



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CRISTIANO COMIN

**ESTRUTURAS PORTUÁRIAS – DISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS NA
INFRAESTRUTURA DEVIDOS À AMARRAÇÃO E ATRACAÇÃO DE
EMBARCAÇÕES**

Belém – PA

2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CRISTIANO COMIN

**ESTRUTURAS PORTUÁRIAS – DISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS NA
INFRAESTRUTURA DEVIDOS À AMARRAÇÃO E ATRACAÇÃO DE
EMBARCAÇÕES**

Dissertação submetida à Banca Examinadora aprovada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Estruturas e Construção Civil, orientada pelo Professor Remo Magalhães de Souza, Ph.D.

Belém – PA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Comin, Cristiano, 1986-

Estruturas portuárias: distribuição de esforços na infraestrutura devidos à amarração e atracação de embarcações / Cristiano Comin.- 2015.

Orientador: Remo Magalhães de Souza

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2015.

1.Ancoradouros 2.Estruturas marítimas semi-submersíveis - ancoradouros 3.Amarração de navios 4.Ancoragem (Engenharia de estruturas) 5.Portos I.Título

CDD 22.ed.627.22



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ESTRUTURAS PORTUÁRIAS – DISTRIBUIÇÃO DE ESFORÇOS NA
INFRAESTRUTURA DEVIDOS À AMARRAÇÃO E ATRACAÇÃO DE
EMBARCAÇÕES**

AUTOR:

CRISTIANO COMIN

Dissertação submetida à Banca Examinadora aprovada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Estruturas e Construção Civil.

APROVADO EM: 26 de Março de 2015

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Remo Magalhães de Souza, Ph.D
Instituto de Tecnologia - UFPA
Orientador

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo
PPGEC – UFPA
Membro Interno

Prof. Hito Braga de Moraes, Ph.D
Instituto de Tecnologia - UFPA
Membro Externo

Prof. Regina Augusta Campos Sampaio, Ph.D
Instituto de Tecnologia - UFPA
Membro Externo

Prof. Dr. João Batista Marques de Sousa Junior
PEC - UFC
Membro Externo

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo sobre as ações de projeto a serem consideradas no dimensionamento e análise de estruturas portuárias, no tocante às solicitações devidas à amarração e atracação de embarcações. O estudo buscou fazer um levantamento sobre o assunto na literatura nacional e internacional, com ênfase nas normas técnicas, em especial a NBR 9782/1987, a norma inglesa BS 6349 e a norma alemã EAU 2004, além das recomendações da Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC 2002) e de Mason (Jayme, 1982) em sua publicação Obras Portuárias. Foram estudados os métodos de cálculo dos esforços devido à amarração e atracação de embarcações segundo as diversas referências. Posteriormente realizou-se uma análise comparativa entre os resultados dos esforços obtidos com cada método de cálculo em um estudo de caso de uma estrutura, para o qual é analisada a sua infraestrutura. Os resultados demonstraram uma notável dispersão entre os métodos utilizados nos cálculos, evidenciando uma grande influência do código normativo utilizado para as análises no dimensionamento de estruturas portuárias.

Palavras-chave: Estruturas Portuárias, Amarração, Atracação, Embarcações

ABSTRACT

This work presents a study on the design loads due to mooring and berthing of vessels, regarding the design and analysis of port structures. A literature review was conducted, with emphasis on technical standards and codes, encompassing both national and international publications. More specifically, this study considered design recommendations of the Brazilian Standard NBR 9782/1987, the British Standard BS 6349 and the German Standard EAU 2004, in addition to the recommendations of the Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC 2002) and the analysis procedure proposed on the book “Port Works” by Jayme Mason (1982). The design procedures proposed by these different references regarding the computation of forces due to mooring and berthing of vessels were evaluated in this work. Later, a case study of a port’s substructure was carried on, and a comparative analysis of the results, obtained with each recommendation of the aforementioned publications, was performed. Results showed a remarkable dispersion, revealing a strong influence of the standard to be used in the design loads of port structures.

Keywords: Maritime Facilities, Mooring, Berthing, Vessels

Lista de Figuras

Figura 1– Cargas generalizadas e fatores ambientais que afetam o projeto de um píer	15
Figura 2 – Principais dimensões de um navio	29
Figura 3 – Principais movimentos de um navio	30
Figura 4 – Definição das áreas de incidência de vento no navio	32
Figura 5 - Definição das áreas de incidência de corrente no navio.....	33
Figura 6 – Ilustração do ângulo de incidência do vento no navio segundo NBR 9782:1987	34
Figura 7 – Coeficientes de força devido ao vento para navios de carga seca e pequenos petroleiros – BS 6349-1:2000	39
Figura 8 - Coeficientes de força devido ao vento para grandes petroleiros – BS 6349-1:2000.....	40
Figura 9 - Coeficientes de força devido ao vento para típicos navios de contêineres – BS 6349-1:2000	41
Figura 10 – Área da seção longitudinal do navio projetada acima do nível d’água típica para navios petroleiros – BS 6349-1:2000	42
Figura 11 – Comprimento e área da seção longitudinal do navio projetada acima do nível d’água típica para navios de contêineres – BS 6349-1:2000.....	42
Figura 12 – Coeficientes de força de arrasto devido a corrente para vários tipos de navios e águas profundas – BS 6349-1:2000.....	44
Figura 13 - Fatores de correção da profundidade para as forças de arrasto transversal devido à corrente, C_{CT} – BS 6349-1:2000	45
Figura 14 - Fatores de correção da profundidade para as forças de arrasto longitudinais devido à corrente, C_{CL} , para navios porta-contêineres – BS 6349-1:2000	46
Figura 15 – Ilustração dos principais modos de atracação	49
Figura 16 – Sistema de eixos x, y, z	50
Figura 17 – Idealização do sistema navio (Mason)	54
Figura 18 – Esquema representativo da atracação com atrito tangencial	56
Figura 19 – Esquema representativo da atracação velocidade normal v_p	58
Figura 20 - Esquema representativo da atracação com atrito tangencial em nova configuração dos eixos.....	60
Figura 21 – Nova apresentação da atracação com atrito tangencial	62
Figura 22 – Atracação frontal e lateral	63
Figura 23 – Ilustração do segundo impacto	66
Figura 24 – Exemplos de diagramas de uma defesa	73
Figura 25 – Casos limites da curva carga-deslocamento para defensas	74
Figura 26 – Exemplos de diagramas de carga e descarga em uma defesa	75
Figura 27 – Diagrama de energia da uma defesa tipo cônica	76
Figura 28 – Dimensões características da uma defesa tipo cônica	77
Figura 29 – Simulação computacional da deformação da uma defesa tipo cônica	77
Figura 30 – Velocidades de aproximação – BS 6349-4-1994 (Brolsma <i>et al</i> (1977) <i>apud</i> PIANC (2002))	83
Figura 31 - Velocidades características de atracação segundo BS 6349-4:2014.....	83

Figura 32 – Velocidades de aproximação do navio na atracação recomendadas pela EAU 2004 – Com assistência de rebocador.....	84
Figura 33 - Velocidades de aproximação do navio na atracação recomendadas pela EAU 2004 – Sem assistência de rebocador.....	85
Figura 34 – Definição da distância R utilizada no cálculo do C_E	86
Figura 35 – Fator C_E em função de Φ e da relação R/L atracação.....	87
Figura 36 – Definição do coeficiente de amortecimento do casco.....	88
Figura 37 – Ilustração do coeficiente de atracação.....	89
Figura 38 – Ilustração do espaçamento entre defensas.....	91
Figura 39 – Fluxograma para projeto de sistemas de defensas segundo PIANC (2002).....	93
Figura 40 – Exemplo de aplicação de defensas cilíndricas axiais.....	96
Figura 41 – Exemplo de aplicação de defesa tipo PI.....	96
Figura 42 – Exemplo de aplicação de defensas tipo cônicas.....	97
Figura 43 – Exemplo de aplicação de defesa tipo modular em canto.....	97
Figura 44 – Exemplo de defesa de gravidade com operação na vertical.....	98
Figura 45 – Exemplo de aplicação de defensas tipo pneumáticas.....	98
Figura 46 – Detalhe de um cabeço de amarração em operação.....	100
Figura 47 – Gancho de desengate rápido.....	101
Figura 48 – Detalhe de uma defesa cilíndrica axial afixada em uma pestana.....	101
Figura 49 – Desenho de projeto de uma pestana em um píer fluvial.....	102
Figura 50 – Locação da linha de dolphins – detalhe dos afastamentos.....	103
Figura 51 - Caso de carga 1 na amarração do navio.....	105
Figura 52 - Caso de carga 2 na amarração do navio – Configuração 1.....	105
Figura 53 - Caso de carga 2 na amarração do navio – Configuração 2.....	105
Figura 54 - Caso de carga 3 na amarração do navio.....	106
Figura 55 - Caso de carga 4 na amarração do navio.....	106
Figura 56 - Caso de carga 5 na amarração do navio.....	107
Figura 57 – Profundidade média do rio Amazonas na linha de dolphins.....	108
Figura 58 – Inclinação vertical dos cabos para a situação do navio em carga com NA máximo.....	108
Figura 59 - Inclinação vertical dos cabos para a situação do navio em carga com NA mínimo.....	109
Figura 60 – Inclinação vertical dos cabos para a situação do navio vazio com NA máximo.....	109
Figura 61 - Inclinação vertical dos cabos para a situação do navio vazio com NA mínimo.....	110
Figura 62 - Simulação da atracação do navio nos dolphins.....	111
Figura 63 – Corte transversal na situação do navio vazio com NA máx.....	111
Figura 64 - Corte transversal na situação do navio em carga com NA mín.....	112
Figura 65 - Esforços de amarração p/ NA Máx, por método.....	113
Figura 66 - Esforços de amarração p/ NA Mín, por método.....	113
Figura 67 - Cargas máximas nos Dolphins devido à amarração para cada inclinação de cabo ou posição, por método.....	114
Figura 68 - Detalhamento das forças devido ao vento e à corrente p/ NA máx.....	116

Figura 69 - Detalhamento das forças devido ao vento e à corrente p/ NA mín	116
Figura 70 – Energia de atracação calculada por método	117
Figura 71 – Forças de reação devidas à atracação por método	117
Figura 72 – Planta de forma do dolfin de atracação (cotas em cm).....	122
Figura 73 – Imagem do modelo do dolfin no SAP 2000	123
Figura 74 – Esforços axiais nas estacas para cada método	124
Figura 75 – Momentos M2 nas estacas para cada método	125
Figura 76 - Momentos M3 nas estacas para cada método	125
Figura 77 – Esforços de amarração X TPB do Navio.....	127
Figura 78 – Energia de atracação nominal X TPB do Navio.....	128

Lista de tabelas

Tabela 1 – Campo de atuação da Engenharia de Estruturas Portuárias	12
Tabela 2 - Considerações Gerais para projeto de instalações portuárias	14
Tabela 3 – Comparação entre os principais modais de transporte	16
Tabela 4 – Dimensões de navios graneleiros – Limite de confiabilidade de 95%	27
Tabela 5 - Valores do coeficiente de forma k segundo NBR 9782:1987.....	35
Tabela 6 - Valores de esforços mínimos em dispositivos de amarração segundo NBR 9782:1987 (unid: kN)	37
Tabela 7 - Cargas nominais nos cabeços de amarração e guinchos para navios com até 20.000 TPB - BS 6349-1:2000	46
Tabela 8 - Valores de esforços mínimos em cabeços de amarração segundo EAU 2004.....	47
Tabela 9 – Valores de l e c	64
Tabela 10 – Valores de μ e c_u	64
Tabela 11 - Valores de γ e c_{u0}	65
Tabela 12 – Equações para o coeficiente de massa adicional.....	71
Tabela 13 – Velocidade de aproximação de navios na atracação segundo Mason (1982)	72
Tabela 14 - Performance de defensas tipo cônicas (em kN e m).....	76
Tabela 15 - Valores mínimos da velocidade de aproximação do navio para cálculo da energia de atracação segundo a NBR 9782:1987 (em m/s).....	79
Tabela 16 - Valores dos coeficientes de atrito do aço com outros materiais segundo a NBR 9782:1987	81
Tabela 17 – Alternativa para velocidades de aproximação sugeridas pela PIANC (2002) (em m/s)	84
Tabela 18 - Coeficientes de bloco típicos - BS 6349-4-1994	86
Tabela 19 - Valores de C_M propostos pela PIANC (2002)	88
Tabela 20 - Valores máximos admissíveis para pressão no casco do navio durante a atracação segundo PIANC (2002).....	89
Tabela 21 - Fatores de segurança para majoração da energia de atracação segundo PIANC (2002)	90
Tabela 22 – Coeficientes de atrito em função do tipo de material segundo BS 6349-4-1994	90
Tabela 23 – Cargas máximas nos Dolphins devido à amarração para cada inclinação de cabo ou posição, por método	114
Tabela 24 – Comparação entre os métodos em % - NA Máx.....	115
Tabela 25 - Comparação entre os métodos em % - NA Mín.....	115
Tabela 26 – Coeficientes de Forma para forças devidas ao vento	119
Tabela 27 – Coeficientes de Forma para forças devidas à corrente.....	120
Tabela 28 – Esforços máximos nas estacas para cada método (kN, kN.m).....	124

Sumário

RESUMO	3
ABSTRACT	4
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABELAS.....	8
SUMÁRIO.....	9
1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA / REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1 Normas	19
2.2 Livros.....	21
2.3 Monografias, Dissertações e Teses	22
2.4 Artigos em Periódicos e Anais de Eventos	23
3 MÉTODOS DE CÁLCULO DE ESFORÇOS DEVIDOS À AMARRAÇÃO E ATRACAÇÃO DE EMBARCAÇÕES EM INSTALAÇÕES PORTUÁRIAS	26
3.1 Principais dimensões e características das embarcações	26
3.2 Esforços Devidos à Amarração	30
3.2.1 Esforços de amarração segundo recomendações de MASON (1982)	30
3.2.1.1 Forças devido ao vento	31
3.2.1.2 Forças devido às correntes.....	32
3.2.2 Esforços de amarração segundo recomendações da NBR 9782:1987	33
3.2.2.1 Forças devidas ao vento.....	34
3.2.2.2 Forças devidas às correntes	35
3.2.2.3 Considerações sobre amarração das embarcações e avaliação dos esforços	36
3.2.3 Esforços de amarração segundo recomendações da BS 6349-1:2000.....	38
3.2.3.1 Forças devidas ao vento.....	38
3.2.3.2 Forças devidas à corrente	43
3.2.3.3 Considerações sobre a avaliação dos esforços.....	46
3.2.4 Avaliação dos esforços de amarração dos navios.....	46
3.3 Esforços devido à Atracação	47
3.3.1 Esforços de atracação segundo recomendações de MASON (1982).....	49
3.3.1.1 Conceitos da teoria do choque mecânico – Percussões	49

3.3.1.2	Choque de navios contra as instalações portuárias	53
3.3.1.3	Choque com atrito tangencial	56
3.3.1.4	Choque com rotação em torno do ponto de contato	60
3.3.1.5	Considerações gerais sobre as fórmulas de impacto	62
3.3.1.6	Possibilidade de um segundo impacto	65
3.3.1.7	Massa hidrodinâmica dos navios	69
3.3.1.8	Velocidades de aproximação e manobra	71
3.3.1.9	Requisitos a preencher pela defesa	72
3.3.2	Esforços de atracação segundo recomendações da NBR 9782:1987	77
3.3.2.1	Massa deslocada pelo navio (M_1)	78
3.3.2.2	Massa deslocada pelo navio (M_2)	78
3.3.2.3	Velocidade de aproximação do navio (V).....	79
3.3.2.4	Coeficiente de excentricidade (C_e)	79
3.3.2.5	Coeficiente de rigidez (C_r).....	80
3.3.2.6	Forças perpendiculares à linha de atracação.....	80
3.3.2.7	Forças paralelas à linha de atracação.....	80
3.3.2.8	Dimensionamento do sistema de defensas.....	81
3.3.3	Esforços de atracação segundo recomendações da BS, PIANC e EAU	81
3.3.3.1	Velocidade de aproximação do navio (V_B)	82
3.3.3.2	Coeficiente de excentricidade (C_E).....	85
3.3.3.3	Coeficiente de massa hidrodinâmica (C_M).....	87
3.3.3.4	Coeficiente de amortecimento (C_S).....	88
3.3.3.5	Coeficiente de atracação (C_C).....	89
3.3.3.6	Forças perpendiculares à linha de atracação.....	90
3.3.3.7	Forças paralelas à linha de atracação.....	90
3.3.3.8	Espaçamento entre defensas	90
3.3.3.9	Fluxograma para projeto de sistema de defensas.....	92
3.3.4	Principais tipos de defensas.....	94
3.3.4.1	Defensas elásticas	94
3.3.4.2	Defensas de gravidade	97
3.3.4.3	Outros tipos de defensas	98
3.3.4.4	Critérios de seleção das defensas.....	99
3.4	<i>Principais tipos de cais</i>	99
3.5	<i>Elemento de segurança na amarração e atracação</i>	100
4	APLICACAÇÃO DOS MÉTODOS – ESTUDO DE CASO	103
4.1	<i>Estudo de caso - Terminal de granéis vegetais sólidos</i>	103
4.2	<i>Análise comparativa dos métodos</i>	112
4.2.1	Resultados obtidos.....	112

4.2.1.1	Esforços devidos à Amarração	112
4.2.1.2	Esforços devidos à Atracação	117
4.2.2	Considerações sobre as diferenças entre os métodos	119
4.3	<i>Análise da sensibilidade da infraestrutura dos dolphins</i>	121
4.4	<i>Esforços de Amarração e Energia de Atracação X Porte do Navio</i>	126
5	CONCLUSÕES	129
5.1	<i>Proposta para Trabalhos Futuros</i>	130
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131
	APÊNDICE 1	134

1 INTRODUÇÃO

A construção de portos e cais encontra-se entre os primeiros grandes empreendimentos da civilização humana. Os antigos dispunham de um grande conhecimento de natureza intuitiva em suas obras portuárias, que, infelizmente, foi perdido no declínio dos impérios e na mudança das costas marítimas. As estruturas portuárias de madeira e pedra construídas a menos de cem anos atrás, gradualmente estão sendo substituídos por estruturas de concreto e aço, que têm estendido as instalações portuárias marítimas para águas mais profundas e em locais expostos. Mesmo assim, os projetistas de portos e cais ainda dependem fortemente do estudo de experiências passadas para refinar a sua análise e práticas de projetos contemporâneos (Gaythwaite, 2004, p. 1).

A engenharia de estruturas portuárias engloba o planejamento, projeto e construção de estruturas ancoradas fixas e estruturas flutuantes fixas ao longo de costas oceânicas e de grandes rios e lagos, além das obras da categoria *offshore*. A Tabela 1 apresenta uma visão geral dos tipos de estruturas envolvidas neste contexto.

Tabela 1 – Campo de atuação da Engenharia de Estruturas Portuárias

Engenharia de Estruturas Portuárias - Campo de Atuação			
	Obras costeiras	Portos e Cais	Offshore
Objetivo	Proteção da costa	Navegação, atracação e manutenção de embarcações	Extração de recursos naturais (petróleo e gás)
Tipos de Projetos	<ul style="list-style-type: none"> * Quebra-mares * Molhes e diques * Espigões * Paredões * Estabilização de encostas * Controle de cheias * Controle de emissão de poluentes 	<ul style="list-style-type: none"> * Dragagem: canais e bacias de evolução * Estruturas de portos e terminais * Estaleiros * Portos para pequenas embarcações * Ancoradouros 	<ul style="list-style-type: none"> * Plataformas fixas * Unidades de perfuração móveis * Ancoradouros * Tubovias submersas * Terminais <i>offshore's</i>
Subitens relacionados	<ul style="list-style-type: none"> * Monitoração costeira * Levantamento hidrológico * Desenvolvimento portuário 	<ul style="list-style-type: none"> * Bacias de evolução * Vias navegáveis interiores * Instalações portuárias industriais * Desenvolvimento portuário 	<ul style="list-style-type: none"> * Exploração * Bóias e sinalização <i>offshore</i> * Agitação do mar

Fonte: Gaythwaite, 2004, p. 4

Os portos são um dos pontos estratégicos mais importantes da economia de um país, uma vez que grande parte da produção em massa geralmente é escoada através deles (Amador

Júnior, 2006, p. 4). As estruturas portuárias são a ligação do transporte terrestre, rodoviário ou ferroviário, com o aquaviário, e nelas é necessário carregar e descarregar os navios com rapidez e eficiência. Alguns profissionais da área técnica dizem que geralmente não há uma ferrovia sem um porto, especialmente tratando-se em ferrovias destinadas predominantemente para transporte de cargas.

No projeto de uma estrutura portuária é necessária uma grande quantidade de informações para a concepção de uma solução que seja capaz de atender às demandas de movimentação de carga para a qual esta estrutura será projetada com eficiência e viabilidade técnica e econômica. Inicialmente, estas informações dependem, por sua vez, de algumas características gerais, destacando-se como as mais relevantes: (i) o tipo de carga a ser movimentada no porto/terminal; (ii) os tipos de embarcações que irão operar na área e (iii) as condições ambientais locais.

Para uma melhor compreensão e no intuito de contemplar todos os tipos de estruturas portuárias, sejam elas para portos organizados, terminais especializados ou de carga geral, doravante será utilizado o termo “instalação portuária” para fazer menção às estruturas citadas até o momento.

Os critérios de projeto de instalações portuárias devem ser estabelecidos após a consideração cuidadosa de vários requisitos operacionais, funcionais e de navegação, além das condições ambientais do local e as restrições físicas e legais. A Tabela 2 apresenta um resumo destas considerações.

A Figura 1 apresenta uma generalização das solicitações sob as quais a estrutura de uma instalação portuária está submetida, apresentando o exemplo de um píer. Dentre os elementos listados na Tabela 2, destaca-se a importância da avaliação das ações que os navios e embarcações podem exercer sobre estas estruturas, as quais são objeto de estudo deste trabalho e que se caracterizam essencialmente pelos esforços que os navios transmitem às instalações durante as manobras de atracação e os esforços de fixação dos mesmos, após a atracação.

Sob o primeiro aspecto, deve-se considerar o impacto que os navios exercem contra as instalações portuárias com a conseqüente transmissão da energia cinética do navio à estrutura e sua transformação em energia de deformação das estruturas e das defensas. Da equivalência entre a energia cinética de impacto dos navios e a energia de deformação, consideradas as diversas perdas e outros fatores que influem no processo, pode-se deduzir as forças de impacto para efeitos de dimensionamento das obras e defensas (Mason, 1982, p. 88).

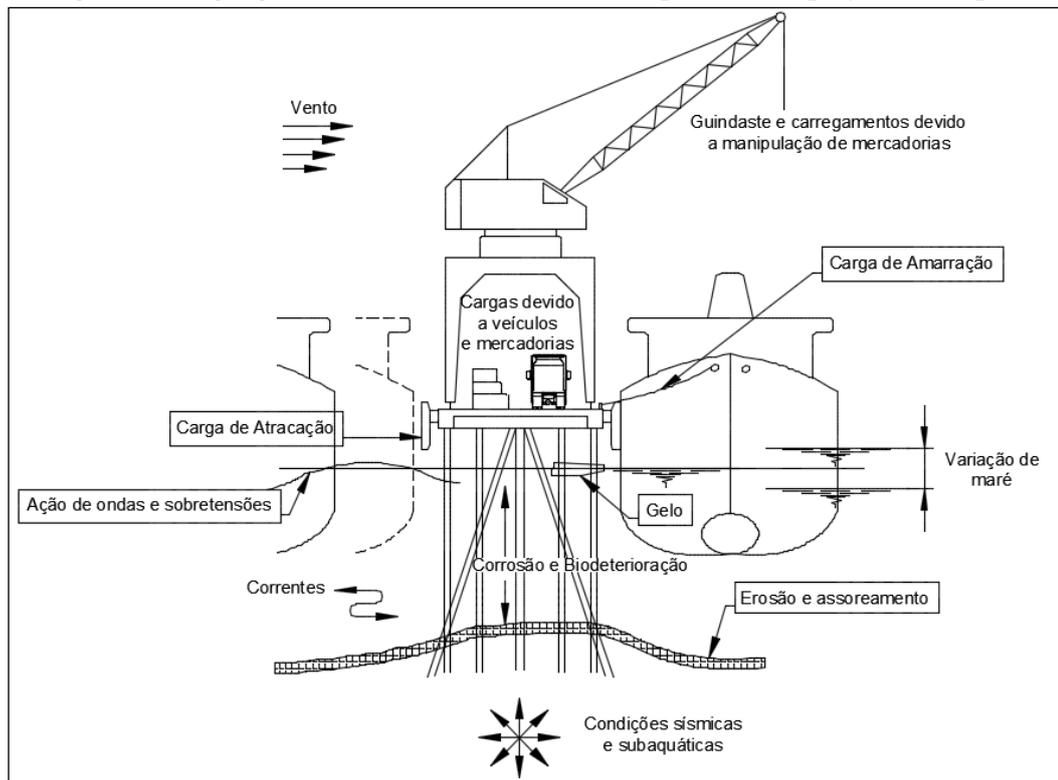
Tabela 2 - Considerações Gerais para projeto de instalações portuárias

Condições locais	<ul style="list-style-type: none"> • Topografia • Batimetria; Sondagens • Dados subterrâneos: histórico geológico, propriedades do solo, profundidade de rochas, etc. • Sismicidade
Condições Ambientais	<ul style="list-style-type: none"> • Meteorologia: normal e extrema, vento, precipitação pluvial, temperatura • Oceanografia/Fluviografia: ondas normais e extremas, maré, correnteza, gelo, propriedades físicas e químicas da água, <i>seiches</i> ou ondas portuárias, etc. • Frequência e probabilidade de tempestades
Considerações Operacionais	<ul style="list-style-type: none"> • Dados dos navios: tamanho, tipos, frequência e tempo de ocupação na atracação, requisitos de cargas e serviços • Dados de veículos: tamanho, tipos, capacidade, dimensões de operação (raio de giro, etc) • Vias férreas: guindastes, carregadores, ferrovias, capacidades de carga, pesos, bitola, velocidade, alcance e tempo de retorno, etc. • Equipamentos especiais: cabeços de amarração, guinchos, cabestrantes, braços de carga, linhas de produtos, etc. • Serviços e utilidades, acesso ao continente, sistema de proteção à incêndios e equipamentos de segurança, iluminação e segurança, energia elétrica, instalações hidráulicas. • Área para armazenamento de cargas
Considerações Funcionais	<ul style="list-style-type: none"> • Dragagem, correnteza e assoreamento, revolução do leito devido a hélice • Tráfego de navios e sistemas de controle de tráfego (VTS) • Acesso pela terra, isolamento, rodovias, aeroportos, etc. • Práticas de manutenção: proteção catódica, recuperação de danos, etc.
Considerações de Navegabilidade	<ul style="list-style-type: none"> • Larguras e profundidades de canais • Condições de aproximação de navios • Equipamentos de navegação • Disponibilidade de rebocadores
Restrições	<ul style="list-style-type: none"> • Linhas de atracação de portos e cais • Regulamentações: padrões de qualidade da água, vazamento de óleo, permissão para dragagem, ocupação, etc. • Permissões e licenças • Oferta de materiais e equipamentos • Instalações existentes: uso inadequado ou limitação de melhorias

Fonte: Gaythwaite, 2004, p. 44

Quanto ao segundo aspecto, isto é, o dos esforços de fixação ou amarração dos navios às instalações portuárias, deve-se levar em conta a ação dos ventos, correntes marítimas e ondas sobre os mesmo, determinando ou avaliando as forças resultantes transmitidas pelos cabos de amarração e seus elementos de fixação. Os esforços assim estimados servirão de base para verificar a estabilidade e dimensionar as estruturas de amarração.

Figura 1– Cargas generalizadas e fatores ambientais que afetam o projeto de um píer



Fonte: Gaythwaite, 2004, p. 45

Os esforços de amarração e atracação são essencialmente esforços horizontais ou com pequenas inclinações com o plano horizontal. No caso das estruturas de instalações portuárias esses esforços são absorvidos pela infraestrutura das mesmas, que são, na sua maioria, compostas por estacas ou estruturas de gravidade. Pode-se observar que os esforços devido à atracação e amarração dos navios dependem diretamente das características e dimensões dos mesmos, sendo, portanto, de fundamental importância a definição do tipo e dimensão do navio de projeto.

Uma vez definidos os critérios a serem utilizados no desenvolvimento dos projetos de uma instalação portuária, deve-se definir qual código normativo deverá ser seguido nos cálculos e dimensionamentos da estrutura da mesma. Com tantas variáveis, incertezas e variações extremas dos esforços a serem considerados no dimensionamento de tais estruturas, fica evidente a fundamental importância da escolha do código normativo a ser utilizado como referência para elaboração do projeto.

Os portos brasileiros integram a infraestrutura necessária ao desenvolvimento econômico do país. O Brasil possui 7.367 km de linha costeira voltada para o Oceano Atlântico, que se ampliam para mais de 8.500 km considerando os recortes litorâneos (baías, enseadas, etc) (Alfredini e Arasaki, 2009, p. 3), além de aproximadamente 40.000 km de hidrovias (Moraes, 2008, p. 4). O índice unitário de custo energético do transporte aquaviário

é muito inferior aos demais modais de transporte, apresentando uma nítida vantagem, além de ser muito mais eficiente em termos de redução na emissão de CO₂ (ver Tabela 3). Entretanto, o modal hidroviário é ainda pouco explorado no Brasil, mesmo sendo muito mais eficiente economicamente que os demais modais e com a grande oferta de vias navegáveis de que o país dispõe.

Tabela 3 – Comparação entre os principais modais de transporte

Modos de Transporte	Índice unitário de custo energético	Emissão de CO₂ / ton/km (g)
Aquaviário	1	3
Ferroviário	3	20
Rodoviário	6 a 9	50
Aeroviário	15	550

Fonte: Moraes, 2008, p. 2 e Ligteringen *et al*, 2012, p. 4

Neste contexto, pode-se notar a demanda por instalações portuárias que o país possui, considerando a extensa rede de hidrovias que ainda não é explorada. O Programa de Aceleração do Crescimento PAC2, do Governo Federal, prevê o investimento em 71 empreendimentos em 23 portos brasileiros para ampliar, recuperar e modernizar as estruturas visando uma redução nos custos logísticos, a melhora da eficiência operacional, aumento da competitividade das exportações e incentivo ao investimento privado. Um estudo realizado pela USP divulgado em 2014 (Infraestrutura Urbana, 2014) constatou que o valor de investimentos estimados necessários para ajustar a infraestrutura de transportes do Brasil até 2030 é de R\$ 1 trilhão.

Embora o país demande elevado número de investimentos no setor portuário e no atual cenário econômico, a literatura técnica nacional sobre o projeto de estruturas portuárias é muito carente, conforme é apresentado no próximo capítulo, sendo de fácil constatação que as obras didáticas existentes se ocupam, via de regra, apenas aos aspetos hidrodinâmicos, de engenharia de costas ou aspectos operacionais, logísticos e ambientais dos portos. Para fortalecer este argumento cita-se que a norma brasileira sobre o tema, a NBR 9782:1987 – Ações em Estruturas Portuárias, Marítimas ou Fluviais, desde o ano de 1987, como citado na própria descrição, não passa por revisão, e o único livro técnico que aborda especificamente o projeto de estruturas de instalações portuárias no Brasil é o do Prof. Jayme Mason intitulado “Obras Portuárias” cuja última edição foi lançada em 1982.

Com a carência da literatura nacional sobre o assunto e com tantas referências normativas internacionais, julga-se de grande valia um estudo que apresente uma análise

sobre os critérios de projeto de instalações portuárias, contribuindo assim para o desenvolvimento de estudos nessa área.

O objetivo geral deste trabalho foi apresentar um estudo sobre as ações de projeto a serem consideradas no dimensionamento e análise de instalações portuárias, com ênfase nas solicitações devido à amarração e atracação de embarcações, através da análise da literatura técnica voltada para o projeto deste tipo de obras, em dois momentos, primeiramente em publicações nacionais, seguido do estudo da literatura internacional, com ênfase nos códigos normativos. Evidentemente não houve a pretensão de se esgotar o estudo sobre as publicações deste tema, principalmente na literatura internacional, a qual é muito vasta sobre o assunto. Foram analisados também artigos técnico-científicos e trabalhos acadêmicos sobre as considerações de projetos de estruturas portuárias.

Como objetivos específicos, buscou-se:

- Apresentar os principais aspectos de cálculo abordados pelos critérios normativos existentes para o projeto de instalações portuárias, estudando os métodos propostos (i) pela NBR 9782:1987 – Ações em Estruturas Portuárias, Marítimas ou Fluviais, (ii) pela BS 6349-1:2000 – *Maritime structures – Part 1: Code of practice for general criteria* (Estruturas Marítimas – Parte 1: Código de prática para os critérios gerais) e BS 6349-4:2014 – *Maritime structures – Part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems* (Estruturas Marítimas – Parte 4: Código de prática para projetos de sistemas de defensas e de amarração) (inglesa), (iii) pelo *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways – EAU 2004* (Recomendações do Comitê para Estruturas de Acostagem, Portos e Hidrovias) (Alemanha), (iv) pela *Permanent International Association of Navigation Congresses – PIANC 2002* (Associação Internacional Permanente dos Congressos de Navegação), além do apresentado por Mason (Jaime, 1982) em sua publicação *Obras Portuárias*, restringindo-se à análise das cargas devido à amarração e atracação de embarcações, não tendo estudado os esforços devido a veículos, cargas devido ao gelo, sismos, etc, por exemplo;
- Em seguida foi realizada a aplicação dos métodos de cálculo em um estudo de caso de instalação portuária. O estudo de caso trata-se de uma linha de dolphins projetada para operar com navios de granéis vegetais sólidos com 60.000 TPB, compostos de bloco de concreto e estacas de concreto protendido com seção circular vazada, onde foram analisados os resultados obtidos dando-se ênfase à

comparação entre os métodos. São apresentados os esforços resultantes na infraestrutura dos dolphins devidos às solicitações calculadas pelos diversos métodos, de modo a permitir a análise da influência de cada um destes;

- Posteriormente realizou-se o cálculo dos esforços de amarração e atracação para navios graneleiros com 5.000 TPB até 250.00 TPB para a criação de curvas Porte do Navio X Esforços para cada referência normativa, com o intuito de melhor visualizar a dispersão dos resultados obtidos para cada método;
- Ao final do trabalho, apresentam-se subsídios que buscam fornecer auxílio na escolha do método de cálculo a ser utilizado no projeto de uma instalação portuária, em termos de esforços de amarração e atracação. Não se pretendeu esgotar o estudo das ações de projeto devidas à amarração e atracação de embarcações em instalações portuárias, tendo em vista a existência de outros códigos normativos para tais ações, como a norma japonesa *Technical Standards for Port and Harbour Facilities in Japan* (Normas Técnicas para Portos e Instalações Portuárias no Japão), de 1991, e a espanhola *Recomendaciones para Obras Marítimas (Programa ROM)* (Programa de Recomendações para Obras Marítimas), de 1990, entre outras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA / REFERENCIAL TEÓRICO

Buscou-se um aprofundamento teórico sobre o assunto na literatura técnica especializada. Estudou-se a literatura nacional disponível e alguns textos internacionais, além da norma brasileira e de normas estrangeiras, com destaque para a inglesa, a alemã e as recomendações da PIANC (2002). A seguir são apresentados de forma sucinta os livros, normas, trabalhos acadêmicos e artigos com estudos correlatos ao objetivo deste trabalho estudados para o desenvolvimento deste.

2.1 Normas

A NBR 9782:1987 – Ações em Estruturas Portuárias, Marítimas ou Fluviais é o código normativo brasileiro que fixa os valores característicos das ações que devem ser consideradas no projeto de estruturas portuárias, marítimas ou fluviais. Para os efeitos da referida norma são consideradas as ações provenientes de cargas permanentes, sobrecargas verticais, cargas móveis, meio ambiente, atracação, amarração e terreno.

A BS 6349 é a norma inglesa, elaborada pelo *The British Standards Institution* (Instituto Britânico de Normatização), que prescreve orientações sobre o projeto de estruturas marítimas e instalações portuárias. A norma é dividida em 8 (oito) partes. A parte 1, a BS 6349-1:2000 – *Maritime structures – Part 1: Code of practice for general criteria* (Estruturas Marítimas – Parte 1: Código de prática para os critérios gerais), dá orientações e recomendações sobre os critérios gerais relevantes para o planejamento, projeto, construção e manutenção de estruturas criadas no ambiente marítimo, discutindo fatores ambientais, necessidades operacionais do transporte aquaviário, aspectos geotécnicos e especificações de materiais. O item 42 desta parte apresenta o método de cálculo da referida norma para previsão dos esforços devido à amarração das embarcações nas estruturas portuárias. É importante ressaltar que esta parte da BS 6349 está passando por revisão e será subdividida em 4 (quatro) subpartes. Destas 4 (quatro) novas subpartes, a subparte 2 conterá o método de cálculo dos esforços devidos à amarração de embarcações. Até o momento, esta é a única subparte que ainda não foi publicada. Somente quando as 4 (quatro) subpartes forem publicadas é que elas substituirão a BS 6349-1:2000, portanto, a BS 6349-1:2000 ainda está em vigor.

Já a parte 4 da BS 6349, a BS 6349-4:2014 – *Maritime structures – Part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems* (Estruturas Marítimas – Parte 4: Código

de prática para projetos de sistemas de defensas e de amarração) dá orientações sobre as práticas de projetos de sistemas de atracação e amarração de embarcações, apresentando os tipos de defensas existentes, layouts de sistemas de defensas, sistemas e dispositivos de amarração para embarcações comerciais, recomendações quanto à sua adequação para várias aplicações e localizações e o método de cálculo para previsão da energia de atracação e projeto do sistema de defensas adequado. Esta parte 4 da norma inglesa passou por revisão recentemente, tendo sido publicada a nova versão em 2014, como apresentado na própria descrição. Quando do início do desenvolvimento deste trabalho, estudou-se a versão anterior desta parte, a de 1994. Posteriormente à publicação da nova versão de 2014, buscou-se atualizar a pesquisa utilizando a nova versão da norma. Constatou-se que a mudança mais representativa para o cálculo dos esforços na versão de 2014 está relacionada ao gráfico de velocidade de aproximação do navio, para o qual foi imposto um limite inferior de 0,08 m/s para esta velocidade, o qual não existia na versão anterior.

A *Permanent International Association of Navigation Congresses – PIANC* (Associação Internacional Permanente dos Congressos de Navegação) é um fórum que reúne profissionais de todo o mundo especializados em infraestruturas de custo-eficaz, confiável e sustentável para facilitar o crescimento do transporte aquaviário. Fundada em 1885 e com sede na Bélgica, PIANC é um dos principais órgãos internacionais na concepção, desenvolvimento e manutenção de portos, vias fluviais e zonas costeiras. Na sua publicação *Guidelines for the Design of Fender Systems: 2002* (Diretrizes para o projeto de Sistemas de Defensas) apresenta orientações sobre os tipos de defensas, sistemas e layouts de defensas, dispositivos de amarração e cabos, layouts do sistema de amarração para embarcações comerciais e recomendações quanto à sua adequação para várias aplicações e locais. Neste documento é apresentado um método de cálculo da energia de atracação de navios, subsidiado por parâmetros necessários no cálculo, tais como velocidades de atracação, dimensões de navios, coeficientes de segurança, etc, acompanhado das recomendações para o dimensionamento do sistema de defesa adequado. A publicação é resultado do relatório elaborado pelo Grupo de Trabalho MarCom WG33.

A publicação *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways – EAU 2004* (Recomendações do Comitê para Estruturas de Acostagem, Portos e Hidrovias) corresponde às recomendações alemãs para instalações portuárias. Desde 1949, o "Comitê para Estruturas Portuárias" tem operado como um comitê da sociedade para a engenharia de estruturas voltadas ao transporte aquaviário, em Hamburgo - Alemanha, e

desde 1951 também atua como grupo de trabalho da Sociedade Alemã de Geotecnia. Na sequência das publicações conjuntas anteriores, esta edição do EAU 2004 contém o conceito de segurança com coeficientes parciais de segurança, de acordo com os Eurocódigos ou as pré-normas europeias. As recomendações do EAU 2004 preenchem os requisitos normativos no que diz respeito ao planejamento, licitação e projeto para a construção e supervisão de construção de obras portuárias.

2.2 Livros

O livro *Obras Portuárias* de Jayme Mason (1982) aborda o assunto voltando-se para os aspectos do projeto da estrutura dessas obras, apresentando considerações sobre elementos de hidromecânica e hidráulica marítima, problemas geotécnicos nas obras portuárias e o cálculo dos esforços de amarração e atracação de navios. Sobre o último aspecto citado, o autor apresenta o desenvolvimento matemático de elementos da teoria do impacto de navios contra obras acostáveis e das forças devido aos ventos e as correntes sobre os navios, apresentando, na sequência, expressões para o cálculo desses esforços. O autor apresenta ainda o método clássico de Nökkentved para cálculo da distribuição de esforços em estacas sob um bloco de coroamento sujeito a carregamentos vertical e horizontais, com aplicação no estudo de um dolfim.

Gaythwaite (2004), na 2ª edição do livro *Design of marine facilities for the berthing, mooring, and repair of vessels* (Projeto de instalações marítimas para a atracação, amarração, e reparação de embarcações), apresenta orientações para o projeto estrutural de instalações portuárias destinadas a amarração, atracação e reparo de embarcações. O livro destina-se a fornecer ao engenheiro civil/estrutural informações e requisitos gerais para o projeto de instalações portuárias, apresentando critérios de projeto estrutural e problemas peculiares às estruturas portuárias, mostrando como estas diferem da construção tradicional em terra. A este respeito, a determinação de cargas de projeto, os efeitos ambientais e a seleção e aplicações adequadas de materiais são enfatizados.

Alfredini e Arasaki (2009), na 2ª edição do livro *Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental*, apresentam bases conceituais sob os enfoques logístico e ambiental para os estudos, projetos e gestão de obras portuárias, de navegação, costeiras e estuarinas. O Capítulo 10, mais especificamente no item 10.6, trata das ações de projeto em estruturas portuárias, citando as recomendações da NBR 9782:1987 para estas solicitações.

Thoresen (2010), na 2ª 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 e a concepção e construção de instalações portuárias devido a novos desenvolvimentos na construção e ao uso de novos materiais. 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. A utilização de novas tecnologias de concreto para as instalações portuárias no meio marinho é tratada em detalhe, bem como os tipos de deterioração e os métodos de recuperação dessas estruturas. Considerações de segurança e problemas de manutenção também foram abordados em detalhes.

Ligteringen e Velsink (2012), no livro *Ports and Terminals* (Portos e Terminais), fornecem elementos básicos para a realização do planejamento e concepção de instalações portuárias, nos quais devem ser considerados os aspectos ambientais, como correntes, ondas, transporte de sedimentos, morfologia costeira, entre outros, e os aspectos logísticos e econômicos. O livro fornece elementos para o planejamento detalhado de terminais de contêineres, incluindo o processo logístico, dando atenção aos aspectos de concepção típicos para estes terminais. Fornece também informações sobre aspectos do planejamento de outros tipos de terminais.

2.3 Monografias, Dissertações e Teses

Amador Júnior (2006) apresenta o projeto estrutural do píer do terminal de contêineres do Porto Itapoá, em Santa Catarina, estudando os seguintes aspectos: (i) arranjo geral, funcionamento e operação do terminal portuário, (ii) alternativas estruturais, onde são estudadas duas alternativas de inclinação das estacas e (iii) carregamentos atuantes.

Fanti (2007) mostra as principais etapas de projeto de uma obra portuária, dando ênfase a um terminal de contêineres (cais e retroárea). O autor faz uma pesquisa dos tipos de estruturas existentes para melhor atender a situação em estudo e mostra os tipos de carregamentos mais importantes num terminal de contêineres considerando os critérios da NBR 9782. São levados em conta os problemas geotécnicos específicos deste tipo de obra e é proposto um método de modelagem simplificado para um sistema de lajes e vigas pré-moldadas solidarizadas apoiadas sobre estacas através de um conjunto de modelos planos e um modelo espacial de checagem.

Amendola (2010) realizou uma análise estrutural do estaqueamento de um píer, abordando aspectos peculiares de projetos de instalações portuárias, dentre os quais as cargas provenientes da amarração e atracação de navios. O autor realiza o cálculo da energia de atracação segundo as recomendações da PIANC (2002).

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. São apresentados resumo e descrição dos principais tipos de defensas e seus critérios de seleção, de forma a entender os principais fatores intervenientes num projeto deste tipo. Posteriormente o autor realiza um estudo do método de dimensionamento, avaliando as recomendações da PIANC, e avaliando também o método definido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Christan (2012) faz um estudo da interação solo-estaca em ambientes submersos, utilizando as seguintes condições: dois tipos de estacas, concreto e mista (tubo metálico preenchido com concreto); quatro condições para o solo (arenoso, coesivo e dois solos estratificados); dois casos de carregamento (caso I com cargas vertical, horizontal e momento e caso II somente carga horizontal e momento). Os modelos de cálculo foram gerados no programa SAP2000, sendo a estaca modelada como elemento de barra e solo representado por molas linearmente elásticas espaçadas a cada metro, baseado no modelo de Winkler.

2.4 Artigos em Periódicos e Anais de Eventos

Vasco Costa (1964) *apud* Mason (1982) estudou a energia cinética que é efetivamente transmitida à instalação portuária no momento da atracação do navio. O autor propôs um método para o cálculo do coeficiente de massa adicional, utilizado no cálculo da energia de atracação, o qual foi adotado pela maioria dos códigos normativos.

Blok *et al.* (1983) estudaram o coeficiente de massa adicional oriundo da desaceleração do navio durante a manobra de atracação. Para os autores, essa massa adicional de água é influenciada pela dimensão do navio, forma do casco, características elásticas da estrutura e modo de colisão. A fim de identificar com maior precisão a influência de todos os diferentes parâmetros que contribuem no fenômeno, os autores executaram um amplo programa de teste em modelos reduzidos. Foram realizados cerca de 750 ensaios, durante os quais se testou a sensibilidade da massa hidrodinâmica adicional na rigidez das defensas, o modo de colisão e a velocidade de aproximação. Os autores constataram que os valores de

massa adicional usados frequentemente pelos projetistas de instalações portuárias parecem ser muito baixos.

Jiang & Janava (1983) recomendam que no projeto e seleção de sistemas de defensas adequados, deve-se considerar a dinâmica da interação entre o navio e a instalação portuária. As características de absorção de energia dos sistemas de defensas variam como uma função dos seguintes parâmetros: material da defesa, geometria, histórico de carregamento no tempo, distribuição espacial da carga, rigidez local do casco e frequência de carregamento. Os autores estudam a interação dinâmica do sistema de defesa com o casco de um navio no domínio do tempo, assumindo a dependência da frequência dos coeficientes hidrodinâmicos sob a forma de uma convolução simplificada.

Schellin e Östergaard (1993) discutem problemas relacionados com a amarração segura dos navios no porto, compreendendo forças ambientais aplicadas ao navio, os princípios gerais que determinam como as forças aplicadas são distribuídas para os cabos de amarração, e a aplicação destes princípios para estabelecer um bom arranjo de amarração. Os autores apresentam uma visão geral dos bons princípios de amarração, orientações para definição do layout da linha de atracação, e previsão de cargas devido ao vento e à corrente no navio.

Natarajan e Ganapathy (1993) estudaram a otimização do comprimento e número de cabos da amarração de acordo com as dimensões da embarcação e as condições ambientais, apresentando expressões para a análise da estabilidade das linhas de atracação e previsão das forças devido à amarração das embarcações. Os autores avaliaram experimentalmente os esforços de amarração em modelos reduzidos onde foram controladas as geração de ondas e velocidades de correntes. Posteriormente, compararam os resultados experimentais com os resultados teóricos obtidos a partir de um softwares de cálculo desenvolvido por eles.

Huang & Chen (2003) apresentam os resultados de uma análise de atracação e sua importância para a concepção de instalações de atracação em condições específicas, onde podem não se aplicar os métodos tradicionais. A análise foi realizada com um modelo de simulação computacional juntamente com um código de movimento de seis graus de liberdade. Este modelo híbrido trata o pier, navios, e bacia do porto como um sistema acoplado. A simulação utilizou parâmetros de projeto real de um píer flutuante em uma bacia extremamente rasa para enfatizar os efeitos dos fluidos. Os resultados indicam que o grande

fluxo induzido por uma atracação do navio em águas rasas tem impactos importantes sobre todos os aspectos. Este fluxo rege essencialmente a energia de atracação e, portanto, as forças nas defensas. O fluxo da água complica ainda mais o encontro entre o píer flutuante e os navios atracados. A influência do fluído deve ser acentuada na concepção de estruturas de atracação para píeres flutuantes. Os autores recomendam que os métodos tradicionais de avaliação de energia atracação devem ser usados com cuidado extra quando ocorrer uma ou mais dessas situações: águas rasas, grande navio e píer flutuante.

Sakakibara e Kubo (2006) propuseram um sistema de monitoramento da amarração e atracação de navios usando defensas do tipo pneumáticas. As cargas nas defensas e a força de reação foram calculadas a partir da medição da pressão do ar no interior da defesa pneumática.

Santos *et al.*(2013) analisaram a influência do tipo do painel frontal do sistema de defensas sobre a eficácia da amarração de embarcações em termos de redução dos movimentos dos navios atracados e melhoria das condições operacionais e de segurança. O modelo físico foi concebido pelos autores com base nas características de um terminal portuário real com problemas operacionais, qual seja o terminal petrolífero de Leixões, Portugal.

3 MÉTODOS DE CÁLCULO DE ESFORÇOS DEVIDOS À AMARRAÇÃO E ATRACAÇÃO DE EMBARCAÇÕES EM INSTALAÇÕES PORTUÁRIAS

Neste capítulo são apresentados os métodos de cálculo para os esforços de amarração e atracação de navios segundo as referências estudadas, em uma sequência que pretende facilitar a compreensão e permitir um melhor relacionamento entre os diversos métodos citados.

3.1 Principais dimensões e características das embarcações

A tonelagem de um navio é a indicação da capacidade de carga em termos de quantidade de carga que ele pode transportar. Dependendo do tipo de navio, do país de origem ou a finalidade para a qual a carga é utilizada, existem muitas maneiras de expressar a tonelagem de um navio (Ligteringen & Velsink, 2012, p. 4). As mais importantes são:

- GRT - *Gross Register Tonnage* - Tonelagem de Arqueação Bruta (a **arqueação** é a medida do volume interno de uma embarcação) - é o volume total de todos os espaços fechados permanentemente acima e abaixo do convés principal, com algumas exceções, como a casa de máquinas, cabine de comando e outro espaço específico acima do convés, expressa em toneladas, onde uma tonelada corresponde a $100 \text{ ft}^3 = 2,83 \text{ m}^3$. O GRT é normalmente usado como base de cálculo de taxas portuárias;
- NRT - *Net Register Tonnage* - Tonelagem de Arqueação Líquida - é o total de todo o espaço destinado à carga, expressa em unidades de $2,83 \text{ m}^3$. A NRT é igual à GRT menos o alojamento da tripulação, oficinas, casa de máquinas, etc;
- DWT - *Deadweight Tonnage* - Tonelagem de Porte Bruto (TPB) - é a diferença entre o deslocamento carregado e o deslocamento vazio, onde: (i) o deslocamento carregado (ou em carga) é a massa do navio quando totalmente carregado, incluindo casco, motores, carga, tripulação, etc. A situação totalmente carregado corresponde àquela na qual o navio afunda até o seu calado máximo; e (ii) o deslocamento vazio é a massa do casco, motores, peças do navio, e todos os outros itens necessários para o desempenho normal de trabalho. Em outras palavras, DWT ou TPB é a expressão da massa da carga do navio propriamente dita, mais combustível, tripulação, passageiros, água fresca, mantimentos, etc, expressa em toneladas. É a expressão mais utilizada e a que será adotada neste trabalho para a apresentação do porte dos navios estudados.

Neste contexto, cabe ressaltar que por questões de estabilidade, os navios não navegam totalmente em vazio, sendo lastreados com água, de onde surge a expressão do navio em lastro.

Uma vez que os esforços de amarração e atracação dependem diretamente das dimensões e das características dos navios, apresentam-se algumas considerações sobre estes aspectos. Algumas referências, como serão apresentadas nos próximos itens, recomendam fatores de segurança que dependem do tipo do navio. A obtenção das dimensões dos navios é uma etapa importante no cálculo dos esforços e exige valores confiáveis, sendo recomendável a consulta a estaleiros, práticos, usuários ou outros entes relacionados com a navegação para obter dados precisos.

Thoresen (2010) apresenta uma vasta lista de dimensões de navios de acordo com o tipo e porte, com valores que possuem limites de confiabilidade variando de 50% a 95%. São apresentadas também valores das áreas laterais e frontais de incidência de vento. A título de ilustração apresenta-se a Tabela 4, transcrita da referência citada, a qual apresenta as dimensões de navios tipo graneleiro com portes variando de 5.000 a 250.000 TPB e limite de confiabilidade de 95%, com as respectivas ilustrações apresentadas na Figura 2.

Tabela 4 – Dimensões de navios graneleiros – Limite de confiabilidade de 95%

Tipo do Navio	TPB (ton)	Deslocamento (ton)	LoA (m)	Lpp (m)	B (m)	D (m)	Max. Draft (m)	Área de Vento Lateral (m ²)		Área de Vento Frontal (m ²)	
								Em carga	Em lastro	Em carga	Em lastro
Bulk carrier (Graneleiro)	5.000	7.190	113	105	16,3	8,8	6,5	811	1.010	247	267
	7.000	9.880	124	116	18,1	9,8	7,2	936	1.210	280	312
	10.000	13.800	138	129	20,2	10,9	8,0	1.090	1.460	319	369
	15.000	20.300	155	146	22,9	12,3	9,0	1.290	1.810	371	447
	20.000	26.700	168	159	25,0	13,4	9,8	1.460	2.110	412	511
	30.000	39.100	188	179	28,4	15,1	11,0	1.740	2.610	479	618
	40.000	51.300	203	194	30,4	16,4	11,9	1.950	3.015	529	702
	50.000	63.500	218	209	32,3	17,6	12,8	2.160	3.420	578	786
	55.000	69.425	224	215	32,3	18,0	13,0	2.243	3.588	598	820
	60.000	75.350	229	220	32,3	18,6	13,5	2.325	3.755	617	853
	70.000	87.200	240	231	32,3	19,5	14,2	2.490	4.090	655	920
	80.000	98.800	249	240	35,3	20,2	14,7	2.623	4.373	686	977
	100.000	122.000	266	257	41,2	21,6	15,8	2.890	4.940	747	1.090
	150.000	179.000	298	290	46,8	24,4	17,8	3.440	6.120	868	1.320
	200.000	236.000	324	316	51,1	26,6	19,4	3.890	7.130	965	1.510
250.000	291.000	345	338	54,8	28,5	20,7	4.270	8.020	1.048	1.670	

Fonte: Thoresen, 2010, p. 518

A descrição/definição das colunas da Tabela 4 são:

Deslocamento – massa do volume de água deslocado pelo navio quando totalmente carregado;

L_{OA} – *comprimento total* – é a maior distância, medida paralelamente à linha d'água, entre a extremidade mais de vante (proa) e a mais de ré (popa), nas partes imersas ou emersas da embarcação;

L_{PP} – *comprimento entre perpendiculares* – é o comprimento do navio medido entre duas perpendiculares ao plano de flutuação do navio. A primeira, passando pela interseção da linha de flutuação (considerando o navio totalmente carregado) com o contorno da proa, e a segunda, passando pela linha de centro do eixo do leme;

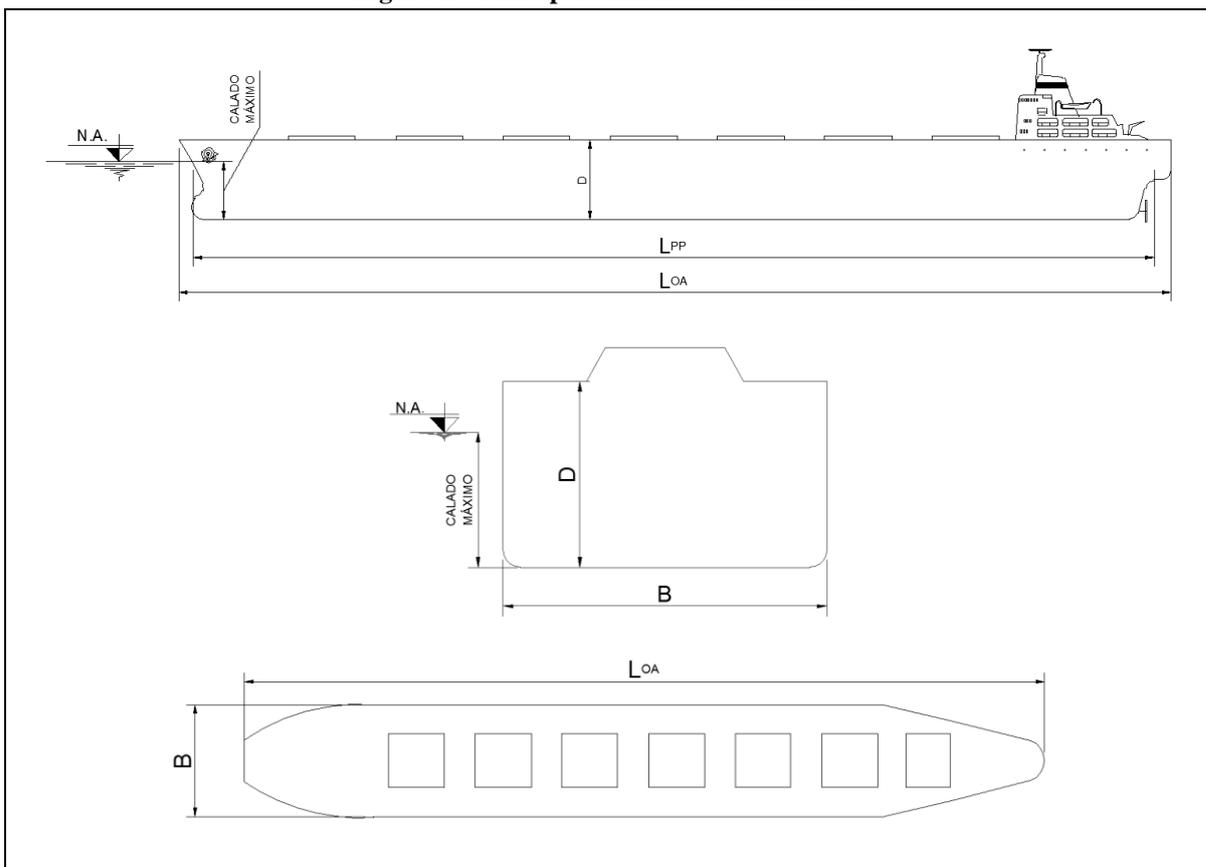
B – *boca* (largura) – é a distância entre os pontos extremos do costado, na seção média do navio;

D – *pontal* – É a distância vertical, medida à meia-náu, entre o convés principal e a linha de base da embarcação (fundo);

Draft – *calado* – é a distância vertical entre a superfície da água e a parte mais baixa da embarcação, na condição em que é feita a medida;

Max. Draft – *calado máximo* – corresponde ao calado medido com a embarcação a plena carga.

Figura 2 – Principais dimensões de um navio

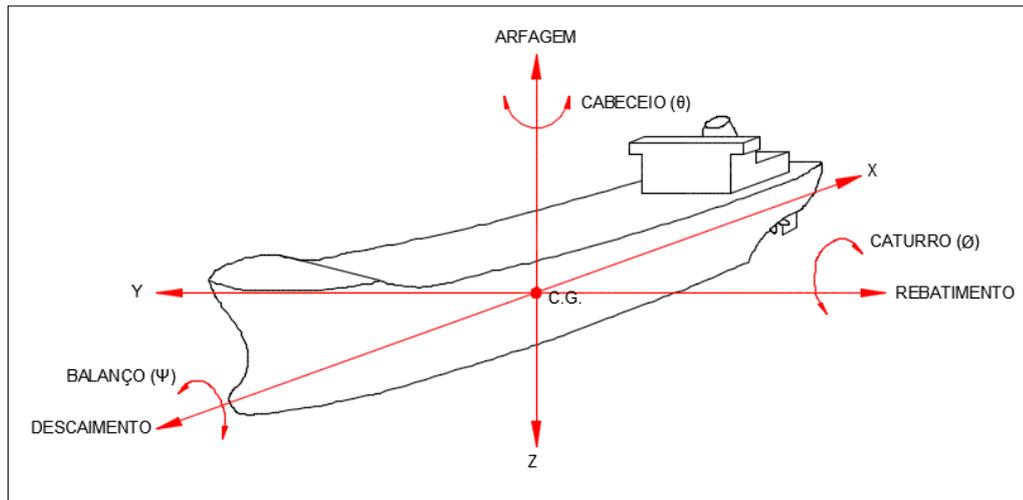


Fonte: Gaythwaite, 2004, p. 18

Sob a ação de ondas, os navios ou embarcações estão sujeitos a movimentos, cujo conhecimento, pelo menos em tese, deve ser do interesse do projetista de instalações portuárias. Um corpo flutuante (navio) pode ser representado como um sólido rígido e, portanto, com seis graus de liberdade, três translações e três rotações (Mason, 1982, p. 93). Se for adotado um sistema de eixos ortogonais x , y , z , como indicado na figura Figura 3, tem-se os seguintes movimentos:

- segundo o eixo x , disposto ao longo do comprimento do navio, denominado *descaimento* ou *deslocamento* (*surge*);
- segundo o eixo y , disposto num plano horizontal e transversal ao eixo x , denominado *rebatimento* ou *abatimento* (*sway*);
- segundo o eixo z , vertical, denominado *arfagem* (*heave*);
- rotação em torno do eixo x , denominada *balanço* (*roll*);
- rotação em torno do eixo y , denominada *caturro* (*pitch*);
- rotação em torno do eixo z , denominado *cabeceio* (*yaw*).

Figura 3 – Principais movimentos de um navio



Fonte: Gaythwaite, 2004, p. 180

Do ponto de vista do projetista de instalações portuárias, é importante conhecer, ao menos em ordem de grandeza, o montante de alguns destes movimentos, de modo a poder fixar certos parâmetros de projeto, tais como, por exemplo, folgas de profundidade abaixo da quilha (fundo) do navio e de gabaritos dos equipamentos portuários. Além disso, os possíveis movimentos têm implicações nos dispositivos de fixação dos navios atracados (Mason, 1982, p. 93).

3.2 Esforços Devidos à Amarração

Os esforços devidos à amarração das embarcações são oriundos de duas parcelas calculadas independentes entre si: a força devido ao vento e a força devido à correnteza. As referências citadas apresentam vários métodos de cálculo, os quais são apresentados a seguir separados por referência.

3.2.1 Esforços de amarração segundo recomendações de MASON (1982)

O autor apresenta uma formulação e regras práticas para avaliação das forças devido aos ventos e correntes, baseadas em conceitos de hidrodinâmica clássica e em critérios estáticos.

Da Mecânica dos Flúidos, tem-se que a força global exercida por um fluido em movimento sobre um obstáculo é dada por

$$F = k \frac{1}{2} \rho v^2 A \quad (3.1)$$

onde:

ρ = densidade do fluido;

v = velocidade de escoamento do fluido;

A = área exposta do obstáculo, normalmente à direção do escoamento;

k = coeficiente de forma

Com as devidas adaptações, a equação (3.1) pode ser aplicada à avaliação das forças de vento e correntes sobre os navios.

3.2.1.1 Forças devido ao vento

No caso do vento, ρ é a densidade do ar e tem-se $\rho = \frac{\gamma}{g}$ (γ = peso específico do ar = 1,225 kgf/m³ ; $g = 9,81$ m/s²), de onde tem-se $\rho = \frac{1,225}{9,81} \approx \frac{1}{8}$, nas unidades fundamentais acima.

Substituindo o valor da fórmula (3.1), tem-se

$$F_V = k_v \frac{1}{16} v^2 A_v \quad (3.2)$$

(com v em m/s, A_v em m² e F_V em kgf). Segundo o autor, valor de k_v é normalmente tomado igual a 1,2.

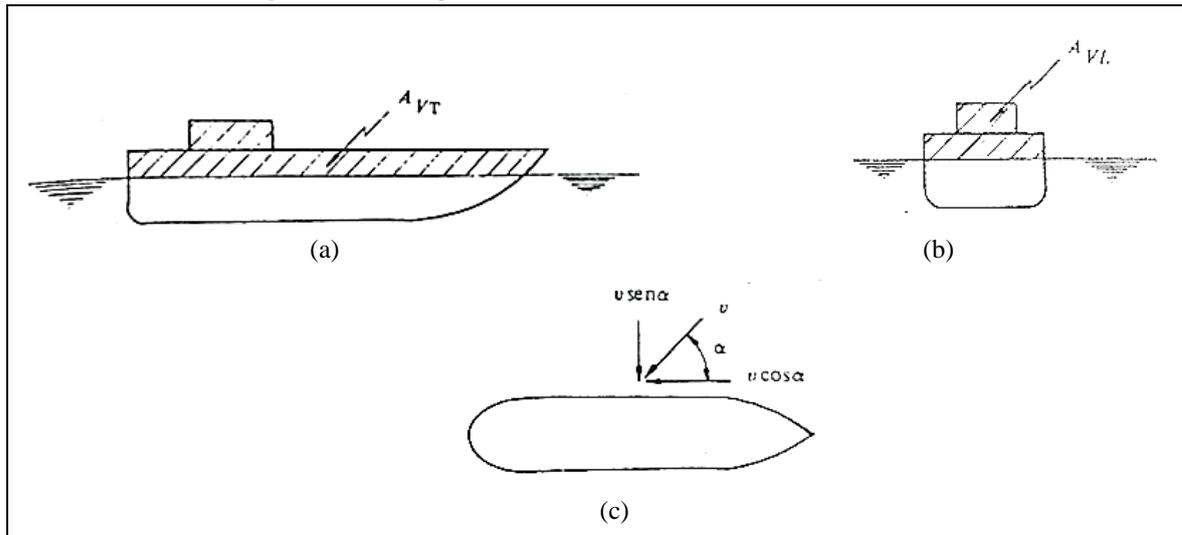
A área A_v a ser considerada na equação (3.2) é a área do navio ou embarcação exposta à ação do vento na respectiva direção. Considerando as indicações da Figura 4, definem-se as áreas transversais A_{vT} e longitudinais A_{vL} dos navios expostos ao vento, de modo que a equação (3.2) pode ser expressa em

$$F_{vL} = k_v \frac{1}{16} v^2 A_{vL} \quad (3.3)$$

$$F_{vT} = k_v \frac{1}{16} v^2 A_{vT} \quad (3.4)$$

Em caso de incidência oblíqua do vento sobre o navio, deve-se decompor a velocidade do vento v em suas componentes, estimando as forças para cada uma delas em separado.

Figura 4 – Definição das áreas de incidência de vento no navio



Fonte: Mason, 1982, p. 119

3.2.1.2 Forças devido às correntes

Para estimativa das forças devido à ação das correntes marítimas ou fluviais, aplica-se novamente a equação (3.1), mas sendo neste caso $\rho = \frac{\gamma}{g}$, com $\gamma = 1034 \text{ kgf/m}^3$ (água salgada) e $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, de modo que

$$\frac{1}{2}\rho = \frac{1}{2} \cdot \frac{1034}{9,81} \approx 52,5$$

e

$$F_c = k_c 52,5 v^2 A_c \quad (3.5)$$

(com v em m/s e A_c em m^2) sendo k_c um coeficiente de forma.

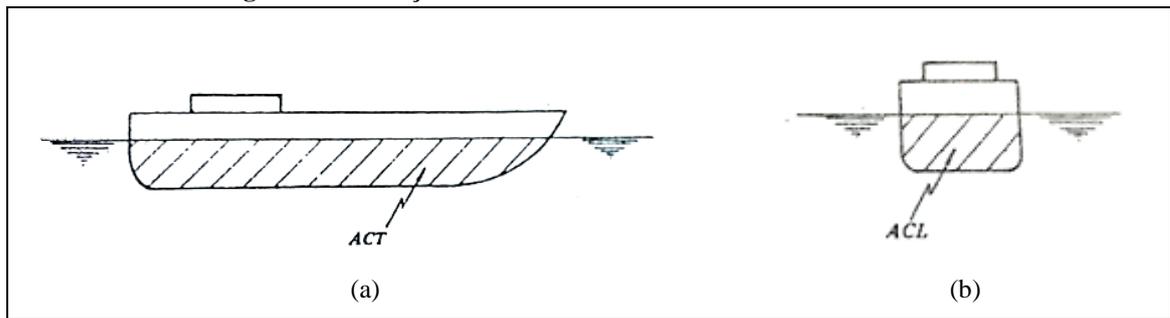
Considerando as áreas de incidência transversal e longitudinal das correntes, conforme a Figura 5, a equação (3.5) será expressa em

$$F_{cL} = k_{cL} 52,5 v_L^2 A_{cL} \quad (3.6)$$

$$F_{cT} = k_{cT} 52,5 v_T^2 A_{cT} \quad (3.7)$$

nas quais k_{cL} e k_{cT} são coeficientes de forma longitudinais e transversais, respectivamente.

Figura 5 - Definição das áreas de incidência de corrente no navio



Fonte: Mason, 1982, p. 120

É usual adotar coeficientes de forma diferentes nos sentidos longitudinal e transversal, levando em conta o fato de que as condições hidrodinâmicas são essencialmente diferentes em cada caso. No sentido longitudinal, a forma do casco é alongada, opondo menor resistência ao fluxo das correntes do que no caso do fluxo transversal ao navio. A profundidade da bacia de atracação também terá acentuada influência no valor dos coeficientes de forma.

Para os coeficientes de forma das equações (3.6) e (3.7), o autor propõe as expressões

$$k_{cL} = 1 + \frac{D}{H} \quad (3.8)$$

$$k_{cT} = 1 + \left(1 + \frac{D}{H}\right)^3 \quad (3.9)$$

nas quais D é o calado do navio e H , a profundidade da bacia. Para k_{cT} , pode-se usar opcionalmente a expressão

$$k_{cT} = 1,57 + \left(\frac{D}{H - D}\right)^2 \quad (3.10)$$

o qual é baseado em um modelo de orifício hidráulico afogado, devendo ser $D \ll H$.

3.2.2 Esforços de amarração segundo recomendações da NBR 9782:1987

Do mesmo modo que o mostrado por Mason, a NBR 9782:1987 divide os esforços devido à amarração em duas parcelas, quais sejam os correspondentes a ação dos ventos e a ação das correntes. A seguir são apresentadas as recomendações da referida norma para estes cálculos.

3.2.2.1 Forças devidas ao vento

Segundo a norma brasileira, o esforço devido ao vento sobre um navio pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$R = k \frac{V^2}{1600} (A_T \cos^2 \theta + A_L \sin^2 \theta) \quad (3.11)$$

Onde:

R = força devida ao vento em kN;

V = velocidade característica do vento em m/s;

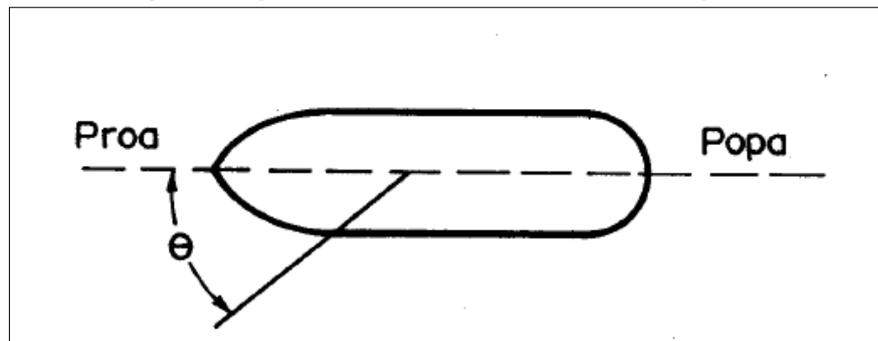
k = coeficiente de forma;

A_T = área da seção transversal do navio acima do nível d'água em m²;

A_L = área da seção longitudinal do navio acima do nível d'água em m²;

θ = ângulo formado pela direção do vento com o eixo longitudinal do navio (Figura 6).

Figura 6 – Ilustração do ângulo de incidência do vento no navio segundo NBR 9782:1987



Fonte: NBR 9782:1987, p. 14

A referida norma recomenda que não sejam consideradas velocidades de ventos que provoquem pressões superiores a 1 kN/m².

O coeficiente de forma (k) é variável com a direção do vento e com a condição de carregamento do navio, isto é, se o mesmo está vazio ou totalmente carregado. A NBR 9782:1987 recomenda assumir para o coeficiente de forma valores entre 0,6 a 1,30, podendo em média ser adotado um valor de 1,2 ou então valores obtidos em ensaios feitos com modelos reduzidos.

A norma brasileira recomenda que a velocidade do vento considerada nos cálculos seja a velocidade média em 10 minutos, medida no local da implantação da instalação portuária a uma altura de 10 m. Os valores máximos de rajada podem ser reduzidos em 10%. Em nenhum caso são admitidas velocidades para o vento menores que 20 m/s. Ainda assim,

deve ser levada em consideração a NBR 6123 na fixação da velocidade dos ventos, não se aceitando velocidades de vento menores que as fixadas por esta norma.

3.2.2.2 Forças devidas às correntes

De acordo com a NBR 9782:1987 o esforço devido às correntes sobre um navio pode ser calculado pela expressão:

$$R = 0,528V^2LDk \quad (3.12)$$

Onde:

R = valor do esforço na direção da corrente em kN;

k = coeficiente de forma;

V = velocidade da corrente em m/s;

L = comprimento do navio entre perpendiculares em m;

D = calado da embarcação em m.

O valor do coeficiente de forma depende essencialmente da direção da corrente e da relação ente o calado da embarcação e a altura do nível da água no local (h).

A norma brasileira recomenda que os valores aproximados de k a serem assumidos podem ser retirados da Tabela 4 do texto, a qual é apresentada na Tabela 5, ou obtidos a partir de ensaios em modelos reduzidos.

Tabela 5 - Valores do coeficiente de forma k segundo NBR 9782:1987

θ (A) h/D	0°	20°	40°	60°	80°	90°
1,1	0,0	1,2	3,1	4,1	4,6	4,7
1,5	0,0	0,5	1,3	2,0	2,3	2,3
7,0	0,0	0,2	0,6	0,8	0,9	0,9

(A) Ângulo formado pela direção da corrente com o eixo longitudinal do navio

Nota: Valores intermediários podem ser interpolados linearmente.

Para o cálculo dos esforços de amarração longitudinal, mesmo no caso de alinhamento do navio com a corrente, a norma recomenda que deva ser considerada a possibilidade de variação da direção da corrente de, no mínimo, aproximadamente 20°.

Analisando a Tabela 5 pode-se observar uma inconsistência na formulação da NBR para os esforços devido à corrente, pois nos casos em que a corrente esteja alinhada com o eixo longitudinal do navio (situação muito comum em projetos de instalações portuárias) o valor de k será zero, resultando em esforço nulo, o que se sabe não ocorrer fisicamente. Para contornar esse problema é recomendado que seja considerada uma variação da direção da corrente de no mínimo 20°, que, de acordo com a referida tabela, resultará em esforços consideráveis.

O valor da velocidade de corrente a ser adotado deve ser aquele obtido em medições no local da implantação da instalação portuária. Em instalações portuárias fluviais o valor mínimo a adotar para a velocidade do fluxo das águas segundo a NBR 9782:1987 é de 1m/s.

3.2.2.3 Considerações sobre amarração das embarcações e avaliação dos esforços

A norma brasileira recomenda que a fixação dos navios deva ser feita por meio dos seguintes dispositivos:

- Cabeços de amarração;
- Guinchos comuns e guinchos de desengate rápido;
- Arganéis.

Nas obras correntes e especiais, devem ser empregados normalmente os cabeços de amarração que sejam constituídos de elementos metálicos especiais fundidos ou compostos de tubos ou outros elementos metálicos adequados.

Em casos especiais, para ajustagem do cabo de amarração devem ser instalados guinchos munidos de cabestrantes que devem cooperar na fixação dos navios e embarcações.

Em terminais que operam com carregamentos especiais tais como combustíveis, ou que estejam sujeitos a fortes ações do mar ou ventos, a norma brasileira recomenda que deva ser indicada a instalação de guinchos de desengate rápido, os quais permitem a liberação dos navios mediante um acionamento manual ou remoto.

Em píeres flutuantes, atracadouros provisórios ou em casos especiais, devem ser usadas no auxílio à fixação dos navios, âncoras, poitas, bóias ou outros dispositivos adequados.

Os dispositivos de amarração dos navios ou embarcações devem ser dimensionados a partir dos esforços exercidos sobre os navios ou embarcações pela ação dos ventos e correntes ou outras ações possíveis ou importantes no caso.

É recomendado que a avaliação dos esforços referidos no parágrafo anterior deva ser feita por meio de critérios estáticos, empregando-se fórmulas da aerodinâmica no caso da ação dos ventos e da hidrodinâmica, no caso da ação das correntes. A norma permite que seja empregados também resultados de ensaios em modelos.

Na determinação dos esforços nos cabeços e dispositivos de amarração, a norma recomenda que devam ser levadas em conta as combinações mais desfavoráveis das ações de ventos e correntes ou outras causas, caso existam, bem como a disposição de linhas de amarração, incluindo os cabos lançantes, través e espringues.

No caso de amarração por âncoras, poitas ou bóias, devem ser verificados os efeitos de catenária dos cabos e estimados os movimentos possíveis dos pontos de fixação na análise da amarração da embarcação.

Os dispositivos de amarração de qualquer tipo devem ter um dimensionamento estrutural compatível com os esforços de amarração, bem como deve ser verificada sua segurança ao arrancamento. Segundo a NBR 9782:1987 estes dispositivos de fixação devem ser dimensionados ao arrancamento com coeficiente de ponderação menor que o adotado no dimensionamento da estrutura de modo a permitir que ocorra a ruptura nos mesmos, sem danificar a estrutura. São permitidas soluções construtivas de qualquer gênero para os dispositivos de amarração, desde que adequadas às finalidades.

Segundo a norma brasileira, em nenhum caso os esforços nos dispositivos de amarração a serem considerados nos cálculos da estrutura da instalação portuária devem ser inferiores aos apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores de esforços mínimos em dispositivos de amarração segundo NBR 9782:1987 (unid: kN)

Deslocamento	Tração nos cabeços
até 20.000	100
até 100.000	300
até 200.000	600
até 500.000	800
até 1.000.000	1.000
até 2.000.000	1.500
> 2.000.000	2.000

Fonte: NBR 9782:1987, p. 17

3.2.3 Esforços de amarração segundo recomendações da BS 6349-1:2000

Do mesmo modo que o mostrado por Mason e pela NBR 9782:1987, a norma inglesa BS 6349-1:2000 divide os esforços devido à amarração em duas parcelas (ventos e correntes). A seguir são apresentadas as recomendações da referida norma para estes cálculos.

3.2.3.1 Forças devidas ao vento

Segundo a norma inglesa, o esforço devido ao vento sobre um navio pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$F_{TW} = C_{TW} \rho_A A_L V_W^2 10^{-4} \quad (3.13)$$

$$F_{LW} = C_{LW} \rho_A A_L V_W^2 10^{-4}$$

Onde:

F_{TW} = força transversal devida ao vento, para trás ou para frente, em kN;

F_{LW} = força longitudinal devida ao vento, em kN;

C_{TW} = coeficiente da força transversal devida ao vento, para frente ou para trás;

C_{LW} = coeficiente da força longitudinal devida ao vento;

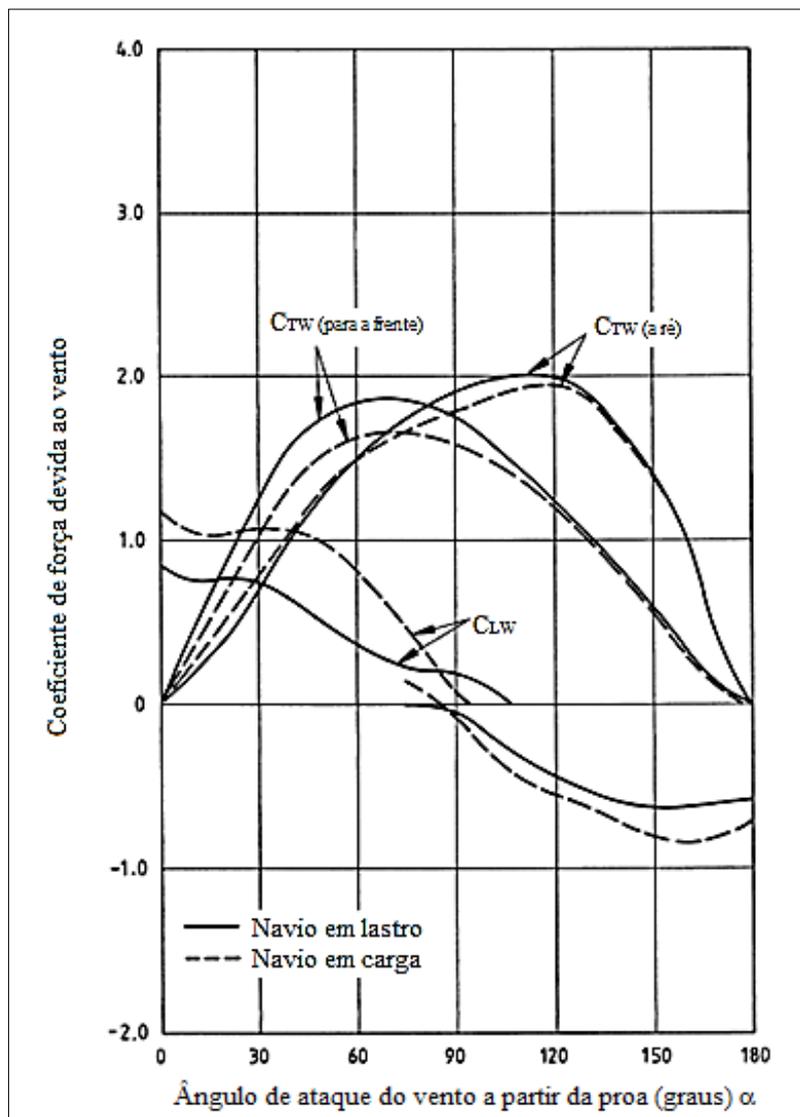
ρ_A = densidade do ar em kg/m³, podendo ser admitida variando de 1.309 6 kg/m³ a 0°C até 1.170 3 kg/m³ a 30°C;

A_L = área da seção longitudinal do navio, projetada acima da linha d'água, em m², conforme Figura 10;

V_W = velocidade de projeto do vento em m/s, a uma altura de 10 m acima do nível da água.

Os coeficientes C_{TW} e C_{LW} podem ser obtidos em gráficos apresentados na própria norma, os quais são reproduzidos na Figura 7, Figura 8 e Figura 9. São apresentados três gráficos, cada um dos quais para tipos diferentes de navios. Estes gráficos fornecem os coeficientes em função do ângulo de incidência do vento sobre o navio, para as condições do navio em lastro e totalmente carregado.

Figura 7 – Coeficientes de força devido ao vento para navios de carga seca e pequenos petroleiros – BS 6349-1:2000

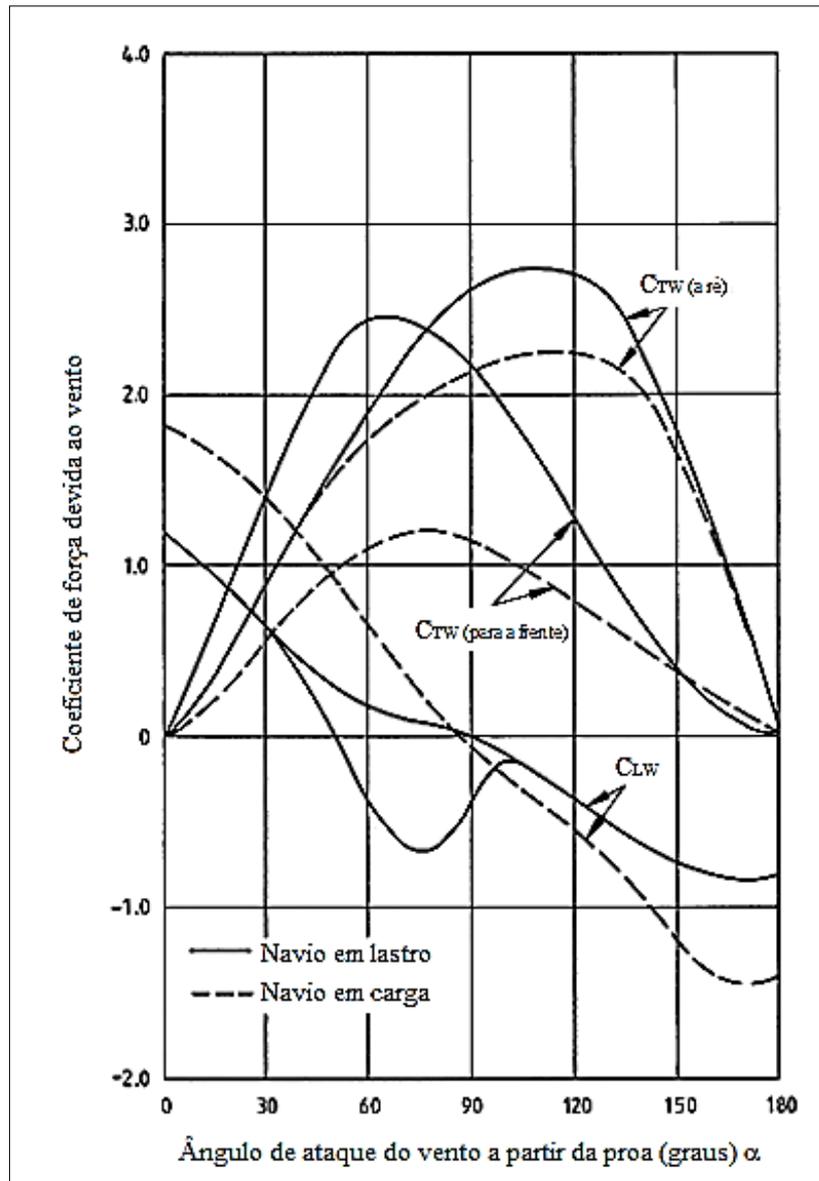


Fonte: 6349-1:2000, p. 122

Na Figura 7, Figura 8 e Figura 9 o ângulo α é o ângulo formado entre a direção do vento e o eixo longitudinal do navio, medido a partir da proa.

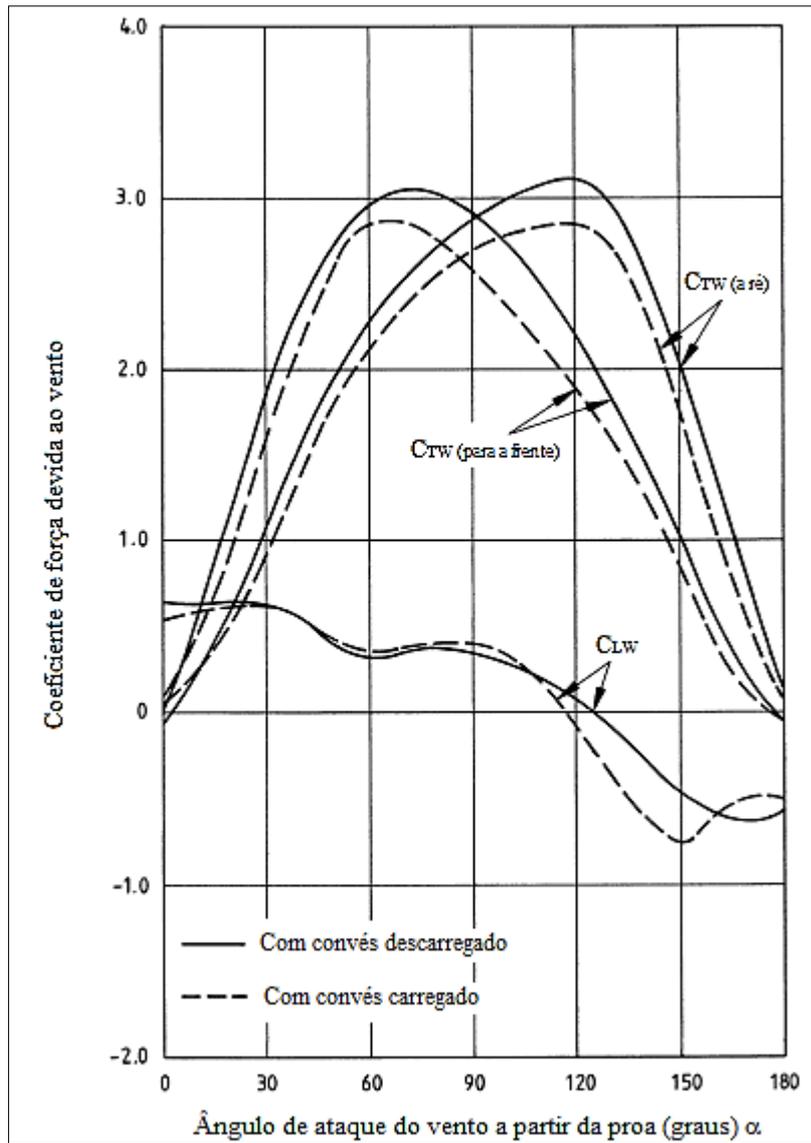
O coeficiente “ C_{TW} (para a frente)” define-se como o coeficiente C_{TW} quando o vento sopra no sentido contra a proa do navio (vento atacando pela proa), e o coeficiente “ C_{TW} (à ré)” como o coeficiente C_{TW} quando o vento sopra no sentido contra a popa do navio (vento atacando pela popa), de acordo com a inclinação entre a sua direção e o eixo longitudinal do navio.

Figura 8 - Coeficientes de força devido ao vento para grandes petroleiros – BS 6349-1:2000



Fonte: 6349-1:2000, p. 123

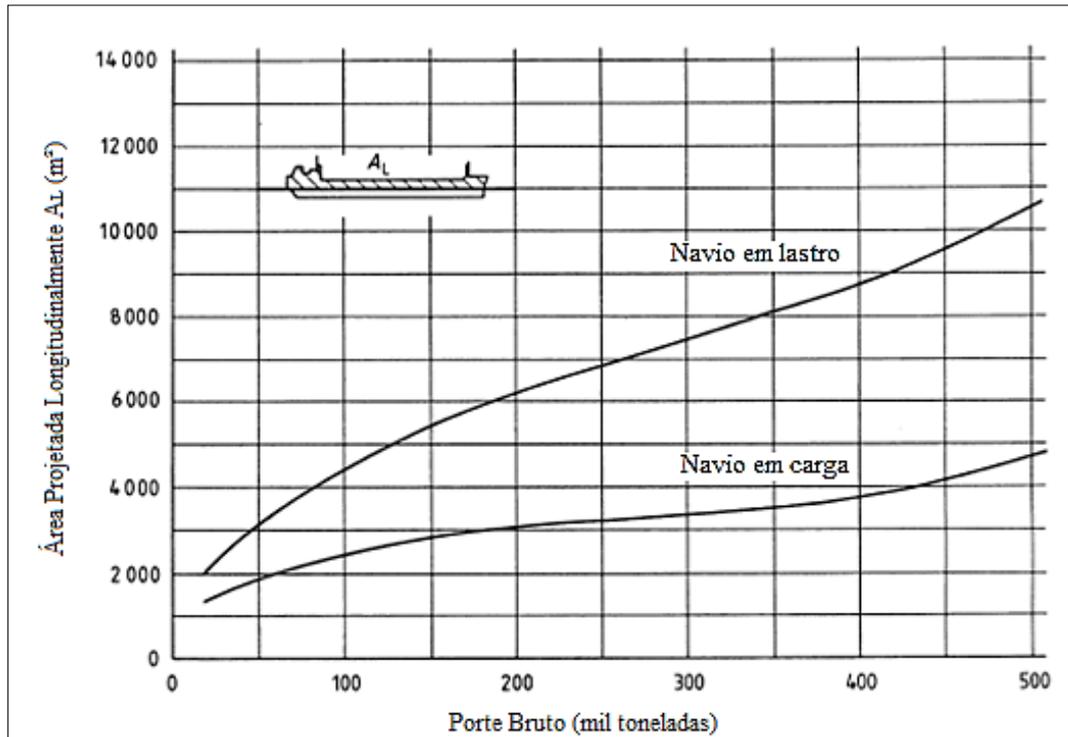
Figura 9 - Coeficientes de força devido ao vento para típicos navios de contêineres – BS 6349-1:2000



Fonte: 6349-1:2000, p. 124

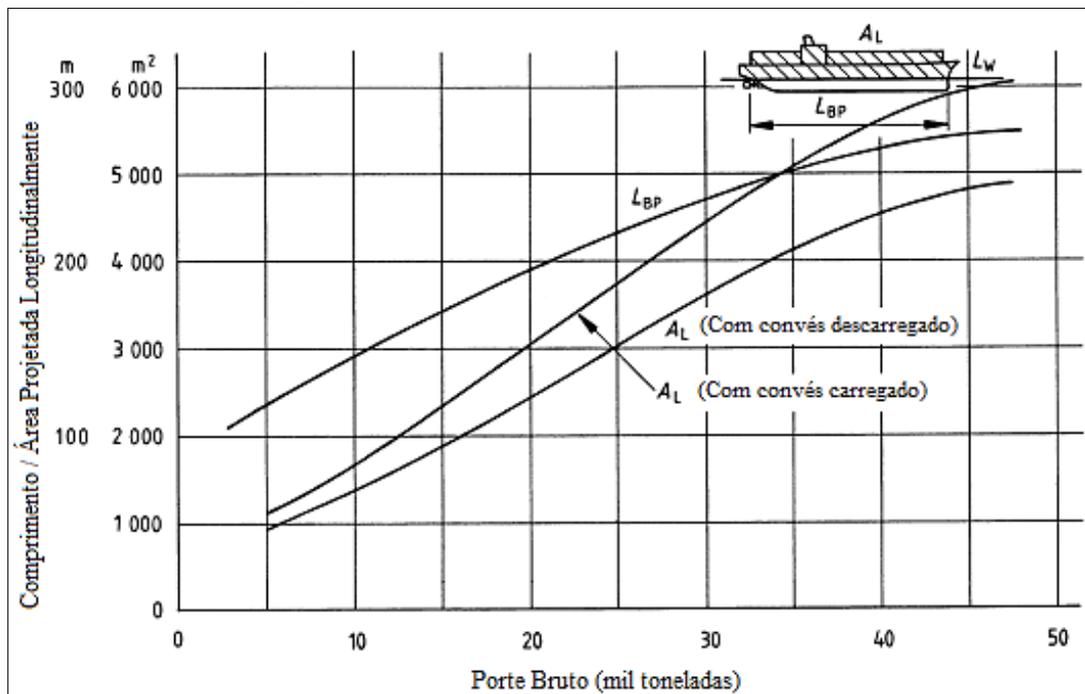
Á área A_L do navio pode ser obtida no texto normativo através das imagens apresentadas na Figura 10 e na Figura 11, ou por outro método ou informação de que o projetista disponha.

Figura 10 – Área da seção longitudinal do navio projetada acima do nível d'água típica para navios petroleiros – BS 6349-1:2000



Fonte: 6349-1:2000, p. 127

Figura 11 – Comprimento e área da seção longitudinal do navio projetada acima do nível d'água típica para navios de contêineres – BS 6349-1:2000



Fonte: 6349-1:2000, p. 128

3.2.3.2 Forças devidas à corrente

Segundo a norma inglesa, o esforço devido às correntes sobre um navio pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$F_{TC} = C_{TC} C_{CT} \rho L_{BP} d_m V_C^2 10^{-4}$$

$$F_{LC} = C_{LC} C_{CL} \rho L_{BP} d_m V_C^2 10^{-4}$$
(3.14)

Onde:

F_{TC} = força transversal devida à corrente, para trás ou para frente, em kN;

F_{LC} = força longitudinal devida à corrente, em kN;

C_{TC} = é o coeficiente de força de arrasto transversal da corrente, para trás ou para frente;

C_{LC} = é o coeficiente de força de arrasto longitudinal da corrente;

C_{CT} = é o fator de correção de profundidade para as forças de arrasto transversal da corrente (deve ser incluído quando a relação entre as profundidades for menor que 6);

C_{CL} = é o fator de correção de profundidade para as forças de corrente longitudinal (deve ser incluído quando a relação entre as profundidades for menor que 6);

ρ = densidade da massa da água, em kg/m³, podendo ser admitida variando de 1.000 kg/m³ para água doce e 1.025 3 kg/m³ para água do mar;;

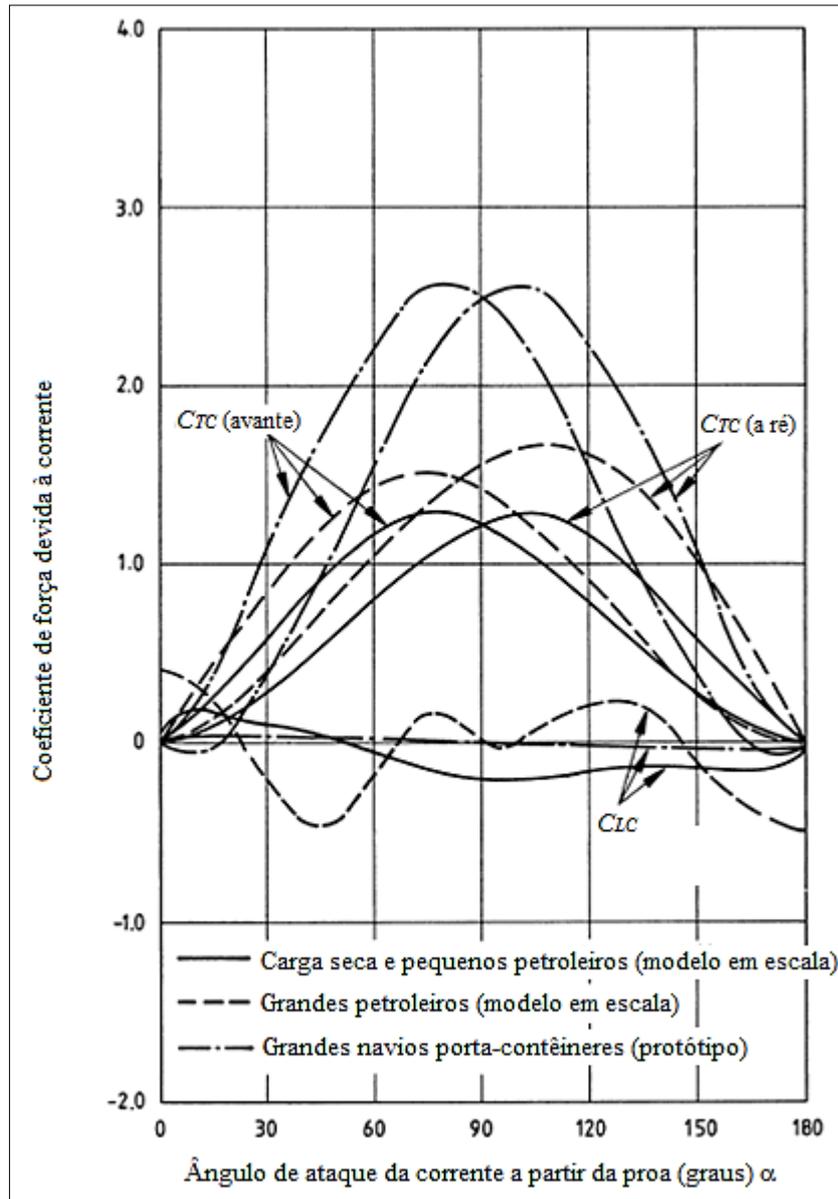
L_{BP} = comprimento entre perpendiculares do navio, em m;

d_m = calado médio, em m;

V_C = velocidade média da corrente na direção considerada sobre a profundidade média da embarcação.

Os coeficientes C_{TC} e C_{LC} podem ser obtidos em um gráfico apresentado na própria norma, o qual é reproduzido na Figura 12, onde são propostos os coeficientes em função do ângulo de incidência da corrente sobre o navio, para vários tipos de navios.

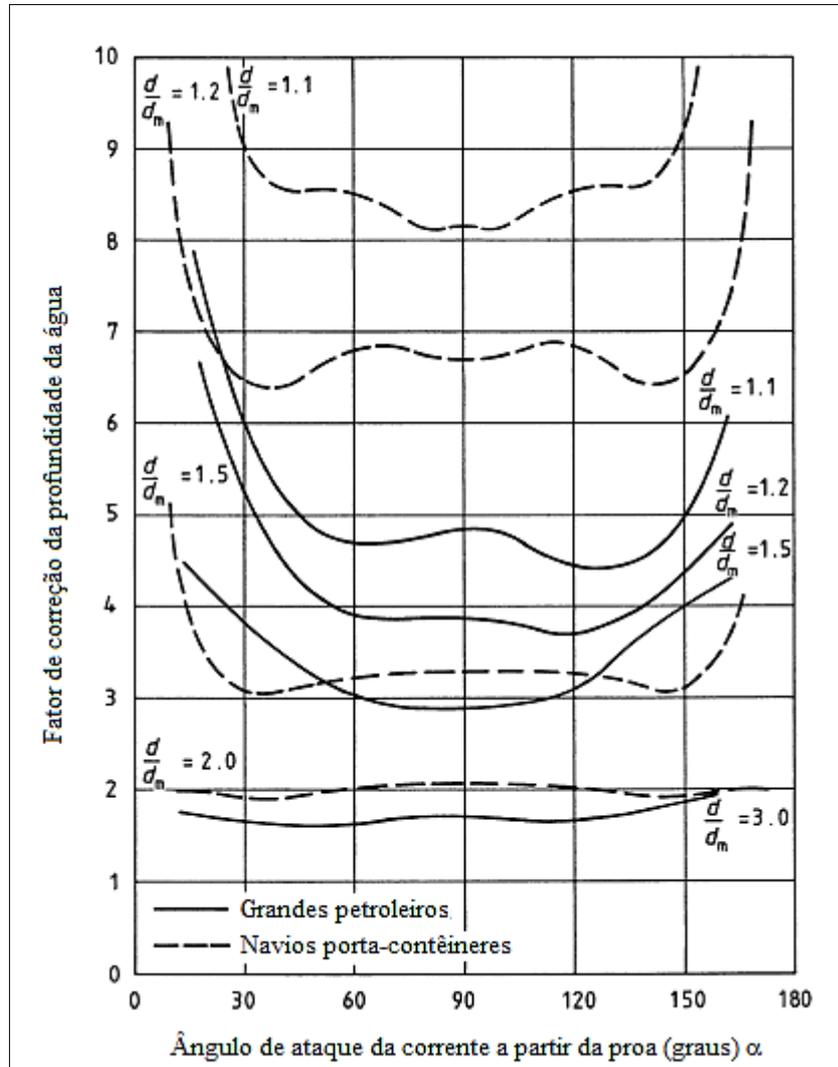
Figura 12 – Coeficientes de força de arrasto devido a corrente para vários tipos de navios e águas profundas – BS 6349-1:2000



Fonte: 6349-1:2000, p. 120

O coeficiente C_{CT} pode ser determinado a partir da Figura 13, onde o fator de correção é função da incidência da corrente sobre o navio e da relação d/d_m , onde d é a profundidade da lâmina d'água e d_m é o calado médio do navio para a situação de cálculo. A determinação do coeficiente C_{CT} por meio destas curvas só é válida se for respeitada a condição de $d/d_m < 6$. No gráfico são apresentados curvas para grandes petroleiros e navios porta-contêineres.

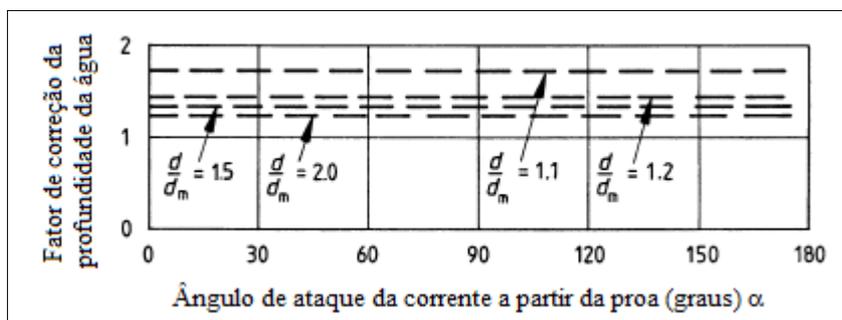
Figura 13 - Fatores de correção da profundidade para as forças de arrasto transversal devido à corrente, C_{CT} – BS 6349-1:2000



Fonte: 6349-1:2000, p. 125

Para a determinação do coeficiente C_{CL} a norma apresenta a Figura 14, a qual apresenta valores apenas para navios do tipo porta-contêineres. Esse fator também é função da incidência da corrente sobre o navio e da relação d/d_m , onde d é a profundidade da lâmina d'água e d_m é o calado médio do navio para a situação de cálculo, devendo ser respeitada a condição de $d/d_m < 6$. Pode-se observar que o valor do fator é constante com a variação do ângulo de incidência da corrente sobre o navio, sofrendo alteração somente com a mudança da relação d/d_m .

Figura 14 - Fatores de correção da profundidade para as forças de arrasto longitudinais devido à corrente, C_{CL} , para navios porta-contêineres – BS 6349-1:2000



Fonte: 6349-1:2000, p. 126

3.2.3.3 Considerações sobre a avaliação dos esforços

Para navios com deslocamento de até 20.000 TPB, a norma inglesa recomenda a utilização das cargas indicadas na Tabela 7 como esforços de dimensionamento da instalação portuária. Para navios com deslocamentos acima de 20.000 TPB, é recomendada a avaliação dos esforços segundo os métodos de cálculo propostos pela referida norma.

Tabela 7 - Cargas nominais nos cabeços de amarração e guinchos para navios com até 20.000 TPB - BS 6349-1:2000

Deslocamento do navio carregado	Carga no cabeço de amarração kN	Carga no guincho kN
Até 2 000	100	200
Até 10 000	300	500
Até 20 000	600	1 000

Fonte: 6349-1:2000, p. 119

3.2.4 Avaliação dos esforços de amarração dos navios

Como mencionado anteriormente, um navio completamente livre constitui um sistema provido de seis graus de liberdade, podendo executar todos os movimentos indicados na Figura 3, dos quais os mais importantes são os de deslocamentos (ao longo do eixo x), de abatimento (ao longo do eixo y) e cabeceio (em torno do eixo z).

Os cabos e sistemas de amarração dos navios têm por objetivo eliminar ou limitar os seus movimentos, em especial os mencionados acima.

Em práticas de projeto é comum o projetista adotar um esquema de amarração que julgue adequado para aquela situação, permitindo assim o cálculo dos esforços nos cabeços de amarração de acordo com as inclinações horizontais e verticais dos cabos de amarração para as situações mais críticas. No estudo de caso apresentado no próximo capítulo é apresentado um esquema de amarração adotado nos cálculos efetuados.

A EAU 2004 recomenda a utilização dos valores mínimos apresentados na Tabela 8 para as forças atuantes nos cabeços de amarração, de acordo com o deslocamento do navio.

Tabela 8 - Valores de esforços mínimos em cabeços de amarração segundo EAU 2004

Deslocamento (ton)	Força nos cabeços (kN)
até 2.000	100
até 10.000	300
até 20.000	600
até 50.000	800
até 100.000	1.000
até 200.000	1.500
> 200.000	2000

Fonte: EAU 2004

Na avaliação dos esforços nos cabos de amarração, devem-se considerar as combinações mais desfavoráveis de ventos e correntes nos sentidos longitudinal, transversal e oblíquo, com o navio em carga ou vazio.

Existem outros esforços nos cabos de amarração e que são devidos aos movimentos e oscilações do mar, em especial por ocasião dos temporais, as quais são de difícil obtenção devido à complexidade e do caráter aleatório das solicitações (Mason, 1982, p. 124).

3.3 Esforços devido à Atracação

Os esforços de atracação consistem da ação do impacto dos navios e embarcações no momento da atracação destes em uma instalação portuária. Os sistemas de defensas são os responsáveis por absorver a energia cinética proveniente dos navios e embarcações neste momento e transmitir os esforços resultantes à estrutura da obra.

As defensas são uma parte integrante e de importância preponderante das instalações portuárias. Os sistemas de defensas são a primeira fronteira entre um navio e a estrutura de acostagem, garantindo a segurança dos navios que atracam nos portos e das estruturas portuárias (Leal, 2011, p. 3). A NBR 11240:1990 define defesa como “Elementos indispensáveis para proteção das obras de acostagem, bem como das embarcações, objetivando a absorção da energia de impacto na atracação, proporcionando a estas proteção enquanto estiverem atracadas”.

As informações básicas para o projeto dos sistemas de defensas de instalações portuárias são fornecidas pelo estudo do impacto dos navios contra as estruturas de atracação. Ao tocar na estrutura da instalação portuária, o navio transmite a ela parte da energia cinética de que está animado. O restante desta energia será empregada no movimento de rotação do

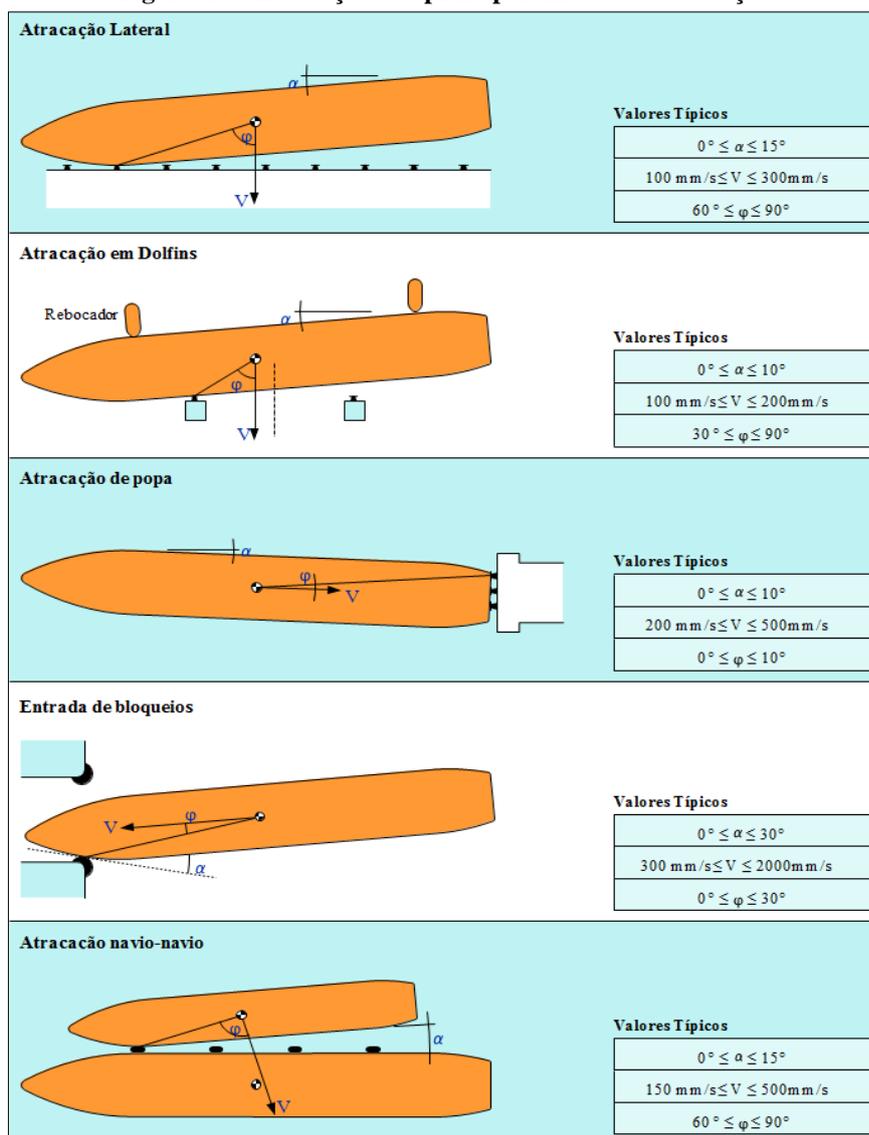
navio, em torno do ponto de impacto e em dissipações diversas. O objetivo deste estudo é determinar qual parcela da energia cinética que é efetivamente transmitida às instalações portuárias (Mason, 1982, p. 100).

Uma vez determinada a energia básica transmitida pelo navio à instalação portuária, deve-se definir um sistema de defensas adequado a absorvê-la e obter as forças que serão transmitidas à obra.

PIANC (2002) menciona uma simples razão para usar defensas: é muito dispendioso não usá-las.

Um aspecto importante a se considerar na introdução dos métodos de cálculo para a energia de atracação é o modo de atracação do navio na instalação portuária. A Figura 15 ilustra os principais modos de atracação praticados. Esta observação é fundamental para a consideração do ângulo formado entre o vetor de velocidade do navio e a linha que liga o centro de massa do navio e o ponto de contato com a instalação portuária.

Figura 15 – Ilustração dos principais modos de atracação



Fonte: Manual Trelleborg, 2011, p. 11

3.3.1 Esforços de atracação segundo recomendações de MASON (1982)

Apresenta-se neste item a dedução matemática apresentada por Mason (1982) acerca do fenômeno físico do impacto do navio em uma instalação portuária durante a atracação, visando apresentar as principais características e variáveis deste fenômeno. O autor estudou os efeitos do impacto do navio contra as instalações portuárias baseando-se na transmissão da energia cinética dos navios à obra e sua transformação em energia de deformação das defensas e da estrutura. Neste processo intervêm perdas e dissipações diversas, que devem ser levadas em conta.

3.3.1.1 Conceitos da teoria do choque mecânico – Percussões

O movimento de um corpo material, com referência a um sistema de eixos x, y, z , é descrito pelas equações

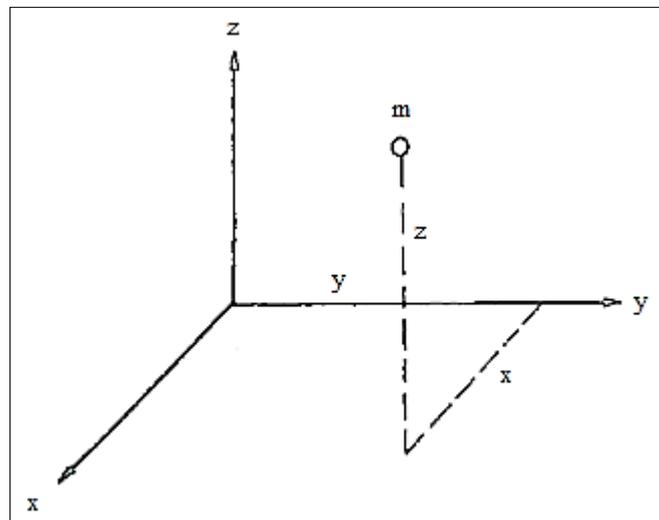
$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = X \quad (3.15)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = Y \quad (3.16)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = Z \quad (3.17)$$

sendo X, Y, Z as componentes da força atuante.

Figura 16 – Sistema de eixos x, y, z



Fonte: Mason, 1982, p. 101

Integrando as equações (3.15), (3.16) e (3.17) entre t_0 e t_1 ,

$$\left(m \frac{dx}{dt} \right) \Big|_{t_1} - \left(m \frac{dx}{dt} \right) \Big|_{t_0} = \int_{t_0}^{t_1} X dt \quad (3.18)$$

$$\left(m \frac{dy}{dt} \right) \Big|_{t_1} - \left(m \frac{dy}{dt} \right) \Big|_{t_0} = \int_{t_0}^{t_1} Y dt \quad (3.19)$$

.....
 nas quais $\left(m \frac{dx}{dt} \right) \Big|_{t_1}$, $\left(m \frac{dx}{dt} \right) \Big|_{t_0}$ etc, representam as quantidades de movimento, calculadas

nos respectivos instantes de tempo.

As integrais das equações (3.18) e (3.19) são denominadas percussões, sendo constituídas do somatório dos impulsos elementares Xdt , Ydt , Zdt . Para elas, introduzem-se as notações

$$p_x = \int_{t_0}^{t_1} Xdt \quad ; \quad p_y = \int_{t_0}^{t_1} Ydt \quad ; \quad p_z = \int_{t_0}^{t_1} Zdt \quad (3.20)$$

de modo que as equações (3.18) e (3.19) podem ser resumidas em

$$\Delta(mu) = mu_1 - mu_0 = p_x \quad ; \quad \Delta(mv) = mv_1 - mv_0 = p_y \quad ; \quad \Delta(mw) = mw_1 - mw_0 = p_z \quad (3.21)$$

em que u , v , w são as componentes da velocidade em relação aos eixos x , y , z , respectivamente. As equações (3.21) implicam o fato de que as percussões produzem variações nas quantidades de movimento.

Tomando o momento das quantidades de movimento em relação aos eixos, teremos, por exemplo, em relação a z

$$\Delta(xmv - ymu) = xp_y - yp_x \quad (3.22)$$

e outras equações análogas.

As definições acima podem ser estendidas a sistemas de pontos materiais ou a corpos contínuos, por somatório ou integração. Em se tratando de um sistema de corpos distintos, têm-se percussões externas e percussões internas. As percussões externas são aplicadas ao sistema, por ações exteriores ao mesmo e as percussões internas são criadas pela interação dos corpos do sistema entre si. Pelo principio da ação e reação, as percussões internas sempre ocorrem em pares iguais e contrários, anulando-se portanto para o conjunto de corpos. Ao fazer-se o somatório das equações (3.22) para um sistema de corpos distintos basta considerar apenas as percussões externas, de modo que

$$\Delta(\Sigma mu) = P_x \quad ; \quad \Delta(\Sigma mv) = P_y \quad ; \quad \Delta(\Sigma mw) = P_z \quad (3.23)$$

onde

$$P_x = \Sigma p_x \quad ; \quad P_y = \Sigma p_y \quad ; \quad P_z = \Sigma p_z \quad (3.24)$$

representa a soma das percussões externas.

Em virtude das conhecidas propriedades do centro de massa, as equações (3.23) poderão ser reescritas da forma

$$M(\Delta u_g) = P_x; \quad M(\Delta v_g) = P_y; \quad M(\Delta w_g) = P_z \quad (3.25)$$

onde $M = \Sigma m$ é a massa total do sistema e u_g, v_g, w_g , são as velocidades de seu centro de massa. Portanto, tudo se passa como se toda a massa do sistema estivesse concentrada no centro de massa, onde também se aplica a percussão.

Para um sistema de corpos materiais a equação (3.22) será substituída por

$$\Delta[\Sigma(x \cdot mv - y \cdot mu)] = \Sigma(xp_y - yp_x) \quad (3.26)$$

que é equivalente a

$$Mk^2 \Delta \omega = \Sigma(xp_y - yp_x) = M_p \quad (3.27)$$

Onde

k = raio de giração segundo o eixo de rotação;

ω = velocidade angular do sistema, em torno do eixo de rotação;

M_p = momento das percussões em torno do eixo de rotação.

As equações (3.25) e (3.27) constituem os elementos básicos para o estudo do choque mecânico.

É interessante também calcular a variação da energia cinética do sistema com o choque, isto é, com a aplicação das percussões. Embora se possa fazê-lo através da diferença de energias calculadas antes e após o choque, pode-se utilizar o teorema de Carnot para fazer o cálculo de outra maneira.

Se for introduzido o conceito de *velocidade perdida* através de

$$v_p = v_1 - v_0 = \Delta v \quad (3.28)$$

isto é, como diferença das velocidades depois e antes do choque, o referido teorema afirma que “a energia cinética perdida pelo sistema é igual à energia cinética do sistema animado das velocidades perdidas”. Formalmente,

$$\frac{1}{2} \Sigma m v_0^2 - \frac{1}{2} \Sigma m v_1^2 = \frac{1}{2} \Sigma m v_p^2 = \frac{1}{2} \Sigma m \Delta v \quad (3.29)$$

Aplicando-se as noções acima ao impacto entre dois corpos sólidos (por exemplo, o navio de um lado e a instalação portuária do outro), caso considere-se o sistema conjunto, ter-se-á apenas percussões internas e os segundos membros das equações (3.25) e (3.27) serão nulos. Isto implicará a conservação da quantidade de movimento e do momento cinético antes e após o choque.

Caso tome-se a decisão de considerar como *sistema* apenas um dos sólidos (o navio, por exemplo), deve-se estabelecer os meios que permitam determinar a percussão que lhe transmite o outro sólido, de modo a conhecermos os segundos membros das equações (3.25) e (3.27), que passarão a caracterizar percussões externas.

Para concluir a exposição sobre os elementos de teoria do choque mecânico elaborada por Mason, é necessário explicar o que sejam *choque elástico* e *choque inelástico*. O choque elástico processa-se sem perda de energia, recuperando os corpos sua forma, uma vez terminado o choque. O choque inelástico corresponde ao outro extremo, em que os corpos adquirem deformações permanentes e têm as mesmas velocidades após o choque. Todos os corpos reais estão em situação intermediária e seu choque é caracterizado pelo *coeficiente de restituição*

$$e = \frac{v_1}{v_0} \quad (3.30)$$

que é a relação entre as velocidades após e antes do choque.

3.3.1.2 Choque de navios contra as instalações portuárias

Pode-se a partir de agora passar à análise do problema do choque de navios contra as instalações portuárias.

Ao chocar-se com a instalação portuária, numa primeira fase, o navio deforma as defensas (incluindo-se também a deformação da própria estrutura) até que a velocidade do seu ponto de contato com elas decresça a zero.

No instante preciso em que a velocidade se anula e se estabelece contato entre o navio e a obra de acostamento, este transmite ao navio uma percussão e recebe dele uma igual e contrária.

A percussão aplicada ao navio faz com que o mesmo mude instantaneamente seus parâmetros de velocidade e forma de movimento.

Ao terminar a percussão, o navio terá perdido parte de sua energia cinética, utilizada na deformação das defensas.

A deformação máxima das defensas está associada a um esforço que deve ser absorvido pela estrutura da instalação portuária.

Numa segunda fase, as defensas começam a recuperar-se da deformação e a restituir sua energia ao navio, restituindo-a totalmente se forem perfeitamente elásticas.

Como as defensas são, na prática, parcialmente elásticas, apenas uma fração da energia é devolvida, de acordo com o coeficiente de restituição.

Se o navio tiver incidência oblíqua sobre a instalação portuária, a energia restituída pode ser suficiente para provocar a rotação do navio, com um segundo impacto no outro extremo.

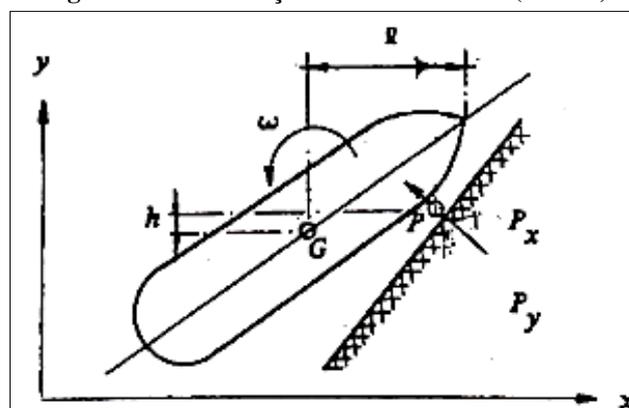
De maior importância para o projeto é a primeira fase do choque, na qual não influem as características de recuperação dos amortecedores (defensas).

Ao analisar-se o problema, pode-se tomar duas atitudes. Primeiro, adota-se como sistema o conjunto do navio e da estrutura da instalação portuária. Ter-se-á, então, apenas percussões internas e os segundos termos das equações (3.25) e (3.27) serão nulos, o que implica a conservação das quantidades de movimento do sistema. Como, em geral, considera-se a estrutura da instalação, portuária imóvel, sua quantidade de movimento é nula antes e após o choque. Isto implica apenas a conservação da quantidade de movimento do navio.

Uma outra possibilidade é considerar apenas o navio como o sistema. Neste caso, a percussão sobre o navio é externa, figurando nas equações (3.25) e (3.27), e deve-se determiná-la convenientemente. Este é o ponto de vista adotado e desenvolvido por Mason (1982).

Seja, conforme Figura 17, um navio referido ao sistema de eixos indicados e chocando-se contra uma instalação portuária no ponto P .

Figura 17 – Idealização do sistema navio (Mason)



Fonte: Mason, 1982, p. 104

As coordenadas do centro de massa do navio G serão x_g e y_g . Antes do choque, as componentes de sua velocidade serão u_g e v_g . A velocidade de rotação do navio em torno do centro de massa será ω_0 .

As coordenadas do ponto P são $x_p = x_g + l$; $y_p = y_g + h$ e as componentes da sua velocidade de translação, u_p e v_p .

Com o choque, o navio recebe uma percussão de componentes P_x e P_y em P , com o que as velocidades no centro de massa passam a ser u_g^1 , v_g^1 , ω_1 . As componentes da velocidade do ponto P passam a ser u_p^1 e v_p^1 .

Definam-se

$$\Delta u_g = u_g^1 - u_g; \quad \Delta v_g = v_g^1 - v_g; \quad \Delta \omega = \omega_1 - \omega_0 \quad (3.31)$$

e seja M a massa do navio.

Aplicando-se as equações (3.25) e (3.27), têm-se

$$\Delta u_g = \frac{P_x}{M}; \quad \Delta v_g = \frac{P_y}{M}; \quad \Delta \omega = \frac{lP_y - hP_x}{Mr^2} \quad (3.32)$$

onde r é o raio de giração da massa em relação a G .

Se forem dadas as percussões, pode-se determinar as velocidades após o choque, isto é,

$$u_g^1 = u_g + \frac{P_x}{M}; \quad v_g^1 = v_g + \frac{P_y}{M}; \quad \omega_1 = \omega_0 + \frac{lP_y - hP_x}{Mr^2} \quad (3.33)$$

aplicando-se as equações (3.31) e (3.32).

Em particular, a velocidade do ponto P era expressa por

$$u_p = u_g - \omega h; \quad v_p = v_g + \omega l \quad (3.34)$$

e será agora

$$u_p^1 = u_g^1 - \omega_1 h = u_g + \frac{P_x}{M} - h \left(\omega + \frac{lP_y - hP_x}{Mr^2} \right) \quad (3.35)$$

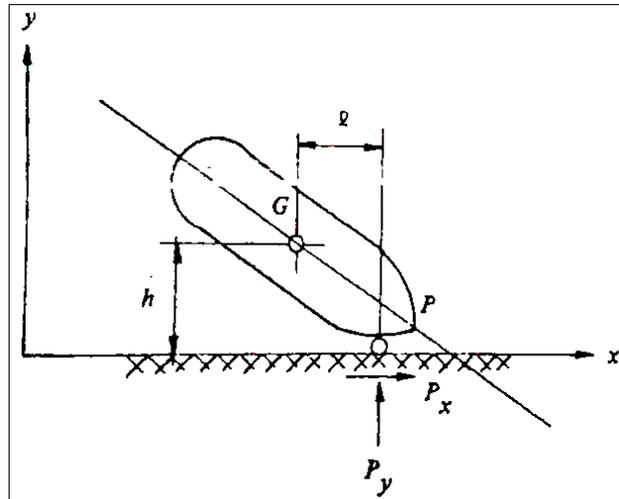
$$v_p^1 = v_g^1 + \omega_1 l = v_g + \frac{P_y}{M} + l \left(\omega + \frac{lP_y - hP_x}{Mr^2} \right) \quad (3.36)$$

Mason (1982) aplica a teoria a dois casos típicos, conforme se descreve a seguir.

3.3.1.3 Choque com atrito tangencial

Considerando a primeira fase do choque de um navio contra a instalação portuária, pode haver uma resistência ao deslizamento tangencial, em virtude do atrito navio-defensa.

Figura 18 – Esquema representativo da atracação com atrito tangencial



Fonte: Mason, 1982, p. 106

Fazendo o eixo x coincidir com a linha de atracação, conforme demonstrado na Figura 18, e se μ for o coeficiente de atrito, tem-se a relação

$$\mu = \frac{P_x}{P_y} \quad (3.37)$$

entre as percussões longitudinais e normal. Por outro lado, no momento do contato, a velocidade v_p^1 do ponto P normal à linha de atracação anular-se-á, isto é

$$v_p^1 = 0 \quad (3.38)$$

Por meio das equações (3.37) e (3.38), pode-se determinar as percussões em função da componente normal v_p da velocidade do navio antes do choque.

Substituindo a equação (3.38) em (3.36), tem-se

$$v_g + \frac{P_y}{M} + l \left(\omega + \frac{lP_y - hP_x}{Mr^2} \right) = 0 \quad (3.39)$$

da qual, por meio da equação (3.37), pode-se deduzir

$$\frac{P_y}{M} = - \frac{v_g + \omega l}{\left(1 + \frac{l^2 - \mu hl}{r^2} \right)} = - \frac{v_p}{\left(1 + \frac{l^2 - \mu hl}{r^2} \right)} \quad (3.40)$$

Por outro lado, da equação (3.37) têm-se

$$\frac{P_x}{M} = \mu \frac{P_y}{M} = - \frac{\mu v_p}{\left(1 + \frac{l^2 - \mu hl}{r^2} \right)} \quad (3.41)$$

Substituindo as equações (3.40) e (3.41) na equação (3.32), têm-se as variações nas componentes da velocidade do centro de massa do navio, ou seja,

$$\Delta u_g = - \frac{\mu v_p}{\left(1 + \frac{l^2 - \mu hl}{r^2} \right)} \quad (3.42)$$

$$\Delta v_g = - \frac{v_p}{\left(1 + \frac{l^2 - \mu hl}{r^2} \right)} \quad (3.43)$$

$$\Delta \omega = - \frac{(l - \mu h)}{r^2} \cdot \frac{v_p}{\left(1 + \frac{l^2 - \mu hl}{r^2} \right)} \quad (3.44)$$

O cálculo da energia cinética perdida pelo navio e absorvida pelas defensas é mais fácil com a aplicação do teorema de Carnot da equação (3.29), que tomará a forma

$$E_d = \frac{1}{2} M \left(\Delta u_g^2 + \Delta v_g^2 + r^2 \Delta \omega^2 \right), \quad (3.45)$$

pois as velocidades perdidas são respectivamente $-\Delta u_g$, Δv_g e $\Delta \omega$. Introduzindo as equações (3.42), (3.43) e (3.44) na equação (3.45), resultará, após simples manipulações algébricas, a expressão

$$E_d = \frac{1}{2} M v_p^2 \left[\frac{1 + \mu^2 + \left(\frac{l - \mu h}{r} \right)^2}{\left(1 + \frac{l^2 - \mu h l}{r^2} \right)^2} \right] \quad (3.46)$$

No caso particular da inexistência de atrito longitudinal, $\mu = 0$, resulta em

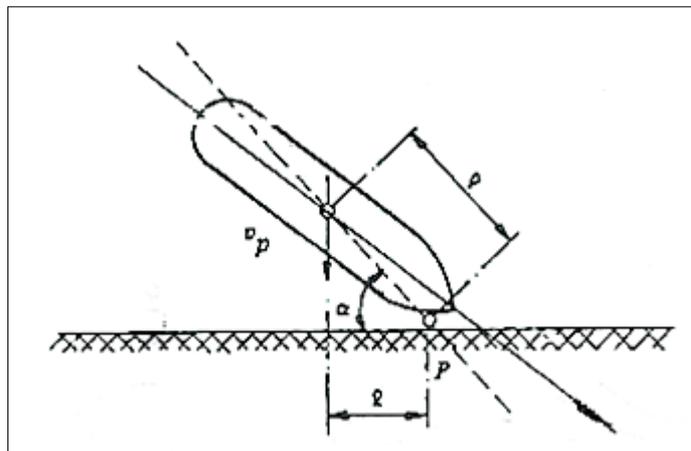
$$E_d = \frac{1}{2} M v_p^2 \frac{1}{1 + \frac{l^2}{r^2}} \quad (3.47)$$

Esta é a formulação proposta por Pagés *apud* Mason (1982) e obtida também, como caso particular de sua teoria, por Vasco Costa *apud* Mason (1982). Aparece também com pequenas variantes em outros autores.

Como ilustração, Mason (1982) deduz também de modo direto a equação (3.47) para quando o navio se aproxima da instalação portuária com velocidade normal v_p (Figura 19).

Viu-se que se for considerado o sistema mecânico como constituído do navio e da instalação portuária, tem-se aproximadamente a conservação da quantidade de movimento, linear ou angular.

Figura 19 – Esquema representativo da atracação velocidade normal v_p



Fonte: Mason, 1982, p. 108

Com referência à Figura 20, a quantidade de movimento angular em torno de P , antes do choque, é $Mv_p l$. Após o choque, o navio gira em torno de P com velocidade angular ω_0 de modo que seu momento angular será $Mk_{min}^2 \omega_0$, sendo k^2 o raio de giração da massa segundo P . Logo

$$Mv_p l = Mk^2 \omega_0 \quad (3.48)$$

de onde

$$\omega_0 = \frac{v_p l}{k^2} \quad (3.49)$$

Por outro lado, o princípio da conservação da energia garante que a energia cinética do navio antes do choque será igual à soma da energia absorvida pelos amortecedores e da energia empregada para girar o navio em torno de P , isto é,

$$\frac{1}{2} Mv_p^2 = E_d + \frac{1}{2} M\omega_0 k^2 \quad (3.50)$$

de onde

$$E_d = \frac{1}{2} Mv_p^2 \left(1 - \frac{l^2}{k^2} \right) \quad (3.51)$$

usando ω_0 dado pela equação (3.49). Pode-se exprimir o raio de giração k em relação a P , através do raio de giração r^2 , em relação ao centro de massa, por meio da conhecida propriedade $k^2 = r^2 + p^2$ (ver Figura 19).

Porém, $\rho = l / \cos^2 \alpha \cong l$, para os ângulos usuais de aproximação, que não passam de $10^\circ, 15^\circ$.

Substituindo na equação (3.51), tem-se:

$$E_d = \frac{1}{2} Mv_p^2 \left(1 - \frac{l^2}{r^2 + l^2} \right) = \frac{1}{2} Mv_p^2 \left(\frac{1}{1 + \frac{l^2}{r^2}} \right) \quad (3.52)$$

que é igual à equação (3.47).

A dedução geral apresentada anteriormente, porém, tem a vantagem de permitir a consideração do atrito.

3.3.1.4 Choque com rotação em torno do ponto de contato

Este caso pode ser considerado como um limite superior, caso não ocorra deslizamento longitudinal ou o navio incida em forte ângulo de inclinação sobre a linha de atracação, quando então deverá girar em torno do ponto de contato.

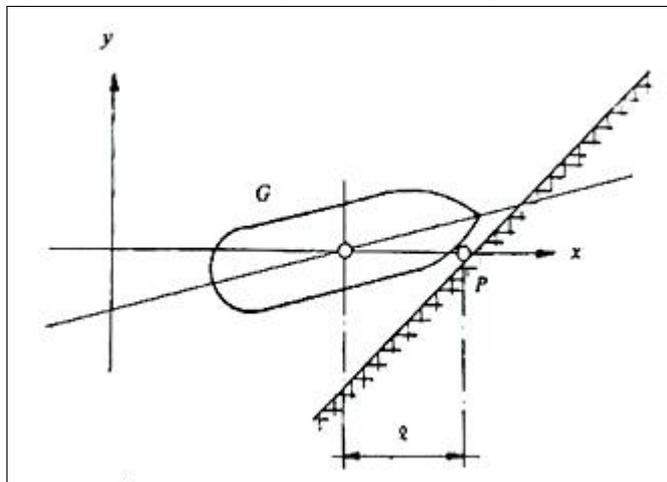
A fim de simplificar o aspecto das equações, Mason (1982) escolhe uma posição de eixos diferente daquela da Figura 18 (ver Figura 20) e mostra que novamente será possível determinar a energia transmitida, em função da velocidade do ponto de contato antes do impacto.

Para que se verifiquem as condições exigidas de que o navio apenas gire em torno do P , após o choque, deve-se ter

$$u_p^1 = v_p^1 = 0 \quad (3.53)$$

nas equações (3.35) e (3.36), para as quais $h = 0$.

Figura 20 - Esquema representativo da atracação com atrito tangencial em nova configuração dos eixos



Fonte: Mason, 1982, p. 109

Daí conclui-se, se for lembrado que $u_p = u_g$, de acordo com a equação (3.34):

$$\frac{P_x}{M} = -u_g = -u_p \quad (3.54)$$

$$\frac{P_y}{M} = -\frac{(v_g + \omega l)}{1 + \frac{l^2}{r}} = -\frac{v_p}{1 + \frac{l^2}{r^2}} \quad (3.55)$$

Por meio das equações (3.33), podem-se calcular agora as variações na velocidade do centro de massa com o choque, isto é,

$$\Delta v_g = -u_p; \quad \Delta v_g = -\frac{P}{1 + \frac{l^2}{r^2}}; \quad \Delta \omega = -\frac{l}{r^2} \cdot \frac{v_p}{1 + \frac{l^2}{r^2}} \quad (3.56)$$

e, da mesma forma que no caso anterior, pode-se empregar o teorema das velocidades perdidas para o cálculo da energia cinética transmitida à estrutura pelo impacto do navio. O resultado é

$$E_d = \frac{1}{2} M \left(u_p^2 + \frac{v_p^2}{1 + \frac{l^2}{r^2}} \right) \quad (3.57)$$

É oportuno destacar o fato de que v_p tem significados diferentes nas equações (3.47) e (3.57), pois em (3.47) é a componente normal à linha de atracção e em (3.57), a componente normal que une o centro de massa ao ponto de contato. O termo l também não é o mesmo nas duas equações (ver Figura 18 e Figura 20).

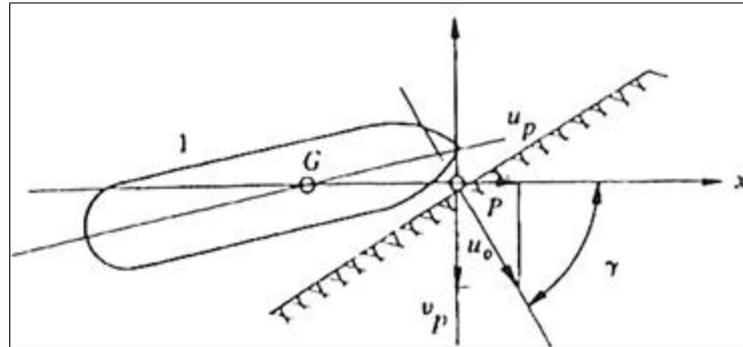
É interessante apresentar a equação (3.57) sob uma forma ligeiramente modificada (ver Figura 21).

Sendo u_0 o módulo da velocidade de P no instante anterior ao choque e γ seu ângulo com a linha que une G e P , tem-se

$$u_p = u_0 \cos \gamma \quad (3.58)$$

$$v_p = u_0 \sin \gamma \quad (3.59)$$

Figura 21 – Nova apresentação da atracção com atrito tangencial



Fonte: Mason, 1982, p. 110

Substituindo (3.58) e (3.59) em (3.57), tem-se

$$E_d = \frac{1}{2} M u_0^2 \left(\cos^2 \gamma + \frac{\text{sen}^2 \gamma}{1 + \frac{l^2}{r^2}} \right) \quad (3.60)$$

que após as devidas manipulações, resultará em

$$E_d = \frac{1}{2} M u_0^2 \cdot \frac{r^2 + l^2 \cos^2 \gamma}{r^2 + l^2} \quad (3.61)$$

Esta equação encontra-se no trabalho de Vasco Costa (1964) que a deduziu por caminho completamente diverso ao deduzido por Mason (1982). Se $\gamma = 90^\circ$, sob pequenos ângulos de incidência, as equações (3.57) e (3.61) darão aproximadamente os mesmos resultados que a equação (3.47), como seria de esperar. Via de regra, porém, o presente caso fornece energias superiores ao caso estudado no item 3.3.1.3.

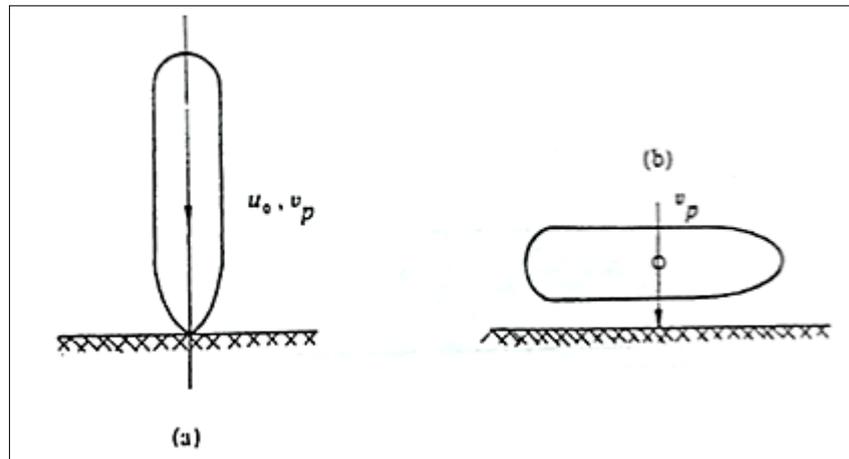
3.3.1.5 Considerações gerais sobre as fórmulas de impacto

Tanto a equação (3.46), como a equação (3.47) fornecem a energia cinética transmitida à estrutura da instalação portuária através da energia global $\frac{1}{2} \cdot M v_p^2$, correspondente à velocidade normal à linha de atracção, multiplicada por um coeficiente de redução que depende da forma e distribuição de massa do navio, além do coeficiente de atrito μ .

Na equação (3.61), tem-se situação igual com referência à energia cinética $1/2 \cdot M u_0^2$. A energia cinética a ser absorvida pelas defensas e pela estrutura dependem, pois, do valor numérico deste coeficiente, que pode oscilar entre limites amplos.

Evidentemente, o máximo valor do coeficiente multiplicador é 1, correspondente a $l=0$ na equação (3.47) ou $\gamma=0^\circ$ na equação (3.61). Este caso corresponde a uma colisão frontal do navio com a instalação portuária (Figura 22a) e pode ser considerado um caso de acidente. Entre os casos de acidentes ou manobras de acostagem mal sucedidas, pode-se incluir também a atracação sob ângulos superiores a $\alpha=15^\circ$ (Figura 19).

Figura 22 – Atracação frontal e lateral



Fonte: Mason, 1982, p. 111

Outro caso em que o coeficiente pode ser 1 é o caso da Figura 22b, no qual o navio se aproxima da instalação portuária em movimento paralelo, o que pode-se concluir diretamente, sem uso da teoria.

Mason calcula valores numéricos para o coeficiente de redução em algumas situações.

Em primeiro lugar, o raio de giracão r situa-se nas imediações de $1/4L$, sendo L o comprimento total do navio.

Este valor pode sofrer variações em função da forma particular de cada navio e da distribuição do seu carregamento, porém será adotado nas considerações subsequentes.

Nestas condições, o coeficiente c , que afeta a equação (3.47), pode ser escrito na forma:

$$c = \frac{1}{1+16\beta^2} \quad (3.62)$$

com

$$\beta = \frac{l}{L}$$

O mínimo de c corresponde ao máximo de l , que é $1/2L$, isto é, metade do comprimento do navio, para o qual $c = 0,20$. Este pode ser considerado o limite inferior do coeficiente de redução.

A seguir apresentam-se, a título de ilustração, alguns valores de c para valores variáveis de l .

Tabela 9 – Valores de l e c

Valores de l	Valores de c
0,50L	0,20
0,40L	0,28
0,30L	0,41
0,25L	0,50
0,20L	0,61
0,10L	0,86
0,00L	1,00

Fonte: Mason, 1982, p. 112

Analisando a influência do coeficiente de atrito μ , Mason (1982) reescreve a equação (3.46):

$$c_u = \frac{1 + \mu^2 + \left(\frac{l - \mu h}{r}\right)^2}{\left(1 + \frac{l^2 - \mu h l}{r^2}\right)^2} \quad (3.63)$$

e computa um par de valores de c_u para $r = 1/4L$ e $l = 1/2L$. O autor faz também $h = 0,1L$, o que corresponde a um ângulo de incidência da ordem de 10° a 15° .

Têm-se, então,

Tabela 10 – Valores de μ e c_u

Valores de μ	Valores de c_u
0,10	0,200
0,50	0,212

Fonte: Mason, 1982, p. 113

Constata-se, pois, que o acréscimo do coeficiente devido ao atrito é muito pequeno, mesmo para o valor de μ difícil de ser superado de 0,50. O coeficiente de redução passou de 0,200 para 0,212 apenas, o que permite desprezar tal efeito.

Por outro lado, na equação (3.61), o ângulo γ que determina a direção da velocidade de aproximação do navio à instalação portuária exerce grande influência. Mason (1982) demonstra alguns valores numéricos, para o caso $l = 1/2L$, $r = 1/4L$:

$$c_{u_0} = \frac{r^2 + l^2 \cos^2 \gamma}{r^2 + l^2} \quad (3.64)$$

Tabela 11 - Valores de γ e c_{u_0}

Valores de γ	Valores de c_{u_0}
0°	1,00
10°	0,98
20°	0,91
30°	0,80
60°	0,40
80°	0,22
90°	0,20

Fonte: Mason, 1982, p. 113

É interessante salientar também que, nas fórmulas apresentadas pelo autor até agora, figuram as velocidades do ponto de contato do navio no momento do choque, o que não exclui a possibilidade de haver velocidade de rotação em torno do centro de massa do navio. Caso, porém, o navio não possua velocidade de rotação antes do choque, as velocidades que figuram nas equações podem também ser interpretadas como sendo as velocidades de translação do centro de massa do navio.

Das considerações precedentes, segundo Mason (1982), pode-se concluir que o coeficiente multiplicador a ser aplicado à energia cinética pode variar entre amplos limites. Ainda segundo o autor, um estudo da literatura e dos critérios adotados em muitos projetos importantes, revela que se encontra, para o coeficiente de redução, quase todos os valores entre 0 e 1.

A escolha entre um coeficiente mais alto ou mais baixo vai depender, em última análise, da experiência e de uma avaliação crítica do projetista, endossada pelo proprietário da obra, em função de cada um dos problemas do projeto. Deverá pesar também a avaliação de risco de acidentes e a confiança depositada na reserva resistente da estrutura projetada e de suas defensas.

3.3.1.6 Possibilidade de um segundo impacto

Até este momento, Mason (1982) estuda a primeira fase do impacto, isto é, o que ocorre desde que o navio toca as defensas até que as mesmas atinjam sua deformação máxima.

Esta fase é a que apresenta maior interesse para os estudos de projeto, pois no instante em que a deformação atingir o máximo, tem-se os máximos esforços sobre a instalação portuária.

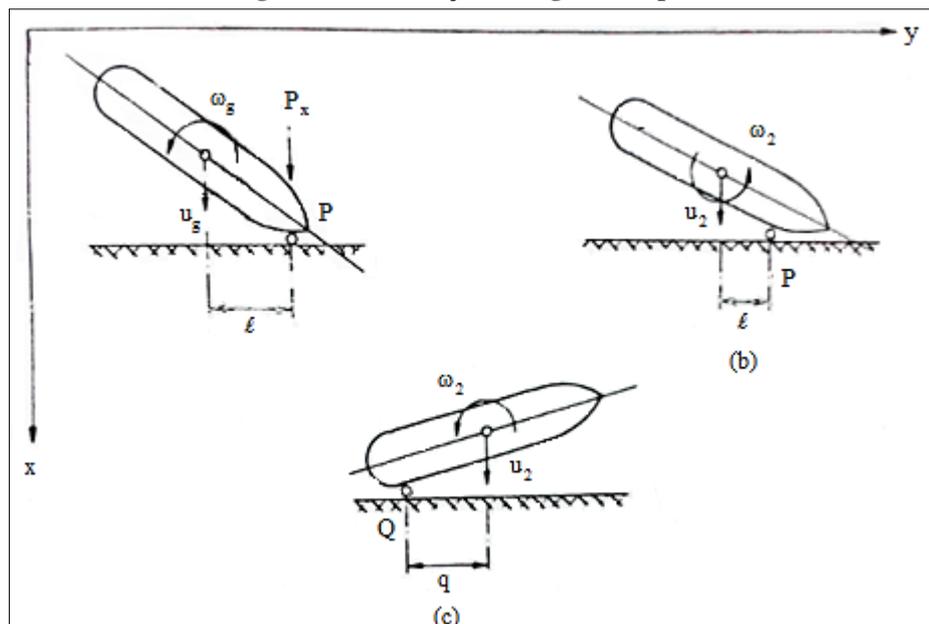
Passa-se agora a considerar também a fase posterior do impacto, quando as defensas começam a recuperar-se e a restituir ao navio a energia recebida na primeira fase. A parcela de energia restituída dependerá das características particulares de cada tipo de defesa e poderá ser suficiente para provocar um giro do navio em torno de seu centro de massa, com um segundo impacto no extremo oposto ao que inicialmente chocou-se contra a obra.

Para a análise do problema, interessam as alterações sofridas pelos parâmetros de movimento do navio ente o instante em que este toca pela primeira vez as defensas e o instante em que as defensas tenham devolvido sua energia, terminando o processo de impacto.

Para distinguir da notação anterior, o autor chama de t_2 este instante final, de modo que a percussão ocorra entre os instantes 0 e t_2 .

Altera-se ligeiramente a Figura 18, colocando a linha de atracação paralelamente ao eixo y (Figura 23) e denominando l , como anteriormente, a distância ente P e o centro de massa, paralelamente ao cais. As velocidades do centro de massa são u_g e ω_g antes do choque no instante 0. O choque do navio com a instalação portuária transmitir-lhe-á uma percussão P_x (entre 0 – t_2) que fará com que as velocidades do centro de massa passem a ser u_2 e ω_2 . Admite-se a ausência de percussão longitudinal, isto é, atrito.

Figura 23 – Ilustração do segundo impacto



Fonte: Mason, 1982, p. 114

O autor considera o navio isoladamente, como sistema, sujeito a uma percussão externa P_x , que deve ser determinada. A condição que permitirá a determinação de P_x será a que especifica o caráter do impacto através do coeficiente de restituição (equação (3.30)).

Assim, aplica as equações (3.25) e (3.27), respectivamente, às situações correspondentes à transição entre a Figura 23a e a Figura 23b. Para centro de momentos, escolhe-se, porém, o centro de massa do navio, de onde:

$$P_x = Mu_2 - Mu_g \quad (3.65)$$

$$P_x l = -Mr^2 \omega_2 + Mr^2 \omega_g \quad (3.66)$$

sendo observados os sinais indicados na figura. Aplicando as equações (3.15), (3.16) e (3.17) às velocidades do ponto de contato P , obtêm-se:

$$u_2 - \omega_2 l = -e(u_g - \omega_g l) \quad (3.67)$$

Estas três equações permitem definir P_x , u_2 e ω_2 .

Das equações (3.65) e (3.66), obtêm-se:

$$u_2 = \frac{P_x}{M} + u_g \quad (3.68)$$

$$\omega_2 = -\frac{P_x l}{M r^2} + \omega_g \quad (3.69)$$

que introduzidas na equação (3.67), resultam em:

$$\frac{P_x}{M} = -\frac{r^2(1+e)}{l^2 + r^2}(u_g - \omega_g l) \quad (3.70)$$

Substituindo P_x/M em u_2 e ω_2 acima, têm-se:

$$u_2 = u_g - \frac{r^2(1+e)}{l^2 + r^2}(u_g - \omega_g l) \quad (3.71)$$

$$\omega_2 = \omega_g + \frac{(1+e)l}{l^2 + r^2}(u_g - \omega_g l) \quad (3.72)$$

Se o navio não tiver velocidade de rotação antes de chocar-se com a estrutura da instalação portuária, $\omega_g = 0$, as equações (3.70), (3.71) e (3.72) resultarão em:

$$\frac{P_x}{M} = -\frac{r^2(1+e)}{l^2+r^2}u_g \quad (3.73)$$

$$u_2 = \left(1 - \frac{r^2(1+e)}{l^2+r^2}\right)u_g \quad (3.74)$$

$$\omega_2 = \frac{(1+e)l}{l^2+r^2}u_g \quad (3.75)$$

Pode-se ver que a percussão é negativa, como se podia esperar. Além disso, como $0 \leq e \leq 1$ e normalmente $l > r$, u_r e ω_r são positivos e $u_2 < u_g$, fatos estes que correspondem à intuição do autor ao fenômeno.

As velocidades u_2 e ω_2 poderão girar o navio, provocando novo choque, em Q (Figura 23c). Este choque será mais desfavorável se a velocidade do navio em Q for maior do que sua velocidade em P , antes do primeiro choque, isto é:

$$u_2 + \omega_2 q > u_g - \omega_g l \quad (3.76)$$

Usando as equações (3.71) e (3.72), obtêm-se, após simples reduções, a expressão:

$$\frac{(1+e)(lq-r^2)}{l^2+r^2} > -\frac{\omega_g(l+q)}{(u_g-\omega_g l)} \quad (3.77)$$

Caso $\omega_g = 0$, por ser $e > 0$, a condição acima equivale a $lq - r^2 > 0$, ou $lq - r^2 > r^2$. Se o choque for tal que $l = q$, deve-se então ter $l > r$, ou seja, a distância do ponto de contato ao centro de massa, paralelamente à linha de atracação, deverá ser superior ao raio de giração baricêntrico.

Segundo Mason, esta condição ocorre com frequência.

A condição da equação (3.77) revela também que, no caso geral, o risco cresce com o coeficiente de restituição e e diminui com ω_g positivo.

Deve-se observar também que outro fato contribui para atenuar o efeito de um segundo impacto, que é a massa hidrodinâmica (a ser apresentada no próximo item)

correspondente ao movimento de rotação do navio, após o primeiro choque. Esta massa contribuirá para o aumento do raio de giração r e será importante no caso em estudo, pois a rotação ocorrerá muito próxima da estrutura da instalação portuária, com ponderável movimentação da massa fluida entre o navio e a obra. Este efeito é particularmente sensível em obras de paramento fechado.

Com base nestas considerações, recomenda-se calcular a energia de projeto através do primeiro impacto e eventualmente verificá-la para um segundo impacto, cuja energia deverá ser absorvida apenas dentro da margem de segurança da obra.

A massa do navio a ser considerada deverá ser a correspondente ao seu deslocamento. A maneira de como avaliar o valor numérico do coeficiente de restituição e para o sistema de defensas segundo Mason é apresentado mais adiante.

3.3.1.7 Massa hidrodinâmica dos navios

Para utilização das expressões propostas por Mason (1982), deve-se compreender a definição da massa hidrodinâmica neste contexto.

Quando um corpo se movimenta no interior de um fluido com movimento acelerado, é submetido a forças de resistência do fluido devido à ação de massa, além das forças de resistência devido à viscosidade e à turbulência. As primeiras (forças de massa) dependem da variação de velocidade (aceleração) e as segundas (viscosidade e turbulência) da velocidade.

Portanto, a força total que deveria ser aplicada ao navio em movimento acelerado seria:

$$F = m \frac{du}{dt} + \Sigma \frac{d}{dt} (m_a u_a) + R \quad (3.78)$$

onde o primeiro termo – $m \frac{du}{dt}$ – diz respeito à força necessária para acelerar a massa propriamente dita m do navio; o segundo, à massa de fluido que se desloca com o navio e o último termo – R – diz respeito às resistências viscosas e de turbulência, que dependem da velocidade do navio.

É habitual incluir os dois primeiros termos da equação (3.78) num só termo, introduzindo o conceito de *massa hidrodinâmica* do navio, de modo que:

$$F = C_M m \frac{du}{dt} + R \quad (3.79)$$

sendo C_M um coeficiente >1 .

Quando um navio estiver sendo acelerado, isto é, quando sua velocidade estiver aumentando, os dois termos finais da equação (3.78), isto é, o devido à massa das partículas fluídas e o devido às resistências viscosas são aditivos. Por outro lado, quando o navio estiver sendo desacelerado, isto é, quando sua velocidade for decrescente, como ocorre nas manobras de atracação, os dois termos acima têm sinais opostos. Em outras palavras, na desaceleração devem-se vencer os efeitos de massas menos as forças de viscosidade e turbulência.

Diversos autores procuraram estabelecer critérios para a avaliação da massa hidrodinâmica dos navios com base em estudos teóricos e ensaios em modelos.

Os efeitos de massa hidrodinâmica são, evidentemente, maiores quando o navio se move transversalmente à linha de atracação do que quando se move longitudinalmente.

Para o primeiro caso, isto é, para o movimento transversal ao navio, Vasco Costa (1964), baseado na análise dos estudos de diversos autores, propôs para o coeficiente C_M a equação:

$$C_M = 1 + 2 \frac{D}{B} \quad (3.80)$$

na qual D é o calado do navio e B sua largura (boca). Cabe destacar que, no entanto neste caso, a velocidade de aproximação u é muito mais baixa do que em caso de movimento longitudinal do navio.

No caso de navios que se deslocam em movimento longitudinal, como os efeitos de massa e de viscosidade são opostos, pode-se admitir, pelo menos como uma aproximação, que os mesmos se compensam, deixando de corrigir a massa do navio para os efeitos hidrodinâmicos.

Pouco se sabe a respeito da massa hidrodinâmica dos navios em movimento de rotação, como costuma ocorrer em manobras normais de atracação.

Em face ao exposto, Mason (1982) recomenda que não sejam adicionados efeitos hidrodinâmicos à massa do navio, admitindo que as resistências viscosas e aquelas devido à turbulência, de certo modo, compensem os efeitos das forças de massa e do fluido influenciado pelo movimento do navio.

Conforme citado por Mason (1982), diversos autores estudaram critérios para a avaliação da massa hidrodinâmica dos navios com base em estudos teóricos e ensaios em

modelos. Thoresen (2010) apresenta a proposta de diversos autores para o coeficiente C_M , as quais são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Equações para o coeficiente de massa adicional

Autor	Ano	Tipo de teste e comentários	Equação para o C_M
Stelson (PIANC, 2002)	1955	Teste em modelo reduzido	$1 + \frac{1/4 \cdot \pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot L}{M_d} = 1 + \frac{\pi \cdot D}{4 \cdot C_B \cdot B}$
Grim (PIANC, 2002)	1955	Teste em modelo reduzido	$1,3 + 1,8 \cdot \frac{D}{B}$
Saurin (PIANC, 2002)	1963	Observação em escala real e teste em modelo reduzido	1,3 (valor médio) 1,8 (valor com fator de segurança)
Vasco Costa (PIANC, 2002)	1964	Teste em modelo reduzido	$1,0 + 2,0 \cdot \frac{D}{B}$
Giraudet (PIANC, 2002)	1966	Teste em modelo reduzido	$1,2 + 0,12 \cdot \frac{D}{H - D}$
Rupert (PIANC, 2002)	1976	Observação em escala real	$0,9 + 1,5 \cdot \frac{D}{B}$
Ueda (PIANC, 2002)	1981	Observação em escala real	$1 + \frac{1/2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot D^2 \cdot L}{M_d} = 1 + \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot C_b \cdot B}$

Fonte: Thoresen, 2010, p. 147

3.3.1.8 Velocidades de aproximação e manobra

Nas expressões para o cálculo da energia de impacto, figura a velocidade de acostamento dos navios, que deverá ser fixada para fins de projeto. Mason (1982) verifica, apesar de grande disparidade de opiniões observada na literatura, um consenso geral no que tange a alguns aspectos essenciais do problema:

- As velocidades de projeto deverão corresponder a manobras normais e corretas de atracação, excluindo-se casos de acidentes, que deverão ser cobertos por seguro da obra e dos navios;
- As velocidades de atracação são maiores para navios pequenos do que para navios de maior porte, uma vez que estes últimos são manobrados com maiores cuidados e, quase sempre, com o uso de rebocadores;
- As velocidades são também maiores para os navios que se movimentam obliquamente à linha de atracação, do que para os que se movimentam transversalmente a ela.

De modo geral, segundo Mason, as práticas internacionais recomendam velocidades de atracação de projeto, de ordem de 0,30 m/s, com ângulos de aproximação de 10° a 15°. A Tabela 13 apresenta velocidades recomendadas nas práticas alemãs, as quais o autor obteve

segundo comunicação de Lackner e Hensen. Esta tabela, aplicada a grandes navios, leva em conta as condições de vento, facilidade de aproximação, proteção da bacia de atracação, entre outro fatores.

Tabela 13 – Velocidade de aproximação de navios na atracação segundo Mason (1982)

Condições de vento	Condições de aproximação	Velocidade normal à linha de atracação (m/s)
Forte	Difíceis	0,40
Forte	Favoráveis	0,30
Moderado	Moderadas	0,20
Protegido	Difíceis	0,15
Protegido	Favoráveis	0,10

Fonte: Mason, 1982, p. 121

Em conclusão, o autor recomenda que seja importante observar que, como ordem de grandeza, a velocidade de aproximação dos navios às instalações portuárias tem como limite a velocidade dos navios à deriva, isto é, quando flutuando livremente, sem ação das máquinas e impulsionados pelo vento. Uma avaliação muito simples da velocidade-limite dos navios à deriva pode ser obtida, se for igualada a força devido à ação do vento sobre o navio à sua resistência ao deslocamento transversal. Esta última pode ser assimilada à força que sobre o navio exerce uma corrente de velocidade igual à velocidade de deslocamento do navio.

3.3.1.9 Requisitos a preencher pela defesa

Determinada a energia nominal transmitida pelo navio à instalação portuária, deve-se escolher um sistema de defesa adequado a absorvê-la. Para a escolha e o dimensionamento da defesa, deve-se considerar uma serie de aspectos.

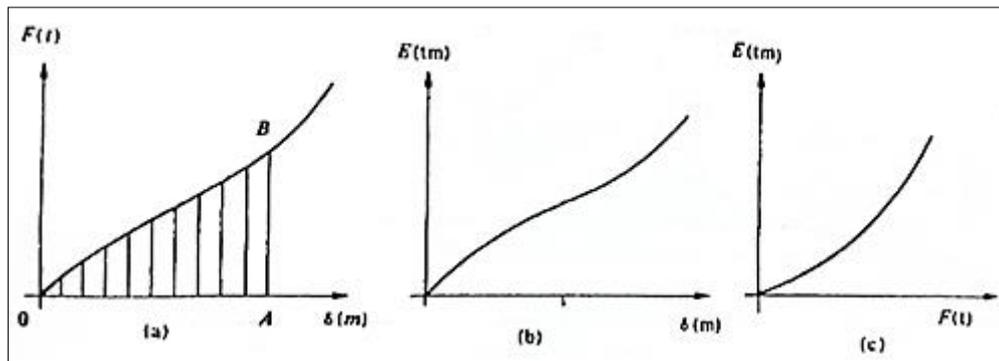
Entre os requisitos principais a serem preenchidos por um sistema de defensas adequado, Mason (1982) destaca:

- a) capacidade de absorção total da energia transmitida pelo navio, executando percurso suficiente para manter a força aplicada na estrutura dentro de limites capazes de serem suportados;
- b) não causar danos aos cascos dos navios;
- c) impedir, o quanto possível, o contato direto do navio com partes desprotegidas da obra;
- d) boa capacidade de absorção de esforços locais, aplicados a pequeno número de elementos protetores;

- e) possuir partes constituintes e elementos de fixação com resistência suficiente para resistir aos esforços a que estarão sujeitos, bem como às forças tangenciais que possam ocorrer.

A principal fonte de informação a respeito das defensas é o seu diagrama força-deslocamento, do qual se pode também deduzir o diagrama da energia absorvida, quer em função da força, quer em função do deslocamento.

Figura 24 – Exemplos de diagramas de uma defesa



Fonte: Mason, 1982, p. 126

Na Figura 24, apresenta-se um diagrama força-deslocamento ($F - \delta$), ao qual acompanham os diagramas energia-deslocamento ($E - \delta$) e energia-força ($E - F$). É comum representá-los todos sobre um mesmo diagrama. Do primeiro deles, obtêm-se a energia absorvida até o deslocamento genérico indicado por A , através da integral

$$E = \int_0^A F d\delta \quad (3.81)$$

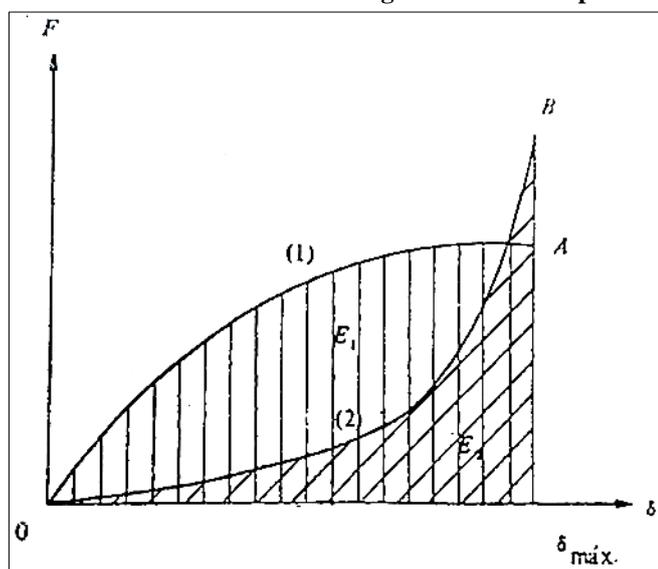
que é a área hachurada OAB , sendo o traçado dos demais diagramas imediato.

Se o diagrama de deslocamento for reto, isto é, a deformação proporcional à carga,

$$E = \frac{1}{2} F\delta \quad (3.82)$$

A forma típica da curva carga-deslocamento varia acentuadamente com o tipo de defesa, porém como casos-limite podem ser considerados os da Figura 25.

Figura 25 – Casos limites da curva carga-deslocamento para defensas



Fonte: Mason, 1982, p. 127

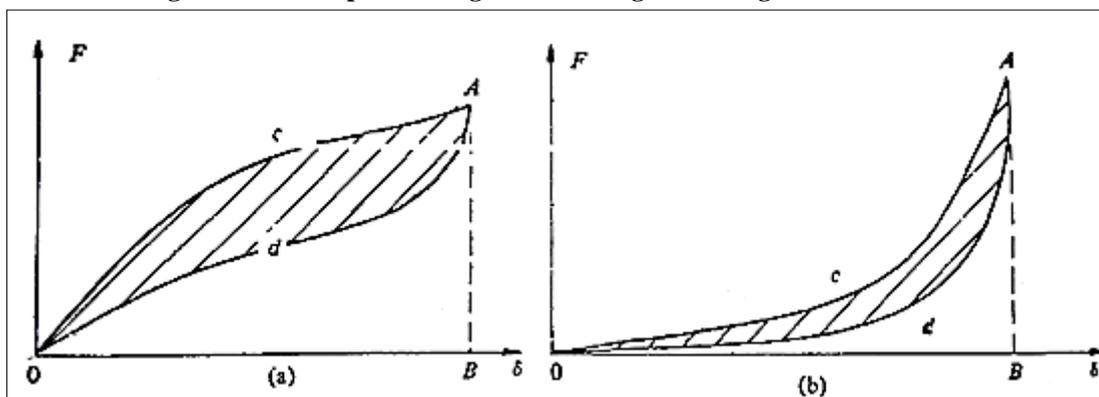
O tipo de defesa dado pela curva $O-I-A$ corresponde a reações acentuadas desde os pequenos deslocamentos, com grande absorção de energia desde o início. O tipo $O-2-B$ não reage às pequenas deformações, permitindo grandes deslocamentos iniciais, com cargas relativamente pequenas. A reação às deformações dá-se apenas na fase final, sendo a absorção total da energia E_2 , via de regra, menor do que E_1 no primeiro tipo.

O tipo de defesa (1) é, portanto, indicado para a absorção de energia de um primeiro impacto, ao passo que o segundo (2) seria indicado para quando o navio já estivesse atracado, pois então teria boa liberdade de movimento, sem induzir novos esforços à estrutura (Mason, 1982, p. 127).

Estas duas propriedades estão, de certa forma, em conflito e não é possível encontrar um tipo de defesa que as inclua simultaneamente.

Ao realizar-se um ensaio em uma determinada defesa, é conveniente submetê-la a um ciclo completo de carga e descarga, obtendo diagramas como os esquematizados na Figura 26a,b, para os tipos (1) e (2) da Figura 25.

Figura 26 – Exemplos de diagramas de carga e descarga em uma defesa



Fonte: Mason, 1982, p. 128

A energia absorvida em carga é dada pela área $OcAB$ e a restituída em descarga pela $OdAB$, de modo que a área $OcAdO$ hachurada é a energia dissipada no processo sob a forma não mecânica.

A relação entre a energia restituída e a energia absorvida, isto é,

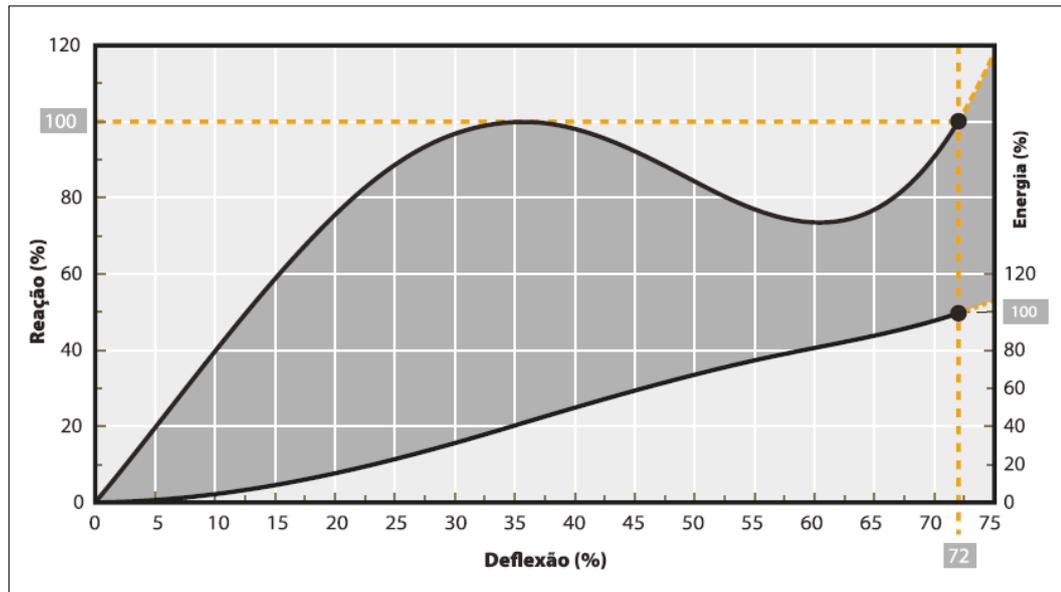
$$e = \frac{\text{área } OdAB}{\text{área } OcAB} \quad (3.83)$$

fornece uma avaliação do coeficiente de restituição das defensas, caso pretenda-se estudar a possibilidade de um segundo impacto após o primeiro.

Quanto maior a área de histerese de uma defesa, menor será o risco de um segundo impacto mais desfavorável que o primeiro.

Uma informação muito importante no dimensionamento da estrutura de uma instalação portuária é a força máxima transmitida pela defesa, quando é absorvida toda a energia transmitida pelo navio. Tal força pode ser obtida do diagrama de energia ou, no caso de comportamento linear, diretamente da equação (3.82) (Mason, 1982, p. 128). A Figura 27 apresenta o diagrama de energia de uma defesa tipo cônica, a título de ilustração. Na Tabela 14 pode-se obter a capacidade de absorção de energia e a respectiva reação, em função da dimensão e eficiência da defesa.

Figura 27 – Diagrama de energia da uma defesa tipo cônica



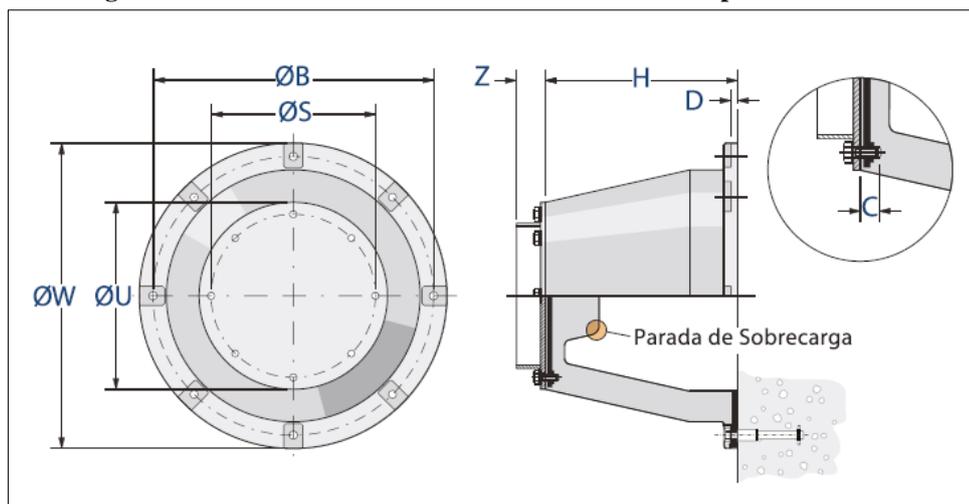
Fonte: Manual Técnico CopabInfra, 2013

Tabela 14 - Performance de defensas tipo cônicas (em kN e m)

		E0.9	E1.0	E1.1	E1.2	E1.3	E1.4	E1.5	E1.6	E1.7	E1.8	E1.9	E2.0
SCN 300	E_R	7.7	8.6	8.9	9.2	9.5	9.8	10.1	10.4	10.6	10.9	11.2	11.5
	R_R	59	65	67	68	70	72	74	75	77	79	80	82
SCN 350	E_R	12.5	13.9	14.4	14.8	15.3	15.7	16.2	16.7	17.1	17.6	18	18.5
	R_R	80	89	91	93	96	98	100	102	104	107	109	111
SCN 400	E_R	18.6	20.7	21.4	22.1	22.8	23.5	24.2	24.8	25.5	26.2	26.9	27.6
	R_R	104	116	119	122	125	128	131	133	136	139	142	145
SCN 500	E_R	36.5	40.5	41.9	43.2	44.6	45.9	47.3	48.6	50	51.3	52.7	54
	R_R	164	182	187	191	196	200	205	209	214	218	223	227
SCN 550	E_R	49	54	56	58	59	61	63	65	67	68	70	72
	R_R	198	220	226	231	237	242	248	253	259	264	270	275
SCN 600	E_R	63	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90
	R_R	225	250	257	263	270	276	283	289	296	302	309	315
SCN 700	E_R	117	130	134	137	141	144	148	151	155	158	162	165
	R_R	320	355	365	374	384	393	403	412	422	431	441	450
SCN 800	E_R	171	190	196	201	207	212	218	223	229	234	240	245
	R_R	419	465	478	490	503	515	528	540	553	565	578	590
SCN 900	E_R	248	275	282	289	296	303	310	317	324	331	338	345
	R_R	527	585	601	617	633	649	665	681	697	713	729	745
SCN 950	E_R	291	322	331	339	348	356	364	373	381	390	398	407
	R_R	588	653	671	688	706	724	742	759	777	795	813	830
SCN 1000	E_R	338	375	385	395	405	415	425	435	445	455	465	475
	R_R	653	725	745	764	784	803	823	842	862	881	901	920
SCN 1050	E_R	392	435	447	458	470	481	493	504	516	527	539	550
	R_R	720	800	822	843	865	886	908	929	951	972	994	1015
SCN 1100	E_R	450	500	514	527	541	554	568	581	595	608	622	635
	R_R	788	875	899	923	947	971	995	1019	1043	1067	1091	1115
SCN 1200	E_R	585	650	668	685	703	720	738	755	773	790	808	825
	R_R	941	1045	1073	1101	1129	1157	1185	1213	1241	1269	1297	1325
SCN 1300	E_R	743	825	847	869	891	913	935	957	979	1001	1023	1045
	R_R	1103	1225	1258	1291	1324	1357	1390	1423	1456	1489	1522	1555
SCN 1400	E_R	927	1030	1058	1085	1113	1140	1168	1195	1223	1250	1278	1305
	R_R	1278	1420	1459	1497	1536	1574	1613	1651	1690	1728	1767	1805
SCN 1600	E_R	1382	1535	1577	1618	1660	1701	1743	1784	1826	1867	1909	1950
	R_R	1670	1855	1905	1955	2005	2055	2105	2155	2205	2255	2305	2355
SCN 1800	E_R	1967	2185	2244	2303	2362	2421	2480	2539	2598	2657	2716	2775
	R_R	2115	2350	2413	2476	2539	2602	2665	2728	2791	2854	2917	2980
SCN 2000	E_R	2700	3000	3080	3160	3240	3320	3400	3480	3560	3640	3720	3800
	R_R	2610	2900	2978	3056	3134	3212	3290	3368	3446	3524	3602	3680

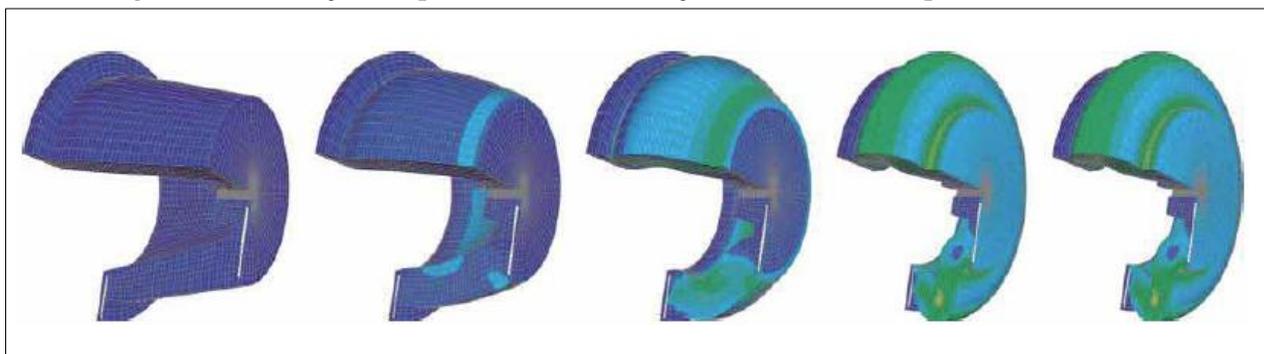
Fonte: Manual Técnico CopabInfra, 2013

Figura 28 – Dimensões características da uma defesa tipo cônica cônica



Fonte: Manual Técnico CopaboInfra, 2013

Figura 29 – Simulação computacional da deformação da uma defesa tipo cônica cônica



Fonte: Manual Técnico CopaboInfra (2013)

Mason (1982) recomenda também que seja levada em conta nos cálculos da estrutura uma força tangencial, da ordem de 0,10 a 0,25 da força normal citada acima.

A força transmitida pela defesa à estrutura da obra pressupõe outra igual e contrária aplicada sobre o navio, devendo esta ficar abaixo dos limites que possam causar danos ao seu casco. Embora tais limites dependam essencialmente do tipo de construção do navio, a título de orientação, Mason (1982) recomenda a adoção de que as pressões nos cascos dos navios possam variar de 20 tf/m² a 40 tf/m².

3.3.2 Esforços de atracação segundo recomendações da NBR 9782:1987

Neste item são apresentados a metodologia e parâmetros considerados pela NBR 9782:1987 para o cálculo dos esforços de atracação de uma embarcação em uma instalação portuária.

Segundo as prescrições da NBR 9782:1987, a energia cinética característica transmitida pelo navio durante a atracação, e que deve ser considerada no dimensionamento das estruturas e defensas é determinada pela seguinte expressão:

$$E_c = \frac{1}{2}(M_1 + M_2)V^2C_eC_r \quad (3.84)$$

Onde:

E_c = energia característica nominal;

M_1 = massa deslocada pelo navio;

M_2 = massa de água adicional;

V = velocidade de aproximação no navio perpendicular à linha de atracação;

C_e = coeficiente de excentricidade;

C_r = coeficiente de rigidez.

3.3.2.1 Massa deslocada pelo navio (M_1)

A massa M_1 depende do tipo de instalação portuária. Nas instalações de descarregamento de navios, a massa (M_1) a ser considerada é a máxima que o navio pode deslocar. Nas instalações em que ocorrerá exclusivamente 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 de 0,9 M_1 , onde M_1 é a massa correspondente a capacidade de carga total do navio (TPB).

3.3.2.2 Massa deslocada pelo navio (M_2)

A massa M_2 , corresponde à massa de água que se movimenta em conjunto com o navio durante a atracação, é a consideração da massa hidrodinâmica pela NBR 9782:1987. Pode ser determinada pela expressão a seguir.

$$M_2 = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \cdot \gamma_a \quad (3.85)$$

Onde:

D = calado do navio nas condições da atracação;

L = comprimento do navio;

γ_a = massa específica da água.

A norma permite adotar valores diferentes dos calculados pela expressão (3.85) para a massa hidrodinâmica, desde que tenham sido comprovados por testes e/ou estudos científicos realizados em laboratório idôneo.

3.3.2.3 Velocidade de aproximação do navio (V)

De acordo com norma NBR 9782, a velocidade (V) de aproximação dos navios perpendicular à linha de atracação é afetada por uma série de fatores, quais sejam: tamanho dos navios, condições de abrigo, uso de rebocadores, habilidade do piloto e condições meteorológicas. Os valores mínimos a serem adotados para o cálculo da energia de atracação característica, segundo a referida norma, são os indicados na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores mínimos da velocidade de aproximação do navio para cálculo da energia de atracação segundo a NBR 9782:1987 (em m/s)

Condição	Aproximação	Velocidade perpendicular à linha de atracação			
		até	até	até	navios maiores
		1.000 TPB	5.000 TPB	10.000 TPB	
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
Ventos e ondas moderadas	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

Fonte: NBR 9782:1987, p. 11

3.3.2.4 Coeficiente de excentricidade (C_e)

O coeficiente de excentricidade segundo a NBR 9782:1987 leva em consideração a energia dispendida no movimento de rotação do navio, e é determinado pela expressão:

$$C_e = \frac{r^2}{l^2 + r^2} \quad (3.86)$$

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 (podendo ser considerado como aproximadamente igual a 25% do comprimento do navio).

3.3.2.5 Coeficiente de rigidez (C_r)

O coeficiente de rigidez (C_r) leva em consideração a parcela da energia de atracação absorvida pela deformação do costado no navio. Segundo a NBR 9782:1987, dependendo da rigidez do sistema de defensas o valor adotado pode variar entre 0,90 e 0,95.

3.3.2.6 Forças perpendiculares à linha de atracação

Após o cálculo da energia de atracação segundo o método da NBR 9782:1987, deve-se avaliar os esforços exercidos sobre a estrutura com o auxílio dos diagramas de energia do sistema de defensas empregado.

As forças características do impacto dos navios são as que correspondem às energias características determinadas conforme a equação (3.84) e de acordo com os tipos de defensas utilizadas. A referida norma preconiza que os valores de cálculo das forças de impacto no estado limite último devem ser considerados como o maior dos valores obtidos nas seguintes situações:

- a) Valor da força característica majorada pelo coeficiente de ponderação definido no item 11.3.1.3 da NBR 9782:1987;
- b) Valor da força correspondente à energia característica majorada pelo coeficiente de ponderação definido no item 11.3.1.3 da NBR 9782:1987.

Deve ser levado em consideração a possibilidade de compressão desuniforme das defensas devido à ocorrência de acostagem de navios não paralelamente à linha de atracação.

3.3.2.7 Forças paralelas à linha de atracação

Além das forças citadas em no item 3.3.2.6, a NBR 9782:1987 determina que seja considerada a ocorrência de forças paralelas à linha de atracação, que surgem durante a operação devido ao atrito entre o costado do navio e o sistema de defensas. Os valores característicos destas forças dependem do tipo de painel frontal utilizado no sistema de defensas. A Tabela 16 apresenta os coeficientes de atrito do aço com os materiais usualmente empregados nos painéis de defensas considerados pela norma.

Tabela 16 - Valores dos coeficientes de atrito do aço com outros materiais segundo a 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

Fonte: NBR 9782:1987, p. 13

3.3.2.8 Dimensionamento do sistema de defensas

Para atender à norma NBR 9782:1987, as instalações portuárias devem ser equipadas com um sistema de defensas que acate aos seguintes requisitos:

- a) O sistema deve ter capacidade para absorver a energia característica (E_c), majorada pelo coeficiente de ponderação definido no item 11.3.1.3 da norma;
- b) Na consideração do item 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 ou píeres contínuos, o espaçamento das defensas deve ser suficiente para que se assegure proteção à estrutura quando houver atracação oblíqua em relação à linha de atracação. Nesta situação dispensa-se a verificação do item b);
- e) As defensas empregadas devem ter curvas de deformação-reação e deformação-energia confiáveis, bem caracterizadas e estabelecidas a partir de ensaios e laboratórios idôneos. As tolerâncias admitidas em relação aos valores de referência devem ser perfeitamente definidas.
- f) 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.

3.3.3 Esforços de atracação segundo recomendações da BS, PIANC e EAU

Esta seção apresenta o método de cálculo dos esforços devido à atracação das embarcações segundo as recomendações da BS, PIANC e EAU. As referências citadas foram agrupadas no mesmo tópico devido ao fato de apresentarem as mesmas expressões para o

cálculo da energia de atracação. No âmbito da pesquisa efetuada, não se pôde verificar a origem da expressão e qual referência propôs primeiro.

O cálculo da energia de atracação nominal (em kN.m) é dado pela seguinte expressão:

$$E = \frac{1}{2} M_D V_B^2 C_E C_M C_S C_C \quad (3.87)$$

Onde:

E = energia de atracação nominal, em kN.m;

M_D = massa deslocada pelo navio, em toneladas;

V_B = velocidade de aproximação do navio, perpendicular à linha de atracação;

C_E = coeficiente de excentricidade;

C_M = coeficiente de massa hidrodinâmica;

C_S = coeficiente de amortecimento;

C_C = coeficiente de atracação.

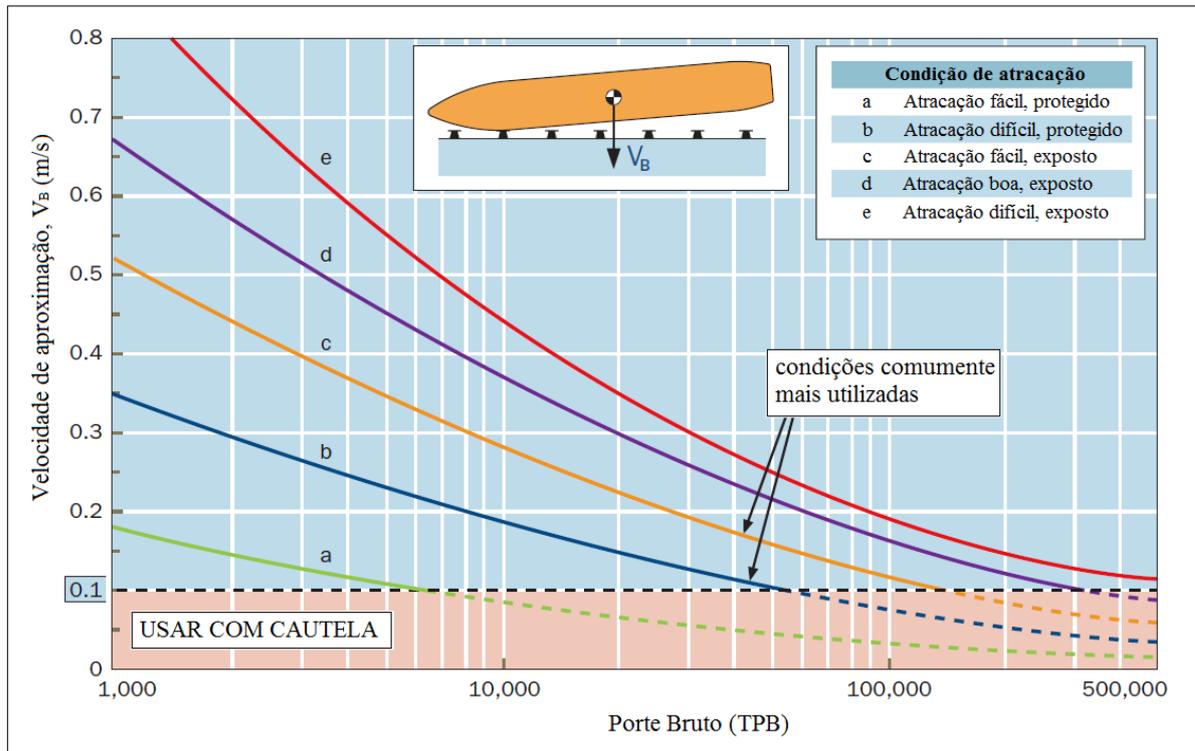
A massa M_D considerada no cálculo é o próprio deslocamento do navio em toneladas.

3.3.3.1 Velocidade de aproximação do navio (V_B)

A velocidade de aproximação é uma função das condições da navegabilidade (facilidade ou dificuldade de aproximação e a exposição da instalação portuária) e do tamanho do navio. As condições são normalmente divididas em cinco categorias, conforme mostrado a seguir.

As velocidades de aproximação do navio adotadas pela norma inglesa e pela PIANC (2002) são as propostas pela tabela de Brotsma (1977) *apud* PIANC (2002), apresentada na Figura 30.

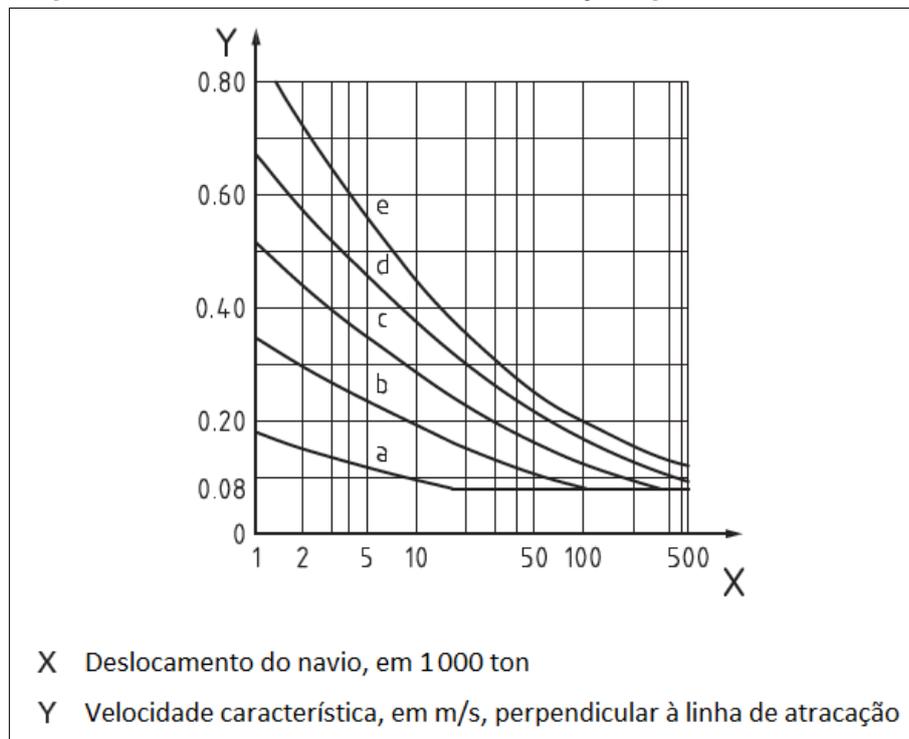
Figura 30 – Velocidades de aproximação – BS 6349-4-1994 (Brolsma *et al* (1977) *apud* PIANC (2002))



Fonte: Manual Trelleborg, 2011, p. 18

A versão de 2014 BS 6349-4 apresenta uma adaptação da tabela de Brolsma (1977) introduzindo um limite inferior para a velocidade de atracação de 0,08 m/s (ver Figura 31).

Figura 31 - Velocidades características de atracação segundo BS 6349-4:2014



Fonte: BS 6349-4:2014, p. 20

A PIANC (2002) apresenta alternativa para obtenção da velocidade de aproximação, a qual é apresentada na Tabela 17. Esta tabela é oriunda da norma espanhola ROM Standard 0.2-90.

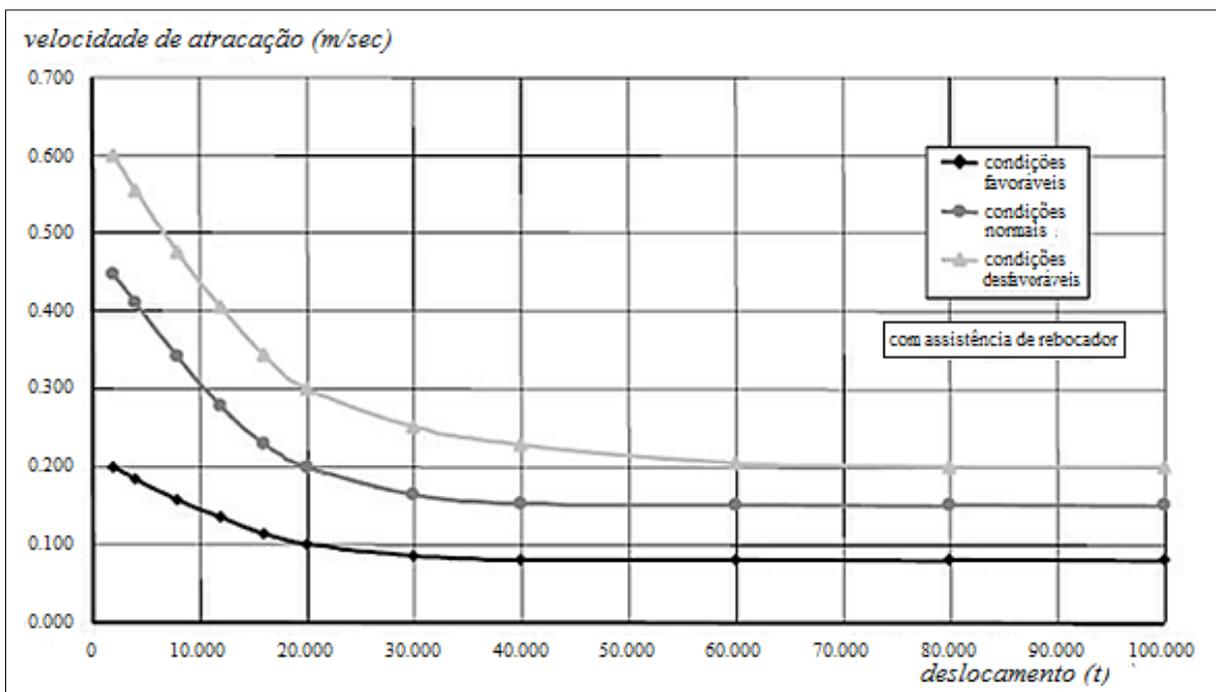
Tabela 17 – Alternativa para velocidades de aproximação sugeridas pela PIANC (2002) (em m/s)

Deslocamento do navio em toneladas	Condição favorável	Condição moderada	Condição Desfavorável
Até 10 000	0,20 – 0,16	0,45 – 0,30	0,60 – 0,40
10 000 - 50 000	0,12 – 0,80	0,30 – 0,15	0,45 – 0,22
50 000 - 100 000	0,08	0,15	0,20
Acima de 100 000	0,08	0,15	0,20

Fonte: PIANC (2002), p. 19

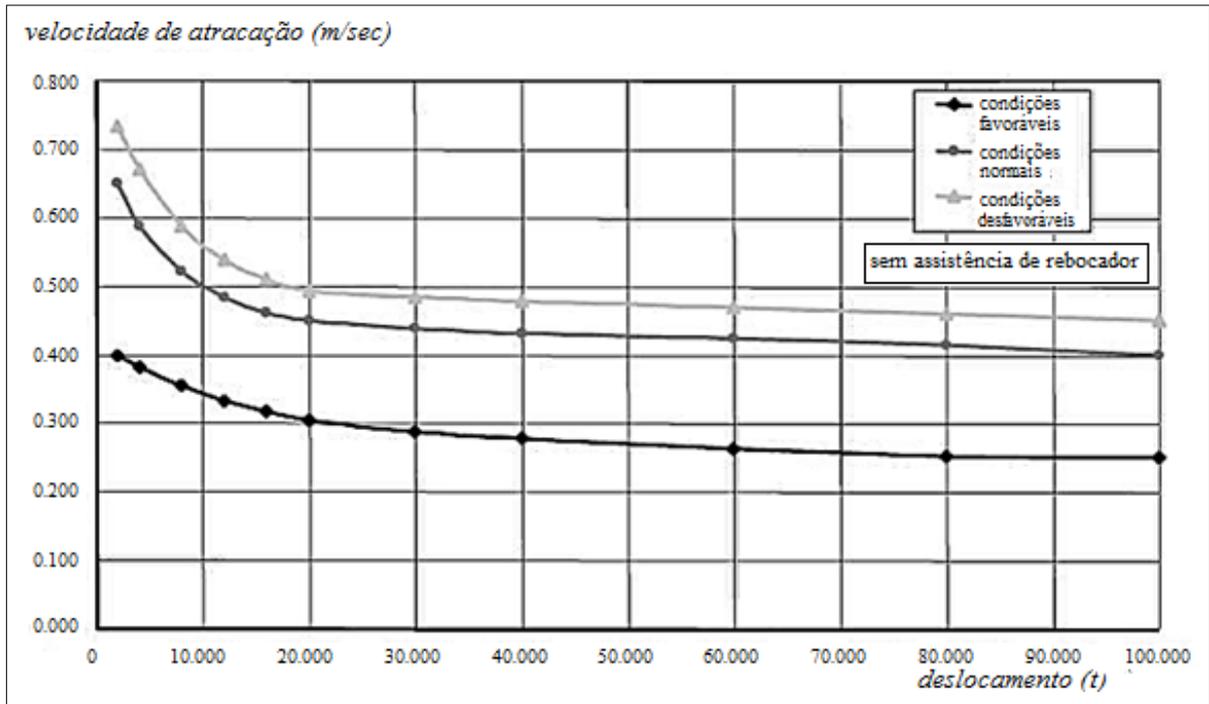
A EAU 2004 também recomenda as velocidades de aproximação do navio propostas pela norma espanhola, apresentando as velocidades recomendadas em duas situações: com a assistência de rebocador durante a atracação e sem assistência de rebocador (ver Figura 32 e Figura 33).

Figura 32 – Velocidades de aproximação do navio na atracação recomendadas pela EAU 2004 – Com assistência de rebocador



Fonte: EAU 2004

Figura 33 - Velocidades de aproximação do navio na atracação recomendadas pela EAU 2004 – Sem assistência de rebocador



Fonte: EAU 2004

3.3.3.2 Coeficiente de excentricidade (C_E)

O coeficiente de excentricidade 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, e, segundo a BS 6349-4-2014, é determinado pela expressão:

$$C_E = \frac{K^2 + R^2 (\cos \Phi)^2}{K^2 + R^2} \quad (3.88)$$

Onde:

K = é o raio de giração do navio, calculado pela expressão:

$$K = (0,19C_b + 0,11)L \quad (3.89)$$

Onde:

C_b = é o coeficiente de bloco do navio, obtido na Tabela 18;

L = 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 (ver Figura 34);

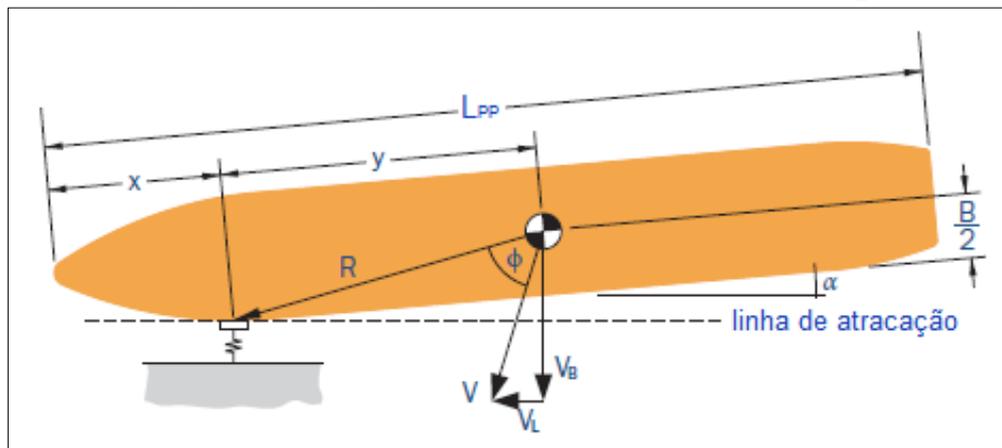
Φ = é o ângulo formado entre a linha que une o ponto de contato do casco na estrutura com o centro de massa do navio e a direção do vetor de velocidade (ver Figura 34).

Tabela 18 - Coeficientes de bloco típicos - BS 6349-4-1994

Tipo do navio	Variação 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

Fonte: BS 6349-4-1994, p. 6

Figura 34 – Definição da distância R utilizada no cálculo do C_E



Fonte: Manual Trelleborg, 2011, p. 20

A EAU 2004 recomenda que o valor do coeficiente C_E seja calculado pela expressão:

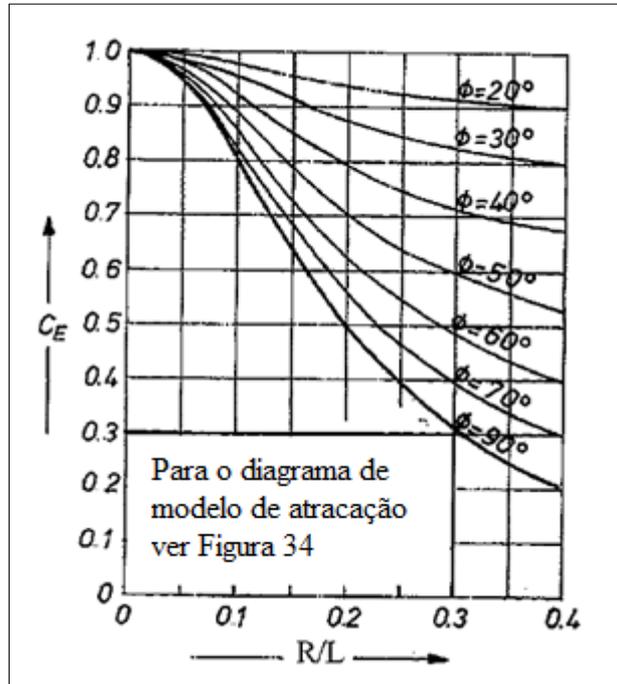
$$C_E = \frac{K^2}{K^2 + R^2} \quad (3.90)$$

que é uma expressão quase idêntica à utilizada pela NBR, não fosse pela NBR considerar a distância R como medida paralelamente à linha da atracação. A norma recomenda ainda que sejam adotados valores de C_E de 0,5 na ausência de informações para a realização dos cálculos, 0,7 para cálculo de energia de atracação em dolphins e 1,0 para navios do tipo RO-RO ou navios que atracam pela popa.

A PIANC (2002) recomenda o cálculo do coeficiente C_E pela expressão apresentada pela BS 6349-4-1994, ou, de forma simplificada adotando o valor de Φ igual a 90° , pela expressão apresentada pela EAU 2004. Ainda assim, recomenda valores de C_E de 0,5 para atracação em estruturas contínuas e 0,7 para atracação em dolphins.

Alternativamente, a PIANC (2002) apresenta a Figura 35 de onde se pode obter o coeficiente C_E em função de Φ e da relação R/L .

Figura 35 – Fator C_E em função de Φ e da relação R/L atracação



Fonte: PIANC (2002), p. 20

3.3.3.3 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.

A norma BS 6349-4-2014 recomenda a utilização do coeficiente proposto por Vasco Costa, dado pela expressão:

$$C_M = 1 + 2 \frac{D}{B} \quad (3.91)$$

Onde:

D = calado do navio;

B = boca do navio.

A norma ainda recomenda o uso de um C_M que fique entre os valores de 1,3 e 1,8.

A EAU 2004 recomenda a utilização de valores entre 1,5 e 1,8.

A PIANC (2002) apresenta as formulações de Vasco Costa e de Shigeru Ueda para o cálculo do C_M , além de uma tabela com valores calculados pelos dois métodos, a qual é apresentada na Tabela 19. Caso o projetista queira usar outros valores, a PIANC (2002) recomenda os valores de C_M variando entre 1,5 e 1,8, da mesma forma que a EAU 2004. Para casos de aproximação longitudinal do navio, a PIANC (2002) recomenda o valor de $C_M = 1,1$.

Tabela 19 - Valores de C_M propostos pela PIANC (2002)

		Navio 1 contêiner	Navio 2 contêiner	Navio 3 petroleiro	Navio 4 petroleiro	Navio 5 cargueiro	Navio 6 cruzeiro	Navio 7 cruzeiro	Navio 8 minério	Navio 9 barcaças p/ carros	Navio 10 cargueiro
Dimensões	TPB *	33 000	50 000	100 000	200 000	50 000	131 000	102 000	70 000	13 000	10 000
Comprimento	L	260	290	270	325	232	310	272	244	195	144
Largura	B	32,2	32,3	39	47,2	30	38,6	35,4	37,8	24	19,4
Calado	D	12,0	11,0	14,6	19,0	12,7	8,6	8,2	13,3	6,7	8,2
Deslocamento	M_D	51 000	68 200	119 700	233 300	68 200	64 400	63 600	84 300	13 000	13 800
Cb atual		0,50	0,65	0,79	0,78	0,75	0,61	0,79	0,67	0,40	0,59
Cb de Akakura		0,66	0,66	0,79	0,79	0,75	0,57	0,57	0,84	0,49	0,75
C_m											
Shigeru Ueda		2,18	1,83	1,77	1,81	1,88	1,57	1,46	1,82	2,08	2,13
Vasco Costa		1,75	1,68	1,75	1,81	1,85	1,45	1,46	1,70	1,56	1,85
média		1,96	1,76	1,76	1,81	1,87	1,51	1,46	1,76	1,82	1,99

* Para navios de cruzeiro usar GRT

Fonte: PIANC (2002), p. 21

3.3.3.4 Coeficiente de amortecimento (C_s)

É o coeficiente que considera a parcela de energia de atracação absorvida pela deformação do casco da embarcação. As referidas normas preconizam que usualmente são utilizados valores de C_s entre 0,9 e 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 36 – Definição do coeficiente de amortecimento do casco



Fonte: Manual Trelleborg, 2011, p. 22

Conforme mencionado por Mason (1982), deve-se garantir que força aplicada sobre o navio como reação da força transmitida pela defesa à estrutura da obra fique abaixo dos

limites que possam causar danos ao seu casco. A Tabela 20 apresenta os valores máximos admissíveis para pressão no casco no navio durante a atracação segundo recomendações da PIANC (2002).

Tabela 20 - Valores máximos admissíveis para pressão no casco do navio durante a atracação segundo PIANC (2002)

Tipo de navio	Tamanho/classe	Pressão no casco (kN/m ²)
Navios de Contêineres	< 1 000 teu (1 ^a /2 ^a geração)	< 400
	< 3 000 teu (3 ^o geração)	< 300
	< 8 000 teu (4 ^a geração)	< 250
	> 8 000 teu (5 ^a /6 ^a geração)	< 200
Navios de Carga geral	≤ 20 000 TPB	400-700
	> 20 000 TPB	< 400
Petroleiros	≤ 20 000 TPB	< 250
	≤ 60 000 TPB	< 300
	> 60 000 TPB	150-200
Navios de Granel gasoso	LNG/LPG	< 200
Graneleiros		< 200
Ro-Ro Passageiros/Cruzeiros SWATH		Geralmente equipados com correias

Fonte: Manual Trelleborg, 2011, p. 27

3.3.3.5 Coeficiente de atracação (C_C)

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.

A BS 6349-4-1994 recomendava valores de 1,0 para estruturas abertas, tipo dolphins, e valores entre 0,80 e 1,00 para estruturas contínuas, tipo píeres ou cais. Na versão de 2014 passou a recomendar o valor de 0,9 para estruturas fechadas com aproximação paralela (ângulo de aproximação < 5°) e 1,0 para todos os demais casos.

A EAU 2004 e a PIANC (2002) recomendam valores de 1,0 para estruturas abertas e 0,9 para estruturas fechadas.

Figura 37 – Ilustração do coeficiente de atracação



Fonte: Manual Trelleborg, 2011, p. 22

3.3.3.6 Forças perpendiculares à linha de atracação

Uma vez calculada a energia de atracação, deve-se multiplicar esse valor por um fator de segurança que é função do tipo do navio, conforme apresenta a Tabela 21.

De posse da energia resultante, devem-se avaliar os esforços exercidos sobre a estrutura com o auxílio dos diagramas de energia do sistema de defensas adotado.

Tabela 21 - Fatores de segurança para majoração da energia de atracação segundo PIANC (2002)

Tipo de navio	Tamanho	F _s
Petroleiros, graneleiros, cargueiros	Maior	1,25
	Menor	1,75
Porta-contêineres	Maior	1,5
	Menor	2,0
Carga geral		1,75
Ro-Ro, barcaças		≥ 2,0
Rebocadores e similares		2,0

Fonte: Manual Trelleborg, 2011, p. 12

3.3.3.7 Forças paralelas à linha de atracação

Assim como mencionado no item 3.3.2.7, deve-se considerar a ocorrência de forças paralelas à linha de atracação, que surgem durante a operação devido ao atrito entre o costado do navio e o sistema de defensas. A BS 6349-4-1994 recomenda que, na ausência de informações fornecidas pelo fabricante das defensas sobre a força paralela à linha de atracação que deve ocorrer em operação, sejam considerados os coeficientes de atrito apresentados na Tabela 22 para o cálculo desta força.

Tabela 22 – Coeficientes de atrito em função do tipo de material segundo BS 6349-4-1994

Material	Coeficiente de atrito μ
Polietileno	0,2
Nylon	0,2
Borracha	0,5
Madeira	0,3

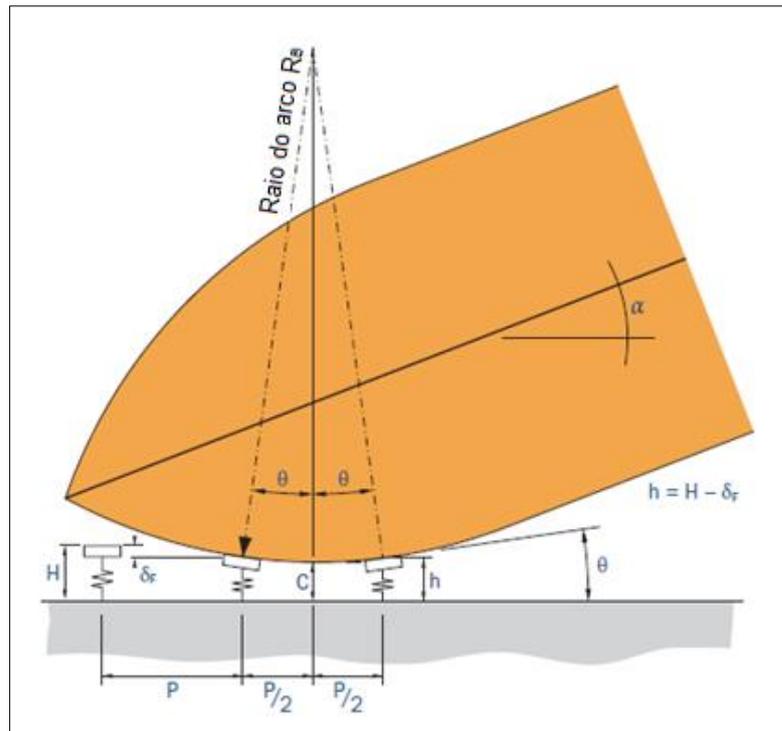
Fonte: BS 6349-4:1994, p. 8

3.3.3.8 Espaçamento entre defensas

Um arranjo de defensas com espaçamentos grandes entre uma e outra pode permitir que os navios batam diretamente na instalação portuária.

Em estruturas de acostagem contínuas deve-se calcular este espaçamento para evitar este tipo de acidente (ver Figura 38).

Figura 38 – Ilustração do espaçamento entre defensas



Fonte: Manual Trelleborg, 2011, p. 24

Na Figura 38 o ângulo α é o ângulo de atracação e o ângulo θ é o ângulo de contato entre o casco e a defesa.

O espaçamento mínimo pode ser calculado pela expressão:

$$P \leq 2\sqrt{R_B^2 - (R_B - h + C)^2} \quad (3.92)$$

Onde:

P = espaçamento entre defensas;

h = comprimento da defesa quando comprimida, medido na linha central da defesa;

C = folga entre o navio e a estrutura de acostagem (C deve ficar entre 5% e 15% da projeção da defesa não comprimida, incluindo o painel);

R_B = raio do arco do casco do navio, dado pela expressão;

$$R_B \approx \frac{1}{2} \left(\frac{B}{2} + \frac{L_{OA}^2}{8B} \right) \quad (3.93)$$

Onde:

B = boca do navio, em m;

L_{OA} = comprimento total do navio, em m.

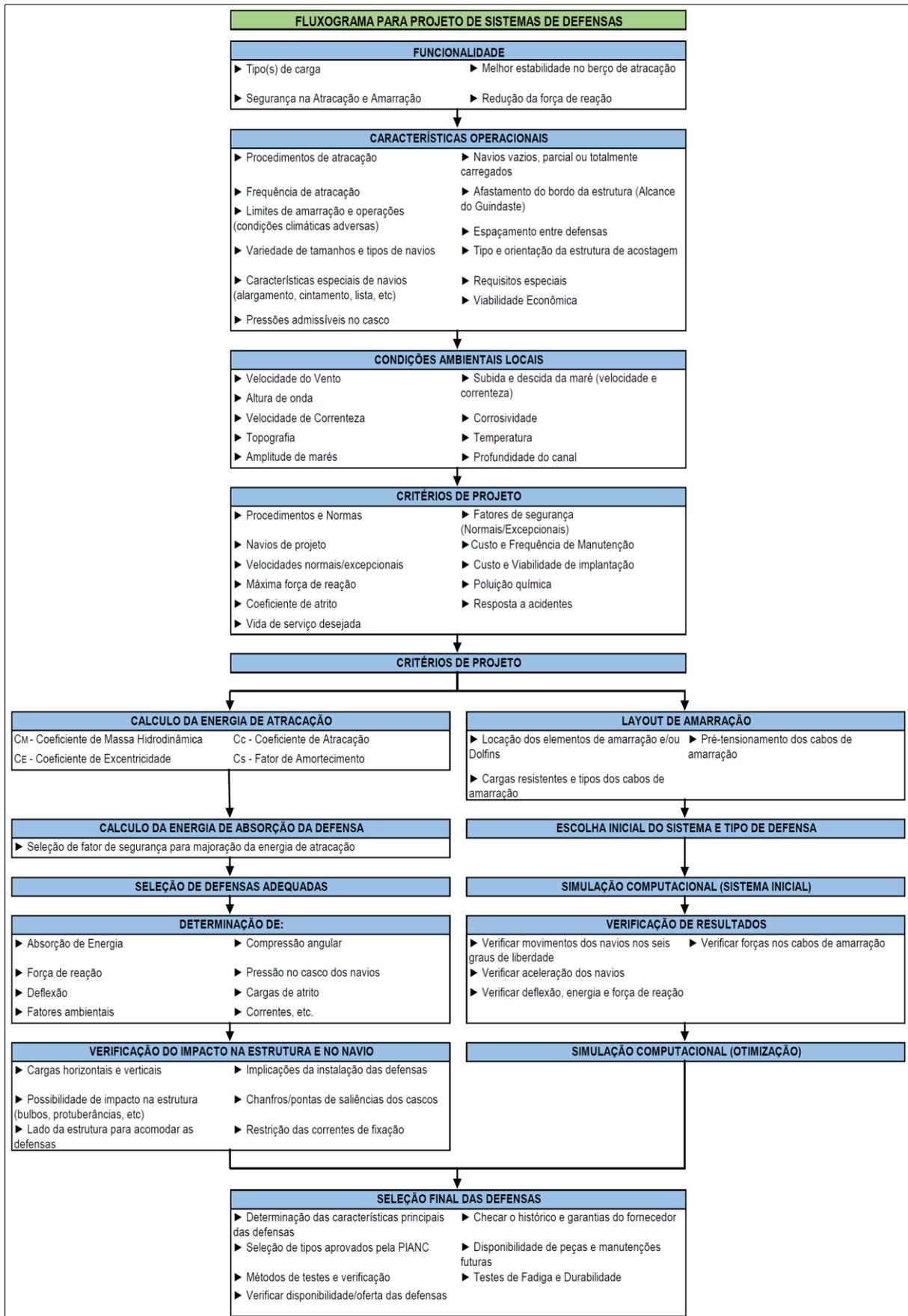
Deve-se verificar, sempre que possível, o valor real do raio de arco do casco de acordo com as dimensões reais do navio, pois a equação (3.93) fornece valores aproximados.

De acordo com a BS 6349-4-1994, é recomendável que o espaçamento entre defensas não exceda o valor de $0,15 \cdot L_S$, onde L_S é o comprimento do menor navio que poderá atracar na instalação portuária.

3.3.3.9 Fluxograma para projeto de sistema de defensas

A Figura 39 apresenta um fluxograma para o projeto de um sistema de defensas adaptado da PIANC (2002).

Figura 39 – Fluxograma para projeto de sistemas de defensas segundo PIANC (2002)



Fonte: Manual Trelleborg, 2011, p. 5

3.3.4 Principais tipos de defensas

De modo geral, podem-se agrupar as defensas em três categorias: elásticas, de gravidade e de tipos diversos. As defensas elásticas operam na base da deformação do sistema com absorção de energia elástica. O princípio das defensas de gravidade consiste em usar a energia do choque para fazer subir o baricentro de um terminado peso. E fora dessas categorias, podem-se encontrar tipos que tiram proveito de fenômenos diversos, tais como compressão do ar, flutuação de pontões, etc (Mason, 1982, p. 129).

A norma NBR 11240:1990 fixa as diretrizes para a utilização de defensas nas instalações portuárias, classificando-as quanto: (i) ao material utilizado, podendo ser de madeira, metálicas, cordoalha e elastômeros; (ii) quanto à colocação na estrutura de acostagem, podendo ser corridas, isoladas ou agrupadas; (iii) quanto à fixação, podendo ser fixas ou móveis; (iv) quanto ao modo de aplicação da carga, podendo ser axiais ou transversais; (v) quanto ao modo de absorção da energia de atracação, podendo ser por conversão em energia potencial por elevação de massa, conversão em energia potencial por imersão, conversão em energia potencial por deformação elástica, por dissipação sob forma de energia térmica por efeitos hidrodinâmicos e por dissipação por deformação plástica; e (vi) quanto ao comportamento, podendo ser de alta ou baixa flexibilidade.

3.3.4.1 Defensas elásticas

A maior parte das variantes de defensas elásticas preconiza o emprego de elementos de borracha, submetida a processos tecnológicos especiais, destinados a dar-lhe resistência à ação da água do mar. Diversos tipos foram desenvolvidos e patenteados por fabricantes (Mason, 1982, p. 129).

Internacionalmente, a PIANC 2002 estabelece método de ensaio para verificação da qualidade, eficiência e certificação de defensas portuárias.

No Brasil, a NBR 11832:1991 fixa as condições exigíveis para aceitação e recebimento dos elastômeros a serem empregados em defensas portuárias. A NBR 12608:1992 padroniza os subtipos e dimensões das defensas portuárias de elastômeros do tipo cilíndricas. A NBR 12828:1993 padroniza os subtipos e dimensões das defensas portuárias de elastômeros do tipo em V. Na NBR 12095:1991 é estabelecido o método de ensaio à compressão em defensas portuárias de elastômeros. E a NBR 13009:1993 padroniza os subtipos e dimensões das defensas portuárias de elastômeros cilíndricas axiais, especificadas na NBR 11832.

Mason (1982) apresenta um levantamento sobre os principais tipos de defensas e seus comportamentos, o qual é apresentado a seguir. Embora o estudo de Mason (1982) já possua considerável tempo, os princípios a serem reproduzidos neste trabalho permanecem atuais.

O tipo mais rudimentar de defensas elásticas são os pneus, eventualmente reforçados por enchimento adequado. É conveniente submetê-los a testes de carga e descarga para obter o diagrama de energia, permitindo obter a estimativa de capacidade de absorção de energia destes.

Um tipo também bastante utilizado são os cilindros de borracha, com orifício interno de modo a possibilitar a livre expansão lateral da borracha em compressão, quando há uma estrutura de ligação que permite seu funcionamento conjunto. Estes cilindros podem ser de grandes comprimentos e solicitados diametralmente. Têm-se então as defensas tubulares ou cilíndricas radiais, que são muito comuns na proteção dos paramentos de cais. O diagrama carga-deformação das defensas cilíndricas é do tipo (2) da Figura 25.

As defensas tipo *Raykin* possuem grande capacidade de absorção de energia e consistem de uma espécie de “sanfona” de borracha, com boa capacidade de resistir também aos esforços horizontais. O seu diagrama é do tipo (1) da Figura 25.

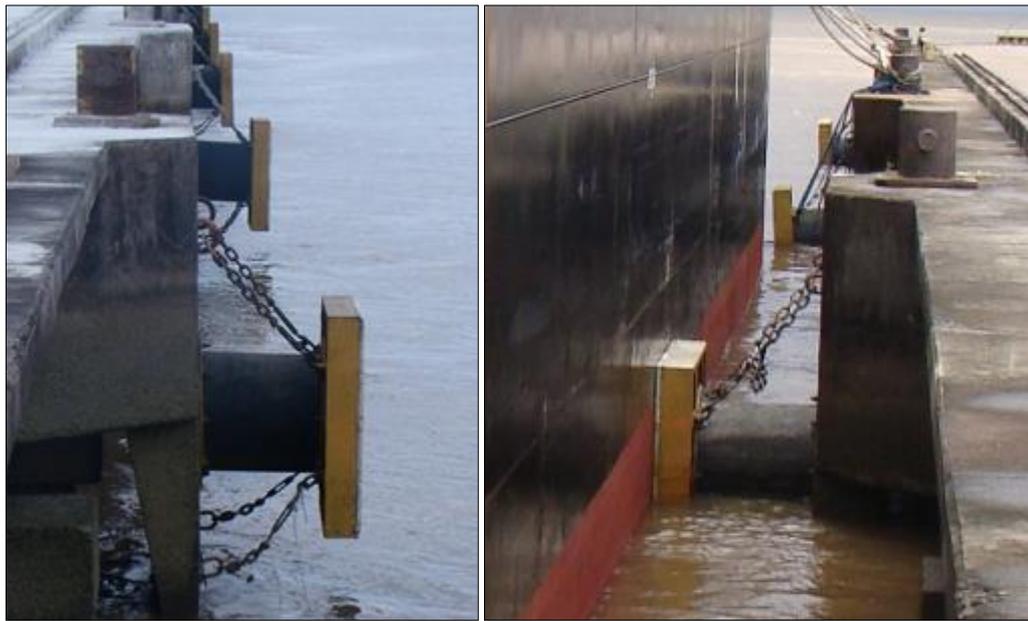
Outro tipo de defesa de grande capacidade energética é o tipo *Lord*. Este tipo consiste de um elemento de borracha, em forma de coluna de seção variável, com a seção mínima na porção média. Quando carregada acima de certo limite, a coluna flamba, dissipando grande quantidade de energia sob forma não mecânica. O seu diagrama apresenta-se como na Figura 26 (a).

Outro tipo de defensas muito empregado é a do tipo cilíndrica axial (ver Figura 40), que nada mais é do que um grande cilindro de borracha, comprimido axialmente e sofrendo flambagem. O seu diagrama é do tipo (1) da Figura 25, o mesmo ocorrendo com as defensas tipo V, que são fabricadas em comprimentos L diversos e podem ser dispostas ao longo de cais vertical ou horizontalmente.

Para completar a breve enumeração de defensas elásticas, Mason (1982) cita também os dolphins elásticos. Este tipo de defesa consiste de uma estaca ou conjunto de estacas de aço que recebem o impacto em seu topo, absorvendo a energia transmitida pelo choque em forma de energia elástica. A energia absorvida pode ser calculada como trabalho externo ou como trabalho interno, a partir de conceitos da Mecânica dos Sólidos. Os dolphins elásticos podem ter diversas aplicações, indo desde terminais de *ferry-boats* até grandes terminais petroleiros. Uma desvantagem destes dolphins é que podem sofrer deformações permanentes quando solicitados além da sua capacidade.

Destaca-se também as defensas tipo cônicas (ver Figura 42), que apresentam uma grande capacidade de absorção de energia sem uma grande transferência de forças às embarcações e às estruturas. Este tipo de defesa possui elevado desempenho, apresentando uma excelente relação energia-deformação, sendo hoje em dia as defensas que apresentam a maior capacidade de absorção de energia. A sua forma cônica permite que resistam a elevadas pressões e ângulos de compressão (Leal, 2011, p. 8).

Figura 40 – Exemplo de aplicação de defensas cilíndricas axiais



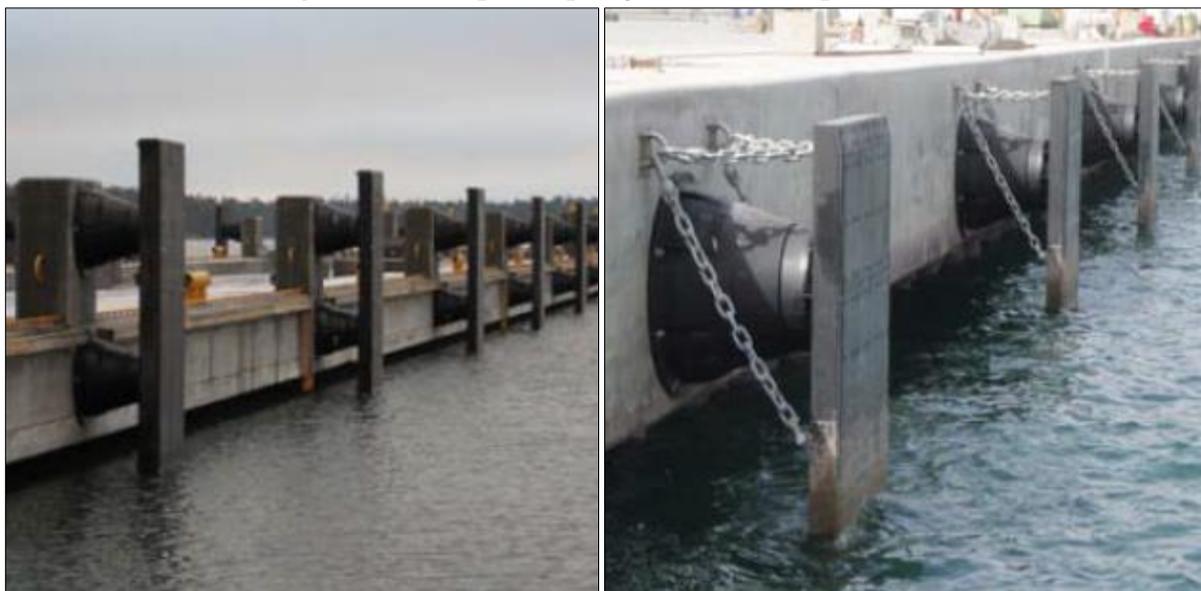
Fonte: Acervo Dynamis Techne, 2013

Figura 41 – Exemplo de aplicação de defesa tipo PI



Fonte: Catálogo Sumitomo, 2013

Figura 42 – Exemplo de aplicação de defensas tipo cônicas



Fonte: Catálogo Sumitomo, 2013

Figura 43 – Exemplo de aplicação de defesa tipo modular em canto



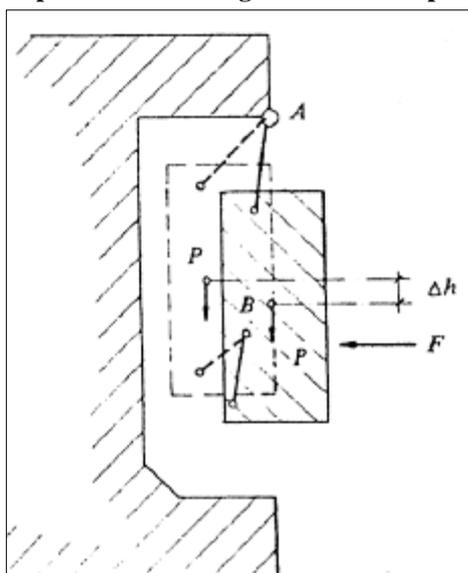
Fonte: Catálogo Sumitomo, 2013

3.3.4.2 Defensas de gravidade

O princípio das defensas de gravidade consiste em transformar a energia de impacto da embarcação em trabalho de elevação do centro de gravidade de um peso.

As defensas de gravidade utilizam este princípio adotando diferentes disposições construtivas. Como, em geral, têm-se grandes energias a absorver e problemas de ordem construtiva não permitem o movimento do peso além de certos limites, estas defensas pressupõem grandes massas de material, a qual pode constituir em importante adição de sobrecarga na estrutura. (Mason, 1982, p. 134). Este tipo de defesa praticamente caiu em desuso devido à grande eficiência das defensas de borracha.

Figura 44 – Exemplo de defesa de gravidade com operação na vertical



Fonte: Mason, 1982, p. 134

3.3.4.3 Outros tipos de defensas

Nesta categoria citam-se as defensas pneumáticas, hidropneumáticas, de pontões, etc. As defensas pneumáticas consistem de bolsões de borracha com enchimento de ar, que se interpõem entre o navio e o cais. Segundo dados de fabricantes, a absorção de energia pode chegar a valores muito elevados, com forças relativamente baixas sobre a estrutura e o navio. Os bolsões possuem válvula de segurança que não permite a subida excessiva da pressão de ar (Mason, 1982, p. 135).

Figura 45 – Exemplo de aplicação de defensas tipo pneumáticas



Fonte: Manual Trelleborg, 2011

As defensas hidropneumáticas baseiam-se em princípio análogo, incluindo, porém, juntamente com o ar, água no interior do bolsão. A água, no entanto, é expelida acima de certos limites de pressão (Mason, 1982, p. 135).

3.3.4.4 Critérios de seleção das defensas

Dentre os tipos de defensas citados, cabe ao projetista de uma instalação portuária optar por algum deles. A escolha do tipo de defesa a empregar depende de considerações diversas, dependendo da natureza da obra, além das considerações de ordem econômica (Mason, 1982, p. 136).

Nos casos de um projeto com infraestrutura vazada e esbelta, incapaz de resistir a grandes esforços horizontais, conduz-se a adoção de defensas elásticas com baixa constante de mola. Como se observa pela simples expressão $E_d = 1/2F\delta$, pode-se absorver a energia, através de grande força aliada a um deslocamento pequeno ou vice-versa. Neste último caso, é apropriado adotar uma defesa que sofra grandes deformações, de modo a reduzir o módulo da força aplicada na estrutura (Mason, 1982, p. 136).

Em casos de obras maciças, capazes de resistir a grandes esforços horizontais, podem-se utilizar defensas elásticas de menor flexibilidade, em geral mais baratas.

Já as defensas de gravidade são sempre elementos de grande peso e acarretam aumento de dimensões da superestrutura, sendo, portanto, pouco utilizadas.

3.4 Principais tipos de cais

Uma estrutura acostável pode ser classificada de acordo a sua localização, condições de abrigo, função, sistema de carga e descarga ou ainda por tipo estrutural.

Destaca-se aqui a classificação pelo tipo estrutural, onde se pode classificar um cais como possuindo paramento fechado ou aberto.

Os cais do tipo fechado são aqueles constituídos de uma cortina frontal com todo o terrapleno no tardoz. Podem ser subdivididos em cais de gravidade e cais de cortina de estacas. Praticamente a totalidade dos portos mais antigos do mundo é constituída de paramento fechado. Estes tipos de cais possuem limitação de profundidade, tendo em vista as suas características, e, portanto, são limitados ao recebimento de navios com calados menores.

Os cais do tipo aberto caracterizam-se essencialmente como estruturas leves, com cargas verticais e horizontais absorvidas por estacas. São estruturas que não dependem da margem para sua sustentação e, portanto, podem ser construídas distantes do continente, o que permite a obtenção de profundidades maiores, possibilitando a ancoragem de navios com

maiores calados. O avanço da indústria naval conduz ao surgimento de navios com dimensões cada vez maiores, que demandam instalações portuárias capazes de permitir a sua atracação e amarração. Neste sentido é notável que as estruturas das instalações portuárias contemporâneas para navios de grande porte sejam predominantemente construídas em cais abertos, como, por exemplo, píeres e dolphins.

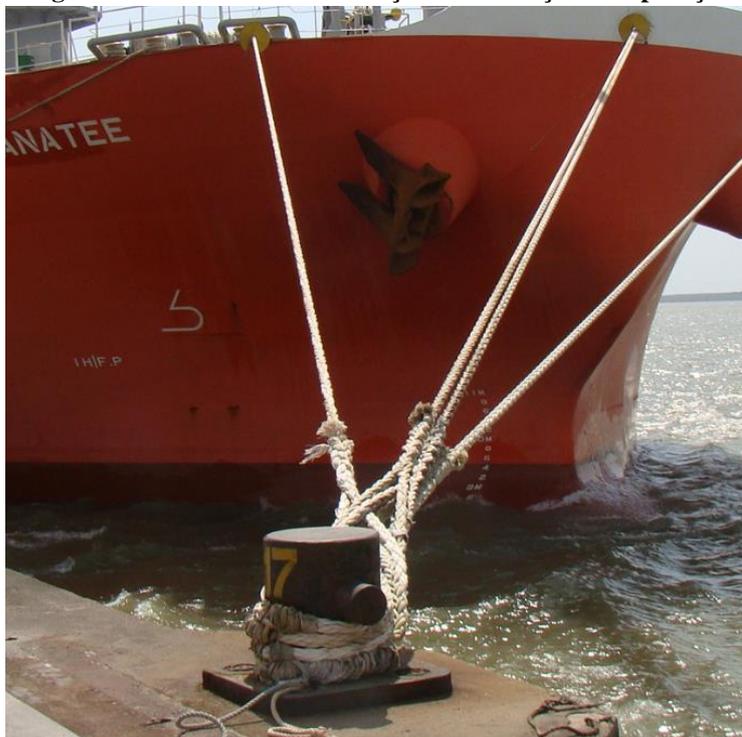
3.5 Elemento de segurança na amarração e atracação

Neste item apresentam-se algumas considerações sobre os elementos acessórios nas operações de atracação e amarração de navios nas instalações portuárias.

Os cabeços de amarração (Figura 46) têm a função de fazer a ligação entre o navio e a estrutura da instalação portuária, transferindo a esta última os esforços oriundos do primeiro.

Em situações extremas de ventos ou variação de ondas é necessário que estes elementos trabalhem como fusíveis, entrando em colapso antes que a estrutura da instalação portuária sofra danos. Um acessório muito útil para situações deste tipo são os ganchos de desengate rápido (Figura 47), muito utilizados nos projetos mais modernos de instalações portuárias, os quais permitem a rápida liberação do navio à estrutura em casos extremos.

Figura 46 – Detalhe de um cabeço de amarração em operação



Fonte: Acervo Dynamis Techne, 2013

Figura 47 – Gancho de desengate rápido

Fonte: Catálogo Pulsar Marine, 2014

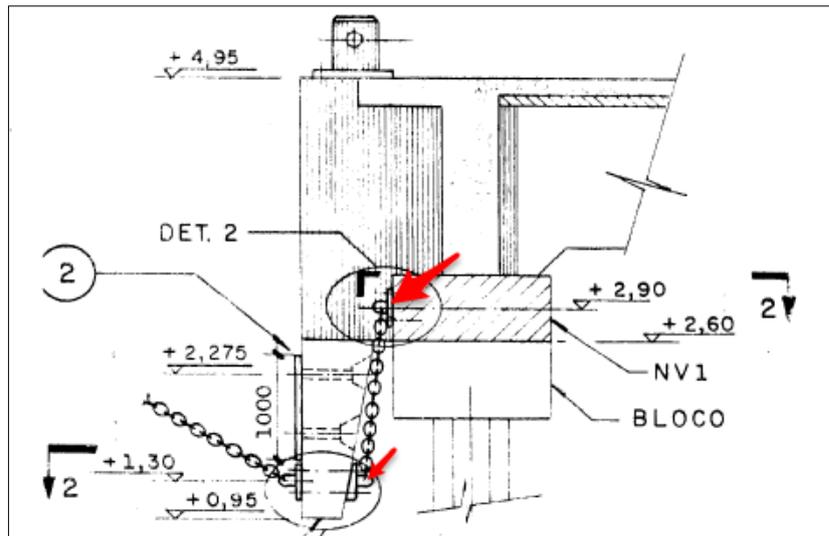
Outro elemento muito útil neste contexto são as pestanas utilizadas para fixação das defensas, bastante utilizadas em dolphins e píeres contínuos.

Estes elementos permitem que, em casos de atracação em que a energia devida ao navio seja acima do valor calculado no projeto, como, por exemplo, em uma situação em que a velocidade de aproximação seja superior à estimada nos cálculos e ocasionada por uma agitação excessiva das águas, a estrutura sofra um colapso localizado em um ponto frágil planejado, o qual evita a transmissão de esforços elevados aos outros elementos estruturais e permite uma recuperação rápida e de menor custo.

Figura 48 – Detalhe de uma defesa cilíndrica axial afixada em uma pestana

Fonte: Acervo Dynamis Techne, 2013

Figura 49 – Desenho de projeto de uma pestana em um píer fluvial



Fonte: Acervo Dynamis Techne, 2013

4 APLICACÃO DOS MÉTODOS – ESTUDO DE CASO

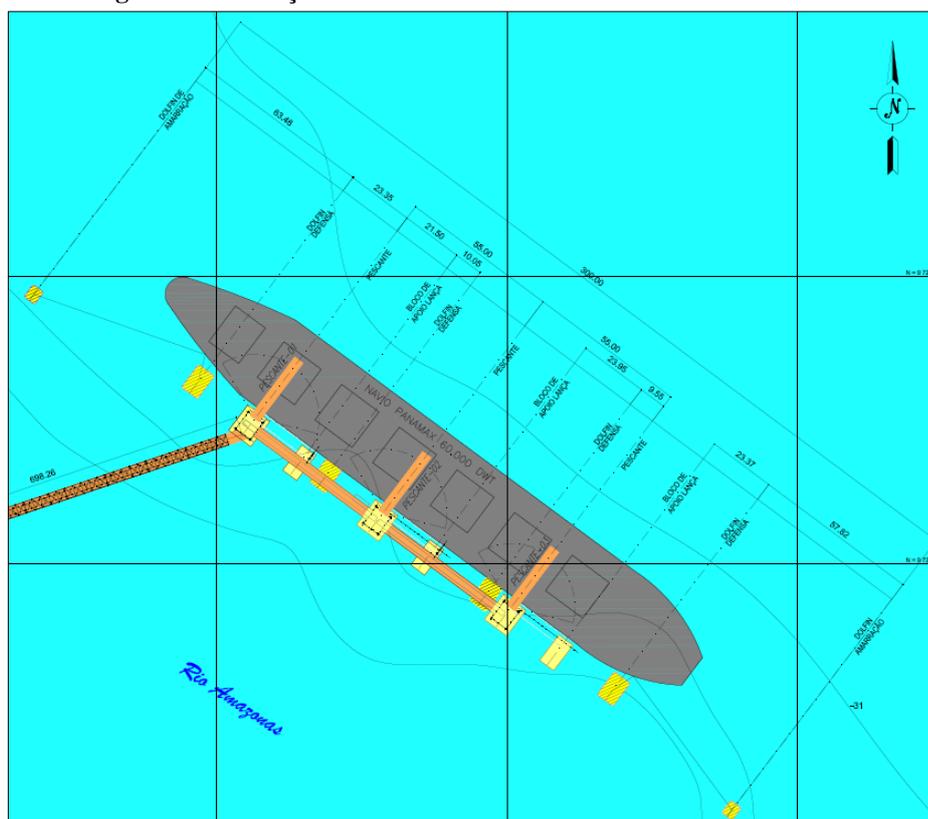
4.1 Estudo de caso - Terminal de granéis vegetais sólidos

O estudo de caso deste trabalho refere-se a uma instalação portuária fluvial, integrante de um terminal concebido para operar com a movimentação de granéis sólidos de origem vegetal (soja e milho), recebendo o produto por via rodoviária e expedindo-o através de navios, e ser implantado às margens do Rio Amazonas na cidade de Santarém – PA.

O terminal será composto de 4 (quatro) armazéns do tipo fundo chato com capacidade de armazenar 110.000 ton cada, gerando uma capacidade estática total de 440.000 ton, podendo movimentar até 7.920.000 ton de soja por ano. Para fazer a recepção da carga, o Terminal contará com 6 (seis) tombadores de carretas com capacidade para receber bi trens. Terá um pátio regulador de caminhões para melhor controle e eficiência no desembarque dos grãos.

De acordo com a concepção do recebimento de cargas do terminal, este possuirá 1 (um) berço para atracação de navios graneleiros do tipo Panamax de 60.000 TPB e 12,00 m de calado, composto por 4 (quatro) dolphins de atracação e 2 (dois) dolphins de amarração, dispostos em linha (ver Figura 50). Para esta configuração, considerou-se no projeto conceitual a utilização de 3 (três) torres de carregamento com capacidade nominal de 3.000 t/h.

Figura 50 – Locação da linha de dolphins – detalhe dos afastamentos



Fonte: Acervo Dynamis Techne, 2013

A cota média do leito do rio na linha de dolphins é de -24,57 m (Imbituba-SC), conforme apresentado na Figura 57, resultando em uma lâmina d'água com profundidade média de 27,87 m para o NA mín e 35,77 m para o NA máx. As cotas do NA máximo e mínimo consideradas foram 11,20 m e 3,30 m, respectivamente.

A direção da correnteza do Rio Amazonas é alinhada com a linha de dolphins, entretanto, para obtenção dos esforços de amarração considerou-se uma inclinação na direção da corrente de 20° com o eixo longitudinal do navio, conforme recomendação mínima da NBR 9782. Para tanto, foram estabelecidos 5 (cinco) casos de cargas distintos, para os quais considerou-se as diversas possibilidades de ocorrência das combinações do vento e da corrente.

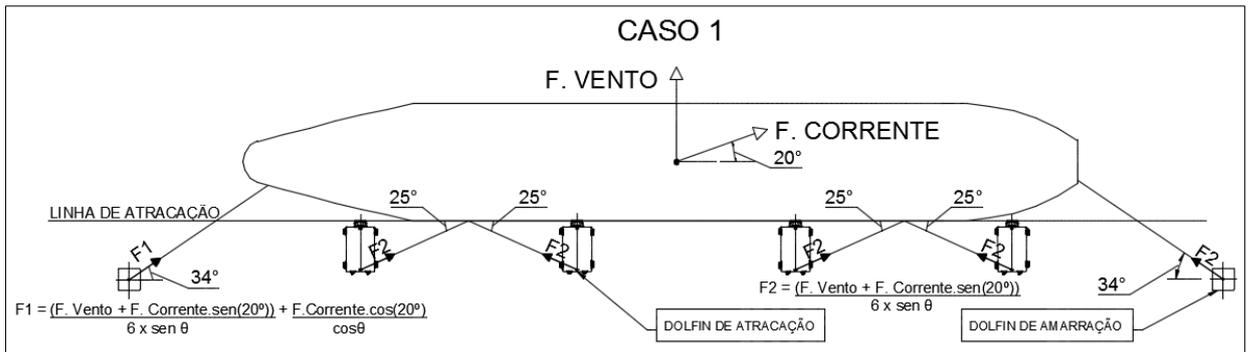
O vento foi considerado como atuando na direção longitudinal e transversal ao navio, em momentos distintos. Para a corrente, considerou-se a incidência desta em dois momentos distintos, quais sejam (i) na direção longitudinal ao navio e (ii) com uma inclinação de 20° com o eixo longitudinal do navio. Quando a corrente atua na direção inclinada a 20° com o eixo longitudinal do navio, são consideradas as componentes transversal e longitudinal da força devida à corrente na realização dos cálculos dos esforços resultantes.

Estabeleceu-se um esquema de amarração de referência para os navios que atracarão nos dolphins, que, por sua vez, permitiu obter as inclinações horizontais e verticais dos cabos de amarração. As inclinações horizontais dos cabos dependem deste esquema de amarração adotado, e as inclinações verticais dependem deste esquema de amarração, do NA do rio e da condição de carregamento do navio. A seguir apresentam-se estas inclinações obtidas. Para as inclinações verticais, foram consideradas as situações do navio vazio e totalmente carregado, combinadas com o NA máximo e mínimo do rio.

O APÊNDICE 1 apresenta o detalhamento do cálculo destes esforços, para a situação do NA Máximo, a título de demonstração.

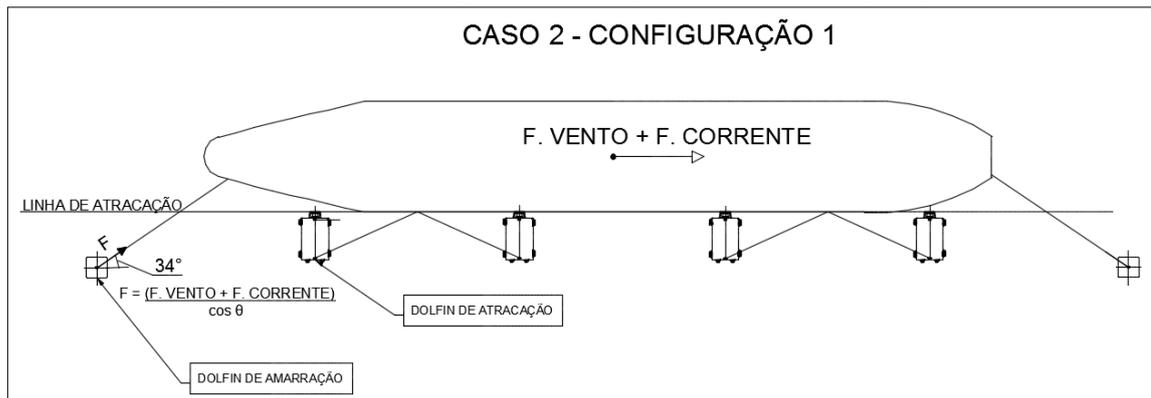
A Figura 51 apresenta o Caso 1 da amarração, no qual se considera a força do vento atuando na direção transversal ao navio e a força da correnteza atuando em uma direção inclinada a 20° do eixo longitudinal do navio. Neste caso, a força do vento e a componente transversal da corrente são divididas em 6 (seis) cabeços de amarração, e a componente longitudinal da corrente é lançada em um cabo apenas, qual seja o lançante de proa, ligado a um dolfin de atracação.

Figura 51 - Caso de carga 1 na amarração do navio



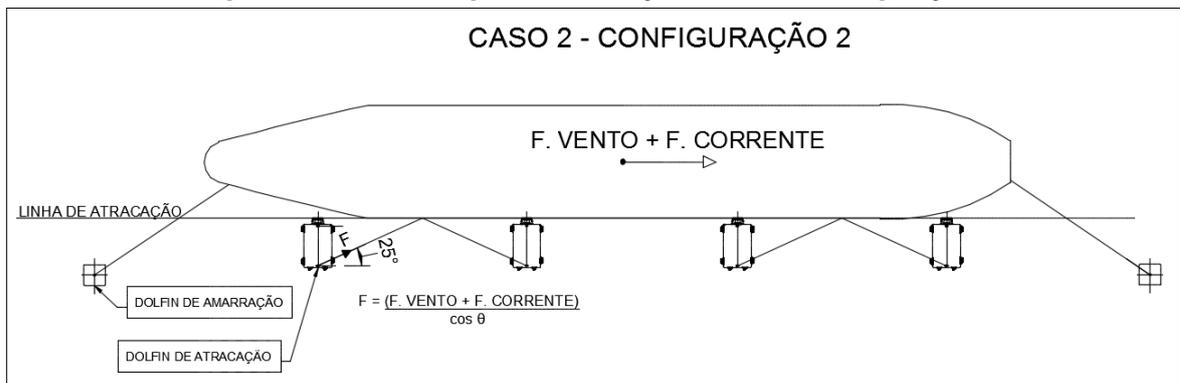
A Figura 52 apresenta o Caso 2 da amarração, no qual se consideram as forças do vento e da correnteza atuando na direção longitudinal ao navio, lançadas em 1 (um) cabeço de amarração, na sua Configuração 1, que considera os esforços lançados no cabeço de um dolfin de amarração.

Figura 52 - Caso de carga 2 na amarração do navio – Configuração 1



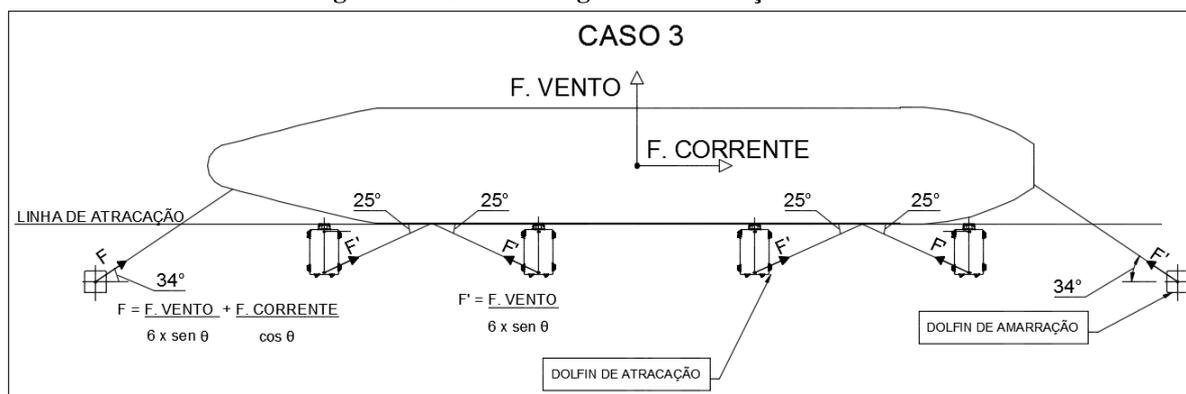
A Figura 53 apresenta o Caso 2 da amarração na sua Configuração 2, que considera os esforços lançados no cabeço de um dolfin de atracação.

Figura 53 - Caso de carga 2 na amarração do navio – Configuração 2



A Figura 54 apresenta o Caso 3 da amarração, no qual se considera a força do vento atuando na direção transversal ao navio, dividida em 6 (seis) cabeços de amarração e a força da correnteza atuando na direção longitudinal ao navio, lançada em 1 (um) cabeço de um delfim de amarração.

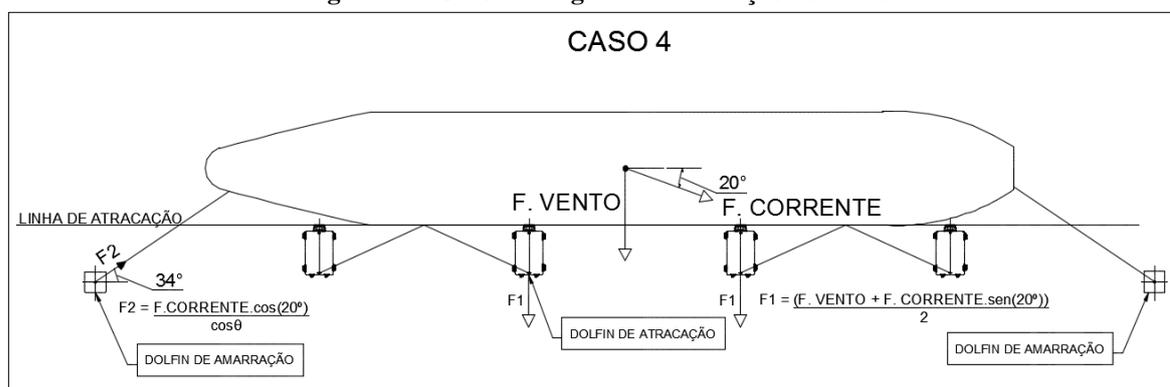
Figura 54 - Caso de carga 3 na amarração do navio



Fonte: Produção do autor

A Figura 55 apresenta o Caso 4 da amarração, no qual se considera a força do vento atuando na direção transversal ao navio, em sentido invertido (empurrando os delfins), e a força da correnteza atuando em uma direção inclinada a 20° do eixo longitudinal do navio. Neste caso, a força do vento e a componente transversal da correnteza (que empurram os delfins) são divididas em 2 (dois) delfins de atracação e a componente longitudinal da correnteza é lançada em um cabo apenas, qual seja o lançante de proa, ligado a um delfin de atracação.

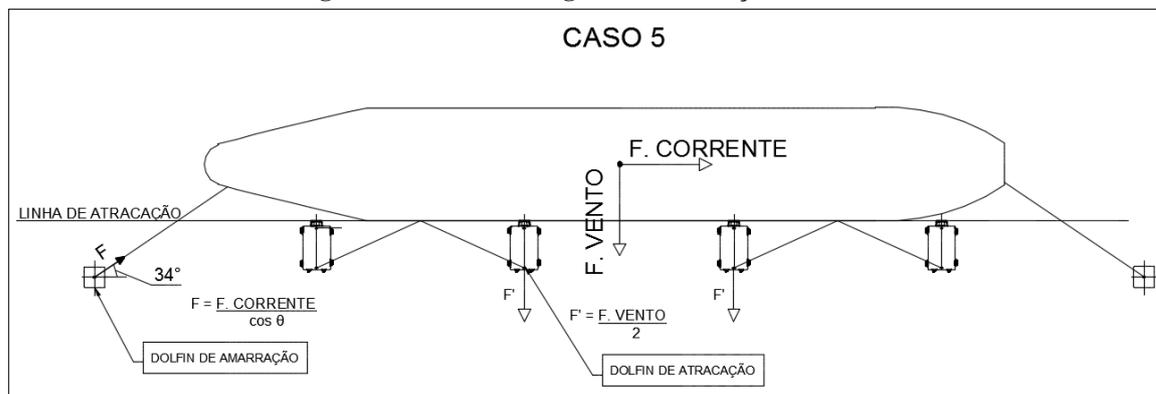
Figura 55 - Caso de carga 4 na amarração do navio



Fonte: Produção do autor

A Figura 56 apresenta o Caso 5 da amarração, no qual se considera a força do vento atuando no sentido transversal ao navio, em sentido invertido (empurrando os dolfin), dividida em 2 (dois) dolfin de atracação e a força da correnteza atuando no sentido longitudinal ao navio, lançada em 1 (um) cabeço de um dolfin de amarração.

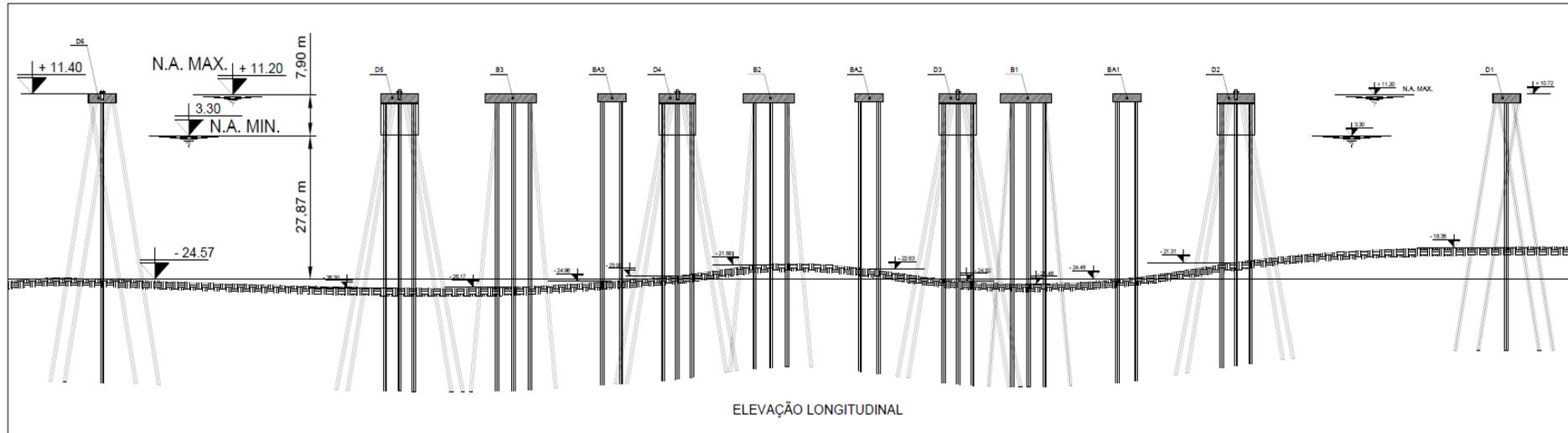
Figura 56 - Caso de carga 5 na amarração do navio



Fonte: Produção do autor

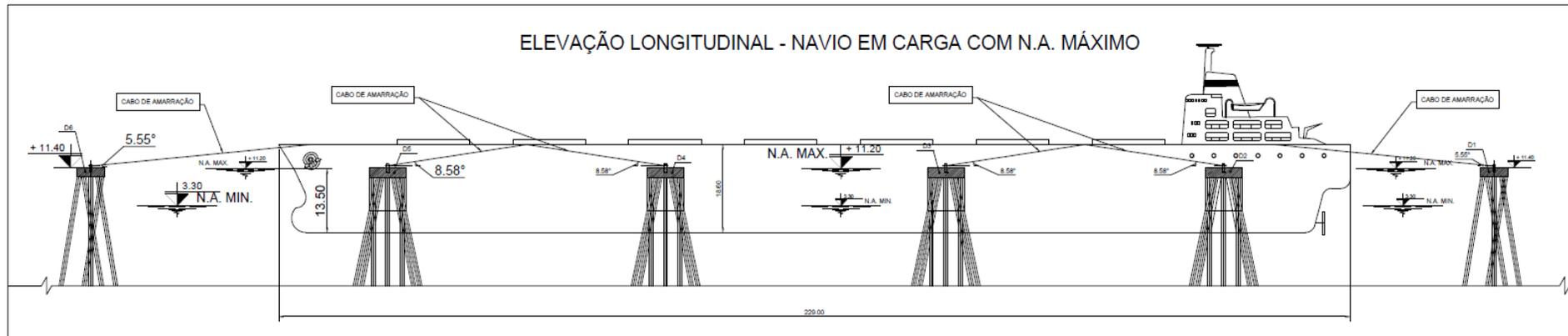
A Figura 58, a Figura 59, a Figura 60 e a Figura 61 apresentam as quatro situações consideradas para as inclinações verticais dos cabos de amarração. As situações críticas são apresentadas na Figura 59 e na Figura 60, as quais correspondem as situações do navio em carga com NA mínimo e do navio vazio com o NA máximo, respectivamente.

Figura 57 – Profundidade média do rio Amazonas na linha de dolfin



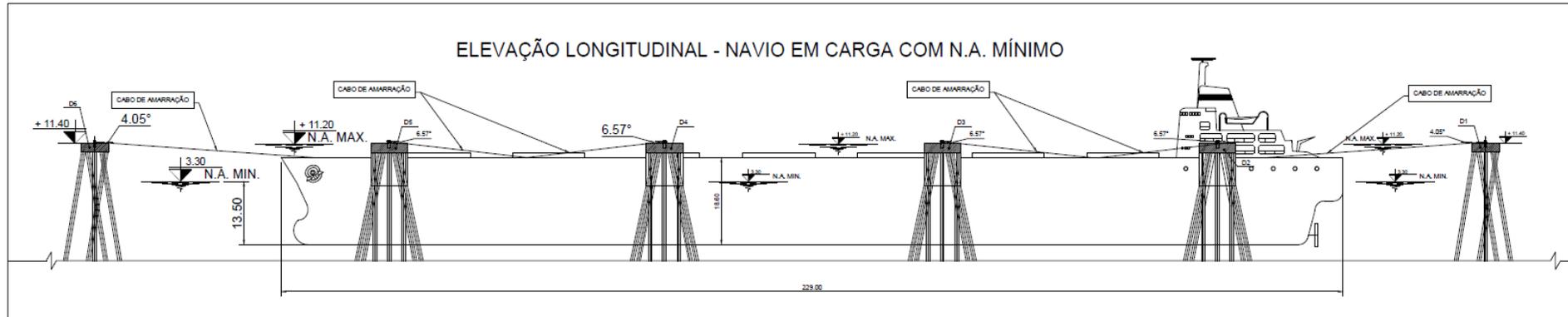
Fonte: Produção do autor

Figura 58 – Inclinação vertical dos cabos para a situação do navio em carga com NA máximo



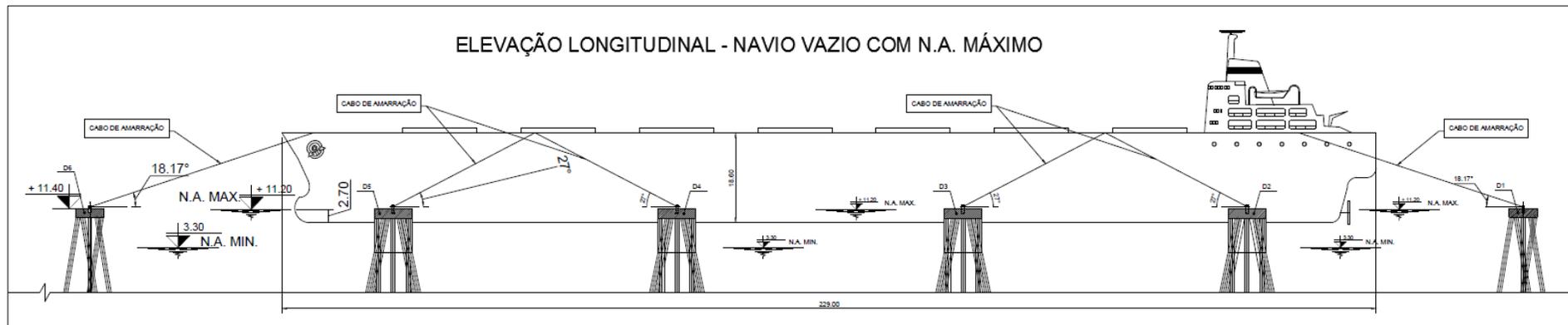
Fonte: Produção do autor

Figura 59 - Inclinação vertical dos cabos para a situação do navio em carga com NA mínimo



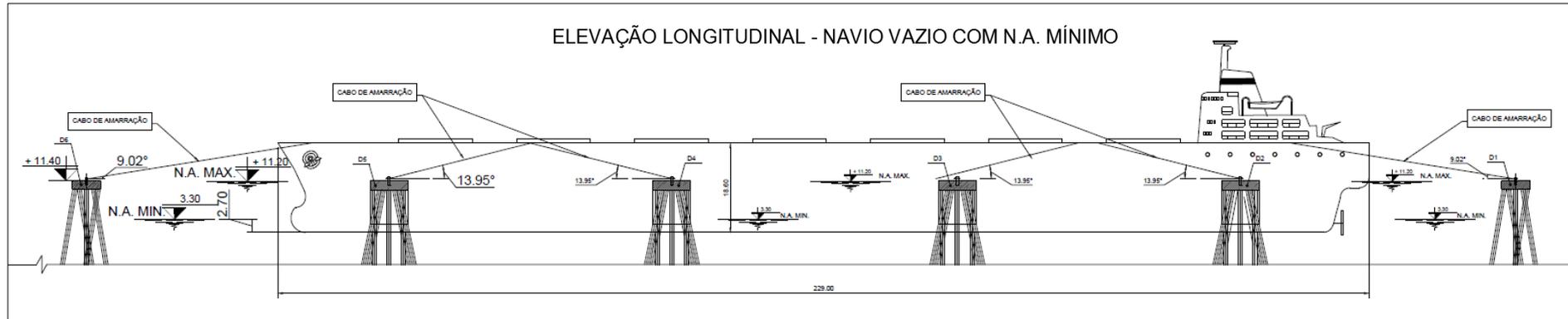
Fonte: Produção do autor

Figura 60 – Inclinação vertical dos cabos para a situação do navio vazio com NA máximo



Fonte: Produção do autor

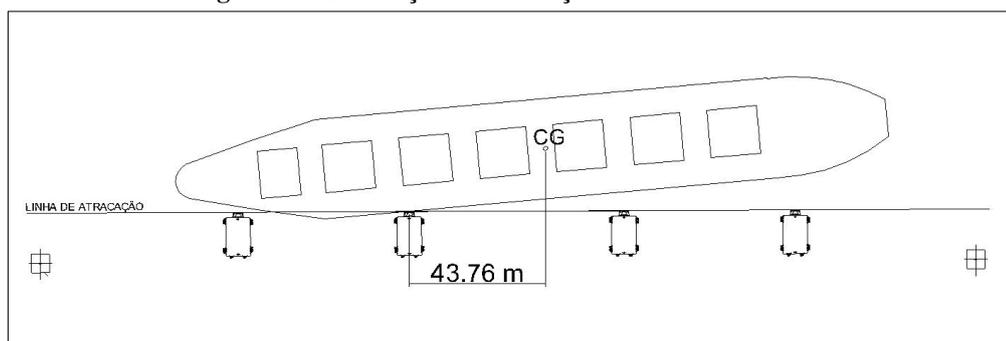
Figura 61 - Inclinação vertical dos cabos para a situação do navio vazio com NA mínimo



Fonte: Produção do autor

Para a obtenção dos esforços de atracação, foi adotada uma simulação da atracação do navio na linha de dolphins, a qual serviu como base para cálculo do coeficiente de excentricidade C_e utilizado nos cálculos da energia de atracação, conforme apresentado na Figura 62.

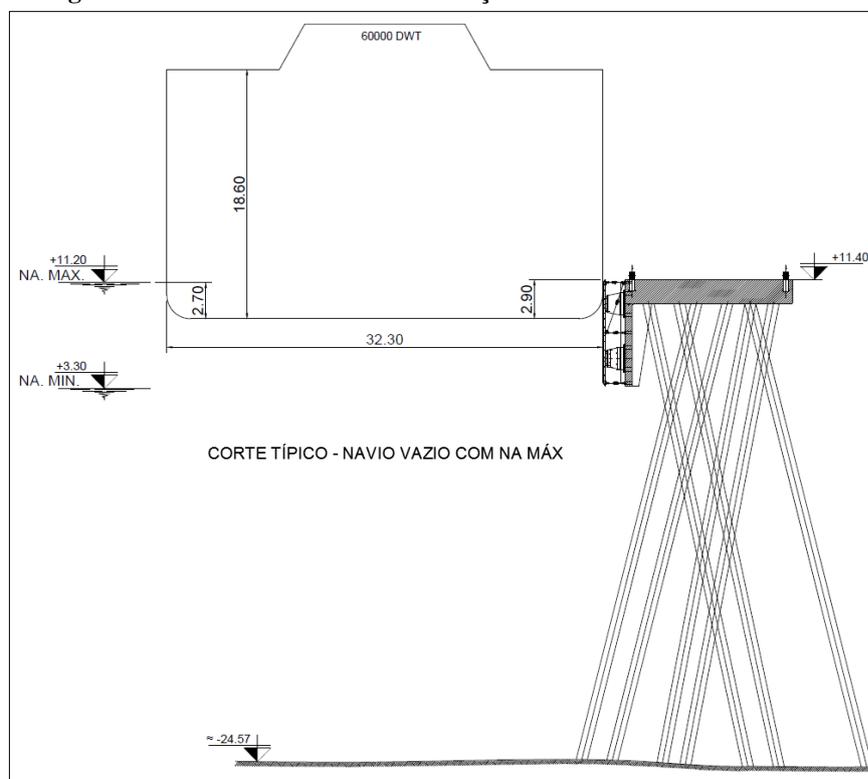
Figura 62 - Simulação da atracação do navio nos dolphins



Fonte: Produção do autor

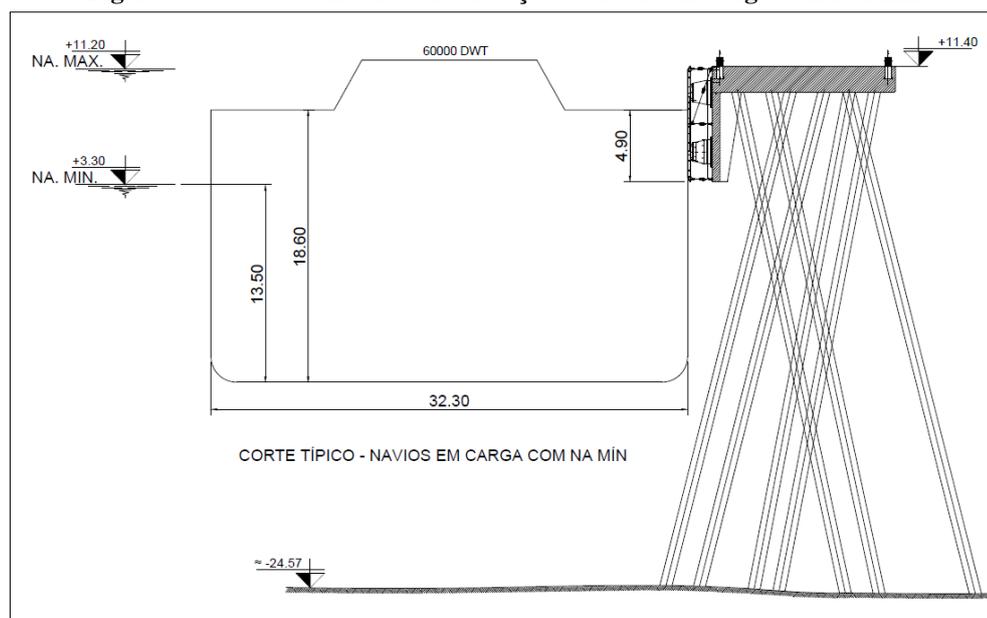
A Figura 63 e a Figura 64 apresentam as vistas dos cortes transversais para as situações críticas para as defensas, quais sejam o navio vazio com o NA máximo e o navio em carga com o NA mínimo.

Figura 63 – Corte transversal na situação do navio vazio com NA máx



Fonte: Produção do autor

Figura 64 - Corte transversal na situação do navio em carga com NA mín



Fonte: Produção do autor

4.2 Análise comparativa dos métodos

4.2.1 Resultados obtidos

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nos cálculos dos esforços devidos à amarração e atracação do navio no estudo de caso realizado, para cada método de cálculo.

4.2.1.1 Esforços devidos à Amarração

A Figura 65 e a Figura 66 apresentam os esforços de amarração resultantes para cada método estudado, por caso de carga e tipo de dolfin. Os cálculos foram efetuados para duas situações extremas, quais são a com o NA máximo e com o NA mínimo no rio. No eixo horizontal das referidas figuras, a identificação da amostra refere-se ao caso de amarração em estudo (Caso 1, Caso 2, etc) seguido da identificação do dolfin analisado, isto é, dolfin de amarração ou de atracação.

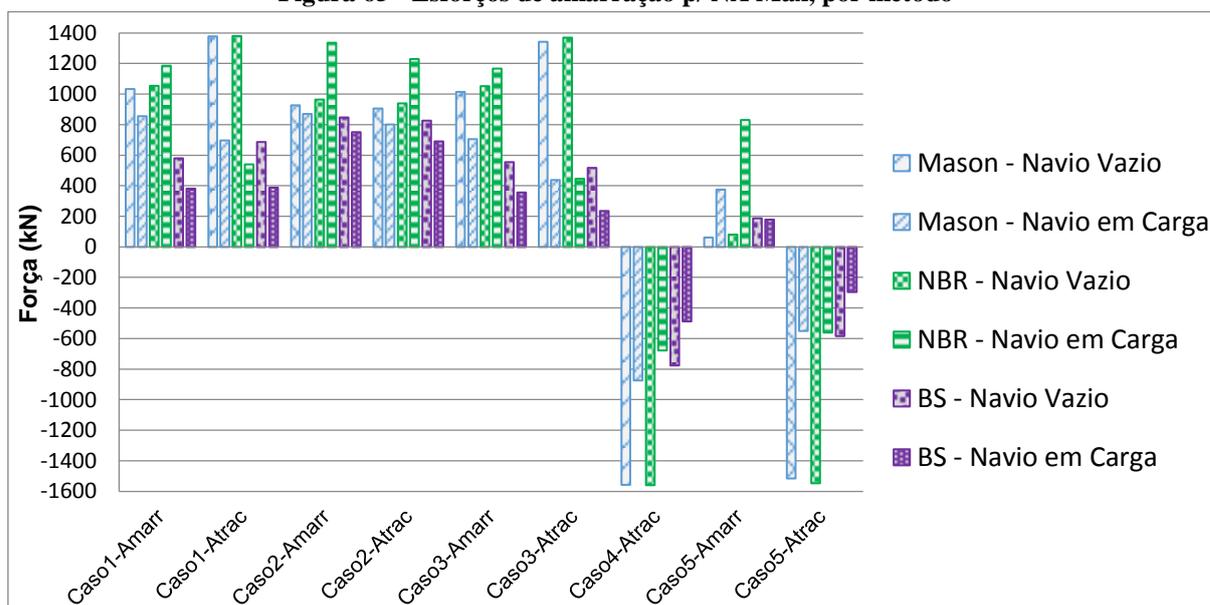
Estes resultados representam a força no cabo de amarração já considerando as suas inclinações horizontais e verticais, com exceção das colunas denominadas “Caso4-Atrac” e “Caso 5-Atrac” onde o resultado representa a força aplicada diretamente no dolfin de atracação com o sentido oposto àquele das forças nos cabos, razão pela qual são representados com o sinal negativo.

Analisando a Figura 65 e a Figura 66 pode-se observar que o método da NBR 9782 conduz aos maiores resultados de esforços de amarração em termos de esforço máximo para

cada caso de carga, tendo sido obtido o maior esforço em um cabo de amarração para o Caso 2 no Dólfim de Amarração para a situação do NA mínimo com o navio vazio.

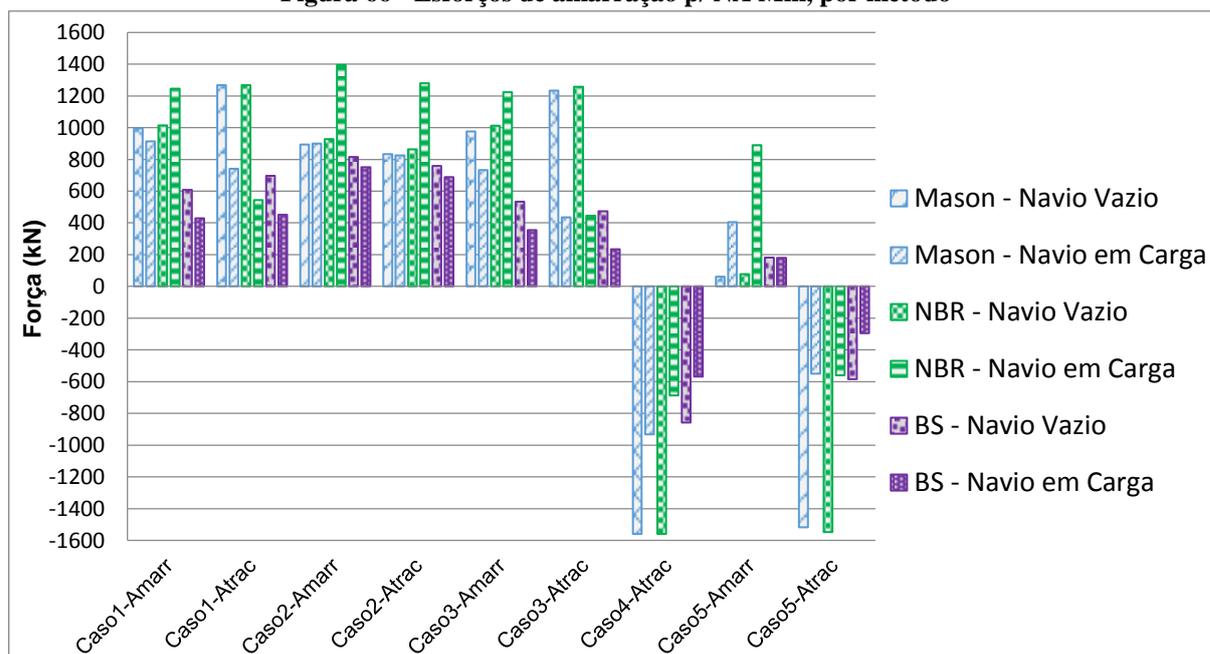
Os resultados fornecidos pelo método apresentado por Mason (1982) ficam, em geral, muito próximos aos resultados obtidos pelo método da NBR 9782. Já os resultados obtidos pelo método da BS 6349 conduzem aos menores resultados, com exceção do Caso 5 para o dólfim de amarração na situação do navio vazio, isto porque esta referência não diferencia, para o cálculo da força devida à corrente, as situações do navio vazio da do navio em carga.

Figura 65 - Esforços de amarração p/ NA Máx, por método



Fonte: Produção do autor

Figura 66 - Esforços de amarração p/ NA Mín, por método



Fonte: Produção do autor

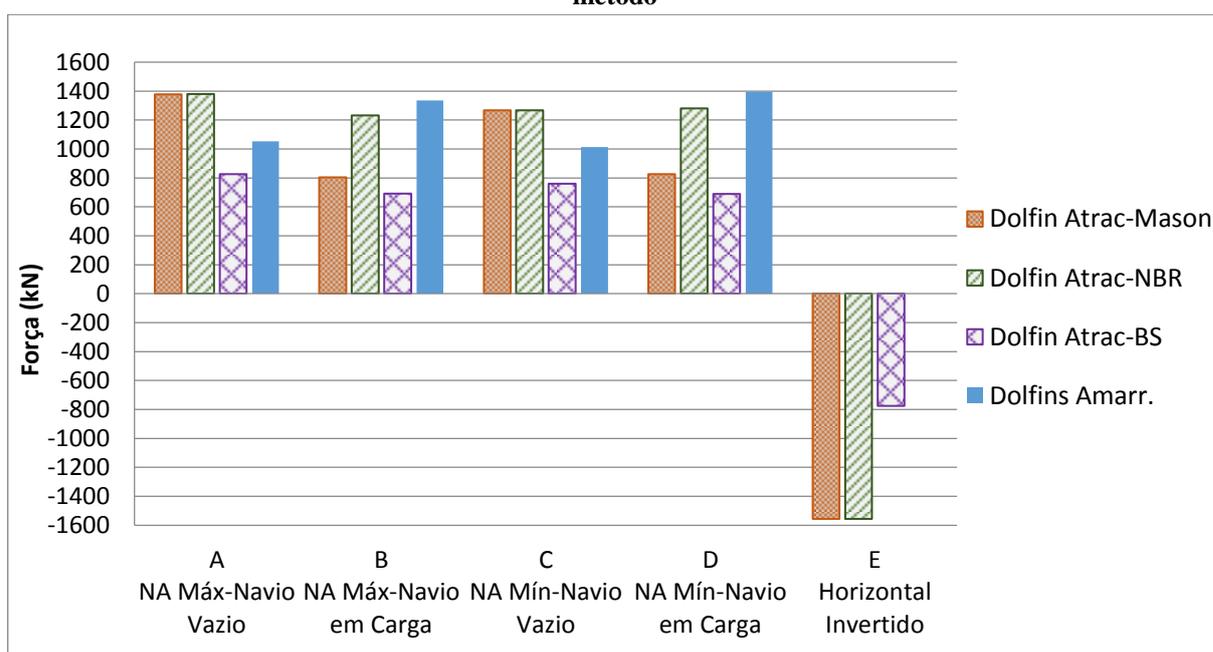
A Tabela 23 e a Figura 67 apresentam os resultados das cargas máximas obtidas para cada situação de posição da carga solicitante estudadas, para cada método, nos dolphins de atracação, isto é, o maior esforço obtido dentre os cinco casos de carga estudados na amarração do navio para cada posição de atuação da carga considerada (NA Máx. com Navio Vazio, NA Máx. com Navio em Carga, etc), e a carga máxima obtida entre os três métodos para o dolfim de amarração. Pode-se observar que em todos os casos os resultados obtidos pelo método da BS 6349 são os menores obtidos. O método da NBR 9782 conduz aos maiores resultados para as situações do navio em carga, seguido do resultado obtido pelo método apresentado por Mason (1982). Já para os casos do navio vazio e Horizontal Invertido os resultados obtidos pelo método da NBR 9782 e pelo apresentado por Mason (1982) são praticamente iguais.

Tabela 23 – Cargas máximas nos Dolphins devido à amarração para cada inclinação de cabo ou posição, por método

CARGAS MÁXIMAS (kN)					
DOLFIN / MÉTODO	Posição/Inclinação do cabo de amarração ou carga				
	A : NA Máx-Navio Vazio	B: NA Máx-Navio em Carga	C: NA Mín-Navio Vazio	D: NA Mín-Navio em Carga	E: Horizontal Invertido
Dolphins de amarração / Envoltória	1053,53	1336,26	1013,53	1394,48	-
Dolphins de atracação / Envoltória	1379,34	1230,77	1267,38	1280,41	-1559,00
Dolfin Atracação / Mason	1378,22	802,56	1267,38	825,61	-1557,00
Dolfin Atracação / NBR 9782	1379,34	1230,77	1266,35	1280,41	-1558,00
Dolfin Atracação / BS 6349	826,24	691,90	758,56	688,68	-775,13

Fonte: Produção do autor

Figura 67 - Cargas máximas nos Dolphins devido à amarração para cada inclinação de cabo ou posição, por método



Fonte: Produção do autor

Na Tabela 24 e na Tabela 25 apresenta-se uma comparação em termos percentuais da diferença entre os resultados obtidos pelo método apresentado por Mason (1982) e pelo método da BS 6349 sobre o resultado obtido para o método da NBR 9782.

Tabela 24 – Comparação entre os métodos em % - NA Máx

CASO DE CARGA		Diferença entre os métodos (% sobre o resultado da NBR 9782) - p/ NA MÁX					
		Mason (1982)		NBR 9782		BS 6349-1:2000	
		Navio Vazio (1)	Navio em Carga (2)	Navio Vazio (1)	Navio em Carga (2)	Navio Vazio (1)	Navio em Carga (2)
CASO 1	Dolphins de amarração	-2,0%	-27,9%	0,0%	0,0%	-44,9%	-67,9%
	Dolphins de atracação	-0,1%	28,9%	0,0%	0,0%	-50,3%	-28,2%
CASO 2	Dolphins de amarração	-3,7%	-34,8%	0,0%	0,0%	-12,1%	-43,8%
	Dolphins de atracação	-3,7%	-34,8%	0,0%	0,0%	-12,1%	-43,8%
CASO 3	Dolphins de amarração	-3,6%	-39,6%	0,0%	0,0%	-47,3%	-69,4%
	Dolphins de atracação	-2,0%	-2,0%	0,0%	0,0%	-62,3%	-47,4%
CASO 4	Dolphins de atracação	-0,1%	28,9%	0,0%	0,0%	-50,2%	-28,2%
CASO 5	Dolphins de amarração	-22,6%	-54,7%	0,0%	0,0%	132,4%	-78,3%
	Dolphins de atracação	-2,0%	-2,0%	0,0%	0,0%	-62,3%	-47,4%

Fonte: Produção do autor

Tabela 25 - Comparação entre os métodos em % - NA Mín

CASO DE CARGA		Diferença entre os métodos (% sobre o resultado da NBR 9782) - p/ NA MÍN					
		Mason (1982)		NBR 9782		BS 6349-1:2000	
		Navio Vazio (1)	Navio em Carga (2)	Navio Vazio (1)	Navio em Carga (2)	Navio Vazio (1)	Navio em Carga (2)
CASO 1	Dolphins de amarração	-1,8%	-26,6%	0,0%	0,0%	-40,1%	-65,6%
	Dolphins de atracação	0,1%	36,0%	0,0%	0,0%	-45,0%	-17,3%
CASO 2	Dolphins de amarração	-3,6%	-35,5%	0,0%	0,0%	-12,1%	-46,2%
	Dolphins de atracação	-3,6%	-35,5%	0,0%	0,0%	-12,1%	-46,2%
CASO 3	Dolphins de amarração	-3,5%	-40,1%	0,0%	0,0%	-47,3%	-70,9%
	Dolphins de atracação	-2,0%	-2,0%	0,0%	0,0%	-62,3%	-47,4%
CASO 4	Dolphins de atracação	0,1%	35,9%	0,0%	0,0%	-45,0%	-17,3%
CASO 5	Dolphins de amarração	-21,0%	-54,5%	0,0%	0,0%	132,4%	-79,8%
	Dolphins de atracação	-2,0%	-2,0%	0,0%	0,0%	-62,3%	-47,4%

Fonte: Produção do autor

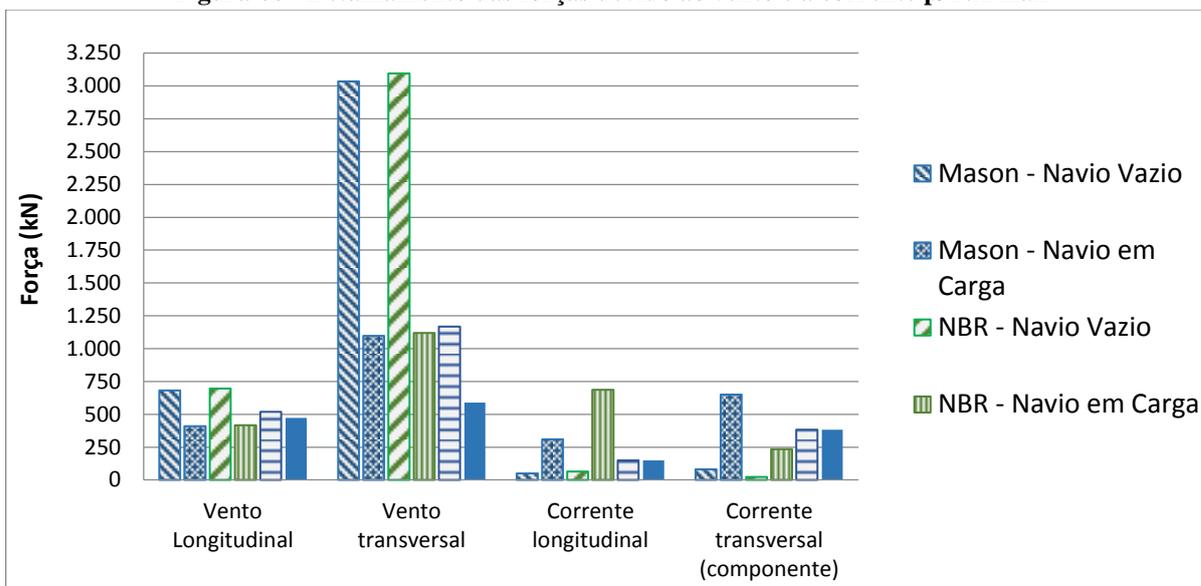
A Figura 68 e a Figura 69 apresentam o detalhamento das forças devidas ao vento e à corrente separadamente, calculadas para cada método estudado. Estes resultados representam as forças resultantes da ação da corrente e do vento nas respectivas direções estudadas, sem considerar, ainda, o efeito da inclinação dos cabos.

Nota-se que o método da NBR 9782 e o método apresentado por Mason (1982) conduzem aos maiores resultados da força devida ao vento, fornecendo resultados muito próximos entre si e muito acima dos resultados fornecidos pela BS 6349, com exceção do vento longitudinal para o navio em carga, para o qual o método da BS 6349 fornece os maiores resultados, mas pouco maior que os obtidos pela NBR 9782 e Mason (1982).

Para a força devida à corrente no sentido transversal, o maior esforço é fornecido pelo método apresentado por Mason (1982), seguido do fornecido pelo método da BS 6349, sendo

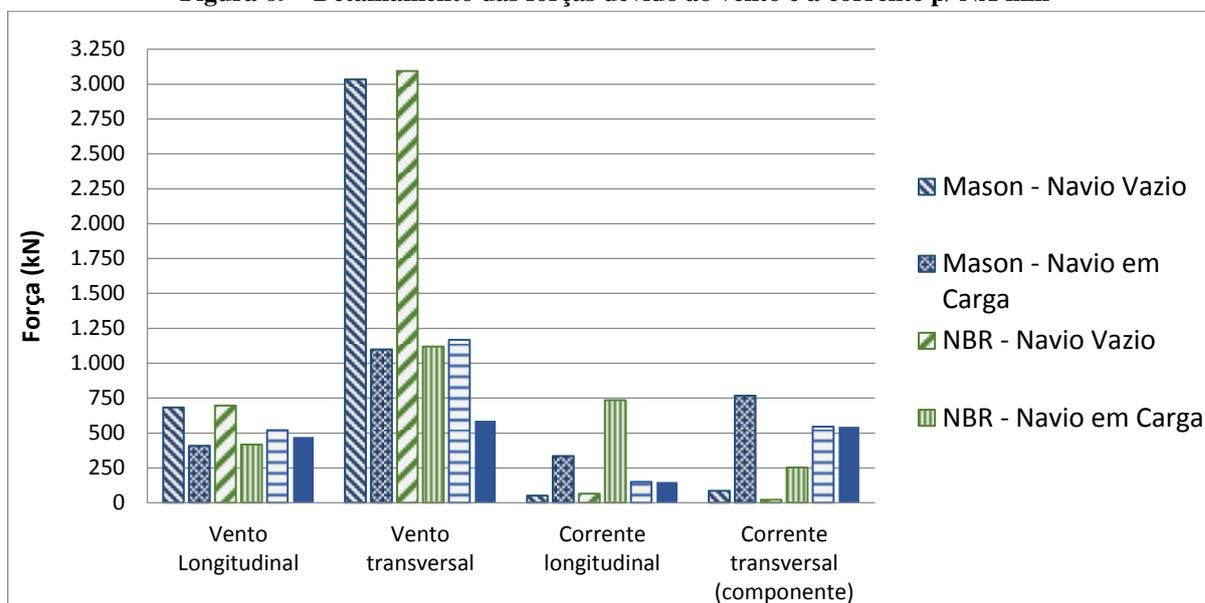
o resultado obtido pela NBR 9782 o menor entre os três. Já para a corrente no sentido longitudinal, o método da NBR 9782 conduz aos maiores esforços, seguido do resultado fornecido pelo método apresentado por Mason (1982) e o da BS 6349, com o menor resultado.

Figura 68 - Detalhamento das forças devido ao vento e à corrente p/ NA máx



Fonte: Produção do autor

Figura 69 - Detalhamento das forças devido ao vento e à corrente p/ NA mín



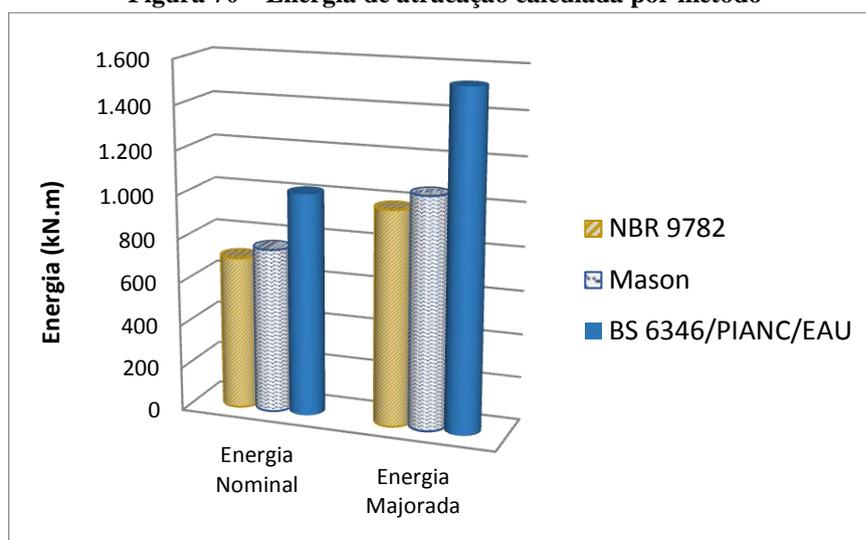
Fonte: Produção do autor

4.2.1.2 Esforços devidos à Atracção

A Figura 70 apresenta os resultados da energia de atracção calculada para cada método estudado.

Para absorver a energia nominal máxima foi adotado um sistema de defensas tipo Cônica SCN 1300H - E1.9 ($E_r=1023$ kN.m ; $R_r=1522$ kN) e para a energia majorada máxima um sistema de defesas tipo Cônica SCN 1400H - E2.7 ($E_r=1554$ kN.m ; $R_r=2141$ kN).

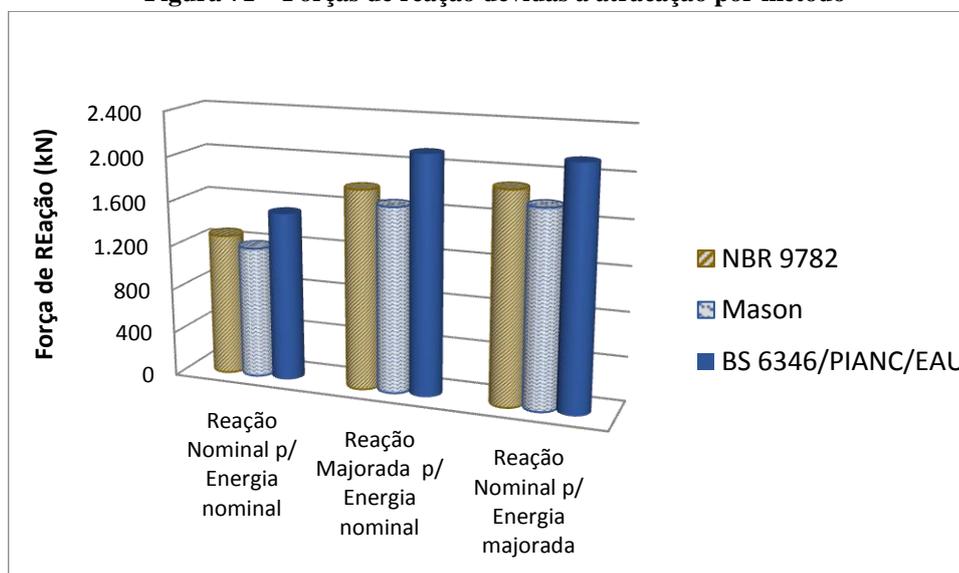
Figura 70 – Energia de atracção calculada por método



Fonte: Produção do autor

A Figura 71 apresenta as forças de reacção oriundas de cada energia calculada para três situações, quais sejam a Reacção Nominal para a Energia Nominal, a Reacção Majorada para a Energia Nominal e a Reacção Nominal para a Energia Majorada.

Figura 71 – Forças de reacção devidas à atracção por método



Fonte: Produção do autor

Analisando os resultados dos esforços de atracação apresentados na Figura 70 e na Figura 71, podem-se destacar as seguintes observações:

- O método de cálculo da BS 6349 (PIANC/EAU 2004) conduz a resultados de energia de atracação nominal superiores ao demais método, ficando 45,2 % maior que o resultado fornecido pela NBR 9782 e 35 % maior que o apresentado por Mason (1982), para as energias de atracação nominais;
- Para as energias de atracação majoradas pelos respectivos coeficientes de cada referência, as diferenças entre o resultado fornecido pela BS 6349 para o resultado fornecido pela NBR 9782 e por Mason (1982) são de 55,6 % e 44,6 %, respectivamente;
- Em termos de força de reação, considerando as reações oriundas do sistema de defensas adotado para a obra e o seu respectivo diagrama de energia, as diferenças entre o resultado fornecido pela BS 6349 para o resultado fornecido pela NBR 9782 e por Mason (1982) são de 19,0 % e 28,2 %, respectivamente, para a reação devida à energia nominal;
- Para a reação devida à energia majorada, estas diferenças caem para 13,6 % sobre o resultado fornecido pela NBR 9782 e 22,0 % sobre o resultado obtido por Mason (1982);
- Considerando os valores obtidos nas duas situações a saber: (i) reação majorada do coeficiente adotado pela referência, oriunda da energia de atracação nominal, e (ii) reação nominal oriunda da energia de atracação majorada do coeficiente adotado pela referência; pode-se observar que a diferença entre estes valores obtidos através do método da BS 6349 é de 0,479 %, através do método da NBR 9782 é de 5,263 % e através do método apresentado por Mason (1982) é de 5,631 %. Tendo em vistas estas pequenas diferenças resultantes, nota-se que é mais interessante adotar a defesa que foi selecionada para a energia de atracação majorada, pois assim garante-se um fator de segurança sobre o dimensionamento da defesa e também sobre o dimensionamento da estrutura da instalação portuária;
- Ressalta-se que embora a energia de atracação obtida pelo método da NBR 9782 tenha sido a menor entre as três, a força de reação oriunda desta energia é a segunda maior, ficando acima do valor obtido pelo método apresentado por Mason (1982). Isto se deve ao diagrama de energia da defesa adotada, que

conduz a reações maiores para o nível de energia obtido pelo método da NBR 9782 do que aquelas obtidas para a energia oriunda do método apresentado por Mason (1982).

4.2.2 Considerações sobre as diferenças entre os métodos

Apresentam-se nesta seção algumas considerações sobre os aspectos que conduzem à dispersão dos resultados obtidos para cada método estudado.

Para as forças de amarração, que depende das forças devido ao vento e à corrente, o fator que mais influência no resultado é o coeficiente de forma, que pode variar entre limites amplos e em relação ao qual as forças são diretamente proporcionais.

Para os coeficientes de forma das forças devidas ao vento, a NBR 9782 recomenda que sejam utilizados valores entre 0,6 e 1,3, podendo ser utilizado em média o valor de 1,2, o qual é adotado por Mason (1982). Nota-se que a norma brasileira tende a ser conservadora na ausência de valores mais precisos, que podem ser obtidos a partir de estudos em modelos reduzidos, por exemplo.

A BS 6349 utiliza nas expressões do cálculo das forças devidas ao vento a área da seção longitudinal do navio tanto para o vento transversal ao navio, quanto para o vento longitudinal. A área de incidência de vento considerada no método da BS 6349 é maior que a área de vento considerada nos demais cálculos, e mesmo assim as forças resultantes do vento fornecidas por esse método são menores. Isto evidencia a influência que o coeficiente de forma possui sobre o resultado obtido. A Tabela 26 apresenta os coeficientes de forma para forças devidas ao vento obtidos para cada por cada método estudado.

Tabela 26 – Coeficientes de Forma para forças devidas ao vento

Ângulo de incidência do vento	Mason		NBR 9782		BS 6349-1:2000	
	Navio Vazio	Navio em Carga	Navio Vazio	Navio em Carga	Navio Vazio	Navio em Carga
0°	1,2	1,2	1,2	1,2	0,24	0,36
90°	1,2	1,2	1,2	1,2	0,54	0,45

Fonte: Produção do autor

Para o cálculo das forças devidas à corrente, a norma brasileira e a inglesa utilizam nas respectivas expressões a área da seção longitudinal do navio, inclusive para a situação da corrente atuando longitudinalmente ao navio, isto é, com a corrente incidindo sobre a seção transversal do mesmo. Isto explica porque mesmo com um coeficiente de forma muito inferior ao obtido pelo método apresentado por Mason (1982), a força devida à corrente

longitudinal ao navio obtida pelo método da BS 6349 fornece resultado relativamente próximo ao fornecido por Mason (1982).

No caso da NBR 9782, o coeficiente de forma quando a corrente está alinhada com o eixo longitudinal do navio é igual a 0, o que sabe-se não ser coerente, pois nesta situação haverá uma força sendo exercida sobre o navio. A norma brasileira apresenta valores deste coeficiente em função da relação profundidade da baía/calado do navio e do ângulo de incidência da corrente sobre o navio, a partir de um ângulo de 20°. Portanto, para uma situação em que a corrente esteja alinhada com o eixo longitudinal do navio, é necessário utilizar o valor de um coeficiente de forma devido à uma inclinação de 20°. Isto evidencia a grande variabilidade do coeficiente de forma, que repercute na dispersão dos resultados obtidos em cada método.

A Tabela 27 apresenta os coeficientes de forma para forças devidas à corrente obtidos para cada por cada método estudado.

A sensibilidade do coeficiente de forma para as forças devidas à corrente à variação da profundidade da lâmina d'água é maior para o método apresentado por Mason (1982) do que para o método da NBR 9782, sendo a menor entre os três para o método da BS 6349.

De uma forma geral, ressalta-se a grande dispersão entre os coeficientes de forma obtidos para cada método, que exerce influência diretamente proporcional nos resultados das forças resultantes. Julga-se necessário, quando possível, a realização de estudos em modelos reduzidos para estimar as forças devidas à amarração e ajustar os coeficientes de forma resultantes.

Tabela 27 – Coeficientes de Forma para forças devidas à corrente

Ângulo de incidência da corrente	Mason		NBR 9782		BS 6349-1:2000	
	Navio Vazio	Navio em Carga	Navio Vazio	Navio em Carga	Navio Vazio	Navio em Carga
0°	1,077	1,377	0	0	0,1	0,1
20°	-	-	0,2	0,437	0,258	0,258
90°	2,249	3,613	0,9	2,007	1,021	1,021

Fonte: Produção do autor

Para a energia de atracação, observa-se que a diferença entre os resultados obtidos para cada método deve-se predominantemente pela diferença entre os coeficientes que multiplicam a energia básica, quais sejam o coeficiente de massa hidrodinâmica e o coeficiente de excentricidade, principalmente.

O método apresentado por Mason (1982) não considera a influência da massa hidrodinâmica no cálculo da energia de atracação. Este fator é o que exerce a maior influência

sobre a diferença entre os resultados obtidos para cada método. A NBR 9782 contempla a massa hidrodinâmica através da massa M_2 , denominada na norma como massa de água adicional, para a qual a referida norma estabelece uma expressão que conduz a valores em média 18 % menores que os obtidos pelo método das normas europeias. O valor da massa M_2 considerada pela norma brasileira diminui ao passo que o porte do navio aumenta.

Os coeficientes de excentricidade calculados para os três métodos apresentam resultados muito próximos entre si, sendo o maior entre os três o obtido pelo método das normas europeias.

Para o coeficiente de rigidez, que leva em consideração a parcela da energia de atracação absorvida pelo costado no navio, a NBR 9782 recomenda a utilização de valores entre 0,9 e 0,95, enquanto que as normas europeias recomendam a utilização de valores entre 0,9 e 1,0, o que conduz a valores de energia menores para o método da NBR 9782. Mason (1982) não considera este efeito no método que apresenta.

Tanto o método da NBR 9782 quanto o apresentado por Mason (1982) não consideram o coeficiente de atracação, que considera a energia que é absorvida pelo efeito de amortecimento da água confinada entre o costado do navio e a parede da instalação portuária, o qual é um coeficiente de minoração, e mesmo assim fornecem resultados inferiores aos fornecidos pelas normas europeias.

4.3 Análise da sensibilidade da infraestrutura dos dolphins

Com o intuito de analisar a sensibilidade da infraestrutura do dolphins às variações das ações de atracação e amarração, foi elaborado um modelo numérico em elementos finitos no programa SAP 2000 (ver Figura 73) dos dolphins de atracação e realizada a análise dos esforços nas estacas para cada método estudado a partir de uma análise estática linear.

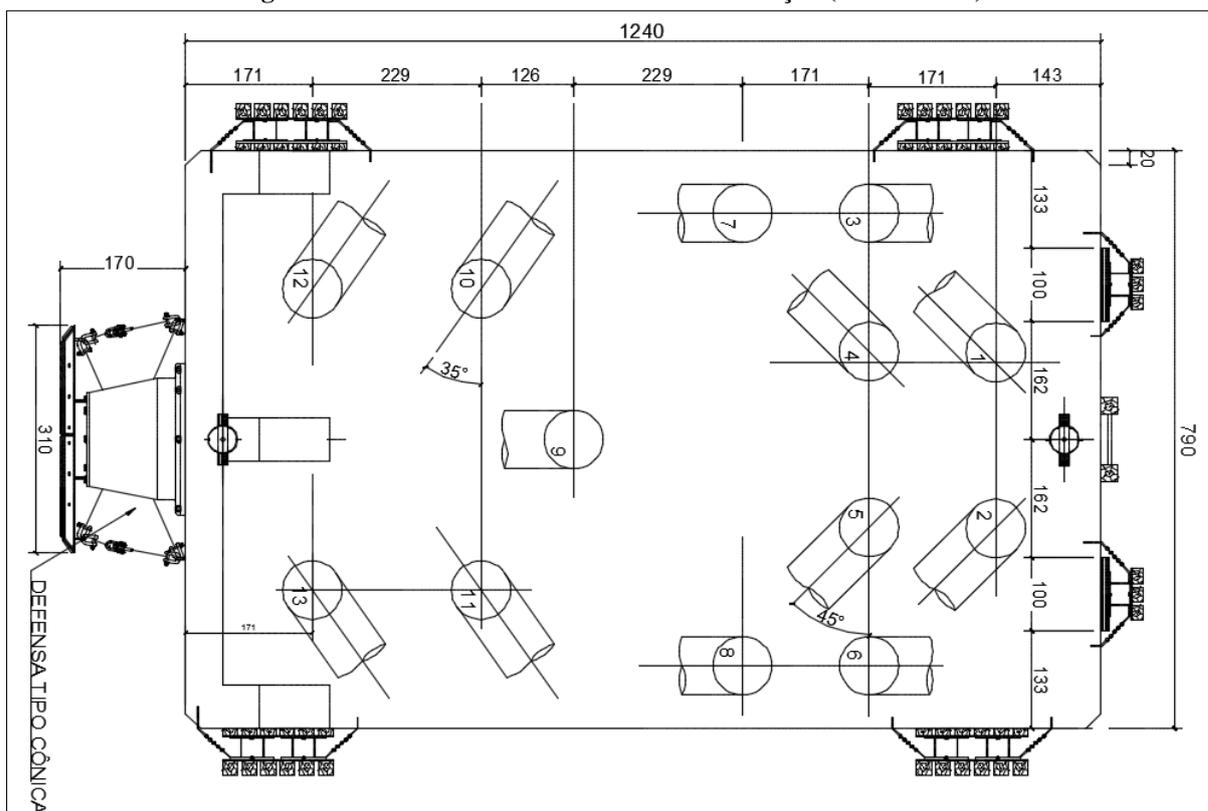
A concepção estrutural do dolphin de atracação prevê um bloco sobre 13 (treze) estacas inclinadas de concreto protendido com seção circular vazada com 80 cm de diâmetro externo e paredes de 12 cm de espessura, com inclinações de 1/4 (ver Figura 72). O bloco terá uma pestana na face frontal que receberá o sistema de defensas composto por duas defensas do tipo cônicas. As estacas possuem comprimento médio de 50,00 m, dos quais 35,00 m ficam acima do leito do rio. Nesta concepção todas as estacas são inclinadas devido ao fato de que a estrutura estará sujeita a cargas predominantemente horizontais, quais sejam devidas à atracação e amarração do navio. As cargas verticais oriundas de peso próprio e sobrecarga serão absorvidas pelas estacas inclinadas, tendo em vista que são pequenas em comparação com as cargas horizontais.

Neste modelo numérico as estacas foram modeladas utilizando-se elementos de barra com formulação da Teoria de Viga de Timoshenko com 2 (dois) nós, cada qual com 6 (seis) graus de liberdade. Foi considerado o comportamento da estaca como sendo engastada na base, a partir de um comprimento fictício de engastamento calculado pelo método de *Davisson & Robinson* (1965), e engastada no bloco no topo.

O bloco e a pestana foram modelados a partir de elementos do tipo sólido com 8 (oito) nós e formulação isoparamétrica. A adoção destes tipos de elementos finitos para o bloco e para as estacas, respectivamente, justifica-se pela intenção de representar o comportamento da estrutura da forma mais realista possível.

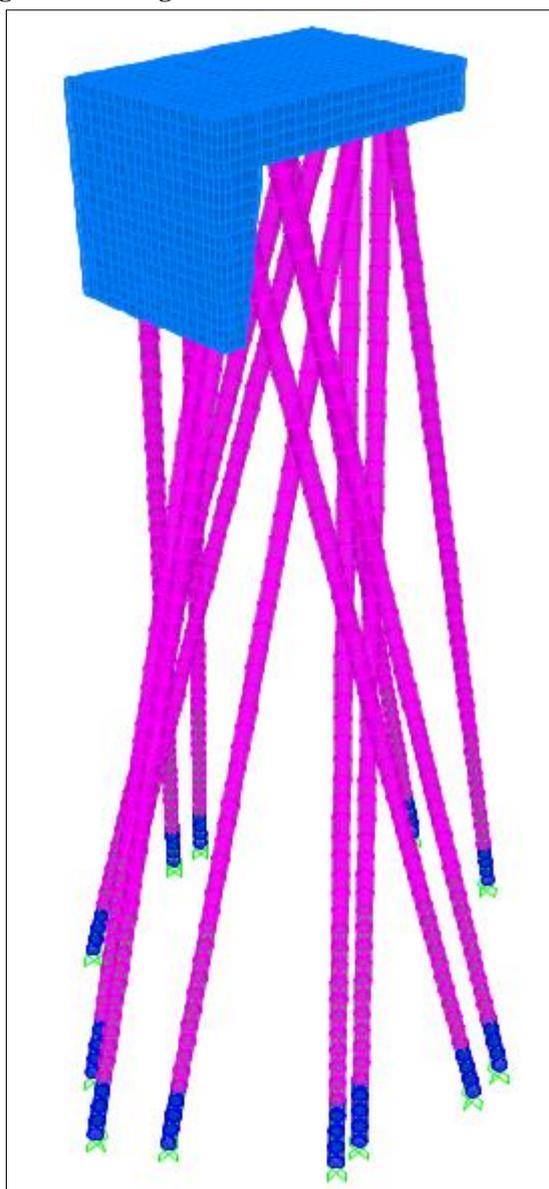
Os materiais componentes dos elementos estruturais do modelo numérico possuem comportamento linear elástico, isotrópico e propriedades mecânicas compatíveis com as prescrições da NBR 6118:2014, para o concreto, e da NBR 8800:2008, para o aço.

Figura 72 – Planta de forma do dolfin de atracação (cotas em cm)



Fonte: Produção do autor

Nesta análise foram consideradas as cargas máximas devidas à amarração obtidas para cada método em cada posição ou inclinação do cabo, conforme apresentado na Tabela 23, e as cargas máximas obtidas para a atracação, apresentadas na Figura 71.

Figura 73 – Imagem do modelo do dolfin no SAP 2000

Fonte: Produção do autor

A Tabela 28 apresenta os esforços internos (esforço axial e momentos) nas estacas do dolfin para cada método de cálculo e posição/inclinação das forças de amarração e atracação, considerando a ocorrência de flexão composta oblíqua. Na Figura 74, Figura 75 e Figura 76 apresenta-se a envoltória dos esforços axiais e momentos M2 e M3 nas estacas.

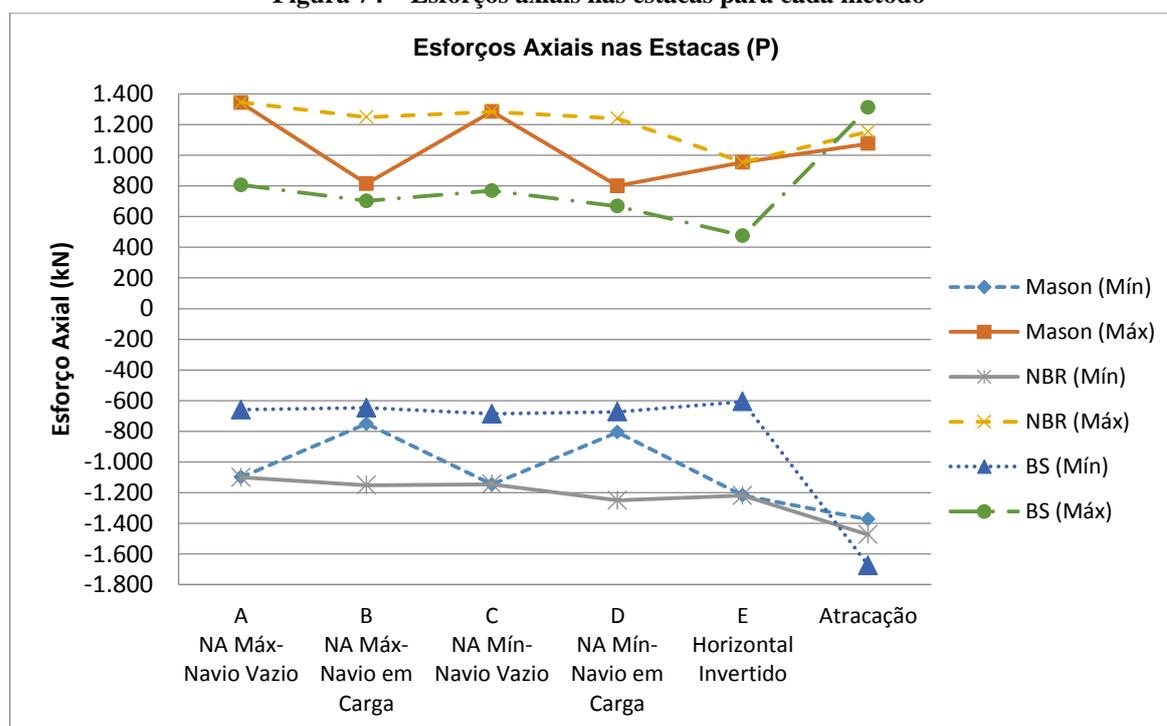
Pode-se observar que as forças resultantes da amarração calculadas pelo método da norma NBR 9782 e pelo método apresentado por Mason (1982) causam os maiores esforços de tração nas estacas, sendo quase alcançados pelos esforços causados pela reação oriunda da energia de atracação calculada pelo método da BS 6349.

Tabela 28 – Esforços máximos nas estacas para cada método (kN, kN.m)

Método de Cálculo	Esforço interno		Posição/Inclinação do cabo de amarração ou carga					Atracação
			A NA Máx- Navio Vazio	B NA Máx- Navio em Carga	C NA Mín- Navio Vazio	D NA Mín- Navio em Carga	E Horizontal Invertido	
Mason	P (kN)	Mín	-1.099,70	-750,58	-1.146,30	-806,36	-1.218,23	-1.373,64
		Máx	1.341,89	814,15	1.284,70	799,80	953,54	1.075,19
	M2 (kN.m)	Mín	-113,65	-73,55	-113,94	-76,10	-24,34	-27,45
		Máx	84,38	54,43	84,40	56,18	24,34	27,45
	M3 (kN.m)	Mín	-95,26	-62,28	-96,21	-64,93	-33,23	-37,47
		Máx	92,48	59,05	91,81	60,47	32,22	36,34
NBR 9782	P (kN)	Mín	-1.100,60	-1.151,05	-1.145,38	-1.250,55	-1.219,01	-1.474,08
		Máx	1.344,98	1.248,55	1.283,70	1.240,39	954,16	1.153,81
	M2 (kN.m)	Mín	-113,74	-112,79	-113,85	-118,02	-24,35	-29,46
		Máx	84,45	83,47	84,33	87,13	24,35	29,46
	M3 (kN.m)	Mín	-95,34	-95,51	-96,70	-100,68	-33,25	-40,21
		Máx	92,55	90,55	91,73	93,79	32,24	38,99
BS 6349	P (kN)	Mín	-659,27	-647,08	-686,10	-672,60	-606,41	-1.675,17
		Máx	805,67	701,89	768,96	667,15	474,71	1.311,20
	M2 (kN.m)	Mín	-68,13	-63,41	-68,20	-63,47	-12,12	-33,47
		Máx	50,59	46,93	50,51	46,86	12,12	33,47
	M3 (kN.m)	Mín	-57,12	-53,69	-57,58	-54,15	-16,54	-45,70
		Máx	55,44	50,90	54,95	50,44	16,04	44,31

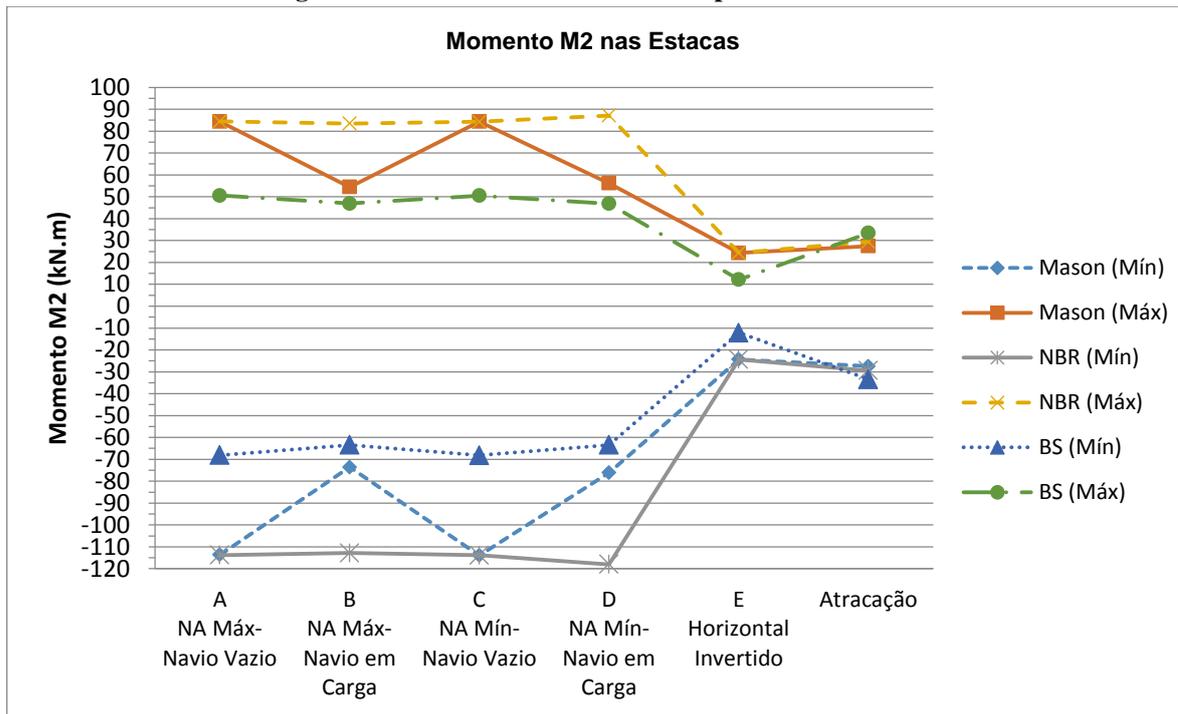
Fonte: Produção do autor

Figura 74 – Esforços axiais nas estacas para cada método



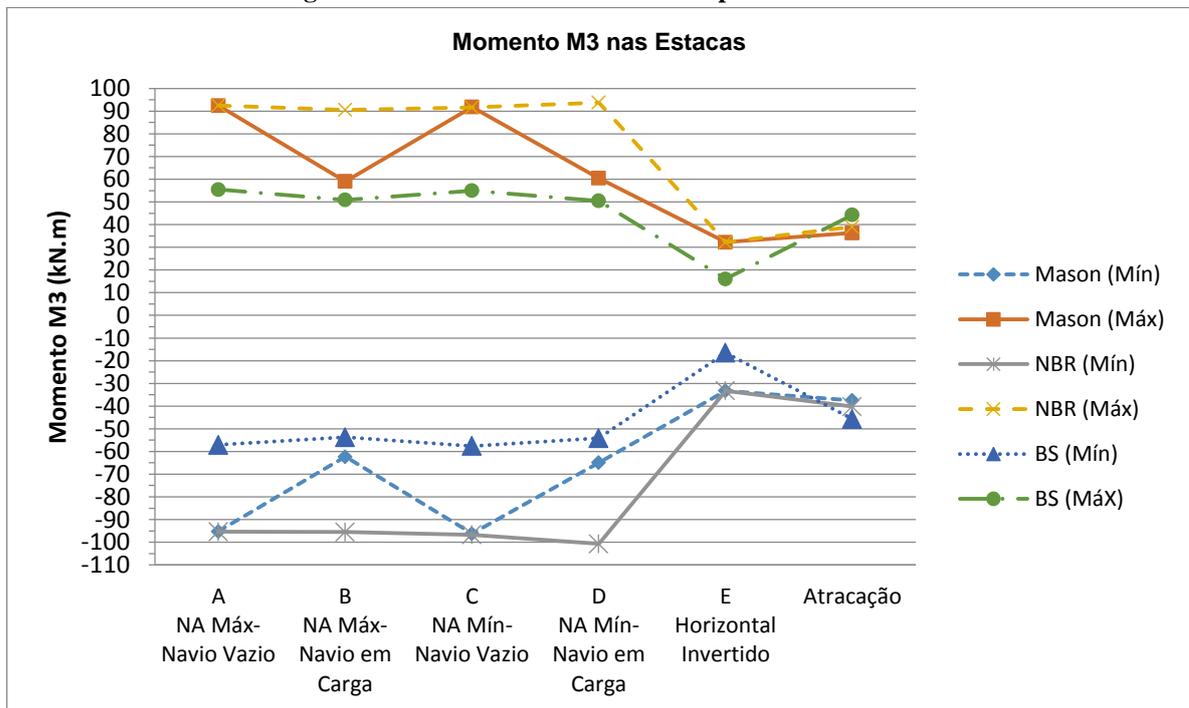
Fonte: Produção do autor

Figura 75 – Momentos M2 nas estacas para cada método



Fonte: Produção do autor

Figura 76 - Momentos M3 nas estacas para cada método



Fonte: Produção do autor

Para os esforços de compressão nas estacas, os maiores resultados são fornecidos pela reação oriunda da energia de atracção calculada pelo método da BS 6349, seguidos daqueles ocasionados pelas forças de amarração calculadas pelo método da norma NBR 9782 e pelo

método apresentado por Mason (1982), os quais são 25 % menores, aproximadamente, para o valor obtido pelo método da NBR 9782 na situação do Navio em Carga com o NA mínimo.

Em termos de momentos fletores, as forças de amarração calculadas pelo método da norma NBR 9782 e pelo método apresentado por Mason (1982) causam os maiores esforços internos deste tipo, tendo em vista que os esforços de amarração atuam predominantemente na direção em que a disposição da estacas dos dolphins conferem menor rigidez ao sistema, em comparação com a direção em que atuam as forças de atracação e as forças de amarração horizontais invertidas.

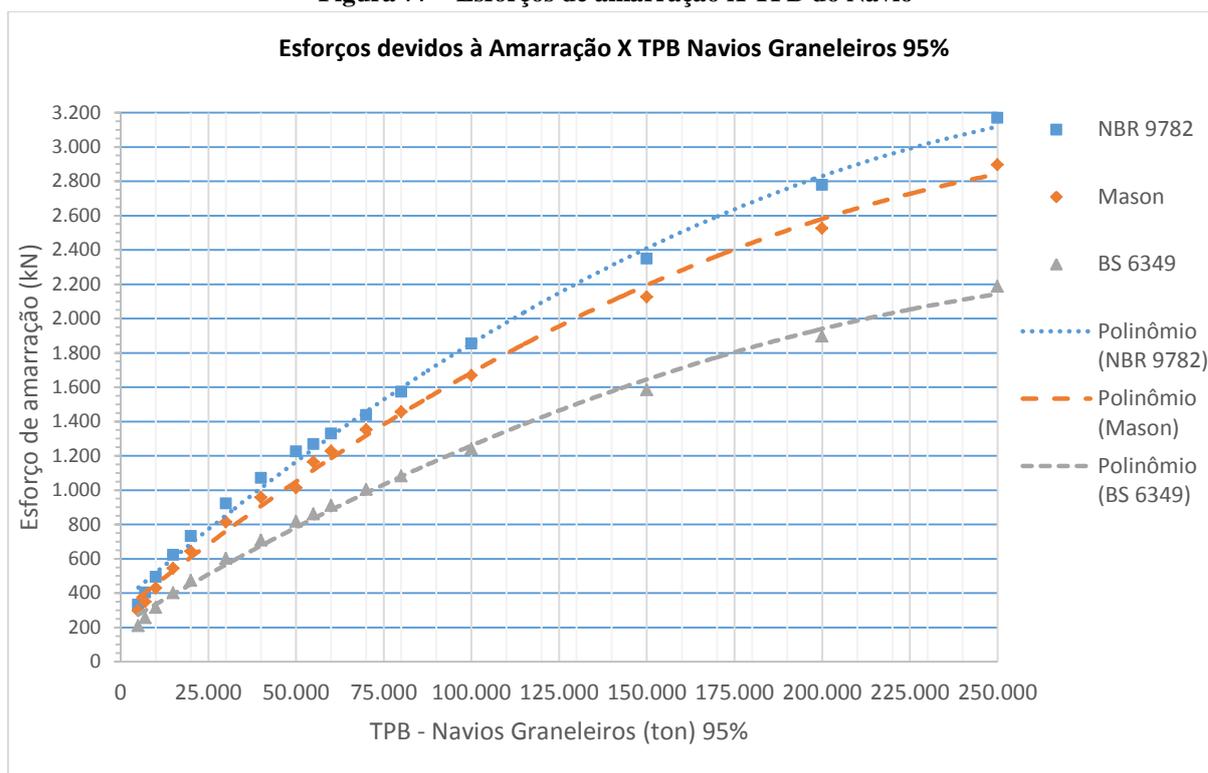
4.4 Esforços de Amarração e Energia de Atracação X Porte do Navio

Nesta seção são apresentados gráficos com informações sobre a energia de atracação e esforços de amarração nominais calculados de acordo com cada método, em função do porte do navio, para navios graneleiros de 5.000 TPB a 250.000 TPB, de modo a permitir uma melhor visualização dos resultados obtidos para cada método. Estes esforços foram obtidos a partir do cálculo para cada navio estudado aplicado ao mesmo estudo de caso da linha de dolphins.

A Figura 77 apresenta os resultados dos esforços de amarração obtidos nos cálculos. O resultado aqui apresentado representa o maior valor obtido entre as 4 (quatro) situações de combinação do NA do rio com a situação de carga do navio estudados, não sendo representado o resultado oriundo dos casos em que o navio empurra o dolphin, tendo em vista que a força de reação devida à atracação supera este valor.

Observar-se que o método da NBR 9782 conduz aos maiores resultados entre os três métodos estudados, seguido do método apresentado por Mason (1982), que fornece resultados em média 11 % menores que os da NBR 9782. O método da BS 6349 fornece os menores resultados, os quais são, em média, 33 % menores que os fornecidos pelo método da NBR 9782.

Figura 77 – Esforços de amarração X TPB do Navio



Fonte: Produção do autor

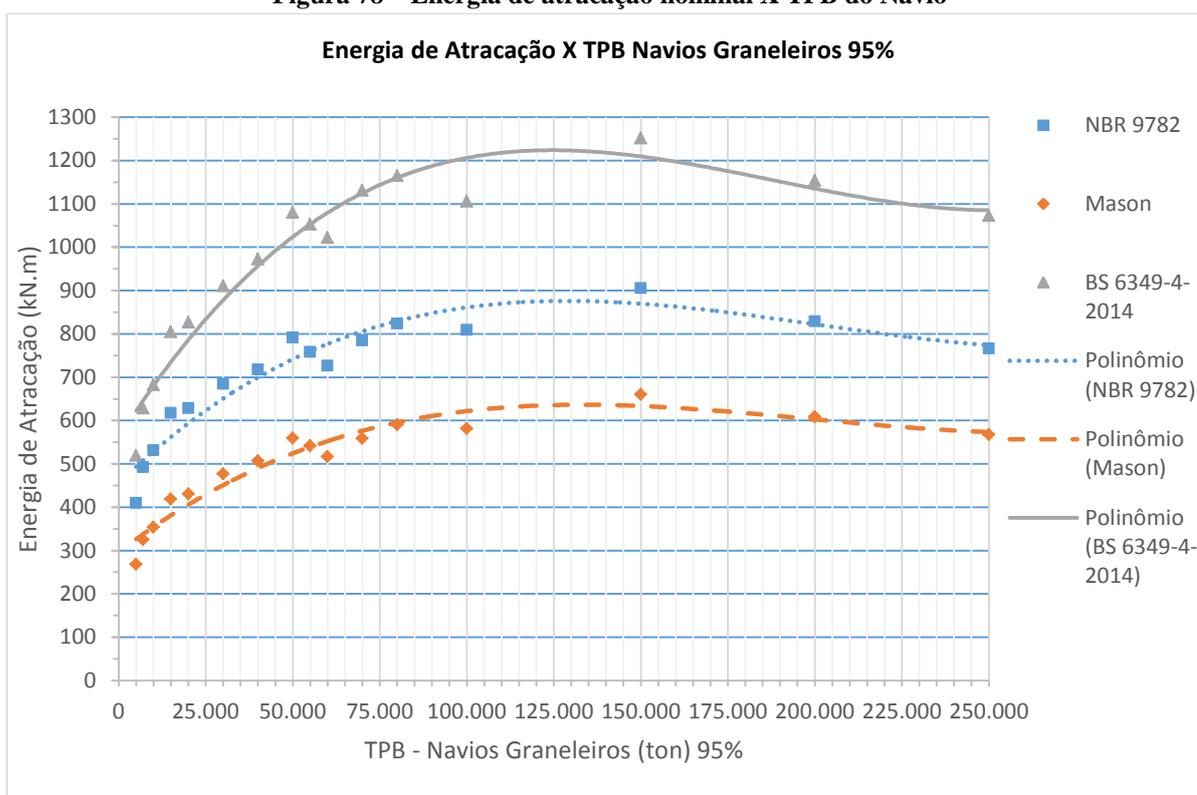
A Figura 78 apresenta os resultados da energia de atracação nominal obtida para cada método, em cada navio estudado.

Para a energia de atracação, observa-se que o método de cálculo da BS 6349 fornece os maiores resultados, sendo estes em média 36 % maiores que os fornecidos pelo método da NBR 9782 e 93 % maiores que aqueles fornecidos pelo método apresentado por Mason (1982).

Nota-se que o aumento do porte do navio não necessariamente aumenta a energia de atracação, pois com o aumento do porte do navio deve-se reduzir a velocidade de atracação até o limite de 0,08 m/s para navios a partir de 240.000 TPB (ver Figura 31). Isto pode ser observado a partir das energias obtidas para navios a partir de 40.000 TPB.

Uma razão que possa justificar a diferença obtida entre resultados fornecidos pelas normas europeias e os resultados fornecidos pelo método da NBR 9782 e pelo proposto por Mason (1982), é o fato de que as normas europeias são atuais e consideraram o avanço da indústria naval, que permitiu, por sua vez, a construção de navios com capacidade de carga maiores que os existentes à época da elaboração da norma brasileira e da realização do estudo de Mason (1982).

Figura 78 – Energia de atracação nominal X TPB do Navio



Fonte: Produção do autor

Ressalta-se que nos cálculos realizados para obtenção do gráfico apresentado na Figura 78 foram utilizados os mesmos parâmetros para os três métodos, de modo a analisá-los sem a influência de mudança de parâmetros externos ao método, como por exemplo, a velocidade de aproximação do navio. Este comentário visa esclarecer a diferença do resultado da energia de atracação calculada pelo método proposto por Mason (1982) mostrada no gráfico para o navio com 60.000 TPB daquele apresentado no item 4.2.1.2, visto que no cálculo mostrado no referido item foram consideradas as recomendações do autor para a velocidade de aproximação e do coeficiente de redução, que conduziram a um resultado superior ao apresentado aqui (ver Apêndice 1).

5 CONCLUSÕES

Para os esforços de amarração observou-se uma grande dispersão nos resultados apresentados pelos métodos estudados. Os resultados obtidos no estudo de caso para este tipo de esforço pelo método da NBR 9782 e pelo método apresentado por Mason (1982) forneceram resultados próximos entre si, em termos de esforços máximos devidos à amarração. Os resultados obtidos através do método da BS 6349 forneceram resultados em média 44 % menores que os obtidos pelos outros métodos, para o estudo de caso. No estudo da curva Esforços devidos à Amarração X TPB do navio, os resultados obtidos pelo método da NBR 9782 forneceram os maiores resultados, sendo em média 12 % maiores que aqueles obtidos pelo método apresentado por Mason (1982) e 51 % maior que os resultados fornecidos pelo método da BS 6349, que forneceu os menores resultados.

Julga-se necessário calcular os esforços de amarração segundo as 3 (três) referências e adotar os maiores resultados, em uma análise mais conservadora, visto que a consideração dos coeficientes de forma para as forças de vento e corrente podem variar em uma faixa de valores que podem conduzir a resultados de até 2 vezes os resultados inferiores. A norma brasileira NBR 9782 mostrou-se a mais conservadora, fornecendo os maiores resultados para os esforços de amarração, sendo considerada como a mais adequada quando da intenção de se elaborar um projeto que considere reduzidos riscos de acidente. Considera-se necessário, quando possível, a realização de estudos em modelos reduzidos para estimar as forças devidas à amarração e ajustar os coeficientes de forma resultantes.

Para os esforços de atracação pôde-se verificar que o método proposto pelas normas europeias (BS 6349, PIANC e EAU 2004) conduzem a valores significativamente superiores aos métodos propostos pela NBR e por Mason, sendo o valor obtido pelo método da NBR o menor entre os três, para o estudo de caso. No estudo da curva Energia de Atracação X TPB do Navio, os resultados obtidos pelo método da NBR 9782 fornecem resultados em média 26 % menores que aqueles obtidos pelas normas europeias, enquanto que para os resultados obtidos pelo método apresentado por Mason (1982) a diferença é de 48 % em média, em termos de energia de atracação. Pôde-se auferir que é mais interessante adotar o sistema de defensas que foi selecionado para a energia de atracação majorada, pois assim garante-se um fator de segurança sobre o dimensionamento das defensas e também sobre o dimensionamento da estrutura da instalação portuária. Deste modo, julga-se mais apropriado utilizar as normas europeias para o cálculo da energia de atracação e para o dimensionamento

do sistema de defensas, tendo em vista os resultados obtidos e o fato de serem normas atuais, a exemplo da inglesa BS 6349-4 cuja última versão é de 2014.

Em termos de esforços internos nos elementos estruturais, pôde-se observar que embora o método da norma inglesa BS 6349 conduza às menores forças de amarração calculadas, devido à geometria dos dolfin e à direção das cargas de amarração e atracação, as maiores forças axiais de compressão são ocasionadas pela reação oriunda da energia de atracação calculada pelo método da BS 6349, e as forças resultantes da amarração calculadas pelo método da norma NBR 9782 e pelo método apresentado por Mason (1982) causam os maiores esforços de tração nas estacas, sendo quase alcançados pelos esforços causados pela reação oriunda da energia de atracação calculada pelo método da BS 6349.

5.1 Proposta para Trabalhos Futuros

Considerando a complexidade do estudo do fenômeno da amarração e da atracação de embarcações, o qual se configura de natureza dinâmica, e da sua influência sobre a infraestrutura de instalações portuárias, destacam-se como propostas para trabalhos futuros:

- Avaliação experimental dos esforços de amarração e atracação de navios em instalações portuárias, por meio de instrumentação dos elementos de amarração, tais como cabeços, para a avaliação dos esforços de amarração, e de elementos estruturais e da infraestrutura, como as estacas em um dolfin e pestanas, para a avaliação dos esforços de atracação;
- Implementação computacional de um programa para cálculo dos esforços de amarração e atracação segundo as referências estudadas;
- Dedução do método de cálculo do comprimento de engastamento fictício de *Davison e Robinson*, para melhor interpretação do fenômeno e refinamento das condições de contorno na modelagem numérica de estruturas portuárias;
- Análise refinada dos coeficientes de forma para forças devidas à corrente e ao vento, para redução da dispersão entre os valores obtidos nos diversos métodos e refinamento dos esforços calculados.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 9782:1987 – Ações em Estruturas Portuárias, Marítimas ou Fluviais. Rio de Janeiro, 1987.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 8800:2008 – Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios. Rio de Janeiro, 2008.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR 6118:2014 – Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

Alfredini, Paolo. Obras e gestão de portos e costas: a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental / Paolo Alfredini, Emilia Arasaki – 2ª ed. – São Paulo: Blucher, 2009.

Amador Júnior, Wellington José. Projeto do Píer de um Terminal de Contêineres – Estudo de Caso. 2006. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

Amendola, Guilherme Guerra. Projeto Conceitual e Análise do Estaqueamento de um Píer. 2010. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2010.

Blok, J.J.; Brozius, L.H.; Dekker, J.N. *The Impact Loads of Ships Colliding With Fixed Structures*. In: 15th Annual OTC in Houston, Texas, 1983. Proceedings... Offshore Technology Conference, 1983. p. 231-240.

British Standard. BS 6349-4:2014 - Maritime structures — Part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems (Reino Unido).

Christan, Priscila de. Estudo da interação solo-estaca sujeito a carregamento horizontal em ambientes submersos. 2012. 192 f. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR. Curitiba, 2012.

CopaboInfra. Catálogo técnico de defensas, 2013.

Costa, Vasco. *The berthing ship. The effect of impact on the design of fenders and other structure*. The Dock and Harbour Authority, 1964.

Davisson, M. T.; Robinson. K. E. *Apud* Veloso, Dirceu Alencar. Fundações, volume 2 : fundações profundas / Dirceu de Alencar Veloso, Francisco de Rezende Lopes. – Nova Ed. – São Paulo : Oficina de Textos, 2010.

Dynamis Techne, Acervo Técnico, 2013.

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. *Design of marine facilities for the berthing, mooring, and repair of vessels* / John W. Gaythwaite. – [2nd ed.]. Reston: American Society of Civil Engineers, 2004.

Governo Federal. PAC2. Disponível em <<http://www.pac.gov.br/transportes/portos>>. Acesso em 03/12/2014.

Huang, Erick T.; Chen, Hamm-Ching. *Ship Berthing at a Floating Pier*. In: The Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference, 2003, USA. Proceedings... Honolulu, Hawaii, USA, 2003. p. 683-690.

Jiang, Chen-wen; Javana, Richard C. *An Analytical Technique for Ship-Fender Interaction*. Report of Office of Naval Research. Arlington, Virginia, 1983.

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

Ligteringen, H. *Ports and Terminals* / H. Ligteringer, H. Velsink – 1st ed. – Delf: VSSD, 2012.

Mason, Jayme. *Obras portuárias* / Jayme Mason. – 2^a ed. – Rio de Janeiro: Campus, 1982.

Natarajan, R.; Ganapathy, C. *Analysis of Moorings of a Berthed Ship*. In: *Marine Structures* 8 (1995). p. 481-499. Elsevier Science Limited. ISSN 0951-8339/95.

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.

Pulsar Marine. *Catálogo técnico de defensas*, 2014.

Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways – EAU 2004 (Alemanha), 2004.

Revista Infraestrutura Urbana. PINI. Disponível em <http://www.infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes-tecnicas/Transporte/estudo-da-usp-aponta-que-brasil-deve-investir-r-1-327071-1.aspx>. Acesso em 22/09/2014.

Sakakibara, Shigeki; Kubo, Masayoshi. *Ship berthing and mooring monitoring system by pneumatic-type fenders*. *Ocean Engineering* 34 (2007) 1174–1181.

Santos, Paulo Rosa; Pinto, Francisco Taveira; Gomes, Fernando Veloso. *Experimental evaluation of the tension mooring effect on the response of moored ships*. *Coastal Engineering* 85 (2014) 60–71. Contents lists available at ScienceDirect.

Schellin, T. E.; Östergaard, C. *The Vessel in Port: Mooring Problems*. *Marine Structures* 8 (1995) 451-479. Elsevier Science Limited. ISSN 0951-8339/95.

Sumitomo. *Rubber Marine Fenders*. *Catálogo técnico de defensas*, 2013.

Thoresen, Carl A. *Port designer's handbook* / Carl A. Thoresen. - [2nd ed.]. – London: Thomas Telford Limited, 2010.

Trelleborg Marine Systems. *Section 12 – Fender Design*. *Catálogo técnico de defensas*, 2011.

APÊNDICE 1

**MEMÓRIA DE CÁLCULO DOS ESFORÇOS DEVIDO À AMARRAÇÃO E
ATRACAÇÃO NOS DOLFINS PARA NAVIO GRANELEIRO PANAMAX 60.000
DWT, COM O NA MÁX**