

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

ANÁLISE PROBABILÍSTICA DO ESFORÇO DE ATRACAÇÃO EM ESTRUTURAS
PORTUÁRIAS

por

Felipe da Silva Finato

Dissertação para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Oceânica

Rio Grande, agosto de 2018.

ANÁLISE PROBABILÍSTICA DO ESFORÇO DE ATRACAÇÃO EM ESTRUTURAS PORTUÁRIAS

Por

Felipe da Silva Finato

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, 30, agosto de 2018

AGRADECIMENTOS

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

À Coordenação do PPGeo, pela dedicação dispensada a melhoria do programa.

Aos Professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica (PPGeo), pelos conhecimentos transmitidos durante a realização das disciplinas.

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.

Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES), pelo auxílio financeiro, e a Universidade Federal do Rio Grande (FURG).

RESUMO

O objetivo deste trabalho consiste na comparação dos esforços de atracação segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira Registrada extinta 9782:1987 - Ações em Estruturas Portuárias, Marítimas ou Fluviais, Normatização Britânica 6349-4:2014 Parte 4: Código de Prática para projeto de sistemas de defesa e amarração (British Standard 6349-4:2014 Part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems), com última correção realizada no dia 30 de Junho de 2014, onde o Reino Unido é o país de origem, Normatização Espanhola ROM 0.2-90 – Ações na concepção de obras marítimas e portuárias (actions in the design of maritime and harbour works), com sua última atualização feita em maio de 1994 e por fim, a Norma Alemã EUA 2012 – Recomendações do “comitê para estruturas portuárias e hidrovias” (Recommendations of the "committe for waterfront structures harbours and waterways"), com sua última atualização em outubro de 2012. 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 a energia de atracação 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 uma variação muito pequena perante as normativas estudadas, onde na análise das energias obtidas a menor confiabilidade, obtido por meio do Método de Monte Carlo, é pela norma brasileira (NBR 9782,1987), contendo uma probabilidade de falha maior que as demais, e a melhor confiabilidade se dá através da norma Alemã, com menor probabilidade de falha, segundo o método de Monte Carlo, se comparado com os pontos de projeto encontrados.

Palavras-chaves: Método Monte Carlo, Atracação, NBR 9782:1987, BS 6349-4:2014, ROM 0.2-90 e EUA 2012.

ABSTRACT

The objective of this work is to compare the results obtained between the berthing energy according to the Brazilian Association of Technical Standards, Registered Brazilian Standard extinct 9782: 1987 - Actions in Port, Maritime or Fluvial Structures, British Standardization 6349-4: 2014 Part 4: Code of Practice for design of fendering and mooring systems, with the last correction on June 30, 2014, where the United Kingdom is the country of origin, Spanish Norm ROM 0.2-90 - actions in the design of maritime and harbour Works, with its last update made in May 1994, and, finally, the German Norm USA 2012 - Recommendations of the "committee for port structures and waterways", with its last update in October 2012. 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 step consists in applying the Monte Carlo Method to all the regulations in order to obtain the computing berthing energy, analyzing by means of statistical parameters the results obtained. The second step consists of verifying the reliability of the regulations against the calculated project values, analyzing the probability of the calculated values (denoted by design points) being exceeded. The results obtained demonstrate a very small variation in relation to the standards studied, where in the analysis of the lowest reliability obtained by the Monte Carlo method, it is Brazilian standard (NBR 9782,1987), which contains a greater probability of failure than the others, and the best reliability is given by the German standard, with lower probability of failure, according to the Monte Carlo method, when compared to the design points found.

Keywords: Monte Carlo Method, Berthing, NBR 9782:1987, BS 6349-4:2014, ROM 0.2-90 e EUA 2012.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa e motivação	16
1.2	Estado da arte	18
1.3	Objetivos	20
1.3.1	Objetivo Geral.....	20
1.3.2	Objetivos Específicos	20
1.4	Organização do texto.....	20
1.5	Normas de projeto	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1	Portos e estruturas portuárias	22
2.1.1	Defensas	23
2.1.2	Cais.....	23
2.1.3	Molhes	23
2.2	Ações	24
2.2.1	Ondas, Correntes e Ventos.....	25
2.2.2	Atracação	25
2.2.3	Amarração	27
2.2.4	Cargas Estáticas	28
2.3	Roteiro de Cálculo.....	28
2.4	NBR 9782: 1987.....	29
2.4.1	Massa deslocada pelo navio (M1)	29
2.4.2	Massa de água adicional (M2)	29
2.4.3	Velocidade de aproximação do navio (V).....	30
2.4.4	Coeficiente de excentricidade	30
2.4.5	Coeficiente de rigidez (Cr)	31
2.4.6	Forças perpendiculares à linha de atracação	31
2.4.7	Forças paralelas à linha de atracação.....	31
2.4.8	Dimensionamento do sistema de defesa	31
2.4.9	Fluxograma para a obtenção da energia de atracação	32
2.5	BS 6349 – 4:2014.....	33

2.5.1	Velocidade de atracação	35
2.5.2	Coeficiente de massa hidrodinâmica (Cm)	36
2.5.3	Coeficiente de excentricidade (Ce)	36
2.5.4	Coeficiente de amortecimento do cais (Cc)	38
2.5.5	Coeficiente de configuração do cais (Cs)	38
2.5.6	Fluxograma para a obtenção da energia de atracação (BS 6349 – 4:2014)	39
2.6	ROM 0.2-90.....	39
	Energia desenvolvida pelo navio durante a atracação.....	40
2.6.1	Deslocamento de água do navio característico.....	40
2.6.2	Velocidade de aproximação	41
	Energia absorvida pelo sistema (Ef)	42
2.6.3	Coeficiente de geometria do navio (Cg).....	43
2.6.4	Coeficiente de excentricidade (Ce)	43
2.6.5	Coeficiente de amortecimento de atracação (Cs)	44
2.6.6	Coeficiente de configuração do cais (Cc).....	44
2.6.7	Fluxograma para a obtenção da energia de atracação	45
2.7	EUA 2012.....	45
2.7.1	Coeficiente de excentricidade (Ce)	46
2.7.2	Coeficiente de massa hidrodinâmica (Cm)	46
2.7.3	Coeficiente de atenuação pela estrutura (Cc).....	47
2.7.4	Velocidade de atracação (V).....	47
2.7.5	Fluxograma para a obtenção da energia de atracação	47
2.8	Teoria das probabilidades e confiabilidade estrutural	48
2.8.1	Variáveis aleatórias e seus principais parâmetros	48
2.8.2	Distribuições de Probabilidade e geração de números aleatórios.....	52
2.8.3	Determinação de distribuições e parâmetros de dados observados.....	52
2.8.4	Confiabilidade na engenharia.....	55
2.8.5	Análise probabilística de estruturas e o Método de Monte Carlo	57
3	METODOLOGIA	60
3.1	Estudo de Caso	60
3.2	Ações e parâmetros estatísticos adotados.....	61
3.3	Probabilidade do porte da embarcação.....	61
3.4	Parâmetros relacionados as embarcações (NBR 9782 e BS 6349)	63
3.5	Parâmetros relacionados as embarcações ROM 0.2-90	66

3.6	Parâmetros relacionados as embarcações EUA 2012.....	68
3.7	Velocidade de aproximação	71
3.7.1	Norma britânica – BS 6349-4:2014.....	71
3.7.2	Norma Brasileira – NBR 9782:1987	72
3.7.3	Norma Espanhola – ROM 0.2-90	73
3.7.4	Norma alemã - EUA 2012	73
4	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO	74
5	PONTOS DE PROJETO	75
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
7	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	81
8	REFERÊNCIAS	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.1- Danificação na estrutura devido a atracação indevida (Fonte: http://g1.globo.com/pa/santarem-regiao/noticia/2014/02/atracacao-de-balsas-danifica-estrutura-de-orla-em-obidos.html).....	17
Figura 2.1.1- Tipos de estruturas portuárias (Fonte: Adaptado de Mason, 1981).	22
Figura 2.1.2- Tipos de estruturas portuárias (Fonte: Tsinker, 2004).	23
Figura 2.2.1- Principais ações em estruturas acostáveis. (Fonte: Adaptado de Thoresen, 2014).	24
Figura 2.2.2- Os dois tipos básicos de estruturas de atracação (Fonte: Adaptada de Thoresen, 2014).	26
Figura 2.2.3- Tipo de estruturas de atracação (Fonte: Adaptada de Thoresen, 2014).	26
Figura 2.2.4- Graus de liberdade da embarcação (Fonte: Adaptado Gaythwaite, 2014).	27
Figura 2.2.5- Decomposição da velocidade de vento incidente e áreas de exposição aos ventos longitudinais e transversais (Fonte: Mason, 1981).	28
Figura 2.2.6- Áreas de exposição das correntes longitudinais e transversais (Fonte: Mason, 1981).	28
Figura 2.4.1- Fluxograma para obtenção dos esforços de atracação para a NBR 9782:1987 (Fonte: Autor).	33
Figura 2.5.1- Geometria de aproximação do navio (Fonte: Adaptação Catalogo FENTEK).	34
Figura 2.5.2- Velocidade de aproximação em função do tamanho do navio e as condições de navegação (Fonte: Adaptado de Brolsma et al, 1977).	35
Figura 2.5.3- Definição do coeficiente de amortecimento do casco (Fonte: Manual Trelleborg, 2011, p.22).	38
Figura 2.5.4- Ilustração do coeficiente de atracação (Fonte: Manual Trelleborg, 2011, p.22).	39
Figura 2.5.5- Fluxograma para obtenção dos esforços de atracação segundo a BS 6349-4:2014 (Fonte: Autor).	39
Figura 2.6.1- Velocidades de atracação para aproximação perpendicular ao berço com assistência (Fonte: Adaptado ROM 0.2-90).	42
Figura 2.6.2- Velocidades de atracação para aproximação perpendicular ao berço sem assistência (Fonte: Adaptado ROM 0.2-90).	42
Figura 2.6.3- Centro de gravidade em relação ao coeficiente de impacto (Fonte: Adaptado ROM 0.2-90).	43
Figura 2.6.4- Fluxograma para obtenção dos esforços de atracação segundo a ROM 0.2-90 (Fonte: Autor).	45

Figura 2.7.1- Variáveis envolvidas na determinação do coeficiente de massa virtual (Fonte: Fender Team (2014)).	46
Figura 2.7.2- Gráfico para determinação do coeficiente de massa virtual (Fonte: Fender Team (2014)).	47
Figura 2.7.3- Fluxograma para obtenção dos esforços de atracação segundo a EUA 2012 (Fonte: Autor).	48
Figura 2.8.1- Probabilidade representada como área (Fonte: Walpole, et.al, 2009).	50
Figura 2.8.2- Probabilidade diferente para o mesmo comprimento (Fonte: Walpole, et.al, 2009).	50
Figura 2.8.3- Relação entre frequência acumulada teórica e experimental (Fonte: Ang e Tang, 2007).	54
Figura 2.8.4- Fluxograma do Método de Monte Carlo (Fonte: Grant,1978 adaptado por Real,2000).	58
Figura 3.1.1- Imagem do cais do TECON Rio Grande (Fonte: http://www.sacarmazenagem.com.br/guia-de-servicos/maritimo/portos/nacionais/tecon-rio-grande-sa.html).	60
Figura 3.3.1- Embarcações atracadas no Terminal de Containeres TECON (Fonte: http://www.teconline.com.br/Terminais/Forms/NavioProgramacaoConsultar.aspx).	62
Figura 3.3.2- Porte da embarcação. (Fonte: https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:3808776/mmsi:255805854/vessel:MSC%20JEONGMIN).	62
Figura 3.4.1- DWT x M. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).	64
Figura 3.4.2- DWT x Loa. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).	64
Figura 3.4.3- DWT x Lpb. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).	65
Figura 3.4.4- DWT x B (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).	65
Figura 3.4.5- DWT x D. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).	66
Figura 3.5.1- DWT x Deslocamento (Fonte: Autor).	67
Figura 3.5.2- DWT x Loa (Fonte: Autor).	67
Figura 3.5.3- DWT x B (Fonte: Autor).	68
Figura 3.5.4- DWT x D (Fonte: Autor).	68
Figura 3.6.1- DWT x Deslocamento (Fonte: Autor).	69
Figura 3.6.2- DWT x Loa (Fonte: Autor).	70
Figura 3.6.3- DWT x Lbp (Fonte: Autor).	70
Figura 3.6.4- DWT x B (Fonte: Autor).	71
Figura 3.7.1- Velocidade de aproximação - curva "a" (Fonte: Autor).	72

Figura 3.7.2- Velocidade de aproximação - Condições favoráveis (Fonte: Autor).....	73
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.4.1- Valores mínimos para o cálculo da energia de atracação (Fonte: NBR 9782:1987)...	30
Tabela 2.4.2-Material empregado e coeficiente de atrito com aço (Fonte: NBR 9782:1987).....	31
Tabela 2.5.1- Grau de abrigo e as condições de navegação, segundo a norma britânica (Fonte: Adaptado BS 6349-4:2014).	36
Tabela 2.5.2- Coeficientes de bloco típicos (Fonte: BS 6349-4:1994).	37
Tabela 2.6.1- Valores sugeridos para o coeficiente de configuração do berço (Fonte: Adaptado ROM 0.2-90).	45
Tabela 2.8.1- Incertezas (Fonte: Machado, 2000).	56
Tabela 2.8.2- Etapas analíticas e computacionais para aplicação da simulação de Monte Carlo (Fonte: adaptado de AYYUB e MCCUEN, 1995).	59
Tabela 3.3.1- Goodness-of-test para os valores de DWT (Fonte: Autor).	63
Tabela 3.4.1- Parâmetros de navios Porta Contêineres (Fonte: Adaptado Thoresen,2014).	63
Tabela 3.5.1- Parâmetros de navios Porta Contêineres (Fonte: Adaptado ROM 0.2-90).	66
Tabela 3.6.1- Parâmetros de navios Porta Contêineres (Fonte: Adaptado EUA 2012).	69
Tabela 6.1 - Parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias de entrada (Fonte: Autor).....	79
Tabela 6.2 - Parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias de saída (Fonte: Autor).....	79

LISTA DE SIMBOLOS

a, b	Limites inferior e superior da distribuição uniforme de probabilidade
B	Largura da embarcação [m]
C_b	Coeficiente de Bloco
C_c	Coeficiente de configuração do cais
C_e	Coeficiente de excentricidade
C_g	Coeficiente de geometria
C_m	Coeficiente de massa virtual
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_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	Energia de atracação
k_c	Folga da quilha
L_{oa}	Distância total da embarcação
L_{bp}	Distância entre perpendiculares da embarcação
n	Tamanho da Amostra
N'	Número de simulações
P	Probabilidade
P_f	Probabilidade de falha
R	Capacidade do sistema
R_n	Número de Reynolds
S_n	Valores da distribuição de frequência observadas no teste de Komolgorov-Smirnov
V	Velocidade de aproximação perpendicular à costa
X	Variável aleatória
$\bar{x}$	Média amostral
W	Deslocamento

Símbolos Gregos

α	Nível de significância
δ	Coefficiente de variação da variável aleatória X
ν	Viscosidade cinemática
μ_x	Valor médio da variável aleatória X
ρ_w	Massa específica da água
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
BSI	<i>British Standards Institution</i> (Instituto Britânico de Normatização)
EUA	Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways
FURG	Universidade Federal do Rio Grande
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PIANC	<i>Permanent International Association of Navigation Congresses</i>
PPGEO	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
ROM	Recomendaciones para Obras Maritimas

1 INTRODUÇÃO

A relação de todas as cidades litorâneas brasileiras com o mar, onde existem terminais portuários, está intimamente ligada ao papel histórico da economia brasileira com os portos, cuja origem é de aproximadamente 1800, e vem sendo considerado até hoje como um setor que gera riqueza para o País.

Segundo (Matte, Sérgio) a história das nações é escrita com o trabalho de seus filhos, com a riqueza do seu solo e com o movimento dos seus portos.

O porto do Rio grande é o mais importante dos três Portos Organizados do Estado, é o único porto marítimo que atende a navegação de longo curso recebendo navios de grande porte. O porto se interliga a todas regiões do estado do Rio Grande do Sul, utilizando diferentes modais de transporte. As características naturais da região são privilegiadas e foram de suma importância para criação do porto. O porto gaúcho é considerado o segundo mais importante porto do país para o desenvolvimento do comércio internacional brasileiro.

O porto encontra uma dificuldade ainda maior para acompanhar a crescente demanda de navios cada vez maiores, estes navios não necessitam apenas de canais mais profundos, mas sim, de estruturas mais robustas e um sistema cada vez mais tecnológico para atendê-los, por conta disso, o porto está em constante evolução.

Torna-se então necessário aprimorar o conhecimento dos projetos de estruturas portuárias, tendo em vista a grande demanda em crescimento.

1.1 Justificativa e motivação

No passado, os esforços das embarcações eram apenas uma pequena parcela de atuação no cais, devido ao tamanho das embarcações serem bem menores, com isso, não se tinha a necessidade de estudos aprofundados a este respeito. Com o passar do tempo, as embarcações foram aumentando de tamanho, de peso, e com características diferentes entre si. As estruturas de atracação teriam que começar a ser mais robustas, para suportar os esforços de grandes embarcações sem causar riscos ao cais e à estrutura do navio.

Aos poucos, diversos métodos de cálculo foram sendo criados, alguns empíricos, devido a diversos experimentos feitos na época, e algumas formulações foram então desenvolvidas.

Cada vez mais se fez necessário o estudo desses esforços, para garantir a integridade da estrutura que abrigará o navio, a segurança e desenvolver uma estrutura adequada para o tipo de embarcação esperada.

A figura 1.1.1 traz um exemplo do que acontece quando a estrutura não está preparada para receber a embarcação. Muitos danos podem ser causados na estrutura, podendo ocorrer até a ruptura do cais, ruptura da embarcação, além do risco de todos os envolvidos na operação.

Por este motivo, se faz necessário o estudo dos tipos de estruturas de defensas, o tipo de embarcação que irá atracar, e o melhor custo a ser empregado, visto que estas estruturas tem um custo muito grande, e consequentemente sua manutenção e reparos também.



Figura 1.1.1- Danificação na estrutura devido a atracação indevida (Fonte:

<http://g1.globo.com/pa/santarem-regiao/noticia/2014/02/atracacao-de-balsas-danifica-estrutura-de-orla-em-obidos.html>)

Toda a estrutura que virá a ser construída, terá capacidade para uma embarcação de projeto específica, ou seja, será o maior navio que atracará naquele cais. A não observação desta premissa, pode gerar rompimento da estrutura, assim como danificar a embarcação, visto que os parâmetros de cálculo mudam drasticamente dependendo do tipo de embarcação e o tipo de cais adotado. Deve-se realizar análise probabilística afim de verificar os resultados obtidos pelo critério de projeto adotado.

Outra motivação para o presente estudo, se faz pela norma Brasileira em vigência que regulamenta o cálculo para a os esforços de atracação, NBR 9782:1987 – Ações em estruturas portuárias, marítimas ou fluviais, ter sido cancelada em 04/05/2015, devido ao fato do setor não a utilizar por estar ultrapassada, surgindo a necessidade de novos estudos nessa área para levantamento de novas metodologias.

No presente trabalho, além da norma Brasileira, são expostas a norma Britânica BS 6349-4:2014, norma Espanhola ROM 0.2-90 e a norma Alemã EUA 2012, todas com grande tradição na área portuária.

Outra razão do presente trabalho, é a falta de literatura Brasileira em vigência para a obtenção dos esforços de atracação, tendo que se fazer o uso de recomendações de outros países ou uma bibliografia brasileira mais antiga, aqui no Brasil temos apenas o livro de Jayme Mason, nomeado Obras Portuárias, com sua publicação no ano de 1982.

Alguns trabalhos acadêmicos, artigos, dissertações e trabalhos de conclusão de curso, conforme será mostrado no capítulo 1.2, foram encontrados tratando de tal assunto contendo roteiro de cálculo e soluções analíticas e empíricas para encontrar a energia de atracação, contudo, em nenhuma delas foi encontrado um estudo por meio de análises probabilísticas pelo Método de Monte Carlo.

Além disso, não foi encontrado nenhuma referência que compara a energia de atracação para todas as normas acima mencionadas, sendo essa, a primeira análise de comparação para as normas citadas. Julga-se então, de grande valia o presente estudo.

1.2 Estado da arte

Um aprofundamento teórico foi feito sobre o assunto, buscando-se diversas bibliografias, tanto nacionais quanto internacionais, buscaram-se livros, normas, trabalhos acadêmicos e artigos com estudos relativos ao trabalho.

Fanti (2007) contribuiu muito com seu estudo sobre estruturas acostáveis para terminais de contêineres, tendo o autor apresentado um estudo de caso completo de dimensionamento estrutural de um cais.

Thoresen (2014), na 3ª edição do livro *Port designer's handbook*, apresenta uma atualização do trabalho dando particular cobertura no que diz respeito à atracação e amarração de navios de grande porte. O livro apresenta orientações e recomendações para lidar com algumas das principais novas premissas no layout, projeto e construção de estruturas portuárias modernas, além das forças e cargas atuantes.

Leal (2011) apresenta o dimensionamento de um sistema de defensas marítimas e a elaboração de um programa para o cálculo de defensas com aplicação ao terminal portuário Tecondi do porto de Santos.

Versteegt (2013) apresenta um estudo probabilístico sobre as forças de atracação de embarcações em estruturas portuárias, no intuito de obtenção de coeficientes e ponderação para utilização em projetos de instalações marítimas.

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.

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 granéis 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.

Quanto aos livros técnicos mais atuais na área de estruturas acostáveis, encontra-se em Tsinker (2004) e Thoresen (2014), excelentes manuais de projeto, com apresentações detalhada das diversas etapas envolvidas nesse processo. No âmbito nacional encontra-se em Mason (1981) alguns dos primeiros trabalhos sobre o assunto no país, contendo classificações, ações estruturais e procedimentos de projeto, tratando-se, no entanto, de referências que carecem de atualização.

Destaca-se também as referências normativas e documentos mais atuais emitidos por diversas entidades, destacando-se a norma britânica para projeto de estruturas marítimas BSI (2014), norma espanhola ROM 0.2-90, norma alemã EUA 2012. Outras referências muito importantes são encontradas em PIANC (2002), Committee for Waterfront Structures (2005) e U.S. Army Corps of Engineers (2016). Cabe ressaltar que o Brasil teve sua norma de ações em estruturas marítimas, a NBR 9782 (ABNT, 1987), cancelada em 2015, sem previsão de atualização.

1.3 Objetivos

O objetivo principal do trabalho é realizar uma análise probabilística em um cais de contêiner de paramento aberto. Pode-se dividir os objetivos em gerais e específicos, demonstrado a seguir.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é a verificação da influência sofrida pela variabilidade de alguns parâmetros específicos para o cálculo da atracação de forma a obter os gráficos de probabilidade acumulada de ocorrência, a obtenção de parâmetros estatísticos e distribuições de probabilidade para a energia de atracação proveniente das normas estudadas, verificando qual das normativas possui maior, ou menor probabilidade de falha, além da probabilidade de excedência dos valores de projeto comparados com os dados obtidos pelo Método de Monte Carlo.

1.3.2 Objetivos Específicos

O presente trabalho possui os seguintes objetivos específicos:

- a) Análise e entendimento da importância dos esforços de atracação de uma estrutura portuária;
- b) Entendimento das metodologias utilizadas para a energia de atracação;
- c) Adequação das fórmulas e valores que melhor representam a estrutura e as embarcações usuais;
- d) Estudo da variabilidade do resultado;
- e) Comparação dos resultados obtidos com pontos de projeto;

1.4 Organização do texto

Organizado em 8 capítulos, este trabalho apresenta um estudo realizado sobre a análise probabilística da energia de atracação em estruturas portuárias.

Neste capítulo serão apresentadas as considerações iniciais para um melhor entendimento da importância deste cálculo, justificativa e motivação, para a realização do presente trabalho, contendo também os estudos recentes na área, objetivos e pôr fim a organização do texto.

No capítulo 2, é apresentado o referencial teórico, nele encontra-se todas as informações para um bom entendimento prévio do trabalho, uma prévia sobre a classificação e tipos de estruturas portuárias, ações sobre estruturas portuárias, roteiros de cálculo para cada uma das normas apresentadas, teoria das probabilidades e confiabilidade estrutural.

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

No capítulo 4, é apresentada a metodologia para a aplicação do Método de Monte Carlo para as quatro 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, além de algumas comparações em relação as normas.

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

1.5 Normas de projeto

Serão abordadas no presente trabalho quatro normas, sendo elas três estrangeiras e uma brasileira. As normas apresentadas, mostraram os procedimentos para o cálculo da energia de atracação de navios, subsidiado por parâmetros necessários no cálculo, tais como velocidades de atracação, dimensões de navios, coeficientes de segurança, entre outros. As normas são:

A norma brasileira que trata de ações em estruturas portuárias é a NBR 9782:1987 – Ações em Estruturas Portuárias, Marítimas ou Fluviais. Esta norma contém diversos parâmetros de avaliação dos esforços sofridos pela estrutura devido às cargas permanentes, sobrecargas verticais, cargas móveis, meio ambiente, atracação, amarração e terreno. Esta norma está um pouco defasada, consequência de não ter sido feita nenhuma atualização da mesma e já ter sido cancelada.

A BS 6349 é a norma inglesa, elaborada pelo *The British Standards Institution* (Instituto Britânico de Normatização). Esta norma trata sobre projetos de estruturas marítimas e instalações portuárias. A norma trata detalhadamente o processo de projetos portuários, sendo dividida em oito partes. Algumas partes dessa estão passando por revisões e poderão ser subdividida em mais partes.

A norma espanhola que trata das questões portuárias é a ROM 0.2-90 - Recomendaciones para Obras Maritimas (recomendações para obras marítimas), elaborada pelo Ministério de Obras Públicas e Transporte de Madrid.

A norma Alemã EUA 2012 – *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways* (Recomendações do comitê para Portos e Hidrovias) trata de algumas recomendações para o cálculo de diversos esforços em portos, estruturas portuárias e hidrovias.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Portos e estruturas portuárias

Segundo a ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2015), o setor portuário brasileiro é composto pelos Portos Organizados (portos públicos) e arrendamentos localizados em suas áreas, pelas instalações portuárias localizadas fora dos portos organizados, também chamados de Terminais de Uso Privado (TUPs), as Estações de Transbordo de Carga (ETC), as Instalações Públicas de Pequeno Porte (IP4) e as Instalações Portuárias de Turismo (IPT).

A figura 2.1.1 abaixo mostra o conceito expõe um fluxograma dos tipos de estruturas portuárias segundo Mason (1981).

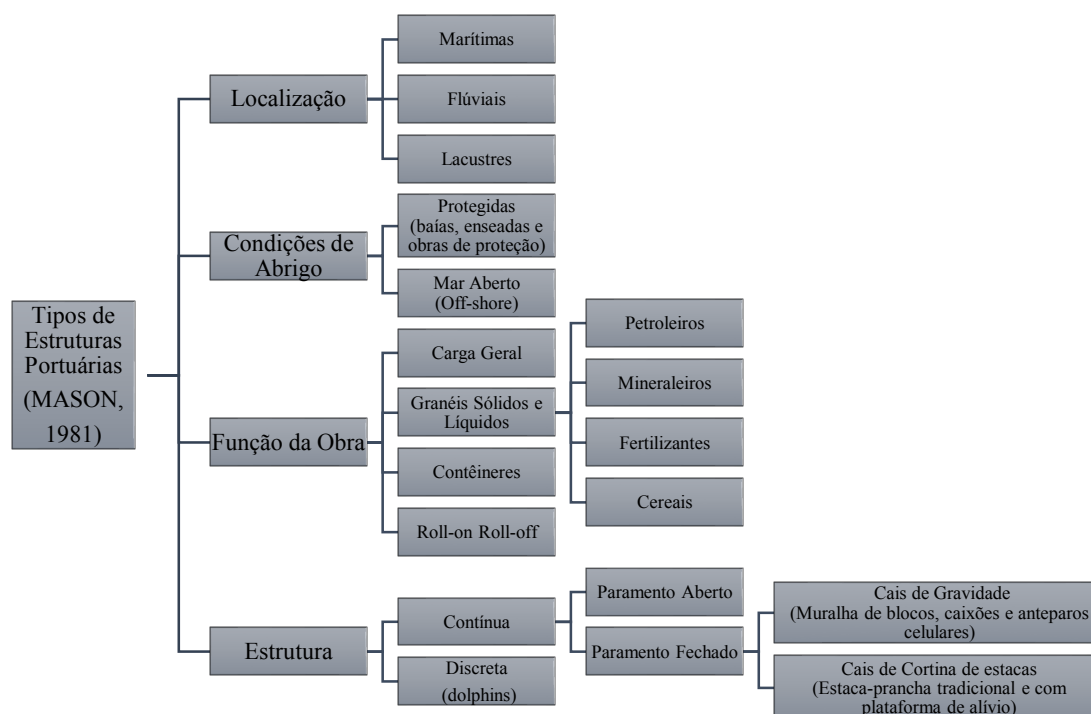


Figura 2.1.1-Tipos de estruturas portuárias (Fonte: Adaptado de Mason, 1981).

Alfredini & Arasaki (2009) expõem que o conceito atual de porto está ligado a cinco aspectos:

- Abrigo: trata das condições que possui o porto de proteção das embarcações aos efeitos de ventos, ondas e correntes, podendo referir-se a condições naturais ou obras de proteção portuária;
- Profundidade e acessibilidade: trata da adequabilidade das condições de altura de lâmina d'água e largura dos canais de acesso às áreas internas dos portos, que devem se adequar às dimensões das embarcações-tipo;
- Área de retroporto: compreende as áreas terrestres onde são movimentadas e armazenadas as cargas;

d) Acesso: trata das condições de acesso que o porto dispõe, podendo ser terrestres, aquaviários ou aeroviários;

e) Impacto ambiental: trata das implicações aos meios físico e biológico no entorno do ambiente portuário.

A figura 2.1, demonstra a classificação dos tipos de estrutura segundo Tsinker (2004).

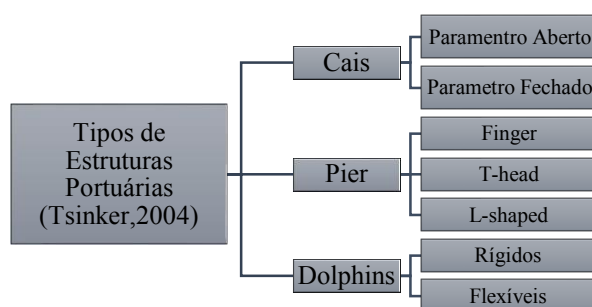


Figura 2.1.2- Tipos de estruturas portuárias (Fonte: Tsinker, 2004).

2.1.1 Defensas

A defesa é a estrutura que protege o cais das embarcações, sem elas seria impossível a acostagem das embarcações, ela protege os esforços de impacto nas atracações.

Segundo ALFREDINI E ARASAKI (2014), os requisitos de um sistema de defesa são:

- Capacidade de absorção da energia transmitida pelas embarcações, mantendo a força na estrutura nos limites capazes de serem suportados.
- Não causar danos ao casco das embarcações. As pressões máximas admissíveis nos cascos dos navios são da ordem de 20 a 40 tf/m².
- Impedir o contato direto dos navios com as partes desprotegidas da obra.
- Boa capacidade de absorção de esforços localizados aplicados sobre pequeno número de elementos protetores, principalmente na manobra de atracação.

2.1.2 Cais

O cais é a plataforma onde os navios são recebidos e fazem a carga e a descarga de seus produtos. O cais deve ser acompanhado de uma retroárea, específica para a movimentação de um determinado tipo de carga.

2.1.3 Molhes

Dependendo da localização e exposição às ondas e correntes, as obras portuárias deverão ser convenientemente protegidas de modo a garantir um grau de tranquilização apropriado para a bacia de atracação. Para atingir esse objetivo, devemos, em obras portuárias em mar aberto ou baías menos

tranquilas e sujeitas à ação de ondas ou correntes de maré, projetar obras de molhes ou diques de proteção, de modo a reduzir o grau de agitação a níveis toleráveis (MASON, 1981).

2.2 Ações

As ações sobre as estruturas supracitadas podem ser classificadas e expostas de acordo com a figura 2.2.1, adaptada de Thoresen (2014) e demonstrada a seguir.

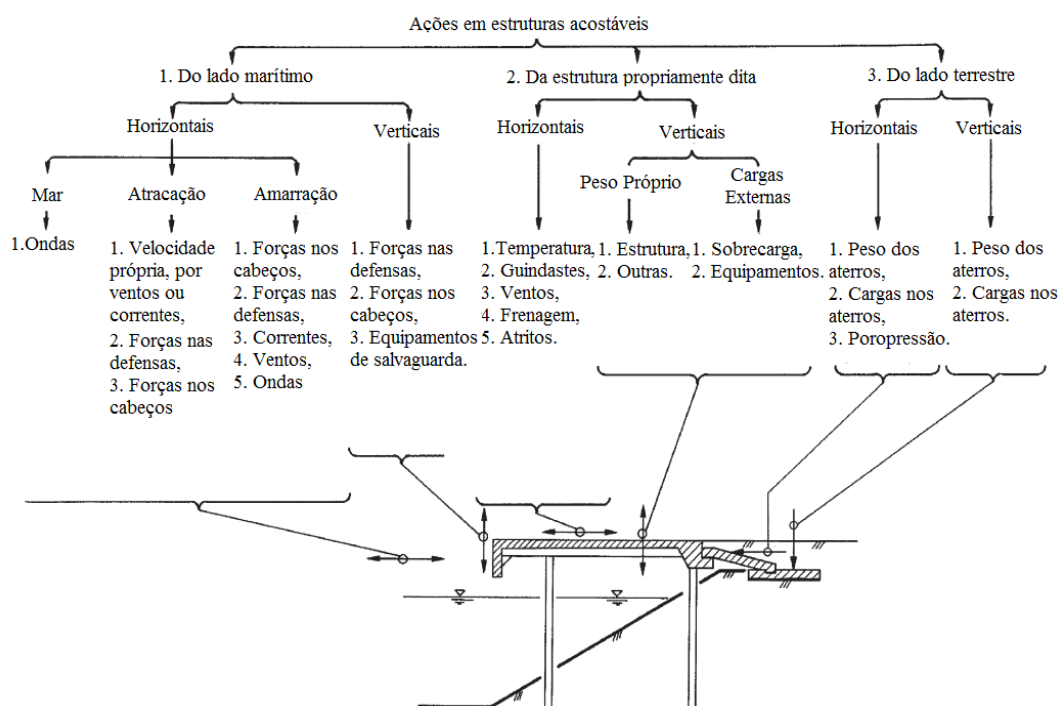


Figura 2.2.1- Principais ações em estruturas acostáveis. (Fonte: Adaptado de Thoresen, 2014).

Os esforços e ações sofridos pela estrutura de um cais podem ser apresentados também de acordo com a NBR 9782 - Ações em estruturas portuárias marítimas ou fluviais da ABNT. Thoresen (2014), propõe três categorias de ações que agem sobre as estruturas de acostagem:

a) Ações provenientes do lado marítimo;

São esforços devidos principalmente à atracação e amarração das embarcações.

As forças de atracação são provenientes da acostagem das embarcações, manobras nas quais os navios se projetam ou são projetados em direção às estruturas, garantindo assim a estabilização dos seus movimentos para a execução da passagem dos cabos de amarração. Consistem em forças de impacto normais às estruturas, podendo ser paralelas em função da fricção do corpo das embarcações contra os elementos de proteção. Essas forças são absorvidas pelas defensas e transmitidas estruturas, que recebem esforços de intensidades dependentes das características dos elementos de proteção.

É muito difícil avaliar e calcular com exatidão esses esforços, uma vez que dependem de uma combinação complexa de fatores como o tamanho das embarcações, velocidade no momento da aproximação, da forma como são executadas as manobras, direções e intensidades de ventos, ondas e correntes marítimas, entre outros.

b) Ações na estrutura propriamente dita;

Consistem em esforços horizontais e verticais, que podem ser aplicados na estrutura por diversos fatores, como: caminhões, guindastes, equipamentos em geral, variações de temperatura, vento, peso próprio, sobrecarga, entre outros.

c) Ações provenientes do lado terrestre.

São as forças horizontais e verticais que os maciços de terra impõem na estrutura, bem como a poro-pressão exercida pela água existente nos maciços.

Os elevados esforços atuantes sobre uma estrutura de acostagem, fazem com que essas obras sejam maciças, de forma a resistirem a essas ações (ALFREDINI E ARASAKI, 2014).

2.2.1 Ondas, Correntes e Ventos

No dimensionamento de estruturas portuárias, é extremamente essencial o cálculo dos esforços devido as forças das ondas e correntes.

Segundo Mason (1981), as correntes, dependendo de suas velocidades, podem produzir efeitos estáticos ou dinâmicos importantes sobre a obra, os quais podem ser determinados pelos princípios que regem a ação do escoamento fluido sobre obstáculos.

2.2.2 Atracação

Segundo NBR 9782 (1987), as ações de atracação são as decorrentes dos impactos das embarcações sobre as estruturas de acostagem.

Segundo Thoresen (2014) os tipos de estruturas de atracação, expostos nas figuras 2.2.2 e 2.2.3 podem ser classificadas em Estruturas de Atracação sólidas (*solid berth structure*), que podem ser subdivididas em:

- Cais 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.

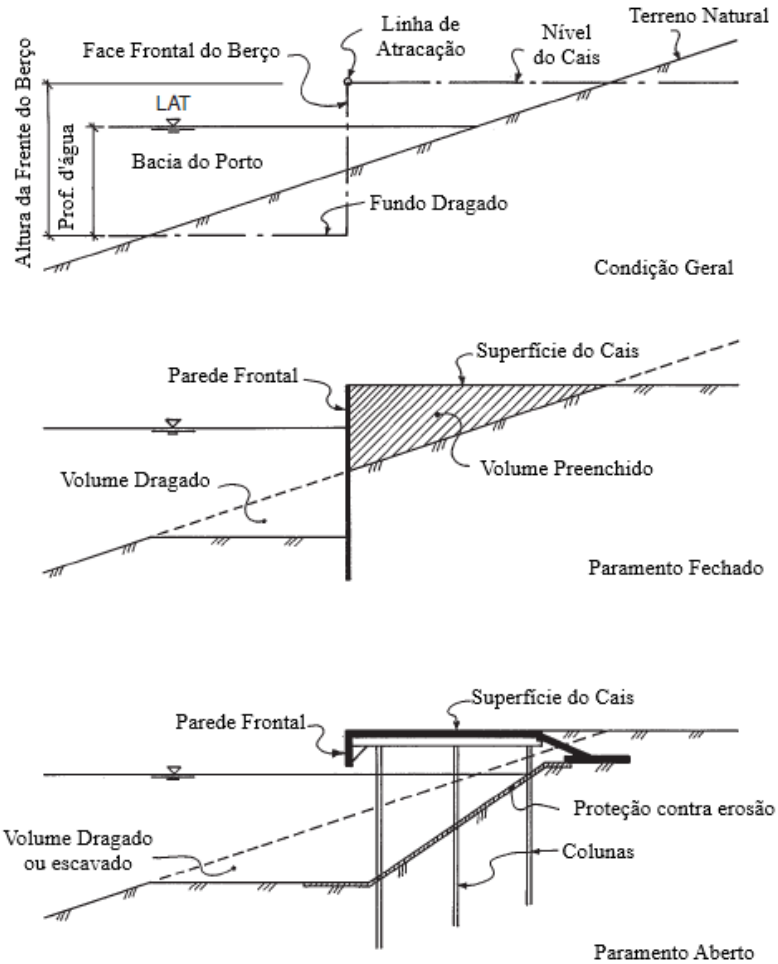


Figura 2.2.2- Os dois tipos básicos de estruturas de atracação (Fonte: Adaptada de Thoresen, 2014).

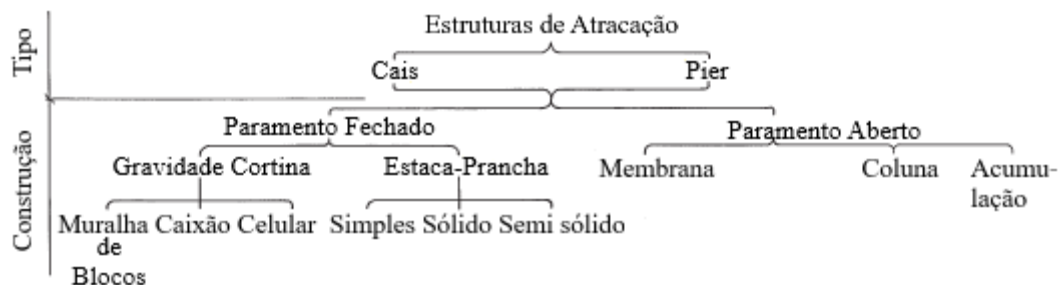


Figura 2.2.3- Tipo de estruturas de atracação (Fonte: Adaptada de Thoresen, 2014).

2.2.3 Amarração

Segundo a NBR 9782 (1987), as ações decorrentes dos esforços pelos cabos de amarração das embarcações nos cabeços do cais são exercidas pelas ações dos ventos e das correntes, sobre os navios atracados.

Para o cálculo dos esforços de amarração, é necessário se definir alguns parâmetros de projeto, como o “navio de projeto” que irá ser utilizado, bem como os valores referentes às velocidades do vento e da corrente.

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 consequentemente controladas pelas velocidades destes fluídos.

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).

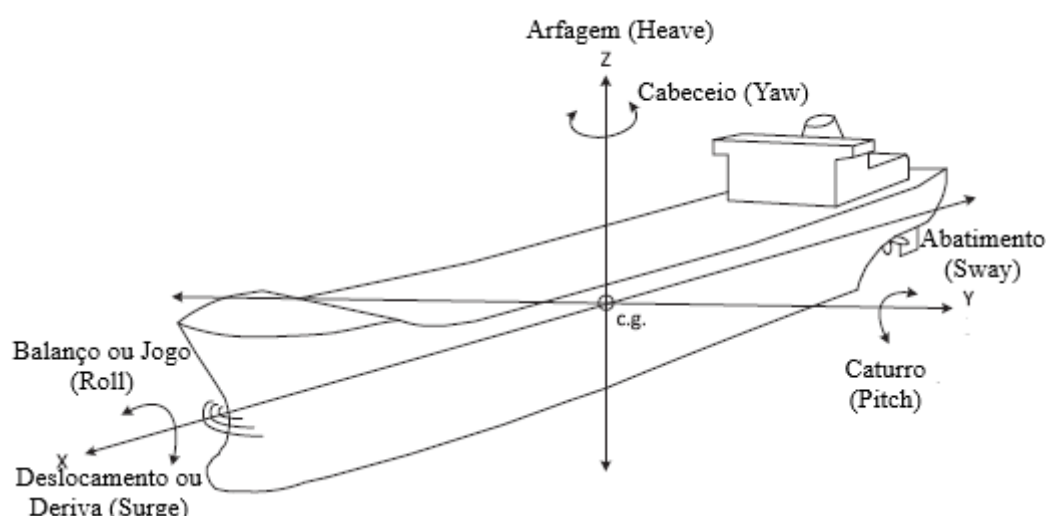


Figura 2.2.4- Graus de liberdade da embarcação (Fonte: Adaptado Gaythwaite, 2014).

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

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 2.2.5 e 2.2.6.

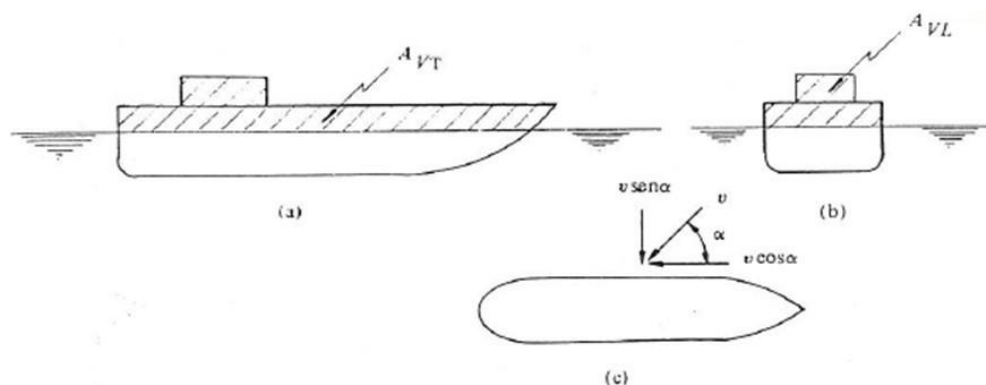


Figura 2.2.5- Decomposição da velocidade de vento incidente e áreas de exposição aos ventos longitudinais e transversais (Fonte: Mason, 1981).

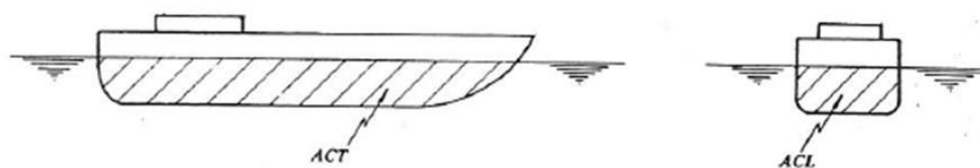


Figura 2.2.6- Áreas de exposição das correntes longitudinais e transversais (Fonte: Mason, 1981).

2.2.4 Cargas Estáticas

Carga Permanente

As cargas permanentes são constituídas pelo peso próprio dos elementos componentes da estrutura portuária e pela massa de todos os elementos construtivos fixos e instalações permanentes, segundo NBR 9782. Podem ser elas o peso próprio, pavimentação, empuxo da terra entre outros.

Sobrecargas, Equipamentos e Temperatura

Segundo VIEGAS (2015), esses esforços não atuam todos em sua maior intensidade e de maneira conjunta sobre a estrutura, de forma a ser necessário analisar para o projeto as diversas combinações de carga, para que cada solicitação seja posta em uma posição capaz de produzir os efeitos mais desfavoráveis para os elementos da estrutura, sem superdimensionar os elementos.

2.3 Roteiro de Cálculo

A seguir serão demonstrados os roteiros de cálculo das normativas (NBR 9782:1987, BS 6349-4, ROM 0.2-90 e EUA 2012) que serão abordadas no presente trabalho, apresentando todas as formulações utilizadas e o significado dos parâmetros envolvidos.

No final de cada normativa, será exposto um fluxograma demonstrando as formulações necessárias, e o procedimento para a obtenção dos esforços.

2.4 NBR 9782: 1987

Durante a atracação, os navios exercem esforços nas estruturas que devem ser avaliados com o auxílio de gráficos do sistema de defensas empregado, que correlacionem a energia absorvida com a deformação imposta e a força transmitida.

Segundo a NBR 9782: 1987, as ações de atracação decorrentes dos impactos das embarcações sobre a estrutura de acostagem é calculada através da energia cinética, determinada pela seguinte expressão:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot (M_1 + M_2) \cdot V^2 \cdot C_e \cdot C_r \quad (1)$$

Onde:

M_1 = Massa deslocada pelo navio (toneladas);

M_2 = Massa de água adicional (toneladas);

V = Velocidade de atracação perpendicular a linha de atracação ($\frac{m}{s}$);

C_e = Coeficiente de excentricidade;

C_r = Coeficiente de rigidez.

2.4.1 Massa deslocada pelo navio (M_1)

A massa M_1 depende do tipo de instalação portuária. Nas instalações do descarregamento de navios a massa a ser considerada é a máxima que o navio pode deslocar. Nas instalações de carregamento, a massa a ser considerada corresponde a situação do navio em lastro ou parcialmente carregado. Admite-se nesta situação considerar como massa deslocada pelo navio o valor $0,9 M'$ onde M' é a massa correspondente a capacidade de carga total do navio (TPB).

2.4.2 Massa de água adicional (M_2)

Corresponde à massa de água que se movimenta em conjunto com o navio durante a atracação.

$$M_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \cdot \gamma_a \quad (2)$$

Onde:

D = calado do navio nas condições de atracação;

L = Comprimento do navio;

γ_a = massa específica da água.

Nota: Podem ser adotados para a massa hidrodinâmica valores diferentes do acima proposto desde que tenham sido comprovados por testes e/ou estudos científicos realizados por laboratório idôneo.

2.4.3 Velocidade de aproximação do navio (V)

A velocidade de aproximação dos navios perpendicular à linha de atracação é afetada por uma série de fatores: tamanho dos navios, condições de abrigo, uso de rebocadores, habilidades do piloto, condições meteorológicas.

Os valores mínimos a serem adotados para o cálculo da energia de atracação característica são os indicados na Tabela 2.4.1.

Tabela 2.4.1- Valores mínimos para o cálculo da energia de atracação (Fonte: NBR 9782:1987).

Condição	Aproximação	Velocidade perpendicular à linha de atracação (m/s)			
		até 1.000 TPB	até 5.000 TPB	até 10.000 TPB	navios maiores
Vento e ondas fortes	Difícil	0,75	0,55	0,40	0,30
Vento e ondas fortes	Favorável	0,60	0,45	0,30	0,20
Vento e ondas moderados	Aceitável	0,45	0,35	0,20	0,15
Protegido	Difícil	0,25	0,20	0,15	0,10
Protegido	Favorável	0,20	0,15	0,12	0,10

Pode-se observar, para embarcações com TPB a partir de 10.000, o valor para velocidade de atracação é de 0,1m/s, para cais protegido.

2.4.4 Coeficiente de excentricidade

O coeficiente (C_e) leva em consideração a energia dispendida no movimento de rotação do navio, e é determinado pela fórmula:

$$C_e = \frac{r^2}{r^2 + l^2} \quad (3)$$

Onde:

l = distância entre o ponto de contato e o centro de gravidade do navio, medida paralelamente à linha de atracação;

r = raio de giro do navio (pode ser considerado aproximadamente igual a 25% do comprimento do navio).

2.4.5 Coeficiente de rigidez (C_r)

O coeficiente de rigidez (C_r) leva em consideração a parcela da energia de atração absorvida pela deformação do costado do navio. Dependendo da rigidez do sistema de defensas o valor adotado pode variar entre 0,90 e 0,95.

2.4.6 Forças perpendiculares à linha de atracação

As forças características do impacto dos navios são as que correspondem às energias características, energia de atracação e de acordo com os tipos de defensas utilizadas. Os valores de cálculo das forças de impacto no estado limite último devem ser consideradas como o maior dos valores obtidos nas seguintes situações:

- Valor da força característica majorada do coeficiente de ponderação.
- Valor da força correspondente à energia característica majorada do coeficiente de ponderação.

Deve-se levar em consideração a possibilidade de compressão desuniforme das defensas devido à acostagem dos navios não paralela à linha de atracação

2.4.7 Forças paralelas à linha de atracação

Além das forças citadas no item acima, durante a operação de atracação dos navios, existem forças paralelas às estruturas, devido ao atrito entre o costado do navio e o sistema de defensas. Os valores característicos dessas forças dependem do tipo de painel frontal utilizado no sistema de defesa. A tabela abaixo apresenta os coeficientes de atrito do aço com os materiais usualmente empregados nos painéis.

Tabela 2.4.2-Material empregado e coeficiente de atrito com aço (Fonte: NBR 9782:1987).

Material	Coeficiente de atrito com aço
Aço	0,35 - 0,4
Madeira seca	0,6
Madeira molhada	0,2
Borracha	0,3 - 0,4
Resina sintética	0,1 - 0,2

2.4.8 Dimensionamento do sistema de defesa

Para absorver a energia de atracação dos navios, as estruturas de acostagem devem ser equipadas com um sistema de defensas que atenda aos seguintes requisitos:

a) O sistema deve ter capacidade para absorver a energia característica (E_c), majorada do coeficiente de ponderação.

b) Na consideração da alínea a), deve-se levar em consideração a perda da capacidade da defesa pela possibilidade de compressão desuniforme devido à acostagem do navio não paralela à linha de atracação. O ângulo mínimo a ser considerado é de 5° ;

c) O sistema de defensas deve ser dimensionado para absorver toda a energia de impacto em apenas um ponto de atracação, quando a atracação for inclinada;

d) No caso de cais contínuo, o espaçamento das defensas deve ser suficiente para que se assegure a proteção à estrutura quando houver acostagem oblíqua em relação à linha de atracação. Nesta situação dispensa-se a verificação da alínea b);

e) As defensas empregadas devem ter curvas de deformação – reação e deformação – energia confiáveis, bem caracterizadas e estabelecidas a partir de ensaios realizados em laboratórios idôneos. As tolerâncias admitidas em relação aos valores de referência devem ser perfeitamente definidas.

O sistema de defensas deve ser dimensionado de forma a absorver a energia de atracação do navio sem causar deformações permanentes na estrutura de atracação ou nas unidades das defensas.

2.4.9 Fluxograma para a obtenção da energia de atracação

Neste item, será exposto na figura 2.4.1 um fluxograma demonstrando o procedimento para a obtenção da energia de atracação para a NBR 9782:1987.

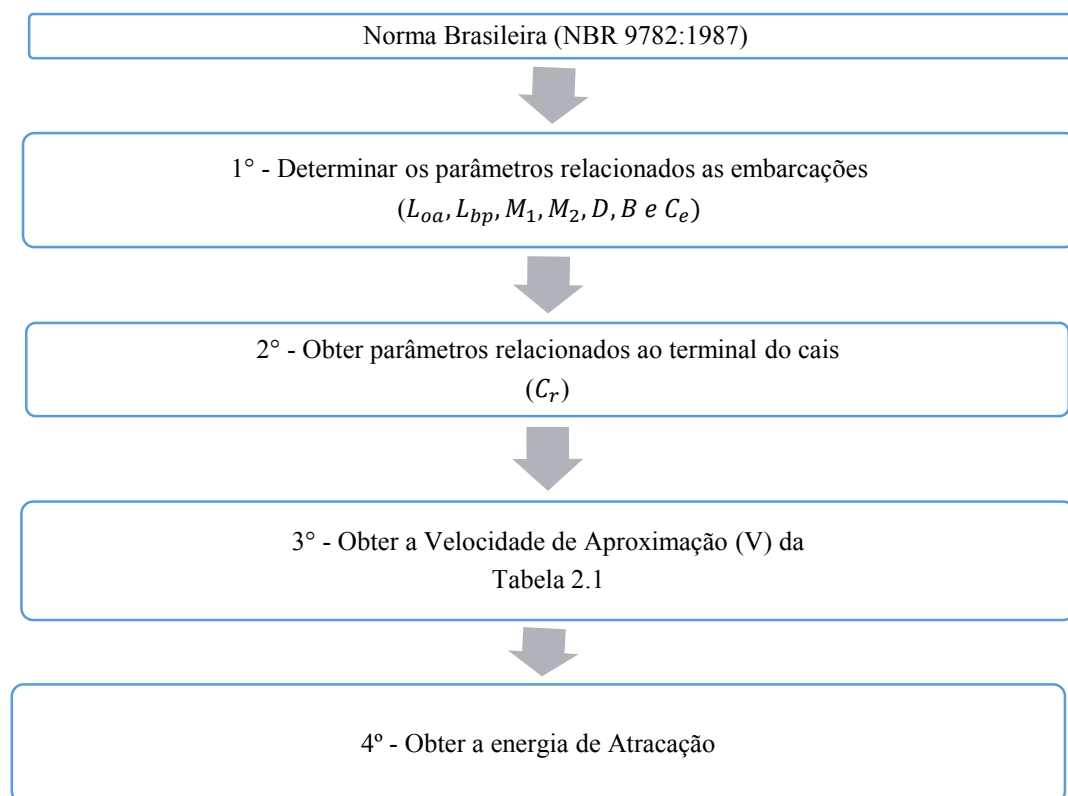


Figura 2.4.1- Fluxograma para obtenção dos esforços de atracação para a NBR 9782:1987 (Fonte: Autor).

2.5 BS 6349 – 4:2014

No curso da atracação de uma embarcação, são geradas cargas entre a embarcação e a estrutura de atracação a partir do momento em que o contato é feito pela primeira vez até que a embarcação seja finalmente colocada em repouso. A magnitude das cargas depende não apenas do tamanho e da velocidade da embarcação, mas também da natureza da estrutura, incluindo qualquer proteção, e o grau de resiliência que elas apresentam sob impacto.

No caso de enormes paredes de cais apoiadas no solo, as cargas de atracação geralmente são resistidas pela pressão passiva do solo desenvolvida atrás da parede do cais com pouco efeito na própria estrutura e, portanto, pode exigir pouca consideração, exceto para minimizar danos aos navios.

O deslocamento da água, conforme o navio se aproxima da parede, tem um efeito de amortecimento e ajuda a reduzir a velocidade de aproximação.

Para outras estruturas, as cargas de atracação são predominantemente uma consideração de projeto.

A velocidade transversal de atracação é um dos principais fatores na determinação da energia.

Segundo a BS 6349, a energia total do movimento de atracação está associada ao movimento do navio e a sua massa hidrodinâmica, representados na expressão abaixo:

$$E = \frac{1}{2} \cdot M_d \cdot V_b^2 \cdot C_m \cdot C_e \cdot C_s \cdot C_c \quad (4)$$

Onde:

M_d = Massa do deslocamento da navio (toneladas);

V_b = Velocidade de atracação perpendicular a linha de atracação ($\frac{m}{s}$);

C_m = Coeficiente de massa hidrodinâmica;

C_e = Coeficiente de excentricidade;

C_s = Coeficiente de configuração do cais;

C_c = Coeficiente de amortecimento.

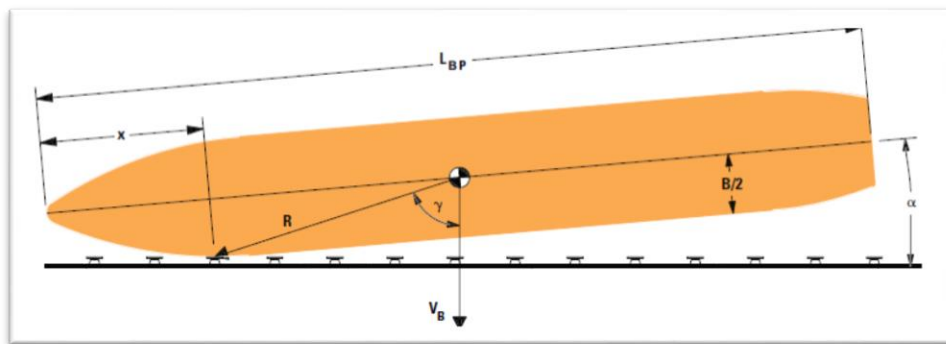


Figura 2.5.1- Geometria de aproximação do navio (Fonte: Adaptação Catalogo FENTEK).

Cada defesa deve ser projetada para absorver a energia de atracação acima. Para este propósito, uma “defensa” pode incluir qualquer um dos seguintes esquemas:

- uma única unidade elastomérica ou pneumática;
- um número de unidades de absorção de energia acopladas em conjunto para formar uma unidade de absorção de energia composta;
- um número de unidades de absorção de energia em proximidade suficientemente próxima que podem ser considerados para atuar em conjunto, se localizado no primeiro ponto de impacto do navio.

Sabendo isso, os próximos passos para o cálculo da energia de atracação são a determinação dos parâmetros envolvidos na equação.

2.5.1 Velocidade de atracação

A velocidade de atracação é um dos fatores mais importantes e determinísticos para a obtenção da energia de atracação, visto que, este valor está ao quadrado na fórmula e influenciará bastante no resultado final.

Para a obtenção da velocidade de aproximação pela norma britânica, deve-se consultar a figura 2.5.2, que determina a velocidade de aproximação com base no deslocamento (toneladas) de cada navio e o grau de abrigo do terminal. A norma ainda adverte, que embora baseado em observações, a figura 2.5.2 fornece velocidades de aproximação para grandes navios que podem facilmente ser excedido em condições adversas. Onde houver correntes cruzadas desfavoráveis, podem ocorrer velocidades de atracação de até 0,25m/s.

O eixo Y representa a velocidade de aproximação em metros por segundo e o eixo X representa a massa de água deslocada, em toneladas.

As letras significam o grau de abrigo e a condição de aproximação:

- a – Boa atracação, abrigada;
- b – Atracação difícil, abrigada;
- c – Fácil atracação, exposta;
- d – Boa atracação, exposta;
- e – Condições difíceis de atracação, exposta;

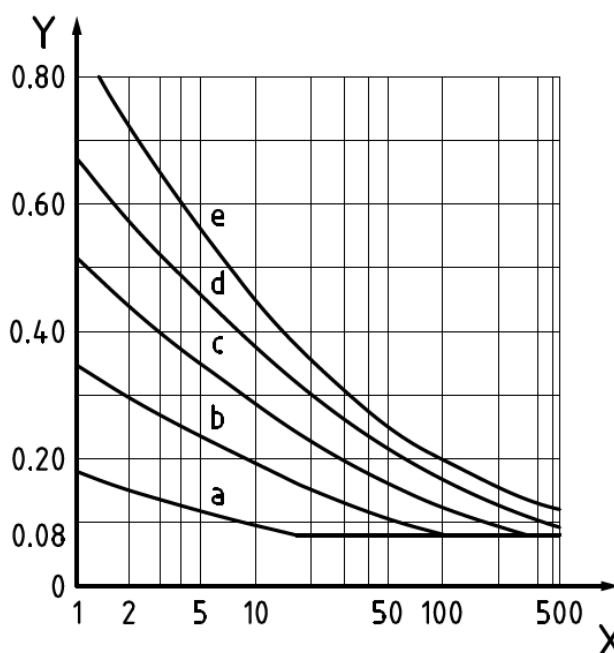


Figura 2.5.2- Velocidade de aproximação em função do tamanho do navio e as condições de navegação (Fonte: Adaptado de Brolsma et al, 1977).

Para simplificar, a tabela 2.5.1 explica algumas das situações indicadas.

Tabela 2.5.1- Grau de abrigo e as condições de navegação, segundo a norma britânica (Fonte: Adaptado BS 6349-4:2014).

Atracação	Com assistência de rebocadores	Sem assistência de rebocadores	Pode ser levado a uma parada paralela ao berço	Não pode ser levado a uma parada paralela ao berço	Com presença de outros navios	Sem presença de outros navios	Velocidade angular
Letra a	x		x			x	
Letra b	x			x	x		x

2.5.2 Coeficiente de massa hidrodinâmica (C_m)

Conforme mencionado nos itens anteriores, o coeficiente de massa hidrodinâmica é introduzido para considerar o efeito da massa de água que se desloca juntamente com o navio durante a atracação.

Este coeficiente pode ser calculado segundo a expressão abaixo:

$$C_m = \frac{2 \cdot D}{B} + 1 \quad (5)$$

Onde:

D é o calado do navio;

B é a boca do navio.

Usando esta fórmula obtém-se valores entre 1,3 e 1,8 para C_m . Contudo, segundo a norma, o valor correto a ser usado em uma situação particular é incerto. Recomenda-se que a energia calculada a ser absorvida pelo sistema de defensas seja comparada com os registros de um berço vizinho, se disponível, ou com dados, como os fornecidos pelo PIANC (2002).

2.5.3 Coeficiente de excentricidade (C_e)

Esse coeficiente permite uma redução da energia transmitida para a defesa quando o ponto de impacto não é o oposto do centro de massa do navio. Este leva em consideração a energia dispendida no movimento de rotação do navio quando o ponto de impacto da embarcação na estrutura não está na mesma seção em que se encontra o centro de massa da embarcação. A obtenção do coeficiente de excentricidade é em função das dimensões do navio de projeto, e do ângulo de incidência do navio no cais, e pode ser calculado da seguinte forma:

$$C_e = \frac{K^2 + (R^2 \cdot \cos^2(\gamma))}{K^2 + R^2} \quad (6)$$

Onde:

K é o raio de giração do navio e pode ser calculado pela formula seguinte:

$$K = (0,19 \cdot C_b + 0,11) \cdot L_{bp} \quad (7)$$

Onde:

L_{bp} é o comprimento entre perpendiculares do navio;

R é a distância entre o ponto de contato da embarcação na estrutura e o centro de gravidade do navio;

γ é o ângulo formado entre a linha que une o ponto de contato do casco; na estrutura com o centro de massa do navio e a direção do vetor de velocidade;

C_b é o coeficiente de bloco do navio, obtidos através da expressão (8).

$$C_b = M_D / (L_{bp} \cdot B \cdot D \cdot \rho) \quad (8)$$

Onde:

L_{bp} é o comprimento do casco entre perpendiculares;

ρ é a densidade da água.

Tabela 2.5.2- Coeficientes de bloco típicos (Fonte: BS 6349-4:1994).

Tipo do navio	Varição do C_b
Petroleiro/graneleiro	0,72 até 0,85
Contêiner	0,65 até 0,70
Ro-Ro	0,65 até 0,70
Passageiros	0,65 até 0,70
Carga seca	0,60 até 0,75
Barcaça	0,50 até 0,65

Na norma Britânica não exemplifica como encontra-se o raio de giração para navios aleatórios.

Podemos simplificar a equação do coeficiente se assumirmos que $\gamma = 90^\circ$.

$$C_e = \frac{K^2}{K^2 + R^2} \quad (9)$$

2.5.4 Coeficiente de amortecimento do cais (C_c)

É o coeficiente que considera a parcela de energia de atracação absorvida pela deformação do casco da embarcação. Para a determinação deste coeficiente, é necessário ter o conhecimento do valor da deflexão da defesa, se esta deformação for menor ou igual a 150 mm o valor de C_c será igual a 0,9, já se for maior que 150 mm o coeficiente assume um valor igual a 1,0. Para navios equipados com defensas de elastômero ao longo do casco é utilizado o valor de 0,9, para todos os demais casos de embarcações é comumente utilizado o valor de 1,0.



Figura 2.5.3– Definição do coeficiente de amortecimento do casco (Fonte: Manual Trelleborg, 2011, p.22).

2.5.5 Coeficiente de configuração do cais (C_s)

É o coeficiente que considera a parcela de energia que é absorvida pelo efeito de amortecimento da água confinada entre o costado no navio e a parede da instalação portuária. Para o cálculo deste coeficiente a única informação necessária é saber se o cais possui paramento aberto ou fechado, conforme demonstrado na figura 2.5.4.

A norma recomenda valores de 1,0 para estruturas abertas e 0,9 para estruturas fechadas.



Figura 2.5.4- - Ilustração do coeficiente de atracação (Fonte: Manual Trelleborg, 2011, p.22).

2.5.6 Fluxograma para a obtenção da energia de atracação (BS 6349 – 4:2014)

Neste item, será exposto na figura 2.5.5 um fluxograma demonstrando o procedimento para a obtenção da energia de atracação para a BS 6349-4:2014.

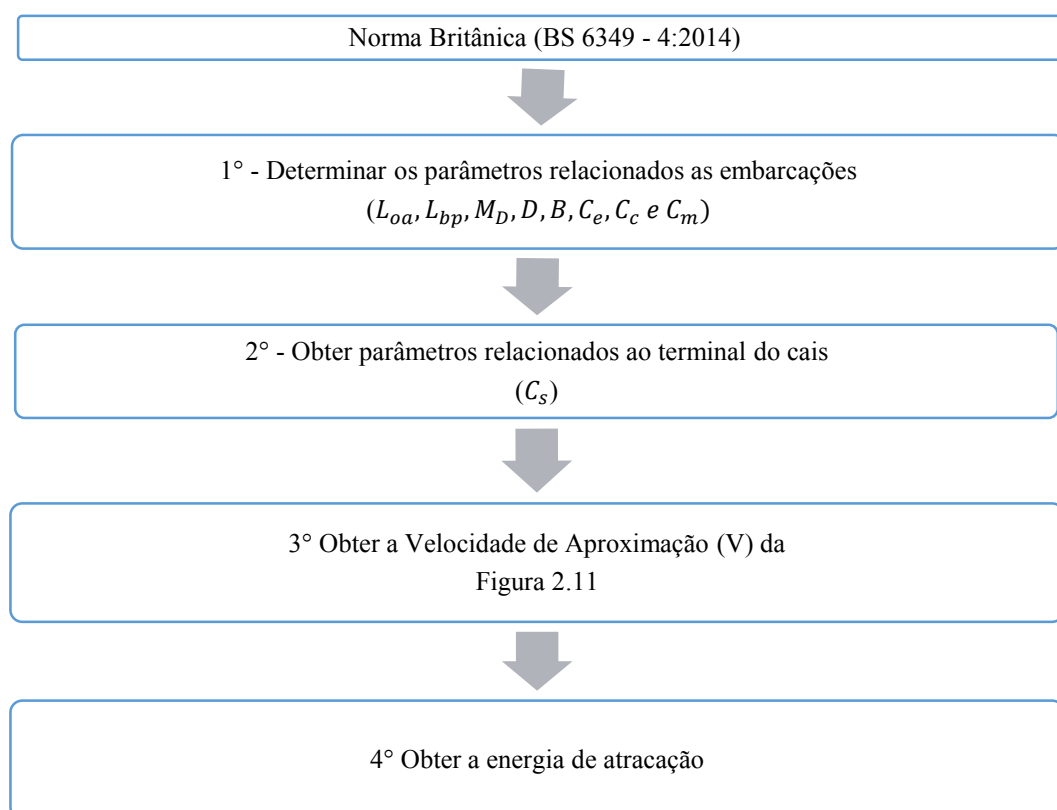


Figura 2.5.5- Fluxograma para obtenção dos esforços de atracação segundo a BS 6349-4:2014 (Fonte: Autor).

2.6 ROM 0.2-90

Os fatores que podem interferir na energia de atracação de um navio são diversos, podendo ser:

- Dimensão do navio, característica estrutural e seus movimentos.

- Características físicas da instalação: local, acessibilidade, proteção e etc.
- Fatores operacionais: condições de aproximação para a instalação, métodos de manobra, frequência de chegada e etc.
- Natureza e característica da estrutura resistente, compatibilidade com as diferentes defensas.
- Maré, variações de nível do mar.
- Condições do ambiente: ventos, ondas e correntes.

A norma alemã recomenda que em casos que já se tem registros da energia de atracação relacionado com o tamanho do navio em berços com as mesmas características e com condições de atracação similares a determinação da energia de atracação deve ser feita através de métodos estatísticos, visto que, as estruturas são muito similares, se possível, ela ainda recomenda que cada registro seja relacionado com o seu respectivo ambiente e condições operacionais.

Para a determinação desta energia em casos onde essa condição não é encontrada, pode-se calcular através das formulações a seguir, vale ressaltar, que esta norma calcula por partes, primeiro a energia desenvolvida pelo navio durante a atracação e depois calcula a energia absorvida pelo sistema, que terá como energia base, o cálculo anterior.

Energia desenvolvida pelo navio durante a atracação

$$E = \frac{1}{2} \cdot g \cdot V_b^2 \cdot C_m \cdot \Delta \quad (10)$$

Onde:

V_b = Velocidade de atracação perpendicular a linha de atracação ($\frac{m}{s}$);

E = Energia cinética característica (t.m);

C_m = Coeficiente de massa hidrodinâmica;

g = aceleração da gravidade ($\frac{9,8m}{s^2}$);

Δ = Deslocamento de água do navio característico (t).

2.6.1 Deslocamento de água do navio característico

A energia de atracação deverá ser determinada então para um navio característico, que será o que tem o maior deslocamento, considerando que ele está totalmente carregado.

Os parâmetros mais comuns que são usados para determinação de tamanho específico são o DWT (Dead Weight Tonnage) e GRT (Gross Register Tonnage).

Para navios específicos, os parâmetros podem ser comumente designados. Para o caso em estudo específico, navios de contêineres, para saber o deslocamento do navio, basta multiplicarmos seu DWT por 1,4.

2.6.2 Velocidade de aproximação

Esse fator é considerado por esta norma, o mais importante na determinação da energia de atracação, sua magnitude depende de fatores como o tamanho do navio, as condições do ambiente (localização da estrutura, ação de ondas, ventos, correntes e maré), condições de operação e manobra e condições de aproximação da instalação.

Para a obtenção da velocidade de aproximação pela norma espanhola, se tem duas opções de gráfico (figura 2.6.1 e 2.6.2), que dependerá de diversos fatores relacionados tanto a embarcação, quanto as condições de navegação, auxílio na atracação e condições dos ventos, correntes e ondas. A seguir, seguem as tabelas que nos direcionam para a informação desejada.

Existem ainda três opções para cada gráfico:

Linha pontilhada - - - - : Condições muito desfavoráveis, ventos, ondas e correntes fortes.

Linha espaçada -.-.-: Condições intermediárias, ventos fortes e moderados ondas e correntes.

Linha contínua ----: Condições favoráveis, ventos, correntes e ondas moderados.

No caso em análise, utiliza-se a primeira tabela, que retrata os valores de velocidade de atracação com assistência, considerando condições favoráveis com ventos, correntes e ondas moderadas. As tabelas acima demonstradas, são válidas apenas para aproximações transversais ao berço, em uma direção praticamente perpendicular. Percebe-se que a partir de um certo ponto, a velocidade de aproximação permanece constante, com valor igual a 0,08 m/s, que seria o valor mínimo então, a ser adotado.

A norma ainda faz uma observação, que as tabelas acima são válidas para condições normais de aproximação. Ela indica a majoração de 25% para difíceis condições das correntes, ou seja, quando elas não estão paralelas à frente do berço.

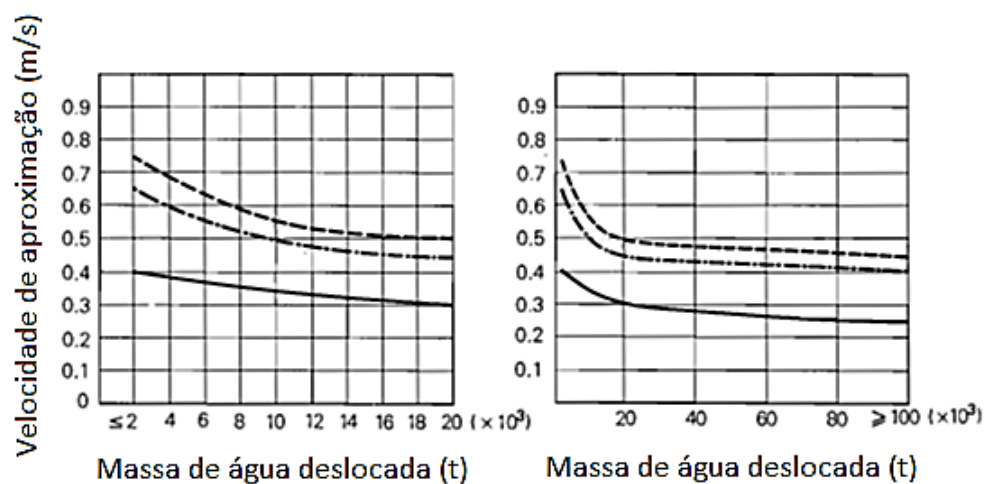


Figura 2.6.1- Velocidades de atracação para aproximação perpendicular ao berço com assistência (Fonte: Adaptado ROM 0.2-90).

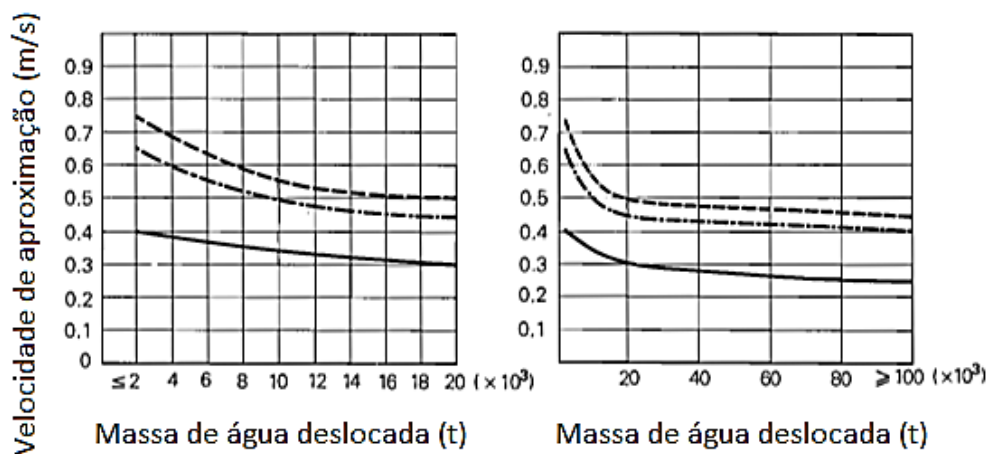


Figura 2.6.2- Velocidades de atracação para aproximação perpendicular ao berço sem assistência (Fonte: Adaptado ROM 0.2-90).

Energia absorvida pelo sistema (E_f)

$$E_f = f \cdot E \quad (11)$$

Para o cálculo final de energia, utiliza-se o coeficiente 'f', calculado da seguinte forma:

$$f = C_e \cdot C_g \cdot C_c \cdot C_s \quad (12)$$

Onde:

C_g = Coeficiente de geometria do navio;

C_e = Coeficiente de excentricidade;

C_c = Coeficiente de configuração do cais;

C_s = Coeficiente de amortecimento de atracação.

2.6.3 Coeficiente de geometria do navio (C_g)

A curvatura do navio e a defesa no ponto de contato influenciam na energia absorvida pelo sistema. Um valor de $C_g = 0,95$ é recomendado quando o ponto de impacto está localizado na parte curva do navio e $C_g = 1$ quando é localizado na parte reta da embarcação.

2.6.4 Coeficiente de excentricidade (C_e)

Quando o ponto de impacto do navio, não coincide com o centro de gravidade do navio, a energia cinética produzida não é completamente transmitida para o berço de atracação. Esse coeficiente é basicamente em função das características do navio e sua geometria.

A aproximação do navio pode ser dar de duas formas, paralela ao berço e perpendicular ao berço. Para cada uma delas existe uma formulação diferente. Para o presente caso que será estudado, é necessário ter a formulação para uma aproximação perpendicular.

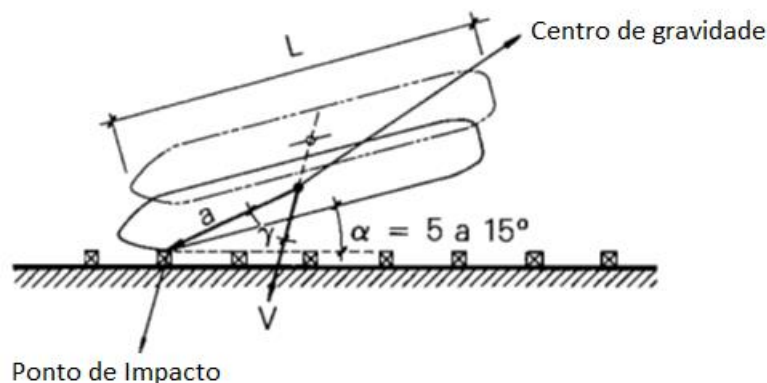


Figura 2.6.3- Centro de gravidade em relação ao coeficiente de impacto (Fonte: Adaptado ROM 0.2-90).

$$C_e = \frac{K^2 + (a \cdot \cos^2(\gamma))}{K^2 + a^2} \quad (13)$$

K é o raio de giração do navio e pode ser calculado pela formula seguinte:

$$K = (0,19 \cdot C_b + 0,11) \cdot L_{bp} \quad (14)$$

Onde:

L_{bp} é o comprimento entre perpendiculares do navio;

a é a distância entre o ponto de contato da embarcação na estrutura e o centro de gravidade do navio;

γ é o ângulo formado entre a linha que une o ponto de contato do casco na estrutura com o centro de massa do navio e a direção do vetor de velocidade.

C_b é o coeficiente de bloco do navio.

$$C_b = \Delta / (L_{bp} \cdot B \cdot D \cdot \rho) \quad (15)$$

Onde:

L_{bp} é o comprimento do casco entre perpendiculares;

ρ é a densidade da água.

A norma ainda indica que em condições normais o valor do ângulo de incidência pode ser assumido entre 70° e 80°.

Para berço de atracação em cais contínuo, pode-se assumir que $a = 0,25 \cdot L_{oa}$. Já para berços em estruturas isoladas, como dolphin, pode-se assumir que o valor de a possa ser calculado como sendo $0,1 \cdot L_{oa}$, com um valor mínimo de 10 m e um máximo de 15 m.

2.6.5 Coeficiente de amortecimento de atracação (C_s)

Esse coeficiente tem relação entre o sistema de amortecimento de atracação (estrutura + defesa) e o amortecimento do navio no impacto. É de fundamental importância calcular o quanto de energia é absorvida pelo navio e não se transfere para a defesa.

Em casos de sistemas muito rígido, como os de madeira, pode-se considerar $C_s = 0,5$, para estruturas muito flexíveis, adota-se o valor de 1.

Geralmente, para garantir a segurança da atracação do navio, o valor de $C_s = 0,9$ é adotado.

2.6.6 Coeficiente de configuração do cais (C_c)

A norma recomenda o uso da tabela abaixo para obtenção dos valores de C_c .

Tabela 2.6.1- Valores sugeridos para o coeficiente de configuração do berço (Fonte: Adaptado ROM 0.2-90).

Método de Aproximação		Tipos de Estrutura		
		Diáfano	Semi-Sólida	Sólida
Transversal		1	0,9	0,8
Longitudinal	Poupa ou proa	1	1	1
	Lateral	1	0,9	0,8

2.6.7 Fluxograma para a obtenção da energia de atracção

Neste item, será exposto na figura 2.6.4 abaixo um fluxograma demonstrando o procedimento para a obtenção da energia de atracção para a ROM 0.2-90.

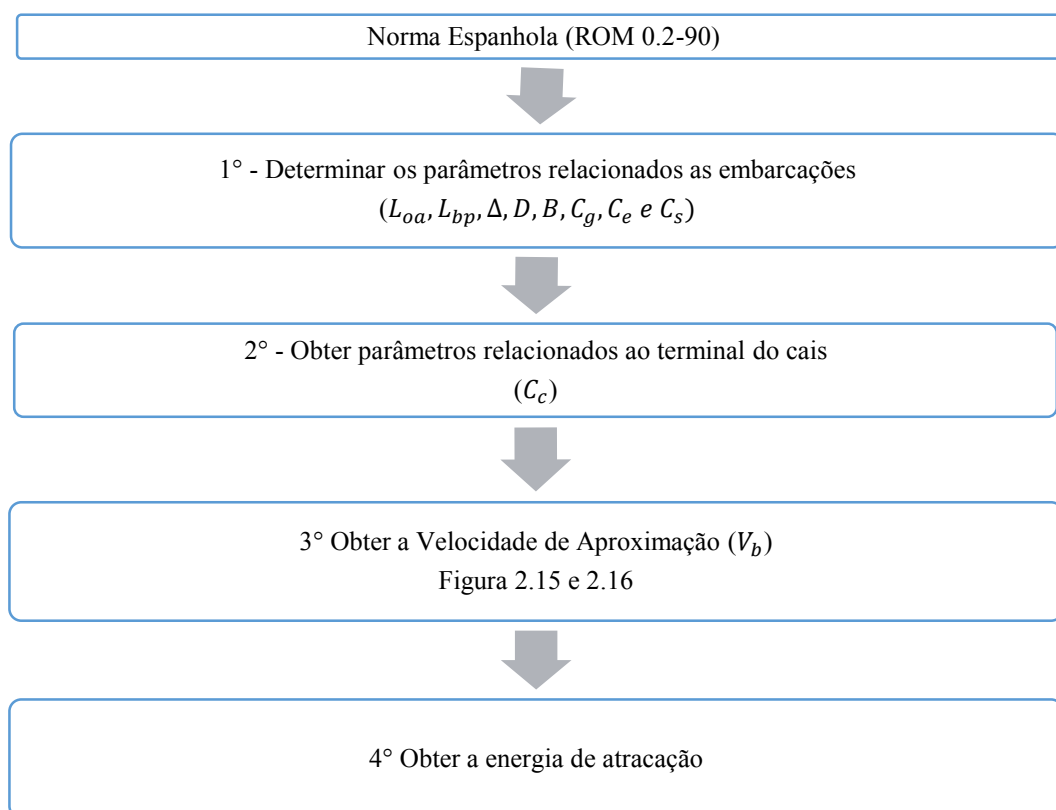


Figura 2.6.4- Fluxograma para obtenção dos esforços de atracção segundo a ROM 0.2-90 (Fonte: Autor).

2.7 EUA 2012

A equação abaixo demonstra o cálculo da energia de absorção pela atracção:

$$E_d = \frac{1}{2} \cdot G \cdot V^2 \cdot C_m \cdot C_e \cdot C_s \cdot C_c \quad (16)$$

Onde:

V = Velocidade de atracação perpendicular a linha de atracação ($\frac{m}{s}$);

E_d = Energia cinética característica (kNm);

C_m = Coeficiente de massa hidrodinâmica;

C_e = Coeficiente de excentricidade;

C_c = Coeficiente de atenuação pela estrutura;

C_s = Flexibilidade do navio;

G = Deslocamento de água do navio característico (t).

2.7.1 Coeficiente de excentricidade (C_e)

Este coeficiente é calculado da mesma forma indicada no item 2.6.4 da norma espanhola ROM 0.2-90.

2.7.2 Coeficiente de massa hidrodinâmica (C_m)

A norma utiliza para o cálculo as recomendações de PIANC (2002), conforme abaixo:

Dependendo do valor da relação entre a folga da quilha do navio (K_c), e o calado (D), a formulação para o cálculo do coeficiente de Massa é alterada, e as equações para os seus respectivos intervalos, bem como a figura que mostra as variáveis estão mostradas a seguir.

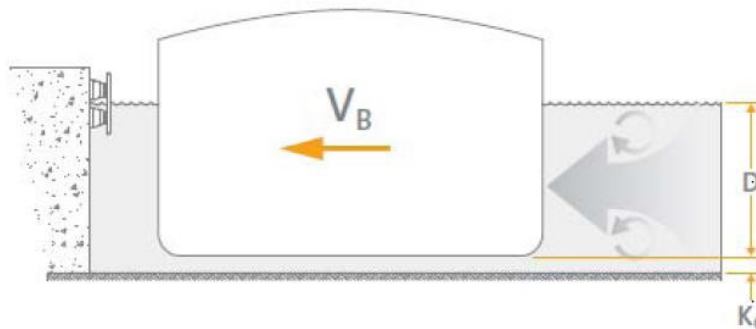


Figura 2.7.1- Variáveis envolvidas na determinação do coeficiente de massa virtual (Fonte: Fender Team (2014)).

$$\begin{aligned}
 \frac{K_c}{D} &\leq 0,1 & C_m &= 1,8 \\
 0,1 &\leq \frac{K_c}{D} \leq 0,5 & C_m &= 1,875 - 0,75 \cdot \frac{K_c}{D} \\
 \frac{K_c}{D} &> 0,5 & C_m &= 1,5
 \end{aligned} \quad (17)$$

O que pode ser representado pela figura 2.7.2.

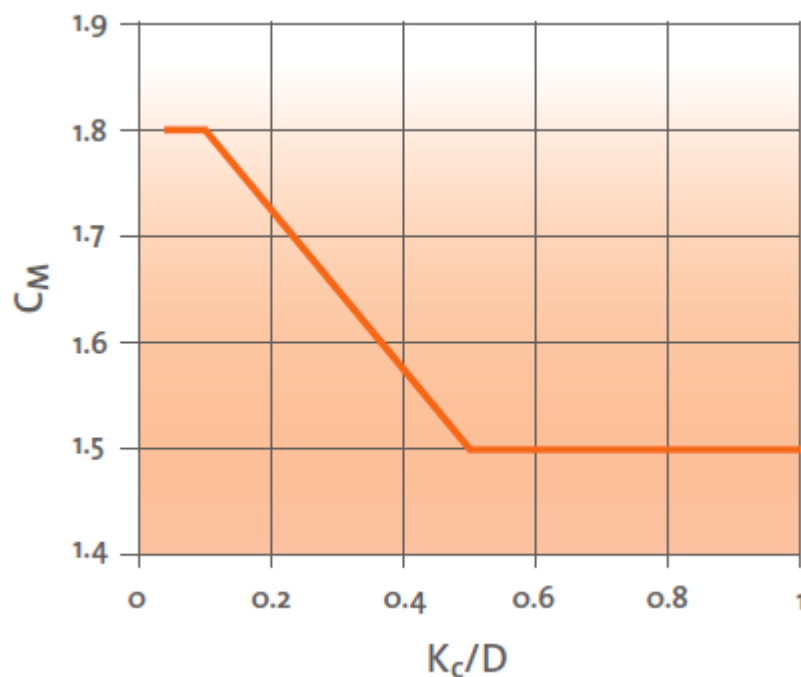


Figura 2.7.2- Gráfico para determinação do coeficiente de massa virtual (Fonte: Fender Team (2014)).

2.7.3 Coeficiente de atenuação pela estrutura (C_c)

Esse fator leva em conta o tipo de estrutura, aberta ou fechada, podendo diminuir ou não a energia gerada pela atracação.

Em geral, dois valores podem ser adotados:

- Estrutura aberta a beira mar: $C_c = 1$.
- Estrutura fechada a beira mar e atracação paralela: $C_c = 0,9$.

2.7.4 Velocidade de atracação (V)

A norma alemã utiliza os mesmos gráficos utilizados pela norma espanhola para determinação da velocidade de aproximação do navio. Podemos então, utilizar os mesmos procedimentos do item 2.6.2, velocidade de aproximação para a ROM 0.2-90.

2.7.5 Fluxograma para a obtenção da energia de atracação

Neste item, será exposto na figura abaixo um fluxograma demonstrando o procedimento para a obtenção da energia de atracação para a EUA 2012.

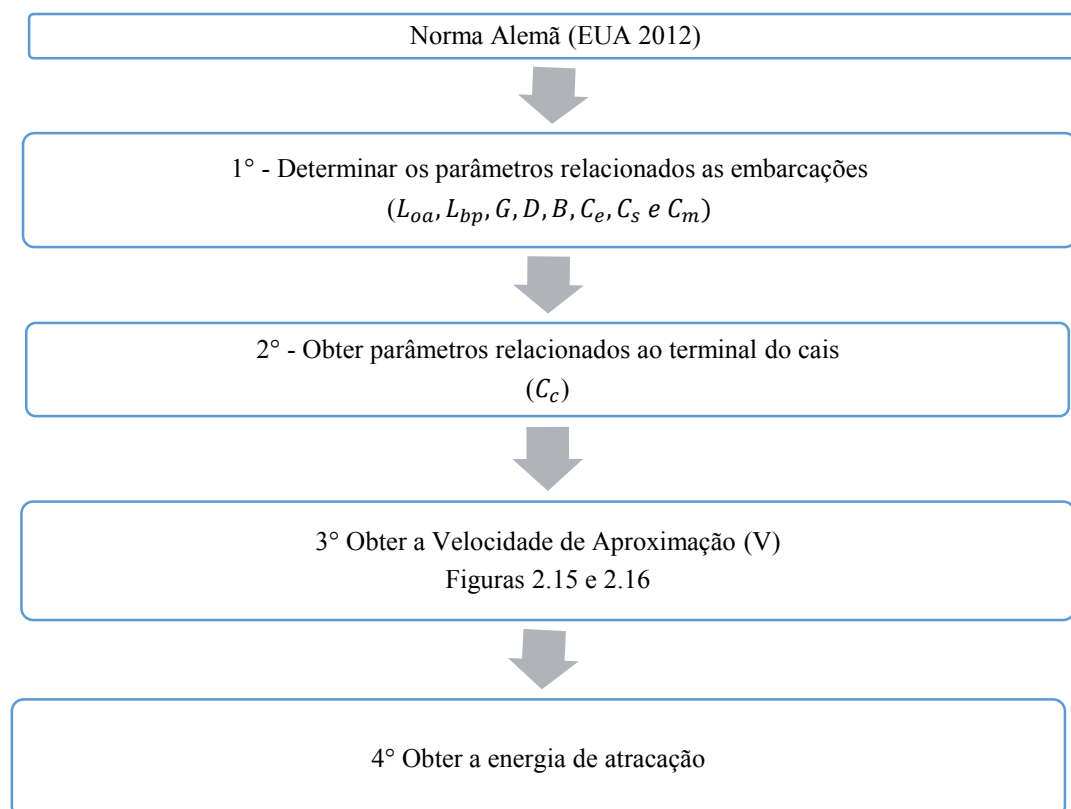


Figura 2.7.3- Fluxograma para obtenção dos esforços de atracação segundo a EUA 2012 (Fonte: Autor).

2.8 Teoria das probabilidades e confiabilidade estrutural

2.8.1 Variáveis aleatórias e seus principais parâmetros

Uma variável aleatória pode ser considerada como o resultado numérico de operar um mecanismo não determinístico ou de fazer uma experiência não determinística para gerar resultados aleatórios.

Conforme Ang & Tang (2007), variáveis aleatórias são artifícios matemáticos utilizados para a representação analítica de certos eventos, e seus valores podem ser definidos dentro de uma faixa de valores possíveis.

Por exemplo, os esforços de atracação em uma estrutura portuária acostável resultam da interação de diversos eventos randômicos, como velocidade de aproximação, dimensões de cada navio, peso, entre outros, que variam dentro de determinadas faixas de valores máximos e mínimos. Essa natureza dos esforços de atracação faz com que os seus valores variem ao longo do tempo, dentro de uma faixa de valores possíveis, e possuindo valores cujas repetições ocorrem com mais frequência. Assim, os valores numéricos possíveis de uma variável aleatória estão associados a um específico valor de probabilidade de ocorrência. As funções que medem a probabilidade de ocorrência dos valores de variáveis aleatórias são chamadas de distribuições de probabilidade.

Neste caso, as variáveis aleatórias que associam um número ao resultado são os parâmetros das embarcações.

Em relação as definições de variáveis aleatórias, podemos dividir em discretas e contínuas, com sua definição abaixo.

Para uma Variável Aleatória Discreta Finita o resultado a princípio não é completamente conhecido, mas sempre descritível com facilidade.

Uma Variável Aleatória que pode assumir qualquer valor numérico em um determinado intervalo ou coleção de intervalos é chamada de variável aleatória contínua.

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:

$$F_X(x) = P_X(X \leq x) \quad (18)$$

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 .

$$F_X(x) = P(-\infty < X \leq x) \quad (19)$$

Já a derivada da equação 19 em relação a x , é denominada densidade de probabilidade de X .

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (20)$$

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:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_a^b f_X(x) dx \quad (21)$$

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 2.8.1.

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 2.8.2, em que o comprimento dos intervalos é o mesmo, porém, a probabilidade do intervalo a,b é maior, por apresentar maior área.

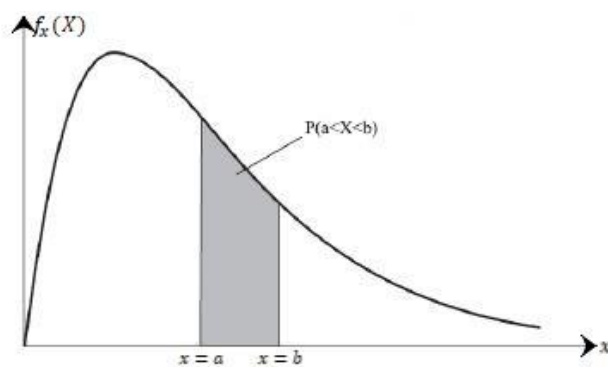


Figura 2.8.1- Probabilidade representada como área (Fonte: Walpole, et.al, 2009).

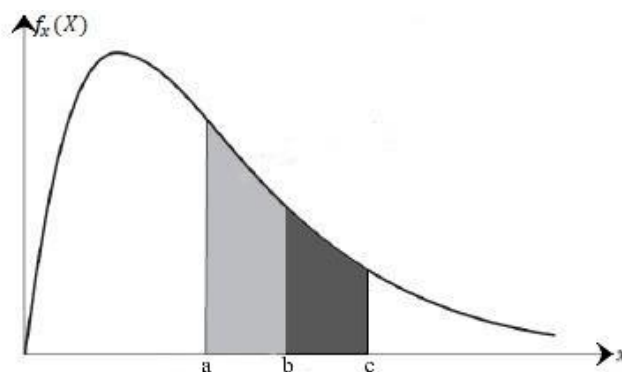


Figura 2.8.2- Probabilidade diferente para o mesmo comprimento (Fonte: Walpole, et.al, 2009).

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 22.

$$\mu_x = \int_{-\infty}^{+\infty} xf_x(x)dx \quad (22)$$

A segunda medida é a dispersão, ou espalhamento das probabilidades, denominada variância (σ^2), e é definida de acordo com a equação 23.

$$\sigma^2_x = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu)^2 f_x(x)dx \quad (23)$$

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 24.

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma^2_x} \quad (24)$$

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 o desvio padrão e a média da variável aleatória (valor central da distribuição), representada em forma de porcentagem, conforme equação 25.

$$\delta_x = \frac{\sigma_x}{\mu_x} \quad (25)$$

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.

2.8.2 Distribuições de Probabilidade e geração de números aleatórios

Foram utilizadas as distribuições de probabilidade uniforme, para a geração de variáveis aleatórias do porte da embarcação (DWT)

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

Distribuição uniforme

A função densidade de probabilidade uniforme é definida como:

$$\begin{aligned} f_{(x)} &= \frac{1}{(b - a)}, a \leq x \leq b \\ f_{(x)} &= 0, \text{ caso contrário} \end{aligned} \quad (26)$$

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.

2.8.3 Determinação de distribuições e parâmetros de dados observados

A distribuição de probabilidade que deve ser adotada, depende dos dados que serão observados, o intervalo de tempo, e todo um conjunto de variáveis pode interferir.

Tendo uma grande quantidade de dados analisados, pode-se chegar em uma distribuição e parâmetros de uma determinada variável aleatória, de uma forma que ela possa ser “prevista”, ou até mesmo estimada.

A descoberta da distribuição de uma variável aleatória é de grande valia, contudo, deve ser usada com cuidado, pois, por exemplo, o número de dados observados deve ser suficientemente grande para a distribuição ter um grande nível de confiança.

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.

Existem três testes para analisar a representatividade de um conjunto de amostras de dados, a partir de três testes:

- 1) Traçando um diagrama de frequência;
- 2) Elaborando um papel de probabilidade (*probability paper*);

- 3) Através da condução de alguns testes conhecidos como testes de *goodness of fit* para uma determinada distribuição (Haldar e Mahadevan, 2000).

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.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} \quad (27)$$

Quando o valor de cálculo do coeficiente χ^2 for menor que $c_{1-\alpha, f}$ (valor crítico de chi-quadrado para que a distribuição assumida represente de forma satisfatória o conjunto de dados), pode-se entender que essa distribuição de probabilidade pode modelar um determinado 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.

Os valores de discrepância máximas (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).

$$D_n = \max |F_X(x) - S_n(x)| \quad (28)$$

$$P(D_n \leq D_n^\alpha) = 1 - \alpha \quad (29)$$

A figura 2.8.3 abaixo, mostra o que foi explicado acima e relaciona a distribuição de frequência acumulada teórica e experimental, além do valor de discrepância máxima.

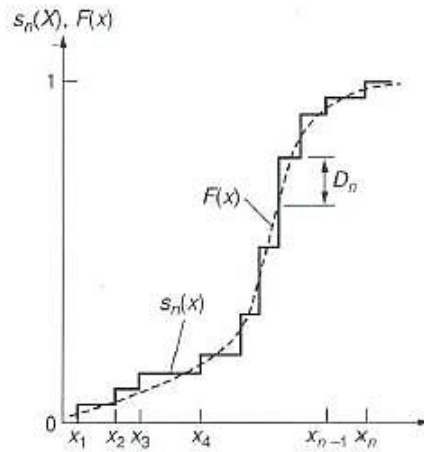


Figura 2.8.3- Relação entre frequência acumulada teórica e experimental (Fonte: Ang e Tang, 2007).

Com a figura 2.8.3, pode-se então, concluir que $S_n(x)$ possui os seguintes intervalos:

$$\begin{aligned} S_n(x) &= 0 \quad x < x_1 \\ &= \frac{k}{n} \quad x_k < x < x_{k+1} \\ &= 1 \quad x \geq x_n \end{aligned} \quad (30)$$

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;

$$A^2 = \sum_{i=1}^n \left[\frac{(2i-1) \{ \ln F_X(x_i) + \ln [1 - F_X(x_{n+1-i})] \}}{n} \right] - n \quad (31)$$

4º) 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).

5º) 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.

2.8.4 Confiabilidade na engenharia

As condições da natureza, por exemplo, são incertezas muito difíceis de prever visto que estes fenômenos levam em conta diversos fatores que muitas vezes não temos como estimar, ou até mesmo saber a magnitude de sua influência. Fenômenos esses como as ações dos ventos, correntes e ondas.

Quando se trata de incertezas não naturais, por exemplo, a probabilidade da chegada de um navio no cais do porto, pode-se ter uma assertividade maior, visto que os dados recebidos serão mais conclusivos.

Todo esse processo de descoberta de probabilidades, se dá pela necessidade de assegurar o desempenho de um sistema, de forma que este não venha a falhar.

As incertezas ocorrem devido a diversos fatores, como exposto na tabela 2.8.1, estas dependem das variáveis aleatórias envolvidas, no caso da presente dissertação, a variável aleatória é o porte das embarcações.

Tabela 2.8.1- Incertezas (Fonte: Machado, 2000).

Incertezas	Descrição
Fenomenológicas	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.

Mesmo com as incertezas, um estudo detalhado das probabilidades, dará uma certa segurança no 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 (defensas de um cais) não atender de forma satisfatória os estados limites, que neste caso, seria o estado limite último.

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.

$$C = P(R > S) \quad (32)$$

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.

$$P_f = P(R < S) = 1 - P(R > S) = 1 - C \quad (33)$$

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.

2.8.5 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 2.8.1), 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).

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.

A simulação de Monte Carlo através de uma geração aleatória de parâmetros de entrada e suas distribuições, realiza diversas simulações através de um modelo numérico, de modo a obter os parâmetros de saída (respostas do modelo), exemplificado na figura 2.8.4 e tabela 2.8.2.

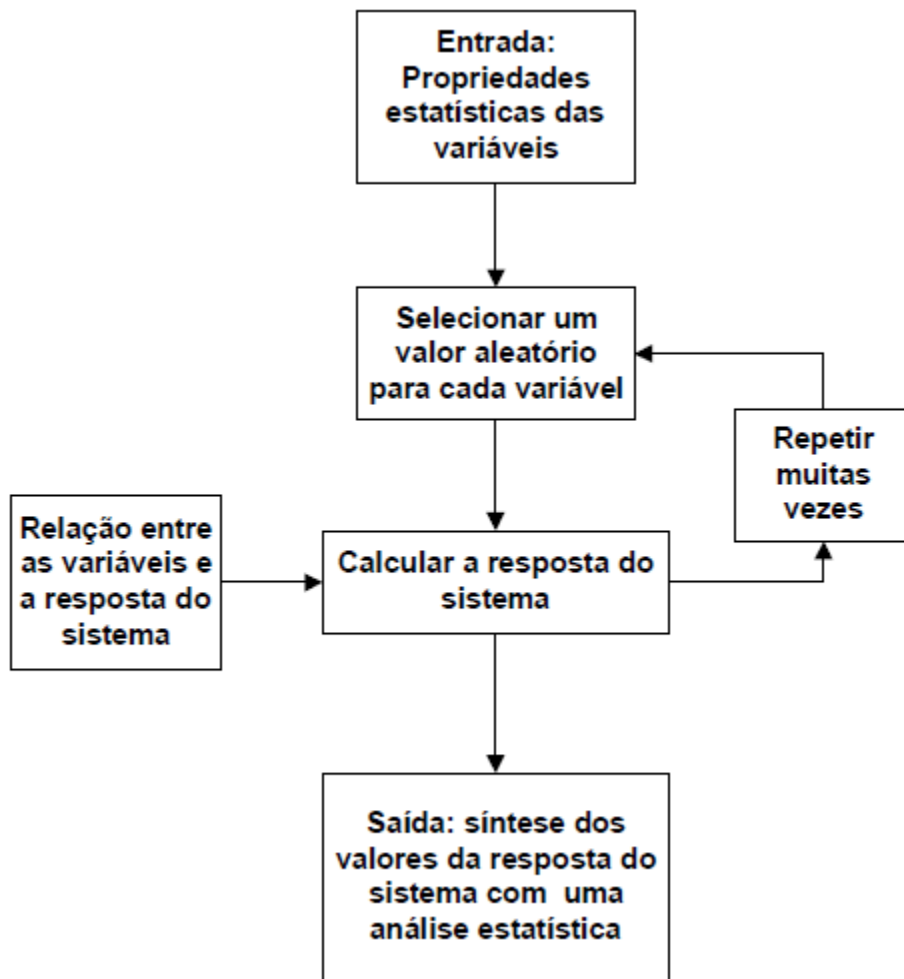


Figura 2.8.4- Fluxograma do Método de Monte Carlo (Fonte: Grant,1978 adaptado por Real,2000).

Tabela 2.8.2- 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).

3 METODOLOGIA

3.1 Estudo de Caso

O estudo do presente trabalho foi baseado na estrutura do terminal de contêineres do Porto de Rio Grande (TECON Rio Grande), devido a facilidade da obtenção de dados de embarcação e por ser uma estrutura conhecida e estudada pela universidade. A estrutura do terminal possui 900 metros de comprimento e 20 metros de largura, composto por 18 módulos de 50 metros de comprimento, cada um desses módulos possui duas defensas flexíveis e dois cabeços de amarração. A figura 3.1.1 apresenta o local em questão:



Figura 3.1.1- Imagem do cais do TECON Rio Grande (Fonte: <http://www.sacarmazenagem.com.br/guia-de-servicos/maritimo/portos/nacionais/tecon-rio-grande-sa.html>).

Como o cais do TECON de Rio Grande recebe navios de nível internacional e tem seu controle de navios por meio de um site, onde os dados são públicos e podem ser acessados, obteve-se estes dados das embarcações que atracaram nele durante um determinado intervalo de tempo, conforme será descrito posteriormente.

Os coeficientes obtidos são baseados nos tipos das embarcações e na característica da estrutura portuária, os quais também foram obtidos de acordo com este mesmo estudo de caso.

O canal de acesso ao terminal, possui, usualmente para métodos de cálculo, uma profundidade de 14,5 metros. Este valor é muito importante e interfere bastante no resultado da determinação da energia de atracação, pois interfere em alguns coeficientes de cálculo, como veremos posteriormente.

3.2 Ações e parâmetros estatísticos adotados

O primeiro passo a ser observado é qual das variáveis é aleatória. Neste caso, temos diversas embarcações, então, já que os parâmetros das embarcações variam de acordo com o navio, consequentemente, a energia de atracação irá mudar também.

Os parâmetros das embarcações foram obtidos através do porte da embarcação (DWT), de forma a obter equações analíticas para a obtenção destes parâmetros, permitindo assim, a aplicação do método de Monte Carlo.

A partir de equações analíticas, consegue-se definir, por exemplo, o (L_{bp}) para qualquer embarcação, através da obtenção de uma função que melhor represente a relação entre as duas variáveis, como veremos no próximo item.

A obtenção das equações foi realizada através do software Excel, selecionando a equação e a curva que melhor se adeque aos pontos observados, consequentemente, será a que possui melhor coeficiente de determinação (R^2).

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

3.3 Probabilidade do porte da embarcação

Como foi comentado anteriormente, a probabilidade do porte da embarcação que atracará no cais, foi obtida através de uma análise do conjunto de embarcações que atracaram no cais num período de 6 meses, obtidos online, para as datas entre julho e dezembro de 2017. Neste intervalo de tempo foram coletado 408 navios, gerando 408 DWT. Estes valores serão usados para posterior análise de probabilidade de ocorrência.

A partir do conjunto de navios que atracaram no cais, consegue-se coletar suas características do seu porte através do site www.MarineTraffic.com, conforme exposto nas figuras 3.3.1 e 3.3.2 abaixo.

Wilson Sons Terminais **Programação de Navios**

* Data Inicial: 30/06/2017 Pesquisar

Exportar para PDF Exportar para XLS Tela Cheia

● Operação
 ● Espera
 ● Programado
 ● Cancelado
 ● Fechado
 ● Operado
 ● Atracado
 Período: (30/06/2017) até (30/07/2017). Total de (455) registro(s) encontrado(s).

Navio/Operação	Berço	Armador	Serviço	Deadline Dry	ETB	Tipo	Situação	ETA	ETO
MSC JEONGMIN JE00809N	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 EAY0013N	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 SM00800N	B3	MSC	MSCCLG		26/02/2018 12:00:00	DEEPSEA	Programado	26/02/2018 12:00:00	27/02/2018 12:00:00
VALENCE VLE0019N	B3	EMC	ESA		20/02/2018 12:00:00	DEEPSEA	Programado	20/02/2018 12:00:00	21/02/2018 12:00:00
MAERSK LETICIA 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 VOO0005E	B3	CCO	ESA		13/02/2018 14:00:00	DEEPSEA	Programado	13/02/2018 14:00:00	14/02/2018 14:00:00
MASCAL KHOB KKH00006N	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 KRISTAL KRY0005N	B3	MSC	MSCCLG		05/02/2018 00:00:00	DEEPSEA	Programado	05/02/2018 00:00:00	06/02/2018 00:00:00

Figura 3.3.1- Embarcações atracadas no Terminal de Containeres TECON
(Fonte: <http://www.teconline.com.br/Terminais/Forms/NavioProgramacaoConsultar.aspx>).

MSC JEONGMIN
Container Ship

IMO: 9720471
MMSI: 255805854
Call Sign: CQZA
Flag: Portugal [PT]
AIS Vessel Type: Cargo - Hazard A (Major)

Gross Tonnage: 94469
Deadweight: 110482 t
Length Overall x Breadth Extreme: 299.89m x 48.33m
Year Built: 2016
Status: Active

Voyage Info: ZAZBA to SG SIN
ATD: 2017-12-30 10:31 LT (UTC +2)
ETA: 2018-01-11 20:00 LT (UTC +8)

Past Track Route Forecast

Figura 3.3.2- Porte da embarcação.

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

Com todos os valores de DWT, pode-se obter a distribuição de probabilidade que melhor representa o conjunto de dados de chegada de cada navio. Para isso, foi utilizado o software EasyFit, que utiliza os testes de goodness-of-fit.

Com a tabela 3.3.1, pode-se observar qual a melhor distribuição a ser adotada para este caso. 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.

Tabela 3.3.1- Goodness-of-test para os valores de DWT (Fonte: Autor).

#	Distribution	Kolmogorov Smirnov	
		Statistic	Rank
61	Uniform	0,07174	1
11	Error	0,07182	2
62	Wakeby	0,07384	3
25	Gen. Pareto	0,07384	4
31	Johnson SB	0,07407	5
1	Beta	0,08622	6
54	Power Function	0,08808	7
23	Gen. Gamma (4P)	0,10136	8
39	Log-Pearson 3	0,10847	9
21	Gen. Extreme Value	0,11145	10
63	Weibull	0,11244	11
55	Rayleigh	0,11548	12
41	Lognormal	0,12221	13
30	Inv. Gaussian (3P)	0,12313	14
36	Log-Gamma	0,12386	15
38	Log-Logistic (3P)	0,1246	16
64	Weibull (3P)	0,1255	17
42	Lognormal (3P)	0,12552	18
44	Normal	0,1258	19

Com a intenção de se ter uma boa análise futura dos resultados, foram gerados com essa distribuição de probabilidade, 10.000 valores aleatórios de DWT, através da ferramenta “*Data Analysis*” do software Excel.

3.4 Parâmetros relacionados as embarcações (NBR 9782 e BS 6349)

Para a obtenção dos parâmetros relacionados as embarcações (M , D , B , L_{oa} e L_{bp}), foram utilizado os dados coletados em Thoresen (2014) considerando-se um limite de confiança de 50%, de forma que tais parâmetros são obtidos em função do porte da embarcação (DWT).

Com a tabela 3.4.1 abaixo, que relaciona o DWT com as características da embarcação, pode-se obter gráficos interpolados que geram, por exemplo a boca (B) do navio, em função do seu DWT. Posteriormente estes valores serão utilizados para o cálculo da energia de atracação. Para obtenção dos gráficos, e das equações, utilizou-se o software Excel.

Tabela 3.4.1- Parâmetros de navios Porta Contêineres (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

DWT (t)	Deslocamento "M" (t)	Loa (m)	Lbp (m)	B (m)	Calado Máximo (m)
7000	10200	116	108	19,3	6,9
10000	14300	134	125	21,6	7,7
15000	21100	157	147	24,1	8,7
20000	27800	176	165	26,1	9,5
25000	34300	192	180	27,7	10,2
30000	40800	206	194	29,1	10,7

40000	53700	231	218	32,3	11,7
50000	66500	252	238	32,3	12,5
60000	79100	271	256	35,2	13,2

As figuras representam uma extrapolação e uma formulação analítica do porte das embarcações (DWT), para cada um dos parâmetros necessários para o cálculo da energia de atracação.

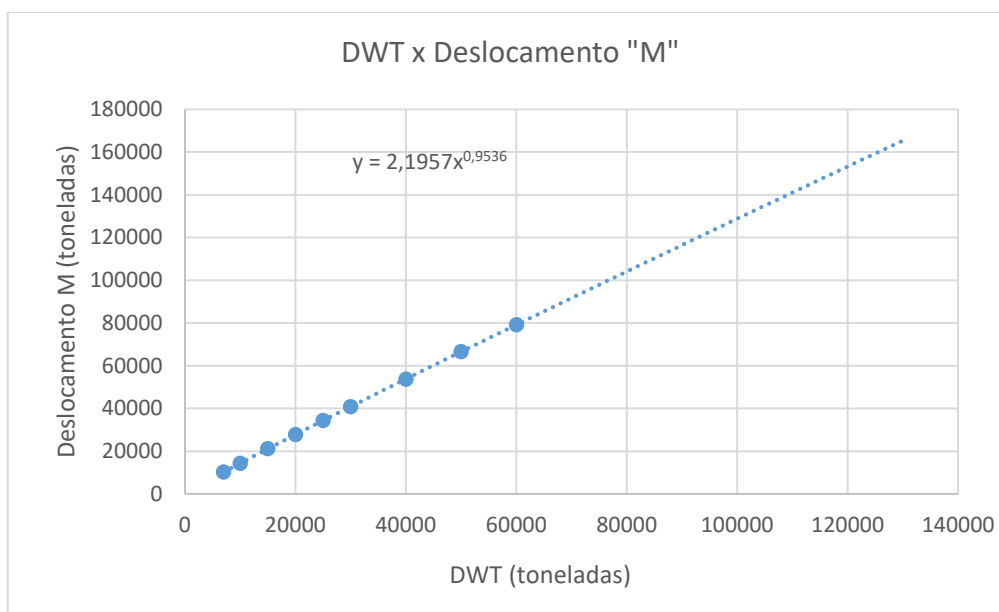


Figura 3.4.1- DWT x M. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

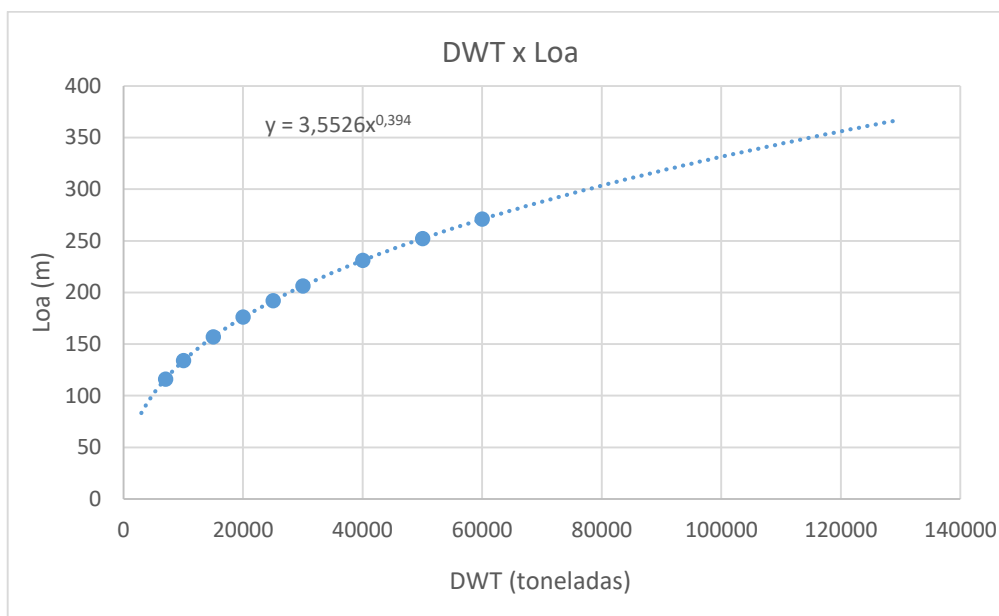


Figura 3.4.2- DWT x Loa. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

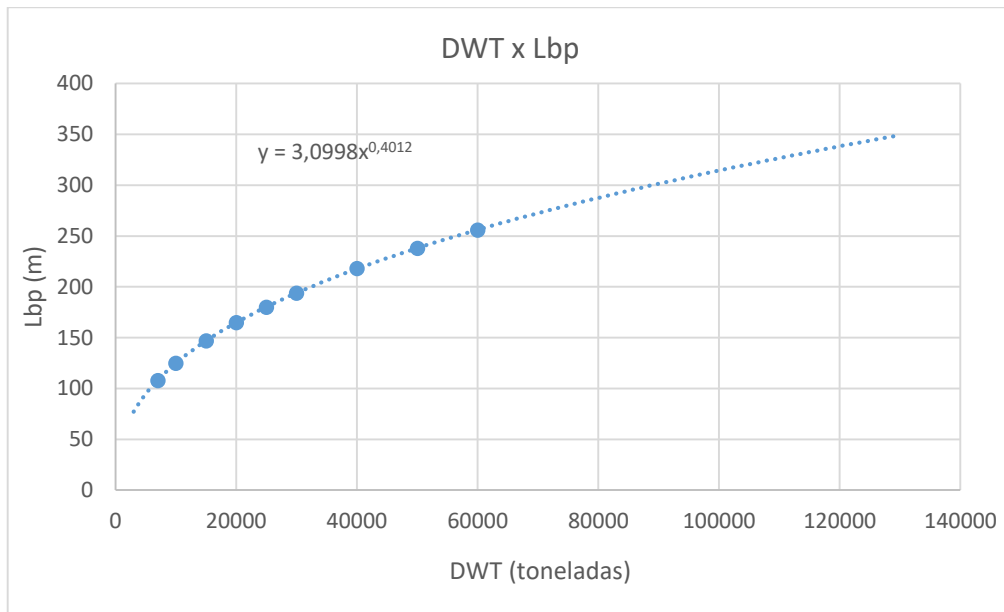


Figura 3.4.3- DWT x Lpb. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

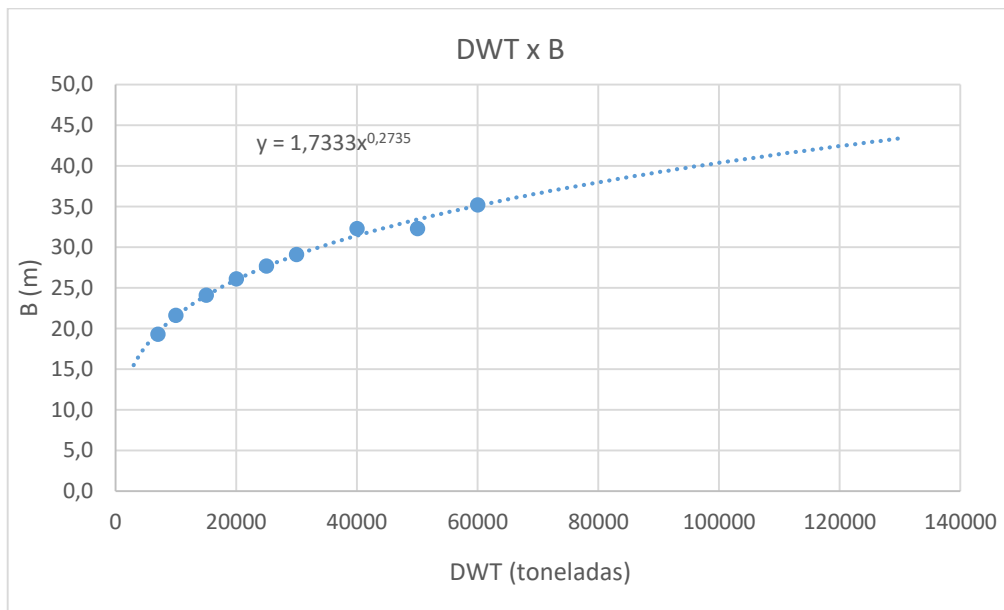


Figura 3.4.4- DWT x B (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

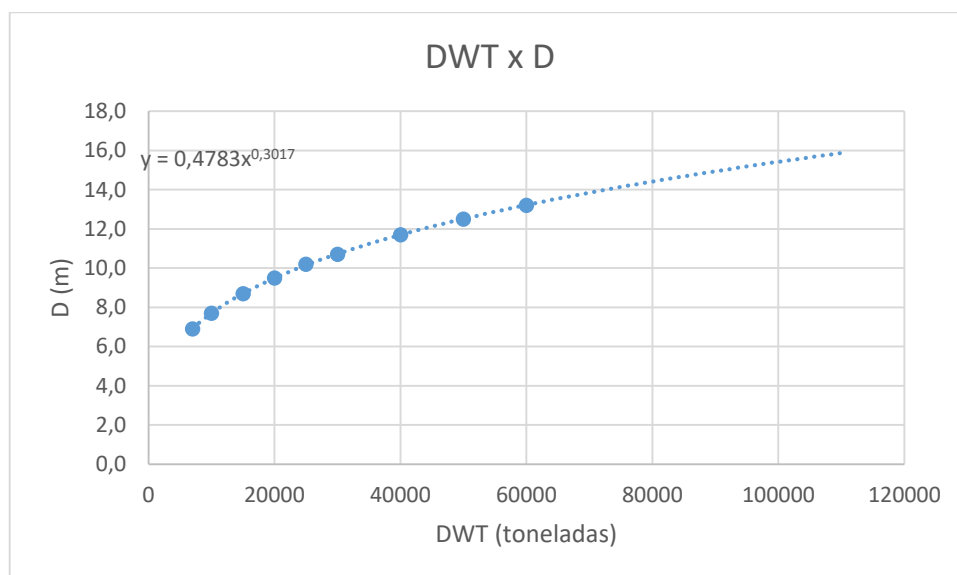


Figura 3.4.5- DWT x D. (Fonte: Adaptado Thoresen, 2014).

3.5 Parâmetros relacionados as embarcações ROM 0.2-90

Para a obtenção dos parâmetros relacionados as embarcações (M , D , B , L_{oa} e L_{bp}), foram utilizados os dados coletados na própria Norma Espanhola, de forma que tais parâmetros são obtidos em função do porte da embarcação (DWT).

Com a tabela 3.5.1 que relaciona o DWT com as características da embarcação, pode-se obter gráficos interpolados que geram, por exemplo a boca (B) do navio, em função do seu DWT. Para obtenção dos gráficos, e das equações, utilizou-se o software Excel.

Tabela 3.5.1- Parâmetros de navios Porta Contêineres (Fonte: Adaptado ROM 0.2-90).

DWT (t)	Deslocamento (t)	Loa (m)	B (m)	Calado Máximo (m)
7000	9800	143	19,0	6,0
10000	14000	159	23,5	8,0
15000	21000	180	26,5	9,0
20000	28000	198	28,7	10,0
25000	35000	212	30,0	10,7
30000	42000	228	31,0	11,3
36000	50400	270	31,8	11,7
42000	58800	285	32,3	12,0
50000	70000	290	32,4	13,0

As figuras a seguir, representam uma extrapolação e uma formulação analítica do porte das embarcações (DWT), para cada um dos parâmetros necessários para o cálculo da energia de atracação.

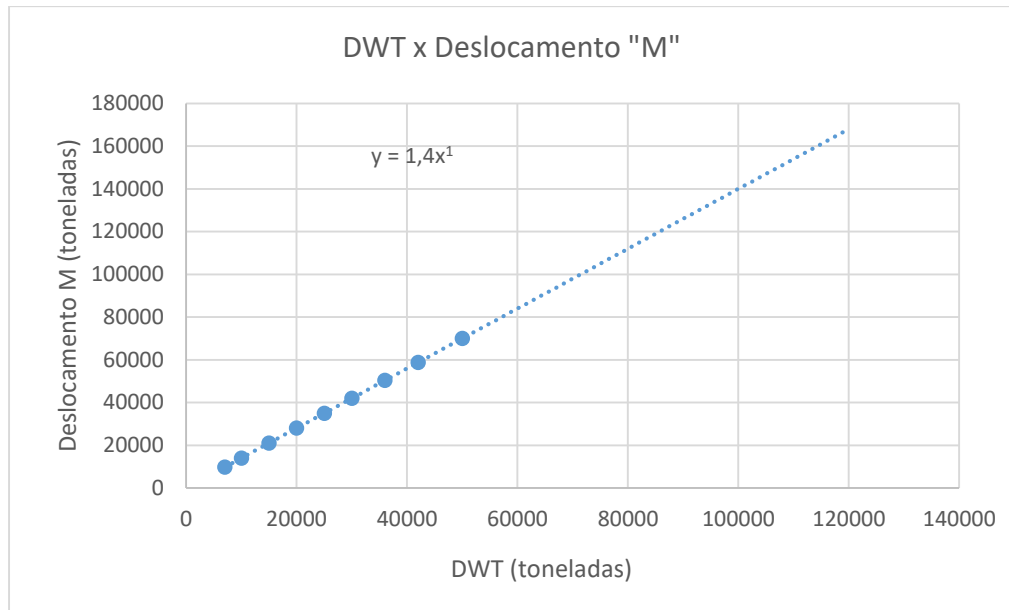


Figura 3.5.1- DWT x Deslocamento (Fonte: Autor).

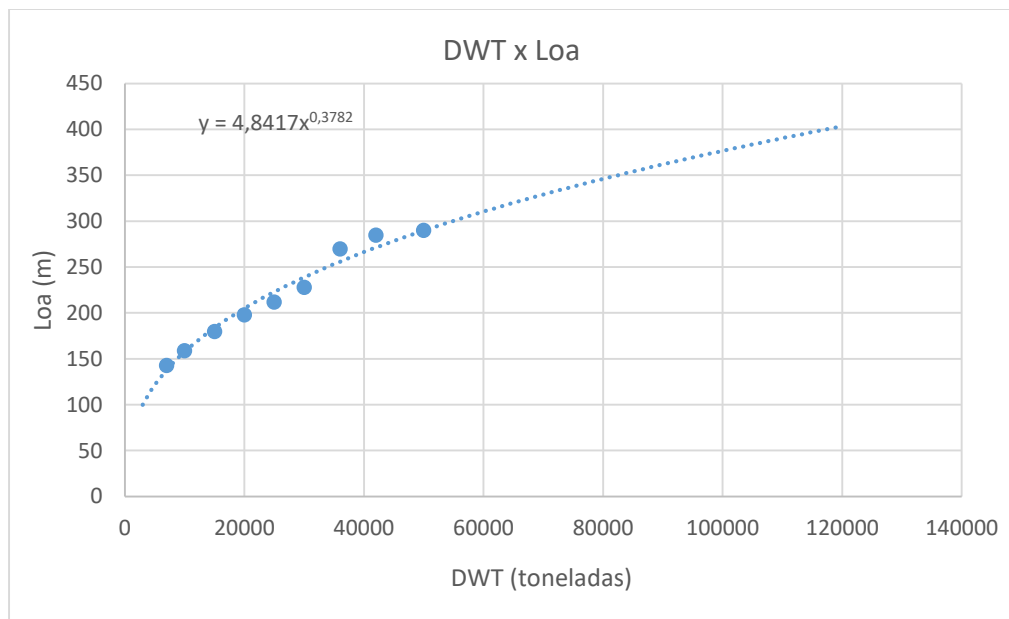


Figura 3.5.2- DWT x Loa (Fonte: Autor).

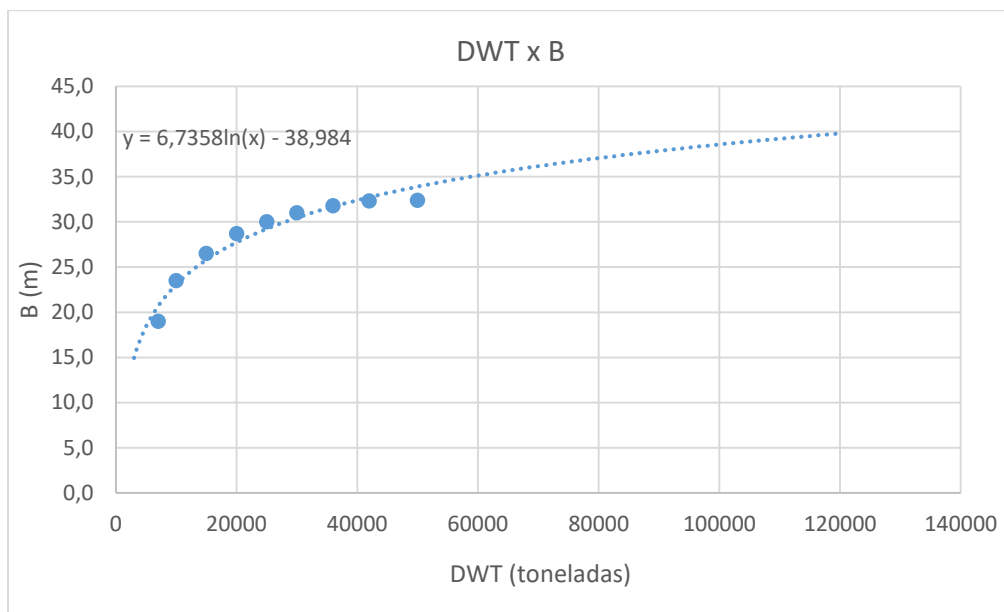


Figura 3.5.3- DWT x B (Fonte: Autor).

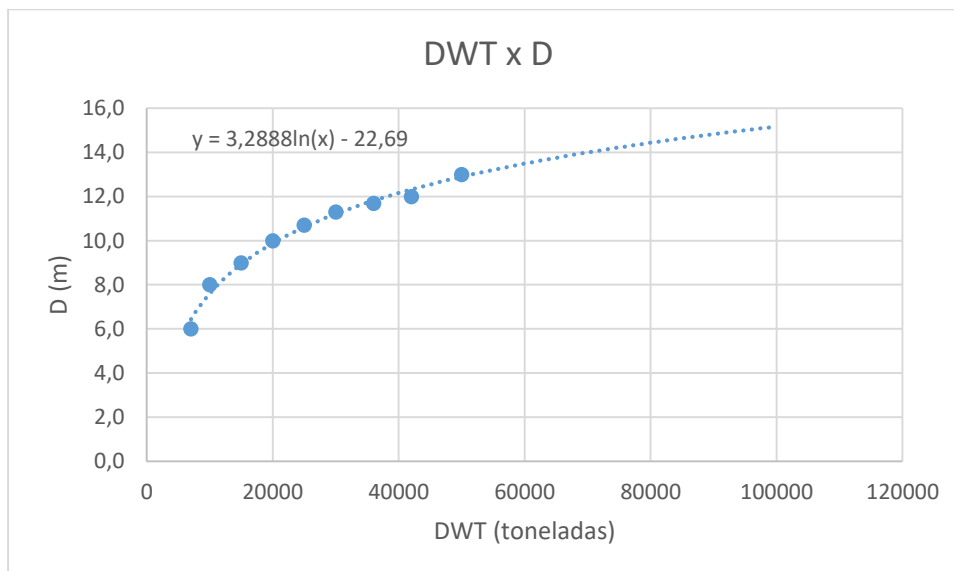


Figura 3.5.4- DWT x D (Fonte: Autor).

3.6 Parâmetros relacionados as embarcações EUA 2012

Para a obtenção dos parâmetros relacionados as embarcações (M , D , B , L_{oa} e L_{bp}), foram utilizados os dados coletados na própria Norma Alemã, de forma que tais parâmetros são obtidos em função do porte da embarcação (DWT).

Com a tabela 3.6.1 que relaciona o DWT com as características da embarcação, pode-se obter gráficos interpolados que geram, por exemplo a boca (B) do navio, em função do seu DWT. Para obtenção dos gráficos, e das equações, utilizou-se o software Excel.

Tabela 3.6.1- Parâmetros de navios Porta Contêineres (Fonte: Adaptado EUA 2012).

DWT (t)	Deslocamento "M" (t)	Loa (m)	Lbp (m)	B (m)	Calado Máximo (m)
200000	260000	399	379	59,0	16,0
188000	244400	396	378	53,6	16,0
160000	208000	397	379	56,4	16,0
150000	195300	386	369	51,0	15,5
140000	182700	376	359	48,4	15,5
130000	170000	365	348	45,6	15,0
120000	157400	353	337	45,6	15,0
110000	144700	342	324	42,8	14,5
100000	133000	329	312	42,8	14,5
90000	120000	315	300	42,8	14,5
80000	107000	300	284	40,3	14,5
70000	93600	285	270	40,3	14
60000	80400	268	254	32,3	13,4
50000	67200	250	237	32,3	12,6
40000	53900	230	217	32,3	11,8
30000	40700	206	194	30,2	10,8
25000	34100	192	181	28,8	10,2
20000	27500	177	165	25,4	9,5
15000	20900	158	148	23,3	8,7
10000	14200	135	126	20,8	7,6
7000	10300	118	109	20,1	6,8

As figuras a seguir representam uma extrapolação e uma formulação analítica do porte das embarcações (DWT), para cada um dos parâmetros necessários para o cálculo da energia de atracação.

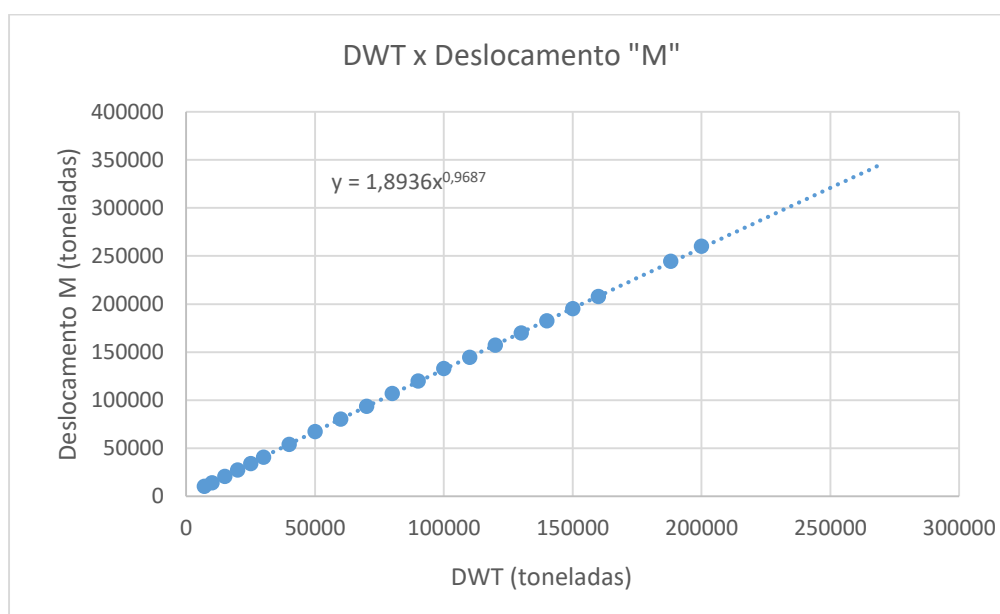


Figura 3.6.1- DWT x Deslocamento (Fonte: Autor).

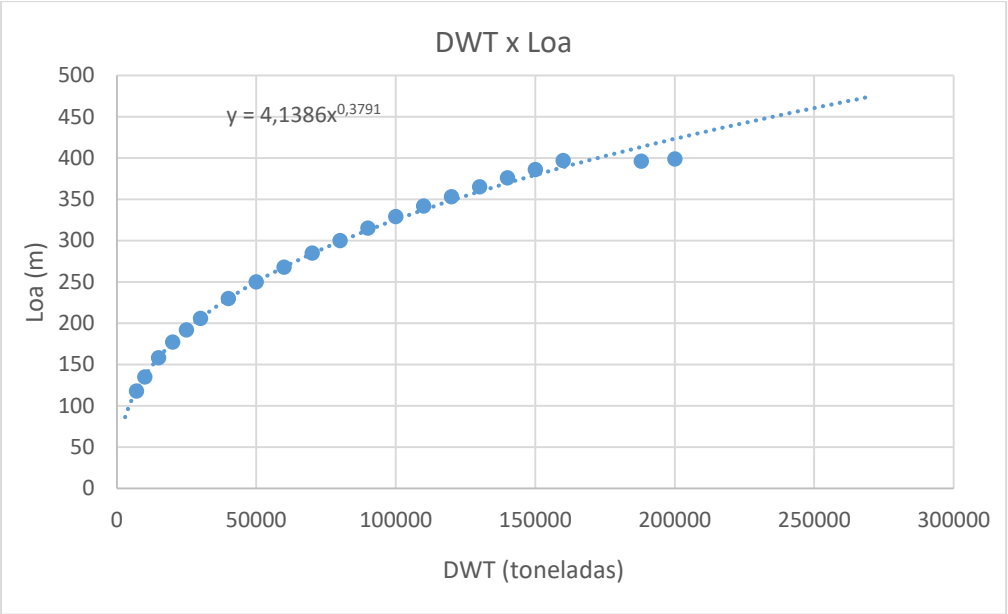


Figura 3.6.2- DWT x Loa (Fonte: Autor).

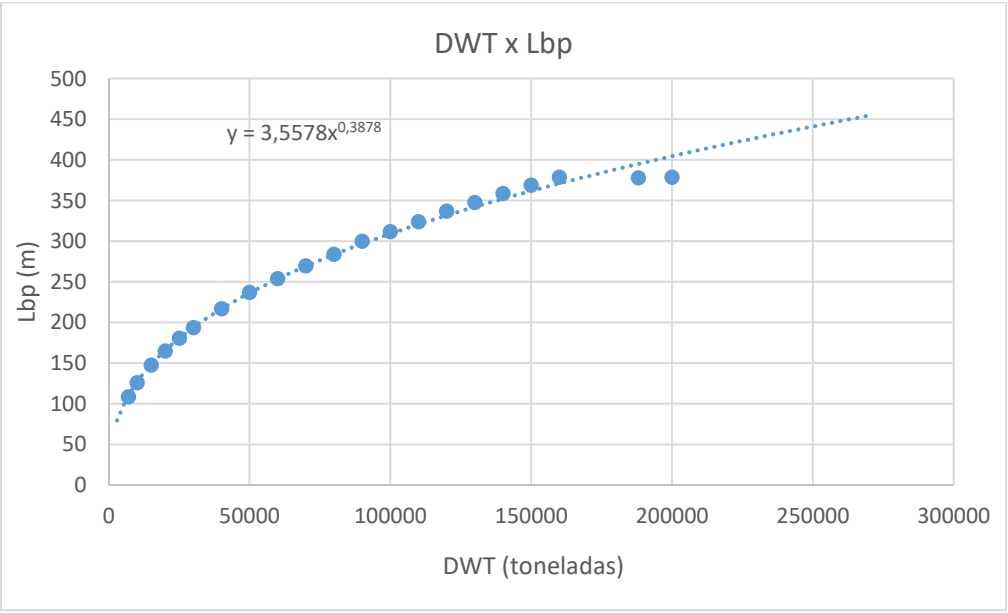


Figura 3.6.3- DWT x Lbp (Fonte: Autor).

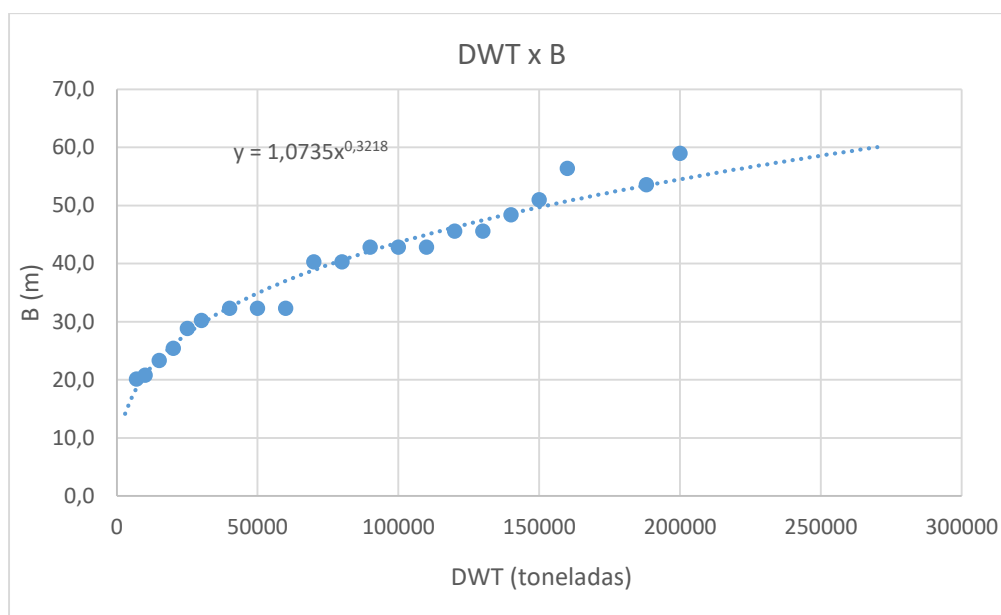


Figura 3.6.4- DWT x B (Fonte: Autor).

3.7 Velocidade de aproximação

Para a velocidade de aproximação, existe uma pequena variabilidade entre as normas, o que pode refletir bastante no resultado final, pois este é um parâmetro que está sempre ao quadrado nas formulações. Além disso, elas divergem, mesmo que minimamente, quando se trata de velocidade mínima que pode ser assumida. Para cada uma das normas, a velocidade de aproximação é determinada através de um gráfico, a partir desse gráfico e utilizando o software Engauge, obtém-se a equação da curva dos gráficos.

3.7.1 Norma britânica – BS 6349-4:2014

Para a obtenção da velocidade de aproximação pela norma britânica, deve-se consultar o gráfico, que determina a velocidade de aproximação com base no DWT de cada navio e o grau de abrigo do terminal. A norma ainda adverte, que embora baseado em observações, a Figura abaixo fornece velocidades de aproximação para grandes navios que podem facilmente ser excedido em condições adversas. Onde houver correntes cruzadas desfavoráveis, podem ocorrer velocidades de atracação de até 0,25m/s.

Utiliza-se então a figura 2.5.2 para a geração de uma equação que determine a velocidade de atracação do navio através do parâmetro deslocamento de água. A partir da figura, elaborou-se um gráfico, e a partir do gráfico, uma equação.

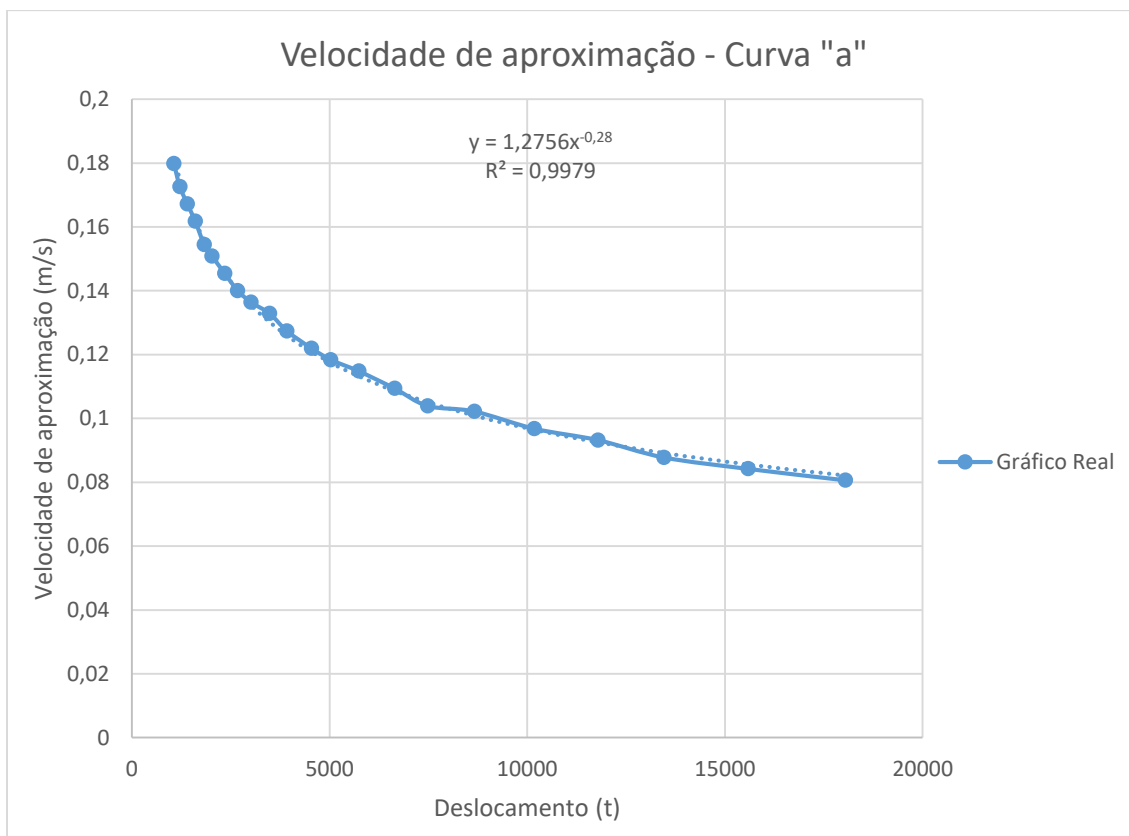


Figura 3.7.1- Velocidade de aproximação - curva "a" (Fonte: Autor).

A linha pontilhada representa a linha de tendência, ou seja, a representação da equação para determinação da velocidade, conforme abaixo:

$$V = 1,2756 \cdot W^{-0,28} \quad (34)$$

Utilizando a equação acima, pode-se então calcular para qualquer navio, a sua velocidade de embarcação, para o presente caso em estudo.

3.7.2 Norma Brasileira – NBR 9782:1987

Pode-se observar que para navios maiores que 10.000 TPB, a velocidade de aproximação é sempre a mesma, dependendo do tipo de condição e aproximação. O tipo de acesso não irá fazer diferença, pois para navios maiores, o valor é o mesmo tanto para a condição difícil, quanto para a favorável.

A norma considera um valor constante para navios com DWT maior que 10.000, se tornando então um parâmetro fixo, pois nesse estudo não foi observado navios de menor porte atracando no terminal.

3.7.3 Norma Espanhola – ROM 0.2-90

Para a obtenção da velocidade de aproximação pela norma espanhola, se tem duas opções, que dependerão de diversos fatores relacionados tanto a embarcação, quanto as condições de navegação, auxílio na atracação e condições dos ventos, correntes e ondas. As opções estão representadas nas figuras 2.6.1 e 2.6.2.

Para o presente estudo, se utilizará a figura 2.6.1 e as condições favoráveis, ventos, correntes e ondas moderados, visto que o cais está protegido.

Utiliza-se então a figura 2.6.1 para a geração de uma equação que determine a velocidade de atracação do navio através do parâmetro deslocamento de água. A partir da figura, elaborou-se um gráfico, e a partir do gráfico, uma equação.

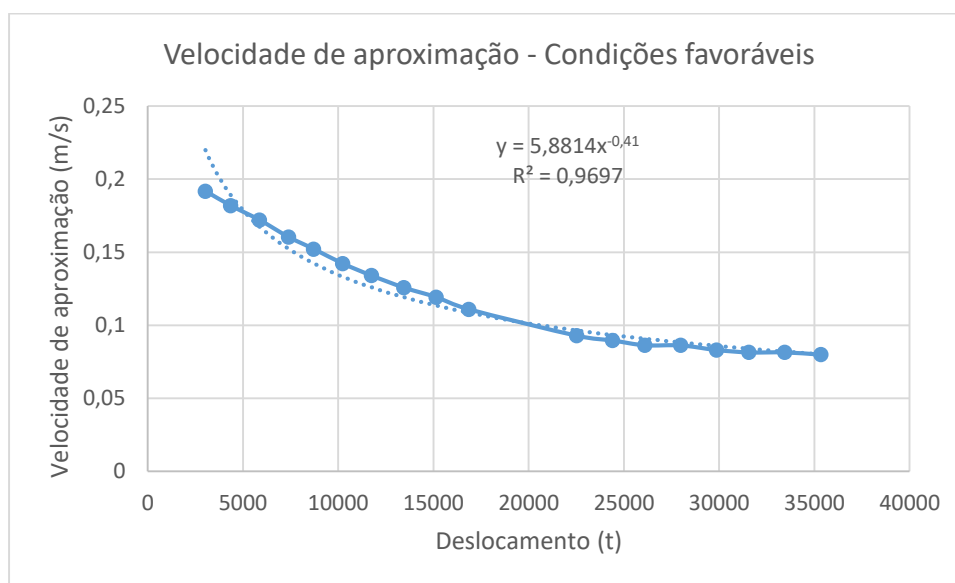


Figura 3.7.2- Velocidade de aproximação - Condições favoráveis (Fonte: Autor).

A linha pontilhada representa a linha de tendência, ou seja, a representação da equação para determinação da velocidade, conforme a seguir:

$$V = 5,8814 \cdot \Delta^{-0,41} \quad (35)$$

Utilizando a equação acima, pode-se então calcular para qualquer navio, a sua velocidade de embarcação, para o presente caso em estudo.

3.7.4 Norma alemã - EUA 2012

A norma alemã usa os mesmos critérios utilizados pela norma espanhola, utilizando os mesmos gráficos e mesmas considerações. Pode-se considerar utilizar a mesma equação para as duas normas.

4 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE MONTE CARLO

Utilizando a figura 2.8.4 e a tabela 2.8.2 para o presente estudo, 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.

Tendo a ciência de quais variáveis são fixas ou aleatórias, conforme exposto no item anterior, calcula-se “N” respostas para os sistemas, onde “N” é o número de simulações. Adota-se um valor de “N” igual a 10.000, visto que não se sabe se será suficiente ou não, essa questão será analisada no capítulo de resultados e discussões. Os sistemas são as formulações para a obtenção dos esforços de atracação para cada uma das normativas e recomendações.

Para cada uma dessas simulações se terá apenas uma resultante final, que será a energia de atracação, para cada uma das normas e recomendações. Juntando os resultados obtidos nas normas brasileira, britânica, recomendações espanholas e alemãs tendo então, 40.000 resultados, os quais podemos fazer diversas análises probabilísticas, além de comparações de resultados.

5 PONTOS DE PROJETO

Os pontos de projeto são aqueles calculados de uma forma determinística, ou seja, retirando os valores das tabelas das normas, valores reais do navio, como seu peso e suas dimensões. Para o navio de projeto, considerou-se as características da maior embarcação que o porto recebeu no decorrer do tempo analisado. Para este caso, diferente da amarração, não se têm as variáveis ambientais envolvidas.

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 demonstrados na figura 5.1.

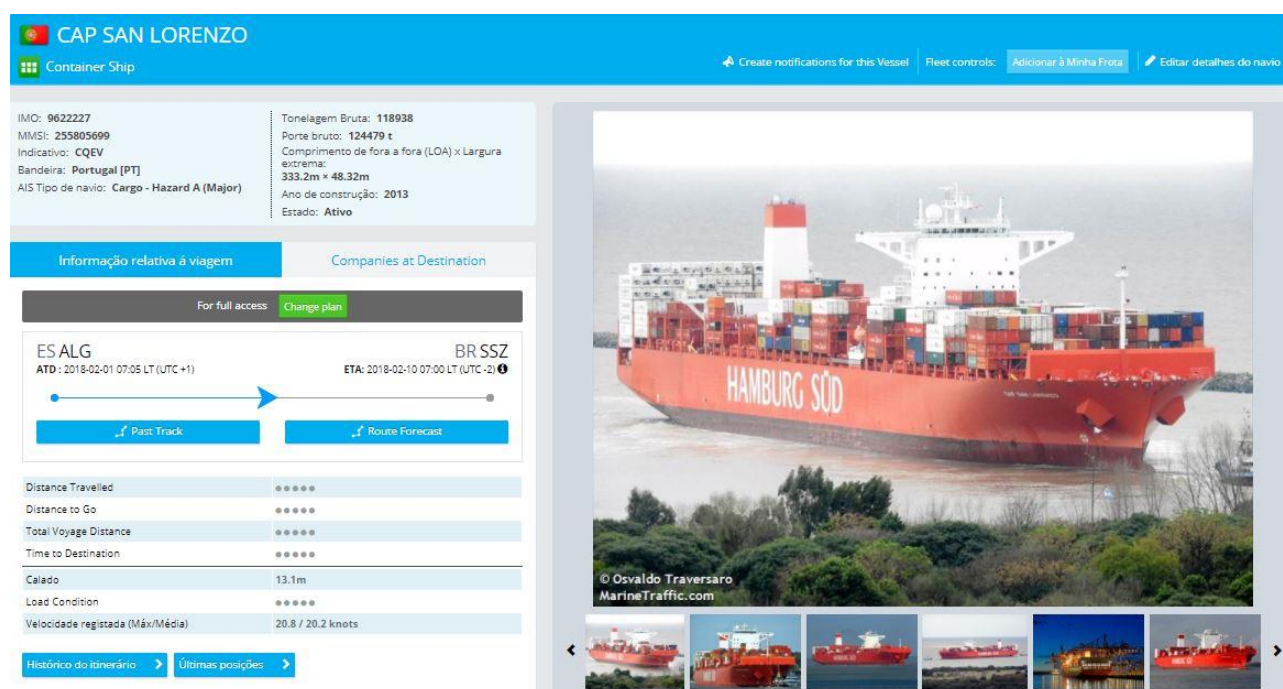


Figura 5.1 - Embarcação San Lorenzo

(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 ($D_{máx}$), valem 124479 toneladas, 333,2 metros, 48,32 metros e 13,1 metros.

O restante dos parâmetros da embarcação, que não são expostos na figura 5.1, são obtidos através das formulações apresentadas ao longo do presente trabalho.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente, é muito importante avaliar a aplicabilidade do método de Monte Carlo, então, obtém-se os valores de média móvel e média móvel do desvio padrão para a energia de atracção para cada uma das normas e recomendações usadas. As figuras 6.1 e 6.2 expressam se o número de simulações adotado é adequado tanto para as médias móveis quanto para o desvio padrão das médias móveis.

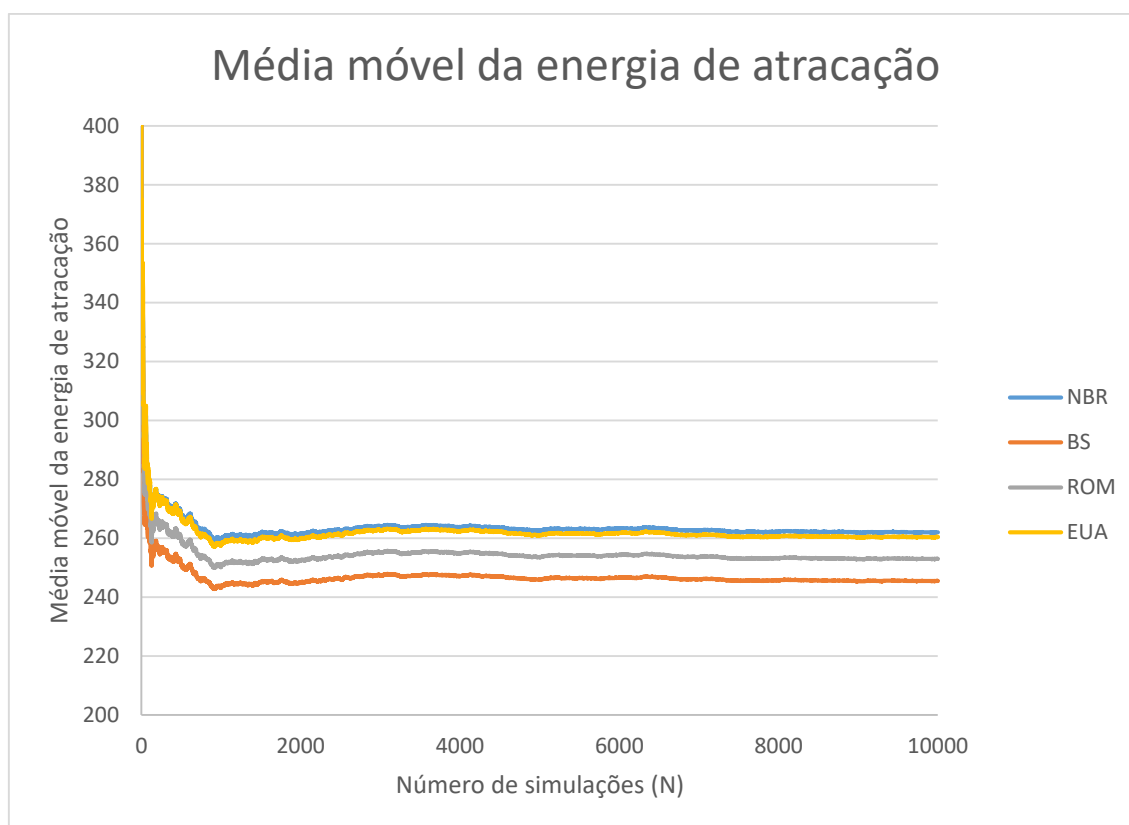


Figura 6.1 - Comparação da média móvel da energia de atracção entre as normas (Fonte: Autor).

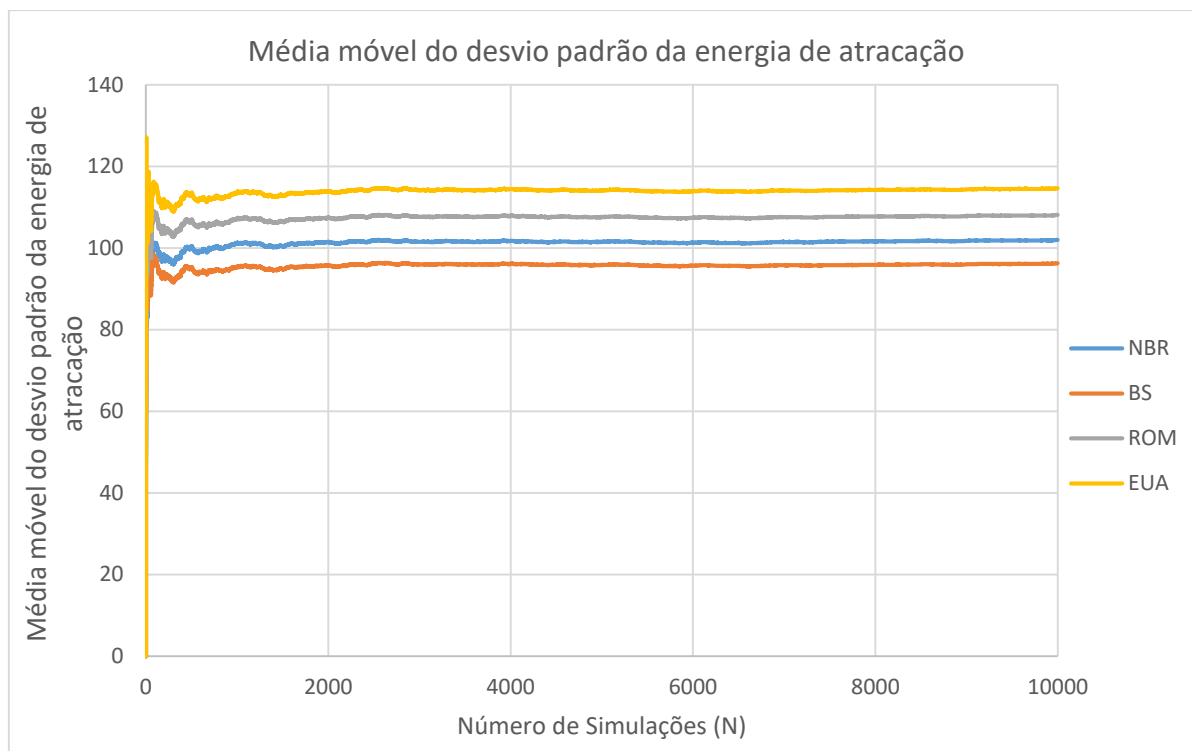


Figura 6.2 - Comparação da média móvel do desvio padrão da energia de atracação entre as normas (Fonte: Autor).

As figuras 6.1 e 6.2 demonstram que os valores convergiram após cerca de 4000 simulações, ou seja, o valor adotado de $N=10.000$ é satisfatório para a realização do estudo. Pode-se também observar uma relação muito parecida na curva dos gráficos.

As tabelas 6.1 e 6.2 mostram o resumo do resultado do parâmetro aleatório de entrada e saída, que no caso é o porte da embarcação (DWT) e a energia de atracação, expondo a média, desvio padrão e a distribuição de probabilidade que melhor atende.

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

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

Variáveis aleatórias	Parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias		
	μ_x	σ_x	Distribuição de Probabilidade
Energia de atracação (NBR 9782:1987)	262,6	101,55	Beta
Energia de atracação (BS 6349-4:2014)	245,95	95,87	Beta

Energia de atracação (ROM 0.2-90)	253,6	107,6	Error
Energia de atracação (EUA 2012)	261,01	114,1	Gen. Pareto

Vale salientar que os demais parâmetros que dependem do porte da embarcação variam, como por exemplo a velocidade de atracação e os coeficientes que levam em conta a embarcação, contudo, não estão expostos na tabela 6.1.

O gráfico 6.2 mostra a relação entre a energia de atracação para diferentes normas, Norma Brasileira (NBR 9782:1987), Norma Britânica (BS 6349-4:2014), Norma Alemã (EUA 2012) e Norma Espanhola (ROM 0.2-90), com os respectivos pontos de projeto, para os diferentes casos.

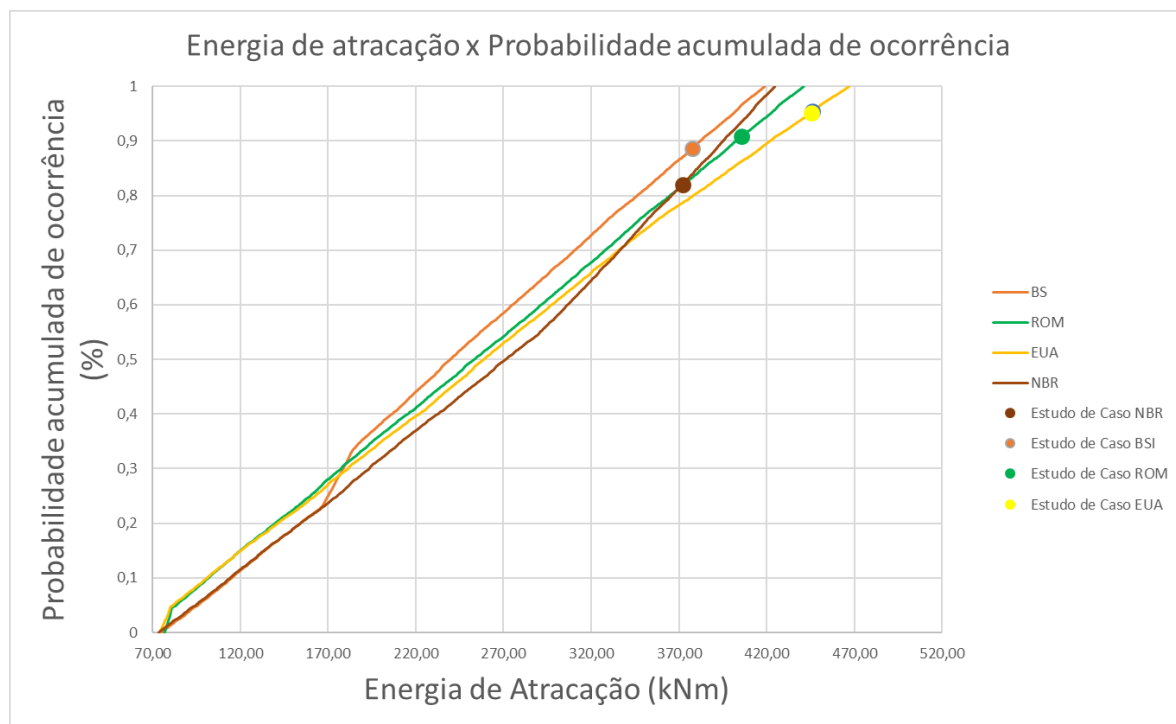


Figura 6.3 - Probabilidade acumulada de ocorrência da energia de atracação para as normas BS, NBR, ROM, EUA e seus pontos de projeto (Fonte:Autor)

Ao analisar a energia de atracação de todas as normas e recomendações, obtidas pelo Método de Monte Carlo, verifica-se que os valores em geral estão bem próximos, visto que as linhas estão praticamente sobrepostas umas com as outras. Vale ressaltar, que estes valores são da energia de atracação de projeto para cada uma das recomendações, sem levar em conta o coeficiente de segurança que elas trazem. O que será demonstrado posteriormente.

As energias de atracação de cálculo apresentam os valores máximos de cada, por ordem decrescente da EUA, ROM, NBR e por último a BSI, com valores 467 kNm, 441,11 kNm, 424,70

kNm e 418,86 kNm respectivamente. Já os valores de projeto para a energia de atracação são iguais a 445,51 kNm para a EUA, 405,43 kNm para a ROM, 377,57 kNm para a BSI e 371,99 kNm para a NBR.

As probabilidades acumuladas de ocorrência dos pontos de projeto (confiabilidade) expostos nas figuras acima, perante os valores apresentados pelo Método de Monte Carlo para as normas NBR, BSI, ROM e EUA, valem respectivamente 82,02%, 88,56%, 90,87% e 95,14%, ou seja, as probabilidades de falha, que correspondem ao complemento dos valores da confiabilidade, valem 17,98%, 11,44%, 9,13% e 4,86% respectivamente.

Um fato que chama a atenção são os resultados serem tão próximos, para as diferentes normas, isso se deve pelo fato de que todas as normas assumem um valor máximo para velocidade de aproximação para navios de grande porte, entre 0,08 m/s e 0,1 m/s, ou seja, o principal fator de cálculo, que tem grande influência na fórmula, por estar elevado ao quadrado, possui valores muito próximos entre todos os métodos. Além disso, nos coeficientes que dependem da embarcação, valores muito próximos foram obtidos, pois, o método de cálculo e considerações que são feitas são muito similares.

Conclui-se então, que a alteração do porte da embarcação do navio (DWT), tem uma grande influência na energia absorvida pelo berço, contudo, as normas e recomendações não divergem de uma forma importante. Sendo a alternativa mais confiável o método apontado pelas recomendações alemãs (EUA) com uma pequena chance de falha e a mais crítica, com quase 20% de falha a NBR, que pode ser explicado por ela ser uma norma extinta, e por suas formulações mais simplificadas, precisaria de algumas alterações para melhorar sua assertividade.

A figura 6.4 representa a energia de atracação majorada pelos coeficientes de segurança de cada norma e recomendação. Pode-se perceber que esse gráfico, altera um pouco as considerações acima, pelos diferentes coeficientes de majoração que são utilizados.

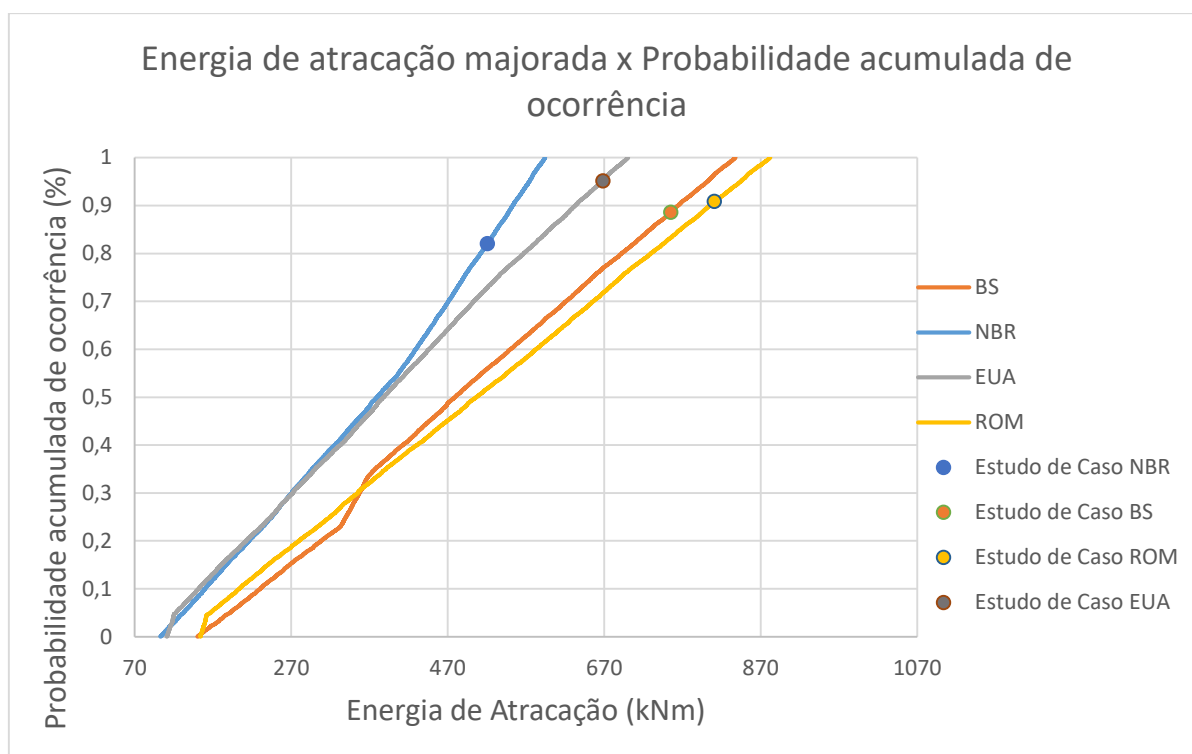


Figura 6.4 - Probabilidade acumulada de ocorrência da energia de atracção majorada para as normas BS, NBR, ROM, EUA e seus pontos de projeto (Fonte: Autor).

Na figura 6.4, temos a confiabilidade mais baixa novamente para a NBR, com 82,02% de assertividade, seguidos da BS, com 88,57% de chances de ocorrência, ROM com 90,87% de chances e novamente a EUA como a mais precisa, com 95,14%. Neste caso, o valor mais alto encontrado é pelo método das recomendações espanholas, mesmo tendo uma maior chance de falha que a EUA.

7 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que mesmo que a norma NBR 9782:1987 já cancelada, tenha obtido uma representatividade relativamente boa comparado as outras normas, considerando que ela calcula os coeficientes de uma forma um pouco mais simplificada, além de muitas vezes utilizar tabelas ao invés de gráficos. Esta simplificação afeta, mas não compromete os resultados. Deve-se usar com cautela, ou procurar atualizações em outras normas, o que pode ser a melhor opção.

Observa-se que todas as normas utilizam muita cautela no cálculo da velocidade de aproximação das embarcações, visto que este parâmetro, é o maior influente na resultante da energia de atracação. As normas limitam esse valor e ressaltam, os valores podem ser maiores que os esperados, dependendo das condições de ondas ventos e correntes.

Para o caso em específico, terminal do cais do TECON, temos uma condição abrigada para a atracação, que limita bastante os valores da velocidade. No caso de um cais off-shore por exemplo, esses valores de velocidade teriam uma variação bem maior, de norma para norma, podendo mudar o resultado final visto neste estudo. Sendo essa, uma sugestão para continuação deste trabalho.

As normas mostram uma resultante semelhante, embora mudem alguns detalhes nos seus cálculos e considerações, não afetaram consideravelmente o resultado final. Percebe-se uma diferença maior quando o fator de majoração é incluído nos cálculos. Para este caso em específico, percebe-se uma equivalência maior entre as normas ROM 0.2-90 e a BS 6349-4:2014.

Fazendo uma análise dos valores de projetos e sua probabilidade de falha, é possível dizer que a norma mais segura para se utilizar é a norma Alemã EUA 2012, sendo a mais confiável tanto no cálculo com o coeficiente de majoração, quanto no cálculo sem o coeficiente de majoração.

A realização de estudos baseados em valores reais 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.

8 REFERÊNCIAS

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. **Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental**. 2ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2009

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

ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários. **Relatório de atividades 2014**. Brasília, 2015

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).

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.

BRITISH STANDARD INSTITUTE (BSI). **BS 6349-4 Maritime structures - Part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems**. London, 2014.

BROLSMA et al (1977), **Paper on Fender Design and Berthing Velocities**. In: PIANC 1977

CEM – **Coastal engineering manual**. Departament of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington DC. EM 1110-2-1100. 2002.

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 requisitos 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.

FANTI. FÁBIO DOLLINGER. **Concepção, métodos construtivos e dimensionamento de terminais para contêineres**. 2007. 171 f. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

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.

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

LEAL, Miguel de Mira Godinho Grego. **Dimensionamento de Defensas Marítimas**. 2011. 151 f. Dissertação de Mestrado – Universidade do Porto, Porto – Portugal, 2011.

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

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).

Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways – EAU 2012 (Alemanha), 2012.

ROM (1990): **Recomendaciones para Obras Maritimas. (Englische Fassung), Maritime Works Recommendations (MWR): Actions in the design of maritime and Harbor Works (ROM 0.2-90)**, Ministerio de Obras Publicas y Transportes, Madrid.

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

SHORE PROTECTION MANUAL. **US Army Engineer Waterways Experiment Station**, U.S. Government Printing Office, Washington, DC. ed. 4, vol. 2. 1984.

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.

VERSTEEGT, G., 2013. **Berthing loads in structural design. Validation of partial factors**. Dissertação de Mestrado, Delft University Technology.

VIEGAS, C. H. H., 2015. **Análise dos esforços em estacas de um cais de contêineres de paramento aberto**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, FURG – Universidade Federal do Rio Grande

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.