocidade média do vento para rajada de vento de 1 min
X	Variável aleatória
$\bar{x}$	Média amostral
W	Deslocamento

Símbolos Gregos

α	Nível de significância
δ	Coeficiente de variação da variável aleatória X
ν	Viscosidade cinemática
μ	Coeficiente de fricção entre a embarcação e o sistema de defensas.
μ_x	Valor médio da variável aleatória X
ρ_a	Massa específica do ar
ρ_w	Massa específica da água
θ_c	Ângulo formado pela direção da corrente com o eixo longitudinal do navio
θ_w	Ângulo formado pela direção do vento com o eixo longitudinal do navio
θ_x	Ângulo do vento incidente que provoca força longitudinal nula
γ_w	Peso específico da água
χ	Parâmetro adimensional da embarcação
χ^2	Valor de Chi-quadrado

σ_x^2	Variância da variável aleatória X
σ_x	Desvio Padrão da variável aleatória X

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASCE	Sociedade Americana dos Engenheiros Civis (American Society of Civil Engineers)
APPA	Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina
BLT	<i>Bollard Load Test</i> (Teste de carregamento dos cabeços de amarração)
BSI	<i>British Standards Institution</i> (Instituto Britânico de Normatização)
EAU	<i>Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways</i> (Recomendações do Comitê para Estruturas de Acostagem, Portos e Hidrovias)
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
OCIMF	<i>Oil Companies International Marine Forum</i> (Fórum Marítimo Internacional das Companhias de Petróleo)
PIANC	<i>Permanent International Association of Navigation Congresses</i>
PPGEO	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
SOLAS	International Convention for the Safety of Life at Sea
TECMA	Terminal de Combustíveis Marítimos do Açu
TECON	Terminal de Contêineres do Porto de Rio Grande – RS
UFC	<i>Unifed Facilities Criteria</i> (Critério Unificado de Facilidades)

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa e motivação

Antigamente, as dimensões das embarcações eram mínimas comparado com as produzidas atualmente, onde os dispositivos de amarração eram adotados mediante conhecimento adquirido ao longo dos anos, através da experiência dos capitães das embarcações.

Porém, com o passar dos anos, as embarcações se tornaram maiores e mais complexas, de forma que a área de incidência do vento e da corrente também cresceram, a do vento devido ao aumento da superestrutura das embarcações, e a da corrente devido ao aumento dos calados das embarcações, de forma que os antigos métodos baseados nos anos de experiência, utilizados para a determinação dos dispositivos de amarração, se tornaram inadequados.

Daí, surgiu-se a necessidade de novos métodos que levassem em conta as referidas grandezas, de forma a limitar os movimentos das embarcações nos berços de atracação, além de prever nas referidas metodologias o rompimento dos cabos de amarração com posterior desprendimento destes (Gaythwaite, 2014).

A figura 1.1 demonstra o desprendimento de um dispositivo de amarração devido ao incorreto dimensionamento e emprego deste.



Figura 1.1 - Desprendimento dos Cabeços de Amarração (Fonte: BLT Bollard Load Test, visto em: <http://bollardloadtest.com/examples-and-consequences-of-failed-bollards/>).

Conforme exposto, o principal motivo do surgimento da necessidade de metodologias de cálculo para obtenção dos esforços de amarração, deve-se ao aumento dos parâmetros das embarcações.

A escolha do critério de projeto é o primeiro passo a ser tomado, posteriormente são calculadas as forças para as condições de projeto, determinando assim, o sistema de amarração que será adotado.

Deve-se realizar análises probabilísticas a fim de verificar os resultados obtidos pelo critério de projeto adotado, além disto, a obtenção errônea destes esforços acarreta na inexata escolha dos dispositivos de amarração, e conseqüentemente, compromete a segurança dos usuários e a utilidade dos terminais portuários.

Outra motivação para a realização do estudo, provém da ausência de norma Brasileira em vigência da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), que regulamenta o cálculo para a aquisição dos esforços de amarração, uma vez que a NBR 9782:1987 – *Ações em estruturas portuárias, marítimas ou fluviais – Procedimento*, foi cancelada no dia 04/05/2015 devido ao fato de o setor não a utilizar, surgindo a necessidade de estudos que demonstrem os aspectos de novas metodologias de cálculo relevantes.

No presente trabalho, além da norma Brasileira, são expostas as normas Britânica BS 6349-1:2000 e Americana UFC 4-159-03:2005, as normas estrangeiras advém de países com grande tradição na construção de obras portuárias.

Por fim, além da falta de norma Brasileira em vigência conforme supramencionado, há uma escassez de literatura técnica nacional que aborde métodos para a obtenção de esforços de amarração, onde o único livro é o do autor Jayme Mason, nomeado Obras Portuárias, com última publicação no ano de 1982.

Na busca acadêmica em trabalhos de conclusão de curso, dissertações de mestrado e artigos, conforme será melhor descrito no próximo item, foram encontrados estudos que expõem os roteiros de cálculo das normativas, e suas respectivas soluções analíticas para determinados estudos de caso. Porém, em nenhuma delas foi realizada a análise probabilísticas por meio do Método de Monte Carlo, demonstrando a confiabilidade destas normativas, notado o aludido, julga-se de grande valia o presente estudo.

1.2. Estado de arte

Bianco (2015) apresentou projeto de monografia comparando os critérios de projeto com ênfase nos carregamentos permanentes, sobrecargas verticais, cargas móveis, ações ambientais, ações

de atracação e ações de amarração das normas Brasileira, Americana e Britânica em obras portuárias, com a finalidade principal de analisar o nível de detalhamento da norma Brasileira perante as estrangeiras. No presente estudo, concluiu-se a falta de informações da norma Brasileira comparado com as normas estrangeiras.

Chame (2014), apresenta um modelo de otimização do casco utilizando o software Excel e a ferramenta *Solver* aplicados em estudos de caso, com o intuito de avaliar a adequação para exemplos reais, onde o principal objetivo é o de minimizar a potência do motor e maximizar a carga transportada, dos resultados dos modelos, são propostas equações empíricas que podem ser utilizadas para determinar os principais coeficientes e características das embarcações.

Comin (2015) expõe em seu trabalho a análise das solicitações devidas à amarração e atracação de embarcações frente as ações de projeto, neste trabalho, foi realizado o estudo dos métodos de cálculo da Norma Brasileira (NBR 9782:1987), Britânica (BS 6349:2000) e Alemã (EAU 2004) de acordo com as recomendações de Mason (1981) e PIANC (2002), com posterior análise comparativa entre as normas, considerando como estudo de caso o porto fluvial de movimentação de graneis vegetais sólidos, localizado nas margens do Rio Amazonas, na cidade de Santarém-PA. Ao fim, é apresentada a divergência nos resultados obtidos pelas normativas, demonstrando a influência na escolha destas.

Mapa (2016), expõe em sua dissertação uma ferramenta computacional empregando o método analítico de FORM, e o método de simulação de Monte Carlo em ambiente MATLAB, com o intuito de realizar a análise de confiabilidade de pórticos metálicos via análise estrutural avançada em elementos finitos por meio do software *Computacional System for Advanced Structural Analysis* (CS-ASA).

Ramos (2016), demonstrou a análise estrutural probabilística através da aplicação do método de Monte Carlo a um modelo estrutural em elementos finitos de um cais de contêineres de paramento aberto, com o principal propósito de obter parâmetros estatísticos e distribuições de probabilidade dos esforços nas fundações da estrutura.

1.3. Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho, consiste na obtenção de parâmetros estatísticos e distribuições de probabilidade para os esforços finais de cálculo de amarração provenientes das normas Brasileira, Britânica e Americana, de forma que ao obter os gráficos de probabilidade acumulada de ocorrência, seja verificado qual das normativas possui maior, ou menor probabilidade

de falha para cada situação (esforços longitudinais, transversais e resultantes), além da verificação da probabilidade de excedência dos valores de projeto comparados com os dados obtidos segundo o Método de Monte Carlo, com o intuito de que, ao final do trabalho, o leitor possua todas as informações necessárias para a escolha correta do critério de projeto que deverá ser utilizado.

Os objetivos específicos podem ser divididos em: estudo das recomendações de projeto, determinação dos pontos de projeto, determinação das distribuições de probabilidade das forças de amarração por meio do Método de Monte Carlo, avaliação da confiabilidade do ponto de projeto, e por fim, o estudo comparativo dos pontos de projeto e da confiabilidade na determinação das forças de amarração. Todos os objetivos específicos foram realizados para as normas Brasileira (NBR 9782:1987), Britânica (BS 6349-1:2000) e Americana (UFC 4-159-03:2005).

1.4. Organização do texto

Organizado em 8 capítulos, este trabalho apresenta um estudo realizado sobre a análise probabilística dos esforços de amarração em estruturas portuárias. Neste capítulo, são apresentadas as considerações iniciais sobre os aspectos necessários para o cálculo dos esforços de amarração, expondo a justificativa e motivação para a realização do presente trabalho, seguidos dos estudos recentes na área (estado de arte), objetivos (gerais e específicos), e por fim, a organização do texto.

No capítulo 2, é apresentado o referencial teórico, e este é subdividido em quatro itens: Classificação e tipos de estruturas portuárias, ações sobre estruturas portuárias, roteiros de cálculo, teoria das probabilidades e confiabilidade estrutural. Em cada um destes subitens são abordados aspectos necessários para o entendimento do presente estudo.

No capítulo 3, são apresentados aspectos do referido estudo de caso, além da demonstração da obtenção dos parâmetros fixos e aleatórios referentes as três metodologias de cálculo estudadas.

No capítulo 4, é apresentado a metodologia para a aplicação do Método de Monte Carlo para as três normativas estudadas.

No capítulo 5, demonstra-se o procedimento para a obtenção dos pontos de projeto e dos seus parâmetros, onde os subitens deste, demonstram como são determinadas as velocidades de projeto para cada uma das normativas.

No capítulo 6, são apresentados os resultados e discussões do estudo através da apresentação de gráficos de probabilidade acumulada de excedência, médias móveis, e médias móveis do desvio padrão, explicando os motivos pelos quais os resultados tomaram as respectivas formas.

No capítulo 7, são apresentadas as conclusões e considerações finais, demonstrando, perante os

resultados encontrados, os aspectos positivos e negativos para cada uma das normativas.

Por fim, no capítulo 8, apresenta-se toda a bibliografia para a elaboração da presente dissertação.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Classificação e tipos das estruturas portuárias

Cada obra portuária, independente do seu tipo, será inserida em um determinado meio (exposição a condições ambientais como ventos, correntes e ondas) a fim de cumprir um objetivo (tipo e quantidade de navios, cargas que serão manuseadas e manipuladas), onde estas podem ser abrigadas ou não da ação do mar. Em função disso, conforme visto na figura 2.1, pode ou não haver a necessária da utilização de obras especiais de defesa, podendo ainda estas serem localizadas onshore (junto a costa) ou offshore (ao largo da costa).

Concluindo, o ideal seria que as estruturas portuárias fossem instaladas em um ambiente natural, com profundidade compatível com o seu uso (dispensando a necessidade de dragagem) e abrigado das agitações marítimas (localizados em estuários, ambientes lacustres, etc.).

Porém, como nem sempre tais condições podem ser alcançadas, surge a necessidade da implementação de diversas estruturas portuárias, a fim de cumprir o objetivo para qual a mesma foi projetada, resistindo ao ambiente inserido. A seguir, a figura 2.1 expõe um fluxograma dos tipos de estruturas portuárias segundo Mason (1981).

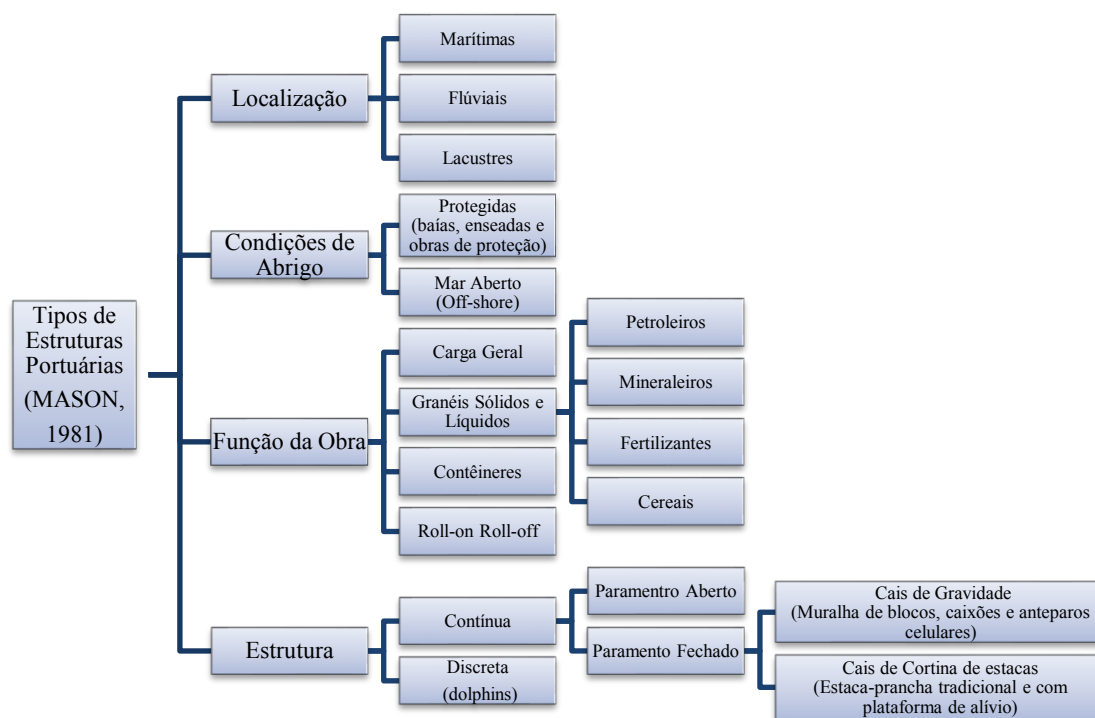


Figura 2.1 - Tipos de estruturas portuárias (Fonte: Adaptado de Mason, 1981).

Há diversas classificações e parâmetros que devem ser analisados quanto a engenharia portuária no capítulo introdutório do livro *Port Engineering* do autor *Gregory P. Tsinker* do ano de 2004, ele percorre os diversos itens que devem ser considerados no planejamento, construção, manutenção e segurança dos portos, são estes: aspectos logísticos, destinação, planejamento a médio e longo prazo, custo, tráfego, instalações, carregamentos solicitantes, produtividade, critérios de cálculo, traçados, número de berços de atracação, tempo de espera e embarcações (Carga Geral, Granéis Sólidos e Líquidos, Contêineres, Roll-on Roll-off etc), sempre levando em conta a relação entre os parâmetros supracitados e as condições ambientais das localidades.

Como o presente trabalho trata do esforço de amarração, não serão expostas todas as classificações citadas, devido não somente a Tsinker (2004), como demais autores de bibliografias existentes que serão abordadas a seguir.

Serão tratados somente os assuntos relacionados a aspectos estruturais, esforços causados pelo movimento das embarcações, por fenômenos naturais, e demais conhecimentos que sejam necessários para o entendimento do presente trabalho.

Em relação aos tipos de estruturas portuárias, segundo Tsinker (2004), o primeiro tipo a ser abordado é o cais (*wharf or quay*), que consiste em uma estrutura marítima para atracação de navios construída por algum tipo de parede, ou outro tipo de estrutura de retenção paralelo e próximo a linha de costa.

A parcela de solo localizada no lado exposto ao ambiente marítimo é dragada para alcançar a profundidade do canal necessária.

Já a parcela em contato com a parte terrestre, deve ser modificada através da realização de cortes e aterros, de forma a obter o nível de acesso estipulado em projeto.

Dentro da classificação de cais, há aqueles que possuem paramento fechado e aqueles que possuem paramento aberto, cada um com suas vantagens e desvantagens.

O de paramento fechado (*closed wharf structure*) tende a defletir a energia, já o aberto (*open wharf structure*) a dissipar, sendo este um dos aspectos que devem ser levados em conta.

Porém, vale salientar que pode haver casos em que sejam utilizadas estruturas diferentes das esplanadas até o momento, sendo de responsabilidade do projetista utilizar os conceitos básicos destas para formar uma estrutura adequada para o caso em particular.

A segunda classificação é a de *Pier*, sendo esta uma estrutura marítima conectada a costa, destinada a atracação de embarcações, podendo ser classificadas em *finger*, que é geralmente orientado perpendicularmente a linha de costa e usualmente possui dois berços de atracação (vide figura 2.2), *T-head* é geralmente orientado paralelo a linha de costa, com ponte de acesso ligando o

continente ao centro do Píer, geralmente fornece somente um berço de atracação, se o comprimento dele for grande o suficiente, um maior número de berços de atracação pode ser adotado (vide figura 2.3), e por último, o *L-shaped*, é similar ao *T-head* porém a ponte (caminho) de acesso é feita conectando a linha de costa ao fim do píer, onde os dois lados podem ser utilizados para atracação (vide figura 2.4). Ainda pode-se citar o píer flutuante, que é ideal para locais com extrema variação de maré, ou onde o período de utilização do píer é muito pequeno.



Figura 2.2 - Fingers piers de grãos líquidos localizados no canal de Houston. (Fonte: <http://www.lanier-engineers.com/projects/marine-liquid-terminals/page2.html>).



Figura 2.3 - Porto de Paranaguá, projeto do novo terminal de grãos (COREX), píer “T” (Fonte: Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina – APPA).

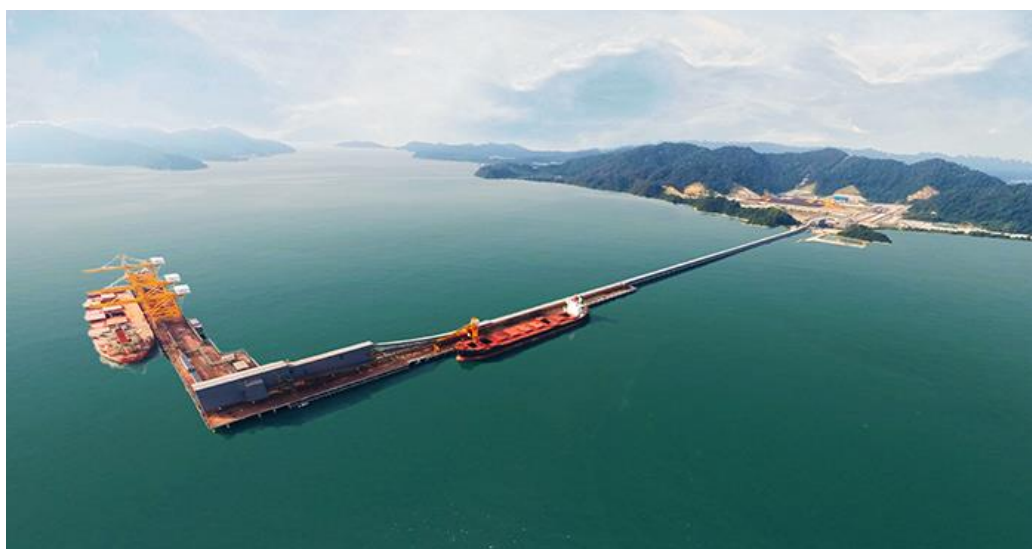


Figura 2.4 - Terminal teluk rubian, localizado no estreito de Malacca, píer em formato de “L”
(Fonte: <http://www.vale.com.my/business/?lang=en/?&lang=en>).

Exemplos de *dolphins* podem ser vistos nas figuras 2.6 e 2.7, estes são constituídos de uma série de estruturas individuais com dispositivos de amarração e atracação, que normalmente são utilizados para o recebimento de embarcações de graneis líquidos e sólidos, onde para estes tipos de embarcações, o custo-benefício é maior. Isto se deve ao fato de não haver necessidade de uma estrutura contínua visto que o material é recolhido através de esteiras rolantes que percorrem o comprimento das embarcações, dispensando a necessidade de um grande espaço para a utilização de maquinário e de pessoal.

Os *dolphins* podem ser divididos em rígidos, em que a estrutura deflete muito pouco sob os carregamentos, e os flexíveis, que defletem sob impacto, em ambas as estruturas são necessários sistemas de defensas, porém, com resistências divergentes.

A figura 2.5, demonstra a classificação dos tipos de estrutura segundo Tsinker (2004).

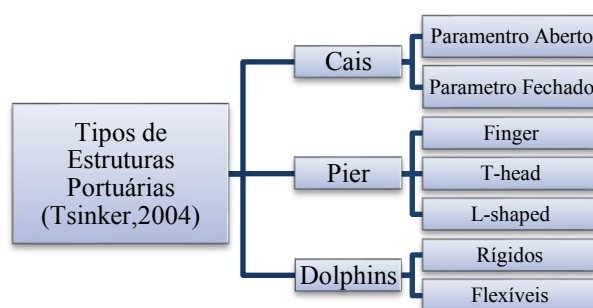


Figura 2.5 - Tipos de estruturas portuárias (Fonte: Tsinker, 2004).



Figura 2.6 - Terminal de combustíveis marítimos do açúcar, TECMA, São Sebastião da Barra- RJ
(Fonte: https://www.bp.com/pt_br/brazil/o-que-fazemos/combustiveis-maritimos.html).

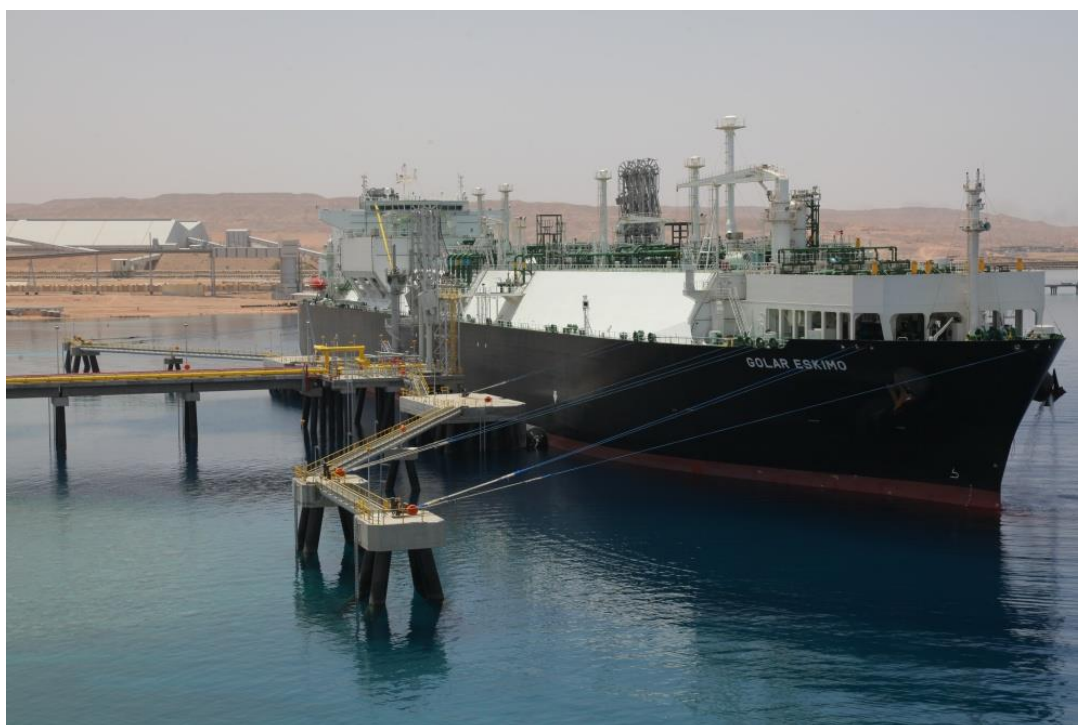


Figura 2.7 - LNG terminal de gás natural liquefeitos, localizado na cidade de Aqaba, Jordânia.
(Fonte: <https://www.baminternational.com/en/projects/aqaba-new-lique>).

Por fim, serão expostos os tipos de estruturas de atracação segundo Thoresen (2014), conforme exposto nas figuras 2.8 e 2.9, estas são classificadas em Estruturas de Atracação sólidas (*solid berth structure*), que podem ser subdivididas em:

- Caís de Gravidade (*gravity-wall structure*), onde a estrutura propriamente dita é capaz de resistir aos esforços solicitantes, sejam eles provenientes das embarcações ou das condições ambientais.
- Estaca-prancha (*Sheet pile structure*), onde a parede frontal exposta ao lado marítimo não resiste aos esforços, e os dispositivos de amarração e atracação são construídos no lado terrestre.
- Estrutura com plataforma de alívio (*Structure with a relieving platform*), parecido com o sistema anterior, porém possui uma plataforma de alívio.
- E em estruturas de atracação abertas (*Open berth structure*), onde ocorre a realização de cortes e aterros, de maneira a obter os níveis estipulados em projeto.

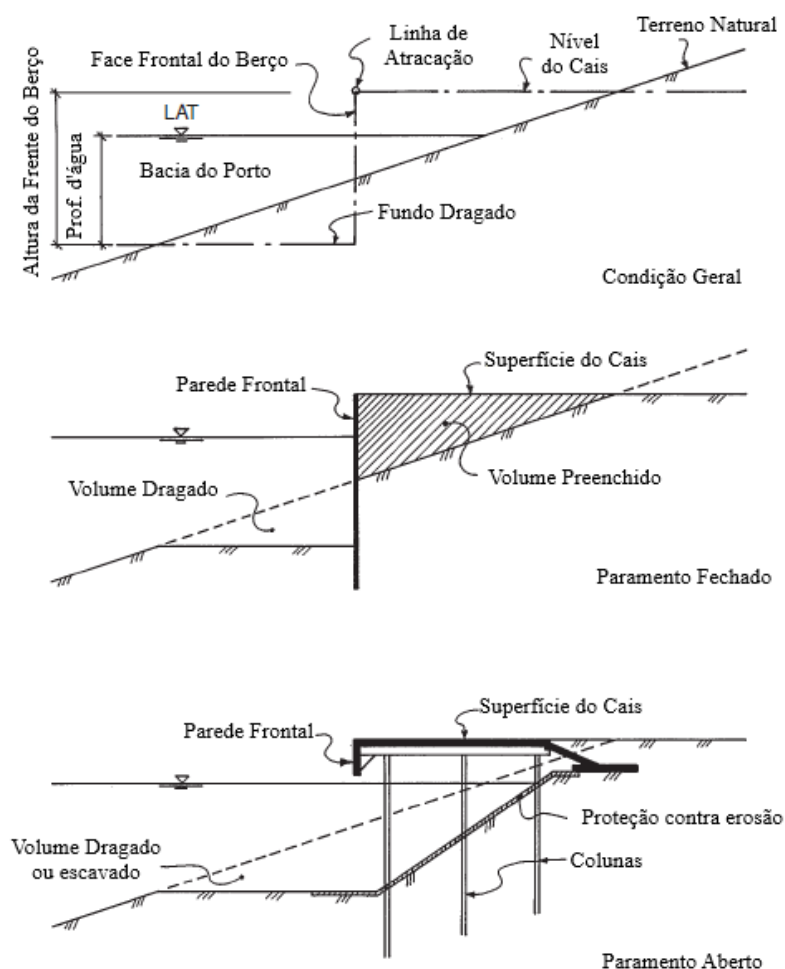


Figura 2.8 - Os dois tipos básicos de estruturas de atracação (Fonte: Adaptada de Thoresen, 2014).

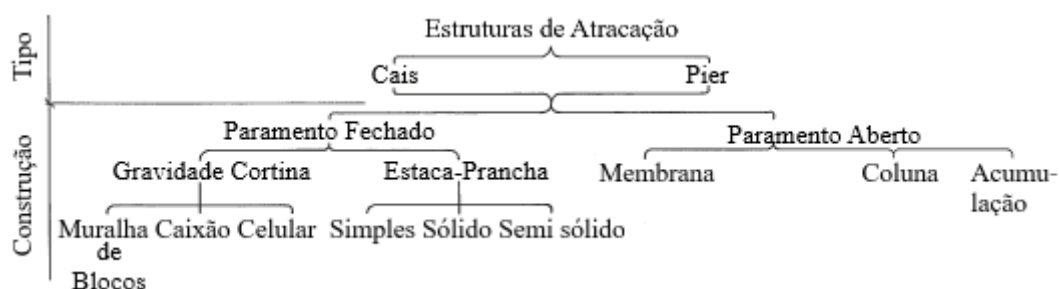


Figura 2.9 - Tipo de estruturas de atracação (Fonte: Adaptada de Thoresen, 2014).

2.2. Ações sobre estruturas portuárias

As ações sobre as estruturas supracitadas são classificadas e expostas de acordo com a figura 2.10, adaptado de Thoresen (2014) e demonstrada a seguir.

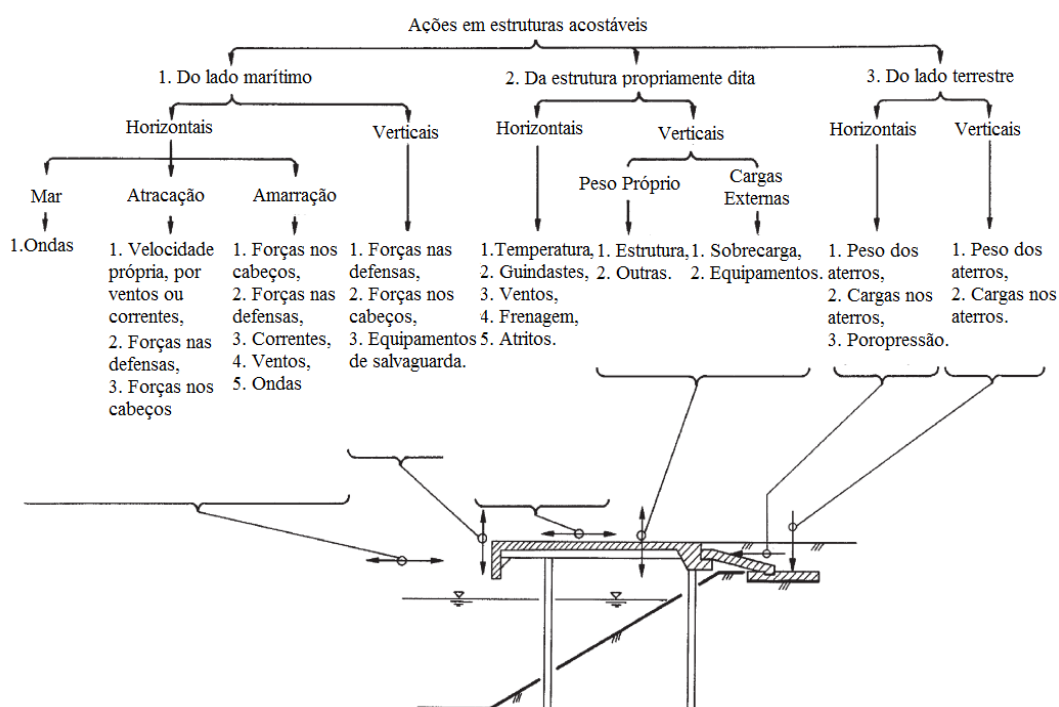


Figura 2.10 - Principais ações em estruturas acostáveis. (Fonte: Adaptada de Thoresen, 2014).

Nos próximos itens serão descritas as ações demonstradas na figura 2.10 que envolvem o cálculo dos esforços de amarração, ou seja, as ações provenientes de condições ambientais (ondas, correntes e ventos), e as ações causadas pelos movimentos das embarcações, de forma a expor o conhecimento necessário para o entendimento do presente trabalho.

2.2.1. Ações provenientes das ondas

Como a maioria dos portos estão localizados em ambientes abrigados naturalmente, ou por estruturas costeiras de proteção, quando o período das ondas geradas pelos ventos é inferior a aproximadamente quatro segundos, o que normalmente ocorre, a ação das ondas não é considerada no cálculo dos esforços de amarração.

Porém, quando o período é superior a quatro segundos, deve ser levado em conta a realização de uma análise dinâmica simplificada do sistema de amarração.

Nos casos em que o porto não é abrigado das ações das ondas, o fenômeno majoritário a ser considerado é o da ressonância, que ocorre devido ao fato de a frequência natural do sistema de amarração se tornar similar a frequência das ondas, acarretando em um aumento da amplitude de vibração do sistema, ampliando assim, o movimento das embarcações, o que acaba levando a um aumento dos esforços nos cabos de amarração (Tsinker, 2004).

2.2.2. Ações provenientes das correntes

A magnitude e a direção das correntes devem ser avaliadas para estabelecer a influência nas operações portuárias de carga e descarga.

As correntes podem surgir nos portos devido ao transporte de massa pelos ventos, diferença entre temperatura e salinidade, efeitos de maré, e fluxo de água proveniente de descargas continentais.

No dimensionamento dos berços de atracação, deve-se assegurar sempre que possível que o eixo que contém a linha de frente das estruturas de atracação esteja o mais paralelo possível da direção da corrente dominante, pois, pequenas angulações entre o eixo longitudinal da embarcação e o ângulo de incidência da corrente podem gerar esforços transversais que devem ser acrescentados durante a avaliação dos sistemas de amarração.

Para averiguar o supracitado, deve-se obter o máximo de dados possíveis em campo de velocidade e direção da corrente.

Outro aspecto importante, presente na obtenção dos esforços proveniente da velocidade da corrente, é o efeito da relação entre o calado submerso da embarcação e a folga existente entre a quilha e o fundo o mar (vide figura 2.11), quanto menor a folga, maior a influência da corrente, consequentemente, maior o esforço gerado pela referida ação (Thoresen, 2014).

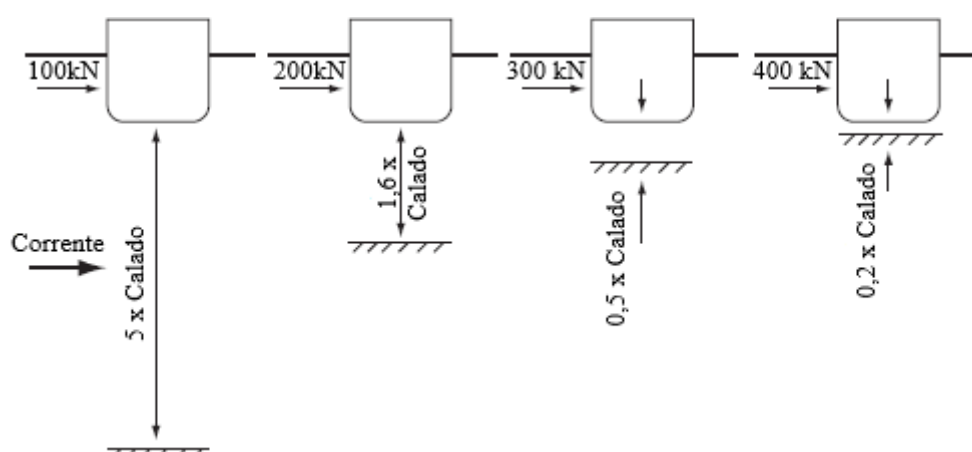


Figura 2.11 - Efeito da folga entre a quilha das embarcações e o fundo.
(Fonte: Adaptada de Thoresen, 2014).

2.2.3. Ações provenientes dos ventos

A velocidade do vento é classificada de acordo com a escala do Beaufort, variando de 0 a 12 conforme a sua intensidade, de acordo com a tabela 2.1. Os dados expostos utilizam como referência a média da velocidade do vento para um período de 10 min, para uma altura de referência de 10 metros (Thoresen, 2014).

Tabela 2.1 - Escala de Beaufort para velocidades de vento (Fonte: Adaptada de Thoresen, 2014).

Beaufort	Descrição	Velocidade (m/s)
0	Calmaria	0,0 - 0,2
1	Bafagem	0,3 - 1,5
2	Aragem	1,6 - 3,3
3	Fraco	3,4 - 5,4
4	Moderado	5,5 - 7,9
5	Fresco	8,0 - 10,7
6	Muito Fresco	10,8 - 13,8
7	Forte	13,9 - 17,1
8	Muito Forte	17,2 - 20,7
9	Duro	20,8 - 24,4
10	Muito Duro	24,5 - 28,4

11	Tempestuoso	28,5 - 32,6
12	Furacão	32,7 -

O vento é o movimento do ar que varia no tempo e no espaço, e seu entendimento é de suma importância para o correto cálculo dos esforços de amarração.

Apesar deste fenômeno variar no tempo e no espaço, o que o torna uma ação dinâmica, a maioria dos critérios de projeto consideram este como uma ação estática.

Os valores das velocidades do vento são obtidos em termos de rajadas, que normalmente possuem tempo de escala que varia entre 5 e 20 segundos, obtidos a partir de uma determinada altura de referência, normalmente 10 metros.

Para cada critério de projeto, é definido um valor de velocidade médio baseado nos valores dos dados de rajada a uma certa altura de referência, de tal forma que a velocidade do vento seja obtida para um determinado período de tempo necessário, para que os esforços nos cabos de amarração se desenvolvam por completo, dadas as elevadas inércias das embarcações.

Deve-se salientar que devido ao fato das grandes embarcações (as que possuem maiores áreas de incidência de vento) ficarem fundeadas quando ventos extremos são previstos, normalmente não ocorre o registro de valores de velocidade de vento durante eventos extremos (Gaythwaite, 2014).

Ainda é importante salientar que as forças atuantes sobre as embarcações devido ao vento variam consideravelmente de acordo com a área de exposição que cada embarcação possui. Quanto maior for esta área, maior será o esforço devido a velocidade do vento.

Nos casos em que ocorre variação dos esforços em relação ao centro de gravidade da embarcação devido a diferenciação do formato desta em relação ao seu centro, pode ocorrer a geração de momentos de rotação, o que pode ou não ser previsto e considerado nos critérios de projeto (Thoresen, 2014).

Ao longo do presente trabalho, serão demonstrados a base de dados das velocidades dos ventos utilizadas, expondo a forma de obtenção destes e as devidas correções de acordo com cada uma das normativas.

2.2.4. Ações causadas por embarcações sobre as estruturas portuárias

Quando a embarcação se aproxima do berço de atracação ela transmite esforços a estrutura, ao atracar ocorre a transformação da energia cinética (navio atracando a uma certa velocidade) em energia de deformação das defensas (a magnitude do impacto da embarcação na defesa deve ser

considerada para evitar danos a embarcação e as defensas).

Após o impacto, ocorre a amarração da embarcação através de cabos ligados a sistemas de amarração, de maneira a limitar ao máximo os movimentos das embarcações.

Para elaboração e entendimento dos elementos pertencentes as estruturas portuárias, deve-se conhecer os principais parâmetros das embarcações, conforme exposto nas figuras 2.12 e 2.13.

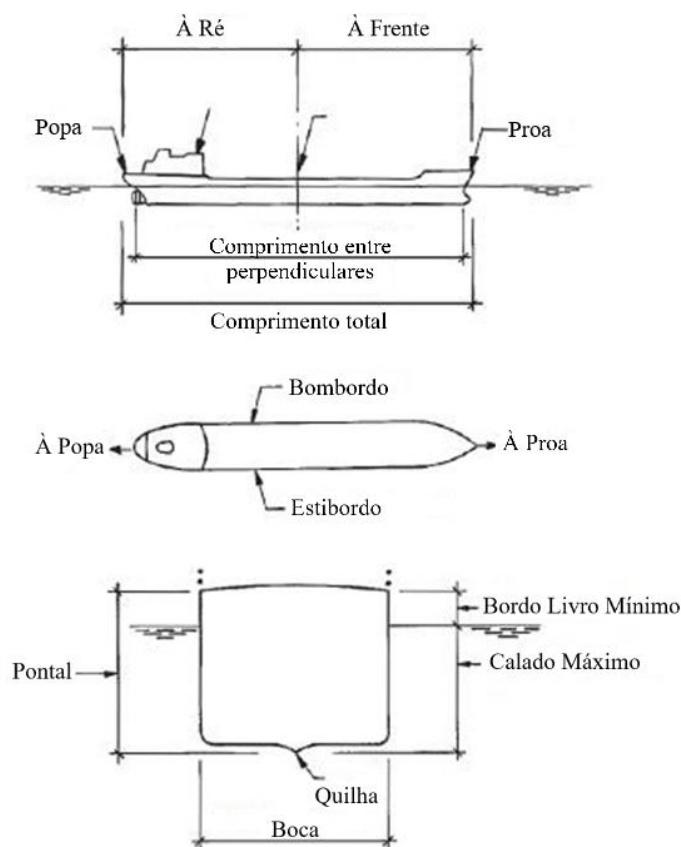


Figura 2.12 - Definição das dimensões da embarcação (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

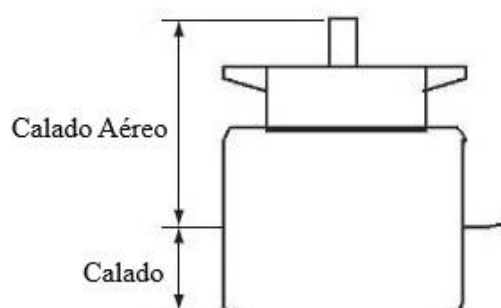


Figura 2.13 - Calado aéreo (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

Os parâmetros das figuras 2.12 e 2.13 são necessários para o dimensionamento dos esforços provenientes das embarcações, onde segue o significado de cada um destes parâmetros:

Proa ou À proa – Ponto localizado na parte frontal da embarcação;

Popa ou À popa – Ponto localizado na parte traseira da embarcação;

À Ré – Distância entre a popa e o centro da embarcação;

À Frente – Distância entre a proa e o centro da embarcação;

Bombordo – Parte localizada a esquerda do rumo da embarcação;

Estibordo – Parte localizada a direita do rumo da embarcação;

Quilha – Peça localizada na parte inferior da embarcação que se estende da proa à popa;

Bordo Livre Mínimo – Distância entre a linha de flutuação e o topo da embarcação para a condição de navio carregado.

Calado Aéreo – Distância máxima entre a linha de flutuação e o ponto mais alto da embarcação, para uma determinada condição de carregamento da embarcação;

D (Calado) – Distância entre a linha de flutuação e a quilha do navio, para uma determinada condição de carregamento da embarcação;

L_{bp} (Comprimento entre perpendiculares) – corresponde ao comprimento medido entre as perpendiculares da embarcação;

L_{oa} (Comprimento total) – corresponde a distância máxima entre os pontos extremos da embarcação sobre o seu eixo;

Pontal – corresponde a altura total do casco do navio;

B (Boca ou Largura) – corresponde a distância entre o Bombordo e Estibordo na seção média do navio;

$D_{máx}$ (Calado Máximo) – corresponde a altura entre a linha de flutuação e a quilha do navio em carga;

W (Deslocamento) – corresponde ao peso do volume de água deslocado pela embarcação expresso em toneladas;

DWT (Porte da Embarcação em Toneladas) – corresponde à diferença entre deslocamento em carga e lastro;

Esforços causados por atracação

As cargas de atracação, são quantificadas em termos de transferência de energia cinética das embarcações em energia potencial dissipada pelos sistemas de defensas, a relação gerada pelo sistema de defesa geralmente impõe um considerável carregamento horizontal na estrutura, portanto, deve-

se dentro dos diversos critérios de projeto calcular a energia de atracação sobre as defensas, determinando dentre os diversos tipos e modelos existentes qual será o sistema utilizado.

A componente longitudinal e vertical da força de atracação atuando sobre a estrutura ($F_{\text{atracação}}$), deve ser calculada através da multiplicação entre o coeficiente de fricção entre a embarcação e o sistema de defensas adotados (μ), função do tipo de material das defensas (vide tabela 2.2), e a energia máxima de atracação ($E_{\text{máx}}$), conforme pode ser visualizado na expressão obtida conforme em Tsinker (2004), e exposta a seguir.

$$F_{\text{atracação}} = \mu \cdot E_{\text{máx}} \quad (1)$$

Tabela 2.2 - Coeficientes de fricção entre embarcações e defensas (Fonte: Adaptado Tskiner, 2004).

Materiais de Contato	Coeficiente de Fricção
Madeira com aço	0,4 – 0,6
Uretano com aço	0,4 – 0,6
Aço com aço	0,25
Borracha com aço	0,6 – 0,7
UHMW ¹ com aço	0,1 – 0,2
UHMW – Ultrahigh – molecular – weight plastic rubbing strips (Tiras de fricção de plástico de peso molecular ultra elevado)	

Esforços causados por amarração

Os carregamentos atuantes nos esforços de amarração provêm de fenômenos ambientais e relacionados as embarcações, como exemplo, pode-se citar os ventos, correntes e ondas (que já foram abordados previamente), efeitos das embarcações, variação de níveis d'água, mudanças de calado, operação e movimentação das instalações, gelo, dentre outros.

As ações de maior importância para a determinação dos esforços de amarração são as velocidades do vento e da corrente, estas são tipicamente tratadas como forças estáticas associadas com o fluxo uniforme, e conseqüentemente controladas pelas velocidades destes fluídos.

Contudo, escoamentos instáveis ou turbulentos são importantes em alguns casos, e, portanto, as acelerações dos fluídos devem ser consideradas, requerendo uma análise dinâmica mais elaborada.

A ação das ondas pode ser dividida em esforços primários, que são proporcionais à altura das ondas (H), onde a embarcação responde dinamicamente a frequência da onda, e secundário, devido as forças de arrasto que são proporcionais ao quadrado da altura da onda.

A força de arrasto apresenta uma pequena magnitude, mas pode variar lentamente ao longo

do tempo, e em algumas circunstâncias, pode gerar respostas dinâmicas no sistema de amarração devido a ressonância, devendo ser realizadas análises dinâmicas.

Outro aspecto importante para a elaboração do correto cálculo dos esforços de amarração, diz respeito aos graus de liberdade de uma embarcação, um navio flutuando livremente possui seis graus de liberdade, três translações e três rotações, o movimento de proa e popa ao longo do eixo longitudinal da embarcação é denominado Deslocamento ou Deriva (Surge), o lateral de Abatimento (Sway) e o vertical de Arfagem (Heave), a rotação ao longo do eixo “z” Cabeceio (Yaw), ao longo do eixo “x” Balanço ou Jogo (Roll) e ao longo do eixo “y” Caturro (Pitch).

A Arfagem (Heave), Caturro (Pitch) e o Balanço ou Jogo (Roll) são movimentos que possuem a ação da gravidade como força restauradora, e períodos naturais associados com a flutuabilidade.

Já a Deriva (Surge), Abatimento (Sway) e Cabeceio (Yaw) não possuem força restauradora e, portanto, possuem períodos associados com a “dureza” do sistema de amarração, e são de primordial importância na análise e projeto dos sistemas de amarração.

As distribuições naturais das forças ocorrem sobre um amplo espectro de frequências, e podem ocasionar qualquer um dos movimentos descritos ou conjunto destes.

Os seis graus de liberdade devem ser considerados separadamente para a condição de embarcação flutuando livremente, enquanto que para os navios amarrados, todos os graus apresentam alguma angulação, e devem ser considerados juntos.

Nas análises estáticas ou quase estáticas, são considerados somente três graus de liberdade, Deslocamento ou Deriva (Surge), Abatimento (Sway), e Cabeceio (Yaw), enquanto que na análise dinâmica, deve-se considerar todos os graus de liberdade (Gaythwaite, 2014).

A figura 2.14 expõe todos os três movimentos de translação e os três movimentos de rotação, totalizando os 6 graus de liberdade de uma embarcação.

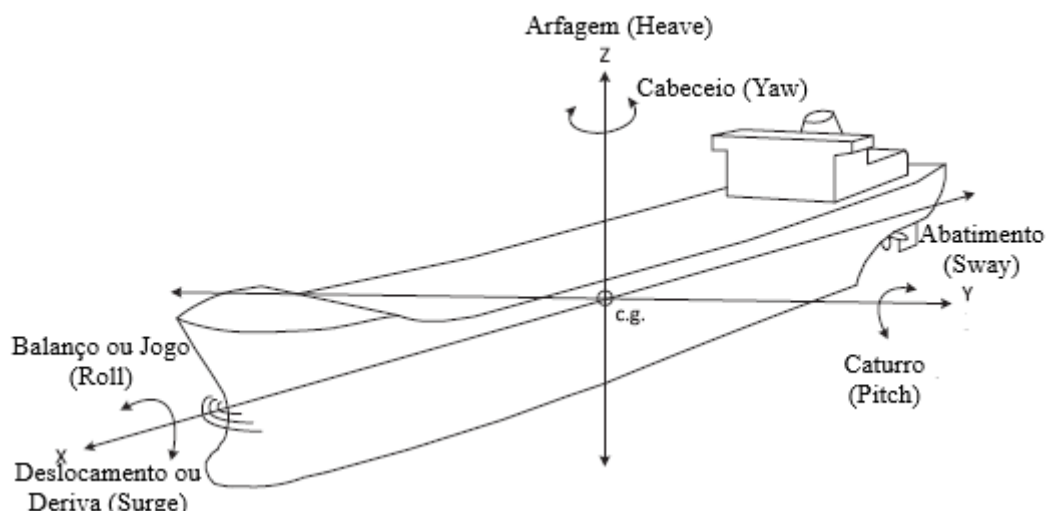


Figura 2.14 - Graus de liberdade da embarcação (Fonte: Adaptado Gaythwaite, 2014).

Precauções sempre devem ser tomadas para verificar as direções de angulações de referência, podendo começar a serem contadas da proa ou da popa, com momentos positivos no sentido horário ou anti-horário, dependendo da fonte, ou seja, do critério de projeto que deverá ser utilizado.

Sempre quando há livre flutuação das embarcações, sem restrições, as forças na maioria das vezes não apresentam importância. As forças de amarração são resultantes das restrições impostas pelos sistemas de amarração.

O nível da água e o calado também podem afetar os resultados devido as mudanças na geometria das linhas de amarração, função do movimento vertical das embarcações, e relacionados com as estruturas fixas de amarração.

Quando as embarcações possuem tamanhos e tipos incertos, e a maior embarcação esperada possui um deslocamento menor do que cerca de 20.000 toneladas, a abordagem tradicional pode ser utilizada.

Esta consiste na aplicação do mínimo carregamento sobre os sistemas de amarração, ou seja, dependendo do critério de cálculo utilizado (Americana, Britânica, etc), são expostos valores conhecidos de força por unidade de área para cada tipo de embarcação, e estes são utilizados para o dimensionamento dos sistemas de amarração, porém, são recomendados somente para os casos em que o deslocamento é menor do que o supracitado (Gaythwaite, 2014).

Outro aspecto importante na obtenção das ações causadas pelas embarcações, é a influência da área de exposição ao vento e a corrente.

É preciso deixar claro, quais são as áreas de influência para cada direção, para o cálculo dos esforços longitudinais, isto é, aqueles que possuem direção coincidente com o eixo longitudinal da

embarcação, a área que está sob ação dos esforços corresponde a seção transversal da embarcação (acima do nível d'água sob influência dos ventos e abaixo das correntes).

Já para o cálculo dos esforços transversais, ou seja, aqueles que possuem direção ortogonal ao eixo longitudinal da embarcação, a área que está sob ação dos esforços corresponde a seção longitudinal da embarcação (acima do nível d'água sob influência dos ventos e abaixo das correntes), conforme pode ser visto nas figuras 2.15 e 2.16.

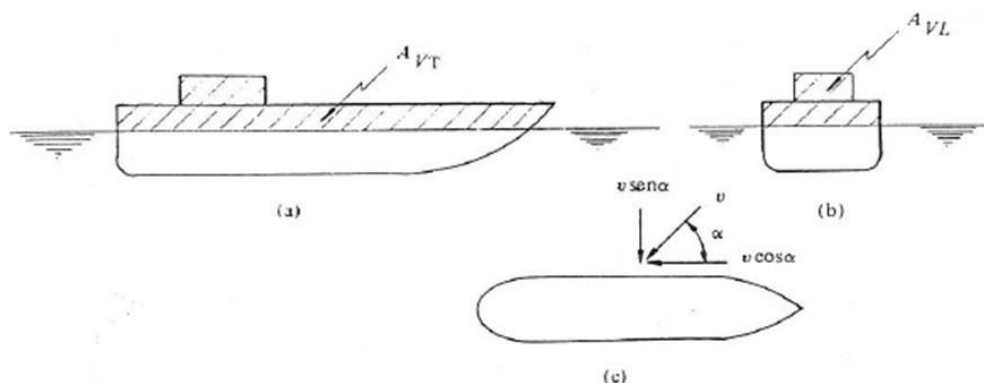


Figura 2.15 - Decomposição da velocidade de vento incidente e áreas de exposição aos ventos longitudinais e transversais (Fonte: Mason, 1981).

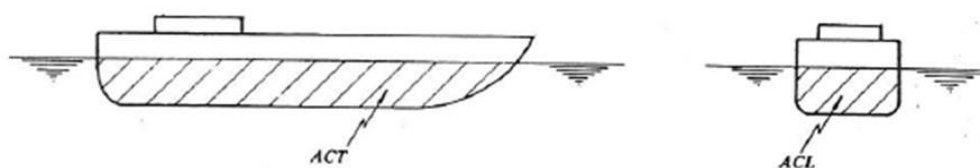


Figura 2.16 - Áreas de exposição das correntes longitudinais e transversais (Fonte: Mason, 1981).

Esforços causados pela própria estrutura

Os esforços causados pela própria estrutura podem ser subdivididos em horizontais e verticais, podendo estes carregamentos possuírem cargas permanentes e variáveis.

As cargas permanentes, consistem no peso dos elementos que sempre estarão presentes na estrutura, tal como os elementos de amarração, defensas, estruturas de acesso, tubulações, trilhos e equipamentos de transporte de cargas estacionários, não devendo o projetista esquecer os elementos previstos para serem utilizados após a conclusão da obra.

Deve-se também, analisar a possibilidade de um carregamento proveniente do galgamento em estruturas localizadas em áreas abertas, expostas as ações marítimas.

As cargas permanentes de uma estrutura portuária, consistem em um pequeno percentual do total dos carregamentos atuantes sobre a estrutura, portanto, a precisão na estimativa das cargas

permanentes não é de grande importância, porém, o projetista deve realizar uma análise simplificada conservadora da estimativa deste tipo de carga (deve-se buscar valores de peso unitários das construções mais recentes), visando a relação custo e benefício.

Já para as cargas verticais variáveis, a principal consideração que deve ser feita é em relação aos equipamentos que se movimentem através das áreas portuárias (Mobile Harbour Crane, Portêineres, Guindastes, etc), além da consideração de cargas móveis e dinâmicas dos veículos de transporte, devendo nestes casos analisar o carregamento de forma dinâmica, ou utilizar metodologias que simplifiquem, porém, considerem tais carregamentos (Tsinker, 2004).

Na falta de dados reais, é necessário utilizar dados de equipamentos existentes nas metodologias de cálculo, que demonstram as principais características dos equipamentos, o ideal para a obtenção dos esforços de cálculo é realizar análises das combinações dos carregamentos que podem ocorrer simultaneamente, de forma a verificar o pior caso, e assim utilizar este como valor de dimensionamento.

Esforços provenientes do lado terrestre

A pressão lateral proveniente do lado terrestre, ativa e passiva, atuando em estruturas portuárias devem ser avaliadas de acordo com procedimentos padrões presentes na engenharia geotécnica.

Na determinação das pressões laterais, o efeito de abalos sísmicos e pressões devidas a diferença entre o nível d'água devem ser consideradas (Tsinker, 2004).

2.3. Roteiro de cálculo

A seguir serão demonstrados os roteiros de cálculo das normativas (NBR 9782:1987, BS 6349-1 e UFC 4-159-03) que serão abordadas no presente trabalho, apresentando todas as formulações utilizadas e o significado dos parâmetros envolvidos.

Ao fim de cada normativa, será exposto um fluxograma demonstrando as formulações necessárias, e o procedimento para a obtenção dos esforços.

2.3.1. Forças devido aos ventos (NBR 9782:1987)

Inicialmente, será exposta a metodologia de cálculo para a obtenção de esforços de amarração segundo a NBR 9782:1987, estes valores serão obtidos a título de posterior comparação com as demais normativas.

O primeiro esforço que deve ser calculado é o devido ao vento, conforme exposto na fórmula a seguir:

$$R_w = k_w \cdot \frac{V_{w,NBR}^2}{1600} \cdot (A_T \cdot \cos^2 \theta_w + A_L \cdot \sin^2 \theta_w) \quad (2)$$

Onde:

R_w = Força devido ao vento de acordo com a NBR 9782:1987 (kN);

k_w = Coeficiente de forma do vento;

$V_{w,NBR}$ = Velocidade de projeto do vento de acordo com a NBR 9782:1987 (m/s);

A_T = Área da seção transversal do navio acima do nível d'água (m²);

A_L = Área de seção longitudinal do navio acima do nível d'água (m²);

θ_w = Ângulo formado pela direção do vento com o eixo longitudinal do navio (graus), vide figura 2.17.

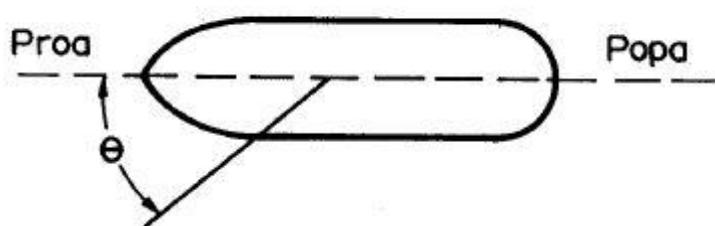


Figura 2.17 - Ângulo formado pela direção do vento com o eixo longitudinal do navio.
(Fonte: NBR 9782:1987).

O item 8.1.2 da NBR 9782:1987 limita a utilização de velocidades que provoquem pressões superiores a 1 kN/m², ou seja, é necessário realizar a divisão do esforço obtido pela área exposta ao vento, tanto para a direção transversal quanto para a direção longitudinal, esta relação não pode ser menor que 1.

Já o item 8.1.3 da NBR 9782:1987, expõe o coeficiente de forma do vento (k_w), que é função da direção do vento e da condição de carregamento da embarcação (carregada ou lastro), pode assumir

valores entre 0,6 a 1,3, podendo ser adotado em média o valor de 1,2, ou então valor obtido de ensaios feitos com modelo reduzido.

Para valores diferentes, recomenda-se a realização de ensaios feitos com modelo reduzido.

2.3.2. Forças devido as correntes (NBR 9782:1987)

O esforço devido a corrente, pode ser calculado de acordo com a equação 3:

$$R_c = 0,528 \cdot V_{c,NBR}^2 \cdot L_{bp} \cdot D \cdot k_c \quad (3)$$

Onde:

R_c = Força devido a corrente de acordo com a NBR 9782:1987 (kN);

$V_{c,NBR}$ = Velocidade da corrente de acordo com a NBR 9782:1987 (m/s);

L_{bp} = Comprimento entre perpendiculares da embarcação (m);

D = Calado da embarcação (m), utilizado $D_{máx}$ ou D_{min} , dependendo da condição da condição de carregamento.

k_c = Coeficiente de forma da corrente.

Os itens 8.2.2 e 8.2.3 da referida norma, expõem que o coeficiente de forma depende da direção da corrente, e da relação entre calado da embarcação e a altura do nível da água no local, expondo os valores de k_c através da tabela 2.3.

Por último, o item 8.2.4, relata que mesmo que a direção da corrente esteja alinhada com o eixo longitudinal da embarcação, $\theta(A) = 0^\circ$, é necessário considerar uma variação da direção da corrente de no mínimo 20° .

Tabela 2.3 - Valores aproximados do coeficiente de forma. (Fonte: NBR9782:1987).

$\theta(A)$ d/D	0°	20°	40°	60°	80°	90°
1,1	0,0	1,2	3,1	4,1	4,6	4,7
1,5	0,0	0,5	1,3	2,0	2,3	2,3
4,0	0,0	0,2	0,6	0,8	0,9	0,9

2.3.3. Fluxograma para a obtenção dos esforços de amarração (NBR 9782:1987)

Neste item, será exposto na figura 2.18 um fluxograma demonstrando as equações e o procedimento para a obtenção dos esforços de amarração devido ao vento e a corrente para a NBR 9782:1987.

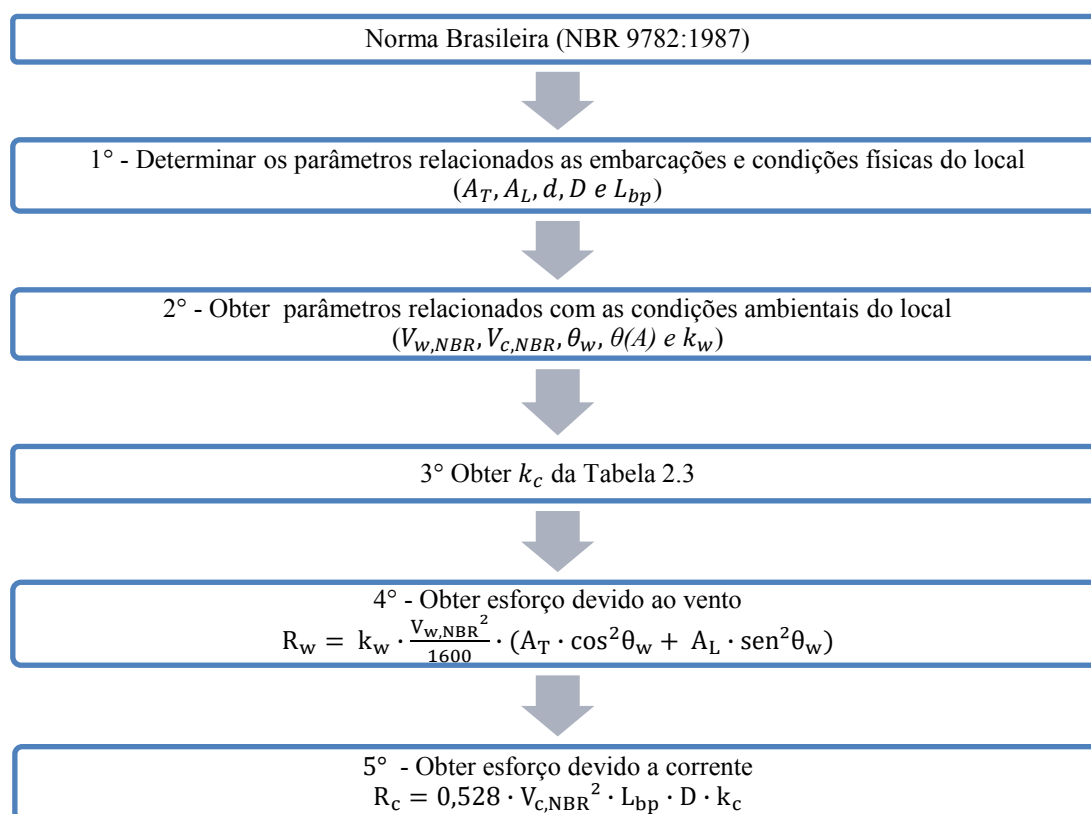


Figura 2.18 - Fluxograma para obtenção dos esforços de amarração para a NBR 9782:1987 (Fonte: Autor).

2.3.4. Forças devido aos ventos (BS 6349-1:2000)

A BS 6349-1:2000 expõe a sua metodologia de cálculo, porém, descreve que deve ser utilizada somente para obter a ordem de grandeza dos esforços devido as velocidades de vento e da corrente.

A norma recomenda ainda, sempre que possível, realizar testes em modelos físicos reduzidos sob o navio de projeto, ou similares a estes. O esforço devido ao vento, para as direções transversais e longitudinais, são obtidas segundo as equações 4 e 5.

$$F_{TW} = C_{TW} \cdot \rho_A \cdot A_L \cdot V_{w,BSI}^2 \cdot 10^{-4} \quad (4)$$

$$F_{LW} = C_{LW} \cdot \rho_A \cdot A_L \cdot V_{w,BSI}^2 \cdot 10^{-4} \quad (5)$$

Onde:

F_{TW} = Força transversal de vento frontal (forward) ou de ré (aft) de acordo com a BS 6349-1:2000 (kN);

F_{LW} = Força longitudinal de vento de acordo com BS 6349-1:2000 (kN);

C_{TW} = Coeficiente de força de vento transversal frontal ou de ré;

C_{LW} = Coeficiente de força de vento longitudinal;

ρ_a = Massa específica do ar (1,3096 kg/m³ à 0°C até 1,1703 kg/m³ à 30°C);

A_L = Área longitudinal projetada do navio acima da linha de superfície da água em metros quadrados (m²);

$V_{w,BSI}$ = Velocidade de projeto do vento de acordo com a BS 6349-1:2000 (m/s).

Os valores dos coeficientes C_{TW} e C_{LW} são expostos nas figuras 2.19, 2.20 e 2.21, estes variam função do ângulo de incidência, condição de carregamento das embarcações, e devido aos tipos de embarcações.

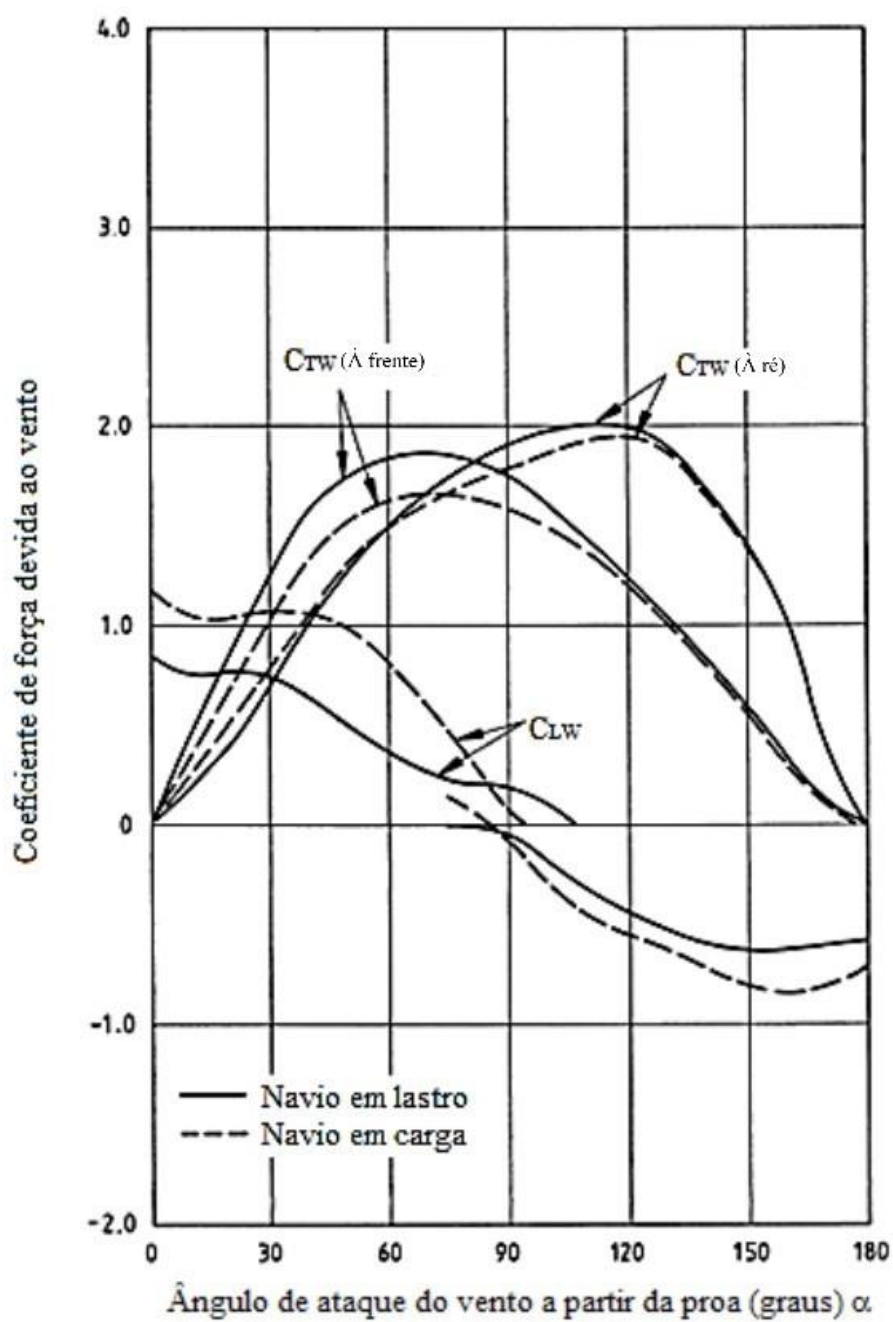


Figura 2.19 - Coeficientes de força devido ao vento para navios de carga seca e pequenos petroleiro (Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).

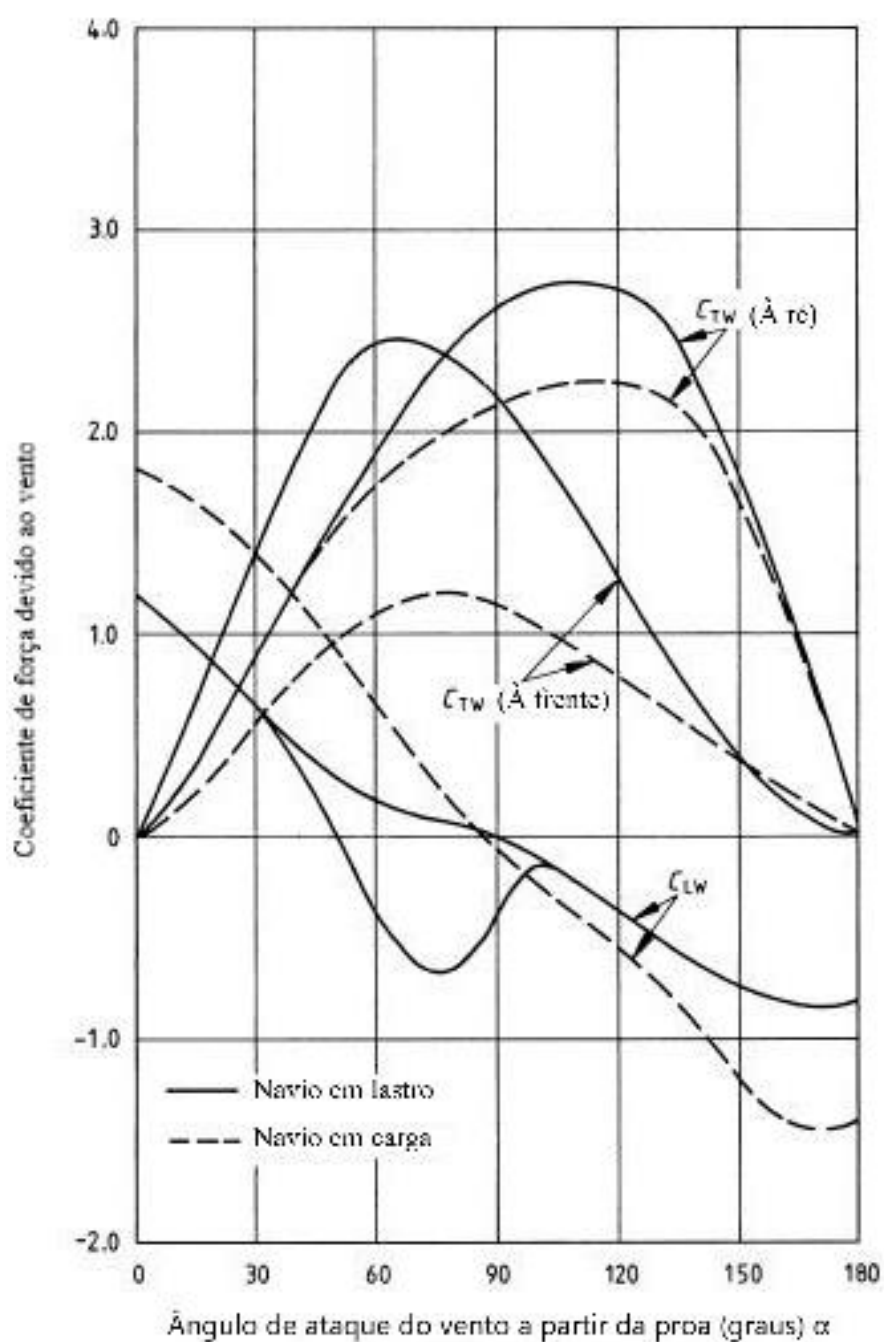


Figura 2.20 - Coeficientes de força devido ao vento para grandes petroleiros com superestrutura à ré (Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).

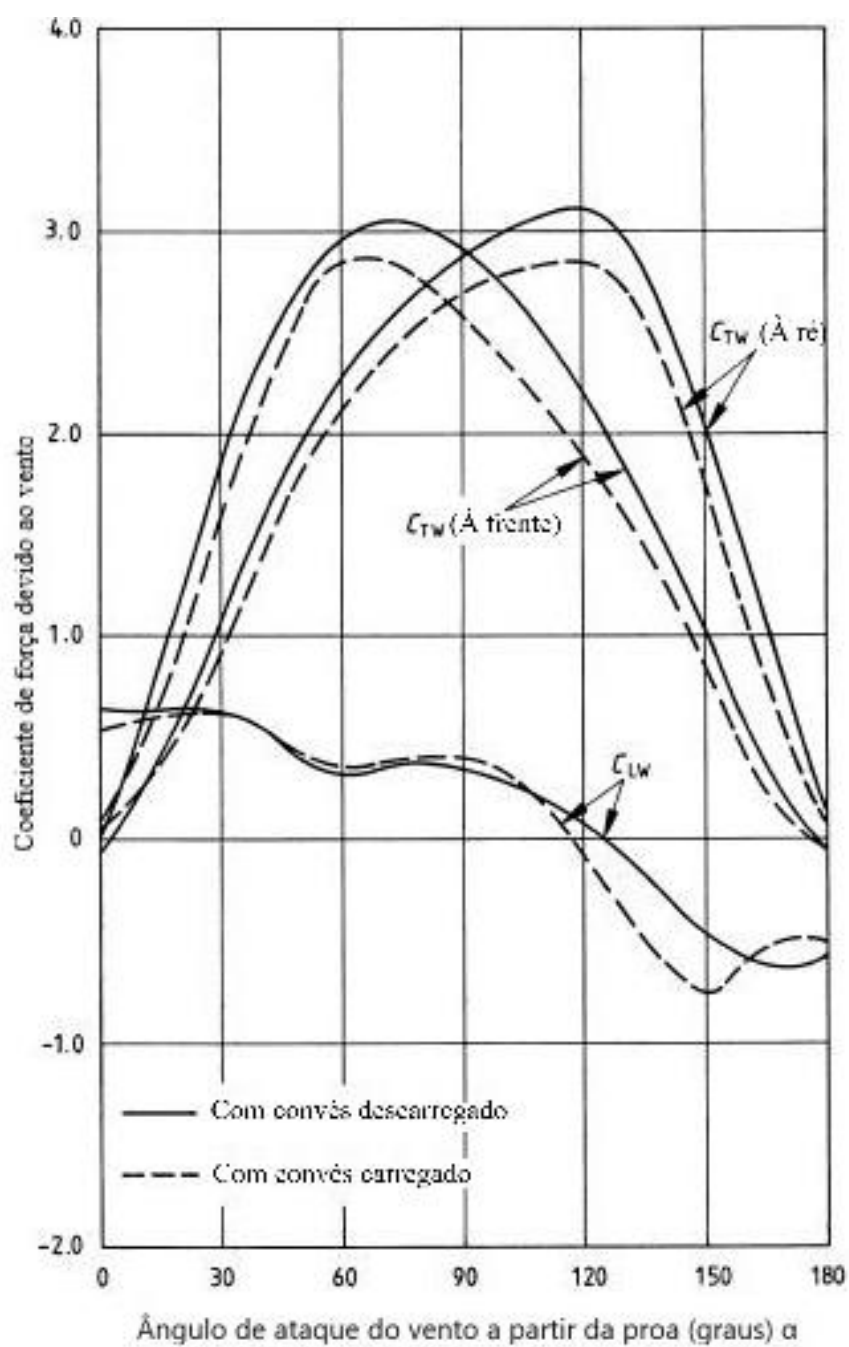


Figura 2.21 - Coeficientes de força devido ao vento para navios de contêineres típicos
(Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).

Na ausência de dados referentes aos parâmetros das embarcações, pode-se utilizar as características das embarcações expostas nas figuras 2.22 e 2.23, que contemplam navios petroleiros e de contêineres.

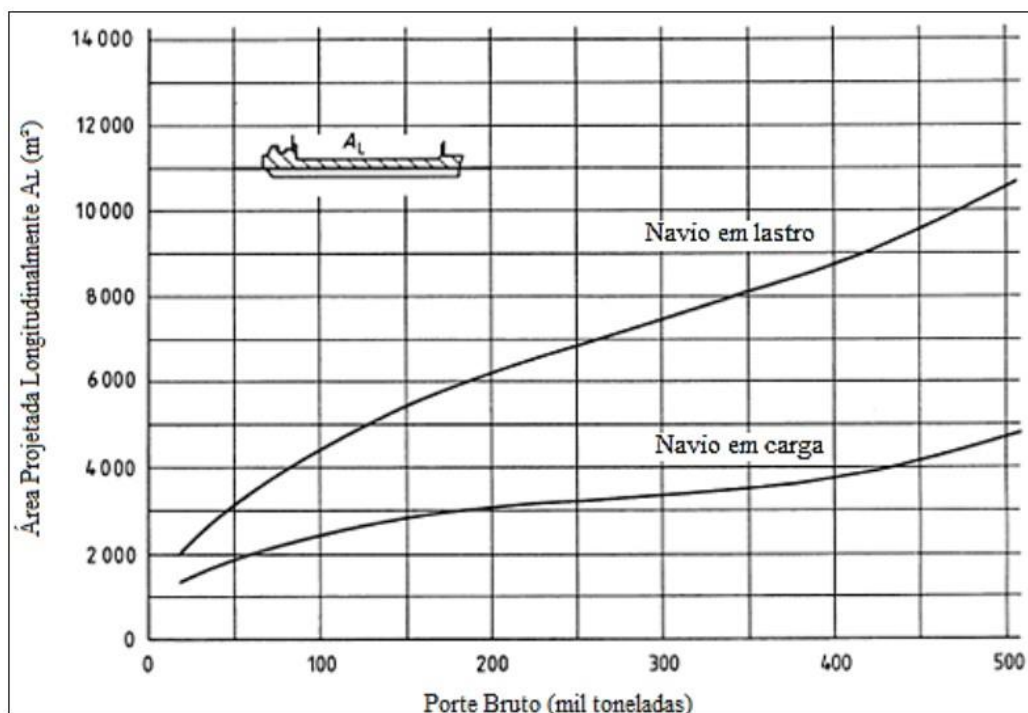


Figura 2.22 - Área projetada acima do nível d'água para navios petroleiros.
(Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).

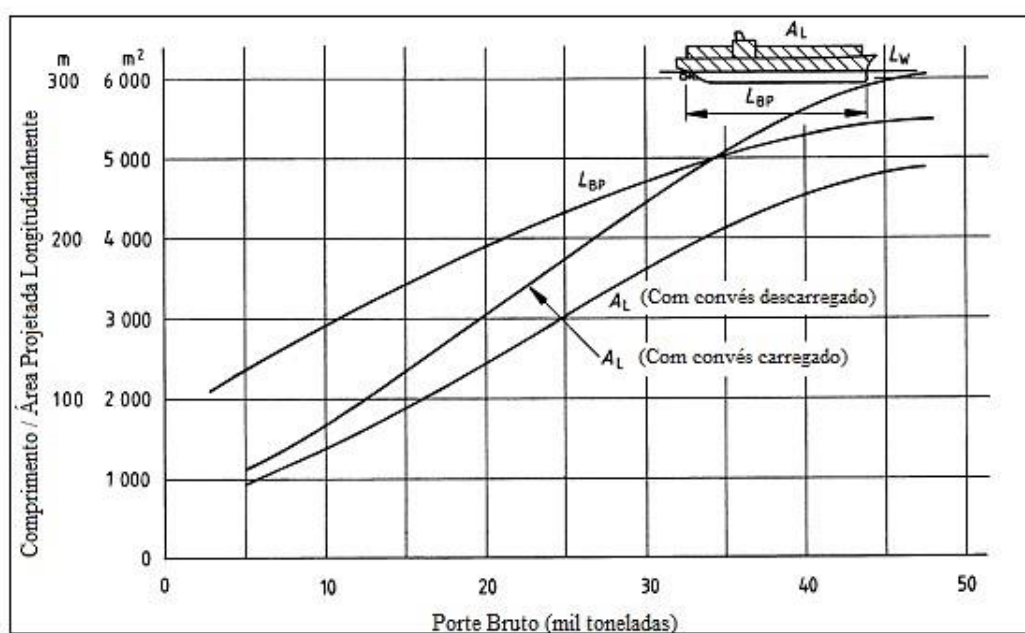


Figura 2.23 - Área projetada acima do nível d'água para navios de contêineres
(Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).

2.3.5. Força devido as correntes (BS 6349-1:2000)

As forças longitudinais e transversais de corrente podem ser obtidas conforme equações expostas a seguir:

$$F_{TC} = C_{TC} \cdot C_{CT} \cdot \rho_w \cdot L_{bp} \cdot d_m \cdot V_{c,BSI}^2 \cdot 10^{-4} \quad (6)$$

$$F_{LC} = C_{LC} \cdot C_{CL} \cdot \rho_w \cdot L_{bp} \cdot d_m \cdot V_{c,BSI}^2 \cdot 10^{-4} \quad (7)$$

Onde:

F_{TC} = Força transversal de corrente frontal ou de ré de acordo com a BS 6349-1:2000 (kN);

F_{LC} = Força longitudinal de corrente de acordo com a BS 6349-1:2000 (kN);

C_{TC} = Coeficiente da força de arraste transversal de corrente frontal ou de ré;

C_{LC} = Coeficiente de ação de arraste de corrente longitudinal;

C_{CL} = Fator de correção da profundidade para ações de corrente longitudinal;

C_{CT} = Fator de correção da profundidade para ações de correntes transversais;

ρ_w = Massa específica da água (kg/m³);

L_{bp} = Comprimento entre perpendiculares da embarcação (m);

d_m = Calado médio da embarcação em metros (m);

$V_{c,BSI}$ = Velocidade de projeto da corrente de acordo com a BS 6349-1:2000 (m/s).

Os valores para obtenção dos coeficientes transversais e longitudinais podem ser obtidos na figura 2.24, estes dependem do tipo da embarcação, ângulo de incidência, localização e direção dos esforços.

Já os fatores de correção para águas profundas, para direção dos esforços transversais e longitudinais podem ser encontrados nas figuras 2.25 e 2.26 respectivamente, estes dependem da relação entre a profundidade natural do canal (d), pelo calado médio das embarcações (d_m), ângulo de incidência, e tipo de embarcação.

Nota-se que para as figuras 2.25 e 2.26, o fator de correção é constante para a variação do ângulo de incidência, apresentando valores diferentes somente com mudanças na relação d/d_m .

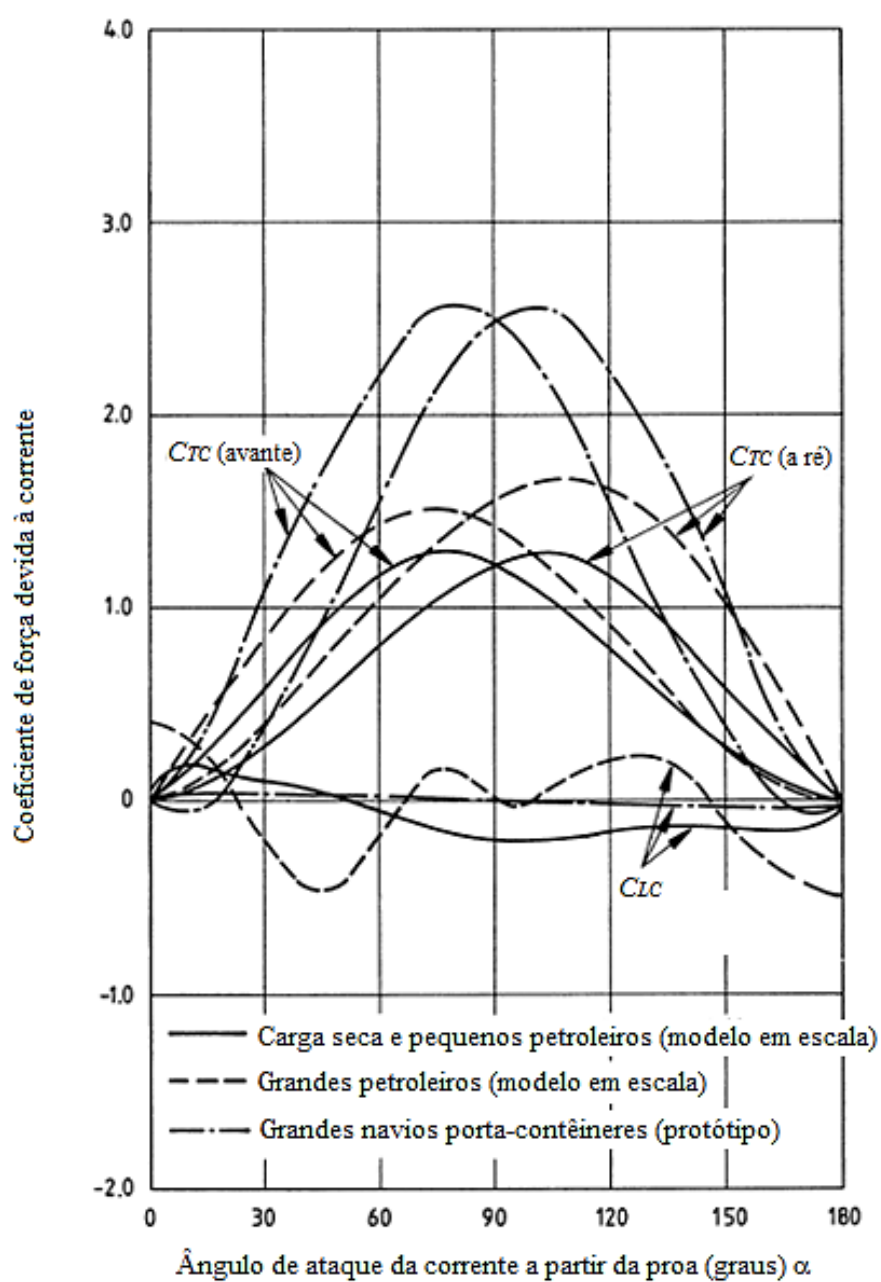


Figura 2.24 - Coeficientes de força de arrasto devido a corrente para águas profundas
(Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).

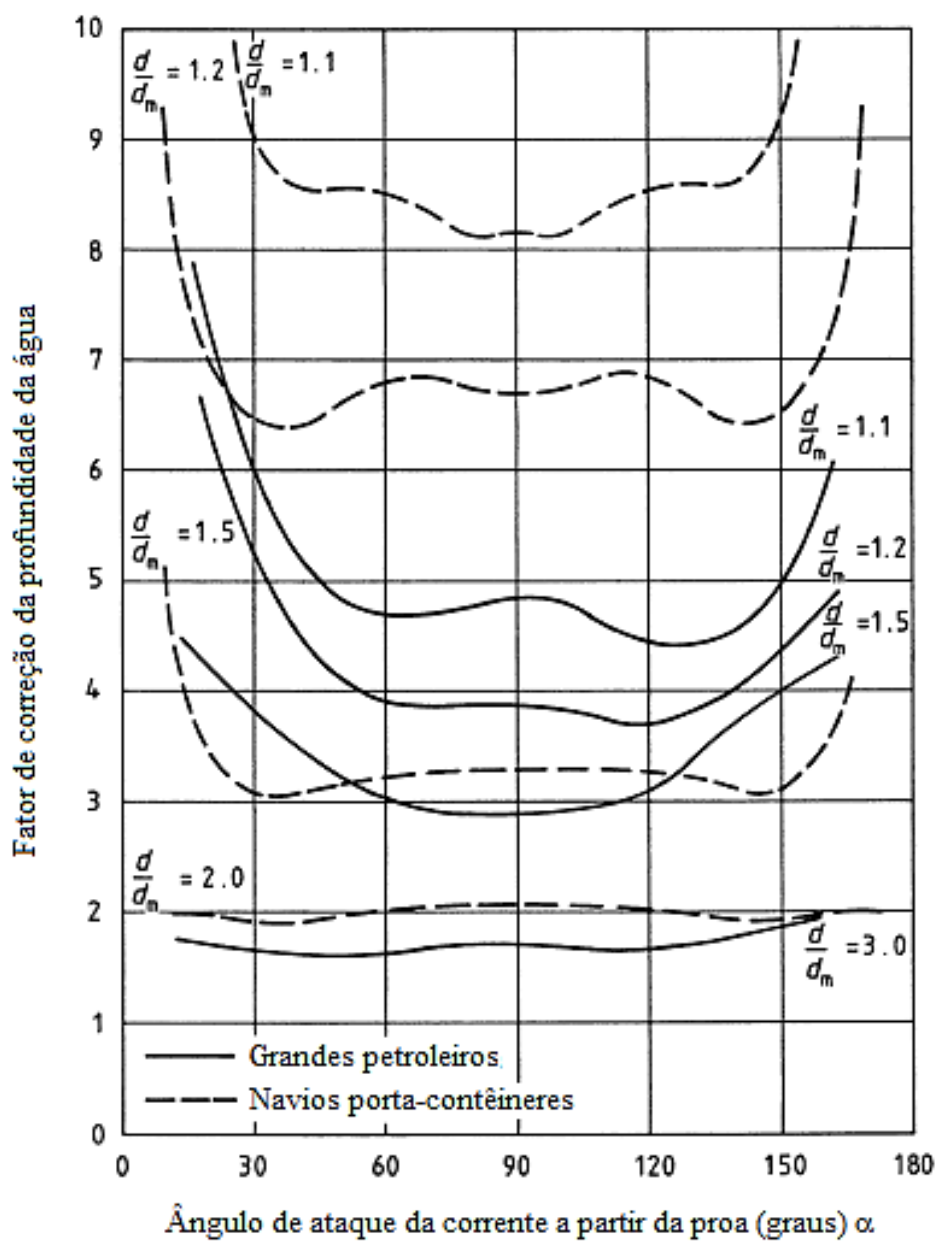


Figura 2.25 - Fator de correção da profundidade da água para esforços laterais devido a corrente (Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).

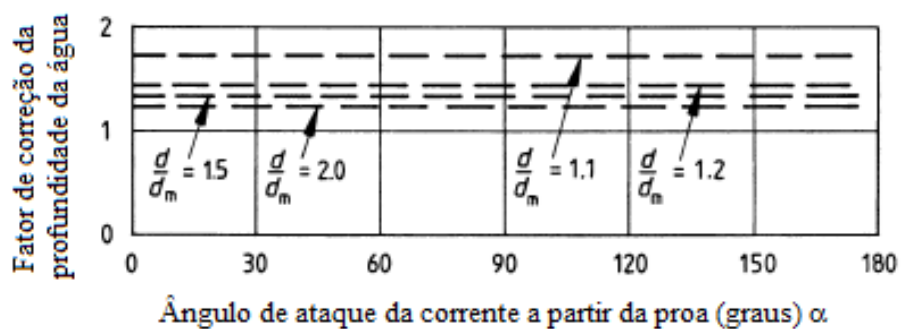


Figura 2.26 - Fator de correção da profundidade da água para esforços longitudinais decorrentes sobre navios de contêineres (Fonte: Adaptado BS 6349-1:2000).

2.3.6. Fluxograma para a obtenção dos esforços de amarração (BS 6349-1:2000)

As figuras 2.27 e 2.28 expõem as formulações e o procedimento da norma Britânica para obtenção dos esforços de amarração devido a corrente e ao vento.

Nota-se que as formulações para a obtenção dos esforços transversais e longitudinais são independentes, tanto para o vento quanto para a corrente, o que não ocorre na norma Brasileira.

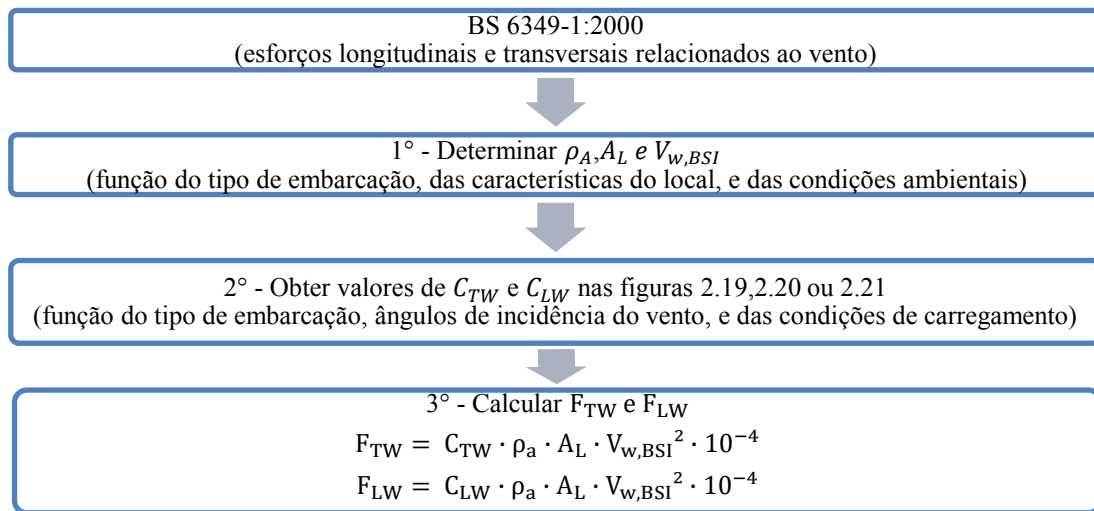


Figura 2.27 - Fluxograma para a obtenção dos esforços transversais e longitudinais devido ao vento para a norma BS 6349-1:2000 (Fonte: Autor).

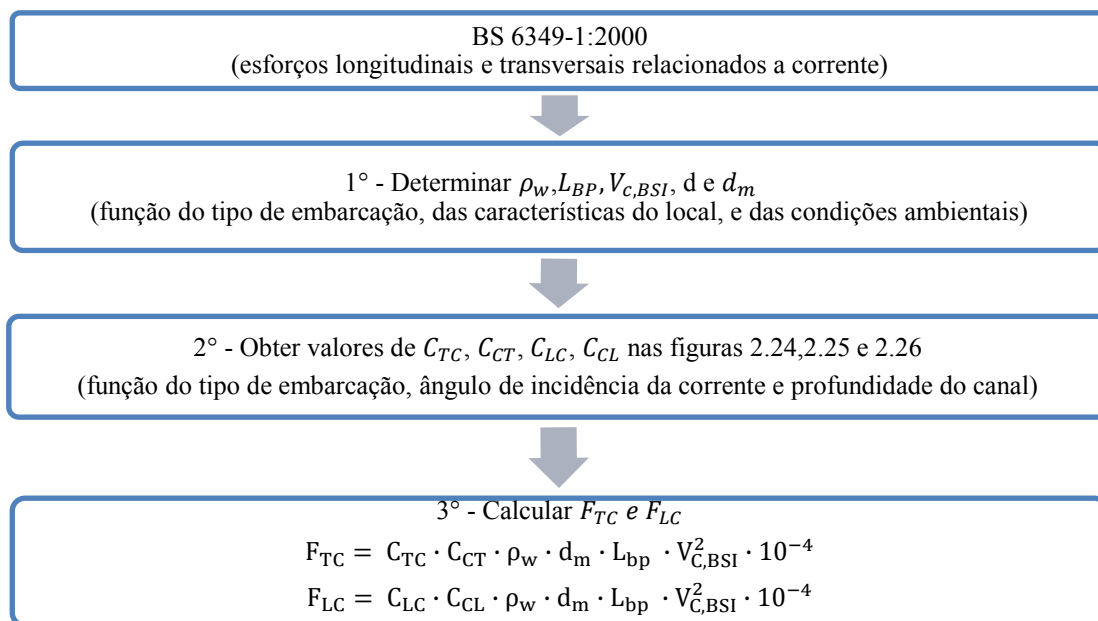


Figura 2.28 - Fluxograma para a obtenção dos esforços transversais e longitudinais devido a corrente para a norma BS 6349-1:2000 (Fonte: Autor).

2.3.7. Forças devido aos ventos (UFC 4-159-03:2005)

A força devido ao vento é obtida na direção longitudinal e transversal ao eixo longitudinal da embarcação.

Primeiro, deve-se determinar a força estática transversal de vento, sendo esta a força que age perpendicularmente ao eixo longitudinal da embarcação, conforme exposto a seguir:

$$F_{yw} = 0,5 \cdot \rho_a \cdot V_{w,UFC}^2 \cdot A_y \cdot C_{yw} \cdot f_{yw}\{\theta_w\} \quad (8)$$

Onde:

F_{yw} = Força estática transversal do vento de acordo com o UFC 4-159-03:2005 (newtons);

ρ_a = Massa específico do ar (kg/m^3), obtido da tabela 2.4;

$V_{w,UFC}$ = Velocidade de projeto do vento de acordo com o UFC 4-159-03:2005 (m/s);

A_y = Área longitudinal projetada da embarcação (m^2);

C_{yw} = Coeficiente de arraste de força transversal de vento;

$f_{yw}\{\theta_w\}$ = Função de forma para força transversal.

As diversas propriedades da água e do ar pertinentes para o cálculo dos esforços de amarração, que variam de acordo com a temperatura, tanto para o sistema inglês quanto para o internacional de medidas, é exposta na tabela 2.4.

Tabela 2.4- Propriedades de engenharia do ar e da água (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).

Valores Padrões para Água salgada sob o nível do mar a 15°C

Propriedades	Sistema SI	Sistema Inglês
Massa específica, ρ_w	1026 kg/m^3	1,9905 slug/ft ³
Peso específico, γ_w	10060 newton/m ³	64,043 lbf/ft ³
Volume por “Long Ton (LT)”	0,9904 m ³ /LT	34,977 ft ³ /LT
Viscosidade cinemática, ν	1,191E-6 m ² /sec	1,2817E-5 ft ² /sec

Valores Padrões para Água doce sob o nível do mar a 15°C

Propriedades	Sistema SI	Sistema Inglês
Massa específica, ρ_w	999,0 kg/m^3	1,9384 slug/ft ³
Peso específico, γ_w	9797 newton/m ³	62,366 lbf/ft ³
Volume por “Long Ton (LT)”	1,0171 m ³ /LT	35,917 ft ³ /LT

Volume por “metric ton”	1,001 m³/LT	35,3497 ft³/LT
Viscosidade cinemática, ν	1,141E-6 m²/sec	1,2285E-5 ft²/sec

Valores Padrões do Ar ao nível do mar a 20°C

Propriedades	Sistema SI	Sistema Inglês
Massa específica, ρ_a	1,221 kg/m³	0,00237 slug/ft³
Peso específico, γ_a	11,978 newton/m³	0,07625 lbf/ft³
Viscosidade cinemática, ν	1,50E-6 m²/sec	1,615E-4 ft²/sec

Para a determinação da área longitudinal projetada da embarcação (A_y) e dos coeficientes C_{yw} e $f_{yw}\{\theta_w\}$, é necessário expor as dimensões das embarcações e suas variáveis de acordo com a referida norma, vale salientar que os graus de liberdade das embarcações são os mesmos demonstrados na figura 2.14.

A figura 2.29 expõe o sistema de coordenadas para as embarcações, onde a direção positiva do eixo “x” (eixo de deriva à proa), “y” (eixo de abatimento à bombordo), e do momento (M+) são expostas.

As áreas transversais e longitudinais sob a ação do vento são demonstradas na figura 2.30, onde o valor de A_y utilizado na equação 8 é obtido através da soma da área longitudinal do casco sob ação do vento (A_H), com área longitudinal da superestrutura sob ação do vento (A_s).

Por fim, é necessário obter o valor do coeficiente empírico C' , função dos tipos de embarcações, conforme visualizado na tabela 2.5, e a função de forma para força transversal ($f_{yw}\{\theta_w\}$), que pode ser obtida de acordo com equação 9 ou através do gráfico da figura 2.31.

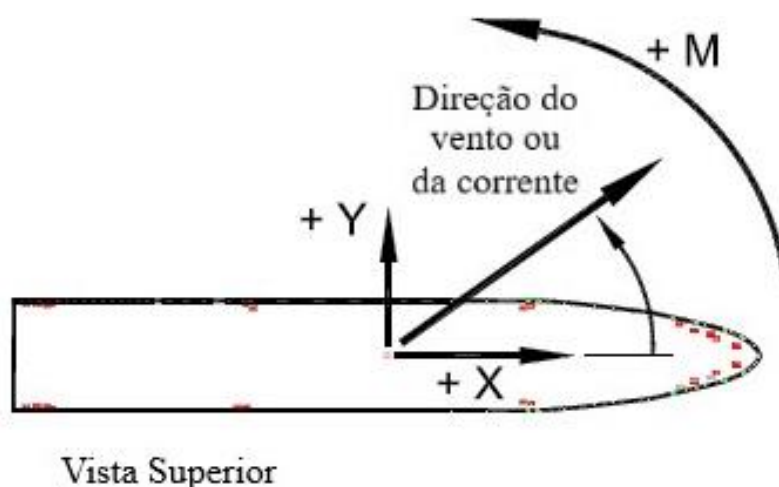


Figura 2.29 - Sistema de coordenadas das embarcações (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).

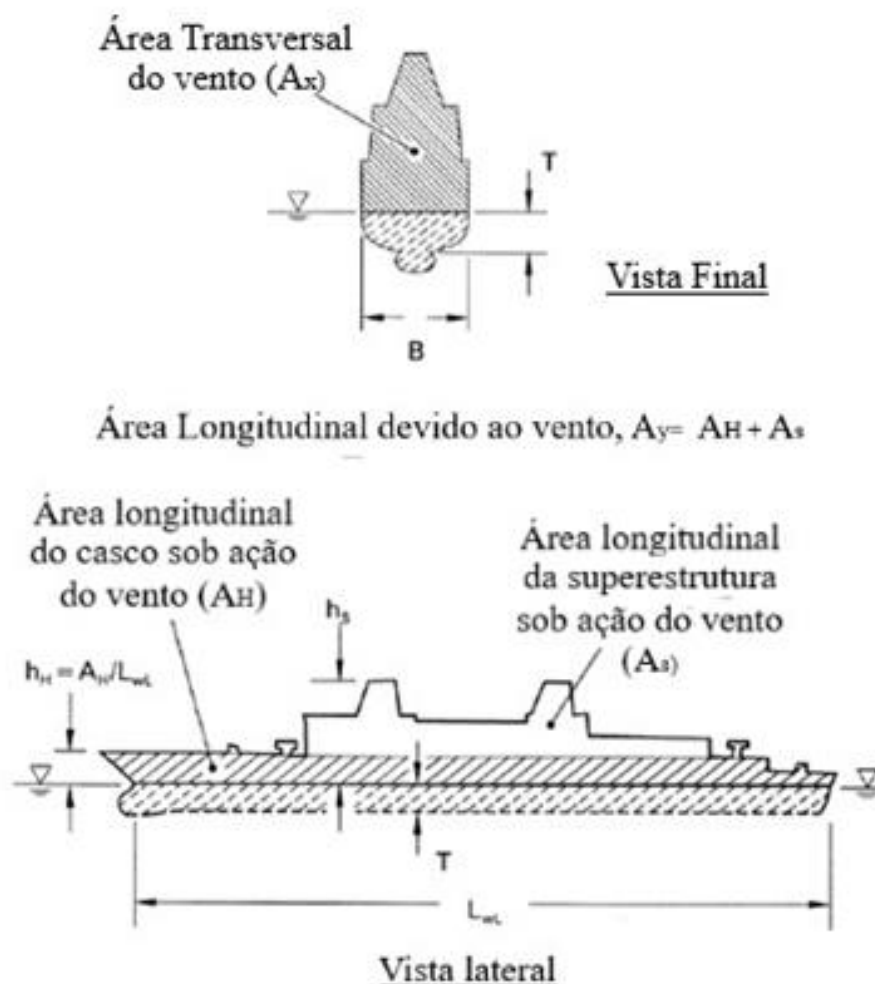


Figura 2.30 - Definição dos termos utilizados no cálculo dos esforços devido aos ventos (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).

Tabela 2.5- Valores amostrais dos coeficientes de ventos para embarcações (C) (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).

Embarcações	C'	Notas
Casco Dominante	0,82	Porta-aviões e Dique Seco
Típico	0,92	Embarcações com superestrutura moderada
Superestrutura extensa	1,02	Navios de guerra

A expressão para calcular $f_{yw}\{\theta_w\}$, é expressa a seguir:

$$f_{yw}\{\theta_w\} = +(\sin \theta_w - 0,05 \cdot \sin\{5\theta_w\})/0,95 \quad (9)$$

A equação acima assume valores positivos quando θ_w varia entre 0° e 180° , e negativos para variações de 180° e 360° , a figura 2.31 demonstra valores de $f_{yw}\{\theta_w\}$ em função de ângulos variando de 0 a 180° .

θ_w (graus)	$f_{yw}\{\theta_w\}$	θ_w (graus)	$f_{yw}\{\theta_w\}$
0	0.000	45	0.782
5	0.069	50	0.856
10	0.142	55	0.915
15	0.222	60	0.957
20	0.308	65	0.984
25	0.402	70	0.998
30	0.500	75	1.003
35	0.599	80	1.003
40	0.695	85	1.001
45	0.782	90	1.000

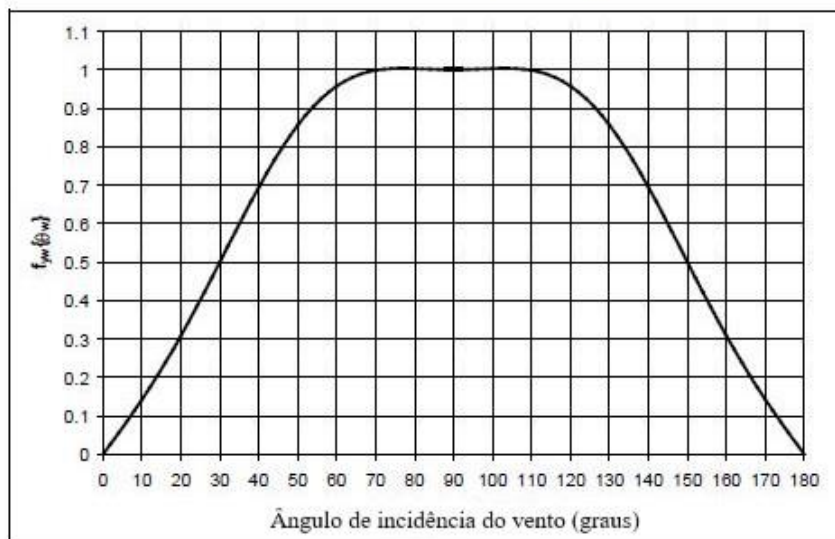


Figura 2.31 - Função de forma para força transversal (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).

Após o exposto, deve-se calcular o coeficiente de arraste da força transversal (C_{yw}) através da seguinte equação:

$$C_{yw} = C' \cdot \left[\left((0,5 \cdot (h_s + h_H)) / h_R \right)^{\frac{2}{7}} \cdot A_s + \left(0,5 \cdot \frac{h_H}{h_R} \right)^{\frac{2}{7}} \cdot A_H \right] / A_y \quad (10)$$

Onde:

C_{yw} = Coeficiente de arraste de vento transversal;

- C' = Coeficiente empírico (extraído da tabela 2.5);
 h_s = Altura da superestrutura acima do nível d'água (m);
 L_{wl} = Comprimento do navio no nível d'água (m);
 A_H = Área de vento longitudinal do casco (m²);
 $h_H = \frac{A_H}{L_{wl}}$ = Altura média do casco de navio (m);
 h_R = Altura de referência (igual a 10 m);
 A_s = Área de vento longitudinal da superestrutura (m²);
 A_y = Área longitudinal projetada da embarcação (m²).

Após o cálculo da força estática transversal de vento de acordo com o UFC 4-159-03:2005 (F_{yw}), é necessário calcular força estática longitudinal do vento de acordo com o UFC 4-159-03:2005 (F_{xw}), esta força corresponde ao esforço devido ao vento atuando na mesma direção que o eixo longitudinal da embarcação, a equação para a obtenção desta força é exposta a seguir.

$$F_{xw} = 0,5 \cdot \rho_a \cdot V_{w,UFC}^2 \cdot A_x \cdot C_{xw} \cdot f_{xw} \cdot \{\theta_w\} \quad (11)$$

Onde:

- F_{xw} = Força estática longitudinal do vento de acordo com o UFC 4-159-03:2005 (newtons);
 ρ_a = Massa específica do ar (kg/m³, obtido na tabela 2.4);
 $V_{w,UFC}$ = Velocidade do vento de acordo com o UFC 4-159-03:2005 (m/s);
 A_x = Área de vento transversal da embarcação (m²);
 C_{xw} = Coeficiente de arraste da força longitudinal do vento;
 $f_{xw} \cdot \{\theta_w\}$ = Função de forma para força longitudinal.

O valor de ρ_a é obtido na tabela 2.4, a área transversal da embarcação (A_x) na figura 2.30, e o modo de obtenção da velocidade do vento será abordado posteriormente, restando a determinação do coeficiente de arraste da força longitudinal do vento (C_{xw}), e a função de forma para a força longitudinal ($f_{xw} \cdot \{\theta_w\}$).

O coeficiente C_{xw} possui valores para ventos incidindo de proa (C_{xwB}) ou de popa (C_{xwS}), e pode ser obtido de acordo com a tabela 2.6, estes variam de acordo com os tipos das embarcações (domínio de casco, normal e superestrutura excessiva).

Tabela 2.6 - Valores recomendados de C_{xwB} e C_{xwS} (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).

Tipos de embarcações	C_{xwB}	C_{xwS}
Casco Dominante (porta-aviões, submarinos, navios de cruzeiro)	0,40	0,40
Normal*	0,70	0,60
Petroleiros com superestrutura centralizada *	0,80	0,60
Superestrutura expressiva (Navios de guerra)	0,70	0,80

* A norma recomenda que um acréscimo de +0.10 no valor de C_{xwB} e C_{xwS} devido a variações dos carregamentos

A função de forma longitudinal ($f_{xw} \cdot \{\theta_w\}$) varia ao longo do comprimento do navio, entre a proa e a popa.

Existe um ângulo em que a força longitudinal devido ao vento muda de sinal (θ_x), este valor depende da localização da superestrutura em relação ao centro da embarcação. Os valores recomendados são os expostos na tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Valores recomendados para θ_x . (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).

Localização da superestrutura	θ_x (graus)
Logo à frente do centro do navio (rumo a proa)	100
No centro do navio	90
Logo atrás do centro do navio (rumo a popa)	80
Navios de guerra	70
Casco dominante	60

Por fim, deve-se obter a função de forma para a força longitudinal ($f_{xw} \cdot \{\theta_w\}$), está varia de acordo com os ângulos θ_x e θ_w , e devido ao tamanho e a forma que as superestruturas das embarcações possuem, a referida função pode ser obtida de duas maneiras, conforme segue.

Grupo I – Superestrutura de navio com pequena área vélica

Como exemplo do tipo I, podemos citar os porta-aviões e os navios de carga, onde θ_x é o ângulo de vento incidente que provoca força longitudinal nula, e θ_w é o ângulo de incidência do vento.

Deve-se verificar os valores obtidos de $f_{xw} \cdot \{\theta_w\}$, pois estes são simétricos, portanto, quando

os valores de θ_w forem maiores que 180° deve-se subtrair o mesmo por 360° .

A equação para a determinação da função de forma longitudinal $f_{xw} \cdot \{\theta_w\}$ para o Grupo I pode ser expressa da seguir forma:

$$f_{xw} \cdot \{\theta_w\} = \cos(\phi) \quad (12)$$

Onde:

$$\phi_- = \left(\frac{90^\circ}{\theta_x} \right) \theta_w \text{ se } \theta_w < \theta_x \quad (13)$$

$$\phi_+ = \left(\frac{90^\circ}{180 - \theta_x} \right) (\theta_w - \theta_x) + 90^\circ \text{ se } \theta_w > \theta_x \quad (14)$$

Grupo II – Navio com grande área vélica, superestrutura distribuída

Para as embarcações que possuem superestrutura distribuída, a função de forma longitudinal pode ser expressa como:

$$f_{xw} \cdot \{\theta_w\} = \frac{\left((\sin(\gamma) - \frac{\sin(5\gamma)}{10}) \right)}{0,9} \quad (15)$$

Onde:

$$\gamma_- = \left(\frac{90^\circ}{\theta_x} \right) \cdot \theta_w + 90^\circ \text{ se } \theta_w < \theta_x \quad (16)$$

$$\gamma_+ = \left(\frac{90^\circ}{180^\circ - \theta_x} \right) \cdot (\theta_w) + \left(180^\circ - \left(\frac{90^\circ \cdot \theta_x}{180^\circ - \theta_x} \right) \right) \text{ se } \theta_w > \theta_x \quad (17)$$

2.3.8. Forças devido as correntes (UFC 4-159-03:2005)

A Força estática transversal devido as correntes de acordo com o UFC 4-159-03:2005 (F_{yc}), é definida como a componente de força que atua perpendicularmente ao eixo longitudinal da embarcação.

Se a folga existente entre a quilha e o fundo do canal for pequena, a embarcação bloqueia o fluxo das correntes e consequentemente F_{yc} aumenta, já quando a folga é grande, a corrente flui livremente abaixo da quilha, e F_{yc} diminui, conforme exposto na figura 2.32.

O efeito supramencionado é considerado na equação de obtenção de F_{yc} , conforme segue:

$$F_{yc} = 0,5 \cdot \rho_w \cdot V_{c,UFC}^2 \cdot L_{wL} \cdot T \cdot C_{yc} \cdot \sin(\theta_c) \quad (18)$$

Onde:

F_{yc} = Força estática transversal de corrente de acordo com o UFC 4-159-03:2005 (Newtons);

ρ_w = Massa específica da água salgada (tabela 2.4);

$V_{c,UFC}$ = Velocidade de projeto da corrente de acordo com o UFC 4-159-03:2005 (m/s);

L_{wL} = Comprimento de embarcação no nível d'água (m);

T = Calado médio (m);

C_{yc} = Coeficiente de arraste para força transversal de corrente;

θ_c = Ângulo da corrente (graus).

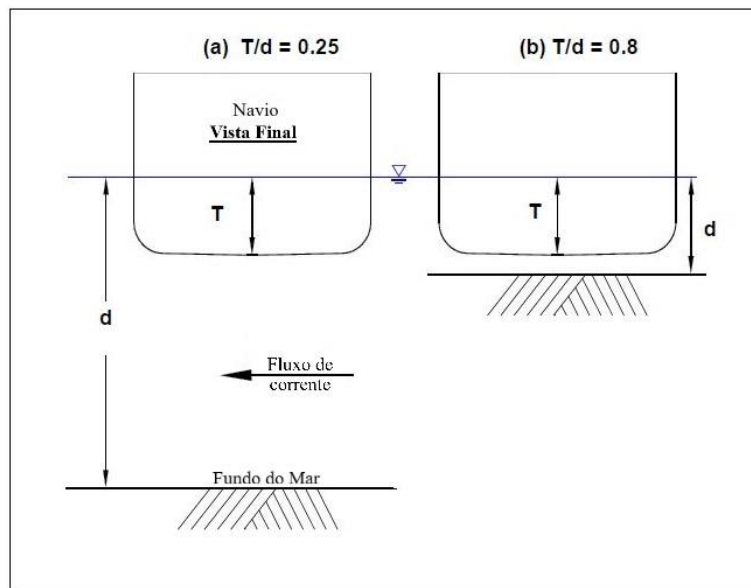


Figura 2.32 - Relação entre T e d. (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).

As formulações demonstradas a seguir, para a obtenção do coeficiente de arraste para força transversal de corrente (C_{yc}), são recomendadas para locais onde as velocidades das correntes não sejam superiores a 1,5 m/s, e para canais não estreitos, caso o contrário ocorra, a norma sugere que modelos em escala reduzida sejam realizados em laboratório.

$$C_{yc} = C_o + (C_1 - C_o) \cdot (T/d)^K \quad (19)$$

Onde:

T = Calado médio (m);

d = Profundidade da água (m);

K = Exponente adimensional obtido através de dados de laboratório com modelagem de navios (K=2 quando houver grande número de testes realizados, K=3 quando houver pequena quantidade de testes realizados).

C_1 = Coeficiente de arraste para força transversal devido a corrente em águas rasas, onde $\frac{T}{d} = 1,0$. (Para velocidades de corrente menores que 1,5 m/s, C_1 pode ser adotado igual a 3,2);

C_o = Coeficiente de arraste para forças transversal devido a corrente em águas profundas, para $\frac{T}{d} \approx 0,0$, C_o pode ser estimado como:

$$C_o = 0,22 \cdot \sqrt{\chi} \quad (20)$$

Onde:

χ = Parâmetro adimensional da embarcação.

O valor de χ pode ser calculado segundo a expressão exposta a seguir:

$$\chi = L_{wL}^2 \cdot A_m / (B \cdot V) \quad (21)$$

Onde:

L_{wL} = Comprimento da embarcação sob o nível d'água (m);

B = Largura ou Boca da embarcação (m);

V = Volume submergido do navio (m³), este pode ser obtido através da divisão do deslocamento (W) pelo peso específico da água (γ_w);

A_m = Área submersa da seção transversal de meia nau da embarcação (m²).

A_m pode ser obtido segundo expressão demonstrada a seguir:

$$A_m = C_m \cdot B \cdot T \quad (22)$$

Onde:

C_m = Coeficiente de meia nau.

B = Largura ou Boca da embarcação (m);

T = Calado médio (m);

Para aqueles casos em que $\frac{T}{d} \neq 0,0$, onde não há possibilidade de estimar C_o pela equação 20, pode-se obter o valor de C_{yc} conforme a figura 2.33, para isto, é necessário obter a relação T/d e calcular o parâmetro χ segundo a equação 21.

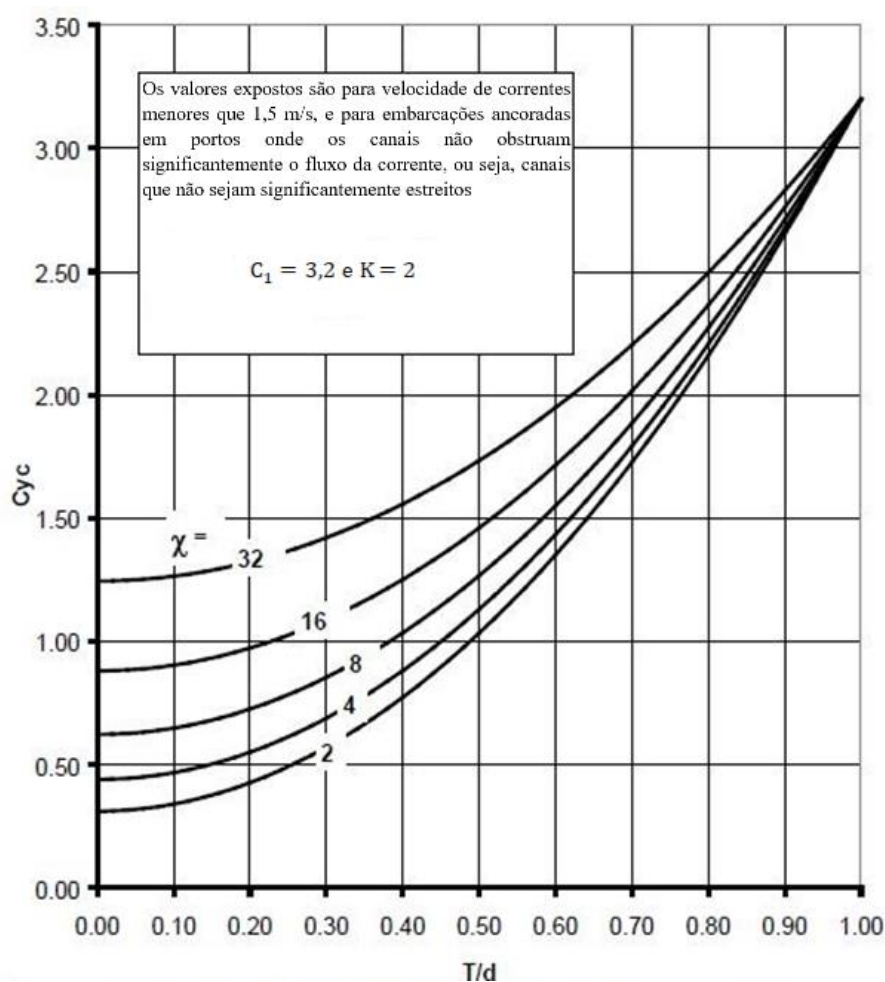


Figura 2.33 - Coeficientes de arrasto (C_{yc}) (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).

A Força estática longitudinal devido as correntes de acordo com o UFC 4-159-03:2005 (F_{xc}), é definida como a componente da força que atua paralelamente ao eixo longitudinal da embarcação, esta pode ser obtida através da soma de três componentes, conforme segue:

$$F_{xc} = F_{xFORM} + F_{xFRICTION} + F_{xPROP} \quad (23)$$

Onde:

F_{xc} = Força estática longitudinal devido as correntes de acordo com o UFC 4-159-03:2005 (Newtons);

F_{xFORM} = Força estática longitudinal de arraste de forma devido as correntes (Newtons);

$F_{xFRICTION}$ = Força estática longitudinal de atrito devido as correntes (Newtons);

F_{xPROP} = Força estática longitudinal correspondente ao propulsor de hélice das embarcações devido as correntes (Newtons).

Para cada uma das componentes, há formulações para a obtenção destes valores, conforme exposto a seguir:

$$F_{xFORM} = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot V_{c,UFC}^2 \cdot B \cdot T \cdot C_{xcb} \cdot \cos(\theta_c) \quad (24)$$

$$F_{xFRICTION} = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot V_{c,UFC}^2 \cdot S' \cdot C_{xca} \cdot \cos(\theta_c) \quad (25)$$

$$F_{xPROP} = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot V_{c,UFC}^2 \cdot A_p \cdot C_{PROP} \cdot \cos(\theta_c) \quad (26)$$

Onde:

ρ_w = Massa específica da água (tabela 2.4);

$V_{c,UFC}$ = Velocidade de projeto da corrente de acordo com o UFC 4-159-03:2005 (m/s);

B = Boca ou Largura (m);

T = Calado médio (m);

C_{xcb} = Coeficiente de arrasto de forma da corrente longitudinal = 0,1;

θ_c = Ângulo de incidência da corrente (Graus);

S' = Área da superfície molhada (m²), estimada como:

$$S' = 1,7 \cdot L_{wL} + \left(\frac{W}{T \cdot \gamma_w} \right) \quad (27)$$

Onde:

L_{wl} = Comprimento da embarcação sob o nível d'água (m);

W = Deslocamento da embarcação (Newtons);

γ_w = Peso específico da água salgada obtido na tabela 2.4 (Newton/m³);

C_{xca} = Coeficiente de fricção longitudinal de pele, estimado como:

$$C_{xca} = 0,075 / ((\log_{10} \cdot R_n) - 2)^2 \quad (28)$$

Onde:

R_n = Número de Reynolds, estimado como:

$$R_n = \left[\frac{V_{c,UFC} \cdot L_{wl} \cdot \cos(\theta_c)}{v} \right] \quad (29)$$

Onde:

v = viscosidade cinemática da água salgada (tabela 2.4)

Deve-se determinar as duas variáveis restantes, a área da lâmina expandida da hélice em m² (A_p) e a área total projetada da hélice em m² (A_{Tpp}), estimadas como:

$$A_p = \frac{A_{Tpp}}{0,838} \quad (30)$$

$$A_{Tpp} = \frac{L_{wl} \cdot B}{A_R} \quad (31)$$

Onde:

A_R = Taxa adimensional para hélices (tabela 2.8);

C_{PROP} = Coeficiente de arrasto de hélice = 1,0.

Tabela 2.8 - Valores da taxa adimensional para hélices (Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005)

Embarcação	A_R
Navio de guerra	100
Cruzadores	160
Navio Transportador	125
Cargueiro	240
Petroleiro	270
Submarino	125

2.3.9. Fluxograma para a obtenção dos esforços de amarração (UFC 4-159-03:2005)

Neste item, serão expostos os fluxogramas que demonstram as formulações e o procedimento para a obtenção dos esforços longitudinais e transversais devido ao vento e a corrente para a norma UFC 4-159-03:2005.

A norma americana é a mais complexa dentre as normas estudadas nesta dissertação, onde os fluxogramas expostos nas figuras 2.34 a 2.37 irão auxiliar a visualização da obtenção dos esforços.

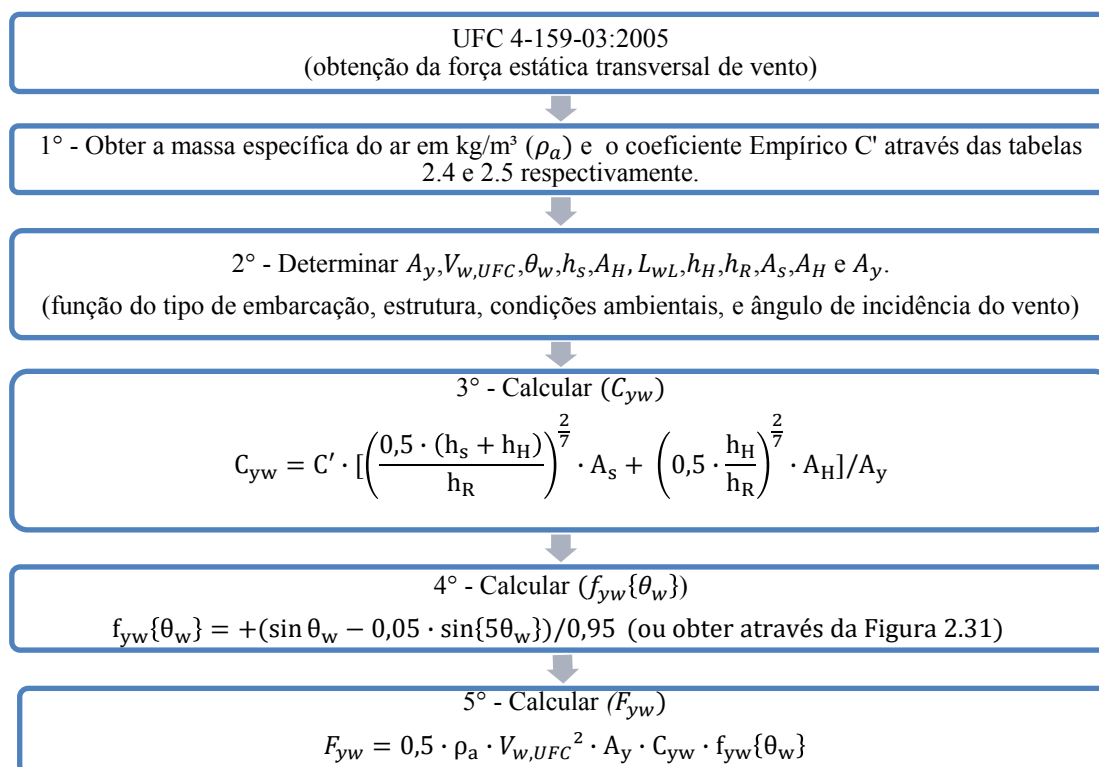


Figura 2.34 - Fluxograma para a obtenção do esforço estático transversal devido ao vento para a norma UFC 4-159-03:2005 (Fonte: Autor).

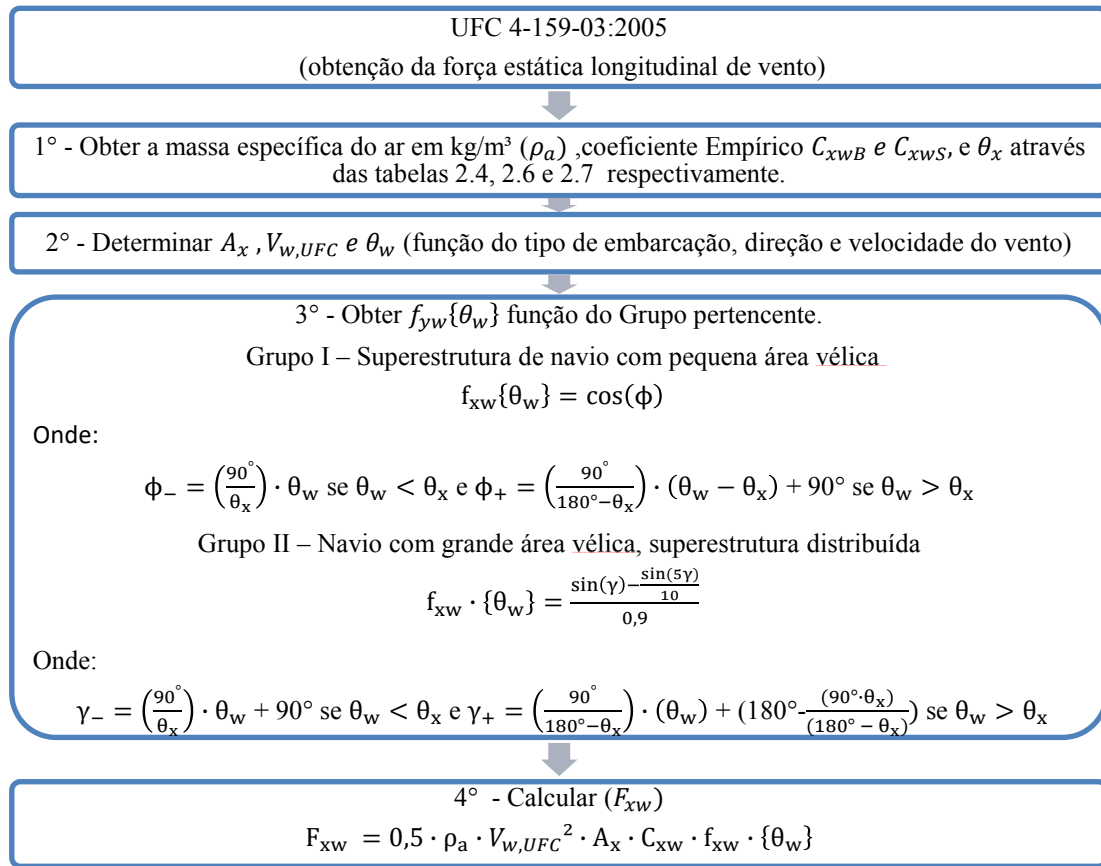


Figura 2.35 - Fluxograma para a obtenção do esforço estático longitudinal devido ao vento para a norma UFC 4-159-03:2005 (Fonte: Autor).

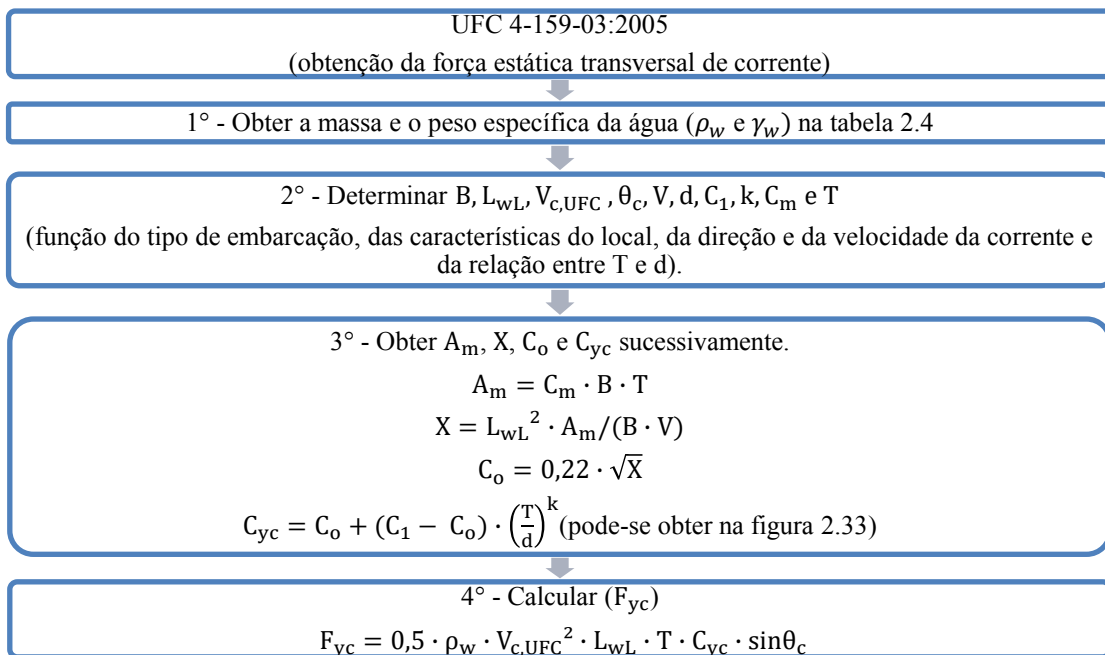


Figura 2.36 - Fluxograma para a obtenção do esforço estático transversal devido a corrente para a norma UFC 4-159-03:2005 (Fonte: Autor).

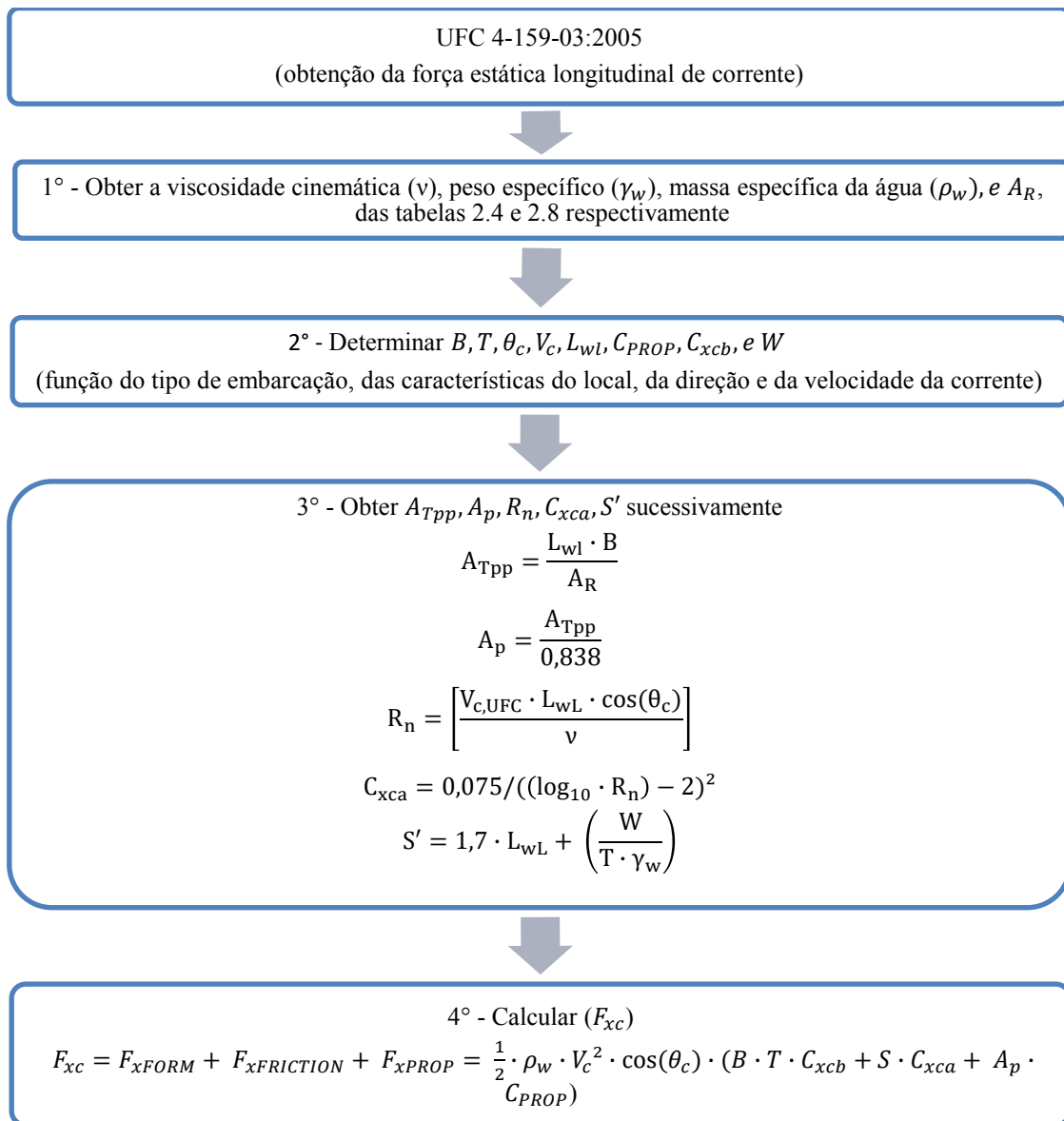


Figura 2.37 - Fluxograma para a obtenção do esforço estático longitudinal devido a corrente para a norma UFC 4-159-03:2005 (Fonte: Autor).

2.4. Teoria das probabilidades e confiabilidade estrutural

2.4.1. Variáveis aleatórias e seus principais parâmetros

Sempre é interessante na resolução de um problema, limitar o resultado de um experimento em um simples número, porém, em alguns casos, um único valor de resposta é suficiente, e em outros é necessário associar um número a cada resultado no espaço amostral.

O dito no parágrafo anterior, deve-se ao não conhecimento do resultado particular de um experimento *a priori*, o valor resultante da variável também não será conhecido *a priori*, isto é, a

variável que associa um número ao resultado de um experimento aleatório é denominada variável aleatória (Montgomery e Runger, 2009).

No caso do presente estudo, não há como saber *a priori* o resultado final dos esforços de amarração, devendo para isto, obter um resultado para cada valor de vento, corrente e parâmetros das embarcações.

Neste caso, as variáveis aleatórias que associam um número ao resultado são as velocidades do vento, corrente e parâmetros das embarcações.

Ainda sobre as definições de variáveis aleatórias, temos aquelas discretas e contínuas, onde a sua definição pode ser melhor entendida segundo exposto a seguir.

Uma variável, V , cujo valor não pode ser previsto com segurança antes de sua observação, ou seja, em repetições do mesmo experimento aleatório em idênticas condições ela assume valores diferentes, se chama “variável aleatória”. Por exemplo, o número que fica para cima no lançamento de um dado é uma variável aleatória, assim como uma função qualquer desse número. Uma variável aleatória pode ser “discreta”, como no exemplo do dado, quando seus possíveis valores formam conjunto discreto, ou “contínua”, como a posição de uma partícula em movimento Browniano, em que os possíveis valores pertencem a um conjunto contínuo. (SCHERER 2010, p. 122).

Na presente dissertação as variáveis são contínuas, pois estas possuem um intervalo finito de números reais para a sua respectiva faixa de ocorrência, portanto, serão tratados a seguir aspectos relacionadas as variáveis contínuas.

As deduções e considerações demonstradas a seguir foram obtidas de acordo com Montgomery, Runger (2009), Hines, et.al (2006), Ang e Tang (2007), Scherer (2010) e Walpole, et.al (2009).

Considerando X como uma variável aleatória, a função que descreve a distribuição de probabilidade da referida variável é denominada função de distribuição de probabilidade acumulada (FDA), ou do inglês *cumulative distribution function* (CDF), e é dada por:

$$F_x(x) = P_x(X \leq x) \quad (32)$$

Considerando uma variável aleatória real, contínua, X , com possibilidade de apresentar qualquer valor dentro do intervalo $-\infty$ a $+\infty$, não se procura a probabilidade de X assumir um dado valor de x , e sim, a probabilidade de X assumir um valor num dado intervalo $a \leq X \leq b$. Onde a análise da probabilidade de X assumir um valor menor que um dado x é a mais utilizada, e apresenta maior importância, esta função é denominada função de distribuição de X .

$$F_X(x) = P(-\infty < X \leq x) \quad (33)$$

Já a derivada da equação 33 em relação a x , é denominada densidade de probabilidade de X .

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (34)$$

Assim sendo, distribuições de probabilidade de variáveis contínuas são dadas pelas chamadas funções densidade de probabilidade, descritas por $f_X(x)$.

Utilizando as definições demonstradas acima, e considerando que $a < b$, a probabilidade de ocorrência de X no intervalo $(a,b]$ é dada por:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f_X(x) dx \quad (35)$$

Podem ser empregados modelos matemáticos, representações gráficas ou geométricas para representar as funções de densidade de probabilidade, onde a área abaixo da função de densidade de probabilidade para um determinado intervalo corresponde à probabilidade $P(a < X < b)$ conforme verificado na figura 2.38.

A área para o intervalo que contém toda a função corresponde a área total, e possui valor igual a 1. É interessante notar que para o mesmo comprimento de intervalo em x a probabilidade varia, conforme visto na figura 2.39, em que o comprimento dos intervalos é o mesmo, porém, a probabilidade do intervalo a,b é maior, por apresentar maior área.

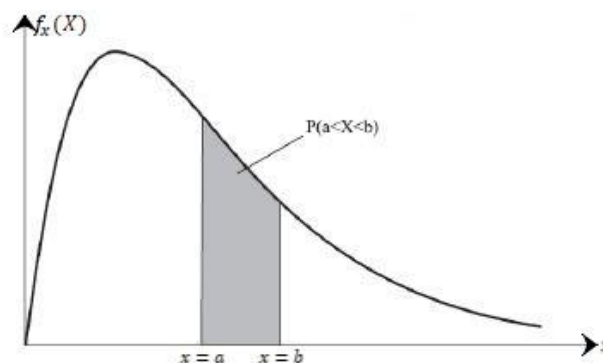


Figura 2.38 - Probabilidade representada como área.
(Fonte: Walpole, et.al, 2009).

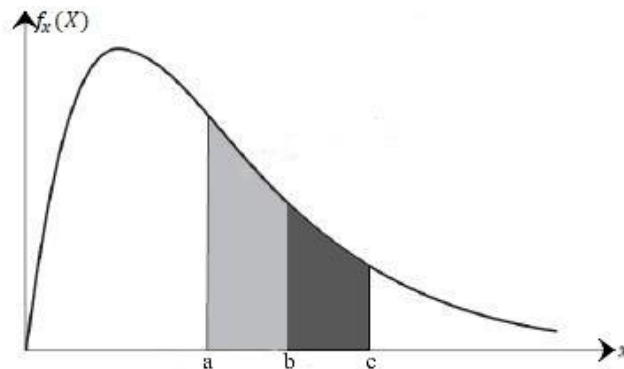


Figura 2.39 - Probabilidade diferente para o mesmo comprimento
(Fonte: Walpole, et.al, 2009).

Algumas medidas são utilizadas para melhor descrever as características das variáveis aleatórias.

Será exposto a seguir quatro medidas descritivas largamente usadas, a primeira delas é a média da variável aleatória (μ_x), que proporciona uma indicação da tendência central da variável aleatória, expressa de acordo com a equação 36.

$$\mu_x = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_x(x) dx \quad (36)$$

A segunda medida é a dispersão, ou espalhamento das probabilidades, denominada variância (σ^2), e é definida de acordo com a equação 37.

$$\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 f_x(x) dx \quad (37)$$

A raiz quadrada positiva da variância é denominada desvio-padrão (σ), onde pequenos valores representam pouca dispersão, e grandes valores, muita dispersão. A variância pode ser definida de acordo com a equação 38.

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2} \quad (38)$$

A última medida apresentada para melhor elucidar as características dos resultados é o

parâmetro chamado de coeficiente de variação (δ_x), que consiste na razão entre a dispersão e a média da variável aleatória (valor central da distribuição), representada em forma de porcentagem, conforme equação 39.

$$\delta_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (39)$$

Deve-se verificar as unidades das medidas apresentadas, a média e o desvio-padrão possuem a mesma medida de unidade da variável aleatória, já a variância, apresenta o valor da unidade da variável aleatória ao quadrado, por sua vez, o coeficiente de variação é adimensional, e expresso em porcentagem.

2.4.2. Distribuições de Probabilidade e geração de números aleatórios

Foram utilizadas as distribuições de probabilidade uniforme, normal e de eventos extremos gumbel Tipo I para a geração de variáveis aleatórias do porte da embarcação (DWT), velocidade da corrente e velocidade do vento respectivamente.

As deduções e considerações demonstradas a seguir foram obtidas de acordo com, Hines, Montgomery et al. (2006), Ang e Tang (2007), Beck&Correa et al. (2012) e Haldar e Mahadevan (2000).

Distribuição uniforme

A função densidade de probabilidade uniforme é definida como:

$$f_{(x)} = \frac{1}{(b - a)}, a \leq x \leq b \quad (40)$$

$$f_{(x)} = 0, \text{ caso contrário}$$

Onde a e b são constantes reais com $a < b$, o valor da densidade de probabilidade é constante dentro do intervalo $[a, b]$, o que significa simplesmente que um determinado ponto aleatório dentro do intervalo de definição (Y), é distribuído uniformemente ao longo do intervalo de definição.

Distribuição normal

A distribuição mais importante e conhecida em probabilidade e estatística é a distribuição normal, nome este dado devido as tentativas realizadas nos séculos XVIII e XIX para estabelecer essa distribuição como a lei de probabilidade subjacente a todas as variáveis aleatórias contínuas, também é conhecida como distribuição gaussiana.

A função densidade de probabilidade é dada por:

$$f_{(x)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{1}{2}\right)\left[\frac{x-\mu}{\sigma}\right]^2}, -\infty < x < \infty \quad (41)$$

Menciona-se que uma variável aleatória X , possui distribuição normal com uma determinada média (μ_x) e variância (σ^2_x), sendo frequentemente representada pela notação abreviada $X \sim N(\mu, \sigma^2)$.

A figura 2.40, foi retirada de Devore (2006), onde o mesmo explica os diversos gráficos conforme segue:

Cada gráfico é simétrico em torno de μ e tem forma de sino, de modo que o centro do sino (ponto de simetria) é tanto a média como a mediana da distribuição. O valor de σ é a distância de μ até os pontos de inflexão da curva (os pontos em que a curva muda de direção). Valores grandes de σ fornecem gráficos com picos altos acima de μ e a maior parte da área do gráfico é muito próxima de μ . Assim, σ grande implica boa possibilidade de se observar um valor de X afastado de μ , enquanto essa possibilidade é muito improvável para σ pequeno. (Devore, 2006, p. 141).

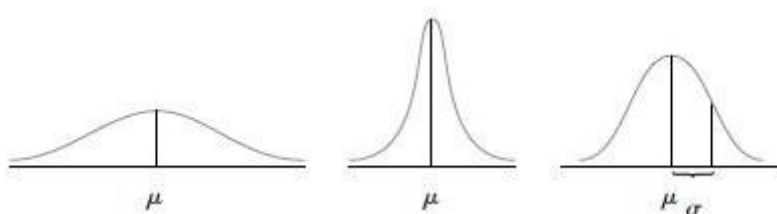


Figura 2.40 - Curvas de distribuição de probabilidade normal. (Fonte: Devore, 2005).

Distribuição de eventos extremos gumbel tipo I

Há três tipos de distribuições de probabilidade Gumbel para valores máximos e mínimos, estas são denotadas por distribuições de eventos extremos Tipo I, Tipo II e Tipo III.

A distribuição de probabilidade acumulada que possui forma assintótica de distribuição para os máximos valores, é denominada distribuição de eventos extremos Gumbel Tipo I.

Conforme relata Beck&Corrêa (2012) e Haldar e Mahadevan (2000), a distribuição de eventos extremos gumbel Tipo I para valores máximos representa de forma satisfatória o conjunto de dados de fenômenos naturais, tais como a velocidade do vento e a variações do nível do mar.

$$F_{Y_n}(y_n) = \exp[-e^{-\alpha_n(y_n - u_n)}] \quad (42)$$

Onde u_n é o valor mais provável de Y_n , α_n é o inverso de uma medida da dispersão dos valores de Y_n , e γ a constante denominada número de Euler, expressos de acordo com as equações 43 e 44.

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{\pi^2}{6\sigma_{Y_n}^2}} \quad (43)$$

$$u_n = \mu_{Y_n} - \frac{\gamma}{\alpha_n}; \text{ onde } \gamma = 0,577216 \quad (44)$$

O resultado teórico obtido da equação 42 é assintoticamente exato, já que o número de amostras do conjunto de valores extremos tende ao infinito.

A afirmação supracitada comprova a qualidade da representação das velocidades do vento, pois estas, num determinado intervalo de tempo, para um conjunto de dados obtidos aleatoriamente, apresentam a característica de fenômenos com valores extremos, tanto para máximos diários, anuais, período de retorno de 50 anos e para outros intervalos de tempo (Beck&Corrêa, 2012).

2.4.3. Determinação de distribuições e parâmetros de dados observados

A determinação da distribuição de probabilidade que deve ser adotada para um conjunto de variáveis aleatórias é, a princípio, um grande desafio para engenheiros.

Geralmente, as distribuições e os parâmetros são estimados utilizando valores obtidos em campo. É de grande valia estudar os procedimentos para a determinação das distribuições e parâmetros para um determinado conjunto de variáveis aleatórias, pois todas as análises de risco e confiabilidade dependem destas avaliações.

Quando há valores suficientes de dados, um histograma de frequência pode ser determinado para descobrir a melhor distribuição, entretanto, mais de uma distribuição pode servir para um determinado conjunto de dados.

A verificação para analisar a representatividade de um determinado conjunto de dados pode

ser realizada a partir de três testes: (a) Traçando um diagrama de frequência; (b) Elaborando um papel de probabilidade (*probability paper*); (c) Através da condução de alguns testes conhecidos como testes de *goodness of fit* para uma determinada distribuição (Haldar e Mahadevan, 2000).

Os dois primeiros testes (a e b) possuem complicações na sua geração e análise, que são visuais. Já os testes de *good of fitness* apresentam os valores dos coeficientes, fazendo com que caso haja mais de uma distribuição que represente bem visualmente um determinado conjunto de dados, tenha-se como estimar qual delas é a melhor.

As deduções e expressões que serão demonstradas a seguir, foram obtidas de acordo com exposto por Ang e Tang (2007), e serão utilizados os seguintes testes: Chi-quadrado, Kolmogorov-Smirnov e Anderson Darling.

O primeiro deles, Chi-quadrado, compara a frequência dos valores observados ($n_{i=1}, n_{i=2}, n_{i=3} \dots n_{i=k}$), com os valores de frequência teóricos a partir de uma distribuição assumida ($e_{i=1}, e_{i=2}, e_{i=3}, \dots, e_{i=k}$), onde k é o tamanho do intervalo analisado.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{(n_i - e_i)}{e_i} \quad (45)$$

Para saber se uma determinada distribuição de probabilidade assumida pode modelar um determinado conjunto de dados, deve-se obter o valor de cálculo do coeficiente chi-quadrado χ^2 , este deve ser menor que $c_{1-\alpha, f}$ (valor crítico de chi-quadrado para que a distribuição assumida represente de forma satisfatória o conjunto de dados).

O valor limite ($c_{1-\alpha, f}$) depende do nível de significância (α) e do grau de liberdade (f), e seus valores limites são tabelados e expostos em Ang e Tang (2007).

O segundo teste é o de Kolmogorov-Smirnov, que consiste na comparação entre a distribuição de frequência acumulada experimental ($S_n(x)$) com a distribuição de frequência acumulada teórica ($F_X(x)$), para uma determinada distribuição de probabilidade assumida.

A discrepância máxima (D_n) entre a distribuição de frequência acumulada teórica e experimental, não pode ser maior que os valores limites (D_n^α), que dependem do tamanho da amostra (n) e do nível de significância (α), estes são tabelados e podem ser encontrados em Ang e Tang (2007).

$$D_n = \max |F_X(x) - S_n(x)| \quad (46)$$

$$P(D_n \leq D_n^\alpha) = 1 - \alpha \quad (47)$$

A figura 2.41 expõe a relação entre a distribuição de frequência acumulada teórica e experimental, além do valor de discrepância máxima.

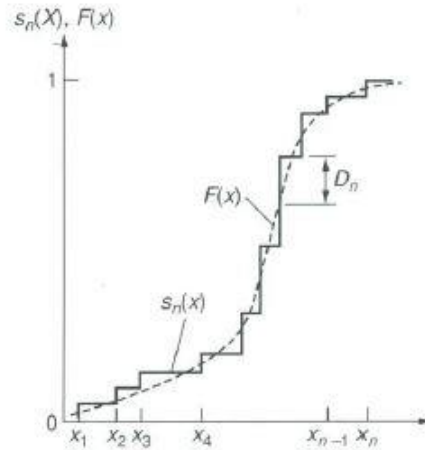


Figura 2.41 - Relação entre frequência acumulada teórica e experimental.
(Fonte: Ang e Tang, 2007).

O gráfico da figura 2.41 demonstra que $S_n(x)$ possui os seguintes intervalos:

$$\begin{aligned} S_n(x) &= 0 & x < x_1 \\ &= \frac{k}{n} & x_k < x < x_{k+1} \\ &= 1 & x \geq x_n \end{aligned} \quad (48)$$

Por último, será exposto o teste de Anderson Darling, este teste surgiu para contribuir com o poder de caracterização das caudas das distribuições assumidas, visto que os demais testes não apresentam esta caracterização.

Este teste é recomendado para aquelas distribuições em que os dados localizados nas caudas possuem uma grande importância para o referido estudo.

O processo de aplicação deste teste pode ser dividido em seis etapas:

- 1º) organizar os dados observados em ordem crescente;
- 2º) avaliar a distribuição de probabilidade acumulada da distribuição proposta;
- 3º) calcular o parâmetro estatístico Anderson Darling;

$$A^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(2i-1) \{ \ln F_X(x_i) + \ln [1 - F_X(x_{n+1-i})] \}}{n} \right] - n \quad (49)$$

4°) ajustar o valor de A^2 de forma a obter o valor corrigido de Anderson Darling (A^*), este último depende do tamanho da amostra e do tipo de distribuição adotada, onde as equações para cada uma das distribuições e demais coeficientes pertinentes podem ser obtidos em Ang e Tang (2007).

5°) obter o valor crítico de c_α para a distribuição assumida, valores estes que podem ser obtidos em Ang e Tang (2007).

6) comparar A^* com c_α , se $A^* < c_\alpha$ a distribuição escolhida pode ser representada para o nível de significância adotado, caso contrário, não é possível modelar o conjunto de dados de acordo com a distribuição de probabilidade assumida.

2.4.4. Confiabilidade na engenharia

Todo projeto de engenharia tem como objetivo assegurar o desempenho de um sistema, dentro das restrições econômicas, ao longo do seu tempo de vida útil, de forma que este não venha a falhar.

As incertezas ocorrem devido a diversos fatores (vide tabela 2.9), estas dependem das variáveis aleatórias envolvidas, no caso da presente dissertação, as variáveis aleatórias são: porte das embarcações, velocidade do vento e velocidade da corrente.

Tabela 2.9 - Incertezas (Fonte: Machado, 2000).

Incerteza	Descrição
Fenomeológicas	Associadas à ocorrência de eventos imprevisíveis, devido ao desconhecimento de algum aspecto do fenômeno analisado, sob condições de segurança ou condições extremas.
Avaliação	Associadas à definição e à quantificação do desempenho do sistema.
Modelo	Associadas às simplificações e às hipóteses adotadas no modelamento do sistema estrutural, ao emprego de novos materiais, e ao uso de técnicas construtivas. Este tipo de incerteza é devido, no geral, à falta de conhecimento, mas pode ser reduzida com pesquisa ou aumento da informação disponível.
Estatísticas	Associadas à extrapolação dos parâmetros estatísticos extraídos de população finitas.

Fatores Humanos	Associadas aos erros humanos ou à intervenção humana no comportamento do sistema.
Físicas	Associadas à aleatoriedade inerente às variáveis de projeto. Podem ser reduzidas com aumento dos dados disponíveis, ou em alguns casos, com o controle de qualidade.

Sempre haverá incertezas, portanto, torna-se necessário realizar uma análise em termos de probabilidade, com o intuito de garantir o desempenho do sistema através da determinação da probabilidade de falha.

Realizando uma analogia com o presente trabalho, a probabilidade de falha, representa o risco de uma determinada estrutura (dispositivo de amarração) não atender de forma satisfatória os estados limites, que neste caso, seria o estado limite último, relacionado a ruptura do dispositivo de amarração.

A confiabilidade (C), tem como objetivo garantir o evento $P(R > S)$ durante toda vida útil da estrutura em termos de probabilidade, onde R é a densidade de probabilidade de resistência e S a densidade de probabilidade de carga (Mapa, 2016).

$$C = P(R > S) \quad (50)$$

Caso o contrário ocorra, $P(R < S)$, ocorre a falha, onde a probabilidade de falha (P_f) pode ser obtida de acordo com a equação 51.

$$P_f = P(R < S) = 1 - P(R > S) = 1 - C \quad (51)$$

Analisando a figura 2.42, a curva de densidade de probabilidade de carga (S), será obtida aplicando o modelo probabilístico de Monte Carlo para cada um dos critérios de projeto estudados.

Já a densidade de probabilidade de resistência (R), será representada em forma de um ponto, denominado ponto de projeto, este localiza-se sobre a curva de probabilidade de carga (S), e é obtido através do cálculo determinístico para cada uma das normativas expostas.

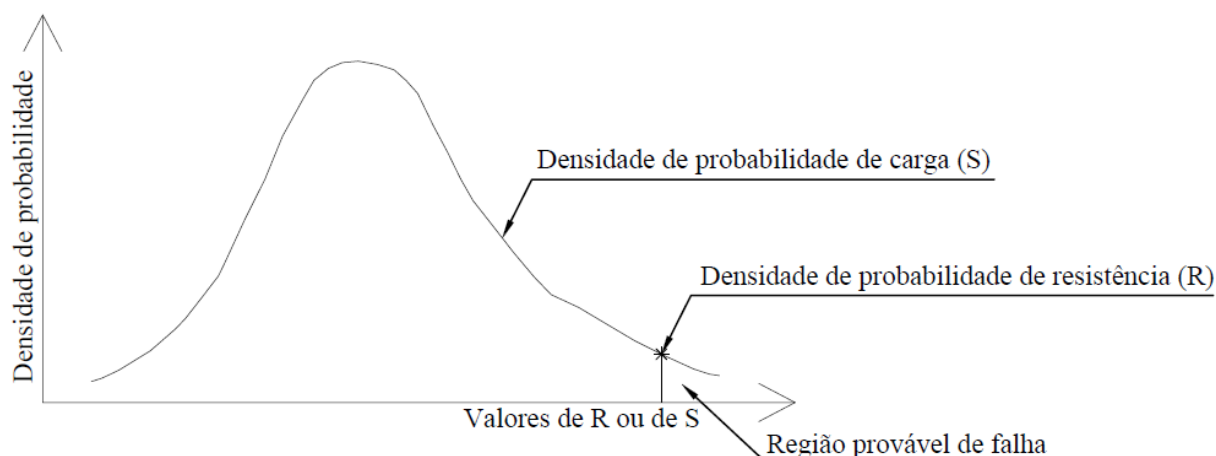


Figura 2.42 - Relação entre resistência (R) e solicitação (S)
(Fonte: Autor).

2.4.5. Análise probabilística de estruturas e o Método de Monte Carlo

Os modelos desenvolvidos ao longo dos anos para análise não-linear, preveem em seus cálculos valores com características determinísticas para a estrutura em questão, dentre estes pode-se citar as propriedades dos materiais, variabilidade do carregamentos aplicados e formato das estruturas (Real,2000).

A variabilidade nos parâmetros de entrada ocorre devido as incertezas inerentes ao projeto (tabela 2.9), portanto, a resposta estática de uma estrutura é função das diversas variáveis aleatórias presentes, ou campos estocásticos (estado indeterminado, com origem em eventos aleatórios), onde as distribuições de probabilidade podem ser conhecidas ou estimadas (Real,2000).

Com o intuito de incluir as incertezas quanto aos parâmetros de entrada no processo de análise estrutural, surgiram diversas técnicas, entre elas o Método de Monte Carlo, nesta dissertação é empregado o método citado.

Os parâmetros de entrada são gerados através de distribuições de probabilidade conhecidas ou assumidas, e com o conjunto de dados gerados (parâmetros de saída), são realizadas análises de comparação entre os valores e de confiabilidade das normativas estudadas.

Resumindo, a simulação de Monte Carlo busca reproduzir um determinado sistema através da geração aleatória dos parâmetros de entrada, com distribuições de probabilidades conhecidas ou assumidas, e a partir destes realizar inúmeras simulações através de um modelo numérico, de modo a obter um universo estatístico das respostas do modelo (parâmetros de saída), conforme pode ser melhor entendido no fluxograma exposto na figura 2.43, e explicado na tabela 2.10.

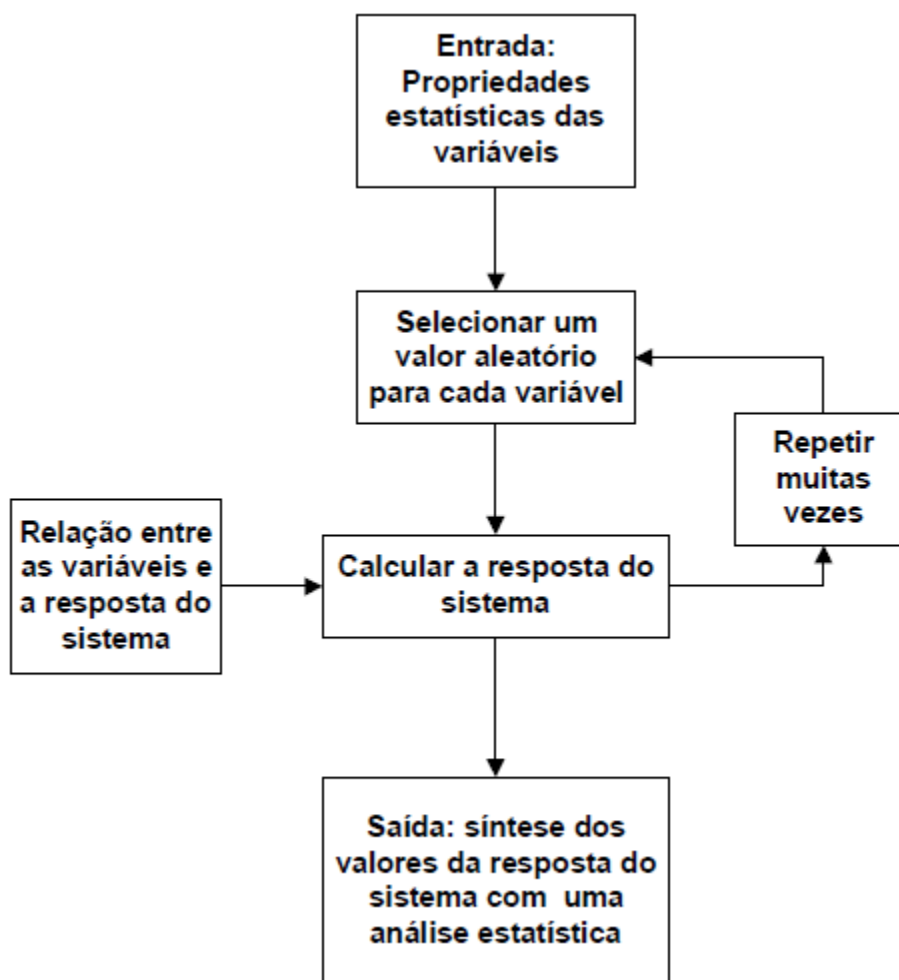


Figura 2.43 - Fluxograma do Método de Monte Carlo (Fonte: Grant,1978 adaptado por Real,2000).

Tabela 2.10 - Etapas analíticas e computacionais para aplicação da simulação de Monte Carlo (Fonte: adaptado de AYYUB e MCCUEN, 1995).

Etapas	Descrição
Definição do sistema	Definir condições de contorno, parâmetros de entrada, de saída e o modelo que relaciona os dados de entrada com os resultados.
Geração das variáveis aleatórias de entrada do sistema	Definir as distribuições de probabilidade dos parâmetros de entrada e demais variáveis estatísticas pertinentes. O procedimento geral para geração de valores randômicos, aplicável a qualquer tipo de distribuição, pode ser formulado a partir dos seguintes passos: 1. Gerar um número aleatório u_i uniforme entre 0 e 1. 2. Obter pela técnica de transformação inversa

	(CDF inversa) o valor randômico da variável aleatória, pela expressão $x_i = F_X^{-1}(u_i)$.
Realização da análise do sistema através do modelo matemático elaborado	Após obtido os parâmetros de entrada, realiza-se a repetição do cálculo do sistema “N” vezes, obtendo “N” valores dos parâmetros de resposta.
Estudo da eficiência e da convergência do método	Obtenção das médias móveis e médias móveis do desvio-padrão dos parâmetros de saída, a fim de verificar se o número de simulações adotado é suficiente.
Análise estatística da resposta obtida	Métodos estatísticos podem ser agora empregados para determinar, por exemplo, média (μ_x), variância (σ_x^2), desvio padrão (σ_x) e coeficiente de variação (δ_x).

Esclarecendo a tabela 2.10, para o estudo em questão, a definição do sistema consistiu na obtenção dos roteiros de cálculo (modelo), definindo quais seriam os parâmetros aleatórios de entrada, saída, e os fixos, levando em conta todos os aspectos abordados pelas normativas (condição de contorno).

Após definição dos parâmetros aleatórios de entrada, foram gerados valores randômicos segundo as distribuições de probabilidade (assumidas ou adotadas) dos parâmetros de entrada.

Em seguida, são realizadas “N” repetições do cálculo das formulações apresentadas para cada uma das normativas, obtendo “N” valores dos parâmetros de resposta, que neste caso, são os esforços para as direções longitudinais e transversais devido a ação do vento e da corrente.

Com o intuito de verificar a validade da aplicação do Método de Monte Carlo, obtém-se o gráfico de média móvel e a média móvel do desvio padrão, verificando se para o número “N” de simulações os valores de média e desvio padrão convergem.

Por fim, são obtidos dados estatísticos, tais como média, variância, desvio-padrão e coeficiente de variação, para realizar uma análise estatística quantitativa dos parâmetros de resposta.

3. METODOLOGIA

3.1. Estudo de caso

O estudo de caso do presente trabalho será o terminal de contêineres do Porto de Rio Grande (TECON Rio Grande), onde a estrutura possui 900 m de comprimento, 20 m de largura, constituídos de 18 módulos de 50 metros de comprimento, onde em cada módulo possui duas defensas flexíveis e dois cabeços de amarração com resistência de 1000kN, uma figura do local do estudo de caso em questão é exposta na figura 3.1.



Figura 3.1 - Imagem do cais do TECON Rio Grande

(Fonte: <http://www.conexaomaritima.com.br/index.php?option=noticias&task=detalhe&Itemid=22&id=2110>).

Baseado no estudo de caso, obteve-se os dados das embarcações que atracaram neste cais durante um determinado intervalo de tempo, conforme será descrito posteriormente.

Os coeficientes baseados nos tipos das embarcações e nas características da estrutura portuária

também foram obtidos de acordo com o estudo de caso, por fim, mas não menos importante, foi utilizado a profundidade do canal de acesso pela barra, igual a 14,5 metros, este é um parâmetro importante para a determinação dos esforços longitudinais e transversais devido a corrente.

Como não há dados de velocidade do vento e de corrente fornecidos pelo TECON, utilizou-se outras fontes de informação localizadas próximas, para a determinação destas ações.

Para a velocidade do vento foram obtidos dados junto a Praticagem da Barra do Rio Grande, como é um local relativamente próximo ao cais do TECON, os dados podem ser utilizados de forma satisfatória.

Já para a velocidade da corrente, devido à falta de informações, baseou-se os valores de acordo com exposto por Möller e Costa (2007) através do artigo “*Estudo da estrutura e variabilidade das correntes na área da plataforma interna ao largo de Rio Grande (RS, Brasil), no sudoeste do Atlântico Sul*” e pelo valor máximo de corrente descrito pelo Porto do Rio Grande.

3.2. Ações e parâmetros estatísticos adotados

As variáveis aleatórias do presente trabalho são: porte das embarcações e velocidades dos ventos e das correntes.

Os parâmetros das embarcações foram obtidos através do porte da embarcação (DWT), por meio da geração de equações analíticas por extrapolação baseadas em dados tabelados, permitindo assim, a aplicação do método de Monte Carlo.

Como exemplo, houve a definição do comprimento entre perpendiculares (L_{bp}) em função do porte da embarcação (DWT), através da obtenção de uma função que melhor represente a relação entre as duas variáveis.

A obtenção das equações foi realizada através do software OCTAVE, selecionando a equação que possuir melhor coeficiente de determinação (R^2).

Em seguida, foram obtidos os parâmetros aleatórios e fixos necessários para a obtenção dos esforços de acordo com cada uma das normativas.

3.2.1. Parâmetros da NBR 9782:1987

Dentre as equações utilizadas para a obtenção dos esforços de ventos e correntes de acordo com a NBR 9782:1987, as variáveis aleatórias são: velocidade do vento (V_w) velocidade da corrente

(V_c) e porte das embarcações (DWT).

E em função de DWT, são obtidas os seguintes parâmetros: Área da seção transversal do navio acima do nível d'água (A_T), Área da seção longitudinal do navio acima do nível d'água (A_L), coeficiente de forma de corrente (k_c), comprimento do navio entre perpendiculares (L_{bp}) e calado máximo e mínimo ($D_{máx}$ e D_{min}).

Parâmetros relacionados as embarcações (NBR 9782:1987)

Para a obtenção dos parâmetros relacionados as embarcações (A_T , A_L , L_{bp} , $D_{máx}$, D_{min}), foram utilizados os dados expostos em Thoresen (2014), de forma que tais parâmetros são obtidos em função do porte da embarcação (DWT).

A distribuição de probabilidade do porte da embarcação foi obtida através do conjunto de dados obtidos junto ao TECON online, conforme demonstrado na figura 3.2, que expõe o conjunto de embarcações que atracaram no cais num período de 6 meses, no presente caso, foi obtido os dados de julho a dezembro de 2017.

Posteriormente, foram coletados dados dos portes das embarcações através do site (www.MarineTraffic.com), conforme exposto na figura 3.3, neste processo foram obtidos 408 valores de DWT.

Navio/Operação	Berço	Armador	Serviço	Deadline Dry	ETB	Typo	Situação	ETA	ETD
MSC JELONGSHAN JEL00802N	B2	MSC	IPA		07/03/2018 00:00:00	DEEPSEA	Programado	07/03/2018 00:00:00	08/03/2018 00:00:00
ANTHEA Y EAY0112N	B3	CCO	ESA		27/02/2018 16:00:00	DEEPSEA	Programado	27/02/2018 16:00:00	28/02/2018 16:00:00
MSC MARINA SMO0808N	B3	MSC	MSCCLG		26/02/2018 12:00:00	DEEPSEA	Programado	26/02/2018 12:00:00	27/02/2018 12:00:00
VALERICE VLE0018N	B3	EMC	ESA		20/02/2018 12:00:00	DEEPSEA	Programado	20/02/2018 12:00:00	21/02/2018 12:00:00
MAERSK LETHICA LEL0752N	B2	MSK	IPA		14/02/2018 08:00:00	DEEPSEA	Programado	14/02/2018 08:00:00	15/02/2018 08:00:00
COSCO SHIPPING VOLGA VO00000E	B3	CCO	ESA		13/02/2018 14:00:00	DEEPSEA	Programado	13/02/2018 14:00:00	14/02/2018 14:00:00
MAISCAL KHOB KHC0806N	B3	HLC	NWC I		09/02/2018 00:00:00	DEEPSEA	Programado	09/02/2018 00:00:00	10/02/2018 00:00:00
COSCO SHIPPING THAMES CST0004N	B3	CCO	ESA		06/02/2018 16:00:00	DEEPSEA	Programado	06/02/2018 16:00:00	07/02/2018 16:00:00
MSC KRYSTAL KRY0805N	B3	MSC	MSCCLG		05/02/2018 00:00:00	DEEPSEA	Programado	05/02/2018 00:00:00	06/02/2018 00:00:00

Figura 3.2 - Embarcações atracadas no Terminal de Containeres TECON
(Fonte: <http://www.teconline.com.br/Terminais/Forms/NavioProgramacaoConsultar.aspx>).

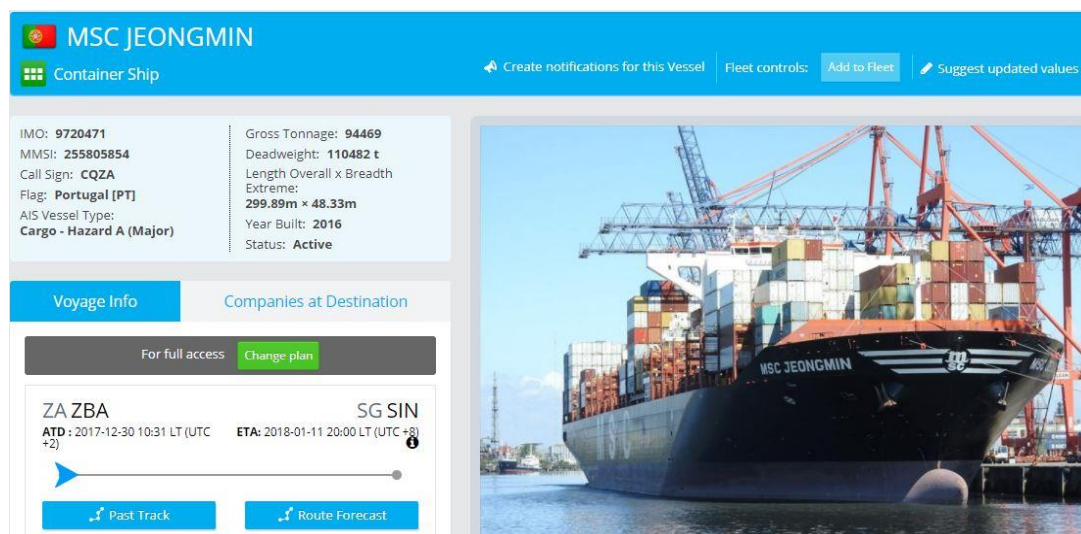


Figura 3.3 - Porte da embarcação.

(Fonte: <https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:3808776/mmsi:255805854/vessel:MSC%20JEONGMIN>)

Em posse dos valores de DWT, foi utilizado o software *EasyFit* para obter a distribuição de probabilidade que melhor representa o referido conjunto de dados, este software utiliza os testes de *goodness of fit*.

De acordo com os resultados apresentados na figura 3.4, optou-se por utilizar a distribuição de probabilidade uniforme, onde os parâmetros desta distribuição a e b valem respectivamente 20333,0 e $1,2983E+5$. A discrepância crítica no teste de Kolmogorov-Smirnov para um nível de significância de 5% é de 0,07174, portanto, entende-se que a distribuição adotada representa de forma satisfatória a variabilidade dos valores de DWT.

#	Distribution	Kolmogorov Smirnov		Anderson Darling		Chi-Squared	
		Statistic	Rank	Statistic	Rank	Statistic	Rank
61	Uniform	0,07174	1	66,506	50	N/A	
11	Error	0,07182	2	29,295	41	56,418	5
62	Wakeby	0,07384	3	59,432	47	N/A	
25	Gen. Pareto	0,07384	4	59,432	48	N/A	
31	Johnson SB	0,07407	5	16,505	35	N/A	
1	Beta	0,08622	6	11,78	26	74,279	20
54	Power Function	0,08808	7	6,9248	5	121,63	41
23	Gen. Gamma (4P)	0,10136	8	4,4744	1	65,378	15
39	Log-Pearson 3	0,10847	9	5,4094	2	42,85	2
21	Gen. Extreme Value	0,11145	10	6,3148	4	63,653	13
63	Weibull	0,11244	11	5,727	3	58,081	8
55	Rayleigh	0,11548	12	7,7718	15	42,894	3
41	Lognormal	0,12221	13	10,203	20	44,681	4
30	Inv. Gaussian (3P)	0,12313	14	7,5687	10	57,531	7
36	Log-Gamma	0,12386	15	10,967	22	56,933	6
38	Log-Logistic (3P)	0,1246	16	7,99	16	71,459	19
64	Weibull (3P)	0,1255	17	7,4416	8	62,869	12
42	Lognormal (3P)	0,12552	18	7,591	11	74,737	21
44	Normal	0,1258	19	7,724	14	60,85	11

Figura 3.4 - Testes de Goodness of fit para os valores de DWT (Fonte: Autor).

Após a adoção da distribuição de probabilidade, foram gerados 10.000 valores aleatórios de DWT através da ferramenta “*Data Analysis*” do software Excel para a distribuição adotada.

A partir dos dados da tabela 3.1, e do auxílio do software OCTAVE, obteve-se gráficos interpolados que relacionam o porte da embarcação com cada um dos parâmetros relacionados que serão necessários para o cálculo dos esforços (Áreas longitudinais e transversais carregadas e em lastro, calado máximo, comprimento entre perpendiculares e deslocamento).

Tabela 3.1 - Parâmetros de navios porta contêineres (Fonte: Adaptado Thoresen,2014).

Limite de confiança = 95%

Tipo	DWT: t	Deslocamento: t	L_{OA} : m	L_{BP} : m	B : m	D : m	Calado Máximo: m	Área Lateral do vento: m ²		Área Frontal do vento: m ²	
								Condição Carregado	Condição em Lastro	Condição Carregado	Condição em Lastro
Navio de Container	7 000	11 500	133	125	21.5	10.6	7.6	1700	2000	377	524
	10 000	16 200	153	144	23.7	12.3	8.4	2180	2490	468	632
	15 000	23 900	179	169	26.4	14.4	9.5	2900	3210	599	782
	20 000	31 400	201	190	28.6	16.1	10.4	3550	3850	714	910
	25 000	38 800	219	208	30.4	17.6	11.1	4150	4420	818	1020
	30 000	46 200	236	223	31.9	18.9	11.8	4720	4950	914	1130
	40 000	60 800	264	251	32.3	21.2	12.8	5780	5930	1090	1310
	50 000	75 200	288	274	32.3	23.2	13.7	6760	6820	1250	1470
	60 000	89 400	310	295	38.5	24.9	14.5	7680	7640	1390	1620

As figuras a seguir demonstram formulações analíticas dependentes do porte das embarcações (DWT), para cada um dos parâmetros das embarcações segundo NBR 9782:1987, são estes: área longitudinal Carregada (A_{lc}), área longitudinal em Lastro (A_{ll}), área Transversal Carregada (A_{tc}), área Transversal em Lastro (A_{tl}), calado Máximo ($D_{máx}$), comprimento entre perpendiculares (L_{bp}) e deslocamento (W), conforme demonstrado nas figuras 3.5 a 3.11.

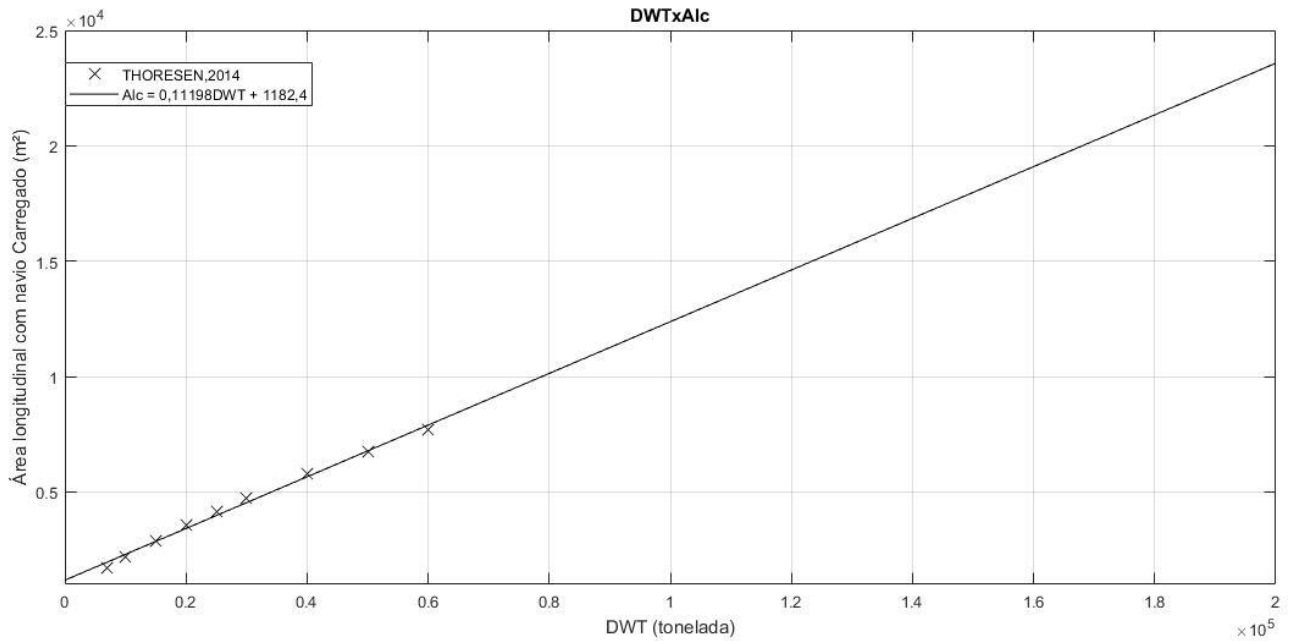


Figura 3.5 - DWTxAlc. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

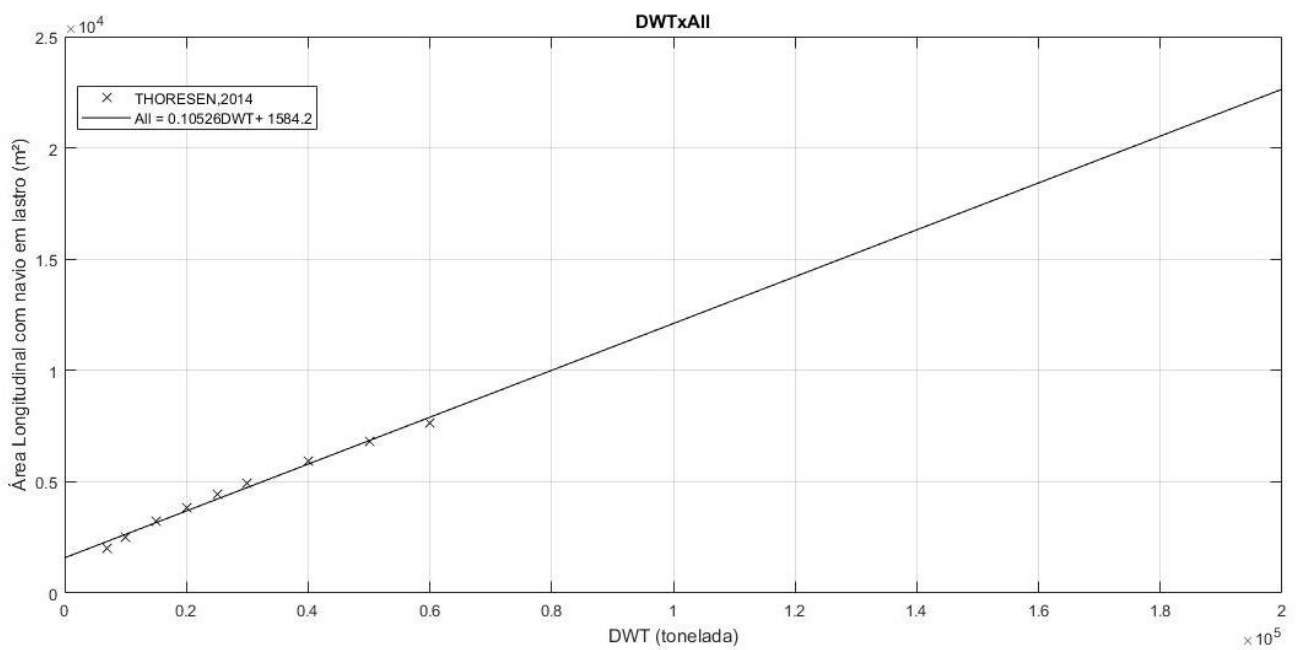


Figura 3.6 - DWTxAll. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

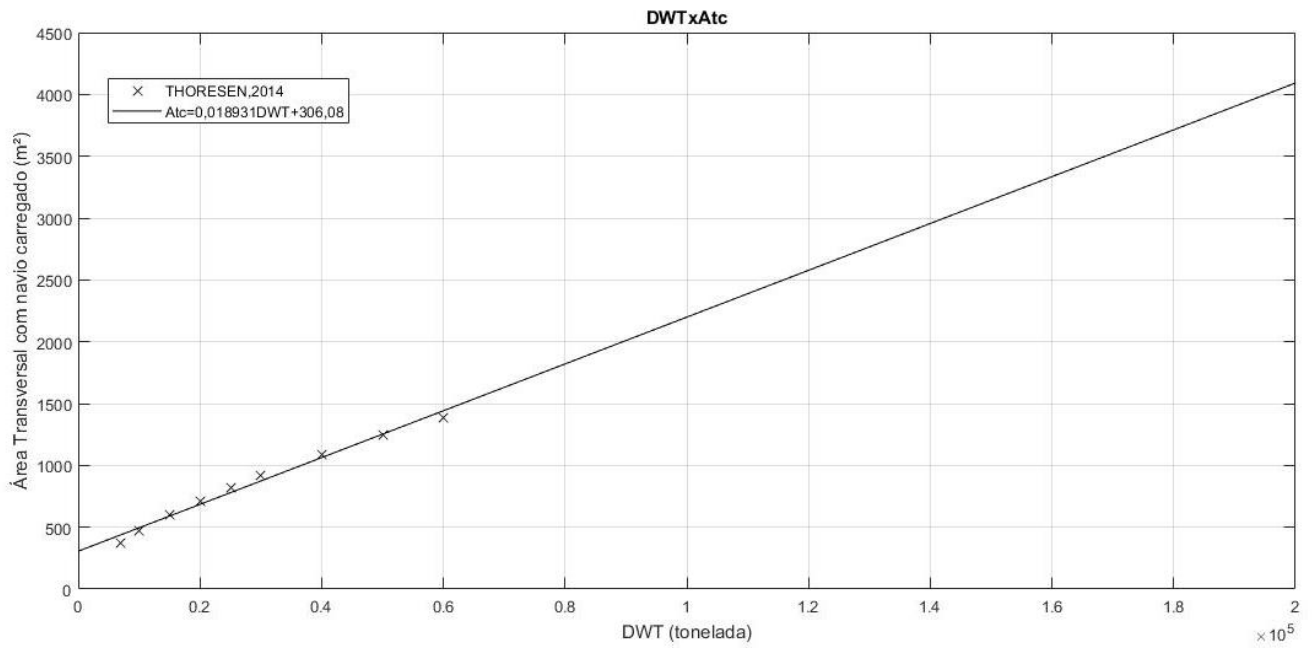


Figura 3.7 - DWTxAtc. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

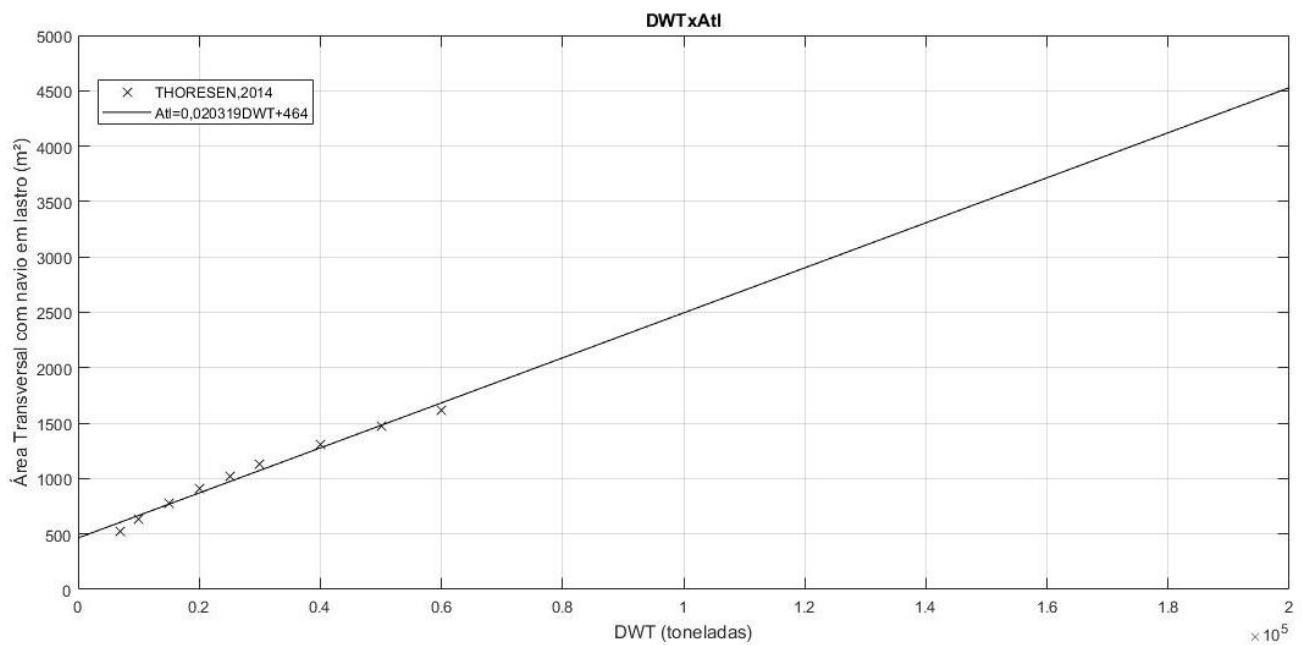


Figura 3.8 - DWTXAtl (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

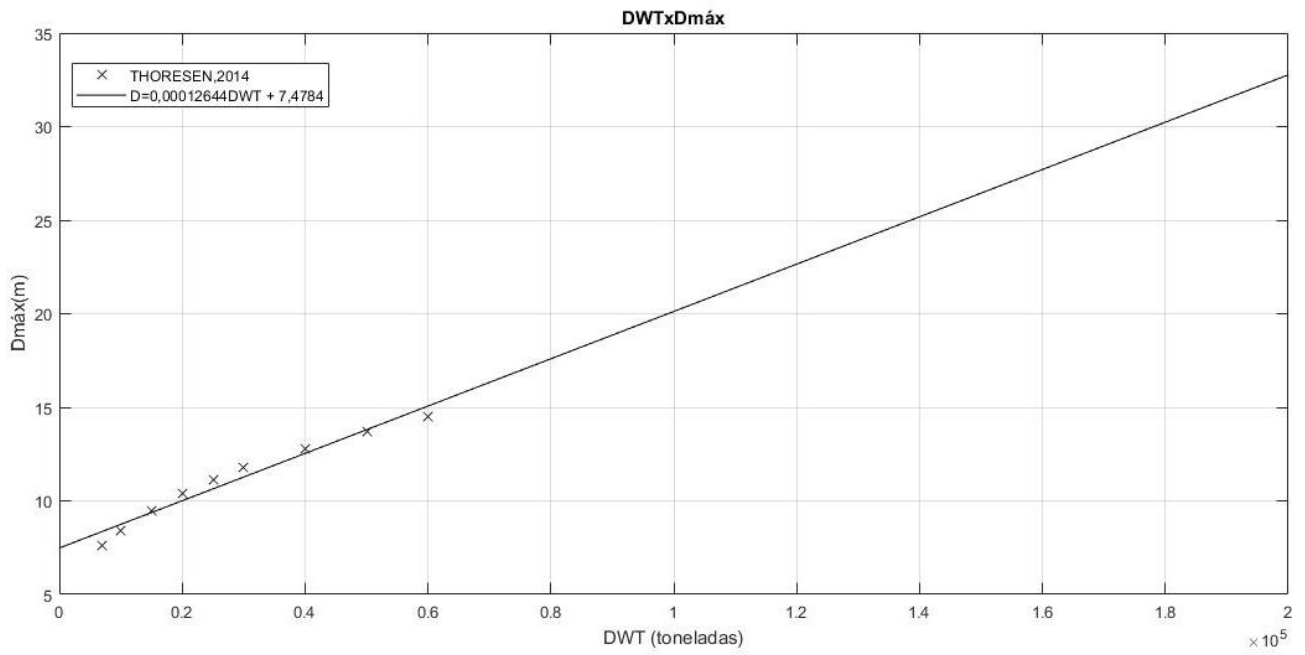


Figura 3.9 - DWTxDmáx. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

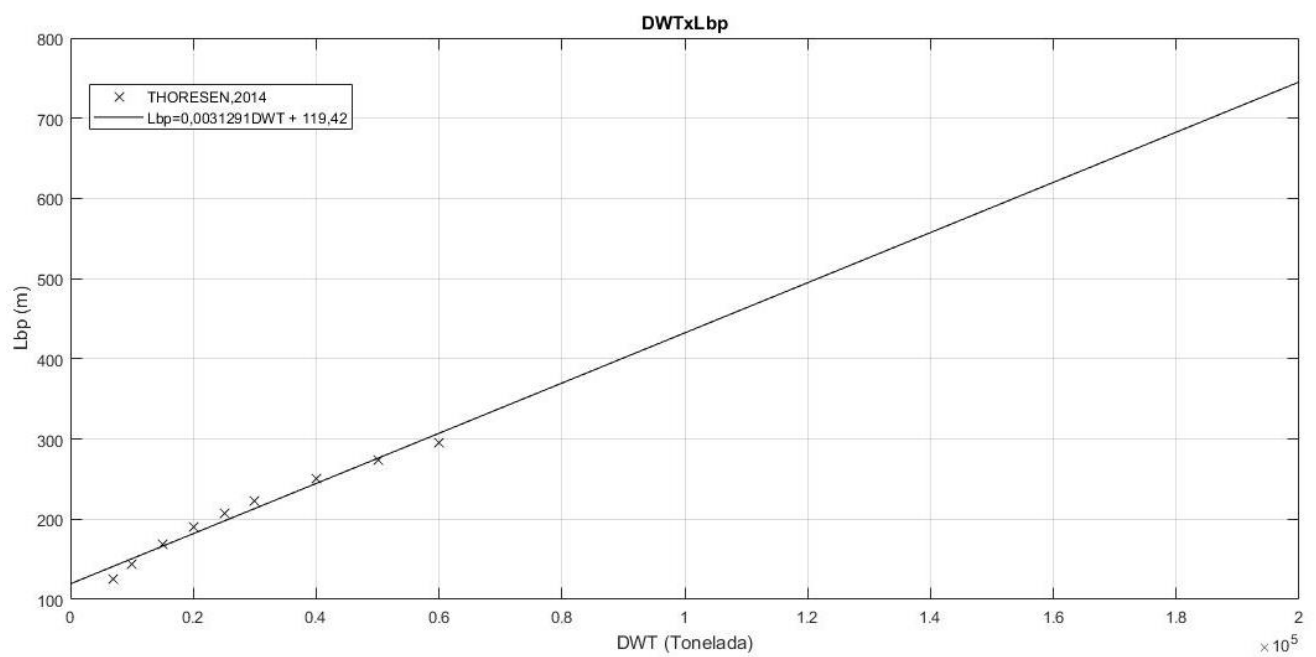


Figura 3.10 - DWTxLbp. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

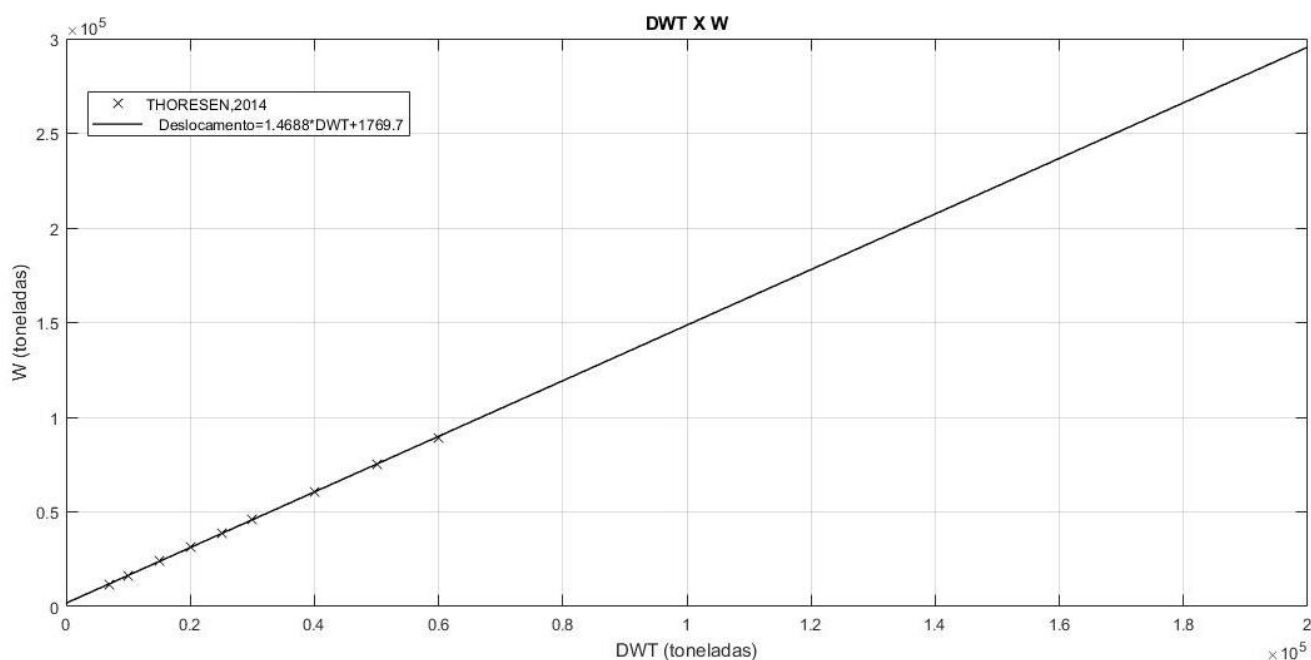


Figura 3.11 - DWTxW. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

Para a obtenção do coeficiente de forma da corrente (k_c), que também está relacionado as dimensões das embarcações, utilizou-se os dados da Tabela 2.3, no presente estudo de caso normalmente a direção da corrente coincide com o eixo longitudinal da embarcação, ou seja, o ângulo de incidência é de 0° , porém, conforme descrito no item 8.2.4 da NBR 9782:1987, o ângulo mínimo a ser considerado é de 20° .

De acordo com o TECON (<https://www.wilsonsons.com.br/pt/teconriogrande/conteudo/quem-somos-tecon-rio-grande>), a profundidade do canal de acesso por meio marítimo é de 14,5 metros, ou seja, há embarcações que possuem calados muito próximos a profundidade do canal, porém, para acessarem o terminal de contêineres não necessariamente operam em sua maior capacidade, de forma que seja respeitado o limite de profundidade.

Dessa forma, para a obtenção dos coeficientes de forma devido a corrente (k_c), para os casos em que a relação h/D for menor que 1,1, será fixado como resultado do coeficiente o valor de 1,2 (considerando ângulo de incidência igual a 20°), dessa forma, foi obtido por interpolação os resultados intermediários de k_c , de acordo com os dados fornecidos na tabela 2.3.

Ainda para o cálculo dos esforços da corrente, para a verificação da condição em lastro e carregado é necessário obter os calados mínimos das embarcações (condição em lastro), para isto, foi utilizado a equação 52 obtida em Mason (1981).

$$D_{\min} = \left(\frac{W - DWT}{W} \right) D_{\max} \quad (52)$$

Onde W é o deslocamento da embarcação, DWT porte da embarcação, $D_{\min}$ e $D_{\max}$ os calados mínimos e máximos respectivamente.

Por fim, para k_w , foi utilizado a recomendação da norma, adotando um valor de 1,2, sendo esse um parâmetro fixo (foi utilizado o mesmo valor para todas as simulações).

Parâmetros relacionados aos esforços ambientais (NBR 9782:1987)

Os esforços ambientais analisados são a velocidade do vento (V_w) e a velocidade da corrente (V_c).

Para a velocidade do vento foram utilizados os dados obtidos junto a Praticagem da Barra do Rio Grande, sendo registradas rajadas máximas horárias de 3s de duração e cerca de 20 m de altura na torre de medições da entidade localizada no Porto do Rio Grande.

Para analisar a distribuição de probabilidade que melhor representa o conjunto de dados das velocidades do vento foi utilizado 14.536 valores de velocidade de vento para um período de janeiro a dezembro de 2015, estes dados foram introduzidos no software *easyfit*, conforme figura 3.12.

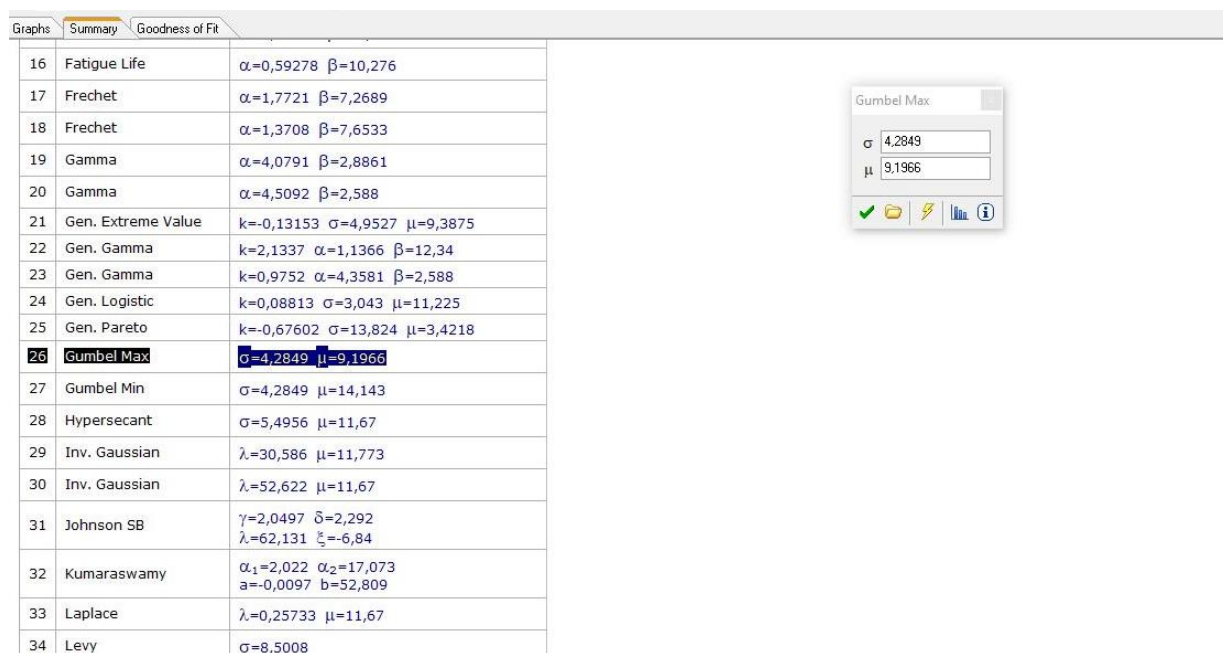


Figura 3.12 - Testes de Goodness of fit para os dados de velocidade do vento do ano de 2015 obtidos junto a praticagem da Barra do Rio Grande (Fonte: Autor).

A distribuição de probabilidade que melhor representa o conjunto de dados é a distribuição de valores extremos Gumbel do Tipo I, os parâmetros obtidos foram σ e μ que valem 4,2849 e 9,1966 respectivamente. A discrepância crítica no teste de Kolmogorov-Smirnov para um nível de significância de 5% é de 0,05887, portanto, entende-se que a distribuição adotada representa de forma satisfatória a variabilidade dos valores da velocidade do vento.

Para a geração de valores de variáveis aleatórias para distribuição de valores extremos Gumbel Tipo I, foi aplicado o método da transformada inversa na equação de densidade de probabilidade da referida distribuição, de forma a obter a função geradora de valores aleatórios de velocidade do vento expressa na equação 53.

$$y_i = u_n + \frac{1}{\alpha_n} \cdot \ln \left[\frac{1}{\ln \left(\frac{1}{u_i} \right)} \right] \quad (53)$$

Onde para o cálculo de u_n e α_n , foram utilizados a média e o desvio padrão obtidos e demonstrados na figura 3.12, conforme exposto em seguida:

$$\alpha_n = \sqrt{\frac{\pi^2}{6 \cdot \sigma_{Y_n}^2}} = \sqrt{\frac{\pi^2}{6 \cdot (4,2849)^2}} = 0,299318497 \cong 0,2993$$

$$u_n = \mu_{Y_n} - \frac{\gamma}{\alpha_n} = 9,1966 - \frac{0,577216}{0,299318497} \cong 7,2682$$

Desta forma, a equação geradora pode ser expressa conforme a equação 54.

$$y_i = 7,2682 + \frac{1}{0,2993} \cdot \ln \left[\frac{1}{\ln \left(\frac{1}{u_i} \right)} \right] \quad (54)$$

Por fim, os parâmetros relacionados a velocidade da corrente são baseados na referência do artigo de Möller e Costa (2007), adotando-se uma distribuição normal com velocidade média (μ) igual a 1,00 m/s e desvio padrão igual (σ) igual a 0,55.

3.2.2. Parâmetros da BS 6349-1:2000

Dentre as equações utilizadas para a obtenção dos esforços de amarração de acordo com a norma britânica BS 6349-1:2000, as variáveis aleatórias são: velocidade do vento (V_w), velocidade da corrente (V_c) e porte da embarcação (DWT). Em função das variáveis aleatórias, obtém-se a área da seção transversal e longitudinal do navio acima do nível d'água para as condições com a embarcação carregada e em lastro (A_{tc} , A_{tl} , A_{lc} , A_{ll}), fator de correção de profundidade d'água para forças transversais (C_{CT}), fator de correção de profundidade d'água para forças longitudinais de corrente em navios porta-contêineres (C_{CL}), comprimento do navio entre perpendiculares (L_{bp}) e calado médio da embarcação (d_m).

Já os parâmetros fixos são: coeficiente de força transversal frontal ou de ré (C_{TW}), coeficiente de força de vento longitudinal (C_{LW}), peso específico do ar (ρ_{ar}), peso específico da água salgada ($\rho_{\text{água salgada}}$), coeficiente da força de arraste transversal de corrente frontal ou de ré (C_{TC}), coeficiente de ação de arraste de corrente longitudinal (C_{LC}) e a profundidade do canal (d).

Parâmetros relacionados as embarcações BS 6349-1:2000

Os parâmetros relacionados as embarcações (A_{tc} , A_{tl} , A_{lc} , A_{ll} e L_{bp}) seguem a mesma metodologia descrita no item anterior.

Já o calado médio (d_m), que não é um parâmetro utilizado na NBR 9782:1987, necessário para a obtenção dos esforços relacionados a corrente e dos parâmetros aleatórios C_{CT} e C_{CL} , pode ser obtido baseado nos valores expostos na figura 3.13, com dados da própria BS 6349-1:2000.

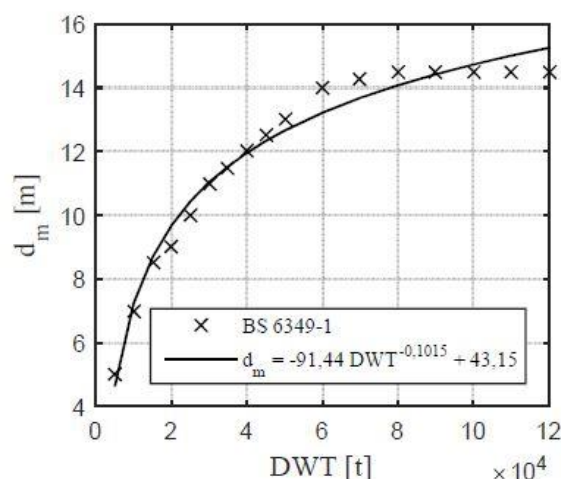


Figura 3.13 - DWT x d_m (Fonte: Ramos, 2016, baseado nos dados da BS 6349-1:2000).

Será adotado ângulo de incidência da corrente igual a 20° conforme NBR 9782:1987, portanto, o gráfico demonstrado na figura 2.25 expõe a coordenada “x” como sendo igual ao ângulo de incidência da corrente (α), e a coordenada “y”, o fator de correção de profundidade d’água para forças transversais (C_{CT}).

Com o intuito de obter uma formulação analítica para a obtenção de C_{CT} , obteve-se quatro pares ordenados de (x,y) da figura 2.25 para o ângulo de incidência igual a 20° (quatro valores do coeficiente C_{CT} relacionados com as razões $\frac{d}{d_m}$ iguais a 1,1, 1,2, 1,5 e 2,0), e de acordo com os respectivos pares ordenados foi realizada a interpolação destes, obtendo a função demonstrada na figura 3.14.

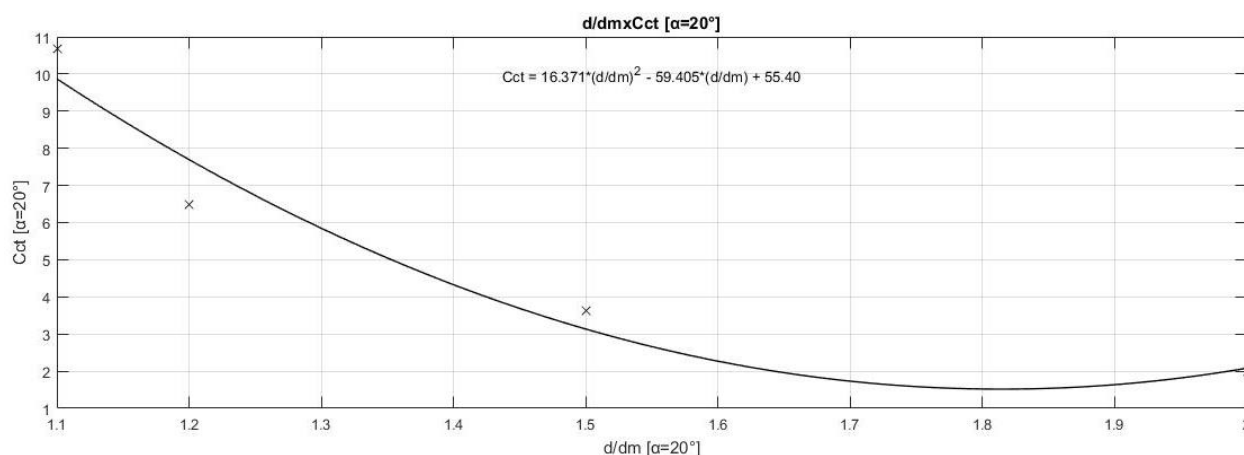


Figura 3.14 - Função para obtenção do C_{CT} (Fonte: Adaptado BSI 6349-1:2000).

Utilizando a mesma analogia com a figura 2.26, que expõe a relação entre o coeficiente C_{CL} e a razão entre $\frac{d}{d_m}$, obtém-se a forma analítica para a obtenção dos valores de C_{CL} para um ângulo de incidência igual a 20° , conforme exposto na figura 3.15.

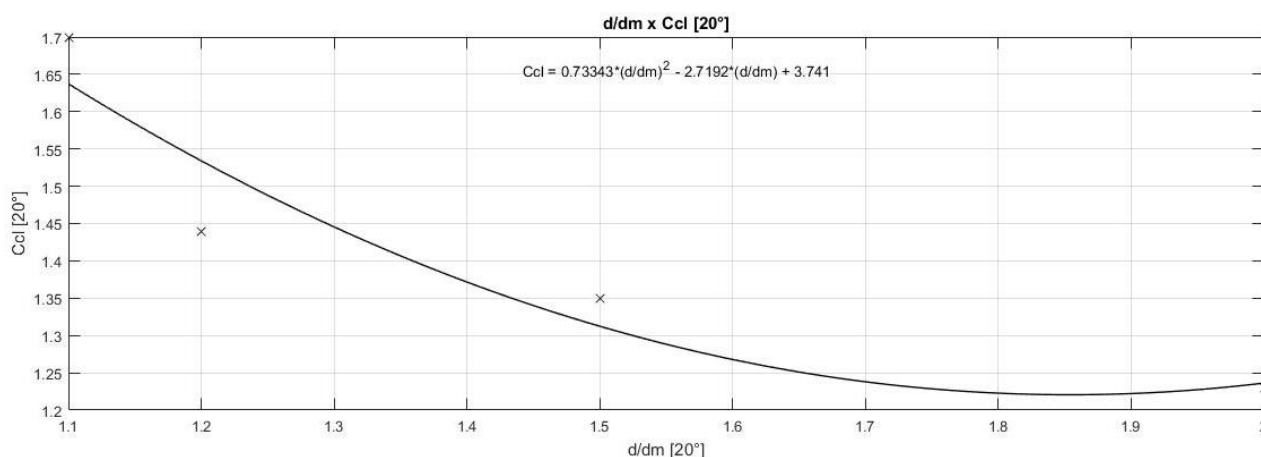


Figura 3.15 - Função para obtenção do C_{CL} (Fonte: Adaptado BSI 6349-1:2000).

Por fim, são obtidos os parâmetros fixos devidos as embarcações já descritas anteriormente, os valores de C_{TW} , C_{LW} , C_{TC} e C_{LC} são obtidos através dos gráficos demonstrados nos itens 2.3.4 e 2.3.5, para o ângulo de incidência igual a 20° , e para as direções à frente e à popa.

Parâmetros relacionados aos esforços ambientais externos BS 6349-1:2000

A obtenção dos parâmetros relacionados aos esforços ambientais (velocidade do vento e da corrente) seguem as mesmas premissas dos itens anteriores, onde posteriormente será demonstrado a variação destes parâmetros para o cálculo dos pontos de projeto e aplicação do método de Monte Carlo.

O restante dos parâmetros fixos são: massa específica do ar (ρ_a), massa específico da água salgada (ρ_w), e a profundidade do canal (d).

O valor de ρ_a é de $1,3096 \frac{kg}{m^3}$ para a temperatura de $0^\circ C$ e $1,1703 \frac{kg}{m^3}$ para a temperatura de $30^\circ C$, foi adotado para o estudo de caso uma temperatura média de $20^\circ C$, portanto, o valor intermediário da massa específica do ar obtido por meio de interpolação de valores é igual a $1,2167 \frac{kg}{m^3}$.

Já para a massa específica da água (ρ_w), não há diferenciação de valores de acordo com a temperatura, de forma que a norma recomenda adotar o valor de $1025,0 \frac{kg}{m^3}$.

Por fim, a profundidade do canal (d), corresponde a profundidade do canal da barra para acesso por meio marítimo ao Porto do Rio Grande, e possui valor igual a 14,5 metros, conforme já foi exposto anteriormente.

3.2.3. Parâmetros da UFC 4-159-03:2005

Dentre as equações utilizadas para a obtenção dos esforços de amarração de acordo com a norma UFC 4-159-03:2005, as suas variáveis aleatórias são: velocidade do vento (V_w), velocidade da corrente (V_c) e porte da embarcação (DWT). Em função das variáveis aleatórias, são obtidas as áreas da seção transversal e longitudinal do navio acima do nível d'água, para as condições com a embarcação carregada e em lastro (A_{tc} , A_{tl} , A_{lc} , A_{ll}), comprimento da embarcação no nível d'água (L_{wL}), calado médio (T), boca ou largura (B), área da superfície molhada (S'), coeficiente de arraste de força transversal de vento (C_{yw}), coeficiente de arraste para força transversal de corrente (C_{yc}), coeficiente de fricção longitudinal de pele (C_{xca}), área da lâmina expedida de hélice (A_p) e os demais

parâmetros dependentes. Os parâmetros fixos são determinados de acordo com o exposto nos itens 2.3.7 e 2.3.8.

Parâmetros relacionados as embarcações UFC 4-159-03:2005

Os parâmetros relacionados com as embarcações que ainda não foram expostos, e que são necessários para a obtenção dos esforços de amarração segundo a norma americana são: altura da superestrutura (h_s), altura do casco (h_H), área longitudinal da superestrutura (A_s), área longitudinal do casco (A_H), comprimento da embarcação no nível d'água (L_{WL}), largura da superestrutura (L_s), bordo livre (BL), comprimento total da embarcação (L_{oa}), coeficiente de bloco (C_b) e coeficiente de meia nau (C_m).

Todos os parâmetros supracitados são variáveis das embarcações, e a norma americana não dispõe de equações para obtenção destes, visto que o ideal consiste na coleta dos dados reais direto com os fabricantes das embarcações. Devido à dificuldade da obtenção das medidas reais das embarcações, surge a necessidade de expor formulações empíricas para obtenção destes parâmetros.

Primeiramente, obtém-se as equações determinísticas conforme as figuras 3.16 e 3.17 por meio da extrapolação dos dados da tabela 3.1 para o comprimento total (L_{oa}) e boca da embarcação (B). Em seguida, a figura 3.18 expõe a formulação para a obtenção do valor da borda livre (BL), onde segundo o *International Convention on Load Lines* (1966), o comprimento L consiste no maior valor entre 96% do L_{oa} e L_{bp} , e os navios do tipo B representam todas as embarcações, exceto navios tanques.

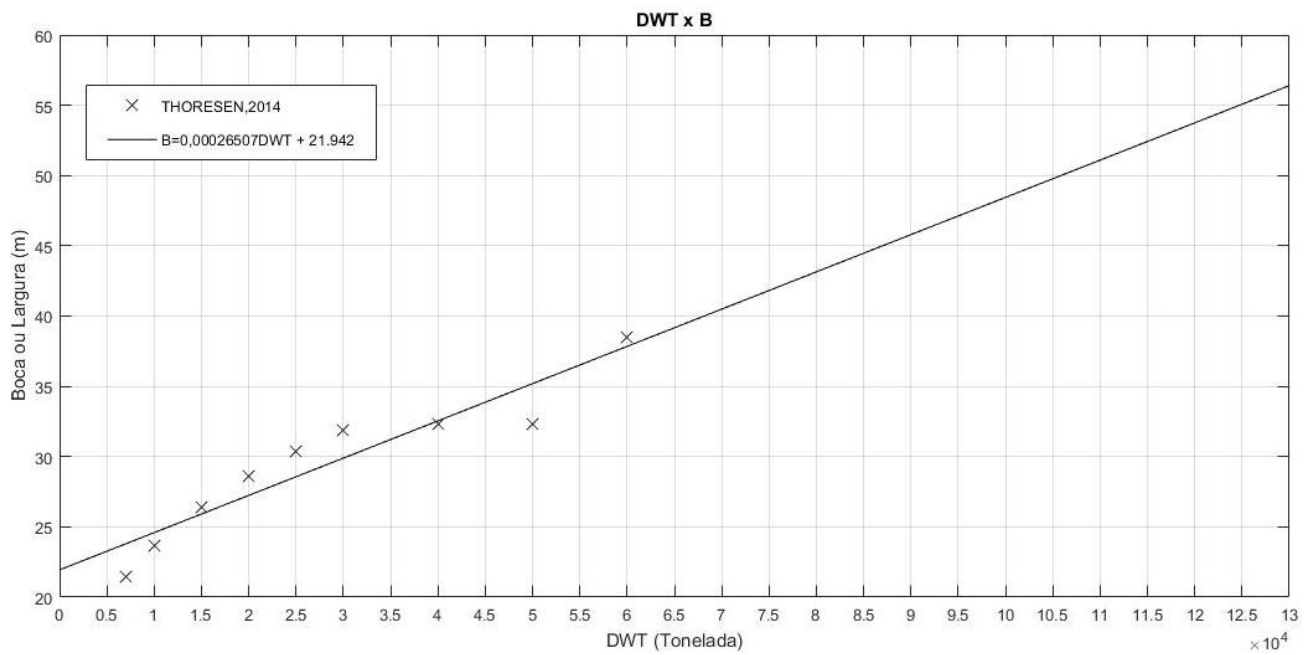


Figura 3.16 - DWT x B (Fonte: Adaptado Thoresen,2014).

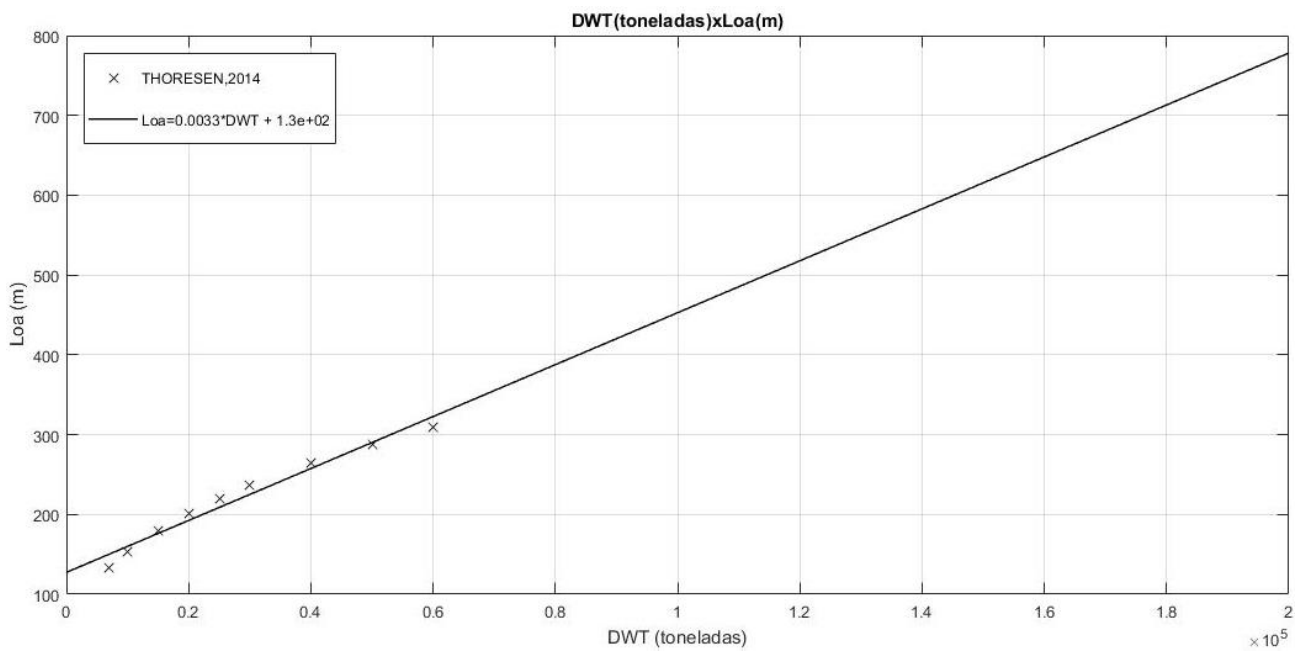


Figura 3.17 - DWT x Loa (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

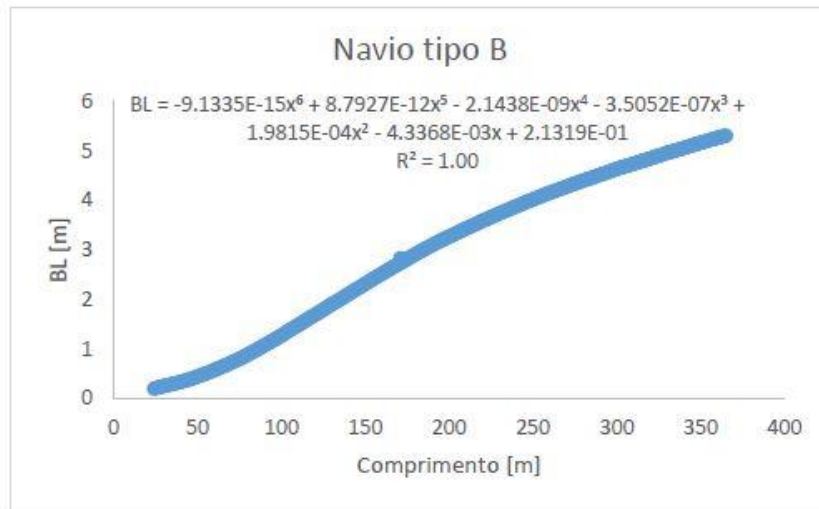


Figura 3.18 - Lbp x BL
(Fonte: Chame,2014, baseado nos dados do International Convention on load lines,1966)

$$L_{wl} = 0,90 \cdot L_{oa} \quad (55)$$

(Chame,2014)

$$h_s = 0,7 \cdot L_{oa} \cdot \sin\left(\sin^{-1} \frac{BL}{500}\right) \quad (56)$$

(Watson e Gilfillan *apud* Parsons, 2003)

$$L_s = 0,08 \cdot L_{oa} \quad (57)$$

(Watson e Gilfillan *apud* Parsons, 2003)

$$C_b = 0,8217 \cdot 1 \cdot LBP^{0,42} \cdot B^{-0,3072} \cdot T^{0,1721} \cdot VEL^{-0,6135} \quad (58)$$

(Watson,1998)

Onde:

VEL = Velocidade de serviço da embarcação em nós (Adotado igual a 22,65 nós, corresponde a média dos valores analisados por Chame (2014)).

$$C_m = 1,006 - 0,0056 \cdot C_b^{-3,56} \quad (59)$$

(Kerlen,1970 *apud* Chame, 2014)

Com as equações 55 a 59, e com as formulações descritas nos itens 2.3.7 e 2.3.8 todos os parâmetros relacionados as dimensões das embarcações podem ser obtidas.

Parâmetros relacionados aos esforços ambientais externos UFC 4-159-03:2005

A obtenção dos parâmetros relacionados aos esforços ambientais (velocidade do vento e da corrente) seguem as mesmas premissas do item anterior, onde posteriormente será demonstrado a variação destes parâmetros para o cálculo do ponto de projeto e aplicação do método de Monte Carlo.

Os parâmetros fixos são obtidos conforme os itens 2.3.7 e 2.3.8, e de acordo com os demais parâmetros relacionados ao estudo de caso que já foram expostos anteriormente.

4. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO

Após a adoção dos parâmetros fixos e aleatórios, calculam-se “N” respostas para o sistema, onde “N” é o número de simulações adotado, igual a 10.000, e o sistema consiste nas formulações para a obtenção dos esforços de amarração para cada uma das normativas.

O primeiro resultado (parâmetros de saída), são os esforços devido ao vento para as direções longitudinais e transversais, para as situações em lastro e carregado, resultando em quatro vetores resultados para cada uma das normativas, cada um com 10.000 valores.

Vale salientar que, a velocidade do vento utilizada para a aplicação do Método de Monte Carlo foi obtida corrigindo a altura de referência de 20 metros obtidos pela praticagem para 10 metros, que corresponde à altura de referência de todas as normativas estudadas, isto foi adotado na análise de Monte Carlo pois estes são os valores reais que ocorrem no ambiente.

Esta correção foi realizada de acordo com a equação 60 recomendada pelo Fórum Marítimo Internacional das Companhias de Petróleo (OCIMF,2010).

$$V_{W,10m} = V_{W,h} \cdot \left(\frac{10}{h}\right)^{1/7} \quad (60)$$

Onde:

$V_{W,10m}$ = velocidade do vento a 10 m de altura [m/s];

$V_{W,h}$ = velocidade do vento na altura requerida[m/s];

h = altura requerida [m].

Também são parâmetros de saída, os esforços provenientes da corrente para um ângulo de incidência de 20°, para todas as normativas.

Para os esforços provenientes da corrente pela NBR 9782:1987, a norma apresenta somente uma formulação para a obtenção do respectivo valor, sem indicar a direção de atuação (transversal ou longitudinal), portanto, o valor resultante para o ângulo de incidência é decomposto para as direções transversais e longitudinais, para as condições em lastro e carregado.

As normas Britânica BS 6349-1:2000 e Americana UFC 4-159-03:2005, expõem duas formulações relacionadas aos esforços provenientes das correntes, uma para a obtenção dos esforços longitudinais e outra para a obtenção dos esforços transversais, não há distinção em relação as condições carregadas e em lastro, visto que não há parâmetros que apresentem essa variação.

Por fim, são obtidos dois vetores resultantes com 10.000 valores para as velocidades transversais e longitudinais devido as correntes para a norma Britânica e Americana, e para a norma Brasileira, são obtidos quatro vetores resultantes com 10.000 valores, para as velocidades transversais e longitudinais nas condições carregado e em lastro.

Os esforços de cálculo obtidos e comparados no presente trabalho são aqueles que representam os maiores valores para as combinações existentes, conforme equações 61 a 67, e estas seguem a metodologia exposta por Mason (1981).

$$F_{\text{Longitudinal em lastro total}} = F_{\text{longitudinal em lastro devido ao vento}} + F_{\text{longitudinal em lastro devido a corrente}} \quad (61)$$

$$F_{\text{Longitudinal carregada total}} = F_{\text{longitudinal carregada devido ao vento}} + F_{\text{longitudinal carregada devido a corrente}} \quad (62)$$

$$F_{\text{transversal em lastro total}} = F_{\text{transversal em lastro devido ao vento}} + F_{\text{transversal em lastro devido a corrente}} \quad (63)$$

$$F_{\text{transversal carregada total}} = F_{\text{transversal carregada devido ao vento}} + F_{\text{longitudinal carregada devido a corrente}} \quad (64)$$

$$F_{\text{longitudinal de cálculo}} = \text{MÁXIMO} (F_{\text{Longitudinal em lastro total}}; F_{\text{Longitudinal carregada total}}) \quad (65)$$

$$F_{\text{Transversal de cálculo}} = \text{MÁXIMO} (F_{\text{transversal em lastro total}}; F_{\text{transversal carregada total}}) \quad (66)$$

$$F_{\text{resultante de cálculo}} = \sqrt{(F_{\text{longitudinal de cálculo}})^2 + (F_{\text{Transversal de cálculo}})^2} \quad (67)$$

Para o caso dos esforços provenientes da corrente, obtidos segundo as normas Britânica e Americana, foi considerado que o valor do esforço longitudinal para as condições carregado e em lastro são iguais, a mesma consideração foi realizada para os esforços transversais devidos a corrente.

5. PONTOS DE PROJETO

Os pontos de projeto são aqueles valores obtidos de forma determinística, considerando as características da maior embarcação que o porto irá receber (navio de projeto), e dos valores de projeto das variáveis ambientais segundo as recomendações de cada uma das normativas.

Foi utilizado como navio de projeto a maior embarcação encontrada dentro do período analisado de 6 meses no cais de terminais de contêineres do TECON, a embarcação que apresenta o maior porte (DWT) é a Cap. San Lorenzo, onde alguns dos seus parâmetros são expostos na figura 5.1.

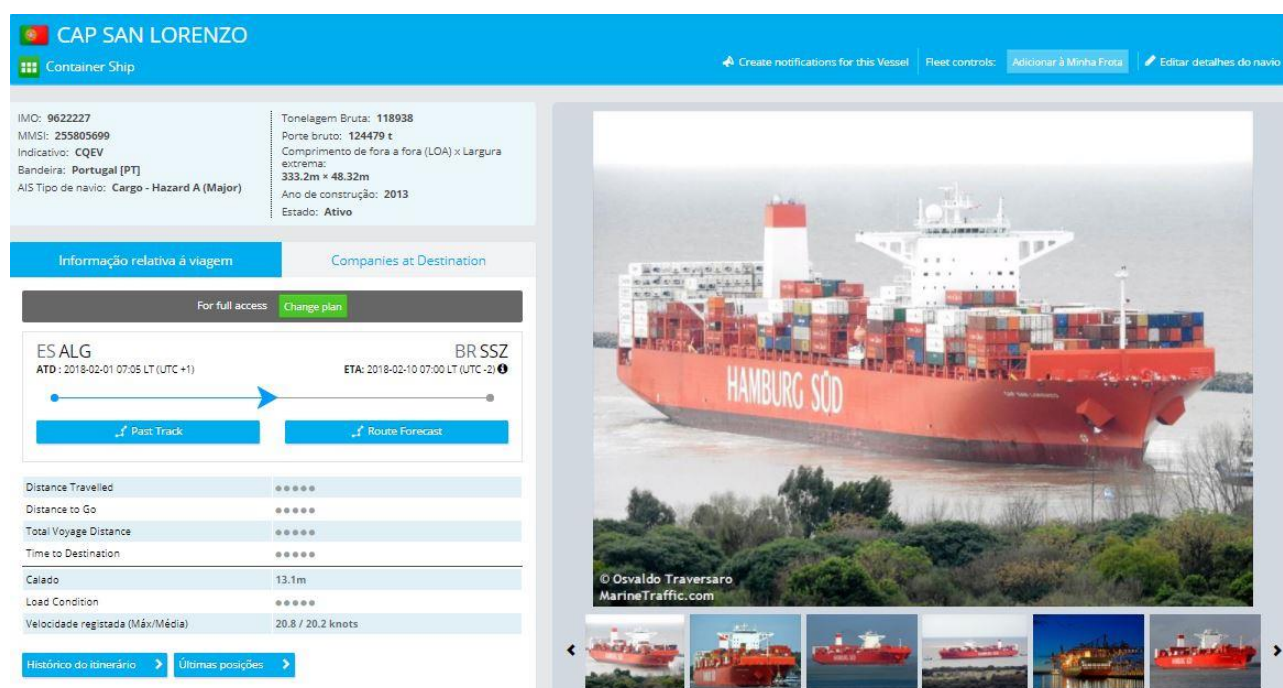


Figura 5.1 - Embarcação San Lorenzo

(Fonte: <https://www.marinetraffic.com/pt/ais/details/ships/shipid:297177/mmsi:255805699/vessel:CAP%20SAN%20LORENZO>)

Pode-se analisar que, os valores do porte da embarcação (DWT), comprimento total (L_{oa}), boca ou largura (B), calado máximo ($D_{máx}$), e velocidade média de aproximação (VEL) valem 124479 toneladas, 333,2 metros, 48,32 metros, 13,1 metros e 20,2 nós respectivamente.

Os demais parâmetros das embarcações são obtidos através das formulações apresentadas ao longo do presente trabalho, deixando salientado que o ângulo de incidência do vento e da corrente é o mesmo considerado para a aplicação do Método de Monte Carlo.

Por fim, é necessário obter os valores das velocidades do vento e da corrente para o tempo, altura e período de retorno especificado por cada uma das normativas.

5.1. Velocidades de projeto

Para a velocidade de projeto da corrente, ambas as normativas demonstram que no mínimo, deve ser obtido um valor corresponde a um período de retorno (T) de 50 anos, porém, como não há dados medidos em campo para estimar estatisticamente este valor, será adotada uma velocidade de projeto devido a corrente para todas as normativas, igual a 4 nós, o que equivale a 2,05778 m/s, pois este é o valor máximo de velocidade de corrente segundo o Porto do Rio Grande (*Fonte: http://www.portoriogrande.com.br/site/estrutura_portuaria_condicoes.php*).

5.1.1. Velocidades de projeto do vento de acordo com a NBR 9782:1987

Para a obtenção dos pontos de projeto, será utilizado o valor de velocidade de projeto estipulado pela NBR 9782:1987, a norma expõe que a velocidade do vento a ser considerada é a velocidade média em 10 minutos, medida no local de implantação da estrutura portuária, a uma altura de 10 metros, portanto, de acordo com a NBR 6123:1988 (norma de referência da NBR 9782:1987 para obtenção da velocidade do vento), o valor que deve ser adotado é o da velocidade de projeto segundo NBR 9782:1987 ($\bar{V}_p$).

$$V_{w,NBBR} = \bar{V}_p = 0,69 \cdot v_o \cdot S_1 \cdot S_3 \quad (68)$$

A velocidade básica (v_o), de acordo com a NBR 6123:1988 para Rio Grande – RS possui valor de aproximadamente 47,0 m/s, o fator topográfico S_1 vale 1,0 (terreno plano ou fracamente acidentado) e o fator estatístico S_3 foi adotado como igual a 1,10, considerando que a ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva.

Desta forma, a velocidade utilizada para a determinação do ponto de projeto segundo a NBR 9782:1987 é igual a 35,67 m/s.

5.1.2. Velocidades de projeto do vento de acordo com a BS 6349-1:2000

A norma técnica britânica BS 6349-1:2000, recomenda a utilização dos valores de velocidade média em 1 min para uma altura de referência igual a 10 metros, para um período de retorno de no mínimo 50 anos.

Tal recomendação deve-se ao tempo necessário para que os esforços nos cabos de amarração

se desenvolvam por completo, dadas as elevadas inércias das embarcações.

Primeiro, deve-se corrigir os valores obtidos segundo a praticagem para uma altura de referência igual a 10 metros, para todo o período de dados da velocidade do vento (ano de 2015).

A velocidade nominal do vento com período de retorno de 50 anos, tem a probabilidade de 2% de ser excedido em um único ano, mas tem a probabilidade de 63% de ser excedido em 50 anos, conforme exposto na figura 5.2 (Beck & Corrêa, 2012).

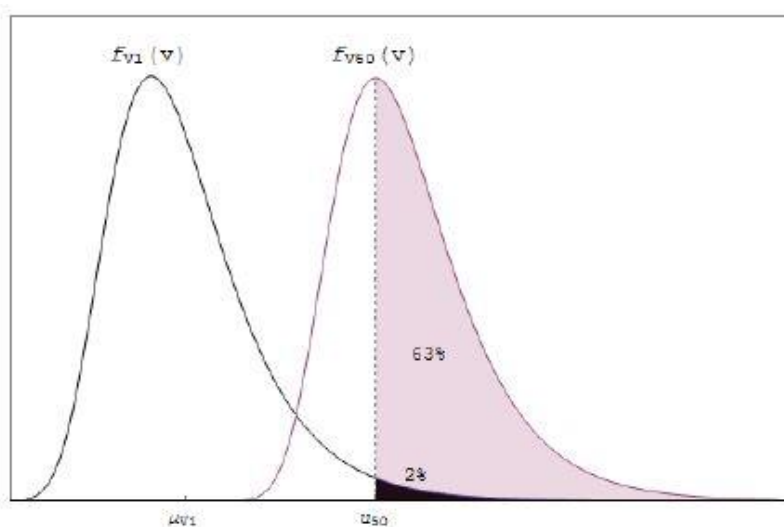


Figura 5.2 - Relação entre valores extremos de 1 e 50 anos (Fonte: Beck & Corrêa, 2012)

Baseado na figura 5.2, obtém-se o valor da velocidade do vento correspondente a probabilidade de 2%, este vale 23,47 m/s, ou seja, este é o valor para rajada de 3s a uma altura de 10 metros para um período de retorno de 50 anos.

Porém, conforme exposto, a norma BS 6349-1:2000 utiliza a velocidade média em 1 min, e esta pode ser estimada em função do valor obtido para 3s, de acordo com a equação 69.

$$V_{W,BSI} = V_{W,1min} = 0,85 \cdot V_{W,3s} \quad (69)$$

Onde:

$V_{W,1min}$ = Velocidade média dos ventos em 1 minuto, a 10 metros de altura, para um período de retorno de 50 anos [m/s].

$V_{W,3s}$ = velocidade de rajada de 3s, a 10 metros de altura, para período de retorno de 50 anos [m/s].

	utilização para portos de cargas em geral, porque tempestades súbitas podem produzir ventos fortes em curto prazo. Nestes casos dimensiona-se o sistema de amarração para o tipo IIB.
Tipo III Amarração sob clima severo	Esta categoria abrange o sistema de amarrações que não devem, ou não deveriam estar atracadas antes da chegada de um evento extremo. Este tipo é recomendado para terminais de reparação, dique seco, para reformas e construções de novas instalações.
Tipo IV Amarração Permanente	Esta categoria abrange a amarração para aqueles casos em que as embarcações permanecem atracadas mesmo durante a ocorrência de eventos extremos. Este tipo é recomendado para navios atracados permanentemente (navios inativos), navios-museu, diques flutuantes, instalações utilizadas para treinamento, dentre outras.

O Tipo III é o que melhor representa o estudo de caso, isto se deve ao fato de o mesmo operar somente dentro de um determinado valor de velocidade, porém, como podem ocorrer mudanças bruscas e rápidas nos valores da velocidade do vento, pode haver situações em que os navios estarão atracados durante um evento extremo.

A norma americana fornece as considerações para a velocidade do vento e da corrente para cada tipo de serviço de amarração, conforme tabela 5.2.

O tipo de serviço III foi o adotado, portanto, tanto para a velocidade do vento, quanto para a velocidade da corrente, a probabilidade de excedência num intervalo de 50 anos (período de retorno) é igual a 0,02, ou seja, a velocidade nominal do vento com período de retorno de 50 anos tem a probabilidade de 2% de ser excedido em um único ano, mas tem a probabilidade de 63% de ser excedido em 50 anos.

Tabela 5.2 - Critérios de projeto de instalações para os tipos de serviços de amarração.
(Fonte: Adaptado UFC 4-159-03:2005).

Tipos de serviços de amarração	Vento¹	Corrente¹²
Tipo I	Menor que 35 nós ¹³	1 nó ou menos
Tipo IIA	V_w = máximo 50 nós	Máximo 1,5 nós
Tipo IIB	V_w = máximo 64 nós	Máximo 2,0 nós
TIPO III ^{2,4,5}	P = 0,02 ou R = 50 anos	P = 0,02 ou R = 50 anos
TIPO IV ^{1,2,4,5}	P = 0,01 ou R = 100 anos	P = 0,01 ou R = 100 anos

1-Deve ser utilizado a área de exposição do tipo D para áreas expostas a ventos soprando em mar aberto a distância de no mínimo 1,61 km, e que os valores expostos de P (Probabilidade de excedência) e R (Período de Retorno) representam os valores mínimos que devem ser adotados.

2-Para navios de pesca, navios com cascos não planos e similares, deve-se adotar a relação $T / d = 0,9$ para definir a profundidade da água, para demais tipos de projeções das embarcações, estimasse o valor da profundidade da água através da adição de 0,61 metros do valor da profundidade média do calado (T).

3-Valores demonstrados são mínimos, e dependendo da localidade é necessário obter a climatologia das velocidades do vento locais, e determinar a velocidade de vento apropriada.

4-Cálculos da velocidade do vento para os tipos III e IV de serviços de amarração é necessário consultar a norma americana UFC 4-152-01 *Design: Piers & Wharves*.

5-Consultar apêndice B (retirado do SSR-NAVFAC ESC-06-2012 “Ambiental” Relatório de condições “para obter a corrente para intervalos de recorrência associados aos tipos de serviço de amarração Tipo III e IV.

A norma Americana recomenda para o cálculo dos esforços de amarração uma velocidade média para rajadas de 30 segundos, a uma altura de referência de 10 metros, com o período de retorno estipulado conforme tipo de sistema de serviço de amarração, para o presente caso é o Tipo III, que corresponde a um período de retorno de 50 anos.

Portanto, a norma expõe uma equação para a conversão da velocidade com rajadas de 3 segundos a uma altura de 10 metros para um período de retorno de 50 anos, em velocidade média para rajadas de 30 segundos a uma altura de 10 metros para o mesmo período de retorno, conforme equação 70.

$$V_{50-30s} = \frac{V_{50-3s}}{1,175} \quad (70)$$

A velocidade V_{50-3s} já foi obtida no item 5.1.2, e possui valor igual a 23,47 m/s, logo, a velocidade V_{50-30s} possui valor igual a 19,97 m/s.

O valor obtido de V_{50-30s} necessita ser corrigida novamente, pois segundo as categorias de exposição ao vento relatadas na norma americana, que são baseadas na “rugosidade da superfície”, o valor obtido em (70) refere-se a área de exposição do tipo C (Terreno aberto com obstruções dispersas com alturas geralmente inferiores a 30 pés, normalmente associado a localidades planas do interior), porém, para região costeira, é necessário utilizar a área de exposição do tipo D, logo, obtém-se o valor $V_{50-30s,corrigido}$ conforme equação 71.

$$V_{W,UFC} = V_{50-30s,corrigido} = V_{50-30s} \cdot \sqrt{1,18} \quad (71)$$

Logo, o valor de velocidade média para rajada de 30 segundos, para um período de retorno de 50 anos, a uma altura de referência de 10 metros com área de exposição costeira (D), assumirá o valor de 21,69 m/s.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o intuito de avaliar a aplicabilidade do Método de Monte Carlo, obtém-se os valores de média móvel e média móvel do desvio padrão para os esforços transversais, longitudinais e resultantes, conforme figuras 6.1 a 6.8.

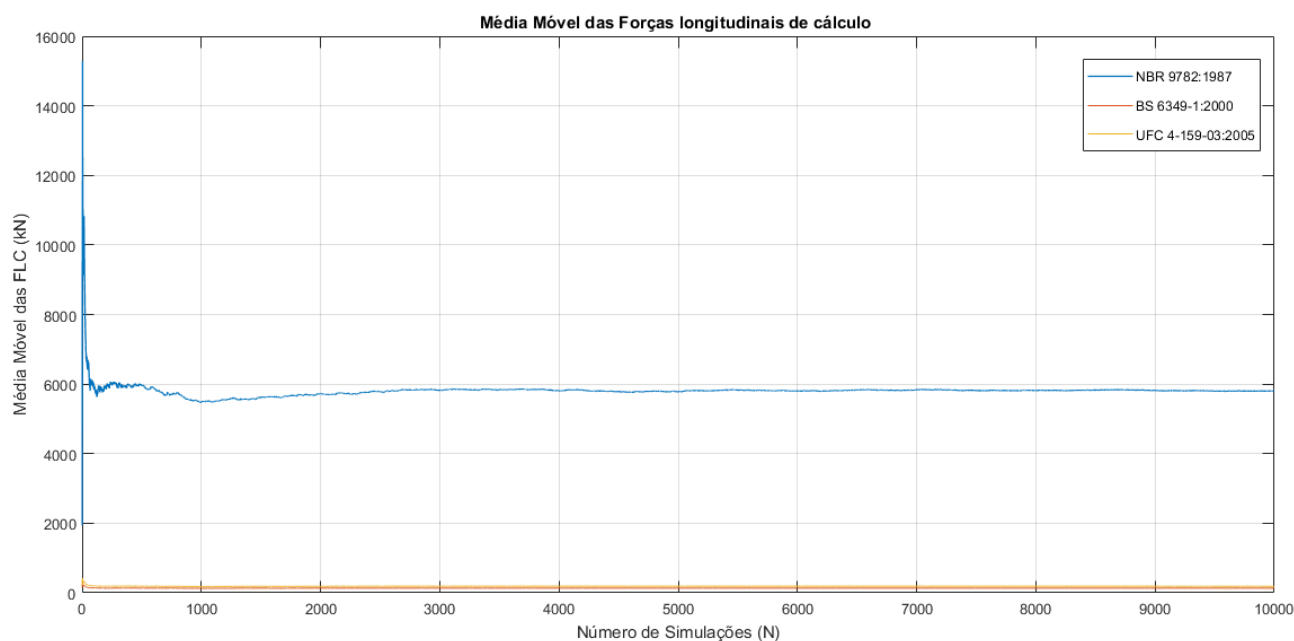


Figura 6.1 - Média móvel das forças longitudinais de cálculo (Fonte: Autor).

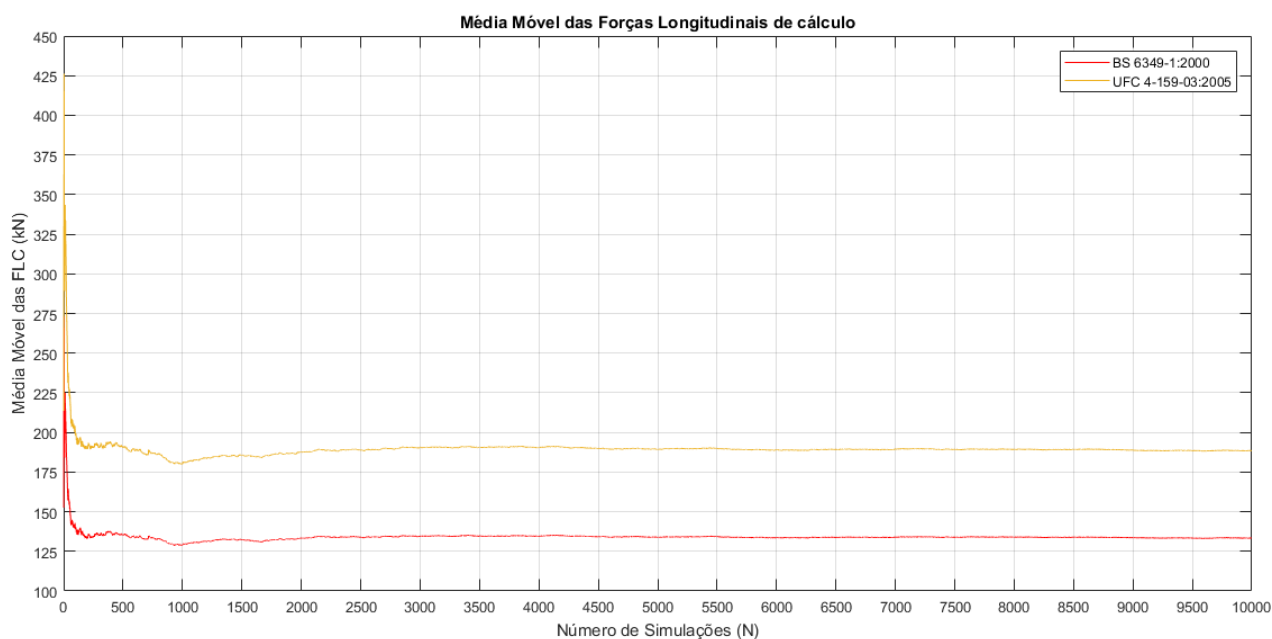


Figura 6.2 - Média móvel das forças longitudinais de cálculo somente para as normativas estrangeiras (Fonte: Autor).

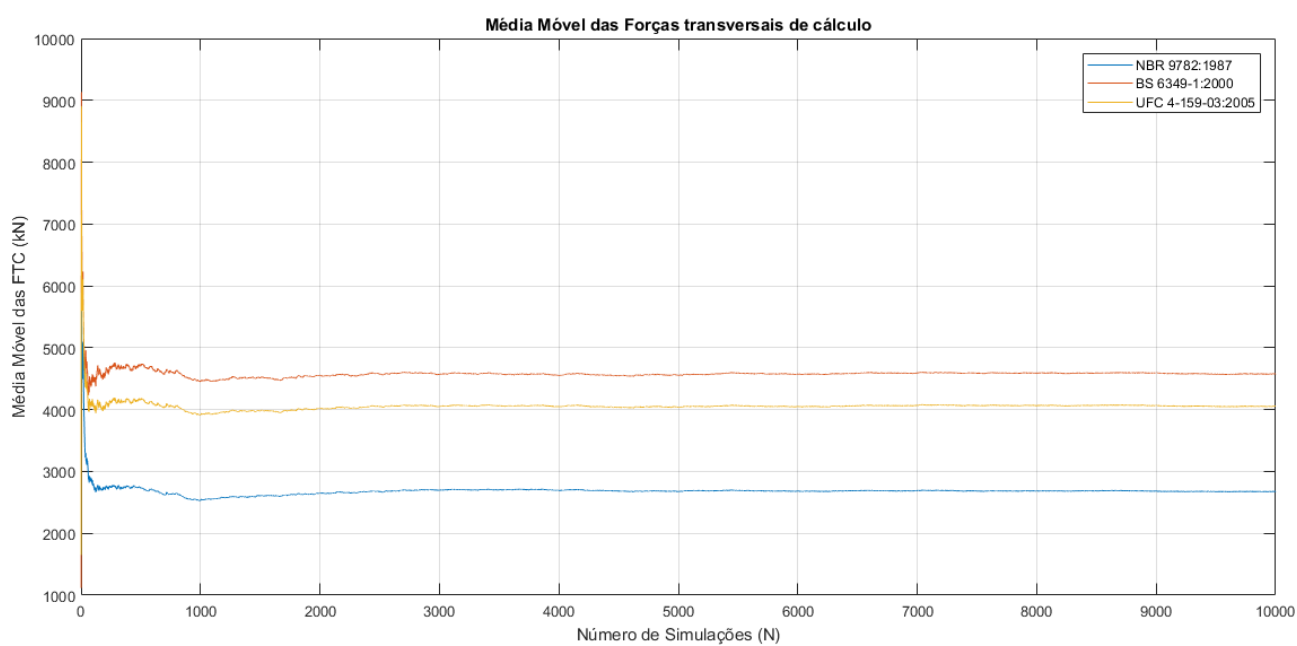


Figura 6.3 - Média móvel das forças transversais de cálculo (Fonte: Autor).

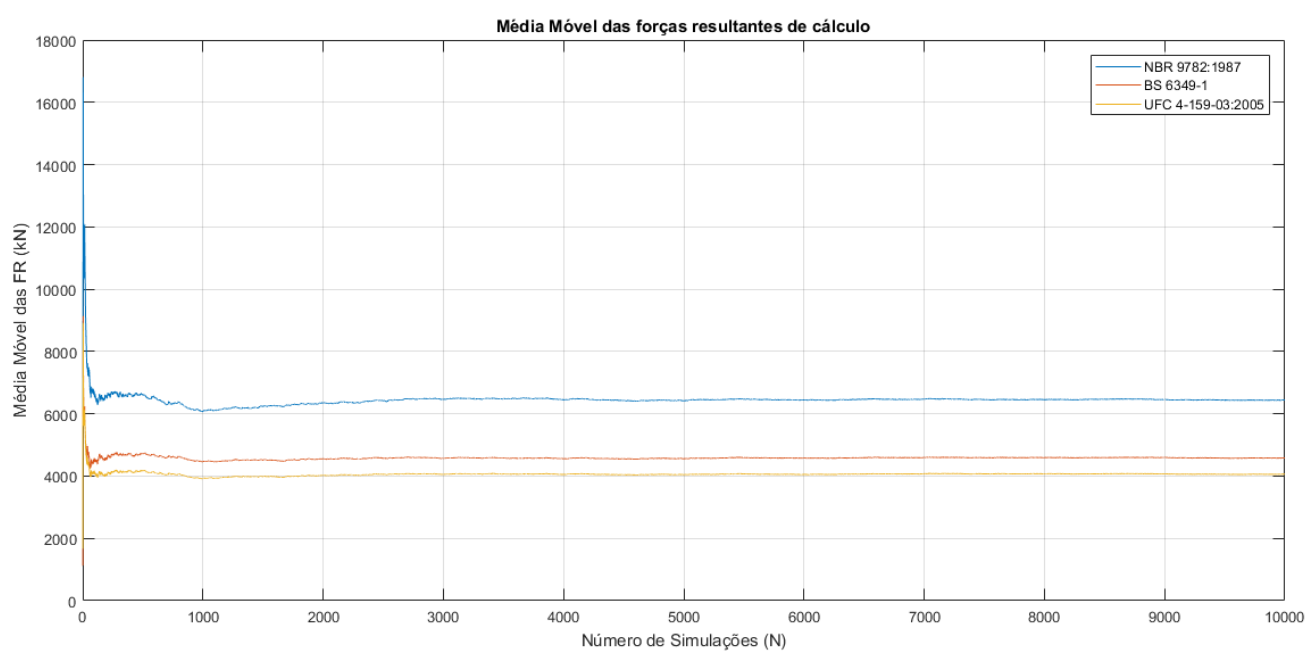


Figura 6.4 - Média móvel das forças resultantes de cálculo (Fonte: Autor).

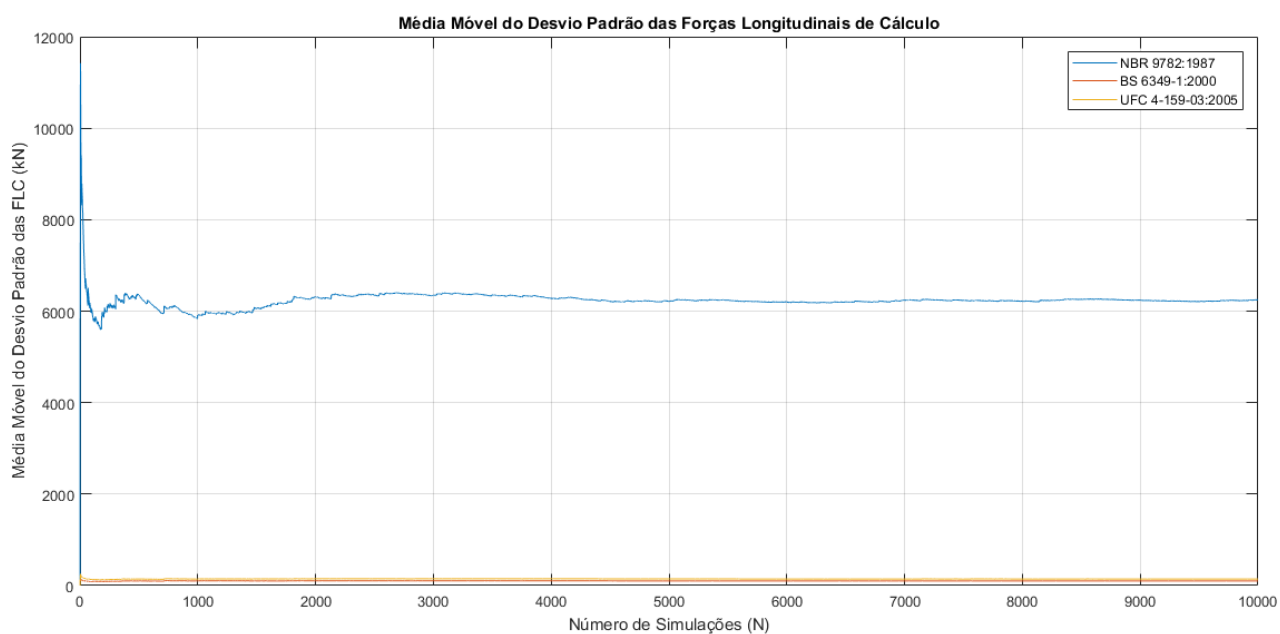


Figura 6.5 - Média móvel do desvio padrão das forças longitudinais de cálculo (Fonte: Autor).

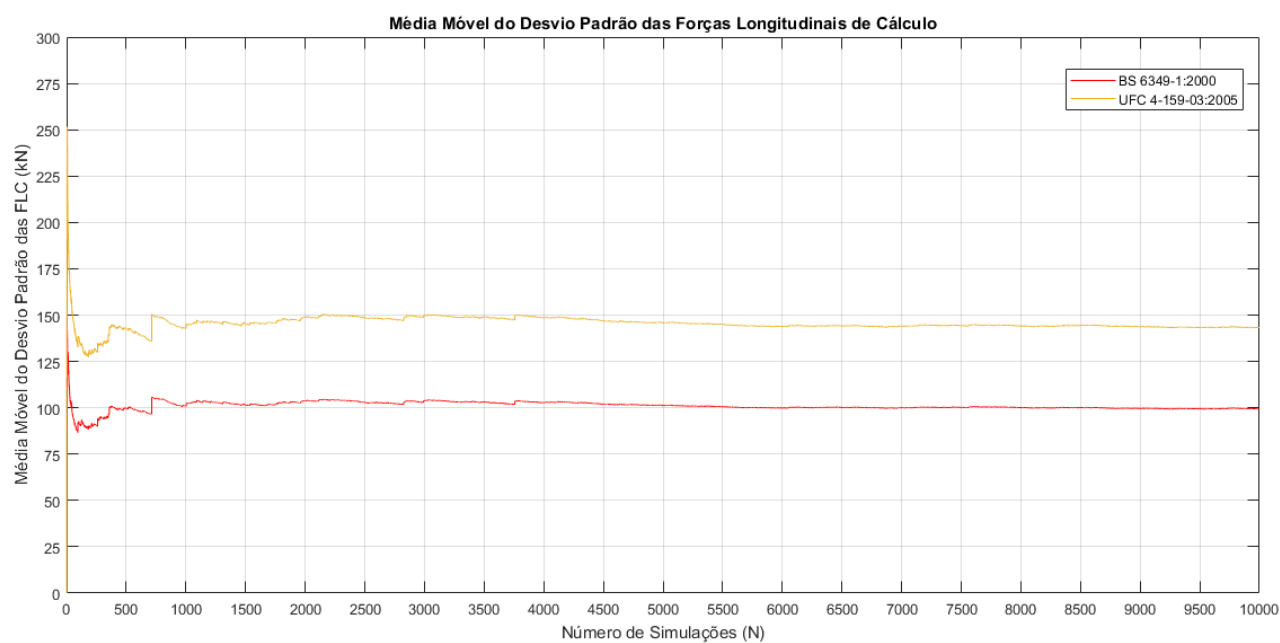


Figura 6.6 - Média móvel do desvio padrão das forças longitudinais de cálculo somente para as normativas estrangeiras (Fonte: Autor).

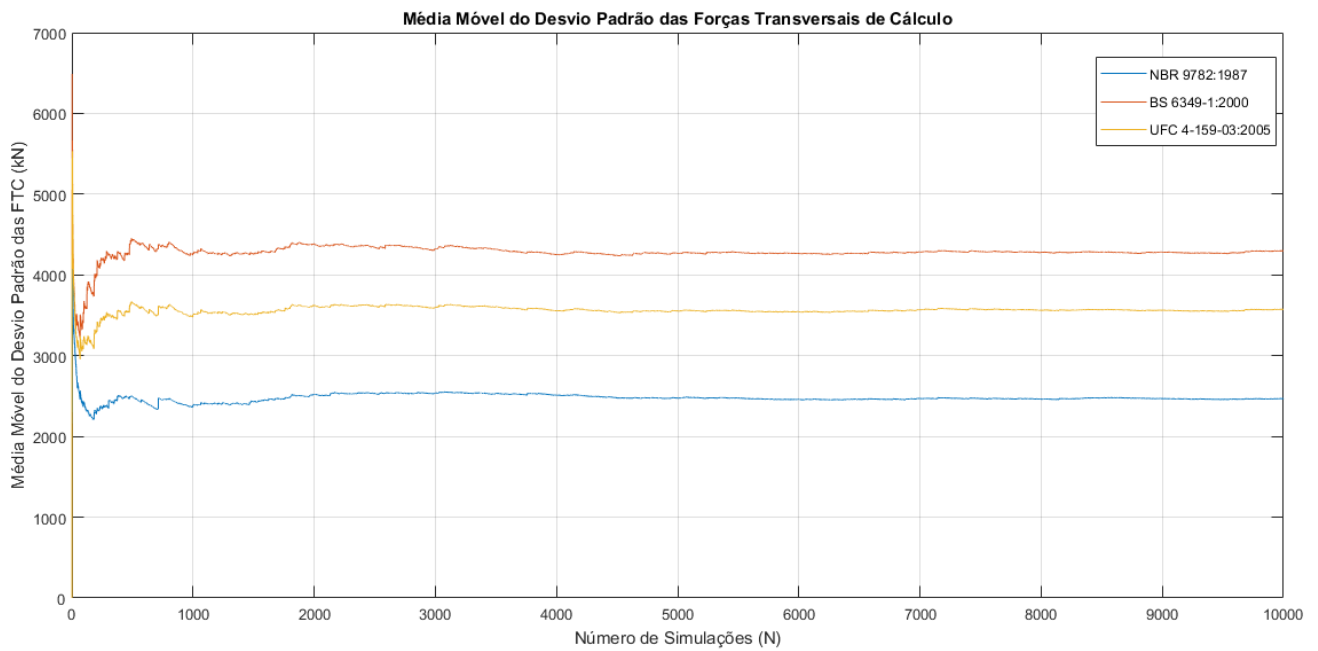


Figura 6.7 - Média móvel do desvio padrão das forças transversais de cálculo (Fonte: Autor).

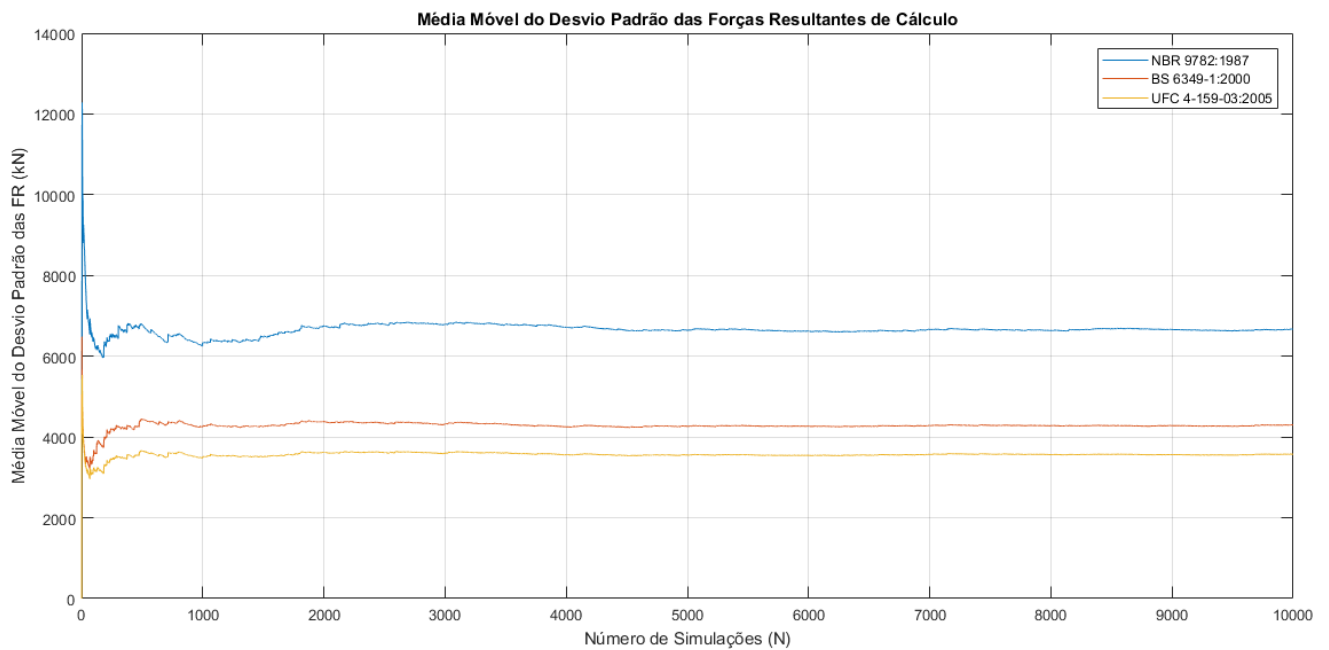


Figura 6.8 - Média móvel do desvio padrão das forças resultantes de cálculo (Fonte: Autor).

Verifica-se que o número de simulações adotada é adequado tanto para as médias móveis, quanto para as médias móveis do desvio padrão, onde a discrepância entre as normativas segue o mesmo padrão das probabilidades acumuladas de ocorrência, conforme será visto em seguida.

Para as diversas normativas analisadas, aquelas que apresentam maiores valores possuem uma variação mais acentuada, necessitando de um número maior de simulações para estabilizarem e convergirem para a média e o desvio padrão.

Verificado a aplicabilidade do Método de Monte Carlo, demonstra-se por meio das tabelas 6.1 e 6.2 o resumo dos resultados dos parâmetros aleatórios de entrada e saída, expondo a média, desvio-padrão e distribuições de probabilidade para cada uma das variáveis.

Tabela 6.1 - Parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias de entrada (Fonte: Autor).

Variáveis aleatórias	Parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias		
	μ_x	σ_x	Distribuição de Probabilidade
Porte da Embarcação (DWT)	74902	31423	Uniforme
Velocidade da corrente (V_c)	1,00	0,55	Normal
Velocidade do vento (V_w)	9,1966	4,2849	Eventos Extremos Gumbel Tipo I

Tabela 6.2 - Parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias saída (Fonte: Autor).

Variáveis aleatórias	Parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias		
	μ_x	σ_x	Distribuição de Probabilidade
Esforço Longitudinal de cálculo (NBR 9782:1987)	5808,40	6247,65	Wakeby
Esforço Transversal de cálculo (NBR 9782:1987)	2677,59	2468,65	Wakeby
Esforço Longitudinal de cálculo (BS 6349-1:2000)	133,36	99,41	Pearson 6
Esforço Transversal de cálculo (BS 6349-1:2000)	4579,10	4297,89	Wakeby
Esforço Longitudinal de cálculo (UFC 4-159-03:2005)	188,53	143,24	Log-Pearson 3
Esforço Transversal de cálculo (UFC 4-159-03:2005)	4054,95	3573,66	Wakeby

Vale salientar que os demais parâmetros dependentes do porte da embarcação variam, porém, estes são obtidos em função do porte da embarcação, portanto, não estão demonstrados na tabela 6.1,

mesmo que estes possuam “N” valores gerados. O supra descrito também ocorre para os esforços finais resultantes, estes não foram expostos na tabela 6.2, pois são obtidos por meio dos esforços longitudinais e transversais conforme equação 67.

Os gráficos das figuras 6.9 a 6.11 expõem a relação entre os esforços de cálculo obtidos através da aplicação do Método de Monte Carlo, segundo as direções transversais, longitudinais e resultantes, para as normas Brasileira (NBR 9782:1987), Britânica (BS 6349-1:2000) e Americana (UFC 4-159-03:2005) com os respectivos pontos de projetos.

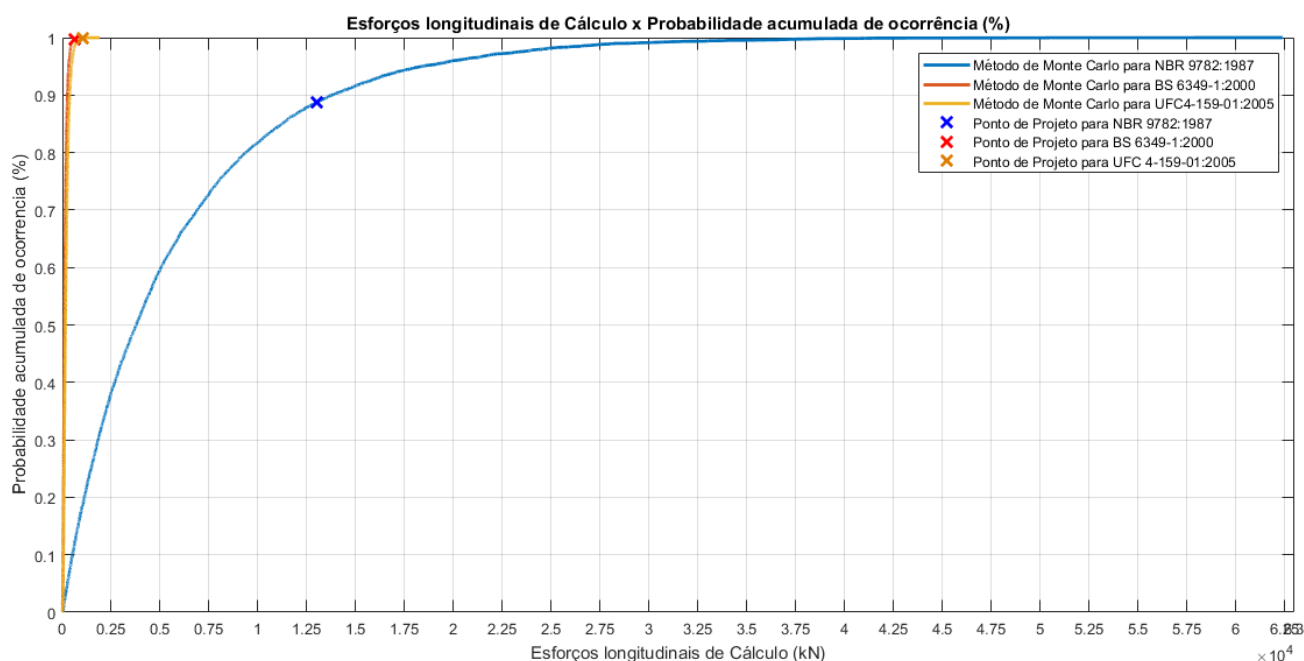


Figura 6.9 - Probabilidade acumulada de ocorrência dos esforços longitudinais de cálculo (Fonte: Autor).

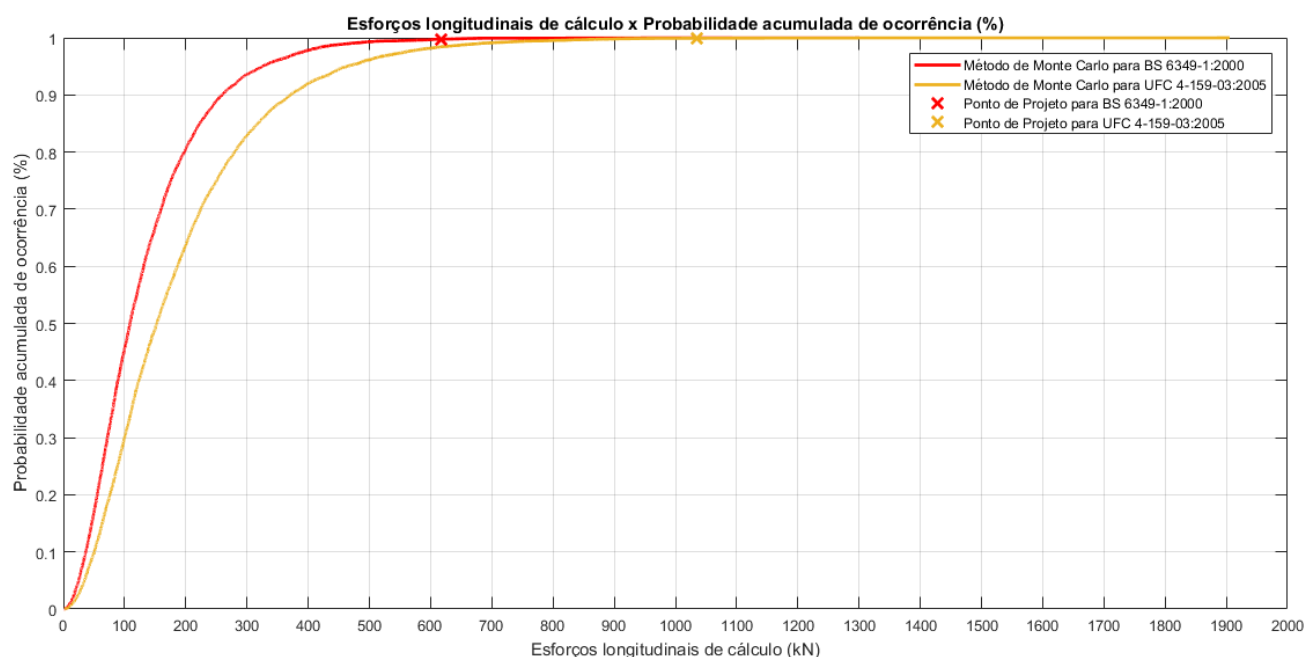


Figura 6.10 - Probabilidade acumulada de ocorrência dos esforços longitudinais de cálculo somente para as normativas estrangeiras (Fonte: Autor).

Ao analisar os esforços longitudinais de cálculo, obtidos segundo o Método de Monte Carlo, verifica-se que os máximos valores obtidos por meio do referido método são aqueles apresentados pela NBR 9782:1987, seguidos pela UFC 4-159-03:2005, e por último a BS 6349-1:2000, com valores iguais a 62391,21 kN, 1905,24 kN e 1299,62 kN respectivamente.

Os valores dos pontos de projeto para os esforços longitudinais são iguais a 12995,2 kN, 1034,86 kN e 617,19 kN para as normas NBR 9782:1987, UFC 4-159-03:2003 e BS 6349-1:2000 respectivamente.

As probabilidades acumuladas de ocorrência dos pontos de projeto (confiabilidade) expostos nas figuras 6.9 e 6.10, perante os valores apresentados pelo Método de Monte Carlo para as normas NBR 9782:1987, BS 6349-1:2000 e UFC 4-159-03:2005, valem respectivamente 88,6770%, 99,7525% e 99,9264%, ou seja, as probabilidades de falha, que correspondem ao complemento dos valores da confiabilidade (vide equação 51), valem 13,3230%, 0,2475% e 0,0736% respectivamente.

Chama a atenção na figura 6.9, a discrepância entre a ordem de grandeza dos valores apresentados pela norma Brasileira perante as estrangeiras, por este motivo, foi exposta a figura 6.10 que demonstra a variação somente entre as normas estrangeiras.

Um dos fatores que explica a discrepância entre os valores, deve-se ao fato da norma Brasileira possuir somente uma formulação para a obtenção dos esforços devido a corrente (vide equação 2), e como o ângulo de incidência em relação ao eixo longitudinal da embarcação adotado foi de 20°, a

componente longitudinal será consideravelmente maior que a transversal. Outro fator que explica o supracitado, deve-se a falta de coeficientes presentes na norma Brasileira, e a presença de diversos coeficientes nas normativas estrangeiras. No caso das normas estrangeiras os valores dos coeficientes em muito dos casos, tendendo a zero, agravando a discrepância vista na figura 6.9.

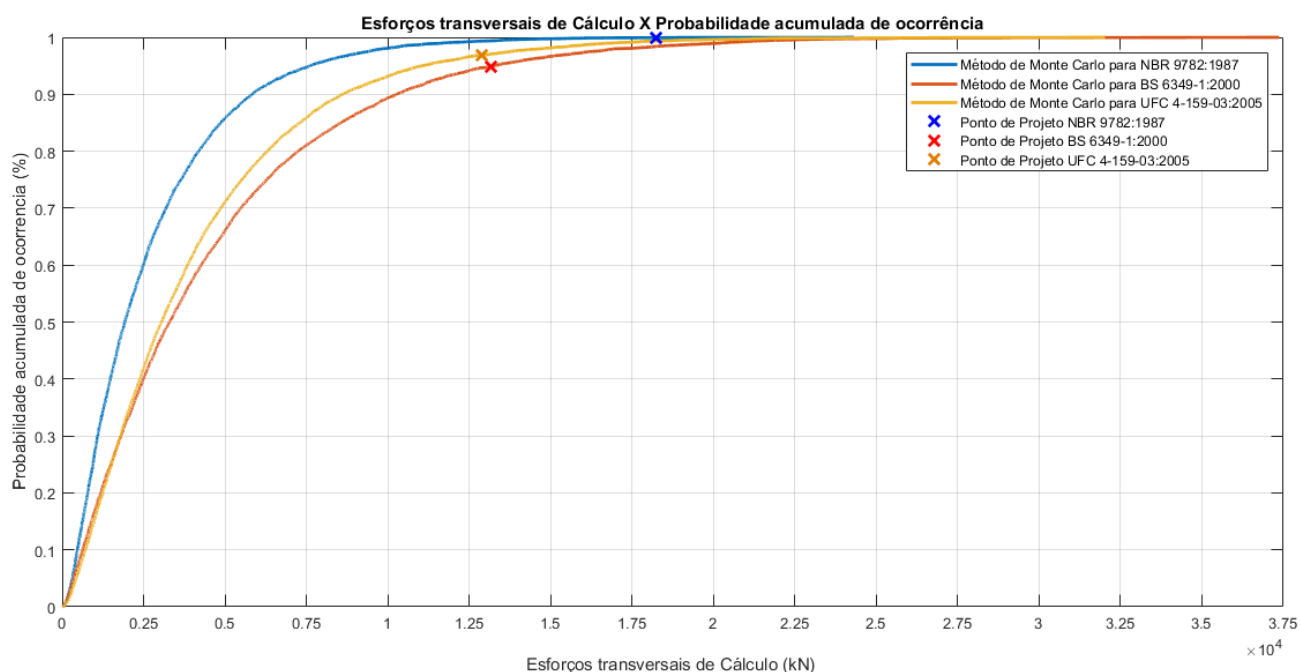


Figura 6.11 - Probabilidade acumulada de ocorrência dos esforços transversais de cálculo
(Fonte: Autor)

Para os esforços transversais de cálculo (figura 6.11), os máximos valores obtidos por meio do método de Monte Carlo são aqueles apresentados pela norma BS 6349-1:2000, seguida da UFC 4-159-03:2005 e, por fim, da NBR 9782:1987, com valores iguais a 37367,69 kN, 32025,88 kN e 24316,72kN respectivamente.

Os valores dos pontos de projeto para os esforços transversais são iguais a 18235,02 kN, 13151,01 kN e 12873,26 kN para as normas NBR 9782:1987, BS 6349-1:2000 e UFC 4-159-03:2003 respectivamente.

A confiabilidade medida perante o cálculo dos pontos de projeto para a NBR 9782:1987, BS 6349-1:2000 e UFC 4-159-03:2005 apresentam valores iguais a 99,9369%, 94,8900%, 96,8383% respectivamente, portanto, as probabilidades de falha possuem valores iguais a 0,0631%, 5,11% e 3,1617% para a mesma ordem da confiabilidade.

Analisando os valores apresentados na figura 6.11, os esforços perante as normativas possuem formatos e valores mais próximos quando comparados com a figura 6.9, onde no geral, a norma

Britânica possui uma probabilidade de falha maior, seguida pela norma Americana e Brasileira.

O motivo do dito acima, deve-se ao fato da componente do esforço transversal devido a corrente da NBR 9782:1987, possuir um valor consideravelmente menor do que comparado com a componente longitudinal, pelo motivo de a NBR 9272:1987 possuir somente uma formulação para a obtenção do esforço devido a corrente, tal fato demonstra uma grande variabilidade da norma brasileira para mudanças de ângulo de incidência das correntes.

Outro motivo da semelhança entre os esforços transversais diz respeito ao fato de as normativas estrangeiras apresentarem nas equações valores de coeficientes que majoram os esforços obtidos para a direção transversal no presente estudo de caso.

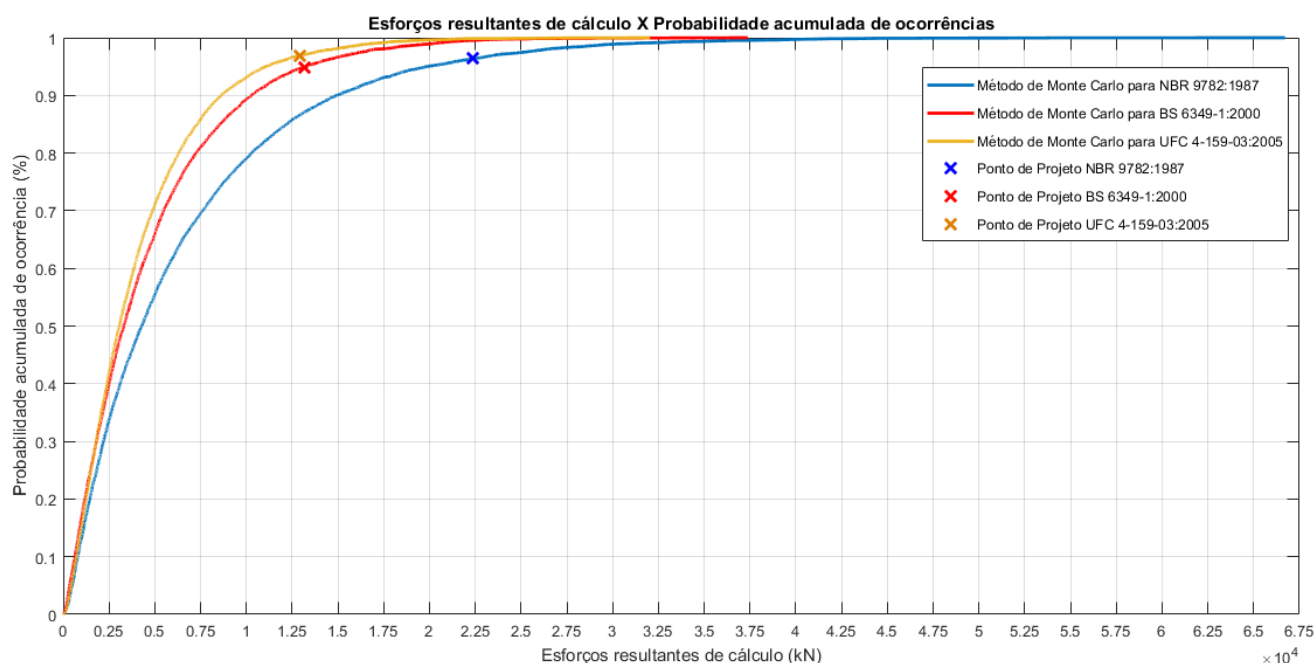


Figura 6.12 - Probabilidade acumulada de ocorrência para os esforços resultantes de cálculo (Fonte: Autor).

A figura 6.12 apresenta os valores resultantes das componentes transversais e longitudinais, onde os valores máximos apresentados por meio do Método de Monte Carlo são os das normas NBR 9782:1987, seguido pela BS 6349-1:2000 e UFC 4-159-03:2005, com valores iguais a 66711,60 kN, 37373,53 kN e 32039,39 kN.

Os valores dos pontos de projeto para os esforços resultantes são iguais a 22391,77 kN, 13167,48 kN e 12914,79 kN para as normas NBR 9782:1987, BS 6349-1:2000 e UFC 4-159-03:2003 respectivamente.

A confiabilidade dos esforços resultantes para as normas NBR 9782:1987, BS 6349-1:2000 e

UFC 4-159-03:2005, valem 96,3708%, 94,9032% e 96,8670% respectivamente, portanto, as probabilidades de falha, seguindo a mesma ordem valem 3,6292%, 5,0968% e 3,1330%.

Por fim, verifica-se que a probabilidade de falha da norma Brasileira, obtida através do Método de Monte Carlo, para valores menores do que cerca de $3,75 \times 10^4$ kN, é a maior dentre as normativas estudadas, enquanto as normas estrangeiras apresentam valores muito próximos, tendo a norma Britânica uma probabilidade de falha ligeiramente superior a norma Americana.

7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível concluir no presente estudo, em relação ao grau de dificuldade de obtenção dos esforços de amarração perante as normativas estudadas que, a NBR 9782:1987 apresenta formulações simples para a obtenção dos esforços resultantes, enquanto a BS 6349-1:2000, apesar de também apresentar formulações simples, considera mais variáveis nas suas formulações, além de possuir gráficos para a obtenção de seus coeficientes, que dependendo do caso, podem majorar ou minorar os valores resultantes.

A norma mais complexa é a UFC 4-159-03:2005, que necessita de um nível de informações muito maior sobre as embarcações do que as demais normativas, isto é, informações que em muitos dos casos são difíceis de encontrar, porém, demonstram uma precisão maior nos esforços obtidos devido ao menor nível de insegurança.

Em relação aos resultados obtidos, verifica-se que as normas estrangeiras, tanto para os esforços transversais, longitudinais, e consequentemente resultantes, apresentam valores próximos, tanto na questão do máximo valor obtido de acordo com a aplicação do método de Monte Carlo, quanto em relação a confiabilidade e probabilidade de falha obtida por meio do cálculo dos pontos de projeto.

A norma Brasileira, apresenta uma grande variabilidade em relação as direções longitudinais, transversais e devido aos esforços resultantes, o que demonstra que as formulações da referida norma são mais sensíveis a variações, pois a discrepância, conforme já citado, advém da decomposição do esforço devido a corrente, enquanto as normas estrangeiras possuem formulações para cada uma das direções, e não necessitam desta decomposição.

Em relação a confiabilidade obtida através do cálculo dos pontos de projeto, verifica-se que para os esforços transversais, a norma Brasileira apresenta uma probabilidade de falha relativamente alta, porém na longitudinal é quase nula, enquanto as normativas estrangeiras apresentam a mesma ordem de grandeza de P_f em ambos os casos, o que leva ao fim, a uma confiabilidade similar na obtenção dos esforços resultantes para ambas as metodologias de cálculo estrangeiras (Britânica e Americana), o que é assegurado devido aos valores de projeto calculados para as velocidades do vento e da corrente para o período de retorno de 50 anos.

Ao analisar o gráfico que expõe os esforços resultantes de cálculo, o valor do ponto de projeto perante a norma Brasileira é o maior, seguido da norma Britânica e Americana, o que levaria a princípio, a escolha da norma Brasileira para o dimensionamento dos sistemas de amarração.

Porém, como os valores das normas estrangeiras são próximos e distantes dos valores

apresentados pela norma Brasileira, levanta-se a suspeita de que a norma Brasileira possa gerar um superdimensionamento dos sistemas de amarração.

A realização de estudos baseados em valores reais de esforços sobre os cabos de amarração, e análises por meio de modelos físicos reduzidos, são sugestões para trabalhos futuros, que podem averiguar se a suspeita citada no parágrafo anterior é válida ou não.

Por fim, na figura que demonstram os esforços resultantes de cálculo tanto para o ponto de projeto quanto para o método de Monte Carlo, verifica-se que para o mesmo valor de esforço resultante, menor que $3,75 \times 10^4$ kN, a probabilidade de falha da norma Brasileira é a maior, seguida pela Britânica, e Americana.

Conclui-se em relação a confiabilidade obtida através da comparação entre aos valores obtidos por meio do Método de Monte Carlo e pontos de projetos que, na faixa de valores que as três normativas estão presentes, para o valor de esforço resultante, a norma Americana apresenta a menor probabilidade de falha, logo, é a mais confiável.

Já a conclusão analisando somente os valores determinísticos dos pontos de projeto é de que a norma Brasileira apresenta o maior valor, porém, não pode ser utilizado pois a NBR 9782:1987 foi cancelada, restando as duas normas estrangeiras, dentre elas, a norma Britânica apresenta um valor de ponto de projeto ligeiramente maior que o da americana, e este deveria ser utilizado para o dimensionamento do sistema de amarração.

8. REFERÊNCIAS

ANG, A. H-S; TANG, W.H. **Probability Concepts in Engineering. Emphasis on Applications to Civil and Environmental Engineering**. 2ed. New York: Wiley, 2007.

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). **NBR 9782: Ações em Estruturas portuárias, marítimas ou fluviais - Procedimento**. Rio de Janeiro, 1987 (NORMA CANCELADA EM 04/05/2015).

ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS (ABNT). **NBR 6123: Forças Devido ao Vento em edificações**. Rio de Janeiro, 1988.

AYYUB, B.M.; MCCUEN, R.H.. Simulation-based reliability methods. In: SUNDARARAJAN,C. (Ed.). **Probabilistic structural mechanics handbook; theory and industrial applications**. New York, Chapman & Hall, 1995. Cap 4,p. 53-59

BIANCO, O. de P. L., 2015. **Critérios de projeto em obras portuárias: uma comparação entre normas brasileira e estrangeiras**. Projeto de Monografia apresentado ao Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Civil.

BECK, A. T., CORRÊA, M.R.S. **New Design Chart for Basic Wind Speeds in Brazil**. *Latin American Journal of Solids and Structures*. v. 10, p. 707-723, 2012.

BRITISH STANDARD INSTITUTE (BSI). **BS 6349-1 Maritime structures - Part 1: Code of practice for general criteria**. London, 2000.

CHAME, E. D. MARIA, 2014. **Projeto conceitual otimizado de embarcação utilizando fórmulas empíricas**. Projeto de Monografia apresentado a Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisistos necessários à obtenção do título de Engenheiro Naval.

COMIN, CRISTIANO, 2015. **Estruturas portuárias: distribuição de esforços na infraestrutura devidos à amarração e atracação de embarcações**. Projeto de Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Bélem, 2015.

COSTA Ricardo L., MÖLLER Osmar O. **Estudo da estrutura e da variabilidade das correntes na área da plataforma interna ao largo de Rio Grande (RS, Brasil), no sudoeste do Atlântico Sul, durante a primavera-verão de 2006-2007**.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. Ed. Thomson, 2006.

GAYTHWAITE, JOHN. **Mooring of ships to piers and wharves**. Reston, Virginia, American Society of Civil Engineers and Coast, Oceans, Ports and Rivers Institute, 2014.

GRANT, L.H.; MIRZA, S.A.; MacGREGOR, J.G. Monte Carlo study of strenght of concrete columns. **ACI Journal**, v.75, p. 348-359, Aug. 1978.

HINES, W. WILLIAM, MONTGOMERY, C. DOUGLAS, GOLDSMAN, M. DAVID, BORROE, M. CONNIER. **Probabilidade e estatística na engenharia**. 2ed, 2006, Rio de Janeiro, LTC.

International Conference on Load Line, (Load Line 66) - London – IMO, 1966.

MACHADO, E. R. (2000). **Avaliação da confiabilidade de estruturas em concreto armado**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte – MG.

MAHADEVAN, Sankaran, HALDAR, Achintya. **Probability, Reability and Statistical Methods in Enginnering Design**. First edition, 2000, New York, John Wiley & Sons.

MAPA, S. L. DANILO, 2016. **Confiabilidade estrutural de pórticos metálicos planos**. Projeto de dissertação apresentado ao Programa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos para a obtenção de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Construção Metálica.

MASON, J. **Obras Portuárias**. Rio de Janeiro: Campus, 1981.

MONTGOMERY, C. DOUGLAS, RUNGER, C. GEORGE. **ESTATÍSTICA APLICADA E PROBABILIDADE PARA ENGENHEIROS**. 4ed, 2009, Rio de Janeiro, LTC.

MONTGOMERY, D. C.; HINES, W. W.; GOLDSMAN, D. M.; BORROR, C. M.; **Probabilidade e Estatística na Engenharia**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

OIL COMPANIES INTERNATIONAL MARINE FORUM (OCIMF). **Anchoring Systems and Procedure**. 2ed, 2010."

PARSONS, Michael G.. **PARAMETRIC DESIGN**. In: LAMB, Thomas.. **Ship design and construction**. Michigan, 2003. Cap. 11. p. 1-48

PIANC - **Permanent International Association of Navigation Congresses. Guidelines for the Design of Fender Systems**: 2002. Report of Working Group 33 of the Maritime Navigation Commission, 2002.

RAMOS, P.A., 2016. **Análise Probabilística dos esforços nas fundações de um cais de Contêineres**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande.

REAL, M. V., 2000. **Análise Probabilística de Estruturas de Concreto Armado, Sob Estado Plano de Tensão, Através do Método dos Elementos Finitos**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

SHERER, CLÁUDIO. **Métodos computacionais da física**, 2 edição, São Paulo, Editora Livraria da Física, 2010.

THORESEN, C. A. **Port's Design Handbook**. 3ed. London: ICE Publishing, 2014

TSINKER, G. P. **Port Engineering – Planning, construction, maintenance and security**. New

Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

(2005), UFC 4-159-03, Change 2, com última alteração em 23 de junho de 2016, **Design: Moorings**. Washington D.C., United Facilities Criteria.

WALPOLE, R. E.; MYERS, R. H.; MYERS, S. L.; YE, K. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. Ed. Pearson Prentice Hall, 2009

WATSON, David G. M.. **Practical Ship Design**. Oxford: Elsevier, 1998. 556 p.