



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica
Programa de Projeto de Estruturas

Carolina Barreto Saba

ESTUDO COMPARATIVO DE NORMAS DE PROJETO DE ESTRUTURAS
PORTUÁRIAS



UFRJ

Carolina Barreto Saba

ESTUDO COMPARATIVO DE NORMAS DE PROJETOS DE ESTRUTURAS
PORTUÁRIAS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Orientador:

Sergio Hampshire de Carvalho Santos

Rio de Janeiro

2023

Saba, Carolina Barreto

Estudo Comparativo de Normas de Projeto de Estruturas
Portuárias / Carolina Barreto Saba – 2023.

188.: 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Projeto de Estruturas) –
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica,
Programa de Projeto de Estruturas, Rio de Janeiro, 2023.

Orientador: Sergio Hampshire de Carvalho

1. Estruturas Marítimas, 2. Normas Portuárias, 3. Estudo
Comparativo. I. Santos, Sergio Hampshire de Carvalho II.
Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. III.
Título.



UFRJ

ESTUDO COMPARATIVO DE NORMAS DE PROJETO DE ESTRUTURAS
PORTUÁRIAS

Carolina Barreto Saba

Orientador:

Sergio Hampshire de Carvalho Santos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Projeto de Estruturas.

Aprovada pela Banca:

Prof. Sergio Hampshire de Carvalho Santos, D. Sc., UFRJ

Prof. Manoel Rodrigues Justino Filho, D. Sc., UFRJ

Prof. Gilberto Olympio Mota Fialho, D. Sc., UFRJ

Prof. Pedro Henrique Cerento de Lyra, D. Sc., USP

Rio de Janeiro
2023

Ao meu querido avô Fabio Barreto, o maior
incentivador à minha educação acadêmica.

Hoje, nossa grande saudade.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Sergio Hampshire pela orientação acadêmica e grande incentivo ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À minha querida amiga e parceira de profissão Patrícia Arana, não somente pelo forte apoio ao longo destes anos de estudo, como pelo suporte paralelo à orientação acadêmica, essenciais nesta trajetória.

Aos meus amigos Guilherme, Samuel, Marcelle, Tatyana, Raissa e Caroline por todo o incentivo, carinho e atenção, fundamentais nesta conquista e sempre presentes na minha vida.

Aos meus pais Carla e André por sempre me incentivarem e buscarem o que estava ao seu alcance para que eu tivesse acesso à melhor educação possível.

Aos meus irmãos Bruna e Pedro, por todo o carinho e amor ao longo da nossa vida.

Ao meu chefe de trabalho Camilo De La Barra pela constante motivação para que eu concluísse este estudo com êxito.

RESUMO

SABA, Carolina Barreto. **Estudo Comparativo de Normas de Projeto de Estruturas Portuárias**. Rio de Janeiro. 2023. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2023.

Este trabalho apresenta um estudo comparativo de alguns aspectos de normas de projeto de estruturas portuárias, com principal foco em: carregamentos de projeto (vento, corrente, sobrecarga de utilização, atracação e amarração), combinações de ações, dimensionamento estrutural de estacas (concreto armado e aço). As seguintes referências bibliográficas são comparadas: Normas Britânicas (BSI), Recomendações Espanholas (ROM), Normas Europeias (Eurocode), Normas Americanas (UFC, AASHTO, ASCE, ACI, AISC) e diretrizes internacionais (PIANC, OCIMF). Para o desenvolvimento deste trabalho, definiram-se Conjuntos de Normas e Recomendações a serem estudadas em grupo, resultando-se em quatro cenários de estudo, sob os quais uma estrutura típica de píer é analisada. Realiza-se um estudo comparativo entre estes cenários, incluindo seus respectivos carregamentos de projeto, aplicabilidade, metodologias de cálculo e os resultados da utilização estrutural das estacas da estrutura. O píer é dimensionado considerando-se critérios de projeto gerais definidos com base nas práticas de indústria portuária e em critérios adicionais de acordo com as diversas normas. Finalmente, os Conjuntos de Normas e Recomendações definidos são comparados de forma global, ressaltando-se as principais discrepâncias entre estes. De forma geral, observa-se que, para a estrutura estudada, o projeto desenvolvido com Normas Britânicas (BSI), Recomendações Espanholas (ROM) e Normas Europeias (Eurocode) se apresentam como mais conservadores quando comparados às Normas Americanas (UFC, AASHTO, ASCE, ACI, AISC) e diretrizes internacionais (PIANC, OCIMF).

Palavras-chave: estruturas marítimas, normas portuárias, estudo comparativo.

ABSTRACT

SABA, Carolina Barreto **Comparative Study of Codes for the Design of Port Structures**. Rio de Janeiro. 2023. Dissertação (Mestrado) – Programa de Projeto de Estruturas, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2023.

This thesis presents a comparative study of some aspects of standards for the design of port structures, focusing mainly on: design loads (wind, current, live load, berthing and mooring), combinations of actions, structural design of piles (reinforced concrete and steel). The following bibliographical references are compared: British Standards (BSI), Spanish Recommendations (ROM), European Standards (Eurocode), American Standards (UFC, AASHTO, ASCE, ACI, AISC) and international guidelines (PIANC, OCIMF). For the development of this work, Sets of Standards and Recommendations were defined to be studied as a group, resulting in four study scenarios, under which a typical pier structure is analyzed. A comparative study is carried out between these scenarios, including their respective design loads, applicability, calculation methodologies and the results of the structural utilization of the piles. The pier is designed considering general design criteria defined based on port industry practices and additional criteria according to the various standards. Finally, the Sets of Standards and Recommendations defined are compared globally, highlighting the main discrepancies between them. In general, it is observed that for the structure studied the project developed with British Standards (BSI), Spanish Recommendations (ROM) and European Standards (Eurocode) is more conservative when compared to American Standards (UFC, AASHTO, ASCE, ACI, AISC) and international guidelines (PIANC, OCIMF).

Keywords: marine structures, port codes, comparative study.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo do Trabalho.....	1
1.2. Escopo do Trabalho.....	3
1.3. Principais Normas para o Projeto de Estruturas Portuárias.....	4
1.3.1. União Europeia.....	4
1.3.2. Reino Unido.....	5
1.3.3. Espanha.....	6
1.3.4. Estados Unidos	6
1.3.5. Associações Internacionais.....	8
1.4. Matriz de Normas Estudadas – Conjuntos de Normas A1/A2 e B1/B2.....	10
2. CRITÉRIOS DE PROJETO DO ESTUDO DE CASO.....	12
2.1. Siglas e Terminologias	12
2.2. Tipo de Operação do Terminal.....	14
2.3. Navio de Projeto.....	14
2.4. Estrutura Estudada.....	15
2.4.1. Geometria	15
2.4.2. Materiais	19
2.5. Condições Batimétricas e Geotécnicas.....	19
2.6. Condições Ambientais e Climáticas.....	19
2.7. Atracação.....	20
2.8. Amarração	24
2.9. Modelo Estrutural do Píer	29
2.9.1. Elementos de Barra.....	30
2.9.2. Elementos de Placa.....	33
2.10. Carregamentos Comuns a Todas as Análises.....	34
2.10.1. Peso Próprio (PP)	34
2.10.2. Forças Devidas à Temperatura e à Retração do Concreto (T).....	34
3. AÇÕES DE PROJETO DEFINIDAS POR NORMA	35
3.1. Forças Devidas à Ação do Vento (V).....	35
3.1.1. Conforme o Eurocode – A1.....	36
3.1.2. Conforme a AASHTO e ASCE/SEI 7-10 – B1 e B2	43
3.2. Forças Devidas à Ação da Corrente (C).....	46

3.2.1.	Conforme o BSI – A1	47
3.2.2.	Conforme a ROM – A2	49
3.2.3.	Conforme a AASHTO – B1 e B2.....	51
3.3.	Sobrecarga de Utilização (SC)	53
3.3.1.	Conforme o BSI – A1	53
3.3.2.	Conforme a ROM – A2	54
3.3.3.	Conforme a UFC – B1 e B2	57
3.4.	Forças Devidas à Atracção (ATR).....	58
3.4.1.	Conforme o BSI – A1	59
3.4.2.	Conforme a ROM – A2	66
3.4.3.	Conforme a PIANC – B1 e B2	73
3.5.	Forças Devidas à Amarração (AM).....	80
3.5.1.	Conforme o BSI – A1	81
3.5.2.	Conforme a ROM – A2	89
3.5.3.	Conforme a UFC – B1.....	99
3.5.4.	Conforme a OCIMF – B2.....	110
4.	COMBINAÇÕES DE AÇÕES	119
4.1.	Para Dimensionamento Estrutural Conforme o BSI e Eurocode – A1 e A2..	119
4.2.	Para Dimensionamento Estrutural Conforme a UFC– B1 e B2.....	121
4.3.	Para Solicitação Geotécnica – A1, A2, B1 e B2	122
5.	DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL.....	123
5.1.	Conjunto de Normas e Recomendações A1	123
5.1.1.	Solicitações de Projeto	123
5.1.2.	Dimensionamento Estrutural das Estacas.....	124
5.2.	Conjunto de Normas e Recomendações A2	125
5.2.1.	Solicitações de Projeto	125
5.2.2.	Dimensionamento Estrutural das Estacas.....	125
5.3.	Conjunto de Normas e Recomendações B1	127
5.3.1.	Solicitações de Projeto	127
5.3.2.	Dimensionamento Estrutural das Estacas.....	127
5.4.	Conjunto de Normas e Recomendações B2	129
5.4.1.	Solicitações de Projeto	129
5.4.2.	Dimensionamento Estrutural das Estacas.....	129

6. COMPARATIVO DE RESULTADOS OBTIDOS PARA AS NORMAS E RECOMENDAÇÕES ESTUDADAS.....	131
6.1. Ações de Projeto.....	131
6.1.1. Carregamentos Devidos ao Vento	131
6.1.2. Carregamentos Devidos à Corrente.....	132
6.1.3. Sobrecarga de Utilização	133
6.1.4. Carregamentos Devidos à Atracação.....	135
6.1.5. Carregamentos Devidos à Amarração	137
6.2. Solicitações nas Estacas	153
6.3. Dimensionamento Estrutural das Estacas.....	155
6.3.1. Concreto Armado	155
6.3.2. Aço	156
6.4. Resumo Comparativo	158
7. CONCLUSÕES	160
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	162
ANEXO A: Carregamentos Aplicados ao Modelo Estrutural.....	166
A.1 Ação da Temperatura (T).....	166
A.2 Ação do Vento (V).....	167
A.2 Ação da Corrente (C).....	170
A.3 Sobrecarga de Utilização (SC).....	174
A.4 Atracação (ATR).....	174
A.5 Amarração (AM).....	181

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Principais Dimensões da Geometria de um Navio.	12
Figura 2-2: Estrutura do Estudo de Caso: Vista em Planta (dimensões em centímetros).	17
Figura 2-3: Estrutura do Estudo de Caso: Estaqueamento (dimensões em centímetros).	17
Figura 2-4: Estrutura do Estudo de Caso: Cortes A-A, B-B e C-C (dimensões em centímetros).	18
Figura 2-5: Defensas Supercônicas – Geometria.	21
Figura 2-6: Atracação Lateral – Solicitação de 1 defesa.	21
Figura 2-7: Defensas Supercônicas – Reações (kN) e Energias Nominais ($kN \cdot m$). ...	23
Figura 2-8: Defensas Supercônicas – Curva de performance.....	23
Figura 2-9: Arranjo de Amarração para o Navio de Projeto.	25
Figura 2-10: Filosofia de projeto de uma estrutura portuária.	26
Figura 2-11: Modelo Auxiliar para Obtenção dos Esforços de Amarração – SAP2000.	27
Figura 2-12: Cabeço de Amarração do Tipo <i>Double-Bitt</i>	28
Figura 2-13 Dimensões e Cargas Nominais do Cabeço de Amarração <i>Double-Bitt</i>	28
Figura 2-14: Modelo Estrutural do Píer em Vista 3D – SAP2000.	29
Figura 2-15: Modelo Estrutural do Píer Extrudado em Vista 3D – SAP2000.	29
Figura 2-16: Modelo Estrutural do Píer em Planta – SAP2000.	29
Figura 2-17: Modelo Estrutural do Píer em Seção Transversal – SAP2000.	30
Figura 2-18: Propriedades: Elemento do Tipo Barra – Estacas Tubulares Metálicas. ...	30
Figura 2-19: Propriedades: Elemento do Tipo Barra – <i>Plug</i> de Concreto Armado.	31
Figura 2-20: Propriedades: Elemento do Tipo Barra – <i>Plug</i> de Concreto Armado.	31
Figura 2-21: Propriedades: Elemento do Tipo Barra – Nervuras da Laje.	32
Figura 2-22: Propriedades: Elemento do Tipo Barra – Vigas Longitudinais.....	32
Figura 2-23: Propriedades: Elemento do Tipo Placa – Laje.....	33
Figura 2-24: Propriedades: Elemento do Tipo Placa – Laje em Balanço.....	33
Figura 3-1: Fator de exposição do vento c_e , para $kl = 1$ (fator de turbulência) e $c_0 = 1$	37
Figura 3-2: Coeficientes de força para seções retangulares com bordas anguladas e sem efeito de fluxo livre na extremidade.	38

Figura 3-3: Coeficientes de força $C_f, 0$ para seções cilíndricas circulares sem efeito de fluxo livre na extremidade para diferentes rugosidades equivalentes k/b	40
Figura 3-4: Fator de agrupamento para elementos cilíndricos verticais enfileirados.....	41
Figura 3-5: Coeficientes de arrasto para cilindros circulares.	48
Figura 3-6: Área de operação e armazenamento de um terminal portuário.	54
Figura 3-7: Geometria da aproximação do navio ao berço – BSI.	59
Figura 3-8: Seleção de modelo de defesa (tipo supercônica SCN) – BSI.	63
Figura 3-9: Geometria da aproximação do navio ao berço – ROM.	66
Figura 3-10: Seleção de modelo de defesa (tipo supercônica SCN) – ROM.	71
Figura 3-11: Geometria da aproximação do navio ao berço - PIANC.	73
Figura 3-12: Dados de Performance – Defensas Supercônicas.	77
Figura 3-13: Forças Resultantes das Ações Ambientais no Navio – Elaborado conforme BS 6349-1-2.....	81
Figura 3-14: Coeficientes de força de vento para: (a) navios de cargas secas e navios-tanque pequenos, (b) navios-tanque grandes com superestrutura à ré, (c) navios Porta-Contêiners.....	83
Figura 3-15: Coeficientes de arrasto de corrente para águas profundas para todos os tipos de navio.	85
Figura 3-16: Coeficientes transversais de correção de profundidade para navios Porta-Contêiners.....	85
Figura 3-17: Coeficientes longitudinais de correção de profundidade para navios Porta-Contêiners.....	85
Figura 3-18: Forças Resultantes das Ações de Vento no Navio – ROM.	89
Figura 3-19: Forças Resultantes das Ações de Corrente no Navio – ROM.	89
Figura 3-20: Coeficiente de excentricidade para navios com superestrutura centrada. .	92
Figura 3-21: Coeficiente de excentricidade para navios com superestrutura a popa.	92
Figura 3-22: Fator de forma transversal para efeito de profundidade do leito.....	94
Figura 3-23 Coeficiente excentricidade para ação de corrente.....	94
Figura 3-24: Forças Resultantes das Ações de Vento e Corrente no Navio – UFC.....	99
Figura 3-25: Função de forma para força transversal devida ao vento.	101
Figura 3-26: Coeficientes de arrasto transversal para ação de corrente no navio.	104
Figura 3-27: Forças Resultantes das Ações de Vento e Corrente no Navio – OCIMF.	110
Figura 3-28: Coeficiente de arrasto longitudinal do vento para navios-tanque.....	112
Figura 3-29: Coeficiente de arrasto transversal do vento para navios-tanque.....	112

Figura 3-30: Coeficiente de momento horizontal do vento para navios-tanque.....	113
Figura 3-31: Coeficiente de arrasto longitudinal da corrente conforme a razão entre o leito e o calado Wd/T	115
Figura 3-32: Coeficiente de arrasto transversal da corrente conforme a razão entre o leito e o calado Wd/T	115
Figura 3-33: Coeficiente de momento horizontal devido à corrente conforme a razão entre o leito e o calado Wd/T	115
Figura 5-1: <i>Steel Design</i> SAP 2000 – <i>Ratios</i> P-M-M – A1.....	124
Figura 5-2: <i>Steel Design</i> SAP 2000 – <i>Ratios</i> P-M-M – A2.....	126
Figura 5-3: <i>Steel Design</i> SAP 2000 – <i>Ratios</i> P-M-M – B1.....	128
Figura 5-4: <i>Steel Design</i> SAP 2000 – <i>Ratios</i> P-M-M – B2.....	130
Figura 6-1: Forças de Amarração Devidas à Ação do Vento ($\theta_w = 30^\circ$).....	146
Figura 6-2: Forças de Amarração Devidas à Ação do Vento ($\theta_w = 90^\circ$).....	147
Figura 6-3: Forças de Amarração Devidas à Ação do Vento ($\theta_w = 120^\circ$).....	147
Figura 6-4: Forças de Amarração Devidas à Ação da Corrente.	149
Figura 6-5: Forças de Amarração Devidas à Ação do Vento ($\theta_w = 30^\circ$) e da Corrente.	150
Figura 6-6: Forças de Amarração Devidas à Ação do Vento ($\theta_w = 90^\circ$) e da Corrente.	151
Figura 6-7: Forças de Amarração Devidas à Ação do Vento ($\theta_w = 120^\circ$) e da Corrente.	151
Figura 6-8: Compressão Axial Característica Solicitante nas Estacas por Carregamento e por Conjunto de Normas e Recomendações.....	153
Figura 6-9: Tração Axial Característica Solicitante nas Estacas por Carregamento e por Conjunto de Normas e Recomendações.	154
Figura 6-10: Momento Fletor Característico Solicitante nas Estacas por Carregamento e por Conjunto de Normas e Recomendações.....	154

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1-1: Famílias de Normas Eurocode.	4
Tabela 1-2: Normas para Projetos Portuários – BSI.	5
Tabela 1-3: Normas para Projetos Portuários – ROM.....	6
Tabela 1-4: Normas Americanas Usualmente Aplicadas para Projetos Portuários.....	7
Tabela 1-5: Normas de Associações Internacionais para Projetos Portuários.....	9
Tabela 1-6: Matriz de Normas e Recomendações Utilizadas – Conjuntos de Normas de Estudo A1/A2 e B1/B2.	11
Tabela 2-1: Características do Navio de Projeto do Estudo de Caso.	14
Tabela 2-2: Velocidades de aproximação (m/s) recomendadas para atraque lateral.....	20
Tabela 3-1: Cálculo da pressão devida à ação do vento – Eurocode.....	37
Tabela 3-2: Cálculo da força devida ao vento na superestrutura – Eurocode.	39
Tabela 3-3: Cálculo da força devida ao vento nas estacas – Eurocode.	42
Tabela 3-4: Forças devidas à ação do vento aplicadas à estrutura – Eurocode.	42
Tabela 3-5: Coeficientes e pressão devida à ação do vento – AASHTO.	44
Tabela 3-6: Coeficientes e forças devidos ao vento na superestrutura – AASHTO.....	44
Tabela 3-7: Coeficientes e forças devidos ao vento nas estacas – AASHTO.	45
Tabela 3-8: Forças devidas à ação da corrente aplicadas à estrutura – AASHTO.	45
Tabela 3-9: Coeficientes e força devida à ação da corrente nas estacas – BSI.	48
Tabela 3-10: Forças devidas à ação da corrente aplicadas à estrutura – BSI.....	48
Tabela 3-11: Coeficientes e força devida à ação da corrente nas estacas – ROM.	49
Tabela 3-12: Forças devidas à ação da corrente aplicadas à estrutura – ROM.	50
Tabela 3-13: Coeficientes de arrasto da corrente – AASHTO.	51
Tabela 3-14: Coeficientes e força devida à ação da corrente nas estacas – AASHTO. .	51
Tabela 3-15: Forças devidas à ação da corrente aplicadas à estrutura - AASHTO.....	52
Tabela 3-16: Sobrecarga de utilização aplicada à estrutura – BSI.	53
Tabela 3-17: Sobrecargas Mínimas para Estruturas Portuárias - ROM.	54
Tabela 3-18: Sobrecarga de utilização aplicada à estrutura – ROM.	56
Tabela 3-19: Sobrecargas verticais distribuídas para lajes de píeres e cais – UFC.....	57
Tabela 3-20: Sobrecarga de utilização aplicada à estrutura – UFC.....	57
Tabela 3-21: Coeficientes de energia de atracação – BSI.	61
Tabela 3-22: Coeficientes e energias de atracação – BSI.....	62
Tabela 3-23: Valores limites para pressão no casco do navio – BSI.....	63

Tabela 3-24: Cálculo da reação para atracação em múltiplas defensas – BSI.	64
Tabela 3-25: Carregamentos devidos à atracação aplicados à estrutura – BSI.	65
Tabela 3-26: Coeficiente de configuração do atraque C_c – ROM.....	69
Tabela 3-27: Coeficientes e energias de atracação – ROM.....	70
Tabela 3-28: Cálculo da reação para atracação em múltiplas defensas – ROM.....	72
Tabela 3-29: Carregamentos devidos à atracação aplicados à estrutura – ROM.	72
Tabela 3-30: Coeficiente de massa virtual – PIANC.	75
Tabela 3-31: Coeficientes de impacto anormal – PIANC.	76
Tabela 3-32: Coeficientes e energias de atracação – PIANC.....	76
Tabela 3-33: Valores limites para pressão no casco do navio – PIANC.....	78
Tabela 3-34: Cálculo da reação para atracação em múltiplas defensas – PIANC.....	79
Tabela 3-35: Carregamentos devidos à atracação aplicados à estrutura - PIANC.....	79
Tabela 3-36: Coeficientes para cálculo da ação do vento no navio conforme – BSI.	82
Tabela 3-37: Forças devidas à ação do vento no navio – BSI.....	82
Tabela 3-38: Coeficientes para cálculo da ação da corrente no navio – BSI.	86
Tabela 3-39: Forças devidas à ação da corrente no navio – BSI.....	86
Tabela 3-40: Forças Totais no Navio Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – BSI.....	87
Tabela 3-41: Forças Totais por Ponto de Amarração Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – BSI.....	87
Tabela 3-42: Cálculo da Capacidade de Carga das Amarras e do Cabeço de Amarração – BSI.....	87
Tabela 3-43: Carregamentos devidos à amarração aplicados à estrutura - BSI.	88
Tabela 3-44: Coeficientes para cálculo da ação do vento no navio – ROM.	91
Tabela 3-45: Forças devidas à ação do vento no navio – ROM.....	91
Tabela 3-46: Coeficientes para cálculo da ação da corrente no navio – ROM.	96
Tabela 3-47: Forças devidas à ação da corrente no navio – ROM.....	96
Tabela 3-48: Forças Totais no Navio Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – ROM.	97
Tabela 3-49: Forças Totais por Ponto de Amarração Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – ROM.	97
Tabela 3-50: Cálculo da Capacidade de Carga das Amarras e do Cabeço de Amarração – ROM.....	97
Tabela 3-51: Carregamentos devidos à amarração aplicados à estrutura - ROM.	98

Tabela 3-52: Coeficientes para cálculo da ação do vento no navio – UFC.....	102
Tabela 3-53: Forças devidas à ação do vento no navio conforme – UFC.....	102
Tabela 3-54: Coeficientes para cálculo da ação da corrente no navio – UFC.....	107
Tabela 3-55: Forças devidas à ação da corrente no navio – UFC.	107
Tabela 3-56: Forças Totais no Navio Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – UFC.	108
Tabela 3-57: Forças Totais por Ponto de Amarração Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – UFC.	108
Tabela 3-58: Cálculo da Capacidade de Carga das Amarras e do Cabeço de Amarração – UFC.	108
Tabela 3-59: Carregamentos devidos à amarração aplicados à estrutura - UFC.....	109
Tabela 3-60: Coeficientes para cálculo da ação do vento no navio – OCIMF.....	113
Tabela 3-61: Forças devidas à ação do vento no navio – OCIMF.	113
Tabela 3-62: Coeficientes para cálculo da ação da corrente no navio – OCIMF.....	116
Tabela 3-63: Forças devidas à ação da corrente no navio – OCIMF.	116
Tabela 3-64: Forças Totais no Navio Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – OCIMF.	117
Tabela 3-65: Forças Totais por Ponto de Amarração Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – OCIMF.	117
Tabela 3-66: Cálculo da Capacidade de Carga das Amarras e do Cabeço de Amarração – OCIMF.	117
Tabela 3-67: Carregamentos devidos à amarração aplicados à estrutura - OCIMF.....	118
Tabela 4-1: Coeficientes de ponderação e de combinação para combinações estruturais – BS/ Eurocode.....	120
Tabela 4-2: Combinações para dimensionamento estrutural – BS/ Eurocode.	120
Tabela 4-3: Combinações do tipo LRFD (<i>Load and Resistance Factor Design</i>) – UFC.	121
Tabela 4-4: Combinações de Valores Característicos das Ações para Solicitação Geotécnica – A1/A2 e B1/B2.	122
Tabela 5-1: Solicitações Características nas Estacas por Carregamento – A1.....	123
Tabela 5-2: Solicitações de Combinações Geotécnicas das Estacas – A1.	124
Tabela 5-3: Máximas Taxas de Utilização Estrutural das Estacas – A1.	124
Tabela 5-4: Solicitações Características nas Estacas por Carregamento – A2.....	125
Tabela 5-5: Solicitações de Combinações Geotécnicas das Estacas – A2.	125

Tabela 5-6: Máximas Taxas de Utilização Estrutural das Estacas – A2.	126
Tabela 5-7: Solicitações Características nas Estacas por Carregamento – B1.....	127
Tabela 5-8: Solicitações de Combinações Geotécnicas das Estacas – B1.	127
Tabela 5-9: Máximas Taxas de Utilização Estrutural das Estacas – B1.	128
Tabela 5-10: Solicitações Características nas Estacas por Carregamento – B2.....	129
Tabela 5-11: Solicitações de Combinações Geotécnicas das Estacas – B2.	129
Tabela 5-12: Máximas Taxas de Utilização Estrutural das Estacas – B2.	130
Tabela 6-1: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Vento.....	132
Tabela 6-2: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Corrente.	133
Tabela 6-3: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Sobrecarga de Utilização.....	135
Tabela 6-4: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Energias de Atracação.....	136
Tabela 6-5: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Forças de Atracação.	137
Tabela 6-6: Comparação Qualitativa – Normas para Cálculo de Esforços de Amarração Devidos a Ações Ambientais no Navio.....	142
Tabela 6-7: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Vento no Navio.	145
Tabela 6-8: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Corrente no Navio.	145
Tabela 6-9: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Forças Totais no Navio (Vento e Corrente).	145
Tabela 6-10: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Cabeço de Amarração.	152
Tabela 6-11: Comparação de Taxas de Utilização Estrutural do Concreto Aramado – Valores Máximos para Todas Combinações Definidas.....	155
Tabela 6-12: Comparação de Taxas de Utilização Estrutural do Concreto Aramado – Valores Máximos para Uma Combinação Semelhante.	156
Tabela 6-13: Comparação de Taxas de Utilização Estrutural do Aço – Valores Máximos para Todas Combinações Definidas.	157
Tabela 6-14: Comparação de Taxas de Utilização Estrutural do Aço – Valores Máximos para Uma Combinação Semelhante.....	157

Tabela 6-15: Matriz de Resultados ² por Normas Utilizadas – Conjuntos de Normas e Recomendações A1/A2 e B1/B2.	159
---	-----

1. INTRODUÇÃO

1.1. Objetivo do Trabalho

O território brasileiro possui 7.367 km de costa (MARINHA DO BRASIL, 2019), ao longo dos quais estão distribuídos aproximadamente 380 terminais portuários. Segundo o (BNDES, 2019), naquele ano estes terminais foram responsáveis por 95% das exportações brasileiras – que somaram um total de um total de US\$ 200 Bi.

Com extrema importância para a movimentação da economia nacional, permitindo a entrada e saída de produtos diversos em um país de dimensões continentais, os portos brasileiros têm vivenciado nos últimos anos os impactos de um mercado em crescimento. A necessidade do aumento de volumes de exportação, envolvendo tanto otimizações de logística e advento de navios de maior porte de carga, como revitalizações de terminais mais antigos têm gerado, assim, uma demanda crescente por projetos de engenharia portuária.

Sabe-se que a antiga norma brasileira destinada à regulamentação de projetos portuários – NBR 9782: Ações em Estruturas Portuárias, Marítimas ou Fluviais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1987) – apesar de obsoleta por algumas décadas, esteve em vigor até o ano de 2015. Neste ano, ciente de que este documento apresentava referências já ultrapassadas para a engenharia atual, a ABNT realizou seu cancelamento – sem promover, entretanto, a elaboração de uma versão substituta.

Desde então, projetos de estruturas portuárias no Brasil têm sido desenvolvidos com base na aplicação de normas e referências bibliográficas internacionais, em combinação com normas de projeto da ABNT atualmente em vigor para o dimensionamento estrutural (como NBR 6118 (2023) e NBR 8800 (2008)), ou em adaptações de cunho livre da antiga NBR 9782 (1987). Certas vezes, ainda, utilizam-se critérios de projeto definidos com base na experiência particular do engenheiro projetista.

Uma vez que a combinação de recortes de normas internacionais distintas e a definição de critérios de projeto sem fundamentos de estudos técnicos podem ocasionar resultados de engenharia desconhecidos, estas práticas impactam diretamente na segurança de um projeto. Em contrapartida, um projetista teria também a liberdade por

optar por um projeto demasiado conservador, o que ocasionaria aumento de custos de capital da sua implantação. Ainda, a falta de normalização de projeto dificulta a execução de estudos de engenharia para possíveis ampliações futuras do terminal portuário. Pode-se dizer que este cenário infringe princípios básicos da normalização da engenharia como: compatibilidade, controle de qualidade, controle de variedade e, claro, segurança.

Desta forma, o aumento da demanda por projetos portuários presenciado pelo mercado brasileiro nos últimos anos culmina na necessidade da elaboração de uma nova norma brasileira para o Projeto de Estruturas Portuárias. Ciente disto, a partir do ano de 2021, a Comissão Especial de Estudos CEE-231, delegada pela ABNT à Associação Brasileira de Engenharia e Consultoria Estrutural – ABECE, reuniu um grupo de trabalho responsável pela elaboração do texto base de uma norma brasileira para Ações e Projeto de Estruturas Portuárias. Este grupo, do qual a autora deste trabalho forma parte, tem se dedicado ao projeto desta nova norma, que se encontra em andamento até a data de apresentação deste presente estudo.

Sabendo-se que a elaboração desta nova norma brasileira consistiria em um documento completamente novo que tomaria como inspiração, em diversos aspectos, prescrições de normas e recomendações internacionais largamente reconhecidas pela indústria portuária, identificou-se uma oportunidade para o desenvolvimento de um estudo comparativo entre estas referências.

Neste contexto, este trabalho se propõe a comparar os principais aspectos relacionados ao projeto de uma estrutura portuária conforme as recomendações de normas internacionais de maior presença na indústria. Incluem-se, neste estudo, critérios de projeto para definição de carregamentos mínimos, combinações e dimensionamento estrutural de fundações. Para tal, se desenvolverá um Estudo de Caso com base em uma estrutura típica de píer, que será analisada de acordo com cada conjunto de normas selecionado.

O objetivo deste trabalho é, dessa forma, obter-se uma visão holística de cada Conjunto de Normas e Recomendações que será definido nos itens subsequentes deste trabalho, permitindo-se a identificação da aplicabilidade das referências estudadas, suas vantagens e desvantagens, refinamento e praticidade dos métodos de cálculo apresentados e ainda, conservadorismo do projeto de maneira geral.

1.2. Escopo do Trabalho

A fim de se atingir os objetivos citados, este trabalho se divide em 7 (sete) capítulos, descritos a seguir.

No Capítulo 1, além de uma revisão bibliográfica das principais referências normativas internacionais relevantes para este estudo, apresenta-se a estruturação dos 4 (quatro) Conjuntos de Normas e Recomendações em que se embasará o trabalho. Isto é, os grupos de normas que serão aplicados em conjunto para a realização desta análise.

No Capítulo 2, têm-se os critérios de projeto do Estudo de Caso definido para este trabalho, incluindo-se: terminologias da indústria portuária, tipo de operação do terminal, navio de projeto, características da estrutura estudada, condições batimétricas e geotécnicas, condições ambientais e climáticas, carregamentos de projeto comuns a todos os Conjuntos de Normas e Recomendações e parâmetros necessários para o cálculo dos carregamentos definidos por norma.

No Capítulo 3, calculam-se as ações de projeto definidas por normas, conforme cada referência normativa selecionada para os Conjuntos de Normas e Recomendações. Incluem-se: forças devidas à ação do vento e da corrente incidentes na estrutura, sobrecargas de utilização, forças devidas à atracação e amarração do navio de projeto.

No Capítulo 4, apresentam-se as combinações de ações aplicadas a cada Conjunto de Normas, conforme as normas de referência definidas.

No Capítulo 5, têm-se os esforços solicitantes resultantes de cada Conjunto de Normas e Recomendações, bem como o dimensionamento estrutural das estacas da estrutura.

No Capítulo 6, desenvolve-se uma análise comparativa de resultados, tanto a nível qualitativa como numérica, do projeto geral conforme as referências de normas selecionadas, isto é, cada uma das ações de projeto e os resultados finais obtidos para os esforços solicitantes e dimensionamento estrutural das estacas. Destacam-se as principais discrepâncias, vantagens e desvantagens de cada método, seu refinamento e praticidade, aplicabilidade e conservadorismo.

No Capítulo 7, têm-se, finalmente, as conclusões e considerações finais deste estudo, incluindo-se propostas para trabalhos futuros.

1.3. Principais Normas para o Projeto de Estruturas Portuárias

Neste item, apresentam-se algumas das principais normas internacionais largamente utilizadas na indústria para projetos portuários e destacam-se, dentre estas, as que serão objeto de estudo deste trabalho.

1.3.1. União Europeia

As normas do Eurocode, elaboradas pelo Comitê Europeu de Normalização (EUROPEAN COMITTEE FOR STANDARDIZATION), foram desenvolvidas para aplicação na União Europeia, tornando-se, a partir de 2007, mandatórias em seu território. Como se apresenta na Tabela 1-1, estas normas são divididas em famílias (grupos), que abrangem: critérios de projeto, ações de projeto, dimensionamento estrutural, sísmico e geotécnico.

Tabela 1-1: Famílias de Normas Eurocode.

Nº Eurocode (série)	Família de Normas
EN 1990	<i>Basis of Structural Design</i>
EN 1991	<i>Actions on Structures</i>
EN 1992	<i>Design of Concrete Structures</i>
EN 1993	<i>Design of Steel Structures</i>
EN 1994	<i>Design of Composite Steel and Concrete Structures</i>
EN 1995	<i>Design of Timber Structures</i>
EN 1996	<i>Design of Masonry Structures</i>
EN 1997	<i>Geotechnical Design</i>
EN 1998	<i>Design of Structures for Earthquake</i>
EN 1999	<i>Design of Aluminum Structures</i>

Fonte: <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/en-eurocodes/eurocodes-family> (EUROPEAN COMMISSION).

Como se observa, as normas do Eurocode possuem grande abrangência, sendo implementadas para cada país membro da União Europeia em conjunto com Anexos Nacionais, que incorporam aspectos particulares e específicos de projetos locais.

Contudo, como menciona a PIANC WG 153: *Recommendations for the Design and Assessment of Marine Oil and Petrochemical Terminals* (WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT INFRASTRUCTURE, 2016), seu escopo se aplica somente a estruturas *onshore*, sendo explicitamente elaborado para projetos de edifícios, pontes e outras obras civis, não abrangendo, portanto, ações ambientais e operacionais típicas de obras marítimas e portuárias.

1.3.2. Reino Unido

Neste contexto, o Instituto Britânico de Normas (BRITISH STANDARDS INSTITUTION) elaborou recomendações para a aplicação do Eurocode para estruturas marítimas e portuárias, isto é, um *set* de normas denominadas BS (*British Standard*) aplicável em conjunto com as normas Eurocode e os Anexos Nacionais. Estas normas também são publicadas em grupos, a Tabela 1-2 a seguir apresenta as normas da família BS 6349, aplicáveis para estruturas marítimas e portuárias.

Tabela 1-2: Normas para Projetos Portuários – BSI.

Nº BSI	Normas para Projetos Portuários
BS 6349-1-1	<i>General – Code of practice for planning and design for operations</i>
BS 6349-1-2	<i>General – Code of practice for assessment of actions</i>
BS 6349-1-3	<i>General – Code of practice for geotechnical design</i>
BS 6349-1-4	<i>General – Code of practice for materials</i>
BS 6349-2	<i>Code of practice for the design of quay walls, jetties and dolphins</i>
BS 6349-3	<i>Code of practice for the design of shipyards and sea locks</i>
BS 6349-4	<i>Code of practice for design of fendering and mooring systems</i>
BS 6349-5	<i>Code of practice for dredging and land reclamation</i>

Fonte: <https://www.bsigroup.com/en-GB/> (BRITISH STANDARDS INSTITUTION).

Desta forma, este trabalho demonstrará nos próximos capítulos a aplicação do Eurocode conforme indicações das normas BSI para sua implementação para estruturas portuárias.

1.3.3. Espanha

Em contexto similar ao descrito anteriormente, outro *set* de normas europeias disponível para endereçar os temas relacionados com estruturas marítimas quando se aplica o Eurocode são as normas desenvolvidas pelo Governo da Espanha (MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO).

Este grupo de recomendações denominado ROM (*Recomendaciones para Obras Marítimas*), cuja publicação ainda está em progresso até a data presente, é dividido também em famílias e se mostra bastante abrangente no que diz respeito a temas marítimos e portuários. A Tabela 1-3 a seguir apresenta um resumo destas referências normativas.

Tabela 1-3: Normas para Projetos Portuários – ROM.

Nº ROM (série)	Família de Normas para Projetos Portuários
ROM 0	<i>Situación y factores de proyecto</i>
ROM 1	<i>Obras de abrigo frente a las oscilaciones del mar</i>
ROM 2	<i>Obras portuarias interiores</i>
ROM 3	<i>Planificación, gestión y explotación de zonas portuarias</i>
ROM 4	<i>Superestructuras e instalaciones en tierra de las zonas portuarias</i>
ROM 5	<i>Las obras marítimas y portuarias en el entorno</i>
ROM 6	<i>Prescripciones técnicas administrativas y legales</i>

Fonte: <https://www.puertos.es/es-es/ROM> (PUERTOS DEL ESTADO - MINISTERIO DE FOMENTO DEL GOBIERNO DE ESPAÑA).

Desta forma, este trabalho demonstrará nos próximos capítulos a aplicação do Eurocode conforme indicações das normas ROM para sua implementação para estruturas portuárias.

1.3.4. Estados Unidos

De forma distinta à União Europeia, os Estados Unidos não possuem um organismo unificado para elaboração de normas de engenharia. Neste caso, há diversas instituições nacionais que desenvolvem normas e manuais aplicáveis ao projeto de estruturas portuárias.

De acordo com a PIANC WG 153: *Recommendations for the Design and Assessment of Marine Oil and Petrochemical Terminals* (WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT INFRASTRUCTURE, 2016), a Tabela 1-4 apresenta as principais normas usualmente aplicadas em projetos portuários nos Estados Unidos .

Tabela 1-4: Normas Americanas Usualmente Aplicadas para Projetos Portuários.

Código da Norma	Título	Aplicação para Projetos Portuários
AISC 360-16	<i>Specification for Structural Steel Buildings</i>	Dimensionamento de Aço
ACI 318-14	<i>Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary</i>	Dimensionamento de Concreto
API RP 2A-WSD	<i>Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design</i>	Dimensionamento Geral Interação Solo-Estrutura Carregamentos de Ondas e Correntes
ASCE/SEI 7-10	<i>Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures</i>	Carregamentos de Vento na Estrutura
AASHTO	<i>LRFD Bridge Design Specifications</i>	Carregamentos de Vento na Estrutura (aplicação da ASCE 7-10) Carregamentos de Correntes
UFC 4-152-01	<i>Design: Piers and Wharves</i>	Critérios de Projeto Gerais Combinações de Carregamentos
UFC 4-159-03	<i>Design: Moorings</i>	Carregamentos de Vento e de Corrente em Navios
ASCE 61-14	<i>Seismic Design of Piers and Wharves</i>	Projeto Sísmico

Fonte: PIANC WG 153: *Recommendations for the Design and Assessment of Marine Oil and Petrochemical Terminals* (2016) – Tabela 6.2 (adaptado).

Esta guia apresentada pela PIANC WG 153 (2016) será, portanto, utilizada como referência para o estudo da implementação de normas americanas para o projeto de estruturas portuárias desenvolvido neste trabalho nos próximos capítulos.

1.3.5. *Associações Internacionais*

Fundada em 1885, a Associação Mundial de Infraestrutura de Transporte Marítimo (*The World Association for Waterborne Transport Infrastructure*), conhecida pela sigla PIANC, é a principal organização global que fornece recomendações técnicas para infraestrutura portuária, marítima e fluvial.

Ao redor de todo o mundo, organismos nacionais que desenvolvem regulamentos específicos para a engenharia portuária de cada país usualmente têm em vista os estudos e orientações elaborados pela PIANC. Pode-se dizer, assim, que a conformidade com as documentações técnicas da PIANC é uma boa prática da engenharia portuária, independente da nação.

Tipicamente, os relatórios da PIANC não fornecem indicações específicas de cálculo, exatamente por serem documentos com objetivo de aplicação internacional, em um contexto onde cada nação poderá dispor de seus próprias normativas de projeto (como a família Eurocode, BSI, ROM e normas americanas, apresentadas anteriormente).

Assim, a PIANC cumpre o papel de fornecer orientações de mais alto nível ao projeto de terminais portuários, apresentando critérios mínimos, considerações de projeto e boas práticas. Em toda sua extensão, os relatórios PIANC mencionam as normas publicadas pelos organismos supracitados, reconhecendo-as e validando-as em sua qualidade técnica e aplicabilidade a projetos portuários.

Vale ressaltar que as normas e recomendações apresentadas anteriormente na Tabela 1-1, Tabela 1-2, Tabela 1-3 e Tabela 1-4, são citadas na PIANC WG 153: *Recommendations for the Design and Assessment of Marine Oil and Petrochemical Terminals* (WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT INFRASTRUCTURE, 2016). Dessa forma, pode-se dizer que todas estas referências, apesar de apresentarem diferentes metodologias e particularidades de cálculo, estão em conformidade com recomendações da PIANC

Embora usualmente as normativas PIANC apresentem recomendações de mais alto nível, vale mencionar que para o tema específico de cálculo de energias de atracação (a ser abordado no Capítulo 3.4), esta entidade fornece indicações de cálculo detalhadas – uma vez que para o tema específico, aplica-se uma metodologia única baseada no princípio físico da conservação de energia, com diferenciações somente em coeficientes de cálculo. Este assunto é abordado na PIANC WG 33: *Guidelines for the Design of Fender Systems* (WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT INFRASTRUCTURE, 2002), que será, portanto, incluída como objeto de estudo deste trabalho.

Em respeito ao tema de cálculo de esforços de amarração, a PIANC WG 184: *Design Principles for Dry Bulk Marine Terminals* (WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT INFRASTRUCTURE, 2019) menciona uma referência adicional para projeto. Também elaborada por uma entidade internacional de engenharia portuária largamente reconhecida na indústria, a norma citada é a OCIMF MEG 4: *Mooring Equipment Guidelines* (OIL COMPANIES INTERNATIONAL MARINE FORUM, 2018), a qual também será incluída como objeto de estudo. Cabe mencionar que referências bibliográficas destinadas à indústria de petróleo e gás são tipicamente mais rigorosas, uma vez que as consequências de uma possível falha ou acidente possuem magnitude em escala superior, quando comparada a terminais que manuseiam outros produtos. Este trabalho utilizará a OCIMF MEG 4 (2018) como objeto comparativo de estudo tendo-se em consideração seu nicho de aplicabilidade.

Desta forma, a Tabela 1-5 apresenta as normativas de entidades internacionais mencionadas nesta seção que serão estudadas como referências de cálculo neste trabalho, bem como sua aplicação:

Tabela 1-5: Normas de Associações Internacionais para Projetos Portuários.

Nº / Código	Título	Aplicação para Projetos Portuários
PIANC WG 33	<i>Guidelines for the Design of Fender Systems</i>	Carregamentos de Atracação
OCIMF MEG4	<i>Mooring Equipment Guidelines</i>	Carregamentos de Vento e de Corrente em Navios

1.4. Matriz de Normas Estudadas – Conjuntos de Normas A1/A2 e B1/B2

Com base na aplicabilidade das normas mencionadas nos itens 1.1 a 1.3, definiram-se conjuntos de normas para estudo neste trabalho, tendo-se em vista o cálculo de ações de projeto, combinações de ações e o dimensionamento estrutural. Compõem-se, assim, os Conjuntos de Normas e Recomendações de estudo apresentados na Tabela 1-6, onde os grupos A1/A2 e B1/B2 representam, respectivamente, referências Europeias e dos Estados Unidos.

Para sua comparação, ao longo deste trabalho estes Conjuntos de Normas e Recomendações serão implementados ao projeto de uma estrutura típica de pír, cujas características e critérios de projeto se descrevem no Capítulo 2. Este trabalho se propõe, assim, a obter os esforços solicitantes e o dimensionamento estrutural das fundações da estrutura descrita nos itens subsequentes, para cada Conjunto de Normas e Recomendações.

Tabela 1-6: Matriz de Normas e Recomendações Utilizadas – Conjuntos de Normas de Estudo A1/A2 e B1/B2.

Conjunto	Ações de Projeto							Combinações de Ações	Dimensionamento	
	PP ¹	T ¹	Vento	Corrente	Sobrecarga	Atracação	Amarração		Concreto	Aço
A1	-	-	EN 1991-1-4 (2005)	BS 6349-1-2 (2016)	BS 6349-1-2 (2016)	BS 6349-4 (2014)	BS 6349-1-2 (2016)	EN 1990 (2002) BS 6349-1-2 (2016)	EN 1992 (2004)	EN 1993 (2005)
A2	-	-		ROM 2.0-11	ROM 2.0-11	ROM 0.2-90	ROM 0.2-90			
B1	-	-	ASCE/SEI 7-10	AASHTO (2020)	UFC 4-151- 01 (2017)	PIANC WG 33 (2002)	UFC 4-159- 03 (2020)	UFC 4-151-01 (2017)	ACI 318-14	AISC 360-16
B2	-	-	AASHTO (2020)				OCIMF MEG4 (2018)			

¹ Para os carregamentos de Peso Próprio (PP) e Temperatura (T) não se listaram referências normativas pois estes serão definidos como critérios de projeto, com valores comuns a todas as análises (ver item 2.10).

2. CRITÉRIOS DE PROJETO DO ESTUDO DE CASO

Este capítulo apresenta os critérios de projeto da estrutura típica de píer definida para o Estudo de Caso deste trabalho, baseada em projetos de terminais portuários reais, usualmente desenvolvidos no Brasil. Incluem-se características da operação do terminal, da estrutura estudada e condições locais, bem como outras premissas de cálculo necessárias. Os capítulos subsequentes se dedicarão a apresentar seu dimensionamento conforma os Conjuntos de Normas e Recomendações estabelecidos na Tabela 1-6.

A fim de que se estudasse uma única estrutura capaz de receber os carregamentos devidos à operação do navio, selecionou-se para este trabalho um navio de projeto que, na atualidade, é considerado de médio porte. Cais designados a receber navios de grande porte tipicamente são compostos por mais de um segmento estrutural independente.

2.1. Siglas e Terminologias

A Figura 2-1 a seguir ilustra algumas das principais dimensões típicas da geometria de um navio, em seguida, apresentam-se as definições de siglas e terminologias da engenharia portuária que serão referenciadas e aplicadas ao longo deste trabalho.

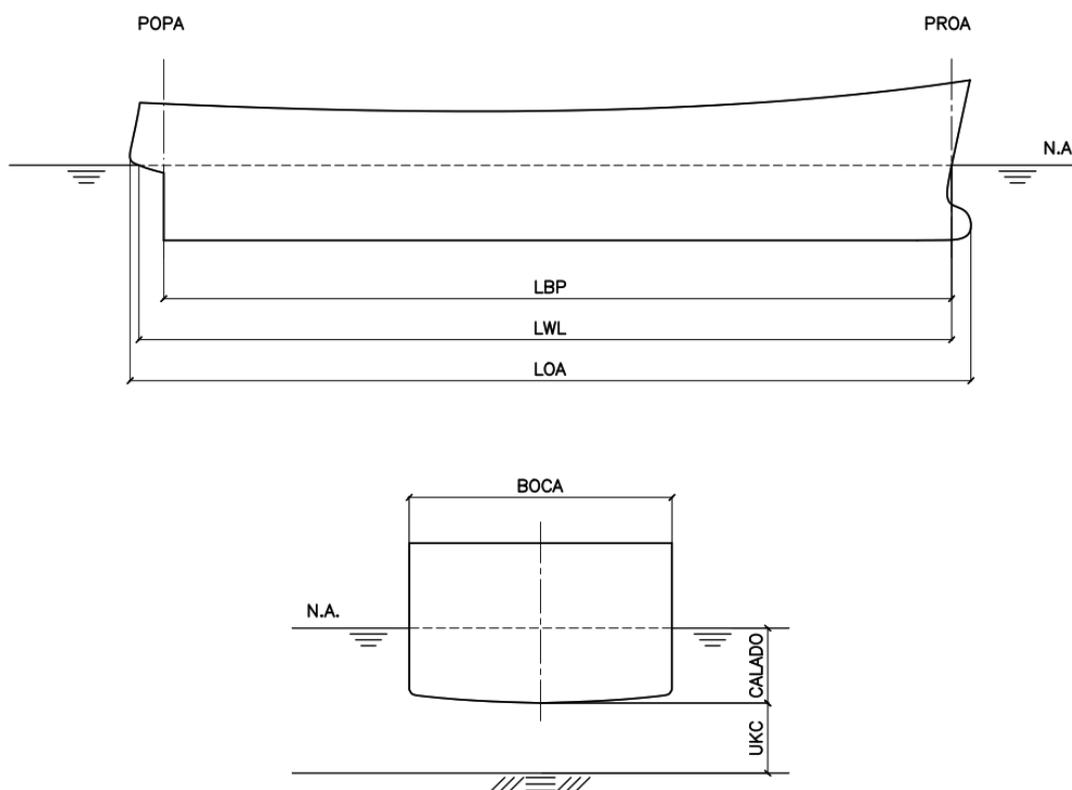


Figura 2-1: Principais Dimensões da Geometria de um Navio.

Amarra	é o cabo que amarra o navio ao píer;
Boca	é a dimensão máxima transversal do navio;
Cabeço	é o dispositivo de amarração, que recebe as amarras do navio;
Calado	é a dimensão entre a quilha do navio e a linha de água;
Defensa	é o dispositivo de atracação, que recebe o impacto do navio;
Pontal	<i>Depth</i> , é a dimensão que corresponde à altura total do navio, isto é, entre sua quilha e a linha de vau;
LBP	<i>Length Between Perpendiculars</i> , é o comprimento longitudinal entre perpendiculares do navio;
LOA	<i>Length Overall</i> , é o comprimento longitudinal total do navio;
LWL	<i>Length at Waterline</i> , é o comprimento longitudinal do navio medido no nível d'água;
NA	Nível da Água, é a elevação da linha de água, referenciado ao nível de maré mínimo;
UKC	<i>Underkeel Clearance</i> , é a distância livre entre a quilha do navio e o leito, conhecida como “pé de piloto”;
MBL	<i>Minimum Breaking Load</i> , carga mínima de ruptura de uma amarra;
SWL	<i>Safe Working Load</i> , carga de trabalho com um fator de segurança;
Popa	é a região traseira do navio;
Proa	é a região frontal do navio;
Meia-nau	é a região entre a proa e a popa do navio;
Ré	região da meia-nau para trás do navio;
Vante	região da meia-nau para frente do navio.

2.2. Tipo de Operação do Terminal

Tipicamente, navios de carga transportam classes de produtos específicas, que podem ser: graneis líquidos, graneis sólidos, gás, contêineres, carga geral, entre outras. Navios designados para cada tipo de carga e sua operação possuem características específicas, que devem ser consideradas para o dimensionamento da estrutura portuária.

Para o Estudo de Caso deste trabalho, tem-se um terminal destinado a receber carga geral, isto é, bens que podem ser transportados individualmente em unidades (tipicamente embaladas), diferentemente de cargas transportadas à granel, por exemplo.

2.3. Navio de Projeto

As características do navio de projeto são apresentadas na Tabela 2-1.

Tabela 2-1: Características do Navio de Projeto do Estudo de Caso.

Característica	Dimensão
DWT	25.000 <i>t</i>
Comprimento Total (LOA)	178 <i>m</i>
Comprimento entre Perpendiculares (LBP)	169 <i>m</i>
Calado Carregado (Máximo)	10,7 <i>m</i>
Calado em Lastro (Mínimo)	6,42 <i>m</i>
Pontal (MD)	14,9 <i>m</i>
Boca	26,4 <i>m</i>
Deslocamento	34.500 <i>t</i>
Área Longitudinal Projetada Total	4.200 <i>m</i> ²
Área Longitudinal Projetada sobre o NA em Lastro (Máxima)	3.200 <i>m</i> ²
Área Longitudinal Projetada sobre o NA Carregado (Mínima)	2.360 <i>m</i> ²
Área Longitudinal Projetada da Superestrutura	1.600 <i>m</i> ²
Altura da Superestrutura	25 <i>m</i>
Área Transversal Projetada Total	695 <i>m</i> ²
Área Transversal Projetada sobre o NA em Lastro (Máxima)	525 <i>m</i> ²
Área Transversal Projetada sobre o NA Carregado (Mínima)	415 <i>m</i> ²

O Anexo A da PIANC WG 235: *Ship Dimensions and Data for Design of Marine Infrastructure* (WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT INFRASTRUCTURE, 2022), que apresenta dados de navios usuais, foi utilizado como referência para a definição dos parâmetros de projeto apresentados. Assume-se que este navio, que transporta carga geral, possui superestrutura distribuída em sua extensão, localizada predominantemente à ré.

2.4. Estrutura Estudada

2.4.1. Geometria

O objeto de estudo será uma estrutura típica de píer estaqueada, com as características descritas neste capítulo. O Estudo de Caso deste trabalho – desenvolvido nos Capítulos 3, 4, 5 e 6 subsequentes – apresentará o percentual de utilização da capacidade estrutural de suas estacas, obtido a partir do dimensionamento realizado conforme cada Conjunto de Normas e Recomendações definidos anteriormente. Para tanto, as características da estrutura foram definidas com base em um pré-dimensionamento e serão consideradas comuns a todas as análises.

A estrutura de estudo, cuja vista em planta se apresenta na Figura 2-2, possui 226 m de comprimento e 35 m de largura e dispõe de 10 defensas distantes de 24 m entre si, com um cabeço de amarração em cada eixo de defensas.

Ressalta-se que a geometria do píer foi definida de acordo com recomendações da indústria portuária. A BS 6349-4 (2014), por exemplo, indica que o espaçamento entre defensas em píeres contínuos não seja superior a $0,15L_s$ sendo L_s o comprimento do menor navio esperado pelo terminal. Para o navio de projeto deste trabalho, tem-se $0,15 LOA = 26,7m > 24m$. A fim de se que se disponha de liberdade de espaço para um arranjo de amarração eficiente, é desejável, ainda, que o comprimento útil do píer seja superior à soma do comprimento do maior navio com sua boca. Para o navio de projeto definido, atende-se a este critério, uma vez que $LOA + B = 204,4m < 226m$. Outras referências bibliográficas citadas ao longo deste trabalho, como PIANC, OCIMF, ROM, também foram consultadas para a definição do layout da estrutura de estudo.

O topo da laje do píer de projeto se encontra na cota $EL + 3,0 m$, assume-se o NA médio na cota $EL 0,0m$. A estrutura é suportada por estacas metálicas de diâmetro $\varnothing 914 mm$ com espessura $t = 16 mm$, cravadas até a cota $EL - 30,0m$ e preenchidas com concreto armado desde seu topo até a cota $EL 0,0m$. Os *plugs* de concreto armado das estacas, que permitem sua solidarização com a superestrutura, é armado com 18 barras de diâmetro $\varnothing 16 mm$.

As estacas metálicas possuem proteção catódica para prevenir sua corrosão. Adicionalmente, considera-se para o dimensionamento estrutural a tolerância à corrosão de $1,5mm$ por face em contato com o solo, isto é, $3mm$ totais de perda de espessura de sacrifício ao longo da vida útil da estrutura.

As estacas estão dispostas em seis eixos nomeados de A a F, como se apresenta na Figura 2-3. Destes eixos, todos são compostos por estacas verticais com exceção do eixo D, cujas estacas se dispõem em pares e possuem inclinações 1:4 (H:V) em direções opostas – com a função de prover maior rigidez à estrutura na direção dos carregamentos dimensionantes (amarração e atracação do navio). Os eixos longitudinais de estacas, numerados de 1 a 29, distam de $8 m$ entre si, enquanto os eixos transversais formam um vão de $6 m$ entre estacas.

A superestrutura é composta por peças pré-moldadas de laje e viga, com solidarização proporcionada pela execução de concretagem *in loco*, como se ilustra na Figura 2-4. Essa tipologia estrutural permite a minimização da utilização de formas para a concretagem *in loco* – uma vez que as peças pré-fabricadas, além de contribuir à rigidez da estrutura, funcionam como “forma perdida”, permitindo maior eficiência construtiva.

Os elementos pré-fabricados de viga tipo U possuem $140 cm$ de largura, $70 cm$ de altura e $18 cm$ de espessura. Já os elementos pré-moldados de laje do tipo Pi, possuem $10 cm$ de espessura, $470 cm$ de comprimento e $150 cm$ de largura, e são posicionados justapostos sobre as vigas. A concretagem *in loco* forma uma camada de laje de $35 cm$ acima do pré-fabricado, totalizando $45 cm$ de espessura de laje e uma viga de altura final de $165 cm$.

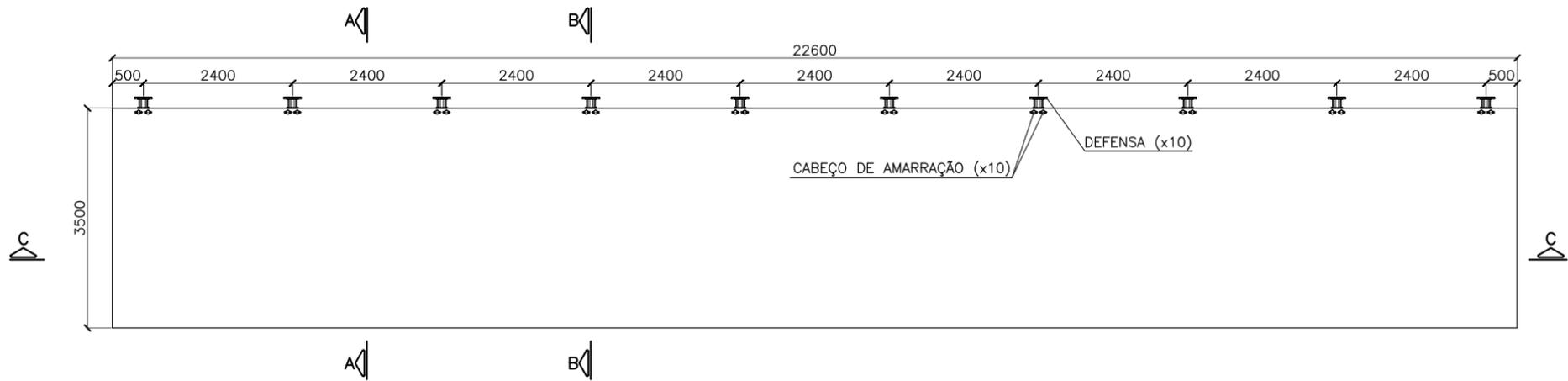


Figura 2-2: Estrutura do Estudo de Caso: Vista em Planta (dimensões em centímetros).

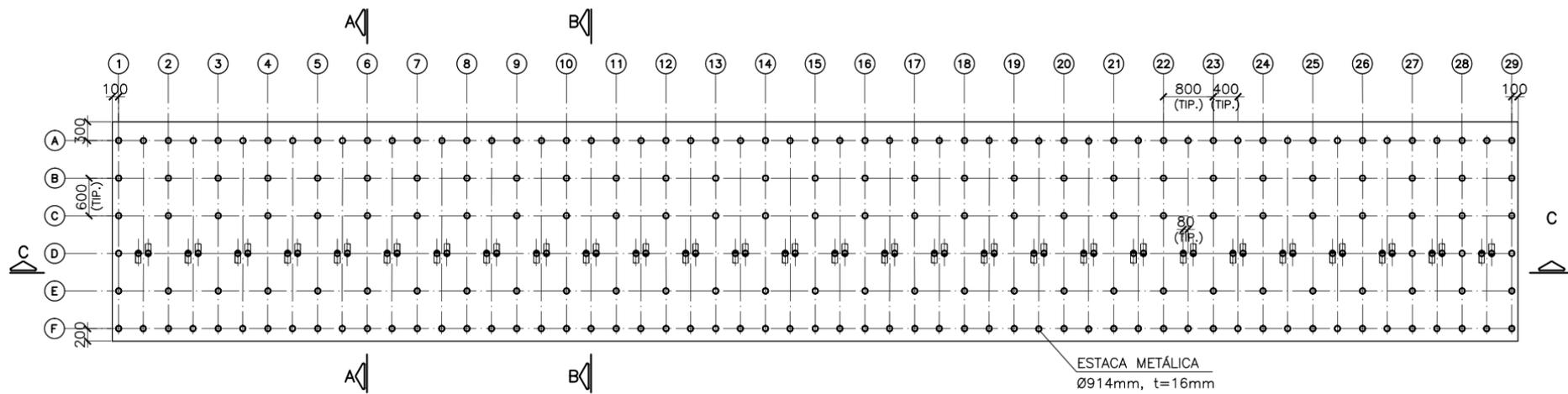


Figura 2-3: Estrutura do Estudo de Caso: Estaqueamento (dimensões em centímetros).

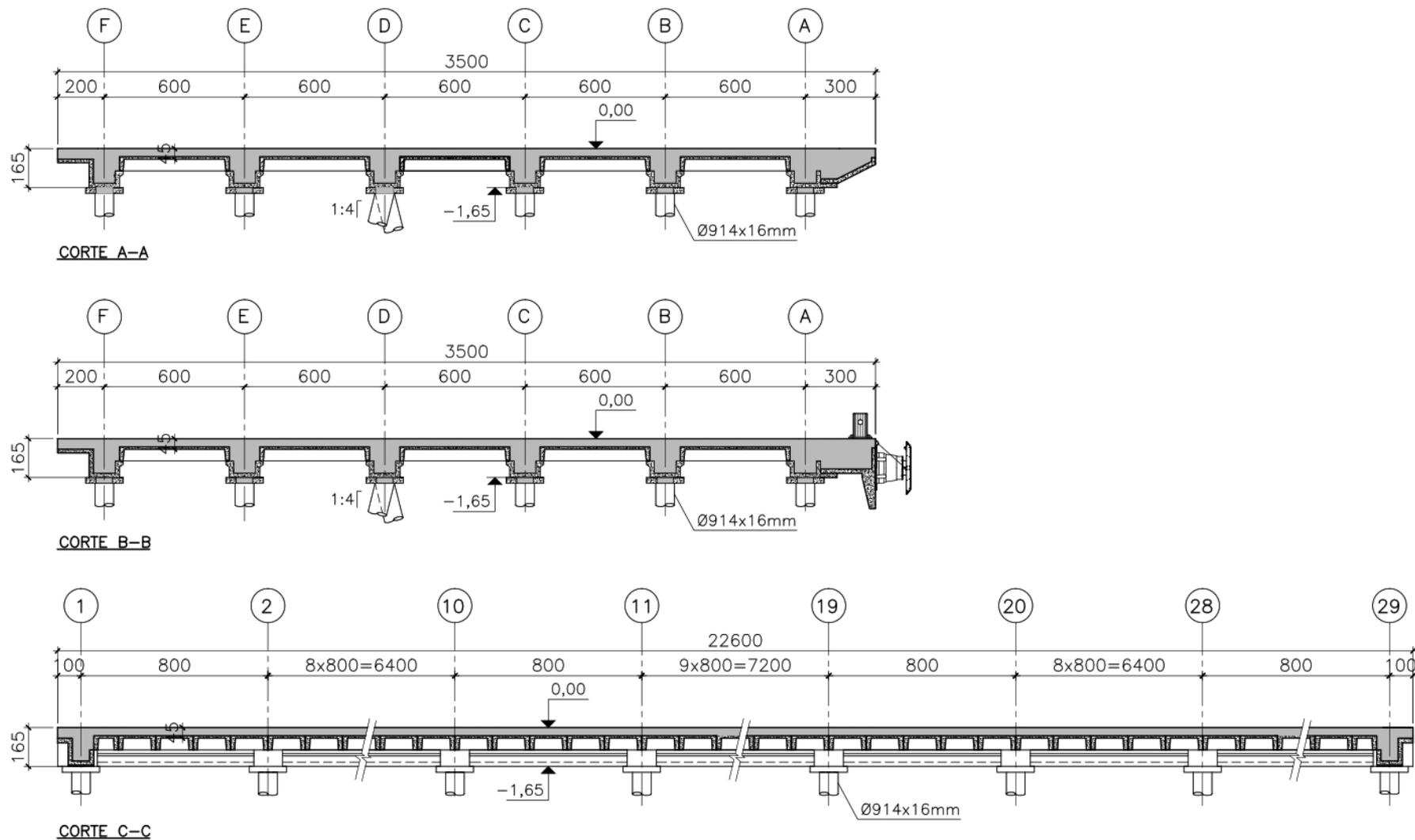


Figura 2-4: Estrutura do Estudo de Caso: Cortes A-A, B-B e C-C (dimensões em centímetros).

2.4.2. Materiais

Os elementos da superestrutura, tanto pré-fabricados bem como executados *in loco*, são formados por concreto de resistência nominal à compressão $f_{ck} \geq 40 \text{ MPa}$. O concreto utilizado para preenchimento da camisa metálica das estacas possui também esta mesma resistência à compressão.

Suas armaduras são compostas por aço com tensão de escoamento nominal de $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$. Já o aço utilizado para fabricação das estacas metálicas tubulares é do tipo ASTM A-572 Gr. 50, cuja tensão de escoamento é de $f_{yk} = 345 \text{ MPa}$ e tensão de ruptura é de $f_{uk} = 450 \text{ MPa}$.

Para a determinação dos carregamentos devidos ao peso próprio dos elementos estruturais, considera-se o peso específico do concreto armado como $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$ e o do aço estrutural como $\gamma_s = 77 \text{ kN/m}^3$.

2.5. Condições Batimétricas e Geotécnicas

O nível do leito marinho é definido na cota $EL - 16,0m$. Assume-se que o primeiro metro do perfil do solo seja de resistência desprezada e que o engastamento da estaca ocorre a uma penetração no solo resistente de 5 vezes o seu diâmetro ($5 \times D \cong 5m$). Desta forma, tem-se, que o ponto de engastamento ocorre na cota $EL - 22,0m$. Como descrito, o NA médio se encontra na elevação $EL 0,0m$.

Assim, com base na cota do leito marinho e no calado do navio de projeto definidos, tem-se que a distância livre sob quilha (pé de piloto) é de $UKC = 0,5 \times \text{Calado}$. Isto é, a razão entre a profundidade do leito e o calado vale $1,5 \times \text{Calado}$.

2.6. Condições Ambientais e Climáticas

A velocidade básica do vento para projeto estrutural referente a uma rajada de 3s é de $35m/s$, equivalente à velocidade média de projeto de $24m/s$ medida em $10min$. A velocidade da corrente marítima vale $1,1 m/s$. As condições climáticas desta região produzem uma variação axial de temperatura de $\pm 15^\circ C$, a que os componentes da superestrutura estarão sujeitos. Em conjunto, os efeitos de retração do concreto serão representados como variação térmica de $-10^\circ C$, portanto, se considera uma variação total de $-25/ +15^\circ C$ aplicada à estrutura.

2.7. Atracação

A estrutura de um píer deve ser dimensionada para suportar os esforços devidos ao impacto da atracação do navio de projeto, que dependem principalmente: das características do navio, da sua velocidade e seu ângulo de aproximação e do dispositivo de defesa instalado.

Ultimamente, a performance da defesa selecionada é crucial para a determinação da força de atracação de projeto – isto porque, quando o navio atraca, no momento do impacto sua energia cinética é absorvida pela deformação elástica da defesa e uma determinada força de reação é transmitida à estrutura.

Neste Estudo de Caso, define-se a velocidade de aproximação do navio de projeto ao terminal como $v = 0,20 \text{ m/s}$, em concordância com as recomendações da PIANC WG 33 (2002) para esta classe de navio em condições moderadas de atracação (como mostra a Tabela 2-2).

Tabela 2-2: Velocidades de aproximação (m/s) recomendadas para ataque lateral.

Deslocamento do navio (t)	Condições favoráveis	Condições moderadas	Condições desfavoráveis
Inferior a 10.000	0,20 a 0,16	0,45 a 0,30	0,60 a 0,40
Entre 10.000 e 50.000	0,12 a 0,08	0,30 a 0,15	0,45 a 0,22
Entre 50.000 e 100.000	0,08	0,15	0,20
Superior a 100.000	0,08	0,15	0,20

Fonte: PIANC WG 33: *Guidelines for the Design of Fender Systems* (2002) – Tabela 4.2.1 e ROM 0.2-90: *Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias* (1990).

O píer possui 10 defensas do tipo supercônica em sua extensão, que podem ser solicitadas individualmente ou simultaneamente, conforme o tipo atracação.

Para este estudo, utiliza-se como referência o modelo de defesa supercônica SCN1400 do catálogo *Fender Systems – Product Brochure* (TRELLEBORG MARINE AND INFRASTRUCTURE, 2020), ilustrada na Figura 2-5. O grau do material da defesa de projeto e, portanto, sua capacidade nominal serão definidos de acordo com os esforços solicitantes obtidos pelos cálculos realizados conforme cada norma de estudo selecionada.

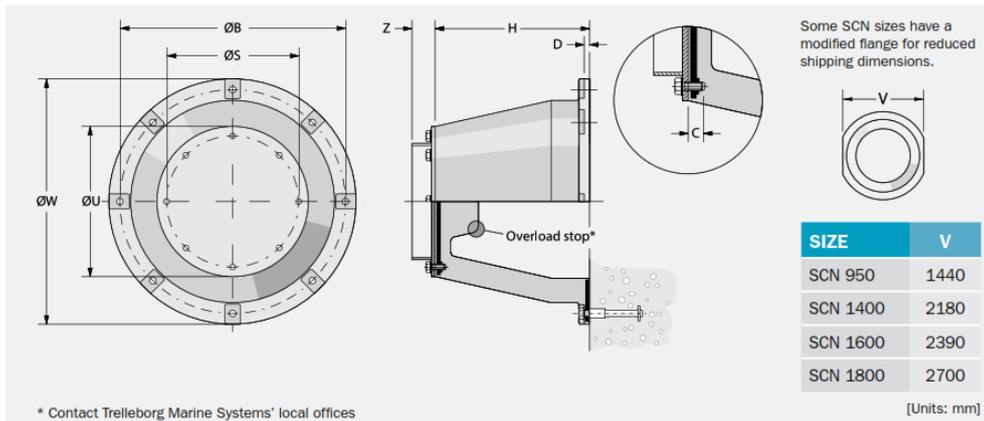


Figura 2-5: Defensas Supercônicas – Geometria.

Fonte: *Fender Systems – Product Brochure* (TRELLEBORG MARINE AND INFRASTRUCTURE, 2020)

Dois cenários de atracação são considerados no projeto: atracação com contato inicial em 1 (uma) defesa e atracação paralela, com contato em múltiplas defensas.

O modelo da defesa é selecionado a partir do primeiro cenário descrito, de forma que esta seja capaz de absorver todo o impacto de atracação, isto é, a energia de absorção nominal (Figura 2-7) deve ser equivalente ou superior à energia total de atracação calculada. Para o dimensionamento estrutural, nos carregamentos em que se têm defensas solicitadas individualmente, assume-se que a energia absorvida seja a nominal e, portanto, a força de reação aplicada é a máxima nominal da defesa (Figura 2-7).

A Figura 2-6 ilustra a atracação com contato inicial em uma única defesa.

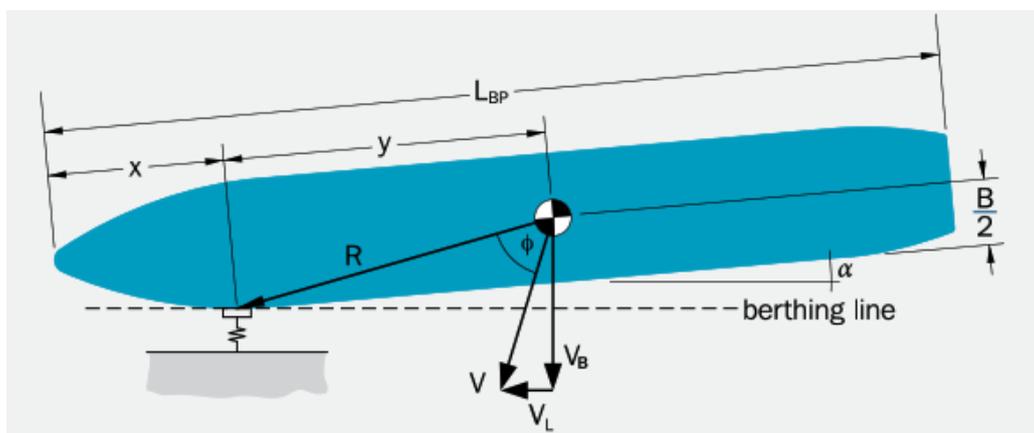


Figura 2-6: Atracação Lateral – Solicitação de 1 defesa.

Fonte: *Fender Systems – Product Brochure* (TRELLEBORG MARINE AND INFRASTRUCTURE, 2020)

Assume-se que o ângulo de tolerância para a aproximação seja $\alpha = 5^\circ$ e a distância entre o ponto de impacto e o centro de gravidade do navio seja aproximada pela formulação abaixo. Esta distância, estimada a partir do Teorema de Pitágoras aplicado à Figura 2-6, pode variar conforme o tipo e o porte do navio.

$$R \cong \sqrt{\left(\frac{L_{BP}}{4}\right)^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2} = 44,3m \quad (2-1)$$

onde:

B boca do navio;

LBP comprimento do navio entre perpendiculares.

Para o segundo cenário de atracação, quando múltiplas defensas são solicitadas simultaneamente, a força de reação de cada defesa é obtida por meio de sua Curva de Performance (Figura 2-8), isto é, o diagrama de interação *Energia × Deformação × Reação*. Neste cenário, a energia total de atracação do navio é absorvida pelas defensas solicitadas em conjunto – a partir da energia absorvida por cada defesa, obtém-se sua deformação e a reação de projeto associada. No Estudo de Caso deste trabalho, assume-se que, na atracação aproximadamente paralela, o navio de projeto definido solicita 7 (sete) defensas simultaneamente.

Assim, para a obtenção das reações do cenário de atracação totalmente paralela, a energia de atracação calculada é dividida por 7. Este valor é utilizado para se determinar o percentual de utilização da capacidade nominal de absorção de energia da defesa (relativo aos valores apresentados na Figura 2-7) – dado de entrada para o diagrama da Figura 2-8, inserido no eixo das ordenadas ao lado direito. Com a curva inferior deste diagrama, obtém-se, então, o percentual de deformação alcançado, no eixo das abscissas. Finalmente, este eixo é utilizado para que se determine o percentual da reação nominal equivalente, a partir da curva superior do gráfico e do eixo das ordenadas ao lado esquerdo. Multiplicando-se este último valor percentual pelo valor da reação nominal (Figura 2-7), obtém-se a força de reação da defesa para este cenário de atracação.

Em cada cenário de atracação de projeto assume-se que os esforços devidos à fricção entre o navio e a defesa sejam de 20% da reação normal de atracação em ambos os cenários de projeto, de acordo com o material do casco e do dispositivo de defesa.

			F 0.9	F 1.0	F 1.1	F 1.2	F 1.3	F 1.4	F 1.5	F 1.6	F 1.7	F 1.8	F 1.9	F 2.0
1050	CV	E	392.0	435.0	446.6	458.2	469.8	481.4	493.0	504.4	515.8	527.2	538.6	550.0
		R	626.0	695.0	713.4	731.8	750.2	768.6	787.0	813.4	839.8	866.2	892.6	919.0
	RPD	E _R	427.3	474.2	486.8	499.4	512.1	524.7	537.4	549.8	562.2	574.6	587.1	599.5
		R _R	682.3	757.6	777.6	797.7	817.7	837.8	857.8	886.6	915.4	944.2	972.9	1001.7
1100	CV	E	450.0	500.0	513.6	527.2	540.8	554.4	568.0	581.4	594.8	608.2	621.6	635.0
		R	685.0	761.0	781.6	802.2	822.8	843.4	864.0	893.4	922.8	952.2	981.6	1011.0
	RPD	E _R	490.5	545.0	559.8	574.6	589.5	604.3	619.1	633.7	648.3	662.9	677.5	692.2
		R _R	746.7	829.5	851.9	874.4	896.9	919.3	941.8	973.8	1005.9	1037.9	1069.9	1102.0
1150	CV	E	514.1	570.3	585.5	600.7	616	631.2	646.4	661.6	676.8	692	707.2	722.4
		R	750	833.2	855.1	877.1	899	921	942.9	974.9	1007	1039	1071	1103
	RPD	E _R	560.3	621.7	638.2	654.8	671.4	688	704.5	721.1	737.7	754.3	770.9	787.4
		R _R	817.5	908.2	932.1	956	979.9	1003.9	1027.8	1062.7	1097.6	1132.5	1167.3	1202.2
1200	CV	E	585.0	650.0	667.6	685.2	702.8	720.4	738.0	755.4	772.8	790.2	807.6	825.0
		R	818.1	909.0	933.4	957.8	982.2	1006.6	1031.0	1066.0	1101.0	1136.0	1171.0	1206.0
	RPD	E _R	637.7	708.5	727.7	746.9	766.1	785.2	804.4	823.4	842.4	861.3	880.3	899.3
		R _R	891.7	990.8	1017.4	1044.0	1070.6	1097.2	1123.8	1161.9	1200.1	1238.2	1276.4	1314.5
1300	CV	E	742.5	825.0	847.0	869.0	891.0	913.0	935.0	957.0	979.0	1001.0	1023.0	1045.0
		R	957.6	1064.0	1092.4	1120.8	1149.2	1177.6	1206.0	1246.6	1287.2	1327.8	1368.4	1409.0
	RPD	E _R	805.6	895.1	919.0	942.9	966.7	990.6	1014.5	1038.3	1062.2	1086.1	1110.0	1133.8
		R _R	1039.0	1154.4	1185.3	1216.1	1246.9	1277.7	1308.5	1352.6	1396.6	1440.7	1484.7	1528.8
1400	CV	E	927.0	1030.0	1057.6	1085.2	1112.8	1140.4	1168.0	1195.4	1222.8	1250.2	1277.6	1305.0
		R	1111.5	1235.0	1268.0	1301.0	1334.0	1367.0	1400.0	1447.2	1494.4	1541.6	1588.8	1636.0
	RPD	E _R	1001.2	1112.4	1142.2	1172.0	1201.8	1231.6	1261.4	1291.0	1320.6	1350.2	1379.8	1409.4
		R _R	1200.4	1333.8	1369.4	1405.1	1440.7	1476.4	1512.0	1563.0	1614.0	1664.9	1715.9	1766.9
1600	CV	E	1381.5	1535.0	1576.6	1618.2	1659.8	1701.4	1743.0	1784.4	1825.8	1867.2	1908.6	1950.0
		R	1447.2	1608.0	1651.6	1695.2	1738.8	1782.4	1826.0	1888.0	1950.0	2012.0	2074.0	2136.0
	RPD	E _R	1478.2	1642.5	1687.0	1731.5	1776.0	1820.5	1865.0	1909.3	1953.6	1997.9	2042.2	2086.5
		R _R	1548.5	1720.6	1767.2	1813.9	1860.5	1907.2	1953.8	2020.2	2086.5	2152.8	2219.2	2285.5

Figura 2-7: Defensas Supercônicas – Reações (kN) e Energias Nominais (kN · m).

Fonte: *Fender Systems – Product Brochure* (TRELLEBORG MARINE AND INFRASTRUCTURE, 2020)

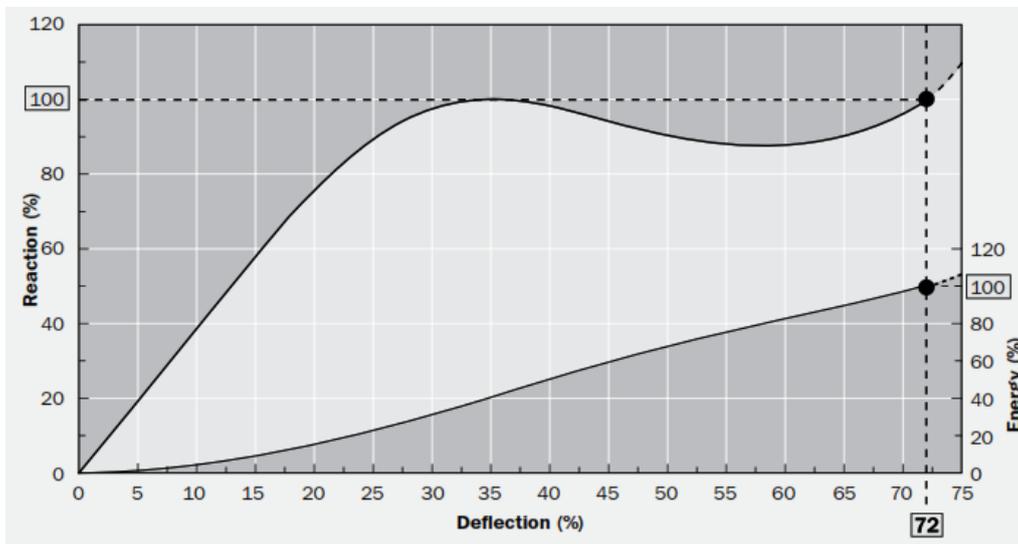


Figura 2-8: Defensas Supercônicas – Curva de performance.

Fonte: *Fender Systems – Product Brochure* (TRELLEBORG MARINE AND INFRASTRUCTURE, 2020)

2.8. Amarração

As reações na estrutura do píer devidas à amarração são geradas pela ação das forças ambientais incidentes no navio, que provocam sua movimentação e, conseqüentemente, deformação elástica nas amarras. As amarras tensionadas, por sua vez, geram uma ação no sentido de arranque nos cabeços de amarração da estrutura, que deve ser dimensionada para reagir a esta força resultante.

Ações ambientais principais incidentes em um navio que tipicamente são consideradas em um estudo de amarração incluem: vento, corrente, ondas e distúrbios hidrodinâmicos devidos à passagem de outros navios nas proximidades. A força resultante devida ao vento incide na área vélica do navio (emersa), enquanto as ações provocadas pelo meio hidrodinâmico incidem na área do casco submersa.

Neste Estudo de Caso, as ações ambientais consideradas para o estudo das forças de amarração serão somente as produzidas pelo vento e pela corrente – definem-se, respectivamente, as velocidades de projeto operacionais como $v_v = 16 \text{ m/s}$ e $v_c = 1,1 \text{ m/s}$. Por se tratar de um terminal em região marítima abrigada sem presença significativa de ondas, esforços devidos a esta ação são desprezados. São desprezadas, também, a ação de navios passantes próximo ao terminal.

As ações atuantes no navio serão calculadas de acordo com as metodologias das normas selecionadas e, posteriormente, aplicadas em um modelo estático simplificado, para obtenção das trações resultantes nas amarras. Desconsidera-se, portanto, a utilização de um modelo dinâmico de amarração no escopo deste trabalho.

Neste estudo, são desprezados ângulos verticais das amarras, bem como a excentricidade da carga devida à altura do cabeço, isto é, assume-se que as forças de amarração atuam no plano horizontal do centroide da laje da estrutura. A consideração destes efeitos na amarração originaria reações na direção vertical e momentos fletores nas direções horizontais nos pontos de amarração, que poderiam provocar localmente distribuição de cargas distintas entre as estacas da estrutura. Para o propósito deste trabalho – a avaliação global do projeto de uma estrutura portuária – a simplificação proposta é adequada.

A Figura 2-9 ilustra o arranjo de amarração definido para o navio de projeto do Estudo de Caso deste trabalho, onde têm-se 12 (doze) cabos de amarração representados

aos pares, por seu traçado médio. Assim, cada cabeço de amarração é do tipo duplo e, quando solicitado, recebe 2 (duas) amarras – os pontos de amarração são dimensionados para sua reação total referente ao par de cabos que recebe.

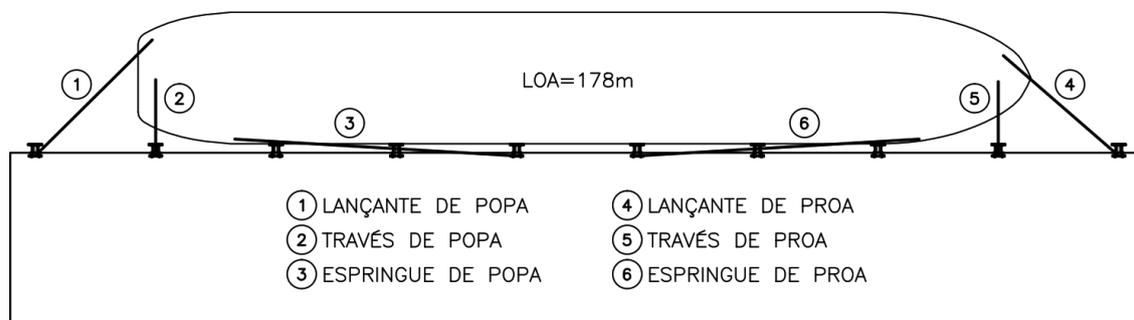


Figura 2-9: Arranjo de Amarração para o Navio de Projeto.

O layout de amarração proposto foi definido com base em uma amarração ideal para navios atracados em berços contínuos, como propõe a BS 6349-4 (2014), entre outras normas da indústria portuária.

Tipicamente, de acordo com as condições de operação a que serão destinados em sua vida útil, os navios de carga possuem seus próprios cabos de amarração de projeto e, portanto, sua carga de ruptura de projeto associada (MBL, *maximum breaking load*). Esta definição é realizada com base em um cálculo de amarração destinado ao dimensionamento dos aparelhos de amarração do próprio navio, como descreve a OCIMF MEG 4: *Mooring Equipment Guidelines* (OIL COMPANIES INTERNATIONAL MARINE FORUM, 2018). Na prática, o estudo de amarração realizado para o projeto de um terminal deve, então, considerar como critério de projeto a carga de ruptura da amarra provável esperada para a classe do navio de projeto definido. Estuda-se, então, o arranjo de amarração mais eficiente dentro dos limites operacionais definidos.

Neste trabalho, contudo, com o objetivo de se comparar de maneira integral os diferentes resultados de um projeto realizado com base em cada norma selecionada para os Conjuntos de Normas e Recomendações (Tabela 1-6), assume-se que os cálculos de amarração são utilizados para a seleção de uma amarra de projeto para o navio, com um MBL associado. Com esta amarra, define-se o cabeço de amarração e, então, os carregamentos para o projeto estrutural.

Como ilustra a Figura 2-10, a filosofia recomendada para o projeto de uma estrutura portuária é que esta possua capacidade de carga superior à do cabeço de amarração, que por sua vez possui maior capacidade de carga que as amarras que recebem.

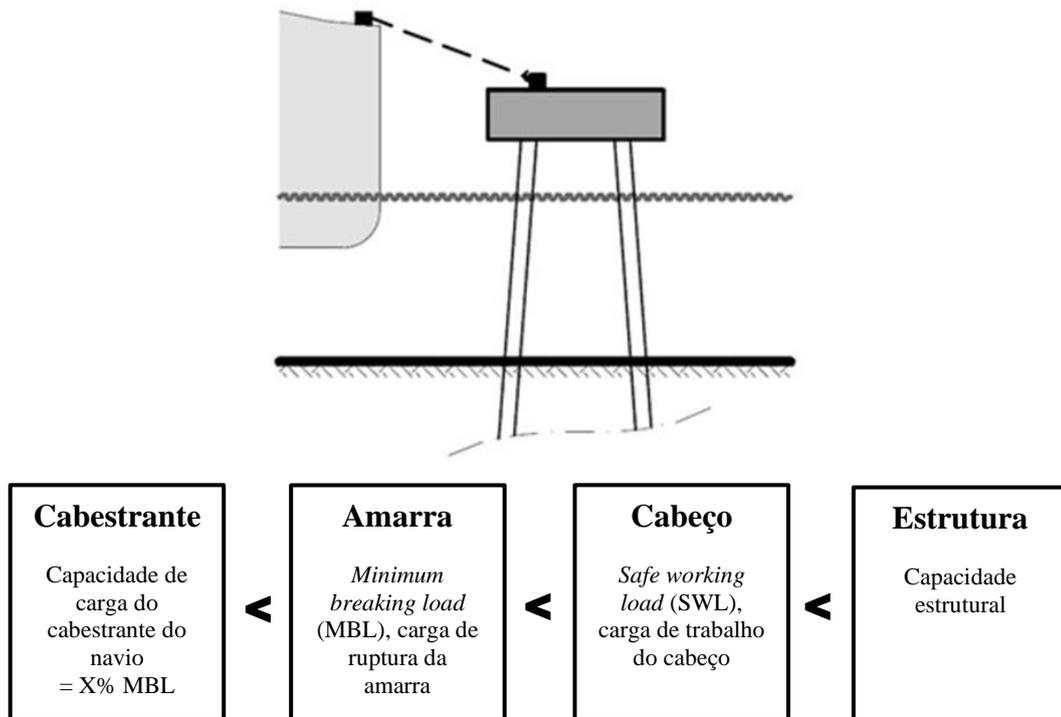


Figura 2-10: Filosofia de projeto de uma estrutura portuária.

Fonte: PIANC WG 153 (2016) – Figura 7.6 (adaptado)

Consideram-se, neste trabalho, disponíveis linhas sintéticas com diâmetro $60\text{mm} \leq \phi \leq 70\text{mm}$ e carga de ruptura $350\text{ kN} \leq MBL \leq 650\text{kN}$.

Como recomenda a PIANC WG 153 (2016), boas práticas de projeto de estruturas portuárias indicam que a carga de ruptura mínima de cabos de material sintético seja igual ao dobro da carga de operação, ou seja, $SWL = 50\% MBL$. Este critério é utilizado para o Estudo de Caso deste trabalho, isto é, são selecionados cabos com carga de ruptura igual ou superior ao dobro das trações obtidas para cada amarra dos pontos de amarração.

Para a determinação das trações resultantes em cada ponto de amarração, utiliza-se um modelo estrutural simplificado desenvolvido no software SAP2000, ilustrado na Figura 2-11.

Neste modelo, as amarras são representadas como elementos do tipo *tendon* (tirantes) e se estendem desde o ponto de amarração na estrutura (o cabelo) até o *fairlead*

do navio (dispositivo através do qual o cabo passa e é guiado para ser amarrado na embarcação), as forças resultantes devidas às ações ambientais no navio são aplicadas em seu centroide. Este ponto é conectado aos pontos que representam os *fairleads* por um *constraint* do tipo *body*, formando um corpo rígido com liberdade de movimento. Desta forma, a atuação de uma força no centro de gravidade do navio o movimentam e deforma as amarras, que são tensionadas e geram uma reação de apoio nos pontos que representam os cabeços.

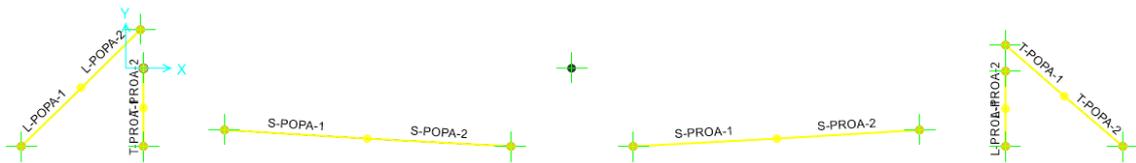


Figura 2-11: Modelo Auxiliar para Obtenção dos Esforços de Amarração – SAP2000.

Neste Estudo de Caso, são analisadas direções de vento predominantemente na direção terra-mar que, portanto, provocam a tendência do afastamento da embarcação em relação à estrutura. De forma conservadora, assume-se que toda a força de ação no barco atracado deverá ser resistida pelas amarras, isto é, despreza-se a solicitação das defensas, que quando comprimidas também podem contribuir ao equilíbrio da embarcação.

Obtendo-se as reações totais nos pontos de amarração, estes valores são divididos por 2 para se determinar a solicitação máxima em uma única amarra. Sabendo-se que esta deverá ser solicitada em no máximo 50% de sua carga MBL, define-se a capacidade de carga necessária da amarra. Então, à carga total obtida no ponto de amarração (a soma da carga MBL do número de amarras que este recebe), aplica-se o fator de segurança $FS = 2$ para se definir a carga nominal do cabeço selecionado.

Para o Estudo de Caso deste projeto, se utiliza como referência o modelo de cabeços *double-bitt* do catálogo *Bollards – Product Brochure* (TRELLEBORG MARINE SYSTEMS, 2018), ilustrado na Figura 2-12 e na Figura 2-13. A capacidade necessária do cabeço será definida de acordo com os esforços solicitantes obtidos pelos cálculos realizados conforme cada norma de estudo selecionada.

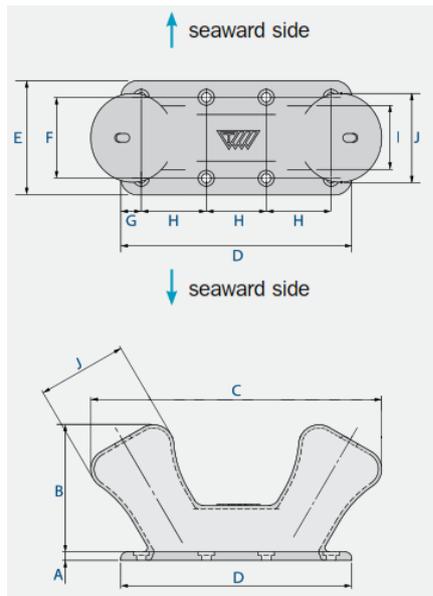


Figura 2-12: Cabeço de Amarração do Tipo *Double-Bitt*.

Fonte: *Bollards – Product Brochure* (TRELLEBORG MARINE SYSTEMS, 2018)

DIMENSION	BOLLARD CAPACITY (tons)							
	20	30	50	75	100	125	150	200
A	20	20	25	40	50	60	60	60
B	300	350	420	510	600	700	750	840
C	680	780	950	1140	1330	1535	1670	1860
D	540	610	720	870	1020	1170	1270	1430
E	280	310	360	440	520	590	640	720
F	190	220	270	330	390	440	490	530
G	45	45	45	55	65	75	75	95
H	150	180	210	190	222.5	255	280	310
I	150	180	210	250	300	340	370	410
J	210	240	310	350	410	470	510	570
Bolt	M20	M22	M30	M36	M42	M42	M48	M56
Bolt Length	300	300	450	500	600	750	850	1070
P	35	35	40	55	65	75	75	75
Quantity	8	8	8	10	10	10	10	10

P = bollard base recess mounting depth including grout [units: mm]

Figura 2-13 Dimensões e Cargas Nominais do Cabeço de Amarração *Double-Bitt*.

Fonte: *Bollards – Product Brochure* (TRELLEBORG MARINE SYSTEMS, 2018)

2.9. Modelo Estrutural do Píer

Para a análise estrutural do píer descrito, utiliza-se o modelo 3D desenvolvido no software SAP2000 apresentado na Figura 2-14 à Figura 2-17, cujos eixos globais X, Y e Z são ilustrados. Os perfis de estacas, vigas e nervuras de lajes são modelados por elementos do tipo *frame* (barra) e a laje por uma malha de elementos finitos, do tipo *shell* (placa). Todos os elementos são modelados com comportamento linear-elástico.

A restrição de apoio das estacas é do tipo engaste, aplicado de acordo com o comprimento de engastamento definido em 2.5.

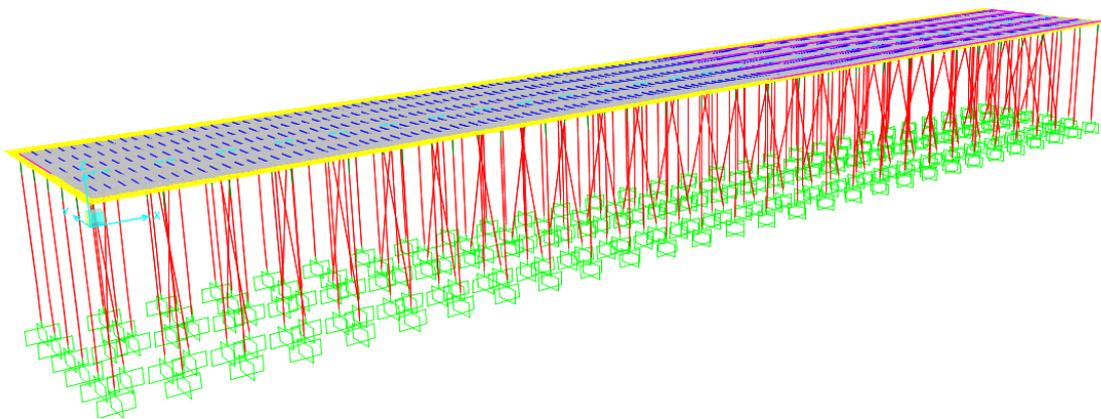


Figura 2-14: Modelo Estrutural do Píer em Vista 3D – SAP2000.

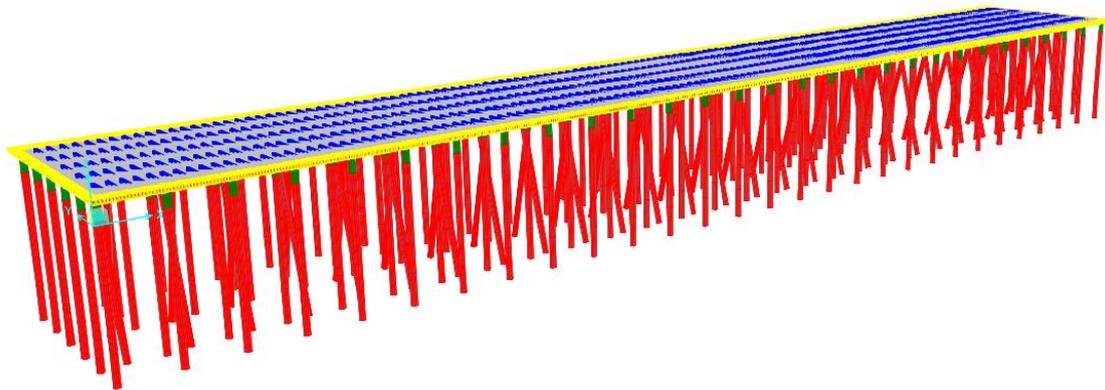


Figura 2-15: Modelo Estrutural do Píer Extrudado em Vista 3D – SAP2000.

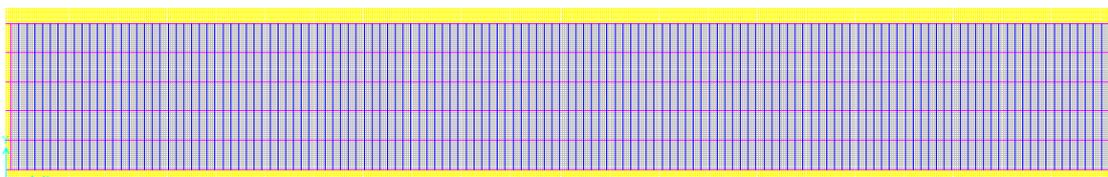


Figura 2-16: Modelo Estrutural do Píer em Planta – SAP2000.

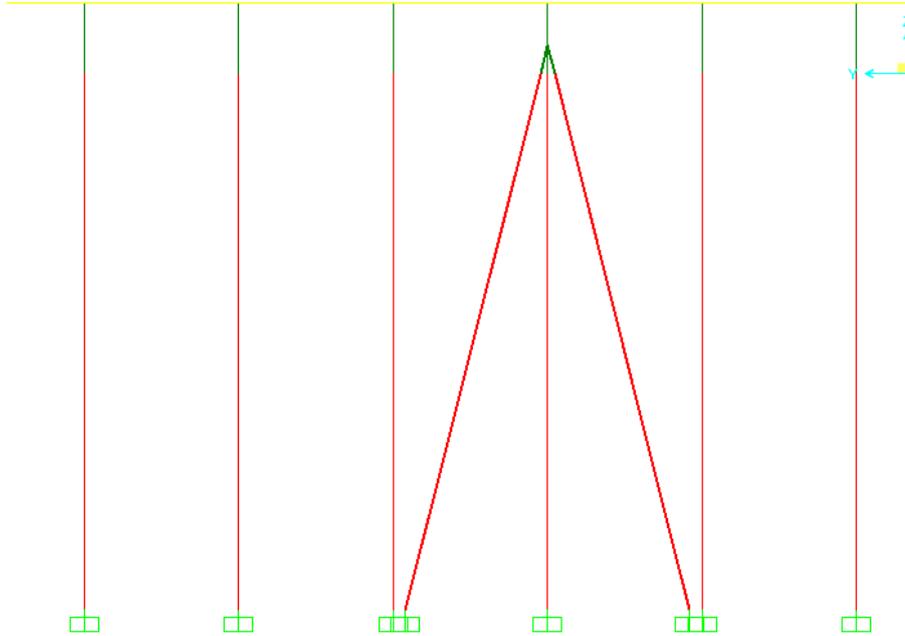


Figura 2-17: Modelo Estrutural do Píer em Seção Transversal – SAP2000.

2.9.1. Elementos de Barra

Os perfis dos elementos utilizados para modelar as estacas, vigas e nervuras de lajes, são apresentados na Figura 2-18 à Figura 2-22.

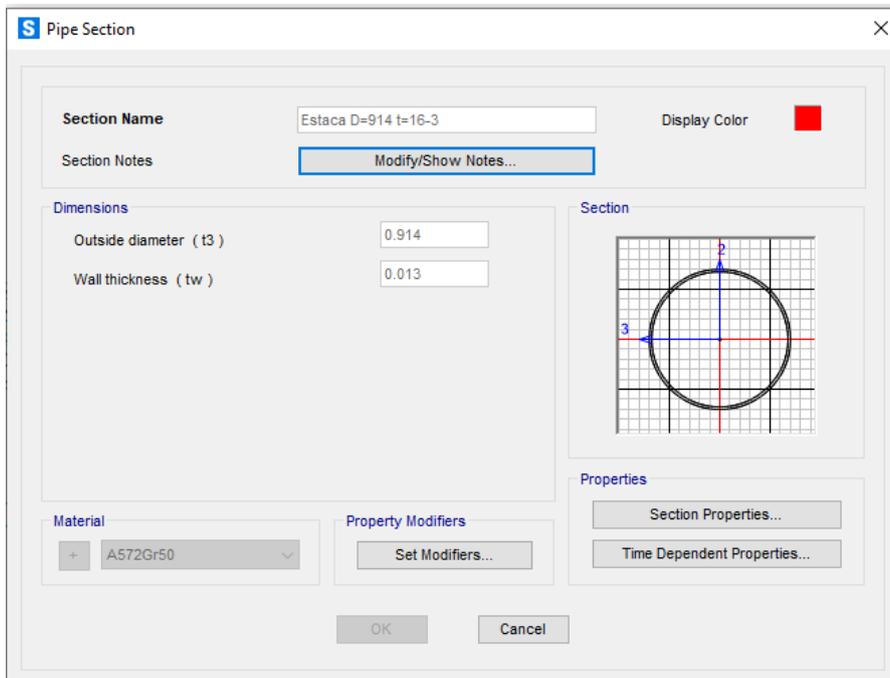


Figura 2-18: Propriedades: Elemento do Tipo Barra – Estacas Tubulares Metálicas.

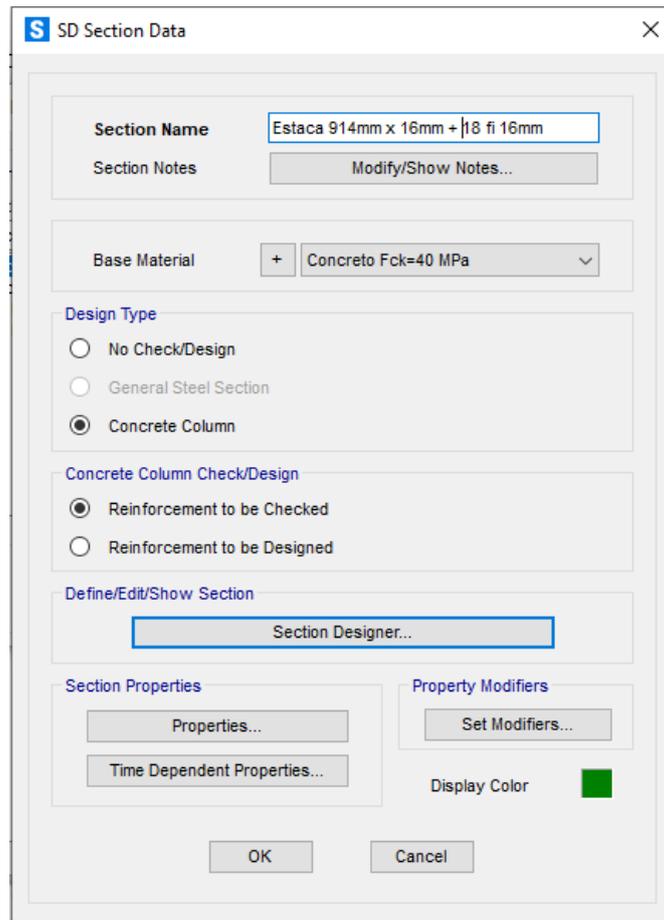


Figura 2-19: Propriedades: Elemento do Tipo Barra – *Plug* de Concreto Armado.

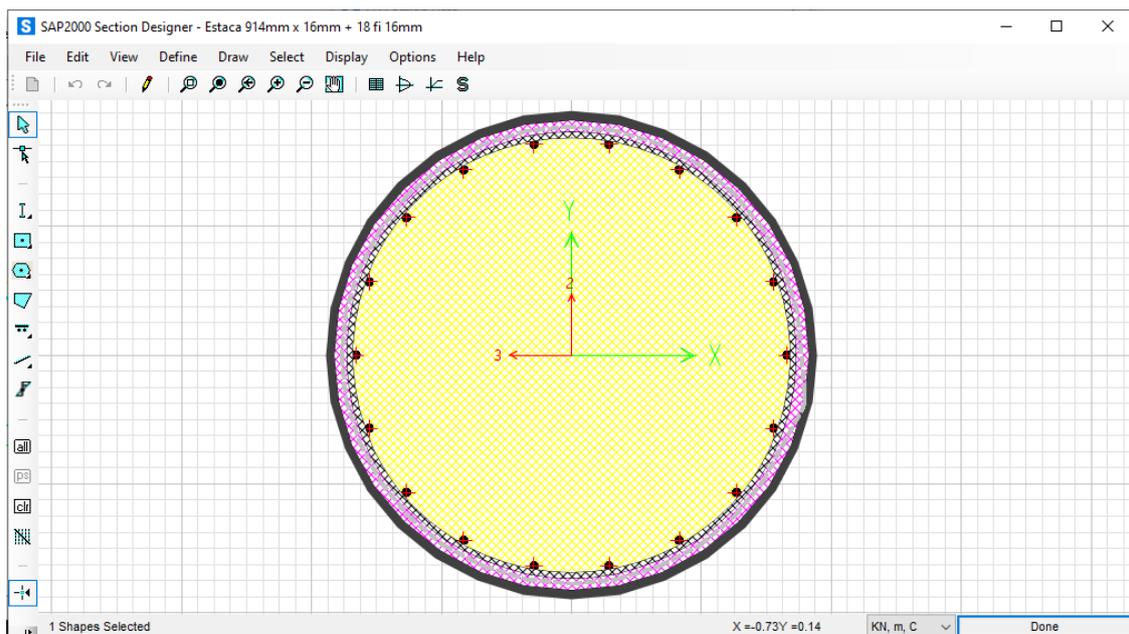


Figura 2-20: Propriedades: Elemento do Tipo Barra – *Plug* de Concreto Armado.

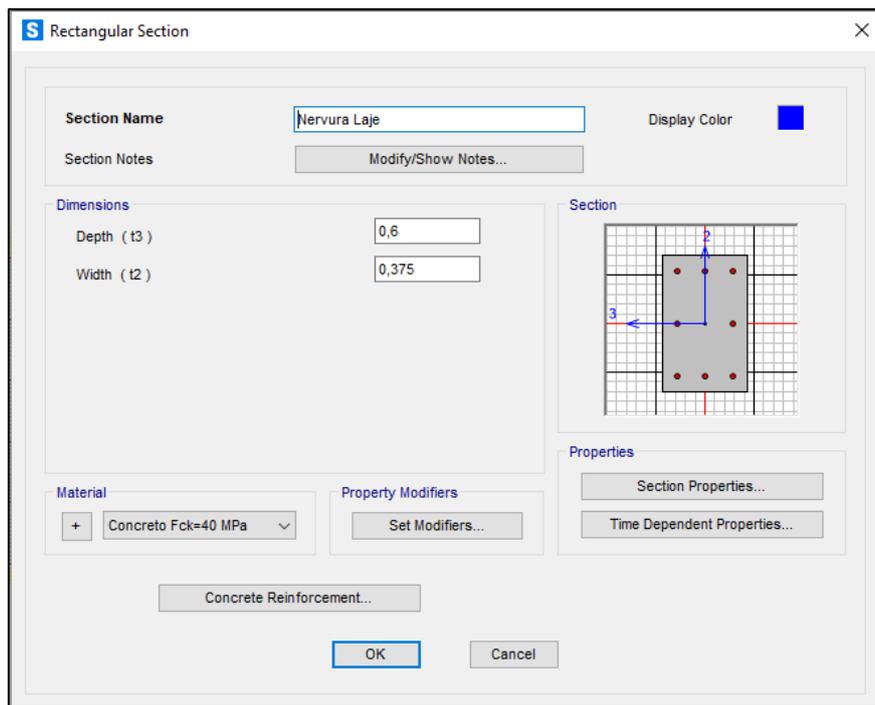


Figura 2-21: Propriedades: Elemento do Tipo Barra – Nervuras da Laje.

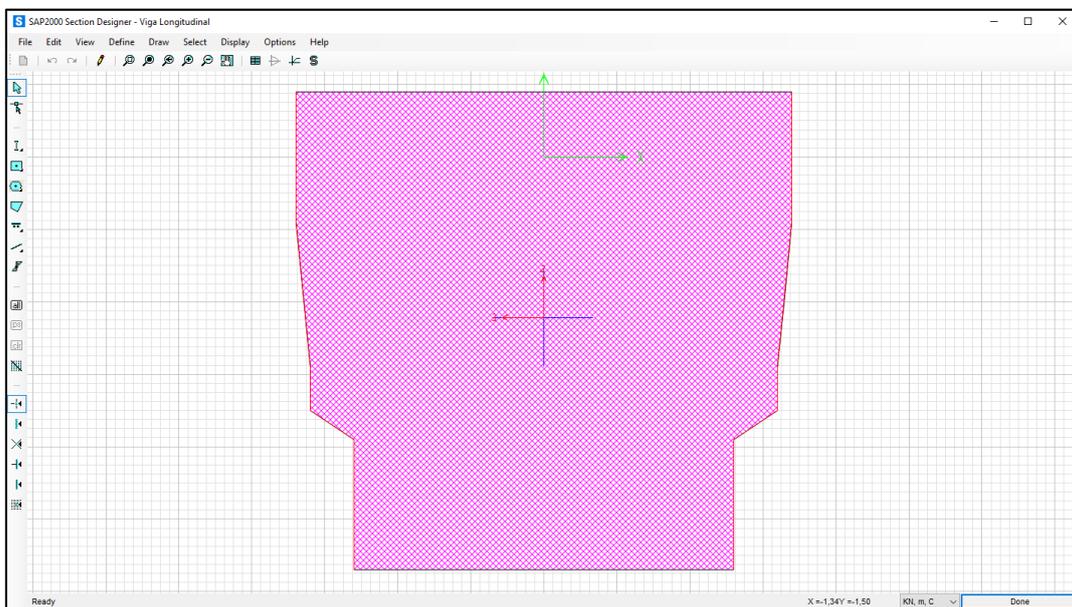


Figura 2-22: Propriedades: Elemento do Tipo Barra – Vigas Longitudinais.

2.9.2. Elementos de Placa

Desenvolveu-se uma malha de elementos finitos do tipo *shell* (placa) para a modelagem da laje da estrutura, cujas seções se apresentam na Figura 2-23 e Figura 2-24.

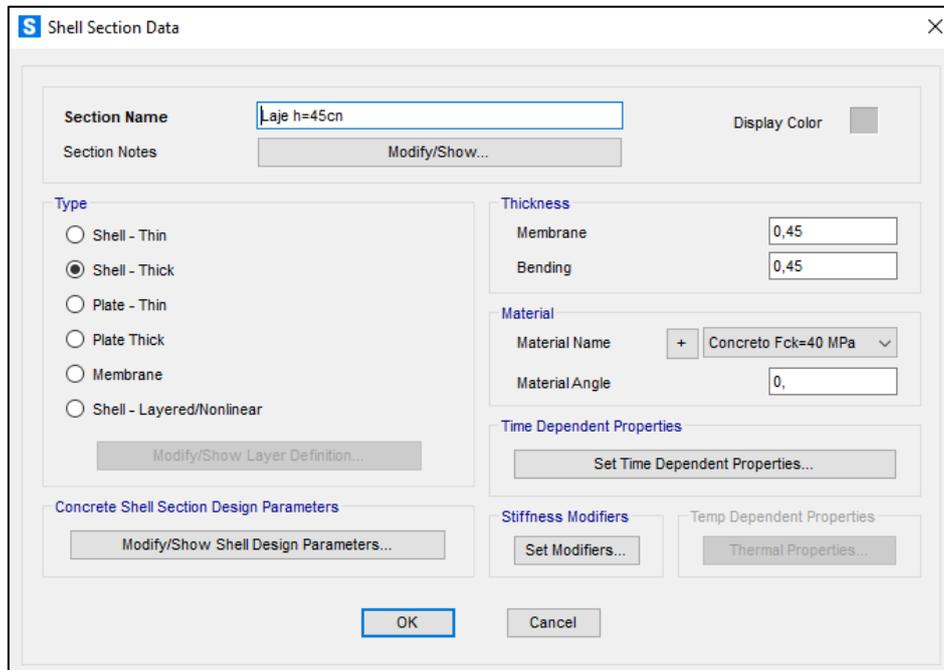


Figura 2-23: Propriedades: Elemento do Tipo Placa – Laje.

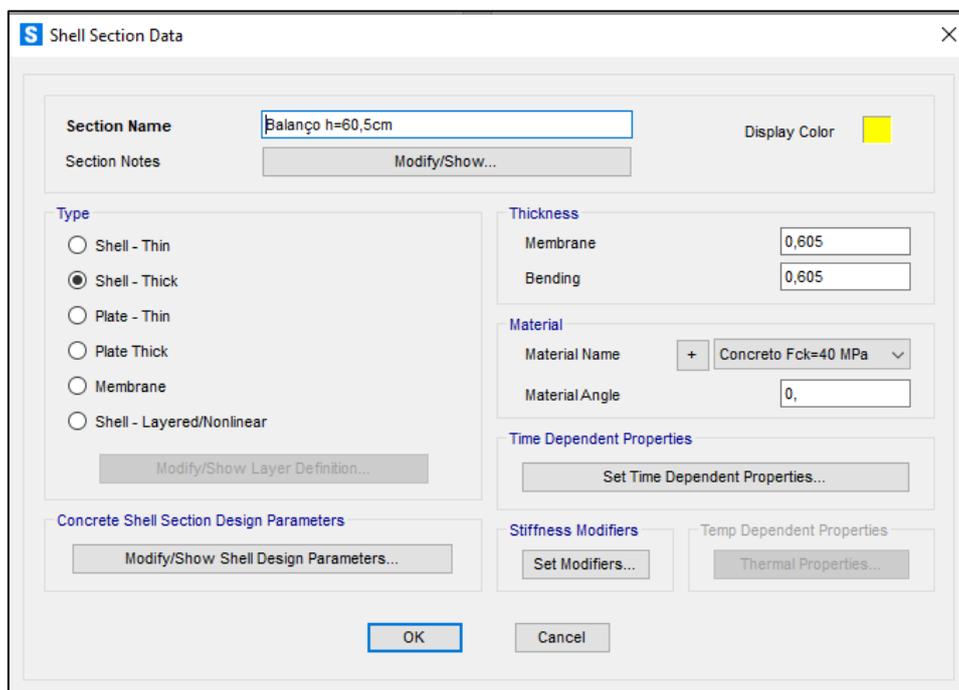


Figura 2-24: Propriedades: Elemento do Tipo Placa – Laje em Balanço.

2.10. Carregamentos Comuns a Todas as Análises

Este item apresenta os carregamentos que se consideram comuns a todas as análises dos Conjuntos de Normas estabelecidos na Tabela 1-6.

Desconsidera-se a aplicação de carregamentos de projeto devidos à utilização de equipamentos especiais no píer, assumindo-se que a sobrecarga de utilização definida por normas atenda aos requisitos operacionais do terminal.

2.10.1. Peso Próprio (PP)

O carregamento devido ao peso próprio da estrutura é calculado automaticamente pelo software SAP2000, considerando-se as propriedades geométricas dos elementos estruturais e o peso específico de seus materiais, definido em item 2.4.2.

2.10.2. Forças Devidas à Temperatura e à Retração do Concreto (T)

Aplicou-se à estrutura a variação de temperatura de $-25/+15^{\circ}\text{C}$, devida ao somatório do efeito das condições térmicas de temperatura e do efeito da retração do concreto (conforme 2.6). Estas variações de temperatura foram aplicadas no modelo estrutural à laje e às vigas da estrutura (Figura A. 1 à Figura A. 4).

3. AÇÕES DE PROJETO DEFINIDAS POR NORMA

Este Capítulo apresenta os carregamentos de projeto do Estudo de Caso que serão definidos conforme normas, de acordo com referência normativa indicada nos Conjuntos de Normas e Recomendações estabelecidos na Tabela 1-6. Incluem-se: forças devidas às ações de vento e de corrente, sobrecargas de utilização, forças de atracação e forças de amarração.

3.1. Forças Devidas à Ação do Vento (V)

Este capítulo apresenta diferentes metodologias para o cálculo das forças devidas à ação do vento na superestrutura e nas estacas do píer. De acordo com as formulações estudadas, a força de arrasto sobre um elemento estrutural prismático sujeito a um fluxo de vento uniforme pode ser sintetizada como:

$$F = p \cdot A = K \cdot C \cdot v^2 \cdot A \quad (3-1)$$

onde:

- p pressão devida ao vento;
- K fator numérico global, que inclui correções de unidades;
- C coeficiente global de força;
- v velocidade do vento;
- A área do elemento em que incide o fluxo de vento.

3.1.1. Conforme o Eurocode – A1

Para o cálculo das forças devidas à ação do vento em estruturas, utiliza-se neste item o Capítulo 4 do EN 1991-1-4: Eurocode 1: *Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions* (EUROPEAN COMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005). Aplicam-se as recomendações para terrenos de Categoria 0 – Áreas marítimas e costeiras expostas ao mar aberto.

3.1.1.1. Cálculo da Pressão de Vento

Segundo o EN 1991-1-4 (2005), a pressão básica do vento é determinada por:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \cdot 10^{-3} \quad (3-2)$$

onde:

ρ densidade do ar (igual a $1,25 \text{ kg/m}^3$);

v_b velocidade básica do vento média em 10 min (em m/s).

A pressão de velocidade de rajada do vento é obtida por:

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b \quad (3-3)$$

onde:

$c_e(z)$ fator de exposição (para terrenos planos, cujo fator orográfico $c_0 = 1$, dado pela Figura 3-1);

z altura de cálculo da ação do vento (em m);

q_b pressão de vento básica (Equação (3-2)).

O fator de exposição $c_e(z)$ é obtido a partir do ábaco da Figura 3-1, de acordo com a categoria do terreno.

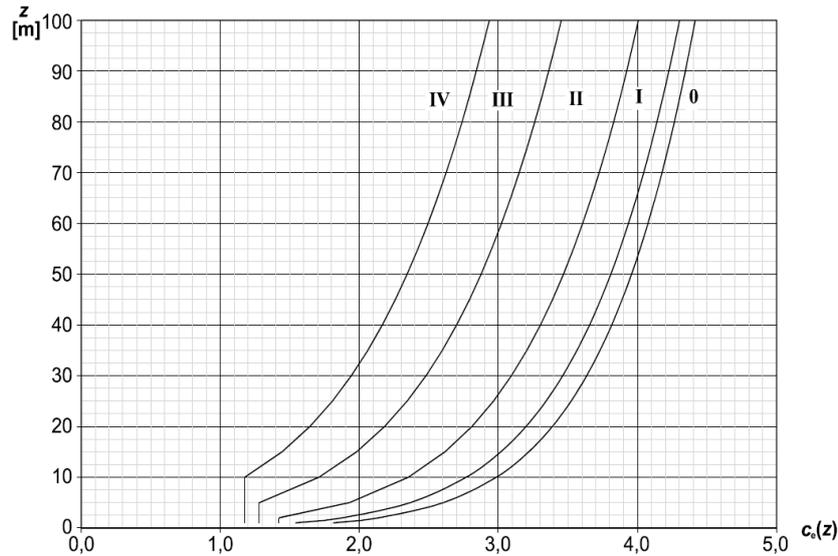


Figura 3-1: Fator de exposição do vento c_e , para $k_t = 1$ (fator de turbulência) e $c_0 = 1$.
 Fonte: EN 1991-1-4: Eurocode 1: *Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions* (2005) – Figura 4.2.

A seguir, a Tabela 3-1 apresenta os coeficientes e valores parciais de cálculo obtidos a partir das Equação (3-2) e da Figura 3-1, bem como o valor final da pressão de vento de rajada, obtida a partir da Equação (3-3), de acordo com os critérios de projeto descritos no item 2.6.

Tabela 3-1: Cálculo da pressão devida à ação do vento – Eurocode.

q_b (kN/m^2)	0,27
c_e	2,5
q_p (kN/m^2)	0,67

A partir da pressão de vento de rajada, calcula-se a força devida à ação do vento na estrutura a partir de

$$F_w = c_s c_d \cdot c_f \cdot q_p(z) \cdot A_{ref} \quad (3-4)$$

onde:

$c_s c_d$ fator estrutural (igual a 1,0 para estruturas de altura inferior a 15 m);

c_f coeficiente de força (itens 3.1.1.2 e 3.1.1.3);

A_{ref} área de referência da superfície de incidência do vento (em m^2).

3.1.1.2. Força de Vento nas Faces Laterais da Superestrutura

Segundo o EN 1991-1-4 (2005), o coeficiente de força para elementos estruturais de seção retangular é definido por:

$$C_f = C_{f,0} \cdot \psi_r \cdot \psi_\lambda \quad (3-5)$$

onde:

$C_{f,0}$ coeficiente de força para elementos de seções retangulares com bordas anguladas, sem efeito de fluxo livre nas extremidades (Figura 3-2);

ψ_r fator de redução para seções retangulares com bordas arredondadas (igual a 1,0 para estruturas que não possuem bordas arredondadas);

ψ_λ fator de extremidade, que representa a redução de resistência do elemento estrutural devido ao efeito de fluxo livre de vento em sua extremidade. Desprezível para elementos sólidos e com pouca esbeltez.

O coeficiente de força $C_{f,0}$ é obtido a partir da Figura 3-2, onde d/b é a razão entre as dimensões da laje do píer nas direções X e Y.

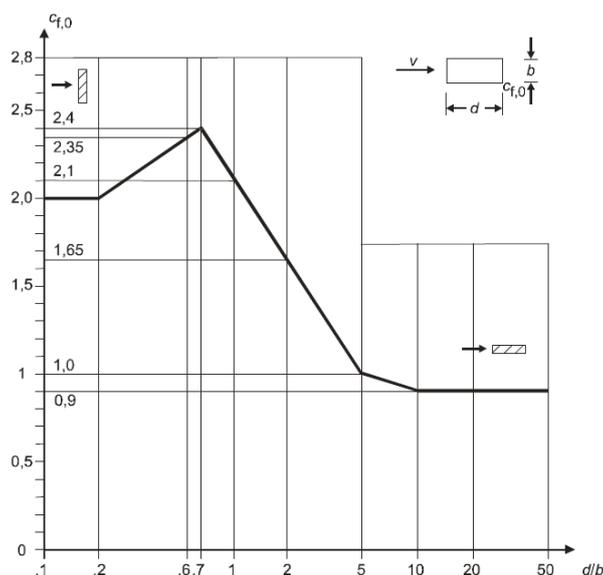


Figura 3-2: Coeficientes de força para seções retangulares com bordas anguladas e sem efeito de fluxo livre na extremidade.

Fonte: EN 1991-1-4: Eurocode 1: *Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions* (2005) – Figura 7.23.

A seguir, a Tabela 3-2 apresenta os coeficientes de cálculo obtidos a partir da Equação (3-5) da Figura 3-2, bem como os valores finais da força devida à ação do vento na superestrutura, obtida a partir da Equação (3-4), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.4 e 2.6.

Tabela 3-2: Cálculo da força devida ao vento na superestrutura – Eurocode.

q_p (kN/m ²)	0,67
$cscd$	1,0
d_x/b_y	127
d_y/b_x	21
$c_{f0,x}$	0,9
$c_{f0,y}$	0,9
ψ_r	1,0
ψ_λ	1,0
$c_{f,x}$	0,9
$c_{f,y}$	0,9
$F_{w,x}/m$ (kN/m)	0,99
$F_{w,y}/m$ (kN/m)	0,99

3.1.1.3. Forças de Vento nas Estacas

Segundo o EN 1991-1-4 (2005), o coeficiente de força para elementos cilíndricos verticais de seção circular enfileirados é definido pela expressão

$$C_f = C_{f,0} \cdot \psi_\lambda \cdot \kappa \quad (3-6)$$

onde:

$C_{f,0}$ coeficiente de força para elementos cilíndricos sem efeito de fluxo livre nas extremidades (Figura 3-3);

ψ_λ fator de extremidade, que representa o efeito de fluxo livre de vento na extremidade do elemento;

κ fator de agrupamento para a direção mais desfavorável (Figura 3-4).

O coeficiente de força para elementos cilíndricos sem efeito de fluxo livre nas extremidades é obtido pelo ábaco da Figura 3-3, cujos dados de entrada são:

k rugosidade equivalente da superfície (em mm , igual para concreto rugoso, 0,2 para concreto suave, 1,0 e 0,02 para superfícies pintadas);

b diâmetro da estaca (em mm);

Re número de Reynolds (Equação (3-7)).

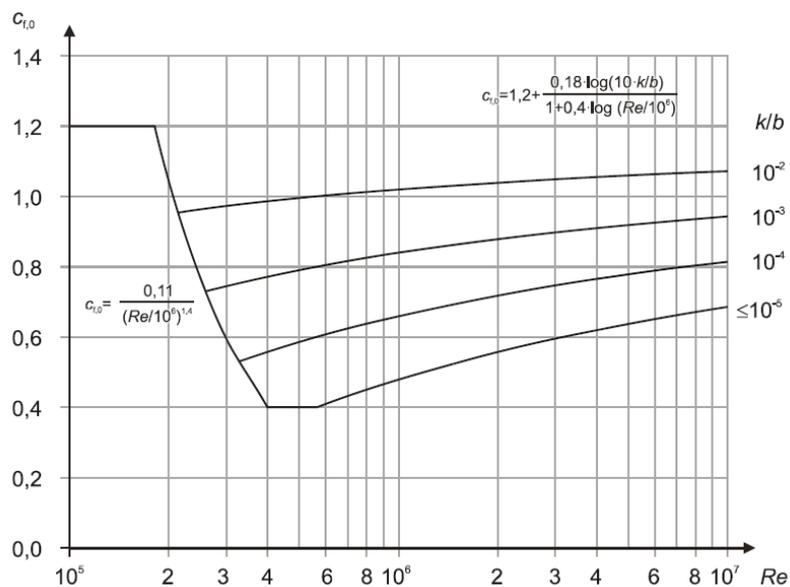


Figura 3-3: Coeficientes de força $C_{f,0}$ para seções cilíndricas circulares sem efeito de fluxo livre na extremidade para diferentes rugosidades equivalentes k/b .

Fonte: EN 1991-1-4: Eurocode 1: *Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions* (2005) – Figura 7.28.

O número de Reynolds é dado por:

$$Re = \frac{b \cdot v_p}{\nu} \quad (3-7)$$

onde:

b diâmetro da estaca (em m);

ν viscosidade cinemática do vento (igual a $15 \cdot 10^{-6} m^2/s$);

$v_p(z)$ velocidade de rajada do vento (em m/s , igual a $\sqrt{2 \cdot q_p/\rho}$);

q_p pressão de velocidade de rajada do vento (em N/m^2);

ρ densidade do ar (igual a $1,25 \text{ kg}/m^3$).

O fator de agrupamento é obtido a partir da Figura 3-4, onde a é a distância entre estacas nas direções x e y e b é seu diâmetro.

a/b	κ	
$2,5 < a/b < 3,5$	1,15	
$3,5 < a/b < 30$	$\kappa = \frac{210 - \frac{a}{b}}{180}$	
$a/b > 30$	1,00	

Figura 3-4: Fator de agrupamento para elementos cilíndricos verticais enfileirados.

Fonte: EN 1991-1-4: Eurocode 1: *Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions* (2005) – Tabela 7.14.

A seguir, a Tabela 3-3 apresenta os coeficientes de cálculo obtidos a partir da Equação (3-6), da Figura 3-3 e da Figura 3-4, bem como os valores finais da força devida à ação do vento na superestrutura, obtida a partir da Equação (3-4), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.4 e 2.6.

Tabela 3-3: Cálculo da força devida ao vento nas estacas – Eurocode.

q_p (kN/m ²)	0,67
c_{scd}	1,0
v_p (m/s)	32,73
v (m/s ²)	1,50E-05
R_e	1,99E+06
k (mm)	0,02
k/b	2,19E-05
c_{f0}	0,63
ψ_λ	1,0
a_x/b	4,4
a_y/b	6,6
κ	1,14
c_f	0,72
F_w/m (kN/m)	0,44

3.1.1.4. Carregamentos Devidos à Ação do Vento na Estrutura

As forças de ação do vento da Tabela 3-2 e Tabela 3-3 foram aplicadas ao modelo conforme os carregamentos de projeto V_x e V_y da Tabela 3-4 (Figura A. 5 à Figura A. 8).

Tabela 3-4: Forças devidas à ação do vento aplicadas à estrutura – Eurocode.

Carregamento	F_y/m (kN/m)	F_x/m (kN/m)	Elemento
+V _x	0,00	0,99	Laje (lateral)
+V _x	0,00	0,44	Estacas
-V _x	0,00	-0,99	Laje (lateral)
-V _x	0,00	-0,44	Estacas
+V _y	0,99	0,00	Laje (lateral)
+V _y	0,44	0,00	Estacas
-V _y	-0,99	0,00	Laje (lateral)
-V _y	-0,44	0,00	Estacas

3.1.2. Conforme a AASHTO e ASCE/SEI 7-10 – B1 e B2

Para o cálculo das forças devidas à ação do vento em estruturas, a norma AASTHO: *LRFD Bridge Design Specifications 9th Ed.* (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 2020) implementa a aplicação da ASCE/ SEI 7-10: *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* (AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, 2010) para estruturas marítimas – em especial, para projetos de pontes. A seguir, apresenta-se a metodologia de cálculo segundo o Capítulo 3.8.1 da AASTHO (2020), para terrenos de Rugosidade de Superfície de Categoria D – terrenos planos, não obstruídos e superfícies de águas.

3.1.2.1. Cálculo da Pressão de Vento

Segundo a AASTHO (2020), a pressão devida à ação do vento é dada por:

$$P_z = 2,56 \cdot 10^{-6} v^2 K_z G C_D \quad (3-8)$$

onde:

P_z pressão de vento de projeto (em *ksf*);

v velocidade de projeto de uma rajada de vento de 3s (em *mph*);

K_z coeficiente de pressão de exposição e de elevação (Equação (3-9));

G fator de efeito de rajada (igual a 0,85 para barreiras sonoras, ou 1,0 para outras estruturas);

C_D coeficiente de arrasto (descrito nos itens 3.1.2.2 e 3.1.2.3).

O coeficiente de pressão de exposição e de elevação, para estruturas de Categoria D de Exposição ao Vento, é determinado por:

$$K_z(D) = \frac{\left[2,5 \ln\left(\frac{Z}{0,0164}\right) + 7,65\right]^2}{616.1} \quad (3-9)$$

Onde:

z altura da estrutura (em *m*).

Segundo a AASTHO (2020), a força devida à ação do vento deve ser calculada por:

$$F_w = P_z \cdot A_{ref} \quad (3-10)$$

onde:

A_{ref} área de referência da superfície de incidência do vento (em ft^2).

A seguir, a Tabela 3-5 apresenta os coeficientes, valores parciais de cálculo e a pressão de vento sem aplicação do coeficiente de arrasto, obtidos a partir das Equações (3-8) e (3-9), de acordo com os critérios de projeto descritos no item 2.6.

Tabela 3-5: Coeficientes e pressão devida à ação do vento – AASHTO.

K_z	0,91
G	1,0
P_z (ksf)	0,01 C_d
P_z (kN/m²)	0,50 C_d

3.1.2.2. Força de Vento nas Faces Laterais da Superestrutura

Segundo a AASTHO (2020), o coeficiente de arrasto para superestruturas vale:

$$C_d = 1,3 \quad (3-11)$$

A seguir, a Tabela 3-6 apresenta o coeficiente de arrasto, bem como o valor final da força devida à ação do vento na superestrutura, obtido a partir da Equação (3-10), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.4 e 2.6.

Tabela 3-6: Coeficientes e forças devidos ao vento na superestrutura – AASHTO.

P_z (ksf)	0,01 C_d
P_z (kN/m²)	0,50 C_d
C_d	1,3
F_w/ft (kips/ft)	0,07
F_w/m (kN/m)	1,08

3.1.2.3. Forças de Vento nas Estacas

Segundo a AASTHO (2020), o coeficiente de arrasto para estacas circulares vale:

$$C_D = 1 \quad (3-12)$$

A seguir, a Tabela 3-7 apresenta o coeficiente de arrasto, bem como os valor final da força devida à ação do vento nas estacas, obtido a partir da Equação (3-10), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.4 e 2.6.

Tabela 3-7: Coeficientes e forças devidos ao vento nas estacas – AASHTO.

P_z (ksf)	0,01 C_d
P_z (kN/m ²)	0,50 C_d
C_d	1,0
F_w/ft (kips/ft)	0,03
F_w/m (kN/m)	0,46

3.1.2.1. Carregamentos Devidos à Ação do Vento na Estrutura

As forças de ação do vento da Tabela 3-6 e Tabela 3-7 foram aplicadas ao modelo conforme os carregamentos de projeto V_x e V_y da Tabela 3-8 (Figura A. 9 à Figura A. 12).

Tabela 3-8: Forças devidas à ação da corrente aplicadas à estrutura – AASHTO.

Carregamento	F_y/m (kN/m)	F_x/m (kN/m)	Elemento
+V _x	0,00	1,08	Laje (lateral)
+V _x	0,00	0,46	Estacas
-V _x	0,00	-1,08	Laje (lateral)
-V _x	0,00	-0,46	Estacas
+V _y	1,08	0,00	Laje (lateral)
+V _y	0,46	0,00	Estacas
-V _y	-1,08	0,00	Laje (lateral)
-V _y	-0,46	0,00	Estacas

3.2. Forças Devidas à Ação da Corrente (C)

Este capítulo apresenta diferentes metodologias para cálculo das forças devidas à ação da corrente nas estacas da estrutura. A força de arrasto sobre um elemento estrutural prismático imerso em um fluido submetido a uma corrente uniforme é dada pela formulação geral derivada da Equação de Morison;

$$F = p \cdot A = K \cdot C \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \quad (3-13)$$

onde:

- p é a pressão devida ao fluxo de água;
- K fator numérico global, que inclui correções de unidades;
- C é o coeficiente global de arrasto;
- ρ é a densidade da água;
- v velocidade da corrente;
- A é a área do elemento em que incide o fluxo de água.

3.2.1. Conforme o BSI – A1

Para o cálculo da força devida à ação da corrente marítima incidente sobre as estacas da estrutura, utiliza-se neste item o Anexo E da norma BS 6349-1-2 – *Maritime Works – Part 1-2: General – Code of practice for assessment of actions* (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2016).

De acordo com a BS 6349-1-2 (2016), tem-se:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho v_c^2 A \cdot 10^{-3} \quad (3-14)$$

onde:

F_D força de arrasto devida à corrente (em kN);

C_D coeficiente médio de arrasto para corrente estacionária (Figura 3-5);

ρ densidade da água (igual a 1.025 kg/m^3);

v_c velocidade da corrente incidente (em m/s);

A área do elemento estrutural, perpendicularmente à vazão (em m^2).

O valor do coeficiente de arrasto é determinado a partir do diagrama da Figura 3-5, onde são necessários o número de Reynolds e a rugosidade efetiva (já obtida na Tabela 3-3). O número de Reynolds é obtido por:

$$Re = \frac{b \cdot v_c}{\nu} \quad (3-15)$$

onde:

b diâmetro da estaca (em m);

ν viscosidade cinemática da água (igual a $1,004 \cdot 10^{-6} m^2/s$).

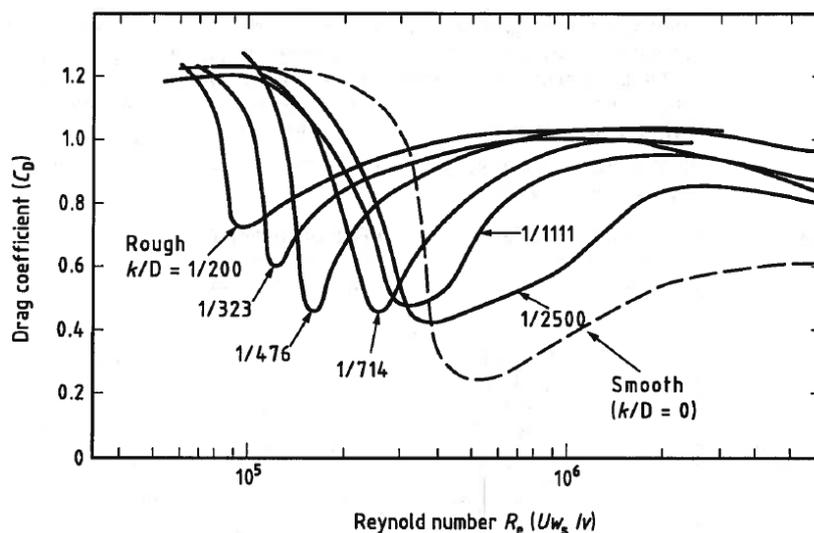


Figura 3-5: Coeficientes de arrasto para cilindros circulares.

Fonte: BS 6349-1-2 – *Maritime Works – Part 1-2: General – Code of practice for assessment of actions* (2016) – Figura E1.

A seguir, a Tabela 3-9 apresenta os coeficientes obtidos a partir da Equação (3-15) e da Figura 3-5 e a força devida à ação da corrente, obtida a partir da Equação (3-14), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.4 e 2.6.

Tabela 3-9: Coeficientes e força devida à ação da corrente nas estacas – BSI.

R_e	1,000E+06
k/b	2,191E-05
C_D	0,40
F_D/m (kN/m)	0,23

Esta carga foi aplicada ao modelo estrutural conforme os carregamentos de projeto C_x e C_y apresentados na Tabela 3-10 (Figura A. 13 à Figura A. 16).

Tabela 3-10: Forças devidas à ação da corrente aplicadas à estrutura – BSI.

Carregamento	F_y/m (kN/m)	F_x/m (kN/m)	Elemento
+Cx	0,00	0,23	Estacas
-Cx	0,00	-0,23	Estacas
+Cy	0,23	0,00	Estacas
-Cy	-0,23	0,00	Estacas

3.2.2. Conforme a ROM – A2

Para o cálculo da força devida à ação da corrente marítima incidente sobre as estacas da estrutura, utiliza-se nesta seção o item 4.6.2.1.1 da norma ROM 2.0-11: *Recomendaciones para Obras Maritimas - Recomendaciones para el Proyecto y Ejecución de Obras de Atraque y Amarre* (MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO, 2012).

De acordo com a ROM 2.0-11 (2012), tem-se:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w A_L V^2 \quad (3-16)$$

onde:

F_D força de arrasto devida à corrente (em kN);

C_D coeficiente de arrasto para corrente (igual a 1,0 para estacas de seção circular, 2,0 para seções retangulares e quadradas com fluxo paralelo às faces, ou 1,6 para seções quadradas com fluxo angulado);

ρ_w densidade da água (igual a $1,03 \text{ t/m}^3$);

A_L área do elemento estrutural, perpendicularmente à vazão (em m^2);

V velocidade da corrente incidente (em m/s).

A seguir, a Tabela 3-11 apresenta o coeficiente de arrasto e a força devida à ação da corrente, obtida a partir da Equação (3-16), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.4 e 2.6.

Tabela 3-11: Coeficientes e força devida à ação da corrente nas estacas – ROM.

C_D	1,0
$F_D/m \text{ (kN/m)}$	0,57

Esta carga foi aplicada ao modelo estrutural conforme os carregamentos de projeto C_x e C_y apresentados na Tabela 3-12 (Figura A. 17 à Figura A. 20).

Tabela 3-12: Forças devidas à ação da corrente aplicadas à estrutura – ROM.

Carregamento	F_y/m (kN/m)	F_x/m (kN/m)	Elemento
+Cx	0,00	0,57	Estacas
-Cx	0,00	-0,57	Estacas
+Cy	0,57	0,00	Estacas
-Cy	-0,57	0,00	Estacas

3.2.3. Conforme a AASHTO – B1 e B2

Para o cálculo da força devida à ação da corrente marítima incidente sobre as estacas da estrutura, utiliza-se nesta seção o item 3.7.3.1 da norma AASTHO: *LRFD Bridge Design Specifications 9th Ed.* (AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, 2020), que apresenta a formulação a seguir:

$$p = \frac{C_D v^2}{1.000} \quad (3-17)$$

onde:

- p pressão do fluxo de água corrente (ksf);
- C_D coeficiente de arrasto para corrente em píeres (Tabela 3-13);
- v velocidade da corrente de projeto (ft/s).

Segundo a AASTHO (2020) o coeficiente de arrasto pode ser determinado por:

Tabela 3-13: Coeficientes de arrasto da corrente – AASHTO.

Tipo	C_D
Elementos semi-circulares	0,7
Elementos quadrados	1,4

Fonte: AASTHO: *LRFD Bridge Design Specifications 9th Ed.* (2020) – Adaptado da Tabela 3.7.3.1-1.

A seguir, a Tabela 3-14 apresenta o coeficiente de arrasto e a força devida à ação da corrente, obtida a partir da Equação (3-17), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.4 e 2.6.

Tabela 3-14: Coeficientes e força devida à ação da corrente nas estacas – AASHTO.

C_D	0,70
p (ksf)	0,01
F/ft (kips/ft)	0,03
F/m (kN/m)	0,40

Esta carga foi aplicada ao modelo estrutural conforme os carregamentos de projeto C_x e C_y apresentados na Tabela 3-15 (Figura A. 21 à Figura A. 24).

Tabela 3-15: Forças devidas à ação da corrente aplicadas à estrutura - AASHTO.

Carregamento	F_y/m (kN/m)	F_x/m (kN/m)	Elemento
+Cx	0,00	0,40	Estacas
-Cx	0,00	-0,40	Estacas
+Cy	0,40	0,00	Estacas
-Cy	-0,40	0,00	Estacas

3.3. Sobrecarga de Utilização (SC)

3.3.1. Conforme o BSI – A1

Para a determinação da sobrecarga de utilização aplicam-se neste item as indicações da BS 6349-1-2 – *Maritime Works – Part 1-2: General – Code of practice for assessment of actions* (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2016).

De acordo com o item 31.3 da BS 6349-1-2 (2016), para terminais de carga geral, na ausência de informações mais detalhadas a respeito da operação deve-se aplicar uma sobrecarga distribuída de $30kN/m^2$ em áreas operacionais e de $50kN/m^2$ em área de armazenamento.

Assim, a carga de $30kN/m^2$ foi aplicada ao modelo estrutural, conforme o carregamento de projeto SC apresentado na Tabela 3-16 (Figura A. 25).

Tabela 3-16: Sobrecarga de utilização aplicada à estrutura – BSI.

Carregamento	F_z/m^2 (kN/m^2)	Elemento
SC	-30	Laje

3.3.2. Conforme a ROM – A2

Para a determinação da sobrecarga de utilização aplicam-se neste item as indicações da ROM 2.0-11: *Recomendaciones para Obras Maritimas - Recomendaciones para el Proyecto y Ejecución de Obras de Atraque y Amarre* (MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO, 2012).

Como se apresenta na Tabela 3-17, a norma ROM 2.0-11 (2012) indica não apenas valores de carregamento distribuído vertical, mas também altura mínima para cálculo de forças do vento, tanto para área de armazenamento como de operação (Figura 3-6). Têm-se ainda, nesta tabela, diferentes tipos de operações (para usos comerciais ou outros), tipos de cargas e de sistemas de manuseio.

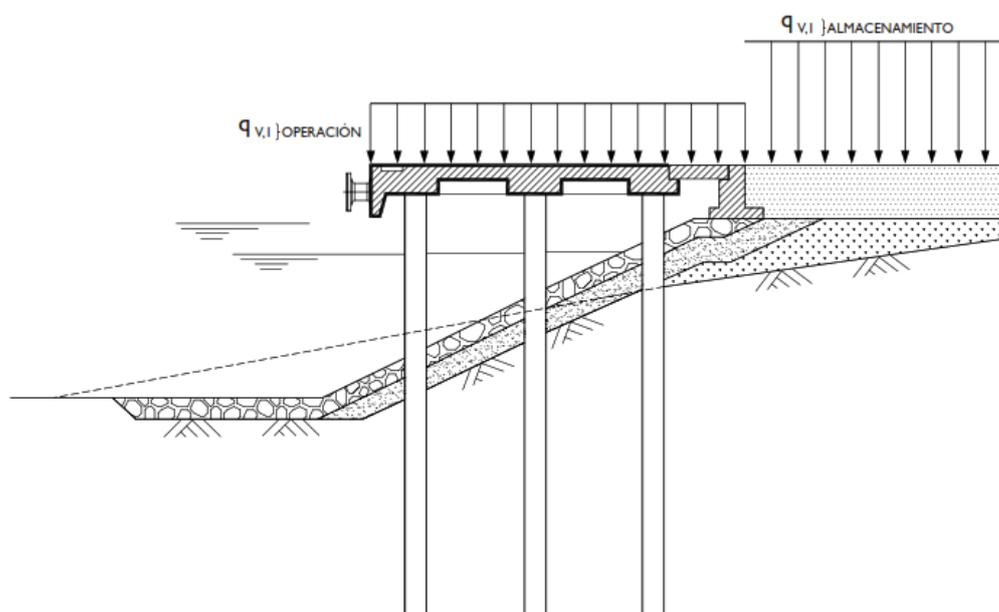


Figura 3-6: Área de operação e armazenamento de um terminal portuário.

Fonte: ROM 2.0-11: *Recomendaciones para Obras Maritimas - Recomendaciones para el Proyecto y Ejecución de Obras de Atraque y Amarre* (2012) – Tabela 4.6.4.4.

Tabela 3-17: Sobrecargas Mínimas para Estruturas Portuárias - ROM.

Fases de Construção, Reparação ou Descomissionamento				
	Área de Operação		Área de Armazenamento	
	q (kN/m^2)	H_a^1 (m)	q (kN/m^2)	H_a^1 (m)
	10	2,5	10	2,5

Fase de Serviço								
Usos		Sistema de Manuseio	Área de Operação		Área de Armazenamento			
			q (kN/m^2)	H_a (m)	q (kN/m^2)	H_a (m)		
Comercial	Granéis Líquidos		Contínuo	10	1,5	-		
			Descontínuo	20	2,5	30	4,0	
	Granéis Sólidos	Ordinários ou pulverulentos		Contínuo	10	1,5	100	8,0
				Descontínuo	30	2,5		
		Pesado		Contínuo	10	1,5	200	12,0
				Descontínuo	50	2,5		
	Carga Geral	Convencional Ordinária		Descontínuo por elevação	30	2,5	60	5,5
		Convencional Pesada			60	1,5	100	4,0
		Porta-Contêiners		Descontínuo por elevação	20	2,5	60	10
		Ro-Ro e Barcaça		Rodante	30	2,5	50	4,0
		Multipropósito		Rodante + elevação	30	2,5	100	8,0
	Passageiro	Barcaça		Rodante	10	1,5	50	4,0
				Rodante + elevação	20	2,5		
		Cruzeiro e outros			10	1,5	20	2,5
	Pesqueiro			15	2,0	15	2,0	
	Náutico-esportivo	Não acessível a tráfego de rodas		5	0,8	-	-	
		Acessível a tráfego de rodas		10	1,5	15	2,0	
	Industrial			100	2,5	100	2,5	
Militar			50	4,0	50	4,0		

Fonte: ROM 2.0-11: *Recomendaciones para Obras Maritimas - Recomendaciones para el Proyecto y Ejecución de Obras de Atraque y Amarre* (2012) – Tabela 4.6.4.4.

¹ Altura mínima de cálculo para forças devidas à ação do vento.

Vale ressaltar que, conforme definido nos critérios de projeto no Capítulo 2 deste trabalho, serão consideradas somente as sobrecargas verticais para o desenvolvimento deste Estudo de Caso.

Como se observa na Tabela 3-17, a sobrecarga vertical fornecida para área de operação de cargas convencionais ordinárias é de $30kN/m^2$. Esta carga foi aplicada ao modelo estrutural, conforme o carregamento de projeto *SC* apresentado na Tabela 3-18 (Figura A. 25).

Tabela 3-18: Sobrecarga de utilização aplicada à estrutura – ROM.

Carregamento	F_z/m^2 (kN/m^2)	Elemento
SC	-30	Laje

3.3.3. Conforme a UFC – B1 e B2

Para a definição sobrecarga de utilização, aplicam-se neste item as indicações da UFC 4-152-01: *Design: Piers and Wharves* (U. S. DEPARTMENT OF DEFENSE , 2017), apresentadas na Tabela 3-19. De acordo com a norma UFC 4-152-01: (2017), píeres e cais são classificados de acordo com sua utilização:

- Tipo I – transferência de combustíveis, munição, abastecimento de carga (utilizado principalmente para transferência de carga entre navio-porto);
- Tipo II – propósito geral, majoritariamente para atracação de navios, não exclusivo para operação de carga (frequentes períodos de inatividade);
- Tipo III – reparos.

Tabela 3-19: Sobrecargas verticais distribuídas para lajes de píeres e cais – UFC.

Tipo	Propósito do Berço/ Transferência de Carga	Sobrecarga (<i>psf</i>)
I	Combustíveis	300
	Munição	600
	Abastecimento (carga geral)	750
	Abastecimento (contêiners)	1.000
II	Atracação (granéis líquidos ou sólidos)	800
	Atracação (demais cargas)	600
	Atracação (submarinos)	600
III	Reparos	600

Fonte: UFC 4-152-01: *Design: Piers and Wharves* (2017) – Adaptado da Tabela 3-2.

Como o píer deste estudo se classifica como uma estrutura do Tipo I, (possui fins comerciais de transferência de carga), tem-se a sobrecarga de 800 psf $\cong 38 \text{ kN/m}^2$. Esta carga foi aplicada ao modelo estrutural, conforme o carregamento de projeto SC apresentado na Tabela 3-20 (Figura A. 26).

Tabela 3-20: Sobrecarga de utilização aplicada à estrutura – UFC.

Carregamento	F_z/m^2 (kN/m^2)	Elemento
SC	-38	Laje

3.4. Forças Devidas à Atracação (ATR)

Este capítulo apresenta diferentes metodologias para cálculo da energia de atracação do navio. Todas as formulações apresentadas têm como base o mesmo conceito físico fundamental: a absorção da energia cinética da embarcação em movimento durante o impacto da atracação. Pode-se, assim, obter a energia de atracação a partir da fórmula geral:

$$E = K \cdot M \cdot v^2 \cdot C \quad (3-18)$$

onde:

- K fator numérico global, que inclui correções de unidades;
- v velocidade de aproximação do navio;
- M massa do navio ou deslocamento do navio;
- C coeficiente global, que abrange características geométricas, rigidez e configuração do sistema.

A partir desta teoria geral, obtém-se a energia característica de atracação, sobre a qual se aplica um coeficiente de segurança ou majoração para se obter a energia de cálculo, utilizada para definição da defesa de projeto. Como se define em 2.7, dois cenários de atracação devem ser considerados no projeto:

- Cenário I: Impacto inicial em uma única defesa;
- Cenário II: Impacto em múltiplas defensas.

Para o primeiro cenário, a energia de atracação é integralmente absorvida por uma única defesa e a reação de projeto será a sua reação nominal, que poderá ser aplicada a qualquer unidade do sistema de defensas. Já o segundo cenário será representado por um único caso de carregamento em que sete (7) defensas são solicitadas simultaneamente e a reação solicitada é determinada a partir da curva de performance da defesa.

Conjuntamente a cada um dos cenários, aplica-se uma reação devida à fricção entre o casco do navio e o dispositivo de defesa, na direção paralela à linha de atracação, estimada como 20% da reação transversal solicitada.

3.4.1. Conforme o BSI – A1

Para o cálculo dos esforços devidos à atracação, utiliza-se neste item o Capítulo 5 da BS 6349-4 – *Maritime Works – Part 4: General – Code of practice for fendering and mooring systems* (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2014). Esta metodologia apresenta o cálculo de uma Energia de Atracação Característica, à qual se aplica um coeficiente de majoração para se obter a Energia de Atracação de Projeto. A Figura 3-7 ilustra a geometria da aproximação definida na norma BS 6349-4 (2014).

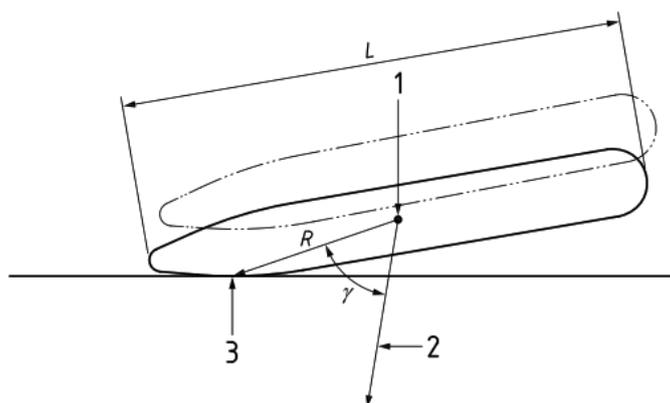


Figura 3-7: Geometria da aproximação do navio ao berço – BSI.

Fonte: BS 6349-4 – *Maritime Works – Part 4: General – Code of practice for fendering and mooring systems* (2014) – Figura 6.

3.4.1.1. Energia de Atracação

De acordo com a BS 6349-4 (2014), a Energia de Atracação Característica é calculada por:

$$E_C = 0,5 \cdot C_M M_D v_B^2 C_E C_S C_C \quad (3-19)$$

onde:

- E_C energia de atracação característica (em $kN \cdot m$);
- C_M coeficiente hidrodinâmico de massa do navio (Equação (3-20));
- M_D deslocamento do navio (em t);
- v_B velocidade de atracação (não inferior a $0,08m/s$);
- C_E coeficiente de excentricidade do navio (Equação (3-21));

C_S coeficiente de flexibilidade, aplicado quando parte da energia de atracção é absorvida pelo casco do navio (tipicamente igual a 1,0, ou para cascos muito flexíveis ou defensas muito rígidas, igual a 0,9);

C_C coeficiente de configuração do berço, aplicado quando parte da energia de atracção é absorvida pelo efeito de amortecimento da massa de água contida entre o casco e a parede de contenção (igual a 0,9 para paredes sólidas e distância livre sob quilha superior a 15% do calado, ou 1,0 em outros casos).

O coeficiente hidrodinâmico de massa é obtido pela formulação de Vasco Costa, válida quando a velocidade de aproximação é superior a 0,08 m/s e a distância livre sob a quilha é superior a $0,1D_V$:

$$C_M = 1 + \frac{2D_V}{B} \quad (3-20)$$

onde:

D_V calado do navio (em m);

B boca do navio (em m).

O coeficiente de excentricidade é calculado a partir da seguinte fórmula:

$$C_E = \frac{K^2 + R^2 \cos^2 \gamma}{K^2 + R^2} \quad (3-21)$$

onde:

K raio de giração do navio ao redor do eixo vertical que passa pelo seu centro de gravidade (Equação (3-22));

R distância entre o ponto de contato do navio com a estrutura e o centro de massa do navio (em m);

γ ângulo entre a linha que une o ponto de contato do navio com a estrutura ao seu centro de massa e a direção da velocidade.

O raio de giração do navio é dado por:

$$K = (0,19C_b + 0,11)L_{BP} \quad (3-22)$$

onde:

C_b coeficiente de bloco do navio (Equação (3-23));

L_{BP} comprimento do navio entre perpendiculares (em m).

O coeficiente de bloco do navio C_b é dado por:

$$C_b = \frac{M_D}{L_{BP}BD_V\rho_W} \quad (3-23)$$

onde:

ρ_W densidade da água (igual a 1.025 kg/m^3).

De acordo com a BS 6349-4 (2014), para se obter a Energia de Atracção de Projeto, a Energia Característica deve ser multiplicada pelo coeficiente de energia de atracção, que representa a probabilidade de que a primeira seja excedida e o sistema de defensas receba uma sobrecarga (Equação (3-24)). Na ausência de estudos detalhados, usam-se os valores indicados na Tabela 3-21.

$$E_D = E_C \cdot k_E \quad (3-24)$$

onde:

E_D energia de atracção de projeto (em $kN \cdot m$);

k_E coeficiente de energia de atracção (Tabela 3-21).

Tabela 3-21: Coeficientes de energia de atracção – BSI.

Tipo de Berço	k_E
Contínuos, carga convencional	1,5
Para barcaças	2,0
Para LNG e LPG	2,0
Descontínuos, dolfins de atracção	2,0

Fonte: BS 6349-4 – *Maritime Works – Part 4: General – Code of practice for fendering and mooring systems* (2014).

A seguir, a Tabela 3-22 apresenta os coeficientes obtidos a partir das Equações (3-20) a (3-23) e da Tabela 3-21, bem como os valores das energias de atracação característica e de projeto, obtidos a partir das Equações (3-19) e (3-24), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.3 e 2.7.

Tabela 3-22: Coeficientes e energias de atracação – BSI.

C_M	1,81
C_b	0,71
$K (m)$	41,2
C_E	0,54
C_S	1,00
C_C	1,00
$E_C (kN \cdot m)$	677
k_E	1,50
$E_D (kN \cdot m)$	1.016

3.4.1.2. Seleção da Defesa de Projeto

Considerando-se que a defesa selecionada deve possuir capacidade de absorção de energia nominal superior ao valor de projeto obtido na Tabela 3-22, seleciona-se o modelo SCN 1400 F1.0 da *Fender Systems – Product Brochure* (TRELLEBORG MARINE AND INFRASTRUCTURE, 2020), como se apresenta na Figura 3-8.

Conforme define a BS 6349-4 (2014), a pressão de contato entre a defesa e o casco não deve ultrapassar os valores da Tabela 3-23. Dessa forma define-se a dimensão do painel da defesa:

$$L_{\text{painel}} = \sqrt{\frac{1.334}{200}} \cong 2,6m \quad (3-25)$$

			F 0.9	F 1.0	F 1.1	F 1.2	F 1.3	F 1.4	F 1.5	F 1.6	F 1.7	F 1.8	F 1.9	F 2.0
1050	CV	E	392.0	435.0	446.6	458.2	469.8	481.4	493.0	504.4	515.8	527.2	538.6	550.0
		R	626.0	695.0	713.4	731.8	750.2	768.6	787.0	813.4	839.8	866.2	892.6	919.0
	RPD	E _R	427.3	474.2	486.8	499.4	512.1	524.7	537.4	549.8	562.2	574.6	587.1	599.5
		R _R	682.3	757.6	777.6	797.7	817.7	837.8	857.8	886.6	915.4	944.2	972.9	1001.7
1100	CV	E	450.0	500.0	513.6	527.2	540.8	554.4	568.0	581.4	594.8	608.2	621.6	635.0
		R	685.0	761.0	781.6	802.2	822.8	843.4	864.0	893.4	922.8	952.2	981.6	1011.0
	RPD	E _R	490.5	545.0	559.8	574.6	589.5	604.3	619.1	633.7	648.3	662.9	677.5	692.2
		R _R	746.7	829.5	851.9	874.4	896.9	919.3	941.8	973.8	1005.9	1037.9	1069.9	1102.0
1150	CV	E	514.1	570.3	585.5	600.7	616	631.2	646.4	661.6	676.8	692	707.2	722.4
		R	750	833.2	855.1	877.1	899	921	942.9	974.9	1007	1039	1071	1103
	RPD	E _R	560.3	621.7	638.2	654.8	671.4	688	704.5	721.1	737.7	754.3	770.9	787.4
		R _R	817.5	908.2	932.1	956	979.9	1003.9	1027.8	1062.7	1097.6	1132.5	1167.3	1202.2
1200	CV	E	585.0	650.0	667.6	685.2	702.8	720.4	738.0	755.4	772.8	790.2	807.6	825.0
		R	818.1	909.0	933.4	957.8	982.2	1006.6	1031.0	1066.0	1101.0	1136.0	1171.0	1206.0
	RPD	E _R	637.7	708.5	727.7	746.9	766.1	785.2	804.4	823.4	842.4	861.3	880.3	899.3
		R _R	891.7	990.8	1017.4	1044.0	1070.6	1097.2	1123.8	1161.9	1200.1	1238.2	1276.4	1314.5
1300	CV	E	742.5	825.0	847.0	869.0	891.0	913.0	935.0	957.0	979.0	1001.0	1023.0	1045.0
		R	957.6	1064.0	1092.4	1120.8	1149.2	1177.6	1206.0	1246.6	1287.2	1327.8	1368.4	1409.0
	RPD	E _R	805.6	895.1	919.0	942.9	966.7	990.6	1014.5	1038.3	1062.2	1086.1	1110.0	1133.8
		R _R	1039.0	1154.4	1185.3	1216.1	1246.9	1277.7	1308.5	1352.6	1396.6	1440.7	1484.7	1528.8
1400	CV	E	927.0	1030.0	1057.6	1085.2	1112.8	1140.4	1168.0	1195.4	1222.8	1250.2	1277.6	1305.0
		R	1111.5	1235.0	1268.0	1301.0	1334.0	1367.0	1400.0	1447.2	1494.4	1541.6	1588.8	1636.0
	RPD	E _R	1001.2	1112.4	1142.2	1172.0	1201.8	1231.6	1261.4	1291.0	1320.6	1350.2	1379.8	1409.4
		R _R	1200.4	1333.8	1369.4	1405.1	1440.7	1476.4	1512.0	1563.0	1614.0	1664.9	1715.9	1766.9
1600	CV	E	1381.5	1535.0	1576.6	1618.2	1659.8	1701.4	1743.0	1784.4	1825.8	1867.2	1908.6	1950.0
		R	1447.2	1608.0	1651.6	1695.2	1738.8	1782.4	1826.0	1888.0	1950.0	2012.0	2074.0	2136.0
	RPD	E _R	1478.2	1642.5	1687.0	1731.5	1776.0	1820.5	1865.0	1909.3	1953.6	1997.9	2042.2	2086.5
		R _R	1548.5	1720.6	1767.2	1813.9	1860.5	1907.2	1953.8	2020.2	2086.5	2152.8	2219.2	2285.5

Figura 3-8: Seleção de modelo de defesa (tipo supercônica SCN) – BSI.

Fonte: *Fender Systems – Product Brochure (TRELLEBORG MARINE AND INFRASTRUCTURE, 2020)*

Tabela 3-23: Valores limites para pressão no casco do navio – BSI.

Tipo de Navio		Pressão no casco (kN/m^2)
Porta-Contêineres		<200
Carga Geral	≤ 20.000 DWT	200 a 300
	> 20.000 DWT	<200
Navios-tanque de óleo	≤ 60.000 DWT	<300
	> 60.000 DWT	<200
Gaseiros		130 a 200
Graneleiros		<200
Cruseiros		<150
Barcaças e Ro-Ro		<200

Fonte: BS 6349-4 – *Maritime Works – Part 4: General – Code of practice for fendering and mooring systems* (2014) – Tabela 3.

3.4.1.3. Carregamentos Devidos à Atracção

A Tabela 3-24 a seguir apresenta os cálculos das forças de solitação da defesa selecionada para os Cenários de Atracção I e II, conforme as definições apresentadas no item 3.4. Utilizaram-se os valores de energia e reacção nominais obtidos a partir da Figura 3-8 e os percentuais de deformação e de força de reacção solicitada, a partir da curva de desempenho da defesa apresentada na Figura 2-8.

Tabela 3-24: Cálculo da reacção para atracção em múltiplas defensas – BSI.

R_{nom} (kN)		1.334
E_{nom} (kN · m)		1.112
$N_{defensas}$		7
$E_{N,1} = E_D / N_{defensas}$		145
$E_{N,1} / E_{nom}$		13%
$\delta_{N,1} / \delta_{nom}$		16%
$R_{N,1} / R_{nom}$		65%
$R_{N,1}$ (kN)		867
Cenário I Atracção em 1 defensa	F_y (kN)	1.334
	F_x (kN)	267
Cenário II Atracção em N defensas	F_y (kN)	867
	F_x (kN)	173

As cargas apresentadas na Tabela 3-24 foram aplicadas ao modelo estrutural, conforme os carregamentos de projeto *ATR* apresentados na Tabela 3-25 (Figura A. 27 à Figura A. 37).

Tabela 3-25: Carregamentos devidos à atracação aplicados à estrutura – BSI.

Carregamento	F_y (kN)	F_x (kN)	Elemento
ATR1	-1.334	267	Defensa 1
ATR2	-1.334	267	Defensa 2
ATR3	-1.334	267	Defensa 3
ATR4	-1.334	267	Defensa 4
ATR5	-1.334	267	Defensa 5
ATR6	-1.334	267	Defensa 6
ATR7	-1.334	267	Defensa 7
ATR8	-1.334	267	Defensa 8
ATR9	-1.334	267	Defensa 9
ATR10	-1.334	267	Defensa 10
ATR11	-867	173	Defensas 2 a 8

3.4.2. Conforme a ROM – A2

Para o cálculo dos esforços devidos à atracação, utiliza-se nesta seção o item 3.4.2.3.5 da ROM 0.2-90: *Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias* (MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO, 1990).

A metodologia apresentada na ROM 0.2-90 (1990) tem como base o cálculo de uma Energia Cinética Característica, à qual se aplicam coeficientes de excentricidade, geometria, configuração e rigidez, a fim de se obter a Energia Absorvida pelo Sistema de Atracação em condições normais de operação. A esta se aplica um coeficiente de majoração para se obter a Energia de Atracação em Condições Excepcionais de Projeto. A Figura 3-9 apresenta a geometria da aproximação definida nesta norma.

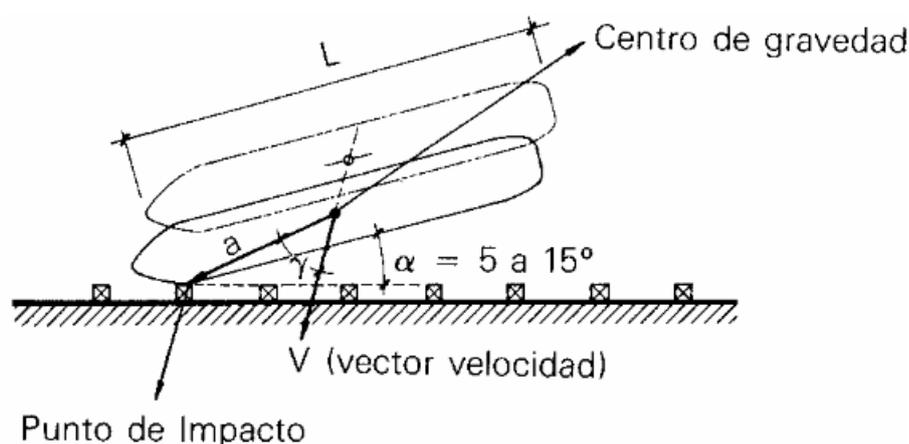


Figura 3-9: Geometria da aproximação do navio ao berço – ROM.

Fonte: ROM 0.2-90: *Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias* (1990) – Tabela 3.4.2.3.5.4.

3.4.2.1. Energia de Atracação

De acordo com a ROM 0.2-90 (1990), a Energia Cinética Característica é dada por:

$$E = \frac{1}{2g} C_m \Delta v_B^2 \quad (3-26)$$

onde:

E_C energia cinética característica (em $t \cdot m$);

g aceleração da gravidade (igual a $9,81 \text{ m/s}^2$);

C_m coeficiente hidrodinâmico de massa do navio (igual a 1,5 quando a distância livre sob a quilha é igual ou superior a $1,5D$, caso contrário, utiliza-se a Equação (3-27));

Δ peso ou deslocamento do navio (em t);

v_B velocidade de atracação (em m/s).

O coeficiente hidrodinâmico de massa é obtido pela formulação de Vasco Costa, válida quando a velocidade de aproximação é superior a $0,08 m/s$ e a distância livre sob a quilha é superior a $0,1D$:

$$C_M = 1 + \frac{2D}{B} \quad (3-27)$$

onde:

D calado do navio;

B boca do navio.

De acordo com a ROM 0.2-90 (1990), a Energia Absorvida pelo Sistema de Atracação é calculada por:

$$E_f = E C_e C_g C_c C_s \quad (3-28)$$

onde:

E_f energia cinética absorvida pelo sistema de atracação (em $t \cdot m$);

E energia cinética característica (em $t \cdot m$);

C_e coeficiente de excentricidade do navio (Equação (3-29));

C_g coeficiente geométrico do navio, representa a influência que o ponto de impacto tem sobre a energia absorvida pelo sistema (igual a 0,95 quando o impacto ocorre na curvatura do casco ou igual a 1,0 caso contrário);

C_c coeficiente de configuração do berço, aplicado quando parte da energia de atracação é absorvida pelo efeito de amortecimento da massa de água contida entre o casco e a parede de contenção (Tabela 3-26);

C_s coeficiente de flexibilidade, aplicado quando parte da energia de atracção é absorvida pelo casco do navio (igual a 1,0 para sistemas de atraque rígidos ou entre 0,9 e 1,0 para sistemas flexíveis. Consideram-se flexíveis sistemas em que o impacto do navio produza deformações superiores a 0,15m).

O coeficiente de excentricidade é calculado a partir da seguinte fórmula:

$$C_e = \frac{k + a^2 \cos^2 \gamma}{k^2 + a^2} \quad (3-29)$$

onde:

k raio de giração do navio ao redor do eixo vertical que passa pelo seu centro de gravidade (Equação (3-30));

a distância entre o ponto de contato do navio com a estrutura e o centro de massa do navio;

γ ângulo entre a linha que une o ponto de contato do navio com a estrutura ao seu centro de massa e a direção da velocidade.

O raio de giração do navio é dado por:

$$k = (0,19C_b + 0,11)L \quad (3-30)$$

onde:

C_b coeficiente de bloco do navio (Equação (3-31));

L comprimento do navio.

O coeficiente de bloco do navio C_b é dado por:

$$C_b = \frac{\Delta}{L_{BP}BD\gamma_W} \quad (3-31)$$

onde:

L_{BP} comprimento do navio entre perpendiculares.

γ_W densidade da água (igual a 1,03 t/m³).

O coeficiente de configuração do atraque é obtido a partir da Tabela 3-26.

Tabela 3-26: Coeficiente de configuração do atraque C_c – ROM.

Método de Aproximação Predominante		Tipo de Estrutura		
		Aberta (transparente)	Semifechada	Fechada
Transversal		1,00	0,90	0,80
Longitudinal	Por proa/popa	1,00	1,00	1,00
	Lateral	1,00	0,90	0,80

Fonte: ROM 0.2-90: *Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias* (1990) – Tabela 3.4.2.3.5.6.

Segundo a ROM 0.2-90 (1990), o sistema de defensas deve ser dimensionado para a Energia de Atracção em Condições Excepcionais de Projeto, que é obtida a partir da Energia Absorvida pelo Sistema de Atraque em condições normais de operação multiplicada pelo coeficiente de energia de atracção. Este fator representa a probabilidade de que esta seja excedida e o sistema de defensas receba uma sobrecarga. Tem-se, assim:

$$E_E = E_f \cdot k_E \quad (3-32)$$

onde:

E_E energia de atracção em condições excepcionais (em $t \cdot m$);

k_E coeficiente de energia de atracção (igual a 2,0).

A seguir, a Tabela 3-27 apresenta os coeficientes obtidos a partir das Equações (3-27) e (3-29) a (3-31) e da Tabela 3-26, bem como os valores das energias de atracção característica e de projeto, obtidos a partir das Equações (3-26), (3-28) e (3-32), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.3 e 2.7.

Tabela 3-27: Coeficientes e energias de atracação – ROM.

C_m	1,81
E (kN.m)	1.249
C_b	0,70
k (m)	43,3
C_e	0,56
C_g	1,00
C_s	1,00
C_c	1,00
E_f (kN.m)	703
k_E	2,00
E_E (kN · m)	1.407

3.4.2.2. Seleção da Defesa de Projeto

Considerando-se que a defesa selecionada deve possuir capacidade de absorção de energia nominal superior ao valor de projeto obtido na Tabela 3-27, seleciona-se o modelo SCN 1400 F2.0 da *Fender Systems – Product Brochure* (TRELLEBORG MARINE AND INFRASTRUCTURE, 2020), como se apresenta na Figura 3-10.

Conforme define a ROM 0.2-90 (1990), na ausência de valores de referência, a pressão de contato entre a defesa e o casco (em t/m^2) não deve ultrapassar o valor numérico do calado do navio (em m) – para navios grandes, adotam-se valores entre 15 e $25 t/m^2$. Aplicando-se o valor médio da referência fornecida para navios grandes, define-se a dimensão do painel da defesa:

$$L_{paine\grave{l}} = \sqrt{\frac{1.767}{200}} \cong 3,0 \text{ m} \quad (3-33)$$

			F 0.9	F 1.0	F 1.1	F 1.2	F 1.3	F 1.4	F 1.5	F 1.6	F 1.7	F 1.8	F 1.9	F 2.0
1050	CV	E	392.0	435.0	446.6	458.2	469.8	481.4	493.0	504.4	515.8	527.2	538.6	550.0
		R	626.0	695.0	713.4	731.8	750.2	768.6	787.0	813.4	839.8	866.2	892.6	919.0
	RPD	E _R	427.3	474.2	486.8	499.4	512.1	524.7	537.4	549.8	562.2	574.6	587.1	599.5
		R _R	682.3	757.6	777.6	797.7	817.7	837.8	857.8	886.6	915.4	944.2	972.9	1001.7
1100	CV	E	450.0	500.0	513.6	527.2	540.8	554.4	568.0	581.4	594.8	608.2	621.6	635.0
		R	685.0	761.0	781.6	802.2	822.8	843.4	864.0	893.4	922.8	952.2	981.6	1011.0
	RPD	E _R	490.5	545.0	559.8	574.6	589.5	604.3	619.1	633.7	648.3	662.9	677.5	692.2
		R _R	746.7	829.5	851.9	874.4	896.9	919.3	941.8	973.8	1005.9	1037.9	1069.9	1102.0
1150	CV	E	514.1	570.3	585.5	600.7	616	631.2	646.4	661.6	676.8	692	707.2	722.4
		R	750	833.2	855.1	877.1	899	921	942.9	974.9	1007	1039	1071	1103
	RPD	E _R	560.3	621.7	638.2	654.8	671.4	688	704.5	721.1	737.7	754.3	770.9	787.4
		R _R	817.5	908.2	932.1	956	979.9	1003.9	1027.8	1062.7	1097.6	1132.5	1167.3	1202.2
1200	CV	E	585.0	650.0	667.6	685.2	702.8	720.4	738.0	755.4	772.8	790.2	807.6	825.0
		R	818.1	909.0	933.4	957.8	982.2	1006.6	1031.0	1066.0	1101.0	1136.0	1171.0	1206.0
	RPD	E _R	637.7	708.5	727.7	746.9	766.1	785.2	804.4	823.4	842.4	861.3	880.3	899.3
		R _R	891.7	990.8	1017.4	1044.0	1070.6	1097.2	1123.8	1161.9	1200.1	1238.2	1276.4	1314.5
1300	CV	E	742.5	825.0	847.0	869.0	891.0	913.0	935.0	957.0	979.0	1001.0	1023.0	1045.0
		R	957.6	1064.0	1092.4	1120.8	1149.2	1177.6	1206.0	1246.6	1287.2	1327.8	1368.4	1409.0
	RPD	E _R	805.6	895.1	919.0	942.9	966.7	990.6	1014.5	1038.3	1062.2	1086.1	1110.0	1133.8
		R _R	1039.0	1154.4	1185.3	1216.1	1246.9	1277.7	1308.5	1352.6	1396.6	1440.7	1484.7	1528.8
1400	CV	E	927.0	1030.0	1057.6	1085.2	1112.8	1140.4	1168.0	1195.4	1222.8	1250.2	1277.6	1305.0
		R	1111.5	1235.0	1268.0	1301.0	1334.0	1367.0	1400.0	1447.2	1494.4	1541.6	1588.8	1636.0
	RPD	E _R	1001.2	1112.4	1142.2	1172.0	1201.8	1231.6	1261.4	1291.0	1320.6	1350.2	1379.8	1409.4
		R _R	1200.4	1333.8	1369.4	1405.1	1440.7	1476.4	1512.0	1563.0	1614.0	1664.9	1715.9	1766.9
1600	CV	E	1381.5	1535.0	1576.6	1618.2	1659.8	1701.4	1743.0	1784.4	1825.8	1867.2	1908.6	1950.0
		R	1447.2	1608.0	1651.6	1695.2	1738.8	1782.4	1826.0	1888.0	1950.0	2012.0	2074.0	2136.0
	RPD	E _R	1478.2	1642.5	1687.0	1731.5	1776.0	1820.5	1865.0	1909.3	1953.6	1997.9	2042.2	2086.5
		R _R	1548.5	1720.6	1767.2	1813.9	1860.5	1907.2	1953.8	2020.2	2086.5	2152.8	2219.2	2285.5

Figura 3-10: Seleção de modelo de defesa (tipo supercônica SCN) – ROM.

Fonte: *Fender Systems – Product Brochure* (TRELLEBORG MARINE AND INFRASTRUCTURE, 2020)

3.4.2.3. Carregamentos Devidos à Atracção

A Tabela 3-28 a seguir apresenta os cálculos das forças de solicitação da defesa selecionada para os Cenários de Atracção I e II, conforme as definições apresentadas no item 3.4. Utilizaram-se os valores de energia e reação nominais obtidos a partir da Figura 3-10 e os percentuais de deformação e de força de reação solicitada, a partir da curva de desempenho da defesa apresentada na Figura 2-8.

Tabela 3-28: Cálculo da reação para atracação em múltiplas defensas – ROM.

R_{nom} (kN)		1.767
E_{nom} (kN · m)		1.409
$N_{defensas}$		7
$E_{N,1} = E_D/N_{defensas}$		201
$E_{N,1}/E_{nom}$		14%
$\delta_{N,1}/\delta_{nom}$		18%
$R_{N,1}/R_{nom}$		70%
$R_{N,1}$ (kN)		1.237
Cenário I Atracação em 1 defensa	F_y (kN)	1.767
	F_x (kN)	353
Cenário II Atracação em N defensas	F_y (kN)	1.237
	F_x (kN)	247

As cargas apresentadas na Tabela 3-28 foram aplicadas ao modelo estrutural, conforme os carregamentos de projeto *ATR* da Tabela 3-29 (Figura A. 38 à Figura A. 48).

Tabela 3-29: Carregamentos devidos à atracação aplicados à estrutura – ROM.

Carregamento	F_y (kN)	F_x (kN)	Elemento
ATR1	-1.767	353	Defensa 1
ATR2	-1.767	353	Defensa 2
ATR3	-1.767	353	Defensa 3
ATR4	-1.767	353	Defensa 4
ATR5	-1.767	353	Defensa 5
ATR6	-1.767	353	Defensa 6
ATR7	-1.767	353	Defensa 7
ATR8	-1.767	353	Defensa 8
ATR9	-1.767	353	Defensa 9
ATR10	-1.767	353	Defensa 10
ATR11	-1.237	247	Defensas 2 a 8

3.4.3. Conforme a PIANC – B1 e B2

Para o cálculo dos esforços devidos à atracação, utiliza-se neste item o Capítulo 4 da PIANC WG 33: *Guidelines for the Design of Fender Systems* (WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT INFRASTRUCTURE, 2002). Esta metodologia tem como base o cálculo de uma Energia de Atracação de Projeto, à qual se aplica um coeficiente de majoração para se obter a Energia de Anormal de Atracação. A Figura 3-11 apresenta a geometria da aproximação definida nesta norma.

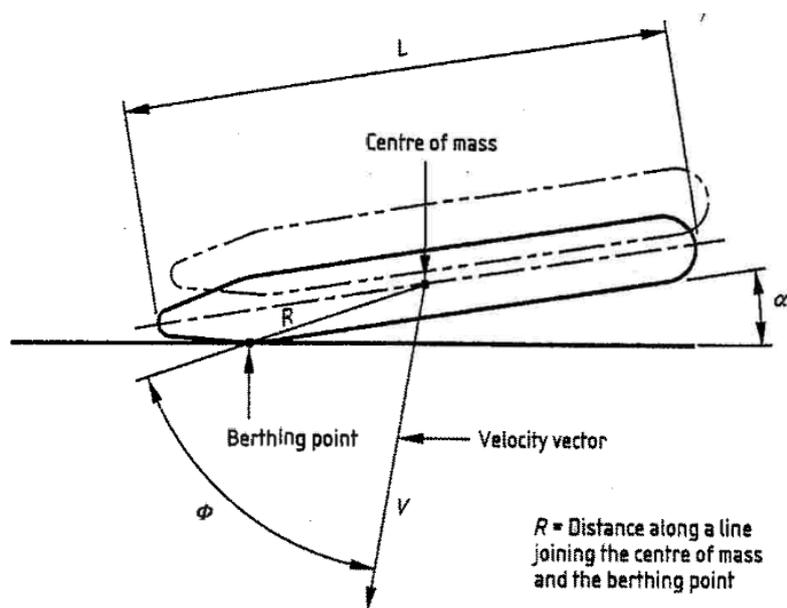


Figura 3-11: Geometria da aproximação do navio ao berço - PIANC.

Fonte: PIANC WG 33: *Guidelines for the Design of Fender Systems* (2002) – Figura 2.3.1.

3.4.3.1. Energia de Atracação

De acordo com a PIANC WG 33 (2002), a Energia de Atracação de Projeto é calculada por:

$$E_D = 0,5 \cdot M v^2 C_e C_m C_s C_c \quad (3-34)$$

onde:

E_D energia de atracação projeto (sob condições normais) a ser absorvida pelo sistema de defensas (em $kN \cdot m$);

M massa do navio de projeto, deslocamento (em t);

- v velocidade de aproximação, perpendicular ao berço (em m/s);
- C_e coeficiente de excentricidade do navio (Equação (3-35));
- C_m coeficiente de massa virtual do navio (Tabela 3-30);
- C_S coeficiente de flexibilidade do navio (tipicamente igual a 1,0 para defensas flexíveis e navios pequenos, ou pode variar até 0,9 para defensas rígidas e navios grandes);
- C_C coeficiente de configuração do berço (igual a 1,0 para estruturas abertas ou cantos de paredes de contenção ou igual a 0,9 para atracação paralela em paredes de contenção).

O coeficiente de excentricidade é calculado a partir da seguinte fórmula:

$$C_e = \frac{K^2 + K^2 \cos^2 \phi}{K^2 + R^2} \quad (3-35)$$

onde:

- K raio de giração do navio ao redor do eixo vertical que passa pelo seu centro de gravidade (Equação (3-36));
- R distância entre o ponto de contato do navio com a estrutura e o centro de massa do navio (em m);
- ϕ ângulo entre a linha que une o ponto de contato do navio com a estrutura ao seu centro de massa e a direção do vetor de velocidade.

O raio de giração do navio é dado por:

$$K = (0,19C_b + 0,11)L \quad (3-36)$$

onde:

- C_b coeficiente de bloco do navio (Equação (3-37));
- L comprimento do navio (em m).

O coeficiente de bloco do navio C_b é dado por:

$$C_b = \frac{M_D}{LBD\rho_W} \quad (3-37)$$

onde:

ρ_W densidade da água (igual a 1.025 kg/m^3);

D calado do navio (em m).

Para o cálculo do coeficiente de massa virtual, a PIANC WG 33 (2002) apresenta algumas formulações, inclusive, o método de Vasco Costa, já apresentado anteriormente neste trabalho. Após uma análise comparativa entre os métodos propostos, esta norma recomenda os seguintes valores, de acordo com a relação entre o calado do navio e a distância livre sob quilha:

Tabela 3-30: Coeficiente de massa virtual – PIANC.

Distância livre sob a quilha do navio (UKC)	C_M
$UKC \geq 0,5D$	1,50
$0,1 < UKC < 0,5D$	$1.875 - 0,75(UKC/D)$
$UKC \leq 0,1D$	1,80

Fonte: Elaborado a partir de PIANC WG 33: *Guidelines for the Design of Fender Systems* (2002).

Para se obter a Energia de Atracção Anormal de Projeto, a Energia de Projeto deve ser multiplicada pelo coeficiente de impacto anormal, que representa a probabilidade de que a primeira seja excedida devido a possíveis acidentes, falhas de manobras ou ventos/correntes adversos, e o sistema de defensas receba uma sobrecarga. Tem-se, assim:

$$E_{AB} = E_D \cdot C_{ab} \quad (3-38)$$

onde:

E_{AB} é a energia de atracção devida ao impacto anormal de projeto (em $kN \cdot m$);

E_D é a energia de atracção de projeto (em $kN \cdot m$);

C_{ab} é o fator de impacto anormal aplicado à energia de atracção (Tabela 3-31).

A norma indica que o coeficiente de impacto anormal deve ser definido pelo projetista, com base em diversos fatores relacionados ao uso da estrutura. Contudo, na ausência de estudos, recomendam-se os valores da Tabela 3-31.

Tabela 3-31: Coeficientes de impacto anormal – PIANC.

Tipo de Navio		C_{ab}
Navios-tanque ou graneleiros	Grandes	1,25
	Pequenos	1,75
Porta- Contêiners	Grandes	1,5
	Pequenos	2,0
Carga Geral		1,75
Ro-Ro e barcaças		$\geq 2,0$
Tugs (rebocadores)		2,0

Fonte: PIANC WG 33: *Guidelines for the Design of Fender Systems* (2002) – Tabela 4.2.5.

A seguir, a Tabela 3-32 apresenta os coeficientes obtidos a partir das Equações (3-35) a (3-37), da Tabela 3-30 e da Tabela 3-31, bem como os valores das energias de atracação característica e de projeto, obtidos a partir das Equações (3-34) e (3-38), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.3 e 2.7.

Tabela 3-32: Coeficientes e energias de atracação – PIANC.

C_m	1,50
C_b	0,67
$K (m)$	42,2
C_E	0,55
C_S	1,00
C_C	1,00
$E_D (kN \cdot m)$	564
C_{ab}	1,75
$E_{AB} (kN \cdot m)$	988

3.4.3.2. Seleção da Defesa de Projeto

Considerando-se que a defesa selecionada deve possuir capacidade de absorção de energia nominal superior ao valor de projeto obtido na Tabela 3-32, seleciona-se o modelo SCN 1400 F0.9 da *Fender Systems – Product Brochure* (TRELLEBORG MARINE AND INFRASTRUCTURE, 2020), como se apresenta na Figura 3-12.

Conforme define a PIANC WG 33 (2002), a pressão de contato entre a defesa e o casco não deve ultrapassar os valores da Tabela 3-33. Dessa forma define-se a dimensão do painel da defesa:

$$L_{panel} = \sqrt{\frac{1.200}{400}} \cong 1,7m \quad (3-39)$$

			F 0.9	F 1.0	F 1.1	F 1.2	F 1.3	F 1.4	F 1.5	F 1.6	F 1.7	F 1.8	F 1.9	F 2.0
1050	CV	E	392.0	435.0	446.6	458.2	469.8	481.4	493.0	504.4	515.8	527.2	538.6	550.0
		R	626.0	695.0	713.4	731.8	750.2	768.6	787.0	813.4	839.8	866.2	892.6	919.0
	RPD	E _R	427.3	474.2	486.8	499.4	512.1	524.7	537.4	549.8	562.2	574.6	587.1	599.5
		R _R	682.3	757.6	777.6	797.7	817.7	837.8	857.8	886.6	915.4	944.2	972.9	1001.7
1100	CV	E	450.0	500.0	513.6	527.2	540.8	554.4	568.0	581.4	594.8	608.2	621.6	635.0
		R	685.0	761.0	781.6	802.2	822.8	843.4	864.0	893.4	922.8	952.2	981.6	1011.0
	RPD	E _R	490.5	545.0	559.8	574.6	589.5	604.3	619.1	633.7	648.3	662.9	677.5	692.2
		R _R	746.7	829.5	851.9	874.4	896.9	919.3	941.8	973.8	1005.9	1037.9	1069.9	1102.0
1150	CV	E	514.1	570.3	585.5	600.7	616	631.2	646.4	661.6	676.8	692	707.2	722.4
		R	750	833.2	855.1	877.1	899	921	942.9	974.9	1007	1039	1071	1103
	RPD	E _R	560.3	621.7	638.2	654.8	671.4	688	704.5	721.1	737.7	754.3	770.9	787.4
		R _R	817.5	908.2	932.1	956	979.9	1003.9	1027.8	1062.7	1097.6	1132.5	1167.3	1202.2
1200	CV	E	585.0	650.0	667.6	685.2	702.8	720.4	738.0	755.4	772.8	790.2	807.6	825.0
		R	818.1	909.0	933.4	957.8	982.2	1006.6	1031.0	1066.0	1101.0	1136.0	1171.0	1206.0
	RPD	E _R	637.7	708.5	727.7	746.9	766.1	785.2	804.4	823.4	842.4	861.3	880.3	899.3
		R _R	891.7	990.8	1017.4	1044.0	1070.6	1097.2	1123.8	1161.9	1200.1	1238.2	1276.4	1314.5
1300	CV	E	742.5	825.0	847.0	869.0	891.0	913.0	935.0	957.0	979.0	1001.0	1023.0	1045.0
		R	957.6	1064.0	1092.4	1120.8	1149.2	1177.6	1206.0	1246.6	1287.2	1327.8	1368.4	1409.0
	RPD	E _R	805.6	895.1	919.0	942.9	966.7	990.6	1014.5	1038.3	1062.2	1086.1	1110.0	1133.8
		R _R	1039.0	1154.4	1185.3	1216.1	1246.9	1277.7	1308.5	1352.6	1396.6	1440.7	1484.7	1528.8
1400	CV	E	927.0	1030.0	1057.6	1085.2	1112.8	1140.4	1168.0	1195.4	1222.8	1250.2	1277.6	1305.0
		R	1111.5	1235.0	1268.0	1301.0	1334.0	1367.0	1400.0	1447.2	1494.4	1541.6	1588.8	1636.0
	RPD	E _R	1001.2	1112.4	1142.2	1172.0	1201.8	1231.6	1261.4	1291.0	1320.6	1350.2	1379.8	1409.4
		R _R	1200.4	1333.8	1369.4	1405.1	1440.7	1476.4	1512.0	1563.0	1614.0	1664.9	1715.9	1766.9
1600	CV	E	1381.5	1535.0	1576.6	1618.2	1659.8	1701.4	1743.0	1784.4	1825.8	1867.2	1908.6	1950.0
		R	1447.2	1608.0	1651.6	1695.2	1738.8	1782.4	1826.0	1888.0	1950.0	2012.0	2074.0	2136.0
	RPD	E _R	1478.2	1642.5	1687.0	1731.5	1776.0	1820.5	1865.0	1909.3	1953.6	1997.9	2042.2	2086.5
		R _R	1548.5	1720.6	1767.2	1813.9	1860.5	1907.2	1953.8	2020.2	2086.5	2152.8	2219.2	2285.5

Figura 3-12: Dados de Performance – Defensas Supercônicas.

Fonte: *Fender Systems – Product Brochure* (TRELLEBORG MARINE AND INFRASTRUCTURE, 2020)

Tabela 3-33: Valores limites para pressão no casco do navio – PIANC.

Tipo de Navio		Pressão no casco (kN/m^2)
Porta- Contêiners	1ª e 2ª Gerações	<400
	3ª Geração (Panamax)	<300
	4ª Geração	<250
	5ª e 6ª Gerações (Superpost Pamanax)	<200
Carga Geral	≤ 20.000 DWT	Entre 400 e 700
	> 20.000 DWT	<400
Navios-tanque de óleo		<300
		<350
VLCC		Entre 150 e 200
Gaseiros (LNG/LPG)		<200
Graneleiros		<200

Fonte: PIANC WG 33: *Guidelines for the Design of Fender Systems* (2002) – Tabela 4.4.1.

3.4.3.1. Carregamentos Devidos à Atracação

A Tabela 3-34 a seguir apresenta os cálculos das forças de sollicitação da defesa selecionada para os Cenários de Atracação I e II, conforme as definições apresentadas no item 3.4. Utilizaram-se os valores de energia e reação nominais obtidos a partir da Figura 3-12 e os percentuais de deformação e de força de reação sollicitada, a partir da curva de desempenho da defesa apresentada na Figura 2-8.

Tabela 3-34: Cálculo da reação para atracação em múltiplas defensas – PIANC.

R_{nom} (kN)		1.200
E_{nom} (kN · m)		1.001
$N_{defensas}$		7
$E_{N,1} = E_D/N_{defensas}$		141
$E_{N,1}/E_{nom}$		14%
$\delta_{N,1}/\delta_{nom}$		18%
$R_{N,1}/R_{nom}$		70%
$R_{N,1}$ (kN)		840
Cenário I Atracação em 1 defensa	F_y (kN)	1.200
	F_x (kN)	240
Cenário II Atracação em N defensas	F_y (kN)	840
	F_x (kN)	168

As cargas apresentadas na Tabela 3-34 foram aplicadas ao modelo estrutural, conforme os carregamentos de projeto *ATR* da Tabela 3-35 (Figura A. 49 à Figura A. 59).

Tabela 3-35: Carregamentos devidos à atracação aplicados à estrutura - PIANC.

Carregamento	F_y (kN)	F_x (kN)	Elemento
ATR1	-1.200	240	Defensa 1
ATR2	-1.200	240	Defensa 2
ATR3	-1.200	240	Defensa 3
ATR4	-1.200	240	Defensa 4
ATR5	-1.200	240	Defensa 5
ATR6	-1.200	240	Defensa 6
ATR7	-1.200	240	Defensa 7
ATR8	-1.200	240	Defensa 8
ATR9	-1.200	240	Defensa 9
ATR10	-1.200	240	Defensa 10
ATR11	-840	168	Defensas 2 a 8

3.5. Forças Devidas à Amarração (AM)

Este capítulo apresenta diferentes metodologias para cálculo das ações de vento e corrente nos navios e seus esforços resultantes em cabos de amarração. De maneira geral, formulações para determinação dessas ações ambientais apresentam o seguinte formato:

$$F = K \cdot C \cdot \rho \cdot area \cdot v^2 \quad (3-40)$$

onde:

- K fator numérico global, que inclui correções de unidades;
- C coeficiente de arrasto global;
- ρ densidade do fluido (ar ou água);
- v^2 velocidade de incidência do fluido no navio.

A partir deste conceito geral, as ações resultantes devidas ao vento e à corrente no navio podem ser representadas em dois tipos de sistemas de forças:

- Tipo I: uma resultante longitudinal ao comprimento do navio, uma resultante transversal e um momento fletor no plano horizontal, que atuam no centro de gravidade de navio;
- Tipo II: uma resultante longitudinal ao comprimento do navio e duas resultantes transversais, que atuam nas perpendiculares do navio à vante e à ré, à uma distância de L_{BP} entre si (comprimento entre perpendiculares).

A fim de se permitirem comparações entre metodologias, todas as ações resultantes serão avaliadas conforme resultantes do Tipo II (conforme se apresenta no item 6.1.5), calculando-se esforços equivalentes quando necessário. Vale ressaltar, ainda, que os métodos apresentados tomam como base eixos locais distintos entre si, tornando-se necessária uma conversão para o eixo global de projeto quando aplicável.

3.5.1. Conforme o BSI – A1

Para o cálculo dos esforços devidos à ação do vento e de correntes no navio amarrado, utiliza-se neste item o Anexo G.2 da BS 6349-1-2 – *Maritime Works – Part 1-2: General – Code of practice for assessment of actions* (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2016). Esta metodologia tem como base a atuação de duas forças resultantes transversais e uma longitudinal (Tipo II definido em 3.5), de acordo com o eixo local representado na Figura 3-13.

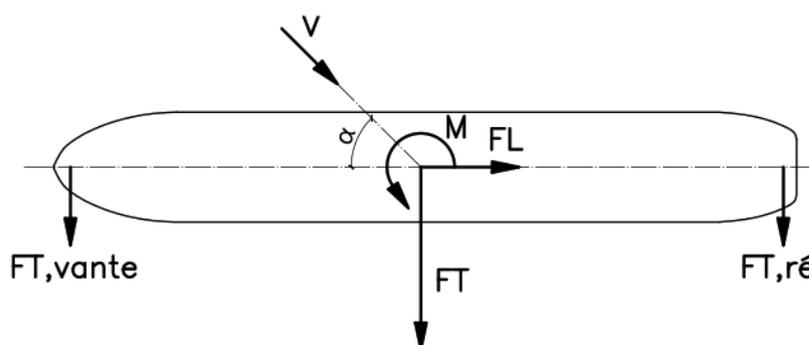


Figura 3-13: Forças Resultantes das Ações Ambientais no Navio – Elaborado conforme BS 6349-1-2.

3.5.1.1. Forças Devidas ao Vento no Navio

De acordo com a BS 6349-1-2 (2016), as forças transversais e a força longitudinal devidas ao vento incidente no navio são dadas, respectivamente, por:

$$F_{TW} = C_{TW} \rho_A A_L V_W^2 \cdot 10^{-4} \quad (3-41)$$

$$F_{LW} = C_{LW} \rho_A A_L V_W^2 \cdot 10^{-4} \quad (3-42)$$

onde:

F_{TW} força transversal devida à ação do vento, à ré ou à vante (em kN);

F_{LW} força longitudinal devida à ação do vento (em kN);

C_{TW} coeficiente de força transversal do vento (Figura 3-14);

C_{LW} coeficiente de força longitudinal do vento (Figura 3-14);

ρ_A densidade do ar (igual a $1,25 \text{ kg/m}^3$);

A_L área longitudinal do navio projetada acima no nível da água (em m^2);

V_W velocidade do vento de projeto (em m/s).

Vale ressaltar que as fórmulas (3-41) e (3-42) apresentavam uma pequena inconsistência com relação às suas unidades na edição mencionada da norma britânica BS 6349-1-2 (2016). Desta forma, as equações apresentadas neste trabalho estão em conformidade com a edição anterior BS 6349-1 (2000), também reproduzida pela PIANC WG 116 (2012).

A Tabela 3-36, a seguir, apresenta coeficientes obtidos a partir do ábaco (a) da Figura 3-14, para o Estudo de Caso deste trabalho. Na sequência, a Tabela 3-37 apresenta as forças resultantes devidas à ação do vento no navio, calculadas a partir das Equações (3-41) e (3-42), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.3 e 2.8.

Tabela 3-36: Coeficientes para cálculo da ação do vento no navio conforme – BSI.

α (°)	$C_{TW,ré}$	$C_{TW,vante}$	C_{LW}
150	1,40	0,70	-0,70
90	1,90	1,75	0,20
60	1,50	1,85	0,40

Tabela 3-37: Forças devidas à ação do vento no navio – BSI.

α (°)	$F_{TW,ré}$ (kN)	$F_{TW,vante}$ (kN)	F_{LW} (kN)
150	142	71	-71
90	193	178	20
60	152	188	41

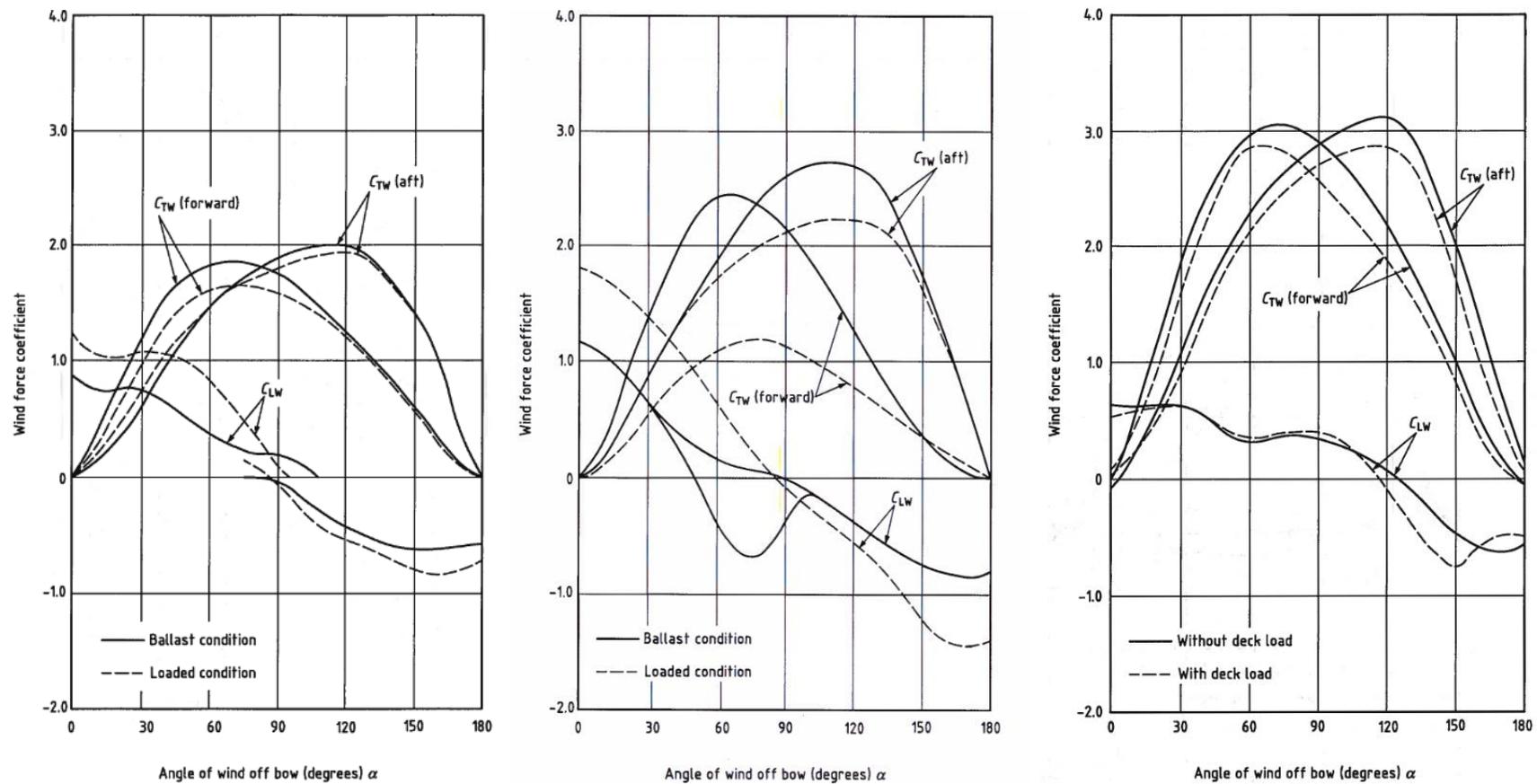


Figura 3-14: Coeficientes de força de vento para: (a) navios de cargas secas e navios-tanque pequenos, (b) navios-tanque grandes com superestrutura à ré, (c) navios Porta-Contêiners.

Fonte: BS 6349-1-2 – *Maritime Works – Part 1-2: General – Code of practice for assessment of actions* – Figura G.1.

3.5.1.2. Forças Devidas à Corrente no Navio

De acordo com a BS 6349-1-2 (2016), a força longitudinal e as forças transversais devidas à corrente incidente no navio são dadas, respectivamente, por:

$$F_{TC} = C_{TC} C_{CT} \rho L_{BP} d_m V_C^2 \cdot 10^{-3} \quad (3-43)$$

$$F_{LC} = C_{LC} C_{CL} \rho L_{BP} d_m V_C^2 \cdot 10^{-3} \quad (3-44)$$

onde:

- F_{TC} força transversal devida à ação da corrente, à ré ou à vante (em kN);
- F_{LC} força longitudinal devida à ação da corrente (em kN);
- C_{TC} coeficiente de arrasto transversal da corrente (Figura 3-15);
- C_{LC} coeficiente de arrasto longitudinal da corrente (Figura 3-15);
- C_{CT} coeficiente transversal de correção de profundidade (Figura 3-16);
- C_{CL} coeficiente longitudinal de correção de profundidade (Figura 3-17);
- ρ densidade da água (igual a 1.025 kg/m^3);
- L_{BP} comprimento do navio entre perpendiculares (em m);
- d_m calado médio do navio (em m);
- V_C velocidade da corrente de projeto (em m/s).

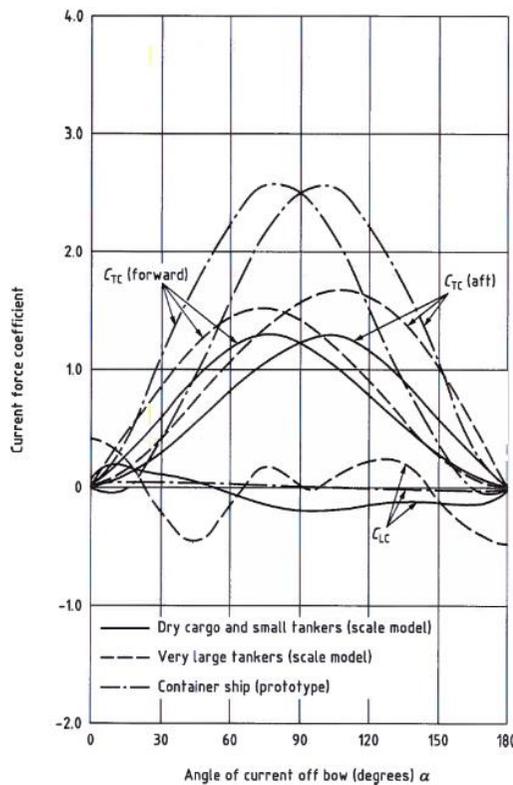


Figura 3-15: Coeficientes de arrasto de corrente para águas profundas para todos os tipos de navio.

Fonte: BS 6349-1-2 – *Maritime Works – Part 1-2: General – Code of practice for assessment of actions* – Figura G.4.

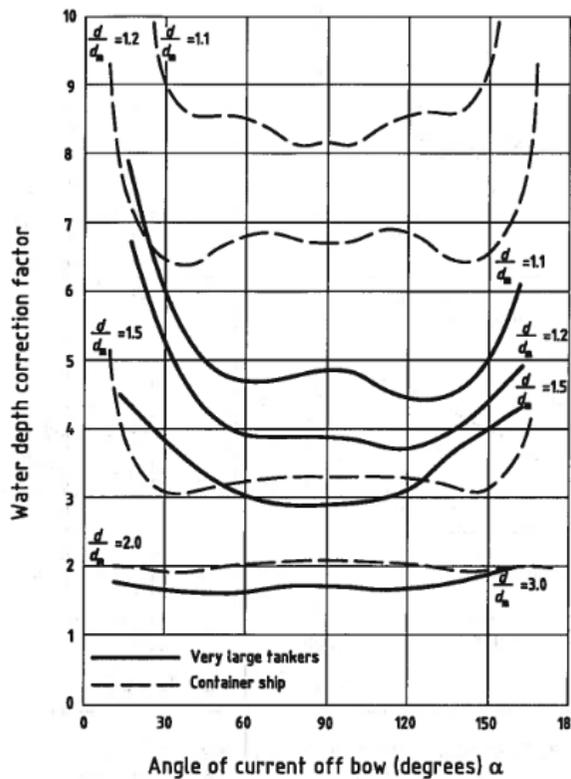


Figura 3-16: Coeficientes transversais de correção de profundidade para navios Porta-Contêineres.

Fonte: BS 6349-1-2 – *Maritime Works – Part 1-2: General – Code of practice for assessment of actions* – Figura G.5.

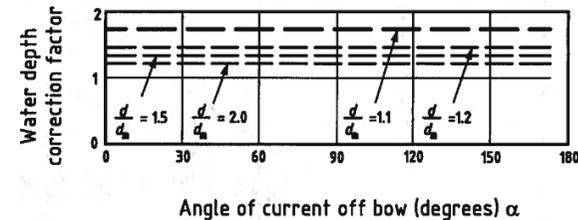


Figura 3-17: Coeficientes longitudinais de correção de profundidade para navios Porta-Contêineres.

Fonte: BS 6349-1-2 – *Maritime Works – Part 1-2: General – Code of practice for assessment of actions* – Figura G.6.

A Tabela 3-38 a seguir apresenta os coeficientes obtidos a partir dos ábacos da Figura 3-15 (para navios de carga seca), Figura 3-16 (para navios-tanque) e da Figura 3-17. Cabe ressaltar que esta norma não apresenta valores para todos os coeficientes de cálculo especificamente aplicáveis ao navio de projeto deste estudo. Desta maneira, quando necessário, fez-se uso de aproximações, utilizando-se ábacos aplicáveis a outros tipos de navio similares.

Na sequência, a Tabela 3-39 apresenta as forças resultantes devidas à ação da corrente navio, calculadas a partir das Equações (3-43) e (3-44), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.3 e 2.8.

Tabela 3-38: Coeficientes para cálculo da ação da corrente no navio – BSI.

α_c (°)	$C_{TC,ré}$	$C_{TC,vante}$	C_{CT}	C_{LC}	C_{CL}
170	0,20	0,10	4,40	-0,12	1,00

Tabela 3-39: Forças devidas à ação da corrente no navio – BSI.

α_c (°)	$F_{TC,ré}$ (kN)	$F_{TC,vante}$ (kN)	F_{LC} (kN)
170	197	99	-27

3.5.1.3. Forças nos Pontos de Amarração e Seleção do Cabeço

A partir dos valores obtidos para as forças resultantes no navio devidas às ações de vento e de corrente apresentadas na Tabela 3-37 e na Tabela 3-39, respectivamente, calculam-se as forças ambientais totais no sistema global de coordenadas, apresentadas na Tabela 3-40. Essas ações são aplicadas no modelo de amarração descrito no item 2.8 deste trabalho, a fim de se determinarem as trações em cada ponto de amarre, apresentadas na Tabela 3-41.

Tabela 3-40: Forças Totais no Navio Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – BSI.

θ_w (°)	θ_c (°)	F_y (kN)	F_x (kN)	M_{xy} (kN)
30	10	509	98	-28.694
90		667	7	-19.252
120		636	-14	-10.669

Tabela 3-41: Forças Totais por Ponto de Amarração Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – BSI.

θ_w (°)	Proa (kN)		Popa (kN)		Springues (kN)
	Lançante	Través	Lançante	Través	
30	76	325	137	15	21
90	176	365	113	69	20
120	203	313	93	80	19

Com estes valores, definem-se a carga de ruptura da amarra de projeto do navio (MBL) e a capacidade do cabeço de amarração selecionado, apresentadas na Tabela 3-42, conforme os critérios de projeto definidos em 2.8.

Tabela 3-42: Cálculo da Capacidade de Carga das Amarras e do Cabeço de Amarração – BSI.

T_{ponto} (kN)	T_{linha} (kN)	FS	MLB (kN)	Amarras/Cabeço	Capacidade do Cabeço (kN)
365	182	2	375	2	750

Em seguida, definem-se os carregamentos devidos à amarração para dimensionamento da estrutura, aplicados ao modelo conforme a Tabela 3-43 (Figura A. 60 à Figura A. 70) . Os carregamentos *AM1* a *AM3* foram definidos a partir das trações nos pontos de amarração obtidas para as situações de carregamento de projeto, conforme a Tabela 3-41, enquanto os carregamentos *AM4* a *AM11* foram definidos com base na capacidade máxima de carga dos dispositivos de amarração apresentada na Tabela 3-42.

Tabela 3-43: Carregamentos devidos à amarração aplicados à estrutura - BSI.

Carregamento	T (kN)	θ (°)	F_y (kN)	F_x (kN)	Elemento
AM1	137	45	97	97	Cabeço 1
	15	90	15	0	Cabeço 2
	21	10	4	21	Cabeço 6
	325	90	325	0	Cabeço 9
	137	135	97	-97	Cabeço 10
AM2	113	45	80	80	Cabeço 1
	69	90	69	0	Cabeço 2
	20	170	4	-20	Cabeço 5
	365	90	365	0	Cabeço 9
	176	135	124	-124	Cabeço 10
AM3	93	45	66	66	Cabeço 1
	80	90	80	0	Cabeço 2
	19	170	3	-19	Cabeço 5
	313	90	313	0	Cabeço 9
	203	135	143	-143	Cabeço 10
AM4	750	45	530	530	Cabeço 1
AM5	750	135	530	-530	Cabeço 10
AM6	750	45	530	530	Cabeço 2
AM7	750	135	530	-530	Cabeço 9
AM8	750	90	750	0	Cabeço 2
AM9	750	90	750	0	Cabeço 9
AM10	750	170	130	-739	Cabeço 5
AM11	750	10	130	739	Cabeço 6

3.5.2. Conforme a ROM – A2

Para o cálculo dos esforços devidos à ação do vento e de correntes no navio amarrado, utilizam-se neste item as Tabelas 3.4.2.3.5.9 e 3.4.2.3.5.10 da ROM 0.2-90: *Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias* (MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO, 1990). Esta metodologia tem como base a atuação de uma força resultante transversal, uma longitudinal e um momento horizontal (Tipo I definido em 3.5), de acordo com o eixo local representado na Figura 3-18 e na Figura 3-19.

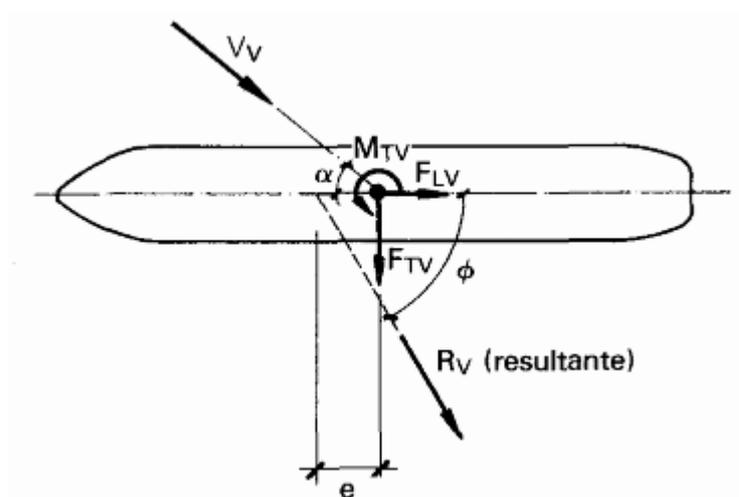


Figura 3-18: Forças Resultantes das Ações de Vento no Navio – ROM.

Fonte: ROM 0.2-90: *Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias* (MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO, 1990) – Tabela 3.4.2.3.5.9.

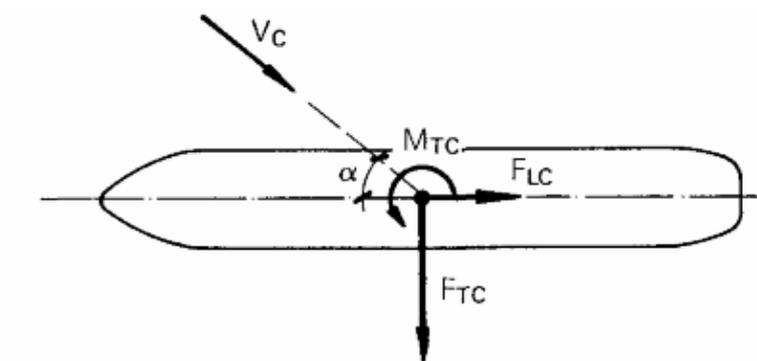


Figura 3-19: Forças Resultantes das Ações de Corrente no Navio – ROM.

Fonte: ROM 0.2-90: *Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias* (MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO, 1990) – Tabela 3.4.2.3.5.10.

3.5.2.1. Forças Devidas ao Vento no Navio

De acordo com a ROM 0.2-90 (1990), as forças transversal e longitudinal e o momento horizontal devidos ao vento incidente no navio são obtidos, respectivamente, por:

$$F_{TV} = R_V \cos \emptyset \quad (3-45)$$

$$F_{LV} = R_V \sen \emptyset \quad (3-46)$$

$$M_{TV} = F_{TV}e = F_{TV}K_eL \quad (3-47)$$

sendo:

$$R_V = \frac{\rho}{2g} C_V V_V^2 (A_T \cos^2 \alpha + A_L \sen^2 \alpha) \quad (3-48)$$

$$\tg \emptyset = \frac{A_L}{A_T} \tg \alpha \quad (3-49)$$

onde:

- F_{TV} força transversal devida à ação do vento (em tf);
- F_{LV} força longitudinal devida à ação do vento (em tf);
- M_{TV} momento horizontal devido à ação do vento (em $tf \cdot m$);
- R_V força resultante horizontal devida à ação do vento (em tf);
- \emptyset ângulo entre o eixo longitudinal do navio e R_V , de popa a proa;
- α ângulo entre o eixo longitudinal do navio e o vento, de proa a popa;
- ρ_A densidade do ar (igual a $1,225 \cdot 10^{-3} t/m^3$);
- V_V velocidade do vento de projeto (em m/s);
- g aceleração da gravidade (igual a $9,81 m/s^2$);

- C_V fator de forma adimensional (na ausência de estudos, igual a 1,3);
- K_e coeficiente de excentricidade, adimensional (Figura 3-20 e Figura 3-21);
- L comprimento do navio (em m).

Cabe mencionar que a norma ROM 0.2-90 (1990) apresenta valores de cálculo para o coeficiente K_e em formato discreto, em tabela. Com o objetivo de facilitar a obtenção do valor de cálculo para este Estudo de Caso e de se permitir a análise do formato da curva de interação, desenvolveram-se os ábacos da Figura 3-20 e Figura 3-21.

A Tabela 3-44 a seguir apresenta os coeficientes obtidos a partir do ábaco da Figura 3-21 (em lastro) para o Estudo de Caso deste trabalho. Na sequência, a Tabela 3-45 apresenta as forças resultantes devidas à ação do vento no navio, calculadas a partir das Equações (3-45) a (3-49), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.3 e 2.8.

Tabela 3-44: Coeficientes para cálculo da ação do vento no navio – ROM.

α (°)	C_V	R_V	ϕ (°)	K_e
150	1,30	243	106	-0,33
90		652	90	-0,04
60		516	85	0,05

Tabela 3-45: Forças devidas à ação do vento no navio – ROM.

α (°)	F_{TV} (kN)	F_{LV} (kN)	M_{TV} (kN.m)
150	234	-67	-13.749
90	652	0	-4.644
60	514	49	4.572

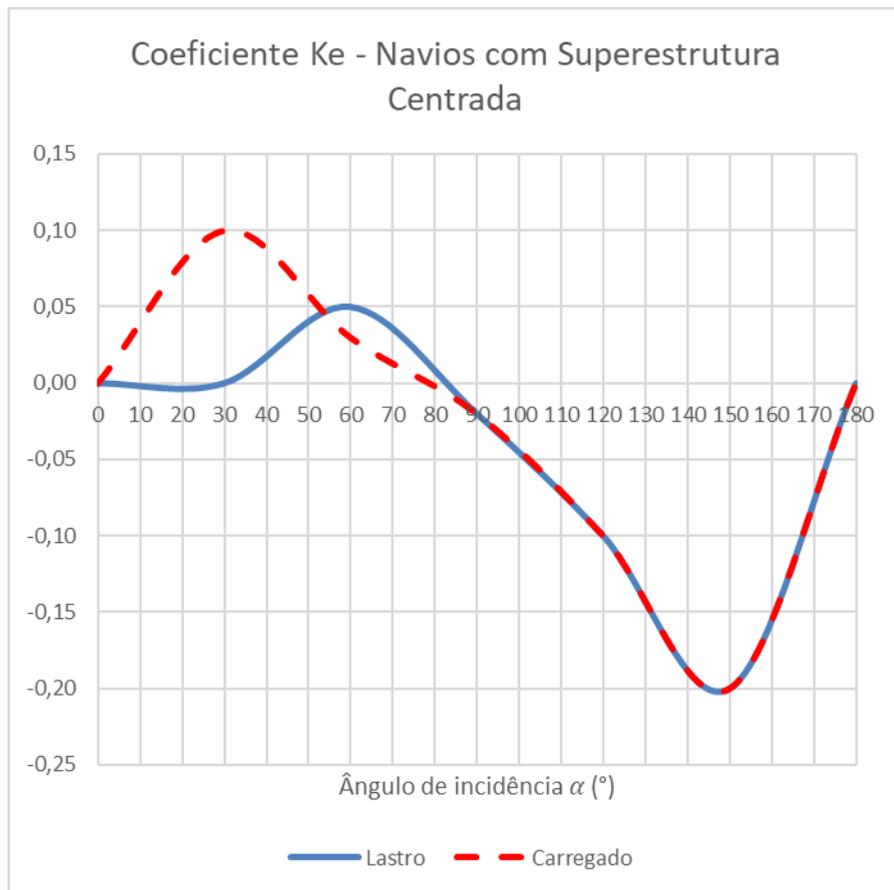


Figura 3-20: Coeficiente de excentricidade para navios com superestrutura centrada.

Fonte: Elaborado a partir de ROM 0.2-90: *Ações em el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias* (1990).

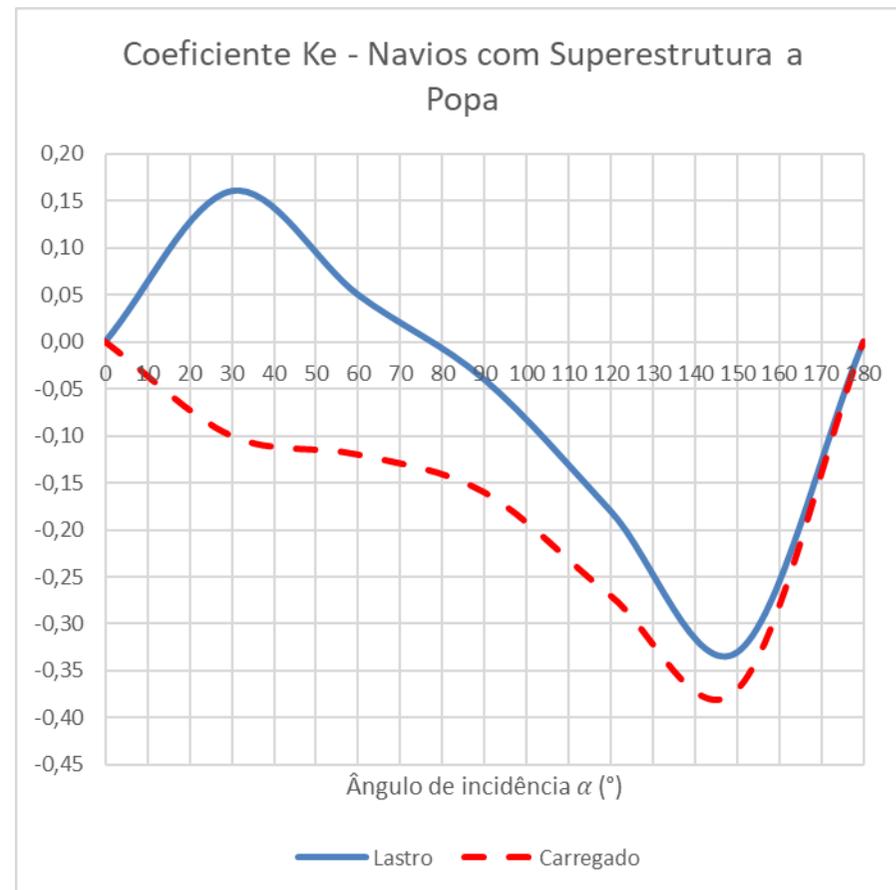


Figura 3-21: Coeficiente de excentricidade para navios com superestrutura a popa.

Fonte: Elaborado a partir de ROM 0.2-90: *Ações em el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias* (1990).

3.5.2.2. Forças Devidas à Corrente no Navio

De acordo com a ROM 0.2-90 (1990), as forças transversal e longitudinal e o momento horizontal devidos à pressão da corrente incidente no navio são obtidos, respectivamente, por:

$$F_{TC} = \frac{\gamma_w}{2g} C_{TC} V_C^2 A_{LC} \sin \alpha \quad (3-50)$$

$$F_{LC} = \pm \frac{\gamma_w}{2g} C_{LC} V_C^2 A_{TC} \quad (3-51)$$

$$M_{TC} = F_{TC} e = F_{TC} K_{ee} L \quad (3-52)$$

onde:

- F_{TC} força transversal de pressão devida à corrente (em tf);
- F_{LC} força longitudinal de pressão devida à corrente (em tf);
- M_{TC} momento horizontal de pressão devido à corrente (em $tf \cdot m$);
- α ângulo entre o eixo longitudinal do navio e a corrente, de proa a popa;
- γ_w peso específico da água (igual a $1,03 t/m^3$);
- V_C velocidade da corrente de projeto (em m/s);
- g aceleração da gravidade (igual a $9,81 m/s^2$);
- C_{TC} fator transversal que depende de profundidade do leito (Figura 3-22);
- C_{LC} fator longitudinal de forma da proa (na ausência de estudos, igual a 0,6);
- A_{LC} área longitudinal submersa (na ausência de dados, igual a $(L_{BP} \cdot D)$);
- A_{TC} área transversal submersa (na ausência de dados, igual a $(B \cdot D)$);
- B boca do navio (em m);
- D calado do navio (em m);

K_{ec} coeficiente de excentricidade, adimensional (Figura 3-23).

Cabe mencionar que a norma ROM 0.2-90 (1990) apresenta valores de cálculo para o coeficiente K_{ec} em formato discreto, em tabela, a partir da qual se desenvolveu o ábaco da Figura 3-23.

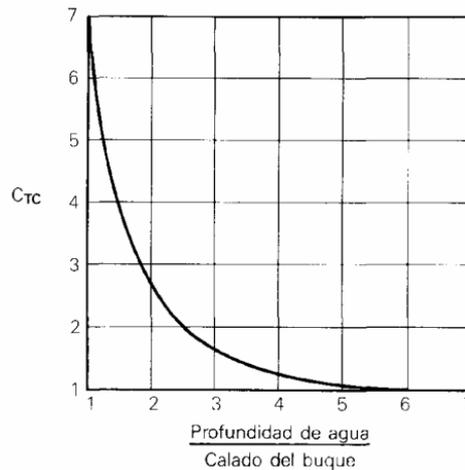


Figura 3-22: Fator de forma transversal para efeito de profundidade do leito.

Fonte: Elaborado a partir de ROM 0.2-90: *Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias* (1990) – Tabela 3.4.2.3.5.10.

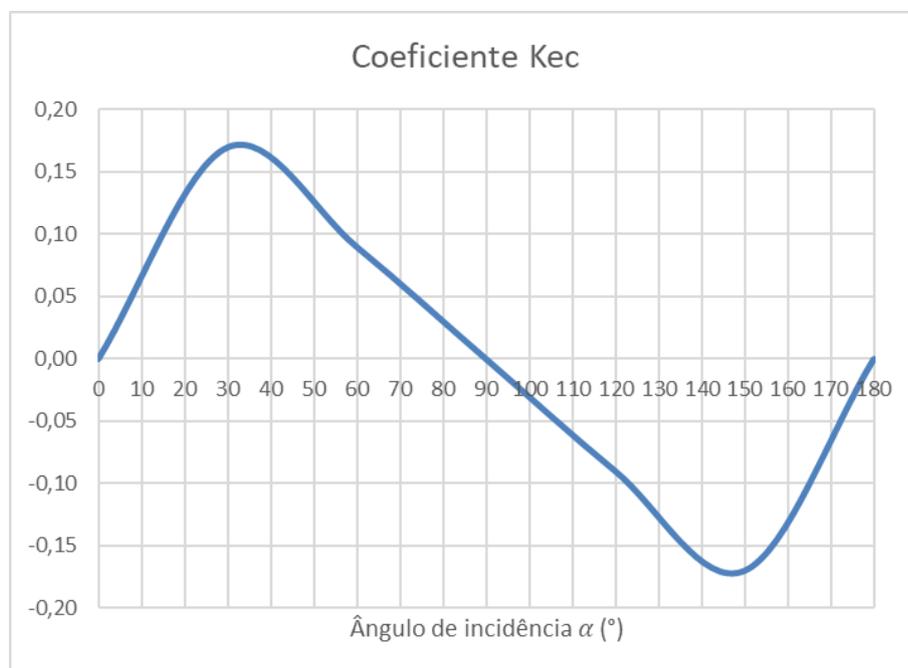


Figura 3-23 Coeficiente excentricidade para ação de corrente.

Fonte: Elaborado a partir de ROM 0.2-90: *Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias* (1990).

Às ações de pressão devidas à corrente somam-se os efeitos de fricção da corrente no casco do navio, que são determinados a partir das seguintes equações:

$$F'_{TC} = \frac{\gamma_w}{2g} C_r V_C^2 A'_{TC} \sin^2 \alpha \quad (3-53)$$

$$F'_{LC} = \pm \frac{\gamma_w}{2g} C_r V_C^2 A'_{LC} \cos^2 \alpha \quad (3-54)$$

onde:

- F_{TC} força transversal de fricção devida à corrente (em *tf*);
- F_{LC} força longitudinal de fricção devida à corrente (em *tf*);
- C_R coeficiente de fricção (igual a 0,001 para navios novos ou igual a 0,005 para navios em serviço);
- A'_{TC} área molhada transversalmente, na direção da corrente (na ausência de dados, igual a $[(L_{BP} + 2D) \cdot B]$);
- A'_{LC} área molhada longitudinalmente, na direção da corrente (na ausência de dados, igual a $[(B + 2D) \cdot L_{BP}]$).

A seguir, a Tabela 3-46 apresenta coeficientes de cálculo obtidos para o Estudo de Caso deste trabalho e as ações devidas ao efeito de pressão e fricção da corrente, calculadas a partir das Equações (3-50) a (3-54), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.3 e 2.8. Na sequência, a Tabela 3-47 apresenta as forças resultantes totais devidas à ação da corrente no navio.

Tabela 3-46: Coeficientes para cálculo da ação da corrente no navio – ROM.

Pressão	α (°)	170
	C_{TC}	3,90
	F_{TC} (kN)	777
	C_{LC}	0,60
	F_{LC} (kN)	-105
	K_{ec}	-0,07
	M_{TC} (kN.m)	-9.675
Fricção	C_r	0,004
	F'_{TC} (kN)	0
	F'_{LC} (kN)	-20

Tabela 3-47: Forças devidas à ação da corrente no navio – ROM.

α (°)	F_{TC} (kN)	F_{LC} (kN)	M_{TC} (kN.m)
170	777	-124	-9.675

3.5.2.3. Forças nos Pontos de Amarração e Seleção do Cabeço

A partir dos valores obtidos para as forças resultantes no navio devidas às ações de vento e de corrente apresentadas na Tabela 3-45 e na Tabela 3-47, respectivamente, calculam-se as forças ambientais totais no sistema global de coordenadas, apresentadas na Tabela 3-48. Essas ações são aplicadas no modelo de amarração descrito no item 2.8 deste trabalho, a fim de se determinarem as trações em cada ponto de amarre, apresentadas na Tabela 3-49.

Tabela 3-48: Forças Totais no Navio Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – ROM.

θ_w (°)	θ_c (°)	F_y (kN)	F_x (kN)	M_{xy} (kN)
30	10	1.011	191	-23.424
90		1.429	124	-14.320
120		1.291	76	-5.104

Tabela 3-49: Forças Totais por Ponto de Amarração Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – ROM.

θ_w (°)	Proa (kN)		Popa (kN)		Springues (kN)
	Lançante	Través	Lançante	Través	
30	336	480	232	42	59
90	545	619	254	123	44
120	524	528	209	133	43

Com estes valores, definem-se a carga de ruptura da amarra de projeto do navio (MBL) e a capacidade do cabeço de amarração selecionado, apresentadas na Tabela 3-50, conforme os critérios de projeto definidos em 2.8.

Tabela 3-50: Cálculo da Capacidade de Carga das Amarras e do Cabeço de Amarração – ROM.

T_{ponto} (kN)	T_{linha} (kN)	FS	MLB (kN)	Amarras/Cabeço	Capacidade do Cabeço (kN)
619	310	2	625	2	1.250

Em seguida, definem-se os carregamentos devidos à amarração para dimensionamento da estrutura, aplicados ao modelo conforme a Tabela 3-51 (Figura A. 71 à Figura A. 81). Os carregamentos AM1 a AM3 foram definidos a partir das trações nos pontos de amarração obtidas para as situações de carregamento de projeto, conforme a Tabela 3-49, enquanto os carregamentos AM4 a AM11 foram definidos com base na capacidade máxima de carga dos dispositivos de amarração apresentada na Tabela 3-50.

Tabela 3-51: Carregamentos devidos à amarração aplicados à estrutura - ROM.

Carregamento	T (kN)	θ (°)	F_y (kN)	F_x (kN)	Elemento
AM1	232	45	164	164	Cabeço 1
	42	90	42	0	Cabeço 2
	59	10	10	58	Cabeço 6
	480	90	480	0	Cabeço 9
	336	135	237	-237	Cabeço 10
AM2	254	45	180	180	Cabeço 1
	123	90	123	0	Cabeço 2
	44	10	8	44	Cabeço 6
	619	90	619	0	Cabeço 9
	545	135	386	-386	Cabeço 10
AM3	209	45	148	148	Cabeço 1
	133	90	133	0	Cabeço 2
	43	10	7	42	Cabeço 6
	528	90	528	0	Cabeço 9
	524	135	371	-371	Cabeço 10
AM4	1.250	45	884	884	Cabeço 1
AM5	1.250	135	884	-884	Cabeço 10
AM6	1.250	45	884	884	Cabeço 2
AM7	1.250	135	884	-884	Cabeço 9
AM8	1.250	90	1.250	0	Cabeço 2
AM9	1.250	90	1.250	0	Cabeço 9
AM10	1.250	170	217	-1.231	Cabeço 5
AM11	1.250	10	217	1.231	Cabeço 6

3.5.3. Conforme a UFC – B1

Para o cálculo dos esforços devidos à ação do vento e de correntes no navio amarrado, utiliza-se neste item os Capítulo 4 da UFC 4-159-03: *Unified Facilities Criteria – Moorings* (U. S. DEPARTMENT OF DEFENSE, 2020). Esta metodologia tem como base a atuação de uma força resultante transversal, uma longitudinal e um momento horizontal (Tipo I definido em 3.5), conforme o eixo local representado na Figura 3-24.

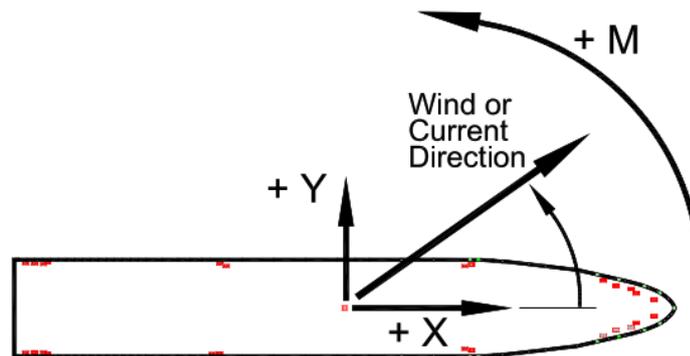


Figura 3-24: Forças Resultantes das Ações de Vento e Corrente no Navio – UFC.

Fonte: UFC 4-159-03 – *Unified Facilities Criteria – Moorings* (2020) – Figura 4-2.

3.5.3.1. Forças Devidas ao Vento no Navio

De acordo com a UFC 4-159-03 (2020), as forças transversal e longitudinal e o momento horizontal devidos ao vento incidente no navio são dados, respectivamente, por:

$$F_{yw} = 0,5\rho_a v_w^2 A_y C_{yw} f_{yw}(\theta_w) \cdot 10^{-3} \quad (3-55)$$

$$F_{xw} = 0,5\rho_a v_w^2 A_x C_{xw} f_{xw}(\theta_w) \cdot 10^{-3} \quad (3-56)$$

$$M_{xyw} = 0,5\rho_a v_w^2 A_y L C_{xyw}(\theta_w) \cdot 10^{-3} \quad (3-57)$$

onde:

F_{yw} força transversal devida à ação do vento (em kN);

F_{xw} força longitudinal devida à ação do vento (em kN);

M_{xyw} momento horizontal devido à ação do vento (em $kN \cdot m$);

ρ_a	densidade do ar (igual a $1,221 \text{ kg/m}^3$);
v_w	velocidade do vento de projeto (em m/s);
θ_w	ângulo de incidência do vento;
A_y	área longitudinal do navio projetada acima no nível d'água (m^2);
A_x	área transversal do navio projetada acima no nível d'água (m^2);
C_{yw}	coeficiente transversal de arrasto do vento (Equação (3-58));
$f_{yw}(\theta_w)$	função de forma para força transversal (Figura 3-25);
C_{xw}	coeficiente longitudinal de arrasto do vento (para navios com superestrutura típica à ré, $C_{xw,vante} = 0,70$ e $C_{xw,ré} = 0,60$);
$f_{xw}(\theta_w)$	função de forma para força longitudinal (Equação (3-59)).
L	comprimento do navio (em m);
$C_{xyw}(\theta_w)$	coeficiente de momento horizontal (Equações (3-62) e (3-63)).

O coeficiente transversal de arrasto do vento é dado por

$$C_{yw} = \frac{C}{A_y} \left[\left(0,5 \frac{(h_s + h_h)}{h_r} \right)^{\frac{2}{7}} A_s + \left(0,5 \frac{h_h}{h_r} \right)^{\frac{2}{7}} A_h \right] \quad (3-58)$$

onde:

C	coeficiente empírico (igual a 0,92 para superestrutura típica);
h_r	altura de referência (igual a $10m$);
h_h	altura média do casco do navio (igual a A_h/L_w);
A_h	área longitudinal de exposição ao vento do casco do navio (m^2);
L_w	comprimento do navio no nível d'água (em m);
h_s	altura da superestrutura do navio acima do nível d'água (em m);
A_s	área longitudinal de exposição ao vento da superestrutura (em m^2).

A função de forma para a força transversal $f_{yw}(\theta_w)$ é obtida pela Figura 3-25:

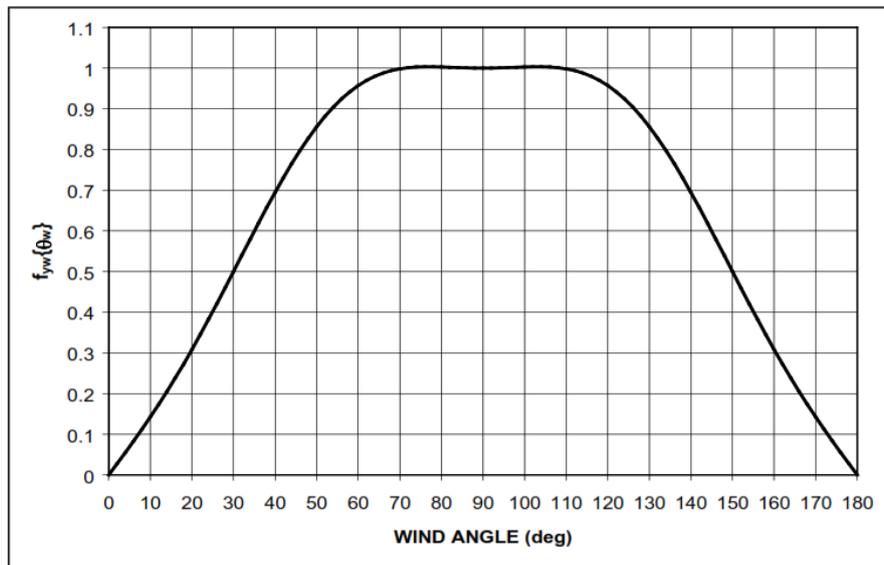


Figura 3-25: Função de forma para força transversal devida ao vento.

Fonte: UFC 4-159-03 – *Unified Facilities Criteria – Moorings* (2020) – Figura 4-4.

A função de forma longitudinal é dada por:

$$f_{xw}(\theta_w) = \cos \phi \quad (3-59)$$

onde:

θ_x ângulo em que a força longitudinal inverte o sinal (igual a 80° para navios típicos com superestrutura à ré).

Sendo a função ϕ dada por:

$$\phi^- = \left(\frac{90^\circ}{\theta_x}\right) \theta_w \quad \text{para } \theta_w < \theta_x \quad (3-60)$$

$$\phi^+ = \left(\frac{90^\circ}{180^\circ - \theta_x}\right) (\theta_w - \theta_x) + 90^\circ \quad \text{para } \theta_w > \theta_x \quad (3-61)$$

O valor do coeficiente de momento horizontal é dado por:

$$C_{xyw}(\theta_w) = -a_1 \operatorname{sen}\left(\frac{\theta_w \cdot 180^\circ}{\theta_z}\right) \text{ para } 0 < \theta_w < \theta_z \quad (3-62)$$

$$C_{xyw}(\theta_w) = a_2 \operatorname{sen}\left[(\theta_w - \theta_z) \left(\frac{180}{180 - \theta_z}\right)\right] \text{ para } \theta_z \leq \theta_w < 180^\circ \quad (3-63)$$

onde:

- a_1 valor de pico negativo normalizado (igual a 0,096 para navios típicos com superestrutura à ré);
- a_2 valor de pico positivo normalizado (igual a 0,029 para navios típicos com superestrutura à ré);
- θ_z ângulo que gera momento horizontal nulo (igual a 102° para navios típicos com superestrutura à ré).

A seguir, a Tabela 3-52 apresenta coeficientes obtidos a partir da Figura 3-25 e das Equações (3-58) a (3-63), para o Estudo de Caso deste trabalho. Na sequência, a Tabela 3-53 apresenta as forças resultantes devidas à ação do vento no navio, calculadas a partir das Equações (3-55) a (3-57), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.3 e 2.8.

Tabela 3-52: Coeficientes para cálculo da ação do vento no navio – UFC.

θ_w (°)	F_{yw} (kN)		F_{xw} (kN)				M_{xyw} (kNm)			
	C_{yw}	f_{yw}	θ_x (°)	C_{xw}	ϕ (°)	f_{xw}	θ_z (°)	a_1	a_2	C_{xyw}
30	0,91	0,50	80	0,60	33,8	0,83	102	0,096	0,029	-0,07661
90		1,00		0,60	261,0	-0,16				-0,03468
120		0,96		0,70	234,0	-0,59				0,01923

Tabela 3-53: Forças devidas à ação do vento no navio conforme – UFC.

θ_w (°)	F_{yw} (kN)	F_{xw} (kN)	M_{xyw} (kN.m)
30	227	41	-6.820
90	455	-8	-3.087
120	436	-34	1.712

3.5.3.2. Forças Devidas à Corrente no Navio

De acordo com a UFC 4-159-03 (2020), a força transversal devida à corrente incidente no navio é dada por:

$$F_{yc} = 0,5\rho_w v_c^2 L_{wL} TC_{yc} \text{ sen } \theta_c \cdot 10^{-3} \quad (3-64)$$

$$F_{xc} = F_{x,forma} + F_{x,fricção} + F_{x,prop} \quad (3-65)$$

$$F_{x,forma} = 0,5\rho_w v_c^2 BT C_{xcb} \text{ cos } \theta_c \cdot 10^{-3} \quad (3-66)$$

$$F_{x,fricção} = 0,5\rho_w v_c^2 SC_{xca} \text{ cos } \theta_c \cdot 10^{-3} \quad (3-67)$$

$$F_{x,prop} = 0,5\rho_w v_c^2 A_p C_{prop} \text{ cos } \theta_c \cdot 10^{-3} \quad (3-68)$$

$$M_{xyc} = F_{yc} \left(\frac{e_c}{L_{wL}} \right) L_{wL} \quad (3-69)$$

onde:

F_{yx}	força transversal devida à ação da corrente (em kN);
F_{xc}	força longitudinal total devida à ação da corrente (em kN);
$F_{x,forma}$	força longitudinal de forma ou pressão (em kN);
$F_{x,fricção}$	força longitudinal devida ao atrito de superfície (em kN);
$F_{x,prop}$	força longitudinal devida ao arrasto dos propulsores (em kN);
M_{xyc}	momento horizontal devido à ação da corrente (em $kN \cdot m$);
ρ_w	densidade da água (igual a 1.026 kg/m^3);
v_c	velocidade da corrente de projeto (em m/s);
θ_c	ângulo de incidência do da corrente;
L_{wL}	o comprimento do navio no nível d'água (em m);

T	calado do navio (em m);
B	boca do navio (em m);
C_{yc}	coeficiente de arrasto de corrente transversal (Figura 3-26);
C_{xcb}	coeficiente de arrasto de corrente longitudinal (igual a 0,1);
S	área da superfície molhada (Equação (3-71));
C_{xca}	coeficiente de fricção da superfície molhada (Equação (3-72));
A_p	área expandida da hélice do propulsor (Equação (3-74));
C_{prop}	coeficiente de arrasto dos propulsores (igual a 1,0);
e_c	excentricidade da força transversal (Equações (3-76) e (3-77)).

O coeficiente de arrasto de corrente transversal é determinado pela Figura 3-26:

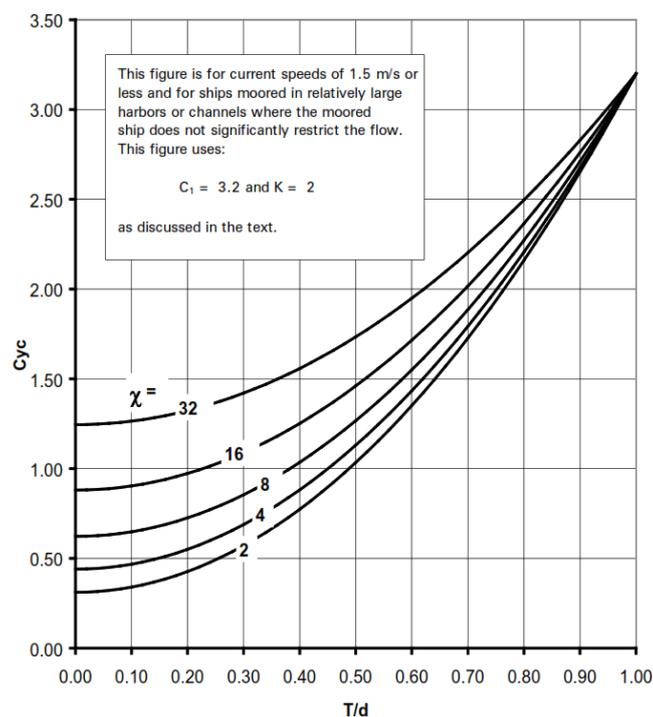


Figura 3-26: Coeficientes de arrasto transversal para ação de corrente no navio.

Fonte: UFC 4-159-03 – *Unified Facilities Criteria – Moorings* (2020) – Figura 4-9.

Sendo os parâmetros de entrada para o ábaco anterior: a relação entre o calado do navio e a profundidade do leito T/d e o coeficiente adimensional, dado por:

$$\chi = L_{WL}^2 \frac{A_m}{B \cdot V} \quad (3-70)$$

onde:

A_m área da seção transversal submersa (em m);

V volume submerso do navio (*deslocamento*/ ρ_w , em m^3).

O valor da superfície molhada sujeita à fricção é dado por:

$$S = 1,7TL_{WL} + \left(\frac{D}{T\gamma_w} \right) \quad (3-71)$$

onde:

D deslocamento do navio (em N);

γ_w peso específico da água (em N/m^3).

O valor do coeficiente de fricção longitudinal é determinado por:

$$C_{xca} = \frac{0,075}{(\log_{10} R_N - 2)^2} \quad (3-72)$$

onde:

R_N Número de Reynolds, dado por:

$$R_N = \left| \frac{v_c L_{WL} \cos \theta_c}{\nu} \right| \quad (3-73)$$

sendo:

ν viscosidade cinemática da água (igual a $1,191 \cdot 10^{-6} m^2/s$).

O valor da área expandida da hélice do propulsor A_p é determinado por:

$$A_p = \frac{A_{Tpp}}{0,838} \quad (3-74)$$

$$A_{Tpp} = \frac{L_{wL}B}{A_R} \quad (3-75)$$

onde:

A_{Tpp} área projetada total dos propulsores (em m^2);

A_R coeficiente adimensional de proporção de área para propulsores (para carga geral, igual a 240);

O *ratio* de excentricidade do navio no nível da água e_c/L_{wl} é determinado por:

$$\frac{e_c}{L_{wL}} = a + b \cdot \theta_c \quad \text{para } 0^\circ \leq \theta_c < 180^\circ \quad (3-76)$$

$$\frac{e_c}{L_{wL}} = a + b \cdot (360 - \theta_c) \quad \text{para } 180^\circ \leq \theta_c < 360^\circ \quad (3-77)$$

onde:

a coeficiente linear da função (igual a $-0,291$ para navios com casco “cheio” ou igual a $-0,201$ para navios com casco arredondado);

b coeficiente angular da função (igual a $0,00353$ para navios com casco “cheio” ou igual a $0,00221$ para navios com casco arredondado).

A seguir, a Tabela 3-54 apresenta coeficientes de cálculo obtidos para o Estudo de Caso deste trabalho e as ações devidas ao efeito de pressão e fricção da corrente, calculadas a partir da Figura 3-26 e das Equações (3-70) a (3-77), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.3 e 2.8. Na sequência, a Tabela 3-55 apresenta as forças resultantes totais devidas à ação da corrente no navio, calculadas a partir das equações (3-64) a (3-69).

Tabela 3-54: Coeficientes para cálculo da ação da corrente no navio – UFC.

	θ_c (°)	10
F_{yc} (kN)	χ	9,01
	C_{yc}	1,73
F_{xc} (kN)	C_{xcb}	0,10
	$F_{xc,forma}$ (kN)	17
	S (m ²)	6.217
	R_N	1,54E+08
	C_{xca}	0,002
	$F_{xc,fricção}$ (kN)	7
	A_r	240
	A_{tpp} (m ²)	18,59
	A_p (m ²)	22,18
	C_{prop}	1
	$F_{xc,prop}$ (kN)	14
M_{xyc} (kNm)	a	-0,29100
	b	0,00353
	e_c / L_{wL}	-0,26

Tabela 3-55: Forças devidas à ação da corrente no navio – UFC.

θ_c (°)	F_{yc} (kN)	F_{xc} (kN)	M_{xyc} (kN.m)
10	349	38	-15.069

3.5.3.3. Forças nos Pontos de Amarração e Seleção do Cabeço

A partir dos valores obtidos para as forças resultantes no navio devidas às ações de vento e de corrente, apresentadas na Tabela 3-53 e na Tabela 3-55, respectivamente, calculam-se as forças ambientais totais no sistema global de coordenadas, apresentadas na Tabela 3-56. Essas ações são aplicadas no modelo de amarração descrito no item 2.8 deste trabalho, a fim de se determinarem as trações em cada ponto de amarre, apresentadas na Tabela 3-57.

Tabela 3-56: Forças Totais no Navio Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – UFC.

θ_w (°)	θ_c (°)	F_y (kN)	F_x (kN)	M_{xy} (kN)
30	10	576	79	-21.889
90		803	31	-18.156
120		785	5	-13.357

Tabela 3-57: Forças Totais por Ponto de Amarração Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – UFC.

θ_w (°)	Proa (kN)		Popa (kN)		Springues (kN)
	Lançante	Través	Lançante	Través	
30	142	325	128	26	12
90	244	409	139	78	11
120	255	383	122	90	16

Com estes valores, definem-se a carga de ruptura da amarra de projeto do navio (MBL) e a capacidade do cabeço de amarração selecionado, apresentadas na Tabela 3-58, conforme os critérios de projeto definidos em 2.8.

Tabela 3-58: Cálculo da Capacidade de Carga das Amarras e do Cabeço de Amarração – UFC.

T_{ponto} (kN)	T_{linha} (kN)	FS	MLB (kN)	Amarras/ Cabeço	Capacidade do Cabeço (kN)
409	205	2	425	2	1.000

Em seguida, definem-se os carregamentos devidos à amarração para dimensionamento da estrutura, aplicados ao modelo conforme a Tabela 3-59 (Figura A. 82 à Figura A. 92). Os carregamentos AM1 a AM3 foram definidos a partir das trações nos pontos de amarração obtidas para as situações de carregamento de projeto, conforme a Tabela 3-57, enquanto os carregamentos AM4 a AM11 foram definidos com base na capacidade máxima de carga dos dispositivos de amarração apresentada na Tabela 3-58.

Tabela 3-59: Carregamentos devidos à amarração aplicados à estrutura - UFC.

Carregamento	T (kN)	θ (°)	F_y (kN)	F_x (kN)	Elemento
AM1	128	45	90	90	Cabeço 1
	26	90	26	0	Cabeço 2
	12	10	2	11	Cabeço 6
	325	90	325	0	Cabeço 9
	142	135	101	-101	Cabeço 10
AM2	139	45	98	98	Cabeço 1
	78	90	78	0	Cabeço 2
	11	170	2	-11	Cabeço 5
	409	90	409	0	Cabeço 9
	244	135	173	-173	Cabeço 10
AM3	122	45	86	86	Cabeço 1
	90	90	90	0	Cabeço 2
	16	170	3	-16	Cabeço 5
	383	90	383	0	Cabeço 9
	255	135	180	-180	Cabeço 10
AM4	1.000	45	707	707	Cabeço 1
AM5	1.000	135	707	-707	Cabeço 10
AM6	1.000	45	707	707	Cabeço 2
AM7	1.000	135	707	-707	Cabeço 9
AM8	1.000	90	1.000	0	Cabeço 2
AM9	1.000	90	1.000	0	Cabeço 9
AM10	1.000	170	174	-985	Cabeço 5
AM11	1.000	10	174	985	Cabeço 6

3.5.4. Conforme a OCIMF – B2

Esta sessão apresenta o cálculo dos esforços de amarração conforme a OCIMF MEG 4: *Mooring Equipment Guidelines* (OIL COMPANIES INTERNATIONAL MARINE FORUM, 2018). Esta metodologia tem como base a atuação de uma força resultante transversal, uma longitudinal e um momento horizontal (Tipo I definido em 3.5), de acordo com o eixo local representado na Figura 3-27.

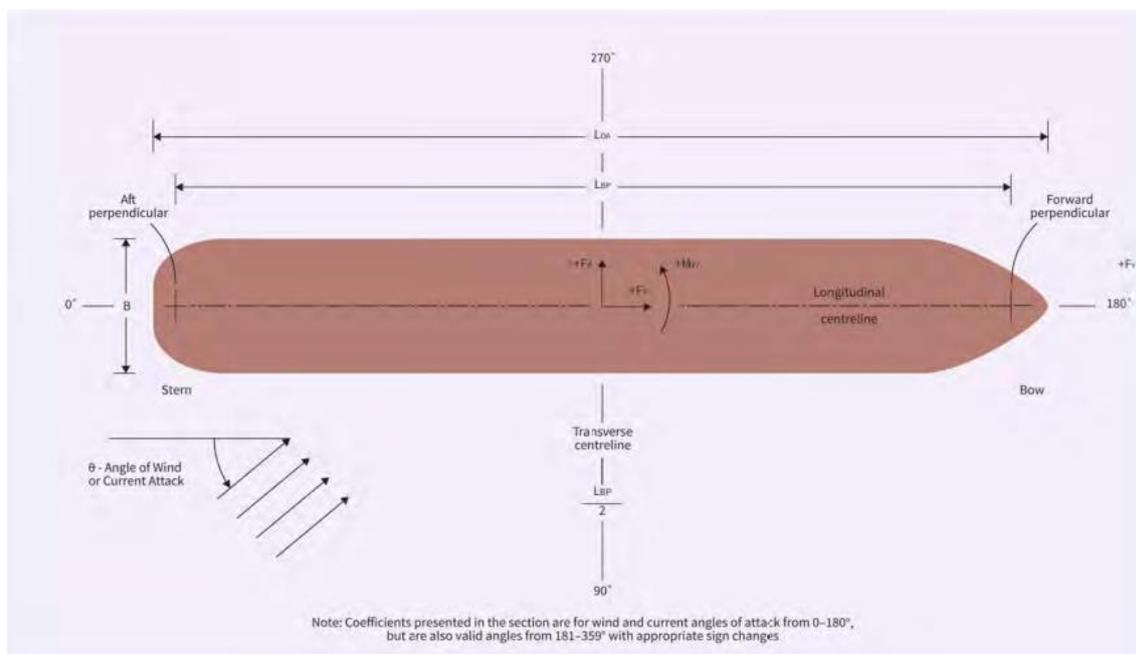


Figura 3-27: Forças Resultantes das Ações de Vento e Corrente no Navio – OCIMF.

Fonte: OCIMF MEG 4: *Mooring Equipment Guidelines* (2018) – Figura A2.

A norma supracitada apresenta coeficientes para o cálculo das ações devidas à corrente e ao vento no navio aplicáveis a navio-tanque com superestrutura à popa e a navios gaseiros (que transportam gás liquefeito). Considerando-se o tipo de superestrutura e o formato do casco do navio de estudo, pode-se dizer que este mais se assemelha ao primeiro tipo, aplicando-se, portanto, os coeficientes referentes a navios-tanque.

3.5.4.1. Forças Devidas ao Vento no Navio

De acordo com a norma OCIMF MEG 4 (2018), as forças transversal e longitudinal e o momento horizontal devidos ao vento incidente no navio são obtidos, respectivamente, por:

$$F_{xw} = \frac{1}{2} C_{xw} \rho_w V_w^2 A_T \quad (3-78)$$

$$F_{yw} = \frac{1}{2} C_{yw} \rho_w V_w^2 A_L \quad (3-79)$$

$$M_{xyw} = \frac{1}{2} C_{xyw} \rho_w V_w^2 A_L L_{pp} \quad (3-80)$$

onde:

F_{xw} é a força longitudinal devida à ação do vento (em kN);

F_{yw} é a força transversal devida à ação do vento (em kN);

M_{xyw} é o momento horizontal devido à ação do vento (em $kN \cdot m$);

C_{xw} é o coeficiente de arrasto longitudinal do vento (Figura 3-28);

C_{yw} é o coeficiente de arrasto transversal do vento (Figura 3-29);

C_{xyw} é o coeficiente de momento horizontal do vento (Figura 3-30);

$\rho_w = 1,28 \text{ kg/m}^3$ é a densidade do ar;

V_w é a velocidade do vento (em m/s);

A_L é a área projetada longitudinal do navio acima no nível d'água (em m^2);

A_T é a área projetada transversal do navio acima no nível d'água (em m^2);

L_{BP} é o comprimento entre perpendiculares do navio (em m).

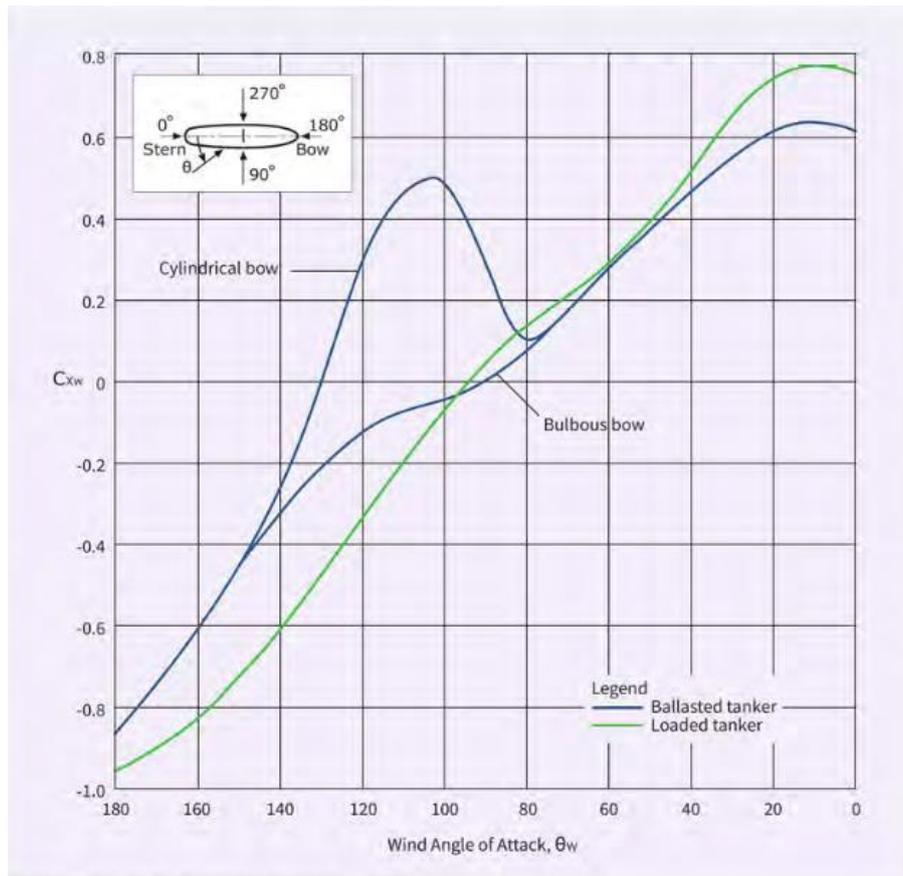


Figura 3-28: Coeficiente de arrasto longitudinal do vento para navios-tanque.
 Fonte: OCIMF MEG 4: *Mooring Equipment Guidelines* (2018) – Figura A3.

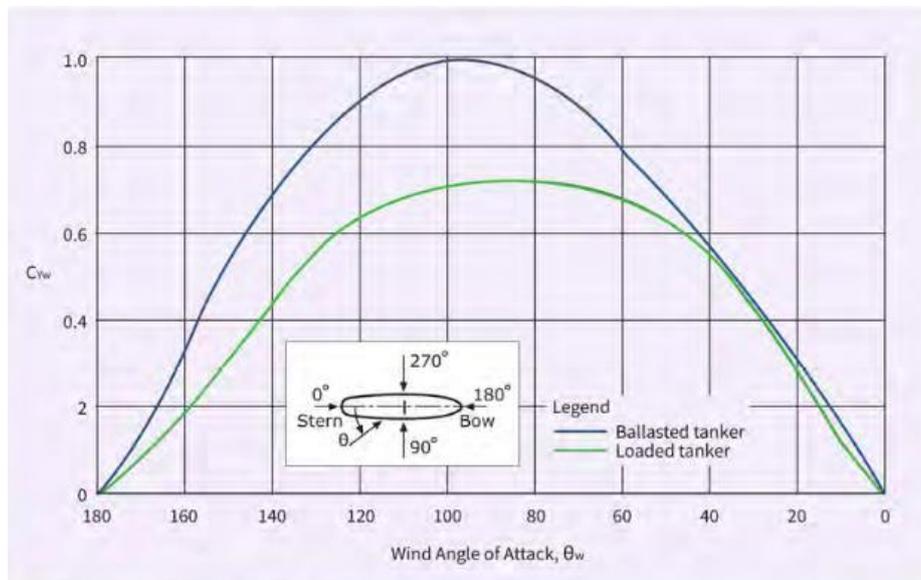


Figura 3-29: Coeficiente de arrasto transversal do vento para navios-tanque.
 Fonte: OCIMF MEG 4: *Mooring Equipment Guidelines* (2018) – Figura A4.

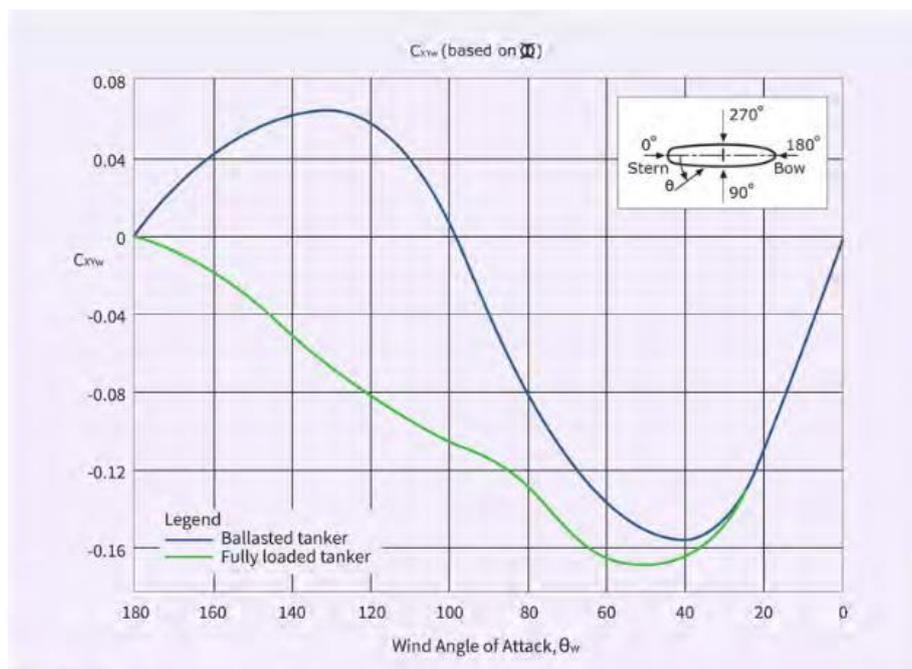


Figura 3-30: Coeficiente de momento horizontal do vento para navios-tanque.

Fonte: OCIMF MEG 4: *Mooring Equipment Guidelines* (2018) – Figura A5.

A seguir, a Tabela 3-60 apresenta coeficientes obtidos a partir dos ábacos da Figura 3-28 à Figura 3-30 (em lastro) para o Estudo de Caso deste trabalho. Na sequência, a Tabela 3-61 apresenta as forças resultantes devidas à ação do vento no navio, calculadas a partir das Equações (3-78) a (3-80), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.3 e 2.8.

Tabela 3-60: Coeficientes para cálculo da ação do vento no navio – OCIMF.

α (°)	C_{yw}	C_{xw}	C_{xyw}
30	0,45	0,56	-0,14
90	0,99	0,01	-0,04
120	0,90	-0,12	0,06

Tabela 3-61: Forças devidas à ação do vento no navio – OCIMF.

α (°)	F_{yw} (kN)	F_{xw} (kN)	M_{xyw} (kN.m)
30	236	48	-12.405
90	519	1	-3.544
120	472	-10	5.316

3.5.4.2. Forças Devidas à Corrente no Navio

De acordo com a norma ROM 0.2-90 (1990), as forças transversal e longitudinal e o momento horizontal devidos à corrente incidente no navio são obtidos, respectivamente, por:

$$F_{xc} = \frac{1}{2} C_{xc} \rho_c V_c^2 L_{BP} T \quad (3-81)$$

$$F_{yc} = \frac{1}{2} C_{yc} \rho_c V_c^2 L_{BP} T \quad (3-82)$$

$$M_{xyc} = \frac{1}{2} C_{xyc} \rho_c V_c^2 L_{BP}^2 T \quad (3-83)$$

onde:

F_{xc} é a força longitudinal devida à corrente (em kN);

F_{yc} é a força transversal devida à corrente (em kN);

M_{xyc} é o momento horizontal devido à corrente (em $kN \cdot m$);

C_{xc} é o coeficiente de arrasto longitudinal da corrente (Figura 3-31);

C_{yc} é o coeficiente de arrasto transversal da corrente (Figura 3-32);

C_{xyc} é o coeficiente de momento horizontal devido à corrente (Figura 3-33);

$\rho_c = 1.025 \text{ kg/m}^3$ é a densidade da água;

V_c é a velocidade da corrente (em m/s);

L_{BP} é o comprimento entre perpendiculares do navio (em m);

T é o calado do navio (em m).

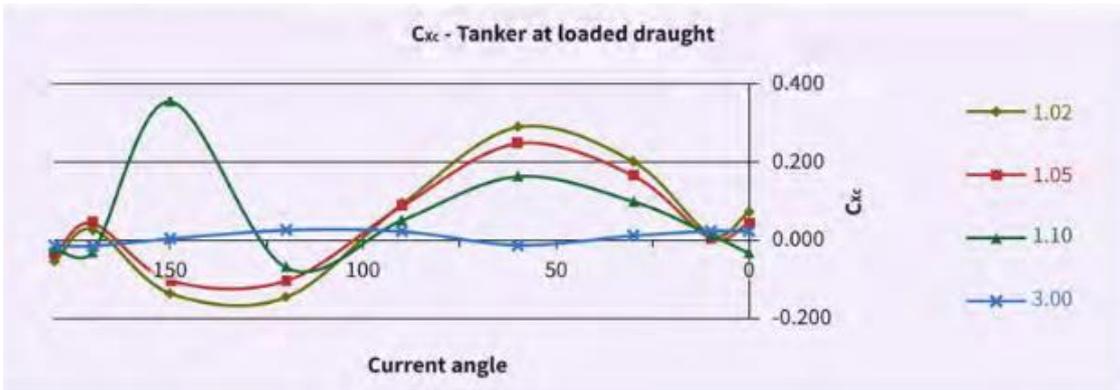


Figura 3-31: Coeficiente de arrasto longitudinal da corrente conforme a razão entre o leito e o calado W_a/T .

Fonte: OCIMF MEG 4: *Mooring Equipment Guidelines* (2018) – Figura A6.

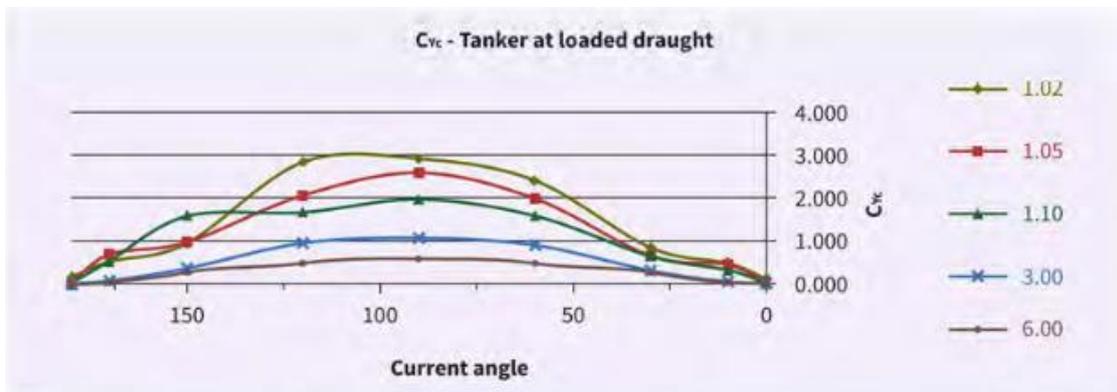


Figura 3-32: Coeficiente de arrasto transversal da corrente conforme a razão entre o leito e o calado W_a/T .

Fonte: OCIMF MEG 4: *Mooring Equipment Guidelines* (2018) – Figura A7.

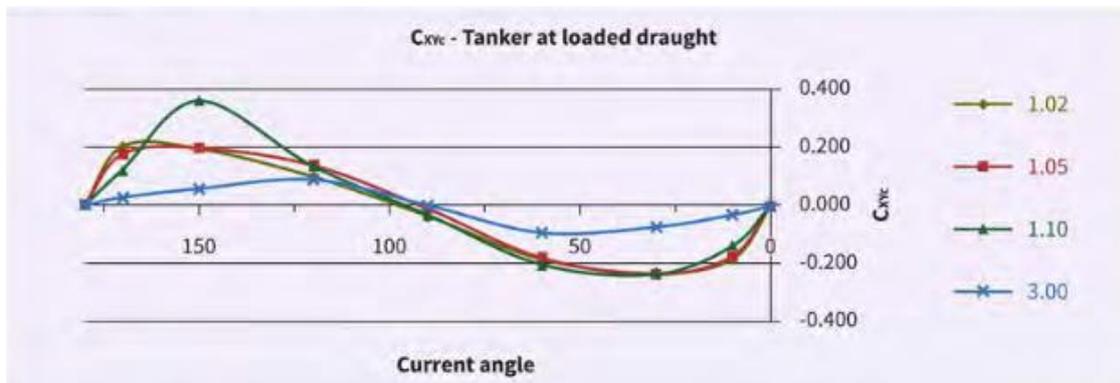


Figura 3-33: Coeficiente de momento horizontal devido à corrente conforme a razão entre o leito e o calado W_a/T .

Fonte: OCIMF MEG 4: *Mooring Equipment Guidelines* (2018) – Figura A8.

A seguir, a Tabela 3-62 apresenta coeficientes de cálculo obtidos a partir dos ábacos da Figura 3-31 à Figura 3-33 para o caso de estudo deste trabalho. Na sequência, a Tabela 3-63 apresenta as forças resultantes devidas à ação do vento no navio, calculadas a partir das Equações (3-81) a (3-83), de acordo com os critérios de projeto descritos nos itens 2.3 e 2.8.

Tabela 3-62: Coeficientes para cálculo da ação da corrente no navio – OCIMF.

α (°)	C_{yc}	C_{xc}	C_{xyc}
10	0,25	0,02	-0,12

Tabela 3-63: Forças devidas à ação da corrente no navio – OCIMF.

α (°)	F_{yc} (kN)	F_{xc} (kN)	M_{xyc} (kN.m)
10	286	17	-22.263

3.5.4.3. Forças nos Pontos de Amarração e Seleção do Cabeço

A partir dos valores obtidos para as forças resultantes no navio devidas às ações de vento e de corrente apresentadas na Tabela 3-61 e na Tabela 3-63, respectivamente, calculam-se as forças ambientais totais no sistema global de coordenadas, apresentadas na Tabela 3-64. Essas ações são aplicadas no modelo de amarração descrito no item 2.8 deste trabalho, a fim de se determinarem as trações em cada ponto de amarre, apresentadas na Tabela 3-65.

Tabela 3-64: Forças Totais no Navio Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – OCIMF.

θ_w (°)	θ_c (°)	F_y (kN)	F_x (kN)	M_{xy} (kN)
30	10	522	65	-34.667
90		805	18	-25.807
120		758	7	-16.946

Tabela 3-65: Forças Totais por Ponto de Amarração Resultantes das Ações do Vento e da Corrente – OCIMF.

θ_w (°)	Proa (kN)		Popa (kN)		Springues (kN)
	Lançante	Través	Lançante	Través	
30	48	372	127	16	19
90	200	451	141	78	24
120	224	391	122	85	20

Com estes valores, definem-se a carga de ruptura da amarra de projeto do navio (MBL) e a capacidade do cabeço de amarração selecionado, apresentadas na Tabela 3-66, conforme os critérios de projeto definidos em 2.8.

Tabela 3-66: Cálculo da Capacidade de Carga das Amarras e do Cabeço de Amarração – OCIMF.

T_{ponto} (kN)	T_{linha} (kN)	FS	MLB (kN)	Amarras/ Cabeço	Capacidade do Cabeço (kN)
451	226	2	475	2	1.000

Em seguida, definem-se os carregamentos devidos à amarração para dimensionamento da estrutura, aplicados ao modelo conforme a Tabela 3-67 (Figura A. 93 à Figura A. 103). Os carregamentos *AM1* a *AM3* foram definidos a partir das trações nos pontos de amarração obtidas para as situações de carregamento de projeto, conforme a Tabela 3-65, enquanto os carregamentos *AM4* a *AM11* foram definidos com base na capacidade máxima de carga dos dispositivos de amarração apresentada na Tabela 3-66.

Tabela 3-67: Carregamentos devidos à amarração aplicados à estrutura - OCIMF.

Carregamento	T (kN)	θ (°)	F_y (kN)	F_x (kN)	Elemento
AM1	127	45	89	89	Cabeço 1
	16	90	16	0	Cabeço 2
	19	10	3	18	Cabeço 6
	372	90	372	0	Cabeço 9
	48	135	34	-34	Cabeço 10
AM2	141	45	100	100	Cabeço 1
	78	90	78	0	Cabeço 2
	24	170	4	-24	Cabeço 5
	451	90	451	0	Cabeço 9
	200	135	142	-142	Cabeço 10
AM3	122	45	86	86	Cabeço 1
	85	90	85	0	Cabeço 2
	20	170	3	-20	Cabeço 5
	391	90	391	0	Cabeço 9
	224	135	158	-158	Cabeço 10
AM4	1.000	45	707	707	Cabeço 1
AM5	1.000	135	707	-707	Cabeço 10
AM6	1.000	45	707	707	Cabeço 2
AM7	1.000	135	707	-707	Cabeço 9
AM8	1.000	90	1.000	0	Cabeço 2
AM9	1.000	90	1.000	0	Cabeço 9
AM10	1.000	170	174	-985	Cabeço 5
AM11	1.000	10	174	985	Cabeço 6

4. COMBINAÇÕES DE AÇÕES

4.1. Para Dimensionamento Estrutural Conforme o BSI e Eurocode – A1 e A2

Segundo o item 4.2 da norma BS 6349-1-2 – *Maritime Works – Part 1-2: General – Code of practice for assessment of actions* (BRITISH STANDARDS INSTITUTION, 2016), combinações de ações devem ser formuladas a partir da EN 1990:2002+A1: *Eurocode: Basis of Structural Design* (EUROPEAN COMITEE FOR STANDARDIZATION, 2002).

A BS 6349-1-2 (2016) apresenta, então, a aplicação desta norma para combinações de ações em estruturas portuárias. Indica-se que o set B de combinações do tipo STR/GEO apresentado deve ser utilizado para o dimensionamento estrutural quando não há ações geotécnicas. A fórmula geral para essas combinações é:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \quad (4-1)$$

onde:

- $\gamma_{G,j}$ coeficientes de ponderação das ações permanentes;
- $G_{k,j}$ valores característicos das ações permanentes;
- $\gamma_{Q,1}$ coeficiente de ponderação da ação variável tomada como principal;
- $Q_{k,1}$ valor característico da ação variável tomada como principal;
- $\gamma_{Q,i}$ coeficientes de ponderação das ações variáveis que acompanham;
- $\psi_{0,i}$ coeficientes de combinação das ações variáveis que acompanham;
- $Q_{k,i}$ valores característicos das ações variáveis que acompanham.

Os valores de coeficientes de ponderação γ são obtidos a partir da Tabela 1 da BS 6349-1-2 (2016), para ações favoráveis e desfavoráveis, enquanto os coeficientes de combinação ψ são obtidos a partir da Tabela 3 da mesma norma. A partir de tais referências, obtiveram-se para o Estudo de Caso deste trabalho os coeficientes apresentados na Tabela 4-1.

Dentre as ações variáveis de projeto de cada combinação deve-se, então, assignar a que será avaliada como variável principal – e, portanto, não receberá um coeficiente de combinação redutor – enquanto as demais serão tidas como ações que a acompanham, isto é, secundárias.

De acordo com a BS 6349-1-2 (2016), o projetista deve avaliar uma variedade de situações de projeto conforme adequado e necessário para o dimensionamento da estrutura, selecionando-se quais ações devem ser consideradas em atuação conjunta e, dentre elas, quais devem ser designadas como principais.

A partir desta metodologia, desenvolveram-se combinações para o dimensionamento estrutural do caso de estudo deste trabalho, apresentadas na Tabela 4-2.

Tabela 4-1: Coeficientes de ponderação e de combinação para combinações estruturais – BS/ Eurocode.

Fatores	PP	SC	ATR	AM	T	V	C
γ	1,35	1,5	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5
	0,95	-	-	-	-	-	-
ψ_0	-	0,7	0,75	0,5	0,6	0,5	0,6

Tabela 4-2: Combinações para dimensionamento estrutural – BS/ Eurocode.

Combinação	PP	SC	ATR	AM	T	V	C
STR/GEO B1	1,35	1,5	-	-	-	-	-
STR/GEO B2	1,35	1,5	-	-	0,9	0,75	0,9
STR/GEO B3	0,95	-	-	-	0,9	1,5	0,9
STR/GEO B4	1,35	-	1,2	-	0,9	-	0,9
STR/GEO B5	0,95	-	1,2	-	0,9	-	0,9
STR/GEO B6	0,95	-	1,2	-	-	-	0,9
STR/GEO B7	1,35	1,5	-	1,05	0,9	-	0,9
STR/GEO B8	1,35	1,05	-	1,5	-	-	0,9
STR/GEO B9	1,35	1,05	-	1,5	0,9	-	0,9
STR/GEO B10	0,95	1,05	-	1,5	0,9	-	0,9

4.2. Para Dimensionamento Estrutural Conforme a UFC– B1 e B2

Para definição das combinações de carregamento, neste item se utilizarão as indicações da UFC 4-152-01: *Design: Piers and Wharves* (U. S. DEPARTMENT OF DEFENSE , 2017). Conforme descrito no item 3-5-2 desta norma, apresentam-se combinações do tipo ASD e LRFD.

O Método das Tensões Admissíveis (*ASD - Allowable Stress Design*) é um método determinístico que considera como fixos (e não aleatórios) os valores numéricos de resistência dos materiais, de ações e de solicitações, utilizando um mesmo fator de segurança global para qualquer dimensionamento. Em contrapartida, segundo o Método dos Estados Limites (*LRFD – Load and Resistance Factor Design*), ações com maior variância probabilística, isto é, menor previsibilidade, recebem fatores de majoração superiores

Para o dimensionamento estrutural deste Estudo de Caso, se utilizará o método LRFD, cujos coeficientes de combinação se definem na Tabela 3-7 da UFC 4-152-01 (2017):

Tabela 4-3: Combinações do tipo LRFD (*Load and Resistance Factor Design*) – UFC.

Combinação	PP	SC	ATR	AM	T	V	C
U0	1,4						
U1	1,2	1,6					
U2.1	1,2		1,6				1,2
U2.2	0,9		1,6				1,2
U3	1,2	1,6			1,2		1,2
U4.1	1,2					1	1,2
U4.2	0,9					1	1,2
U5.1	1,2	1,6		1,6			1,2
U5.2	0,9	1,6		1,6			1,2
U9	1,2	1				1	1,2

Fonte: UFC 4-152-01: *Design: Piers and Wharves* (UNIFIED FACILITIES CRITERIA, 2017) – Tabela 3-7.

4.3. Para Solicitação Geotécnica – A1, A2, B1 e B2

As combinações definidas na norma BS 6349-1-2 (2016), que se usa como referência para os Conjuntos de Normas A1/A2, indicam um método do tipo *LRFD* – *Load and Resistance Factor Design* para o dimensionamento geotécnico, assim como para o estrutural. Esse método não é usual no Brasil, principalmente porque demanda o conhecimento de parâmetros mais detalhados do solo, que fogem ao escopo deste trabalho. Desse modo, usualmente utilizam-se fatores de segurança globais para o cálculo de capacidade de carga geotécnica.

Uma vez que a BS 6349-1-2 (2016) não apresenta combinações do tipo *ASD* - *Allowable Stress Design*, para dimensionamento geotécnico como a UFC 4-152-01, a fim de se ter uma comparação homogênea da solicitação de carga geotécnica das estacas, se utilizam para todos os Conjuntos de Normas deste trabalho, combinações de valores característicos das ações de projeto, conforme a Tabela 4-4.

Tabela 4-4: Combinações de Valores Característicos das Ações para Solicitação Geotécnica – A1/A2 e B1/B2.

Combinação	PP	SC	ATR	AM	T	V	C
C1	1,0	1,0			1,0	1,0	1,0
C2	1,0				1,0	1,0	1,0
C3	1,0		1,0		1,0		1,0
C4	1,0	1,0		1,0	1,0		1,0

5. DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

Este Capítulo apresenta as solicitações de projeto e o dimensionamento estrutural das estacas do píer deste trabalho, para cada Conjunto de Normas definido na Tabela 1-6.

Como descrito em 2.4, a seção da estaca foi definida a partir de um pré-dimensionamento e é considerada comum a todas as análises, com o objetivo de se comparar taxas de utilização da capacidade estrutural. Uma vez que a estaca metálica penetra na superestrutura somente alguns centímetros, desconsidera-se a contribuição da sua área de aço para o dimensionamento do *plug* como uma seção de concreto armado.

O dimensionamento das estacas foi realizado pelo software SAP 2000, utilizando-se, as funções *Concrete Design* para os *plugs* de concreto armado das estacas e *Steel Design* para a estaca metálica tubular, com cada norma de dimensionamento definida. Obtém-se, assim, as taxas de utilização dos perfis estruturais (*P-M-M Interaction Ratios*), obtidas pela razão $DCR = \text{demanda/capacidade}$, considerando-se a combinação da contribuição dos esforços solicitantes normais e dos momentos fletores.

5.1. Conjunto de Normas e Recomendações A1

5.1.1. Solicitações de Projeto

A Tabela 5-1 apresenta as solicitações máximas e mínimas obtidas entre todas as estacas da estrutura, para o Conjunto de Normas e Recomendações A1.

Tabela 5-1: Solicitações Características nas Estacas por Carregamento – A1.

Carregamento	$N(kN)$		$M_x(kN)$		$M_y(kN)$	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
PP	-1.241	-596	-23	22	-40	31
SC	-1550	-597	-37	26	-52	52
ATR	-457	458	-73	74	-76	72
AM	-195	195	-45	45	-44	44
T	-35	58	-233	234	-235	235
V	-29	29	-14	14	-14	14
C	-30	30	-34	34	-33	33

A seguir, a Tabela 5-2 apresenta as solicitações geotécnicas na cabeça das estacas, para os carregamentos do Conjunto de Normas e Recomendações A1 de acordo com as combinações de valores característicos definidas no item 4.3.

Tabela 5-2: Solicitações de Combinações Geotécnicas das Estacas – A1.

Combinação	$N(kN)$	Referência
C1	2.793	Compressão Máxima
-	-	Tração Máxima

5.1.2. Dimensionamento Estrutural das Estacas

A Tabela 5-3 apresenta as taxas máximas de solicitação estrutural obtidas para as estacas do modelo, de acordo com as combinações de projeto definidas no item 4.1.

Tabela 5-3: Máximas Taxas de Utilização Estrutural das Estacas – A1.

Elemento da Estaca	Material	DCR	Combinação
Plug	Concreto Armado	55%	STR/GEO B5
Seção Tubular	Aço	87%	STR/GEO B7

A Figura 5-1, a seguir, mostra os fatores de utilização obtidos para as estacas metálicas, com legenda de cores. Como se observa, todos os valores obtidos são inferiores a 1, portanto, os elementos possuem capacidade estrutural suficiente para resistir aos esforços solicitantes avaliados.

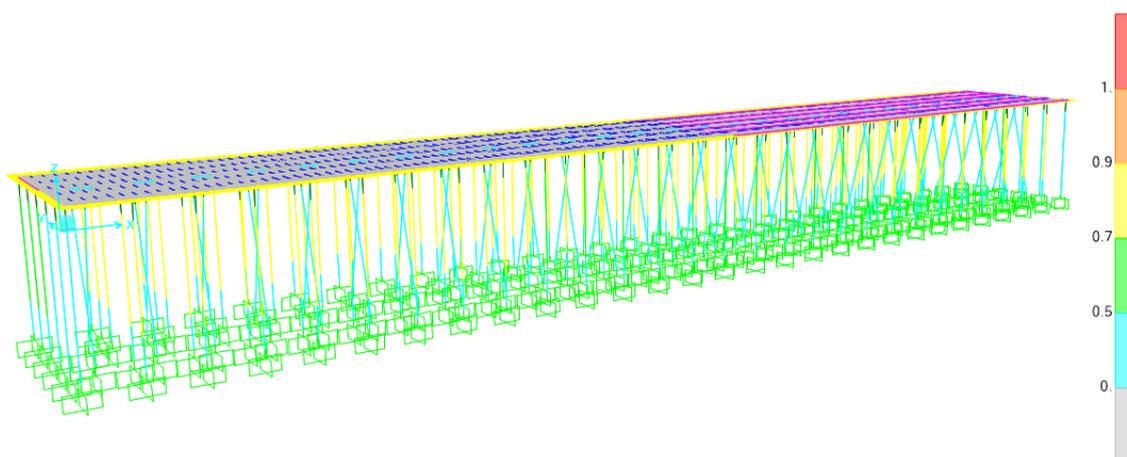


Figura 5-1: Steel Design SAP 2000 – Ratios P-M-M – A1.

5.2. Conjunto de Normas e Recomendações A2

5.2.1. Solicitações de Projeto

A Tabela 5-4 a seguir apresenta as solicitações máximas e mínimas obtidas entre todas as estacas da estrutura estacas da estrutura, para cada carregamento de projeto do Conjunto de Normas e Recomendações A2.

Tabela 5-4: Solicitações Características nas Estacas por Carregamento – A2.

Carregamento	$N(kN)$		$M_x(kN)$		$M_y(kN)$	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
PP	-1.241	-596	-23	22	-40	31
SC	-1550	-597	-37	26	-52	52
ATR	-653	654	-104	106	-108	102
AM	-326	324	-75	75	-74	74
T	-35	58	-233	234	-235	235
V	-29	29	-14	14	-14	14
C	-75	75	-83	83	-81	81

A seguir, a Tabela 5-5 apresenta as solicitações geotécnicas na cabeça das estacas, para os carregamentos do Conjunto de Normas e Recomendações A2 de acordo com as combinações de valores característicos definidas no item 4.3.

Tabela 5-5: Solicitações de Combinações Geotécnicas das Estacas – A2.

Combinação	$N(kN)$	Referência
C1	2.795	Compressão Máxima
C3	81	Tração Máxima

5.2.2. Dimensionamento Estrutural das Estacas

A Tabela 5-6 apresenta as taxas máximas de solicitação estrutural obtidas para as estacas do modelo, de acordo com as combinações de projeto definidas no item 4.1.

Tabela 5-6: Máximas Taxas de Utilização Estrutural das Estacas – A2.

Elemento da Estaca	Material	DCR	Combinação
<i>Plug</i>	Concreto Armado	86%	STR/GEO B5
Seção Tubular	Aço	87%	STR/GEO B7

A Figura 5-2, a seguir, mostra os fatores de utilização obtidos para as estacas metálicas, com legenda de cores. Como se observa, todos os valores obtidos são inferiores a 1, portanto, os elementos possuem capacidade estrutural suficiente para resistir aos esforços solicitantes avaliados.

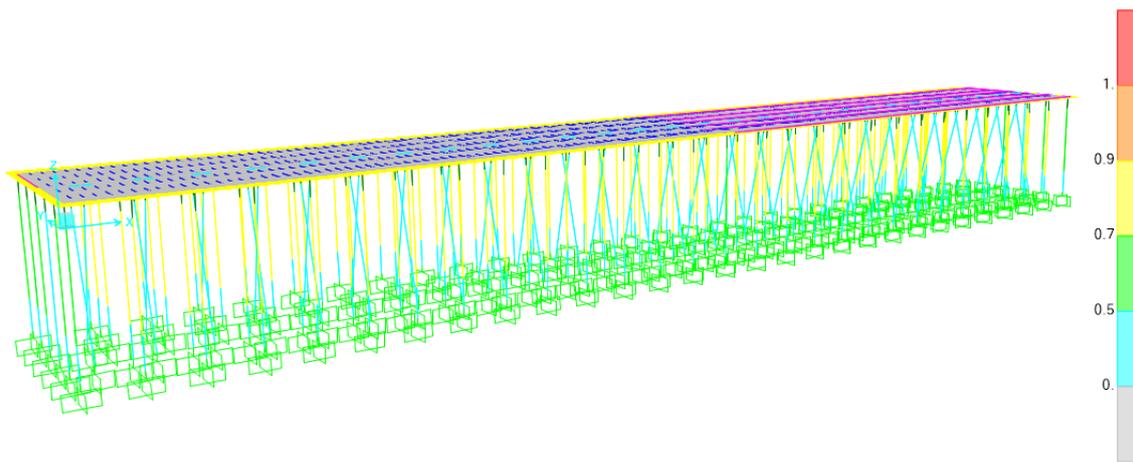


Figura 5-2: *Steel Design* SAP 2000 – Ratios P-M-M – A2.

5.3. Conjunto de Normas e Recomendações B1

5.3.1. Solicitações de Projeto

A Tabela 5-7 a seguir apresenta as solicitações máximas e mínimas obtidas entre todas as estacas da estrutura estacas da estrutura, para cada carregamento de projeto do Conjunto de Normas e Recomendações B1.

Tabela 5-7: Solicitações Características nas Estacas por Carregamento – B1.

Carregamento	$N(kN)$		$M_x(kN)$		$M_y(kN)$	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
PP	-1.241	-596	-23	22	-40	31
SC	-1.963	-755	-47	33	-66	66
ATR	-443	444	-71	73	-73	70
AM	-260	259	-60	60	-59	59
T	-35	58	-233	234	-235	235
V	-31	31	-15	15	-14	14
C	-52	52	-58	58	-57	57

A seguir, a Tabela 5-8 apresenta as solicitações geotécnicas na cabeça das estacas, para os carregamentos do Conjunto de Normas e Recomendações B1 de acordo com as combinações de valores característicos definidas no item 4.3.

Tabela 5-8: Solicitações de Combinações Geotécnicas das Estacas – B1.

Combinação	$N(kN)$	Referência
C1	3.207	Compressão Máxima
-	-	Tração Máxima

5.3.2. Dimensionamento Estrutural das Estacas

A Tabela 5-9 apresenta as taxas máximas de solicitação estrutural obtidas para as estacas do modelo, de acordo com as combinações de projeto definidas no item 4.2.

Tabela 5-9: Máximas Taxas de Utilização Estrutural das Estacas – B1.

Elemento da Estaca	Material	DCR	Combinação
<i>Plug</i>	Concreto Armado	41%	U2.2
Seção Tubular	Aço	57%	U3

A Figura 5-3, a seguir, mostra os fatores de utilização obtidos para as estacas metálicas, com legenda de cores. Como se observa, todos os valores obtidos são inferiores a 1, portanto, os elementos possuem capacidade estrutural suficiente para resistir aos esforços solicitantes avaliados.

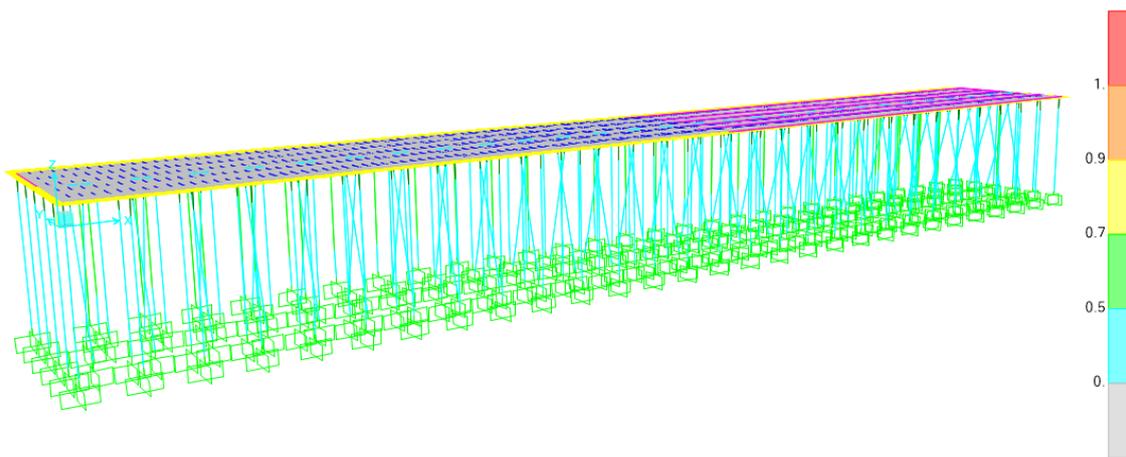


Figura 5-3: *Steel Design* SAP 2000 – *Ratios P-M-M* – B1.

5.4. Conjunto de Normas e Recomendações B2

5.4.1. Solicitações de Projeto

A Tabela 5-10 a seguir apresenta as solicitações máximas e mínimas obtidas entre todas as estacas da estrutura estacas da estrutura, para cada carregamento de projeto do Conjunto de Normas e Recomendações B2.

Tabela 5-10: Solicitações Características nas Estacas por Carregamento – B2.

Carregamento	$N(kN)$		$M_x(kN)$		$M_y(kN)$	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
PP	-1.241	-596	-23	22	-40	31
SC	-1.963	-755	-47	33	-66	66
ATR	-443	444	-71	73	-73	70
AM	-260	259	-60	60	-59	59
T	-35	58	-233	234	-235	235
V	-31	31	-15	15	-14	14
C	-52	52	-58	58	-57	57

A seguir, a Tabela 5-11 apresenta as solicitações geotécnicas na cabeça das estacas, para os carregamentos do Conjunto de Normas e Recomendações B2 de acordo com as combinações definidas no item 4.3.

Tabela 5-11: Solicitações de Combinações Geotécnicas das Estacas – B2.

Combinação	$N(kN)$	Referência
C1	3.207	Compressão Máxima
-	-	Tração Máxima

5.4.2. Dimensionamento Estrutural das Estacas

A Tabela 5-12 apresenta as taxas máximas de solicitação estrutural obtidas para as estacas do modelo, de acordo com as combinações de projeto definidas no item 4.2.

Tabela 5-12: Máximas Taxas de Utilização Estrutural das Estacas – B2.

Elemento da Estaca	Material	DCR	Combinação
<i>Plug</i>	Concreto Armado	41%	U2.2
Seção Tubular	Aço	57%	U3

A Figura 5-4, a seguir, mostra os fatores de utilização obtidos para as estacas metálicas, com legenda de cores. Como se observa, todos os valores obtidos são inferiores a 1, portanto, os elementos possuem capacidade estrutural suficiente para resistir aos esforços solicitantes avaliados.

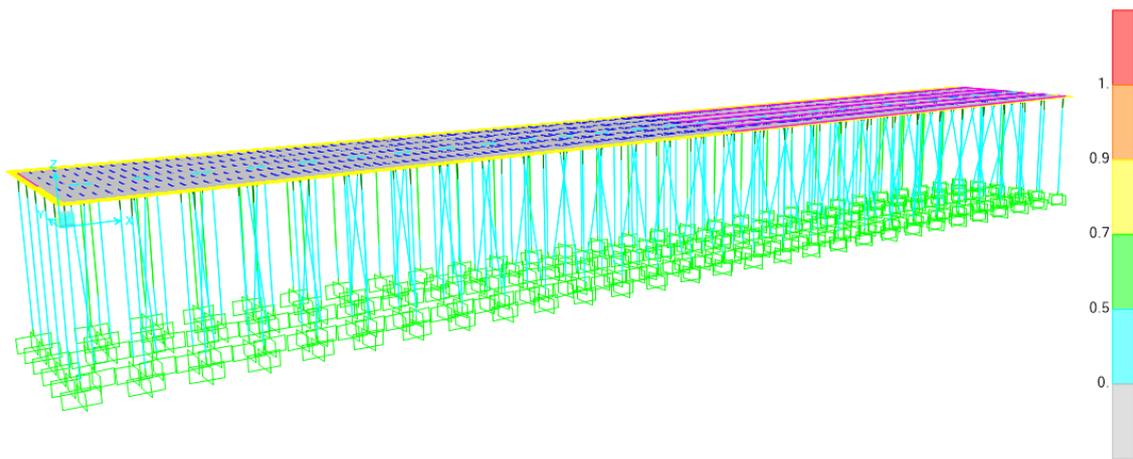


Figura 5-4: *Steel Design* SAP 2000 – *Ratios P-M-M* – B2.

6. COMPARATIVO DE RESULTADOS OBTIDOS PARA AS NORMAS E RECOMENDAÇÕES ESTUDADAS

6.1. Ações de Projeto

6.1.1. Carregamentos Devidos ao Vento

No item 3.1 deste trabalho, utilizaram-se as seguintes normas como referência de cálculo da ação do vento em estruturas portuárias:

- EN 1991-1-4 (2005) – Conjunto de Normas e Recomendações A1/A2 (3.1.1);
- AASTHO (2020) – Conjunto de Normas e Recomendações B1/B2 (3.1.2).

Esta sessão apresenta uma comparação qualitativa e numérica entre as normas estudadas mencionadas acima.

6.1.1.1. Comparação Qualitativa

Ambas as formulações para obtenção das forças devidas à ação do vento em uma estrutura têm como base o mesmo conceito físico fundamental: a força de arrasto sobre um elemento estrutural prismático sujeito a um fluxo de vento uniforme. Desta forma, as metodologias de cálculo se assemelham expressivamente, com exceção de diferenciações em coeficientes de cálculo recomendados.

A formulação apresentada pela norma EN 1991-1-4 (2005) se mostra a mais versátil e abrangente, dispondo de coeficientes de força que representam geometria (forma e condições de borda do elemento que recebe o fluxo de vento) e materiais das superfícies dos elementos estruturais. Para o caso da ação do vento sobre as estacas, há ainda a consideração do efeito de grupo, que majora a ação sobre este elemento estrutural.

Já a AASTHO (2020), uma vez que sua formulação para ações de vento tem como base a aplicação da metodologia geral definida pela ASCE/ SEI 7-10 (2010) para estruturas marítimas, é uma norma que se mostra objetiva e prática para este tipo de estrutura específico. Contudo, por ser aplicável a um contexto singular, não se mostra flexível a diferenciações em características dos elementos estruturais, já que recomenda apenas coeficientes de forças gerais tanto para superestrutura como para fundações.

6.1.1.2. Comparação Numérica

Ainda que os esforços devidos à ação do vento atuando diretamente na estrutura tipicamente não representem carregamentos dimensionantes no projeto de estruturas portuárias, vale ressaltar que se observam valores muito similares entre as normas estudadas.

Como se mostra na Tabela 6-1, apesar de as pressões de cálculo e os coeficientes de força globais apresentarem diferenças, os valores dos carregamentos finais sobre a laje e as estacas da estrutura são semelhantes para ambas as metodologias.

Tabela 6-1: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Vento.

	q (kN/m ²)	Laje		Estacas	
		$C_{força}$	$V_{x,y}$ (kN/m)	$C_{força}$	$V_{x,y}$ (kN/m)
EN 1991-1-4	0,67	0,90	0,99	0,72	0,44
AASHTO	0,50	1,30	1,08	1,00	0,46

6.1.2. Carregamentos Devidos à Corrente

No item 3.2 deste trabalho, utilizaram-se as seguintes normas como referência de cálculo da ação da corrente em estruturas portuárias:

- BS 6349-1-2 (2016) – Conjunto de Normas e Recomendações A1 (3.2.1);
- ROM 2.0-11 (2012) – Conjunto de Normas e Recomendações A2 (3.2.2);
- AASTHO (2020) – Conjunto de Normas e Recomendações B1/B2 (3.2.3).

Esta sessão apresenta uma comparação qualitativa e numérica entre as normas estudadas mencionadas acima.

6.1.2.1. Comparação Qualitativa

Ambas as formulações para obtenção das forças devidas à ação da corrente em uma estrutura têm como base a Equação de Morison, que descreve a força de arrasto sobre um elemento estrutural prismático sujeito a um fluxo uniforme. Desta forma, as metodologias de cálculo se assemelham expressivamente, com exceção de diferenciações em coeficientes de cálculo recomendados.

Dentre as formulações para cálculo das ações devidas à corrente, observa-se que a norma BS 6349-1-2 (2016) apresenta recomendações de coeficientes de arrasto em função da rugosidade da superfície, enquanto as normas ROM 2.0-11 (2012) e AASTHO (2020) somente diferenciam este coeficiente conforme a geometria da seção transversal do elemento (circular ou retangular).

6.1.2.2. Comparação Numérica

Ainda que os esforços devidos à ação da corrente diretamente na estrutura tipicamente não representem carregamentos dimensionantes no projeto de estruturas portuárias, vale ressaltar que se observam valores diferentes entre as normas estudadas.

Como se mostra na Tabela 6-2, tanto os coeficientes de arrasto como os valores dos carregamentos finais sobre as estacas da estrutura apresentam diferenças notórias para as três metodologias.

Tabela 6-2: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Corrente.

	$C_{arrasto}$	$C_{x,y} (kN/m)$
BS 6349-1-2	0,40	0,23
ROM 2.0-11	1,00	0,57
AASHTO	0,70	0,40

6.1.3. Sobrecarga de Utilização

No item 3.3 deste trabalho, utilizaram-se as seguintes normas como referência para as sobrecargas de utilização de estruturas portuárias:

- BS 6349-1-2 (2016) – Conjunto de Normas e Recomendações A1 (3.3.1);
- ROM 2.0-11 (2012) – Conjunto de Normas e Recomendações A2 (3.3.2);
- UFC 4-152-01 (2017) – Conjunto de Normas e Recomendações B1/B2 (3.3.3).

Esta sessão apresenta uma comparação qualitativa e numérica entre as normas estudadas mencionadas acima.

6.1.3.1. *Comparação Qualitativa*

Observa-se que a primeira norma estudada, BS 6349-1-2 (2016), somente apresenta valores mínimos de sobrecargas distribuídas de utilização para área de operação e de armazenamento para terminais que transportam carga geral, não fornecendo carregamentos mínimos relacionados a outros tipos de usos comerciais. Adicionalmente, apresentam-se referências para peso nominal de contêineres e alturas típicas de armazenamento de alguns tipos de carga. Por fim, têm-se valores típicos de geometria e carregamentos para alguns tipos de equipamentos e veículos de operação portuária.

Já a recomendação ROM 2.0-11 (2012) se mostra a mais completa e abrangente entre as referências estudadas para o tema de sobrecargas para estruturas portuárias. Como se apresenta na Tabela 3-17, esta norma indica não apenas valores de carregamento distribuído vertical, mas também altura mínima para cálculo de forças do vento sobre a estrutura, tanto para área de armazenamento como de operação de terminais portuários. Entre as cargas apresentadas, há diferenciação para diversos tipos de operações (para usos comerciais ou outros), para tipos de cargas e ainda para de sistemas de manuseio de carga.

Finalmente, a terceira referência estudada, UFC 4-152-01 (2017), apresenta algumas indicações para sobrecargas verticais para determinados usos de estruturas portuárias (Tabela 3-19), com diferenciação entre berços utilizados para abastecimento de carga ou majoritariamente para atracação de navios. Há diferenciação entre carga geral, contêineres e granéis, porém não se definem cargas para áreas de operação e armazenamento, ou referências para carregamento horizontal de vento.

Pode-se concluir, assim, que entre as referências estudadas, a ROM 2.0-11 (2012) apresenta indicações mais detalhadas e abrangentes para o tema de sobrecargas de utilização de estruturas portuárias.

6.1.3.2. *Comparação Numérica*

A Tabela 6-3, a seguir, apresenta os valores numéricos indicados conforme cada norma estudada para o Estudo de Caso, isto é, para terminais de carga geral. Como se observa, a UFC 4-152-01 (2017) indica um carregamento levemente superior às demais, - um resultado esperado, uma vez que, por sua aplicação, esta é uma referência tipicamente mais rigorosa e com período de retorno superior.

Tabela 6-3: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Sobrecarga de Utilização.

	SC (kN/m^2)
BS 6349-1-2	30
ROM 2.0-11	30
UFC 4-152-01	38

6.1.4. Carregamentos Devidos à Atracação

No item 3.4 deste trabalho, utilizaram-se diferentes metodologias para cálculo da energia de atracação de projeto do navio. Para cada método apresentado, as energias obtidas foram utilizadas para se selecionar um modelo de defesa no catálogo apresentado na Figura 2-7 (TRELLEBORG MARINE AND INFRASTRUCTURE, 2020). Definiram-se, então, os carregamentos devidos à atracação para os Conjuntos de Normas e Recomendações deste trabalho, conforme as seguintes normas:

- BS 6349-4 (2014) – Conjunto de Normas e Recomendações A1 (3.4.1);
- ROM 0.2-90 (1990) – Conjunto de Normas e Recomendações A2 (3.4.2);
- PIANC WG 33 (2002) – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2 (3.4.3).

Apresenta-se uma comparação qualitativa e numérica entre as normas citadas.

6.1.4.1. Comparação Qualitativa

Todas as formulações para obtenção da energia de atracação do navio têm como base o mesmo conceito físico fundamental: a absorção da energia cinética da embarcação em movimento durante o impacto da atracação. Desta forma, as metodologias de cálculo se assemelham expressivamente, com exceção de algumas diferenciações mínimas em coeficientes de cálculo recomendados e em fatores de segurança ou majoração.

Como se apresenta na Tabela 3-21, a norma BS 6349-4 (2014) indica diferentes coeficientes de segurança para o cálculo da energia de atracação de projeto conforme os tipos de operações: carga geral, barcaças, LPG/ LNG e berços isolados. A PIANC WG 33 (2002) também apresenta coeficientes conforme tipos de operação (Tabela 3-31),

diferenciando-se entre: navios-tanque ou graneleiros, porta-contêineres, carga geral, Roro e barcaças e rebocadores (*tugs*). Já a ROM 0.2-90 (1990), contudo, não indica distinção alguma para o coeficiente de segurança da energia de atracação de projeto – apresenta-se somente um coeficiente global de valor constante.

6.1.4.2. Comparação Numérica

A Tabela 6-4 a seguir apresenta os valores numéricos das energias de atracação calculadas conforme cada norma estudada. Como se observa, para o caso de estudo deste trabalho, as metodologias apresentadas pela BS 6349-4 (2014) e pela ROM 0.2-90 (1990) resultam em energias características similares. Já a PIANC WG 33 (2002) resulta em um valor inferior, o que se deve principalmente ao coeficiente de massa virtual, já que esta norma recomenda valores ligeiramente diferentes às demais.

Enquanto aos demais coeficientes para cálculo da energia característica de atracação, há pequenas variações pouco significativas entre as normas estudadas, algumas por diferenças entre utilização como valor de cálculo do comprimento total do navio (*LOA*) ou seu comprimento entre perpendiculares (*LBP*), por exemplo.

Já os fatores de segurança devidos à atracação acidental variam de forma mais expressiva entre as três normas estudadas. Quanto à energia de atracação final de projeto, observa-se um valor mais alto para a ROM 0.2-90 (1990), o que resulta em carregamentos de atracação consideravelmente mais conservadores que as demais, como se apresenta na Tabela 6-5. Pode-se observar que carregamentos de projeto para o Estudo de Caso resultantes da metodologia apresentada pela BS 6349-4 (2014) são semelhantes aos da PIANC WG 33 (2002). Por resultarem em ações de projeto com valores distintos e indicarem pressões admissíveis do casco do navio também diferentes, observa-se variação na dimensão mínima do painel da defesa.

Tabela 6-4: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Energias de Atracação.

	E_C (kN · m)	K	E_D (kN · m)
BS 6349-4	677	1,5	1.016
ROM 0.2-90	703	2,0	1.407
PIANC WG 33	564	1,8	988

Tabela 6-5: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Forças de Atracação.

	Impacto em 1 Defesa		Impacto em 7 Defensas		L_{Painel} (m)
	F_y (kN)	F_x (kN)	F_y (kN)	F_x (kN)	
BS 6349-4	1.334	267	867	173	2,6
ROM 0.2-90	1.767	353	1.237	247	3,0
PIANC WG 33	1.200	240	840	168	1,7

6.1.5. Carregamentos Devidos à Amarração

No item 3.5 deste trabalho, utilizaram-se diferentes metodologias para o cálculo das ações do vento e da corrente incidentes no navio. Para cada método apresentado, as forças resultantes das ações ambientais foram utilizadas para a determinação dos esforços de amarração do navio, e posterior seleção do cabeço de amarração de projeto. Desta maneira, definiram-se os carregamentos devidos à amarração para os Conjuntos de Normas deste trabalho, conforme as seguintes normas:

- BS 6349-1-2 (2016) – Conjunto de Normas e Recomendações A1 (3.5.1);
- ROM 0.2-90 (1990) – Conjunto de Normas e Recomendações A2 (3.5.2);
- UFC 4-159-03 (2020) – Conjunto de Normas e Recomendações B1 (3.5.3);
- OCIMF MEG 4 (2018) – Conjunto de Normas e Recomendações B2 (3.5.4).

Esta sessão apresenta uma comparação qualitativa e numérica entre as normas estudadas mencionadas acima.

6.1.5.1. Comparação Qualitativa

A primeira referência estudada para cálculo das ações de vento e corrente em navios, a norma BS 6349-1-2 (2016), é aplicável a 3 (três) categorias gerais de navios: Navios de Carga Seca (Carga Geral e Graneleiros), Navios-Tanque e Porta-Contêiners. De forma distinta às demais referências, esta metodologia calcula somente forças resultantes: uma longitudinal e duas transversais atuando nas extremidades de popa e proa do navio. As ações ambientais incidentes no navio utilizadas para determinação dos esforços de amarração são compostas por uma parcela devida ao vento e outra à corrente, sendo esta última definida somente por uma componente global de força de arrasto.

A partir do método fornecido pela BS 6349-1-2 (2016) , tanto as forças devidas ao vento como devidas à corrente podem ser avaliadas em duas condições de carregamento: em lastro ou à carga plena. Contudo, embora para as cargas de vento tenham-se coeficientes distintos para as três categorias de navios às quais a metodologia se aplica, para a ação da corrente não há distinção no coeficiente de arrasto. Também não há distinção nos coeficientes transversais de efeito de profundidade por tipos de navio, sendo os longitudinais apenas fornecidos para navios Porta-Containers. Ainda, os coeficientes de efeito de profundidade são fornecidos de forma discreta, necessitando-se interpolação para valores intermediários de razão entre profundidade do leito e calado do navio.

Entre as metodologias estudadas, a BS 6349-1-2 (2016), ao lado da OCIMF MEG 4 (2018), está entre as mais simples e objetivas. Todos os coeficientes da metodologia apresentada pela BS 6349-1-2 (2016) são obtidos a partir de ábacos, o que a torna consideravelmente prática – embora possa dificultar a aplicação automatizada do procedimento de cálculo. Ainda, este método demanda quantidade inferior de dados de entrada, tornando-se aplicável em projetos conceituais ou básicos em que possivelmente não estejam disponíveis informações detalhadas de critérios de projeto ou de características do navio.

A segunda referência estudada para o tema, a norma ROM 0.2-90 (1990), é aplicável para qualquer tipo de navio, sem distinção. Esta própria referência ressalta que, para categorias de navios específicas, outras metodologias reconhecidas podem ser aplicadas. De maneira semelhante às demais normas – com exceção à BS 6349-1-2 (2016) – este procedimento de cálculo define a ação de uma força longitudinal, uma força transversal e um momento resultantes aplicados no centro de gravidade do navio.

Como menciona a PIANC WG 116 (2012), a ROM 0.2-90 (1990) se destaca por ser a única referência estudada que apresenta também um método de cálculo de forças resultantes da ação de ondas em navios, além das componentes típicas devidas ao vento e à corrente (estudadas neste trabalho). Esta última é definida por duas componentes, uma devida à pressão de forma e uma à fricção.

Embora as forças devidas ao vento possam ser avaliadas em duas condições de carregamento (em lastro ou à carga plena), o cálculo das forças devidas à corrente não dispõe desta distinção na ROM 0.2-90 (1990). Adicionalmente, também não se observa distinção quanto ao tipo de navio em nenhum coeficiente de cálculo, tanto para forças

devidas ao vento como à corrente. Ressalta-se que o efeito de profundidade somente é quantificado no sentido transversal do navio.

De maneira geral, a metodologia apresentada na ROM 0.2-90 (1990) se mostra prática e objetiva, embora alguns coeficientes sejam calculados e outros obtidos por meio de tabelas – o que pode dificultar a aplicação automatizada do procedimento de cálculo. Observa-se que este método demanda alguns dados de entrada adicionais, se comparado à BS 6349-1-2 (2016) ou OCIMF MEG 4 (2018), embora em sua ausência estes possam ser facilmente estimados a partir de dimensões típicas do navio.

A terceira norma estudada para o tema, a UFC 4-159-03 (2020), é bastante versátil e aplicável para qualquer categoria de embarcação, inclusive não comerciais, destacando-se: Carga Seca, Navios-Tanque, Submarinos, *Aircraft*, Cruzeiros e *Destroyers*. Assim como as demais normas – com exceção à BS 6349-1-2 (2016) – sua teoria tem como base a ação de uma força longitudinal, uma força transversal e um momento resultantes aplicados no centro de gravidade do navio.

As ações ambientais incidentes no navio para determinação dos esforços de amarração são compostas por uma parcela devida ao vento e outra à corrente, sendo esta última definida por três componentes: arrasto de forma, fricção e arrasto de propulsores. Destaca-se que a UFC 4-159-03 (2020) é a única norma estudada a apresentar a determinação da ação da corrente incluindo-se a contribuição do efeito das hélices dos propulsores.

O método apresentado pela UFC 4-159-03 (2020) dispõe de diferenciação completa quanto aos tipos e características dos navios em seus coeficientes de cálculo, tanto para ação do vento como da corrente. Em relação ao efeito de profundidade do leito, embora somente possua quantificação para o sentido transversal, a norma apresenta também distinção para todos os tipos de navio a que se aplica e determinação a partir de fórmula de cálculo, conferindo-lhe precisão para qualquer razão entre profundidade do leito e calado do navio.

Observa-se que, se comparada às demais, a metodologia da UFC 4-159-03 (2020) se mostra a mais completa e detalhista, dispondo de diversos parâmetros para diferenciar os tipos de navio, tanto no uso, formato do seu casco ou tamanho e posição da superestrutura. Adicionalmente, este método permite a avaliação de qualquer condição

de carregamento intermediária (entre lastro e plena carga), mostrando-se bastante flexível para aplicação em estudo de condições de carga específicas.

Os coeficientes de cálculo do método apresentado pela UFC 4-159-03 (2020), em sua maioria, são obtidos por equações analíticas, inclusive os que possuem representação em ábacos – o que pode lhe conferir maior precisão e facilitar uma aplicação automatizada. Contudo, o nível de detalhamento do método apresentado o torna mais trabalhoso que os demais estudados, uma vez que este requer a determinação de diversos coeficientes de cálculo intermediários. Outra consequência da sofisticação do método é a necessidade de maior detalhe nos dados de entrada, em comparação aos demais, tornando-o somente aplicável quando se tem informações completas sobre o navio e critérios de projeto.

A última norma estudada para o tema, a OCIMF MEG 4 (2018), tem aplicação específica para Navios-Tanque (Gaseiros e demais) com superestrutura à ré. Assim como as demais normas – com exceção à BS 6349-1-2 (2016) – sua teoria tem como base a ação de uma força longitudinal, uma força transversal e um momento resultantes aplicados no centro de gravidade do navio. As ações ambientais incidentes no navio para determinação dos esforços de amarração são compostas por uma parcela devida ao vento e outra à corrente, sendo esta última definida somente por uma componente global de força de arrasto.

Para a categoria de navios à qual esta norma se aplica, a OCIMF MEG 4 (2018) apresenta coeficientes de cálculo detalhados, advindos de extensos estudos modernos. Com relação à ação do vento, os coeficientes se diferenciam entre os dois tipos de Navios-Tanque citados, havendo ainda uma diferenciação quanto ao formato de casco para Navios Gaseiros. Para o cálculo das ações de corrente, os coeficientes de arrasto são fornecidos conforme o efeito de profundidade do leito (de forma discreta), também diferenciados para ambos os tipos de navios.

Entre as metodologias estudadas, a OCIMF MEG 4 (2018), ao lado da BS 6349-1-2 (2016), está entre as mais simples e objetivas. Todos os coeficientes da metodologia apresentada pela OCIMF MEG 4 (2018) são obtidos a partir de ábacos, o que a torna consideravelmente prática – embora possa dificultar uma aplicação automatizada do procedimento de cálculo. Assim como a BS 6349-1-2 (2016), este método demanda quantidade inferior de dados de entrada, tornando-se aplicável em projetos conceituais ou

básicos em que possivelmente não estejam disponíveis informações detalhadas de critérios de projeto ou de características do navio. Esta norma se destaca pela aparente precisão de coeficientes específicos para Navios-Tanque, em paralelo com a simplicidade e praticidade do seu método de cálculo.

De maneira geral, a partir da comparação entre as normas citadas nesta sessão para a determinação das ações de vento e corrente em navios, pode-se observar que:

- Para a aplicação a Navios-Tanque, o método apresentado pela OCIMF MEG 4 (2018), além de prático e moderno, aparenta precisão (advinda de estudos extensos), sendo largamente reconhecida pela indústria para este tipo de projeto;
- A metodologia apresentada pela UFC 4-159-03 (2020) se mostra a mais completa e versátil de todas, sendo aplicável a qualquer tipo de navio, inclusive não comerciais. Sua formulação aparenta precisão, contudo, por ser mais trabalhosa e demandar maior quantidade de dados de entrada, se mostra mais indicada quando se tenha clareza sobre as características do navio e critérios de projeto. Esta metodologia se mostra como a melhor aplicável para navios não comerciais ou com características atípicas;
- A formulação fornecida pela BS 6349-1-2 (2016) se mostra bastante prática, apresentando alguma distinção entre categorias de navios. Desta forma, se observa como aplicável para projetos em que não se tenham características específicas do navio e critérios de projeto de maneira detalhada;
- Por fim, a metodologia indicada pela ROM 0.2-90 (1990) não apresenta distinção alguma entre tipos de navios. Seu destaque está na consideração do efeito de ondas em navios, em adição às ações típicas de ventos e correntes, sendo a única referência dentre as estudadas que dispõe dessa aplicação.

A Tabela 6-6 a seguir apresenta um resumo da comparação qualitativa entre as normas citadas nesta sessão.

Tabela 6-6: Comparação Qualitativa – Normas para Cálculo de Esforços de Amarração Devidos a Ações Ambientais no Navio.

	Característica	BS 6349-1-2	ROM 0.2-90	UFC 4-159-03	OCIMF MEG 4
Geral	Tipos de Navios Aplicáveis	Carga Seca Navios-Tanque Porta-Contêiners	Não especificado	Carga Seca Navios-Tanque Submarinos <i>Aircraft</i> Cruzeiros <i>Destroyers</i> outros	Navios-Tanque em geral Navios-Tanque Gaseiros
	Teoria	2 Forças transversais (distantes <i>LBP</i> entre si) 1 Força longitudinal	No centro de gravidade: 1 Força transversal 1 Força longitudinal 1 Momento horizontal	No centro de gravidade: 1 Força transversal 1 Força longitudinal 1 Momento horizontal	No centro de gravidade: 1 Força transversal 1 Força longitudinal 1 Momento horizontal
	Metodologia	Prática	Prática	Detalhada	Prática
	Dados de entrada	$A_L, V_w, \rho_a, \alpha_w, L_{BP}, V_c, \rho_w, \alpha_c, d_m, d/d_m$	$A_L, A_T, D, B, V_V, \rho_a, \alpha_V, L, L_{BP}, A_{LC}, A_{TC}, d/D, V_c, \gamma_w, \alpha_c$	$L_{wL}, L, A_y, A_s, A_h, h_s, A_x, v_w, \rho_a, \theta_w, T, B, D, T/d, A_m, v_c, \rho_w, \theta_c, v$	$A_L, A_T, V_w, \rho_w, \theta_w, L_{BP}, T, W_d/T, V_c, \rho_w, \theta_c$
	Ações Ambientais	Vento, Corrente	Vento, Corrente, Onda	Vento, Corrente	Vento, Corrente

	Característica	BS 6349-1-2	ROM 0.2-90	UFC 4-159-03	OCIMF MEG 4
Coefficientes para Ação do Vento	Coefficientes	De força: Longitudinal e Transversal	De forma De excentricidade	De forma: Longitudinal e Transversal De Arrasto; Longitudinal (à ré e à vante) e Transversal De momento	De arrasto: Longitudinal, Transversal e de Momento
	Diferenciação de Tipos de Navio	Carga Seca e Navios-Tanque pequenos Navios-Tanque grandes com superestrutura a ré Porta-Contêiners	N/A	Casco predominante Superestrutura extensa Superestrutura única (à ré, à vante ou centrada)	Navios-Tanque em geral Navios-Tanque Gaseiros
	Superestrutura	N/A	À popa ou à proa	Única, uniforme, casco predominante À ré, à vante, meio-navio	Única à ré
	Tipo de Casco	N/A	N/A	N/A	Navios-Tanque: Convencional (bulbo) /cilíndrico Gaseiros: Prismático/ esférico
	Condição de carregamento	Lastro/ Carregado	Lastro/ Carregado	Qualquer	Lastro/ Carregado

	Característica	BS 6349-1-2	ROM 0.2-90	UFC 4-159-03	OCIMF MEG 4
Coefficientes para Ação da Corrente	Componentes da Força	Força de Arrasto Total	Forças: de Pressão e de Fricção	Forças: de Arrasto de Forma, de Fricção e de Arrasto de Propulsores	Força de Arrasto Total
	Coefficientes	De arrasto: Longitudinal e Transversal De Profundidade: Longitudinal e Transversal	De forma: Longitudinal e Transversal De fricção De Excentricidade	De arrasto: Longitudinal e Transversal De fricção De Excentricidade	De arrasto: Longitudinal, Transversal e de Momento
	Diferenciação de Tipos de Navio	Navios-Tanque grandes Porta-Contêiners	N/A	Qualquer	Navios-Tanque LNG
	Tipo de Casco	N/A	Convencional ou outros	Cheio (típico), Arredondado, <i>Aircraft</i> , Submarino	N/A
	Condição de carregamento	Lastro/ Carregado	N/A	Qualquer	Lastro/ Carregado
	Efeito de Profundidade do Leito	Transversal: Navios-Tanque grandes e Porta-Contêiners Longitudinal: Porta-Contêiners Discreto: 1,1; 1,2; 1,5; 2,0 ou >; ∞	Transversal: Qualquer tipo de navio Longitudinal e Momento: N/A Contínuo: 1 a ∞	Transversal: Qualquer tipo de navio Longitudinal e Momento: N/A Contínuo: 1 a ∞	Transversal, Longitudinal e Momento: Navios-Tanque em geral e LNG Discreto: 1,02 1,05 1,10 3,00 ou >

6.1.5.2. Comparação Numérica

A Tabela 6-7 e a Tabela 6-8 a seguir apresentam resumos comparativos dos esforços obtidos para ações devidas ao vento e à corrente no navio, respectivamente, conforme cada norma estudada no item 3.5 deste trabalho. Em seguida, a Tabela 6-9 apresenta o comparativo das forças ambientais totais atuantes no navio.

Tabela 6-7: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Vento no Navio.

θ_w (°)	F_{yw} (kN)			F_{xw} (kN)			M_{xyw} (kN.m)		
	30	90	120	30	90	120	30	90	120
BS	213	371	340	71	-20	-41	-12.017	-2.575	6.008
ROM	234	652	514	67	0	-49	-13.749	-4.644	4.572
UFC	227	455	436	41	-8	-34	-6.820	-3.087	1.712
OCIMF	236	519	472	48	1	-10	-12.405	-3.544	5.316

Tabela 6-8: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Corrente no Navio.

	F_{yc} (kN)	F_{xc} (kN)	M_{xyc} (kN.m)
BS	296	27	-16.677
ROM	777	124	-9.675
UFC	349	38	-15.069
OCIMF	286	17	-22.263

Tabela 6-9: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Forças Totais no Navio (Vento e Corrente).

θ_w (°)	F_y (kN)			F_x (kN)			M_{xy} (kN.m)		
	30	90	120	30	90	120	30	90	120
BS	509	667	636	98	7	-14	-28.694	-19.252	-10.669
ROM	1.011	1.429	1.291	191	124	76	-23.424	-14.320	-5.104
UFC	576	803	785	79	31	5	-21.889	-18.156	-13.357
OCIMF	522	805	758	65	18	7	-34.667	-25.807	-16.946

Como se apresentou anteriormente neste trabalho, as forças totais devidas às ações ambientais determinadas foram aplicadas no modelo de amarração descrito no item 2.8, a fim de se determinarem as trações em cada ponto de amarre.

A seguir, a Figura 6-1 à Figura 6-3 ilustram comparativos dos esforços nas amarras devidos à ação do vento calculada conforme cada norma estudada, para cada ângulo de incidência do vento definido nos critérios de projeto deste trabalho (30°, 90° e 120°, respectivamente).

Como se observa, de maneira geral, os esforços máximos nos cabos de amarração devidos somente à ação do vento determinada a partir das metodologias definidas pela ROM 0.2-90 (1990) e pela OCIMF MEG 4 (2018) se mostram como os mais conservadores dentre as referências citadas. Para o vento incidente a 90°, em específico, nota-se uma diferença mais notória entre a norma ROM 0.2-90 (1990) e as demais. Em contrapartida, a trações máximas resultantes das metodologias definidas pela UFC 4-159-03 (2020) e pela BS 6349-1-2 (2016) se apresentam como as menos conservadoras entre estas.

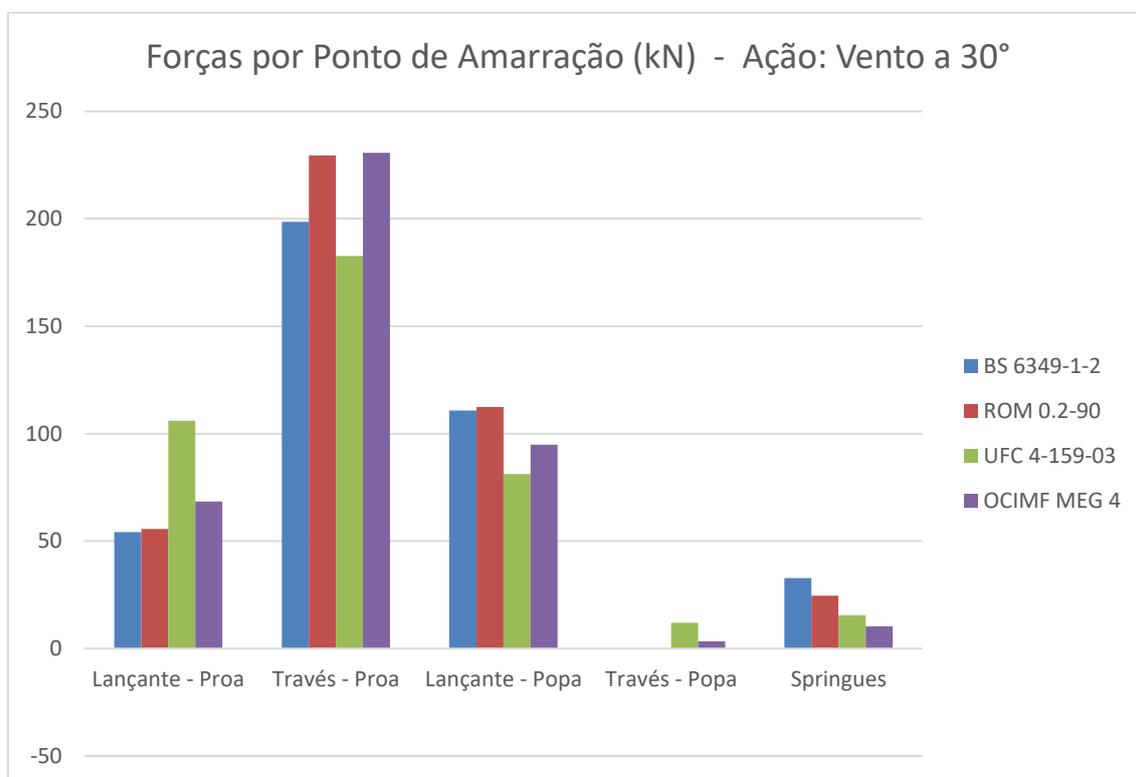


Figura 6-1: Forças de Amarração Devidas à Ação do Vento ($\theta_w = 30^\circ$).

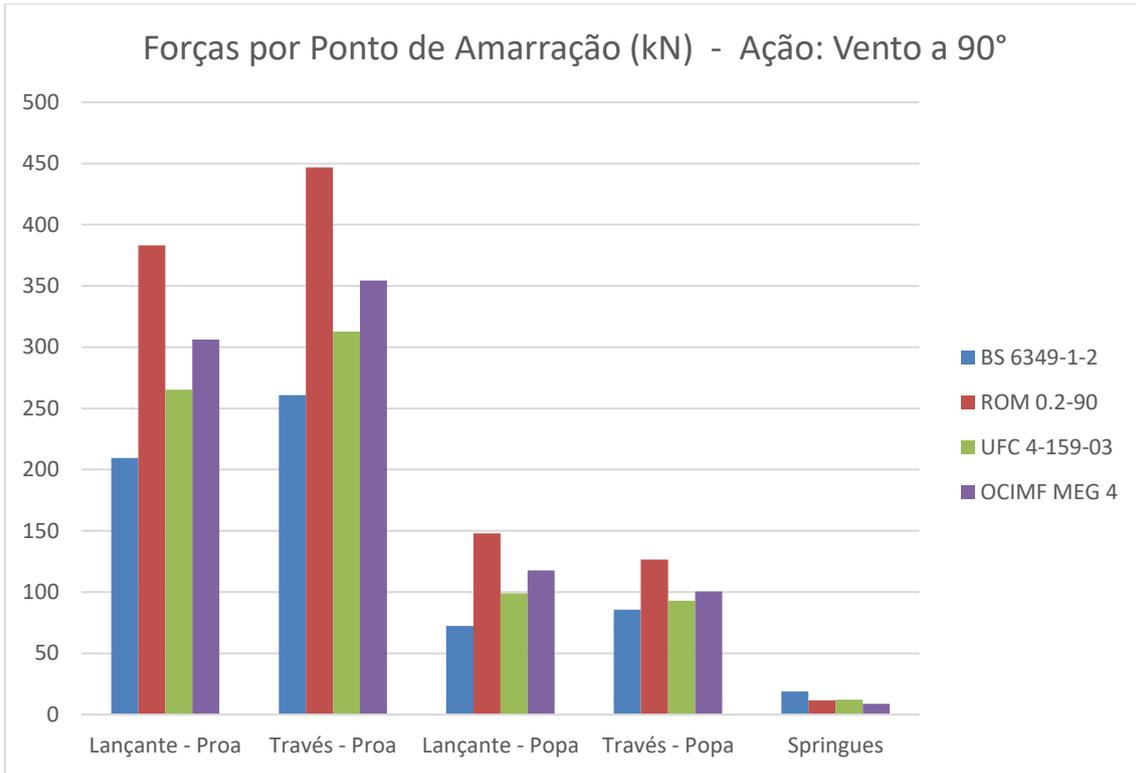


Figura 6-2: Forças de Amarração Devidas à Ação do Vento ($\theta_w = 90^\circ$).

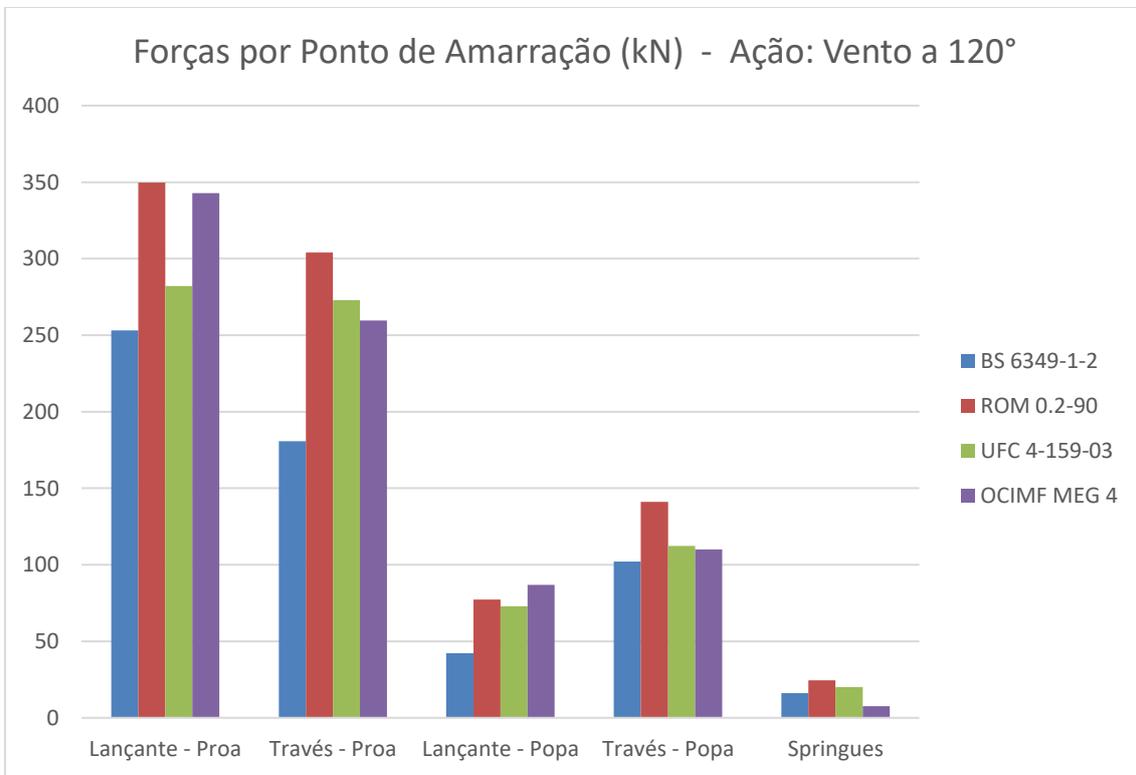


Figura 6-3: Forças de Amarração Devidas à Ação do Vento ($\theta_w = 120^\circ$).

Vale mencionar que a PIANC WG 116 (2012) apresenta um estudo de caso para navio-tanque comparando-se os esforços de amarração devidos à ação do vento no navio de acordo com as normas ROM 0.2-90 (1990), OCIMF MEG 3 (2008) e BS 6349-1 (2000). Embora o estudo mencionado tome como base versões de datas anteriores das normas publicadas pelo (BRITISH STANDARDS INSTITUTION) e pelo (OIL COMPANIES INTERNATIONAL MARINE FORUM), corroboram-se neste as algumas observações do presente trabalho.

No estudo apresentado pela PIANC WG 116 (2012), avaliam-se ventos com ângulos de incidência de 0° e 90°. Avalia-se que:

- Para a corrente incidente a 0°, observa-se que os esforços resultantes da metodologia de cálculo da ROM 0.2-90 (1990) são superiores às demais normas, que apresentam valores resultantes na mesma ordem de grandeza, levemente superiores para a BS 6349-1 (2000);
- Para a corrente incidente a 90°, observa-se um esforço resultante notoriamente mais elevado para a ROM 0.2-90 (1990). As demais normas possuem esforços resultantes na mesma ordem de grandeza, sendo os da OCIMF MEG 3 (2008) superiores.

Ressalta-se que, embora o estudo avalie a versão de norma britânica anterior à BS 6349-1-2 (2016) (referenciada no presente trabalho), não se observaram alterações na metodologia para cálculo de esforços de ações ambientais no navio entre ambas as versões. A OCIMF MEG 4, em contrapartida, de fato apresenta coeficientes de cálculo distintos à sua sucessora OCIMF MEG 3 (2008).

Não obstante, as observações da PIANC WG 116 (2012) corroboram as conclusões deste trabalho em relação às ações no navio devidas ao vento, uma vez que para ângulo de incidência de 90° ambas resultam em esforços superiores para a ROM 0.2-90 (1990).

A seguir, a Figura 6-4 ilustra o comparativo dos esforços nas amarras devidos à ação da corrente calculada conforme cada norma estudada. Como se observa, em relação aos esforços nos cabos de amarração devidos somente à ação da corrente, a norma ROM 0.2-90 (1990) se mostra como notoriamente mais conservadora que as demais. Em seguida, têm-se a OCIMF MEG 4 (2018), a UFC 4-159-03 (2020) e a BS 6349-1-2 (2016), respectivamente.

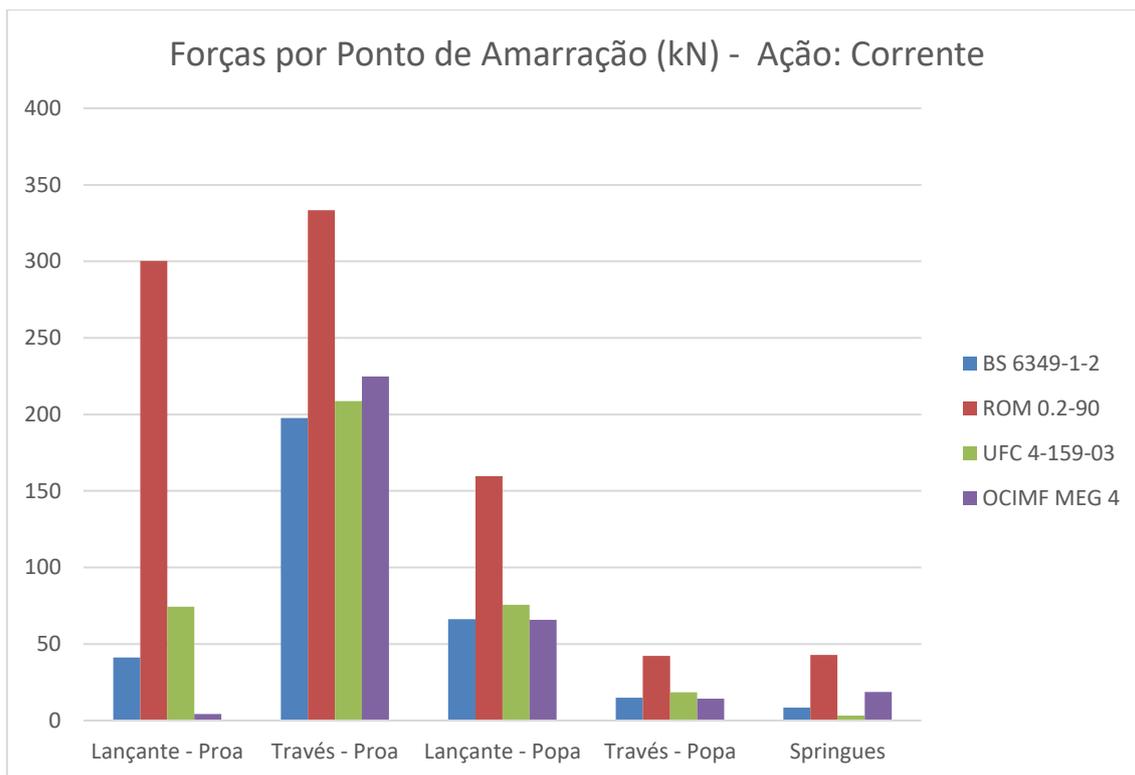


Figura 6-4: Forças de Amarração Devidas à Ação da Corrente.

Em relação aos esforços de amarração devidos à ação da corrente no navio, o estudo comparativo apresentado na PIANC WG 116 (2012) também corrobora observação deste presente trabalho de que a metodologia de cálculo apresentada pela ROM 0.2-90 (1990) resultaria, de maneira geral, em esforços mais conservadores.

No estudo da PIANC WG 116 (2012), avaliam-se correntes com ângulos de incidência de 0° , 90° e 180° , e razões entre a profundidade do leito e o calado do navio de 1,1; 1,5 e 2,0. Avalia-se que:

- Para a corrente incidente a 0° ou a 180° , a BS 6349-1 (2000) é a única norma que apresenta variação nos esforços conforme a razão da profundidade do leito e o calado. A OCIMF MEG 3 (2008) apresenta esforços menos conservadores e as demais normas resultam em esforços em ordem de grandeza similar;
- Para a corrente incidente a 90° , a ROM 0.2-90 (1990) resulta em esforços superiores ao dobro dos esforços resultantes das demais referências normativas, sendo a diferença mais acentuada observada na razão de 1,5

entre o leito e o calado do navio. As demais normas apresentam esforços resultantes da mesma ordem de grandeza.

Como mencionado anteriormente, a metodologia de cálculo da OCIMF MEG 3 (2008), avaliada na PIANC WG 116 (2012), sofreu algumas alterações na publicação da sua sucessora OCIMF MEG 4, estudada no presente trabalho. Não obstante, ressalta-se que o estudo apresentado pela PIANC WG 116 (2012) corrobora a conclusão deste trabalho de que, para uma razão entre leito e calado de 1,5 e um ângulo de incidência entre 0° e 90°, os valores resultantes da ROM 0.2-90 (1990) são notoriamente mais conservadores.

A seguir, a Figura 6-5 à Figura 6-7 apresentam os comparativos dos esforços totais nas amarras, combinando-se as ações de vento e de corrente no navio, para cada ângulo de incidência do vento definido.

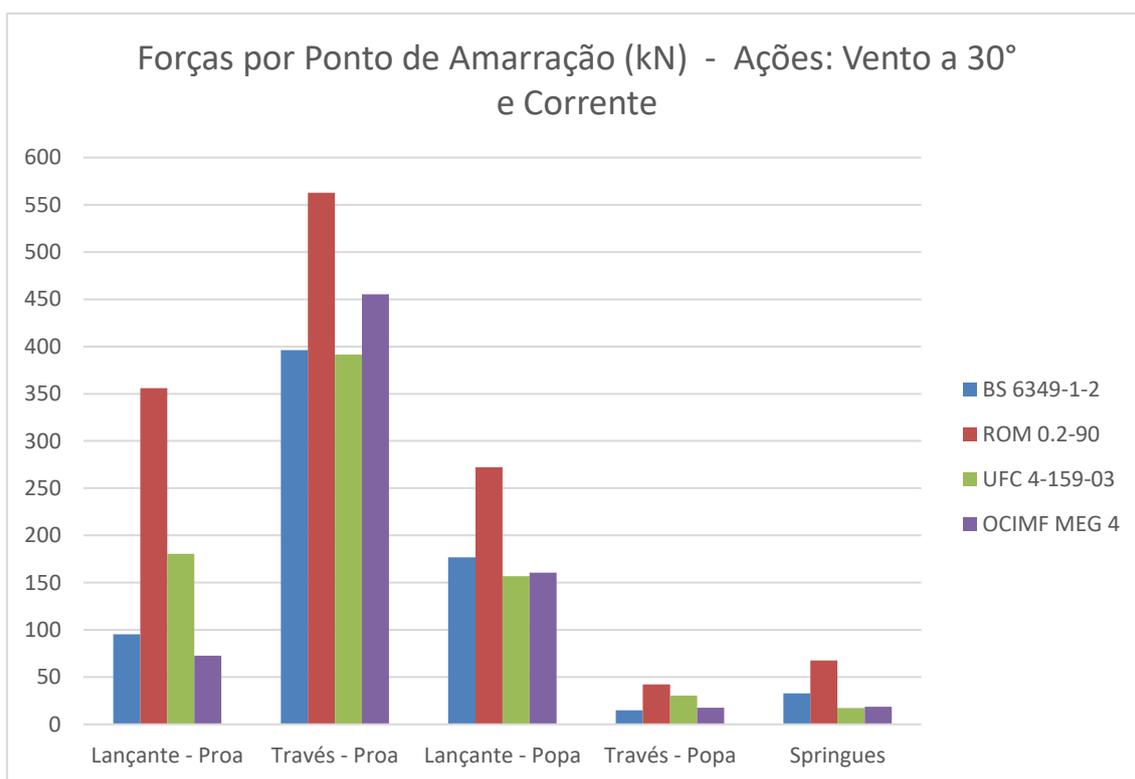


Figura 6-5: Forças de Amarração Devidas à Ação do Vento ($\theta_w = 30^\circ$) e da Corrente.

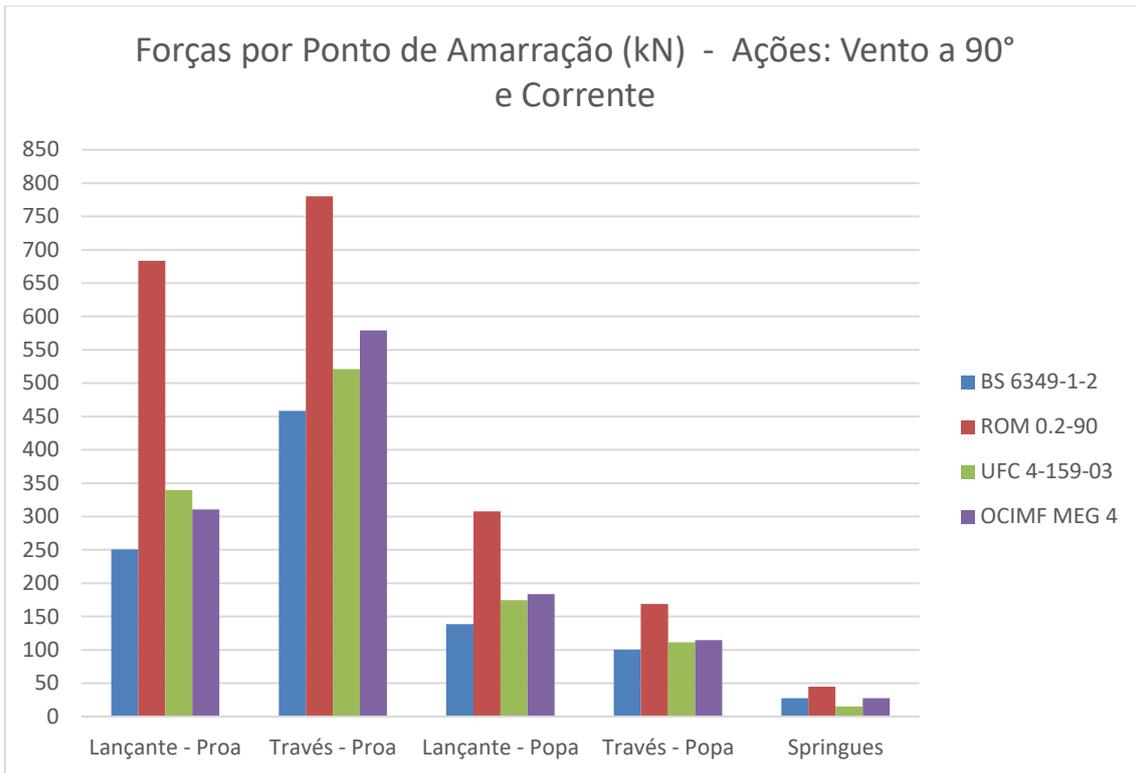


Figura 6-6: Forças de Amarração Devidas à Ação do Vento ($\theta_w = 90^\circ$) e da Corrente.

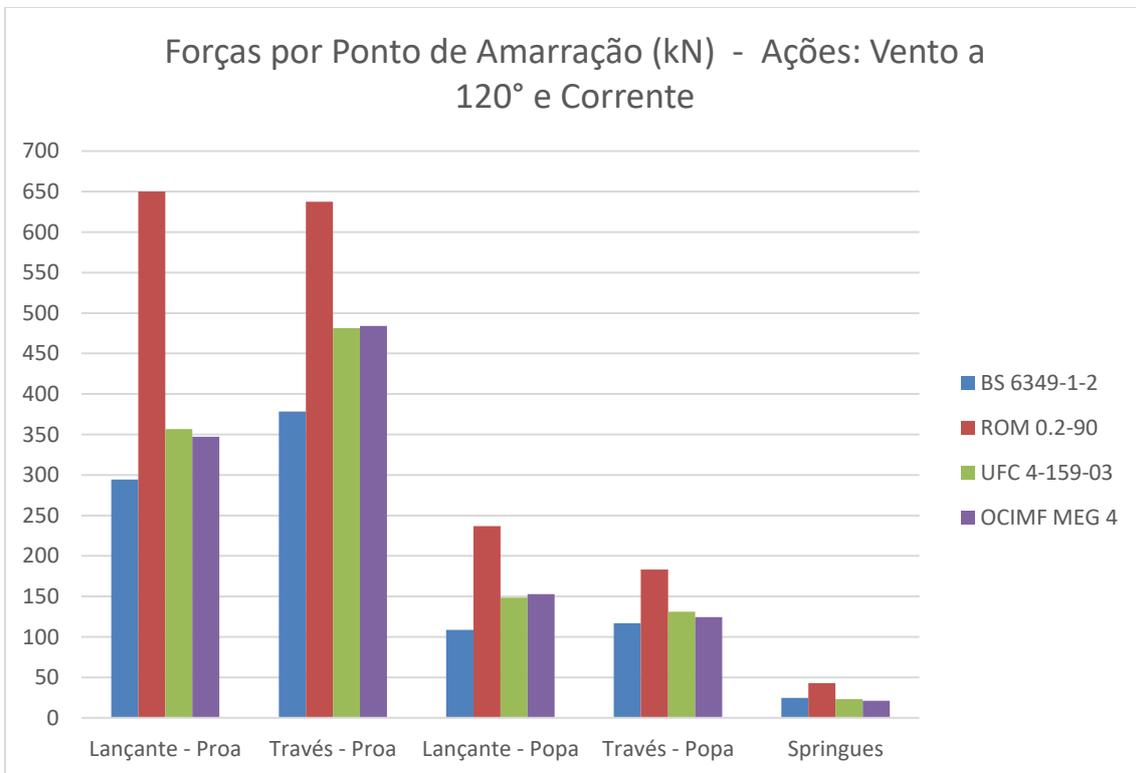


Figura 6-7: Forças de Amarração Devidas à Ação do Vento ($\theta_w = 120^\circ$) e da Corrente.

Como se observa os esforços máximo apresentados pela ROM 0.2-90 (1990) são notoriamente superiores em todos os casos – inclusive quando comparados aos da OCIMF MEG 4 (2018), referência aplicada à indústria de petróleo e gás, presumidamente mais rigorosa. Entre as demais normas estudadas (BS 6349-1-2 (2016), OCIMF MEG 4 (2018) e UFC 4-159-03 (2020)), observam-se trações resultantes de ordem de grandeza similar. De maneira geral, entre estas referências, os esforços resultantes da OCIMF MEG 4 mostram uma tendência a serem superiores – resultado esperado, dada sua aplicação para a indústria de óleo e gás – enquanto os resultantes da BS 6349-1-2 (2016) tendem a ser menos conservadores.

Como se apresenta na Tabela 6-10, os esforços de amarração resultantes da ROM 0.2-90 (1990) ocasionaram a necessidade da seleção de um cabeço de amarração de capacidade superior às demais.

Nota-se que as demais normas apresentam esforços máximos de ordem de grandeza similar, embora o valor inferior resultante da BS 6349-1-2 (2016) permita a seleção de um cabeço de capacidade de carga inferior.

Tabela 6-10: Comparação Numérica de Ações de Projeto por Norma – Cabeço de Amarração.

	$T_{m\acute{a}x}$ (kN)	MLB (kN)	Cabeço Selecionado (kN)
BS 6349-1-2	365	375	750
ROM 0.2-90	619	625	1.250
UFC 4-159-03	409	425	1.000
OCIMF MEG 4	451	475	1.000

6.2. Solicitações nas Estacas

Esta seção apresenta um comparativo das solicitações nas estacas do modelo estrutural, para cada carregamento de projeto conforme os Conjuntos de Normas de estudo – como descrito nos itens 5.1.1, 5.2.1, 5.3.1 e 5.4.1, respectivamente.

A Figura 6-8, a seguir, mostra os valores máximos resultantes de compressão nas estacas. Observa-se que o valor superior de sobrecarga de utilização (SC) indicada pela UFC 4-152-01: (2017) reflete em uma reação axial adicional relevante nos modelos B1/B2, em comparação aos modelos A1 e A2, analisados em conformidade com a BS 6349-1-2 (2016) e a ROM 2.0-11 (2012), respectivamente.

Adicionalmente, notam-se, para modelo A2, esforços de compressão superiores para os carregamentos de atracação (ATR) e amarração (AM), coerentes com as cargas aplicadas anteriormente neste modelo conforme a ROM 0.2-90 (1990). Os demais esforços de compressão devidos à atracação (ATR), para A1, B1 e B2, apresentam valores semelhantes, calculados a partir da BS 6349-4 (2014) e PIANC WG 33 (2002), respectivamente. Para a amarração (AM), notam-se esforços na mesma ordem de grandeza para A1, A2, B1 e B2, obtidos conforme a BS 6349-1-2 (2016), ROM 0.2-90 (1990), UFC 4-159-03 (2020) e a OCIMF MEG 4 (2018), respectivamente.

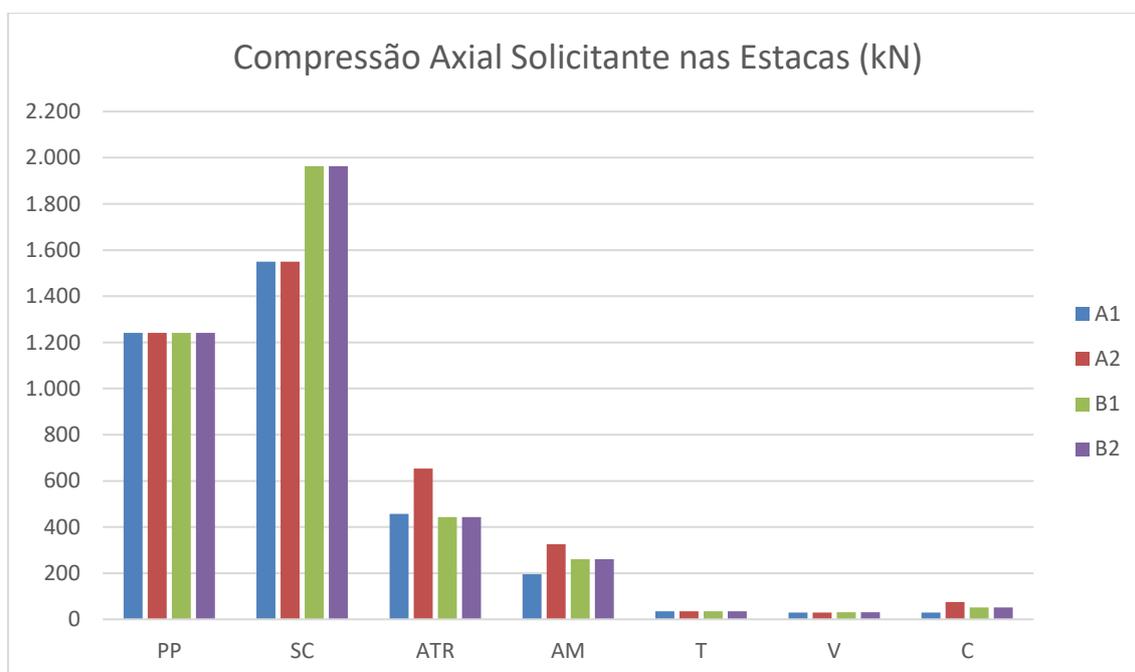


Figura 6-8: Compressão Axial Característica Solicitante nas Estacas por Carregamento e por Conjunto de Normas e Recomendações.

Em seguida, apresentam-se na Figura 6-9 os esforços máximos de tração obtidos para cada cenário. Novamente, observam-se valores superiores nos carregamentos de atracação (ATR) e amarração (AM) para o modelo A2.

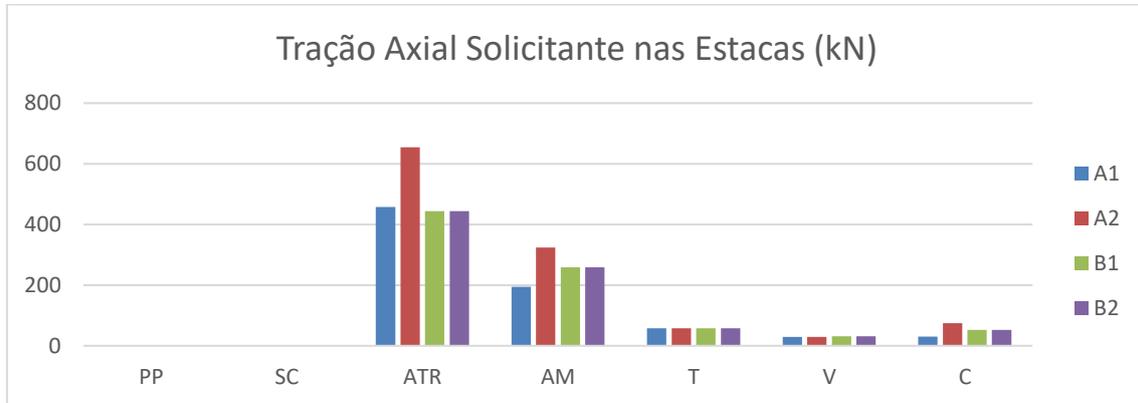


Figura 6-9: Tração Axial Característica Solicitante nas Estacas por Carregamento e por Conjunto de Normas e Recomendações.

Na Figura 6-10, a seguir, apresentam-se os momentos fletores resultantes dos carregamentos estudados. Observa-se que o maior valor obtido é relacionado ao carregamento de temperatura (T), que possui valor comum a todas as análises, não sendo definido por norma. Para os demais carregamentos, nota-se uma tendência do modelo A2 de apresentar valores superiores aos demais.

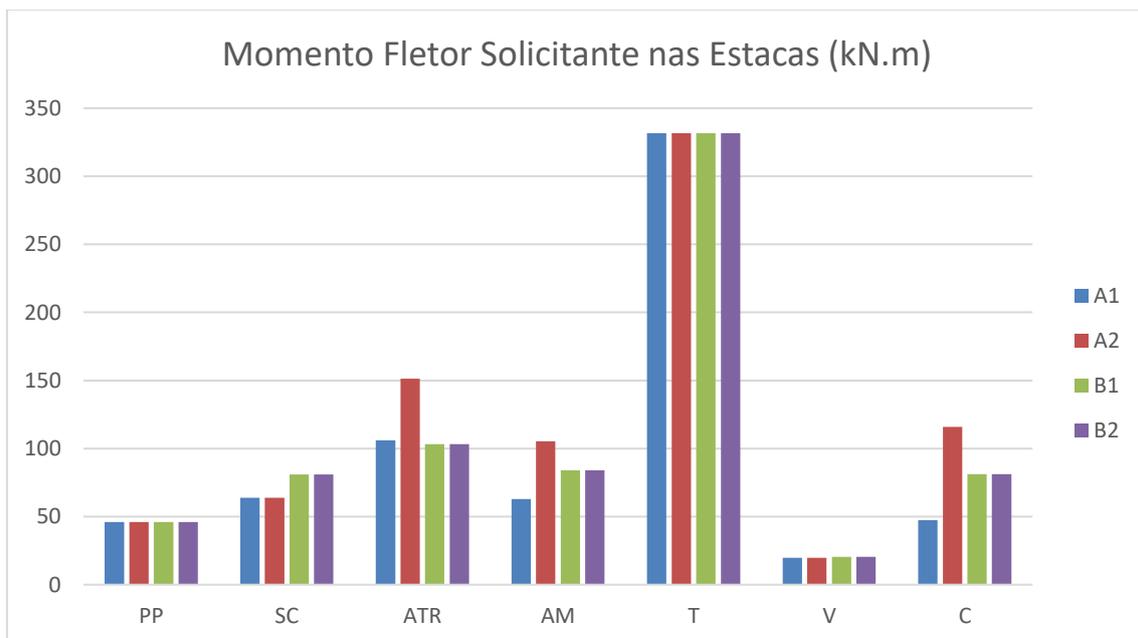


Figura 6-10: Momento Fletor Característico Solicitante nas Estacas por Carregamento e por Conjunto de Normas e Recomendações.

6.3. Dimensionamento Estrutural das Estacas

Esta seção apresenta um comparativo entre as taxas de utilização estrutural das estacas para cada Conjunto de Normas e Recomendações de estudo – como descrito nos itens 5.1.2, 5.2.2, 5.3.2 e 5.4.2, respectivamente.

6.3.1. Concreto Armado

A Tabela 6-11 apresenta a comparação entre as taxas máximas de utilização estrutural dos *plugs* de concreto armado das estacas, considerando-se todas as combinações elaboradas para o projeto – apresentadas em 4.1 e 4.2.

Nota-se que as combinações dimensionantes, para todos os casos, envolvem carregamentos de atracação (ATR), o que justifica a taxa *DCR* expressivamente superior às demais em A2 (86%), já que esta análise se mostrou mais conservadora para o cálculo deste carregamento. Em segundo lugar, tem-se a taxa de A1 (55%), obtida para a mesma combinação de A2. Com resultados inferiores (41%), têm-se tanto B1 como B2, que contaram com os mesmos valores para o carregamento de atracação (ATR) em suas análises.

Tabela 6-11: Comparação de Taxas de Utilização Estrutural do Concreto Armado – Valores Máximos para Todas Combinações Definidas.

Conjunto de Normas e Recomendações	DCR	Carregamentos Dimensionantes
A1	55%	$PP + ATR + T + C$
A2	86%	$PP + ATR + T + C$
B1	41%	$PP + ATR + C$
B2	41%	$PP + ATR + C$

Uma vez que as combinações dimensionantes para o grupo A1/A2 incluem o carregamento de temperatura (T), não presente nas combinações de B1/B2, a Tabela 6-12 compara os resultados de *DCR* para combinações semelhantes (STR/GEO B6 e U2.2). Neste caso, embora os carregamentos de atracação (ATR) em A2 sejam expressivamente superiores, seu *DCR* apresenta menor diferença com relação a B1/B2 do que anteriormente. O *DCR* de A1, que reduz significativamente, se torna inferior a B1/B2.

Interessante observar que, com relação a A1 e B1/B2, apesar de o carregamento de atracação (ATR) se apresentar com valor superior em A1, seu *DCR* é significativamente inferior a B1/B2. Pode-se justificar este resultado em diversos aspectos, incluindo-se tanto diferenças de formulações de dimensionamento e de coeficientes de minoração da resistência do concreto armado, como de coeficientes de majoração das ações. Vale ressaltar que, embora tenham-se selecionado combinações com os mesmos carregamentos, os fatores de majoração são distintos entre os grupos A e B.

Tabela 6-12: Comparação de Taxas de Utilização Estrutural do Concreto Aramado – Valores Máximos para Uma Combinação Semelhante.

Conjunto de Normas e Recomendações	DCR	Carregamentos Dimensionantes
A1	17%	<i>PP + ATR + C</i>
A2	50%	
B1	41%	
B2	41%	

Importante destacar que as combinações de A1/A2, isto é, conforme a BS 6349-1-2 (2016), são definidas pelo projetista, ao passo que as combinações de B1/B2 são previamente definidas na UFC 4-152-01 (2017). Pode-se dizer, desta forma, comparando-se as diferenças entre a Tabela 6-11 e a Tabela 6-12, que no Conjunto de Normas e Recomendações A1/A2, o projetista tem ampla liberdade para definir o conservadorismo do seu projeto – que pode ser superior ou inferior ao do conjunto B1/B2. Ressalta-se que no cenário específico deste Estudo de Caso, o carregamento de temperatura (T) apresenta esforços solicitantes bastante relevantes (como se apresenta na Figura 6-10).

6.3.2. Aço

A Tabela 6-13 apresenta a comparação entre as taxas máximas de utilização estrutural da seção tubular de aço das estacas, considerando-se todas as combinações elaboradas para o projeto – apresentadas em 4.1 e 4.2.

As combinações dimensionantes de A1/A2 incluem carregamentos de amarração (AM), o que justificaria a taxa *DCR* superior às demais em A2 (88%) e A1 (87%). Já as

combinações dimensionantes de B1/B2 não contam com o carregamento de amarração (AM) e possuem *DCR* inferior (57%).

Tabela 6-13: Comparação de Taxas de Utilização Estrutural do Aço – Valores Máximos para Todas Combinações Definidas.

Conjunto de Normas e Recomendações	DCR	Carregamentos Dimensionantes
A1	87%	<i>PP + SC + AM + T + C</i>
A2	88%	<i>PP + SC + AM + T + C</i>
B1	57%	<i>PP + SC + T + C</i>
B2	57%	<i>PP + SC + T + C</i>

Visto que as combinações dimensionantes para A1/A2 incluem o carregamento de amarração (AM) não presente nas combinações de B1/B2, a Tabela 6-14 compara os resultados de *DCR* para combinações semelhantes (STR/GEO B8 e U5.1). Nota-se, contudo, que os resultados do grupo A1/A2 reduzem, porém permanecem com valores semelhantes entre si e superiores a B1/B2 – ainda que o carregamento de amarração (AM) de A1 seja inferior aos demais e a sobrecarga de utilização (SC) de B1/B2 seja superior. Pode-se justificar este resultado em diversos aspectos, incluindo-se diferenças de formulações de dimensionamento e de coeficientes de minoração da resistência do aço, (que fogem ao escopo de estudo do trabalho) ou de coeficientes de majoração das ações.

Assim, para este Estudo de Caso, considerando-se as combinações elaboradas, as taxas de utilização estrutural das estacas de aço se mostram mais conservadoras em A1/A2, havendo maior oportunidade para otimização da seção estrutural em B1/B2.

Tabela 6-14: Comparação de Taxas de Utilização Estrutural do Aço – Valores Máximos para Uma Combinação Semelhante.

Conjunto de Normas e Recomendações	DCR	Carregamentos Dimensionantes
A1	70%	<i>PP + SC + AM + C</i>
A2	71%	
B1	53%	
B2	53%	

6.4. Resumo Comparativo

A Tabela 6-15 apresenta o resumo dos resultados obtidos para cada Conjunto de Normas e Recomendações, conforme se descreveu ao longo deste capítulo. Aplica-se uma legenda de cores para ilustrar a comparação do conservadorismo de cada item com os demais cenários. Ressalta-se que, para esta análise, utilizaram-se os resultados obtidos para combinações semelhantes entre si, isto é, com os mesmos carregamentos de projeto.

Observa-se que, de maneira geral, o grupo A (normas Europeias) apresenta resultados mais conservadores que o grupo B (normas dos Estados Unidos).

Em específico, para o dimensionamento do concreto armado conforme o conjunto A1, apesar de o carregamento dimensionante (atracação) possuir a mesma ordem de grandeza que os cenários B1/B2, o resultado da utilização estrutural se mostra inferior em A1 do que B1/B2. Em contrapartida, para o conjunto A2, o carregamento dimensionante (atracação) significativamente superior ao de B1/B2, se reflete na solicitação do concreto armado de forma moderada. Para o dimensionamento do aço, contudo, os conjuntos A1/A2 resultam em taxas de utilização superiores às de B1/B2, ainda que o carregamento de amarração seja inferior em A1 e a sobrecarga de utilização seja superior em B1/B2.

Estes resultados podem-se explicar não somente em diferenças de valores de carregamentos, como de fatores de majoração das ações e de formulações de dimensionamento estrutural do concreto e do aço em cada método.

Em relação à solicitação geotécnica das estacas da estrutura, os cenários B1/B2 apresentaram maior compressão (o que se deve, majoritariamente, à sobrecarga de utilização), enquanto cenário A2 foi o único que apresentou tração (devido ao carregamento de atracação).

Tabela 6-15: Matriz de Resultados ² por Normas Utilizadas – Conjuntos de Normas e Recomendações A1/A2 e B1/B2.

Conjunto	Ações de Projeto							Combinações de Ações	Dimensionamento da Estaca	
	PP ¹	T ¹	Vento	Corrente	Sobrecarga	Atracação	Amarração		Concreto ³	Aço
A1	-	-	Superior, mesma ordem de grandeza de B1/B2	Inferior, mesma ordem de grandeza de A2 e B1/B2	Superior a B1/B2, igual a A2	Mesma ordem de grandeza de B1/B2	Inferior a A1 e B1/B2	Combinações definidas pelo engenheiro projetista, podem ser menos ou mais conservadoras	Utilização estrutural inferior a A2 e B1/B2	Utilização estrutural superior a B1/B2
A2	-	-		Superior, mesma ordem de grandeza de A1 e B1/B2	Inferior a B1/B2, igual a A1	Superior a A1 e B1/B2	Superior a A1 e B1/B2		Utilização estrutural superior a A1 e B1/B2	Utilização estrutural superior a B1/B2
B1	-	-	Inferior, mesma ordem de grandeza de A1/A2	Entre as demais, mesma ordem de grandeza de A1/A2	Superior a A1 e A2	Mesma ordem de grandeza de A1/A2	Mesma ordem de grandeza de B2	Combinações fixas definidas por norma	Utilização estrutural, superior a A1, inferior a A2, igual a B2	Utilização estrutural inferior a A1/A2
B2	-	-				Mesma ordem de grandeza de B1	Utilização estrutural, superior a A1, inferior a A2, igual a B1		Utilização estrutural inferior a A1/A2	

¹ Para os carregamentos definidos como critérios de projeto, com valores comuns a todas as análises (ver item 2.10). ² Legendas de cores: Amarelo – resultados na mesma ordem de grandeza que os demais cenários, Verde – resultados menos conservadores que os demais, Vermelho – resultados mais conservadores que os demais. ³ Considerando-se combinações semelhantes, com os mesmos carregamentos.

7. CONCLUSÕES

Esta Dissertação teve como objetivo principal desenvolver um estudo comparativo entre normas para o Projeto de Estruturas Portuárias, permitindo-se a identificação da aplicabilidade das referências estudadas, suas vantagens e desvantagens, refinamento e praticidade dos métodos de cálculo apresentados e ainda, avaliando-se ainda conservadorismo do projeto de maneira geral.

Para isso, definiram-se Conjuntos de Normas e Recomendações a serem utilizadas para uma estrutura típica de píer definida, aplicando-as para cálculo de carregamentos de projeto, definição de combinações e dimensionamento estrutural das estacas.

Assim, este trabalho demonstrou as metodologias de cálculo dos carregamentos de: ação do vento, ação da corrente, sobrecarga de utilização, atracação e amarração com base em cada norma e recomendação selecionada para estudo. Estes carregamentos foram aplicados ao modelo estrutural desenvolvido no software SAP 2000, permitindo-se a obtenção de esforços solicitantes e o dimensionamento dos segmentos de concreto armado e de aço das estacas da estrutura, conforme cada Conjunto de Normas e Recomendações.

Em seguida, apresentaram-se estudos comparativos para cada carregamento de projeto definido por norma, onde se desenvolveu tanto uma avaliação qualitativa como numérica das referências estudadas. Evidenciaram-se diferenças entre as metodologias de cálculo e os valores de carregamentos obtidos. Ressalta-se que, para o carregamento de amarração, uma análise comparativa detalhada foi desenvolvida, destacando-se as principais restrições e aplicabilidades das normas selecionadas.

Desenvolveu-se, ainda uma análise comparativa dos esforços solicitantes obtidos nas estacas da estrutura e das taxas de utilização estrutural das fundações. De maneira geral, observou-se que os Conjuntos de Normas A1/A2 (com uso das normas e recomendações BSI / ROM para carregamentos em conjunto com o Eurocode para o dimensionamento) resultavam em esforços solicitantes e índices de utilização dos perfis superiores aos conjuntos B1/B2 (normas e recomendações dos Estados Unidos e de instituições internacionais).

Vale mencionar, contudo, que as normas e recomendações Europeias permitem ao engenheiro projetista ampla liberdade quanto à definição das combinações de projeto, de forma que é possível adaptar o conservadorismo do projeto conforme necessário e adequado ao cenário específico estudado. Conclui-se, assim, que a depender da situação de cálculo e da subjetividade do projetista, o projeto desenvolvido a partir do Conjunto de Normas e Recomendações A1/A2 poderia apresentar resultados similares ou mesmo inferiores aos de B1/B2. Evidencia-se, assim, a importância de uma adequada definição dos critérios de projeto neste caso – assim como para o dimensionamento de estruturas portuárias conforme as normas brasileiras, que permitem similar liberdade ao projetista.

Tendo-se em vista os desafios identificados ao longo deste estudo e seus limites de escopo, sugerem-se alguns temas que podem ser elaborados em trabalhos futuros de forma a dar continuidade ao tema, como:

- Estudo com navios de tipos de cargas e de portes diferentes;
- Estudo de amarração mais sofisticado com o uso de um software de modelagem específico (como Optimoor) que permita avaliar a variação de ângulos horizontais e verticais das amarras, assim como considerar outras variáveis ambientais e movimentos de um navio;
- Avaliação da sensibilidade dos resultados do estudo de amarração com relação a variáveis ambientais como diferentes ângulos de incidência do vento e da corrente e variação da profundidade do leito;
- Cálculo de coeficientes de rigidez do solo e de comprimento de engastamento equivalente das estacas a partir de referências normativas.
- Cálculo de capacidade geotécnica de estacas e o consequente impacto no comprimento de estaca necessário para obtenção da reação solicitante, conforme cada referência normativa;
- Estudo do projeto de píeres com paredes de contenção;
- Estudo do projeto de estruturas de dolphins;
- Estudo do projeto com cargas sísmicas.
- Estudo comparativo das estimativas dos custos de CAPEX (*Capital Expenditure*) do projeto desenvolvido por cada grupo de normas;
- Aplicação dos resultados deste trabalho para avaliação da norma brasileira em desenvolvimento pela ABNT – Ações e Projeto de Estruturas Portuárias.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS. **AASHTO: LRFD Bridge Design Specifications 9th Ed.** Washington DC, USA. 2020.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318-14: Building Code Requirements for Structural Concrete.** Farmington Hills, Michigan, USA. 2014.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API RP 2A-WSD - Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design.** Washington. 2000.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE/SEI 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures.** United States. 2010.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE 61-14: Seismic Design of Piers and Wharves.** United States. 2014.

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **ASCE/ SEI 7-16: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.** Virginia, United States. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9782: Ações em Estruturas Portuárias, Marítimas ou Fluviais.** Rio de Janeiro. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8800: Projeto de Estruturas de Aço e de Estruturas Mistas de Aço e Concreto de Edifícios.** Rio de Janeiro. 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto.** Rio de Janeiro. 2023.

BNDES. Perfis Setoriais: Portos. **BNDES - Hub de Projetos**, 2019. Disponível em: <<https://hubdeprojetos.bndes.gov.br/pt/setores/Portos>>. Acesso em: 21 Abril 2023.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 6349-1: Maritime Structures - Code of Practice for General Criteria**. London. 2000.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 6349-1-3: Maritime works - Part 1-3: General – Code of practice for geotechnical design**. United Kingdom. 2012.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 6349-1-1: Maritime Works - Part 1-1: General - Code of practice for planning and design for operations**. United Kingdom. 2013.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 6349-4: Maritime Works - Part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems**. United Kingdom. 2014.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 6349-1-2: Maritime works - Part 1-2: General - Code of practice for assessment of actions**. United Kingdom. 2016.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BSI Library Search. **BSI Knowledge**. Disponível em: <<https://www.bsigroup.com/en-GB/>>. Acesso em: 07 Janeiro 2023.

EUROPEAN COMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1990:2002+A1: Eurocode: Basis of Structural Design**. Brussels. 2002.

EUROPEAN COMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1991-1-4: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions**. Brussels. 2005.

EUROPEAN COMMISSION. Eurocodes: Building the future. **European Commission Website**. Disponível em: <<https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/en-eurocodes/eurocodes-family>>. Acesso em: 07 Janeiro 2023.

MARINHA DO BRASIL. Marinha, Sudene e a Amazônia Azul. **Ministério da Defesa - Marinha do Brasil**, 2019. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/cm/marinha-sudene-e-amazonia-azul>>. Acesso em: 21 Abril 2023.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO. **ROM 0.2-90: Recomendaciones para Obras Marítimas - Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias**. Madrid. 1990.

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO. **ROM 2.0-11: Recomendaciones para Obras Marítimas - Recomendaciones para el Proyecto y Ejecución de Obras de Atraque y Amarre.** Madrid. 2012.

OIL COMPANIES INTERNATIONAL MARINE FORUM. **OCIMF MEG 3: Mooring Equipment Guidelines.** London. 2008.

OIL COMPANIES INTERNATIONAL MARINE FORUM. **OCIMF MEG 4: Mooring Equipment Guidelines.** London. 2018.

PUERTOS DEL ESTADO - MINISTERIO DE FOMENTO DEL GOBIERNO DE ESPAÑA. ROM - Recomendaciones de Obras Marítimas - Normativa Española en Proyectos Portuarios. **Gobierno de España - Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.** Disponível em: <<https://www.puertos.es/es-es/ROM>>. Acesso em: 08 Janeiro 2023.

TRELLEBORG MARINE AND INFRASTRUCTURE. **Fender Systems - Product Brochure v3.7.** Sweden. 2020.

TRELLEBORG MARINE SYSTEMS. **Bollards - Product Brochure v3.3.** Sweden. 2018.

U. S. DEPARTMENT OF DEFENSE. **UFC 4-152-01: Unified Facilities Criteria - Design: Piers and Wharves.** U. S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Systems Command and Air Force Civil Engineer Center. United States. 2017.

U. S. DEPARTMENT OF DEFENSE. **UFC 4-159-03: Unified Facilities Criteria - Moorings.** U. S. Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Systems Command and Air Force Civil Engineer Center. United States. 2020.

WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT INFRASTRUCTURE. **PIANC WG 33: Guidelines for the Design of Fender Systems.** Brussels. 2002.

WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT INFRASTRUCTURE. **PIANC WG 116: Safety Aspects Affecting the Berthing Operations of Tankers to Oil and Gas Terminals.** Brussels. 2012.

WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT
INFRASTRUCTURE. **PIANC WG 153: Recommendations for the Design and
Assessment of Marine Oil and Petrochemical Terminals.** Brussels. 2016.

WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT
INFRASTRUCTURE. **PIANC WG 184: Design Principles for Dry Bulk Marine
Terminals.** Brussels. 2019.

WORLD ASSOCIATION FOR WATERBORNE TRANSPORT
INFRASTRUCTURE. **PIANC WG 235: Ship Dimensions and Data for Design of
Marine Infrastructure.** Brussels. 2022.

ANEXO A: Carregamentos Aplicados ao Modelo Estrutural

A.1 Ação da Temperatura (T)

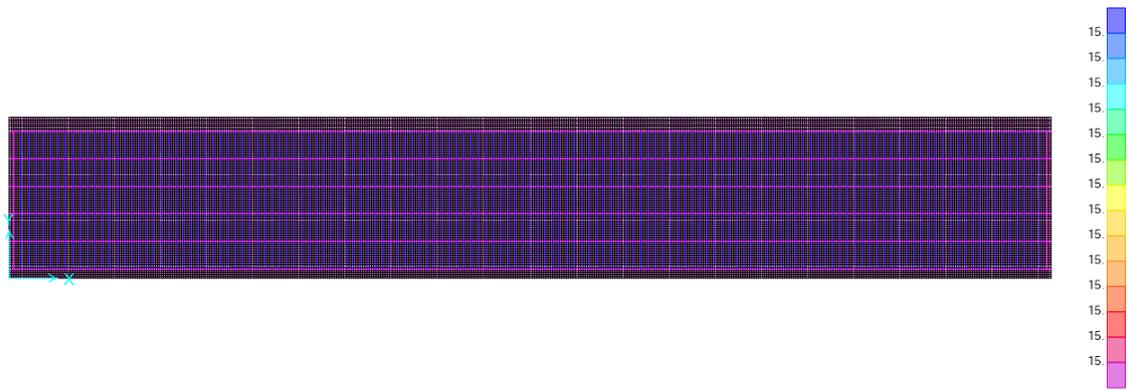


Figura A. 1: Carregamento +T (Laje).

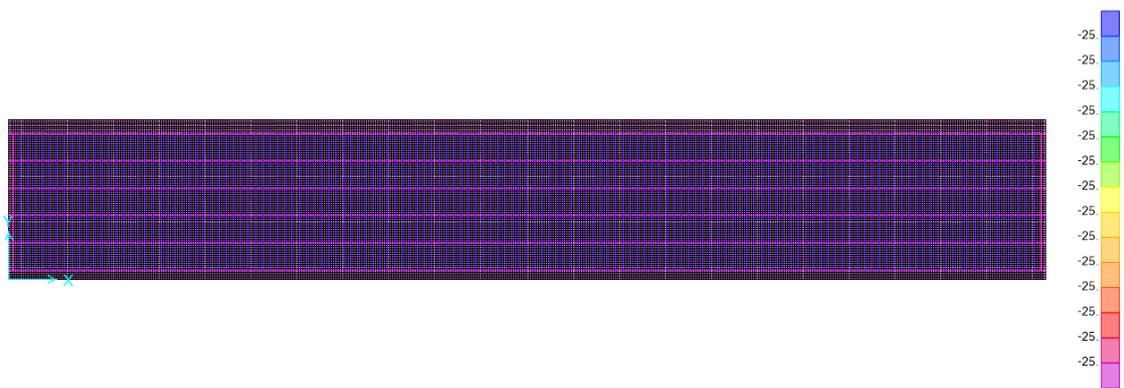


Figura A. 2: Carregamento -T (Laje).

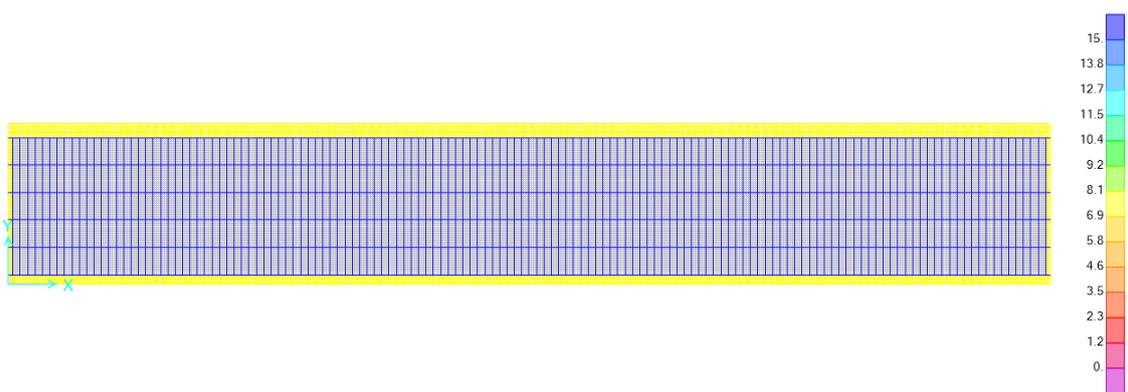


Figura A. 3: Carregamento +T (Viga).

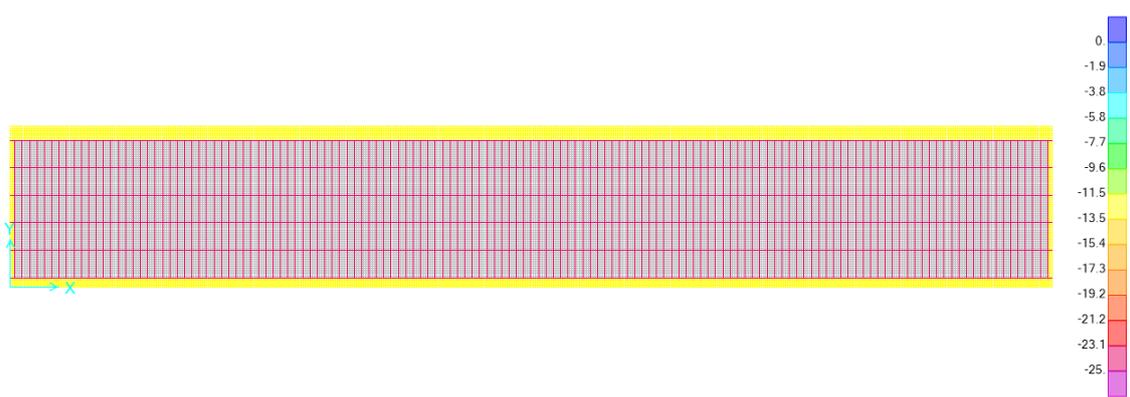


Figura A. 4: Carregamento -T (Viga).

A.2 Ação do Vento (V)

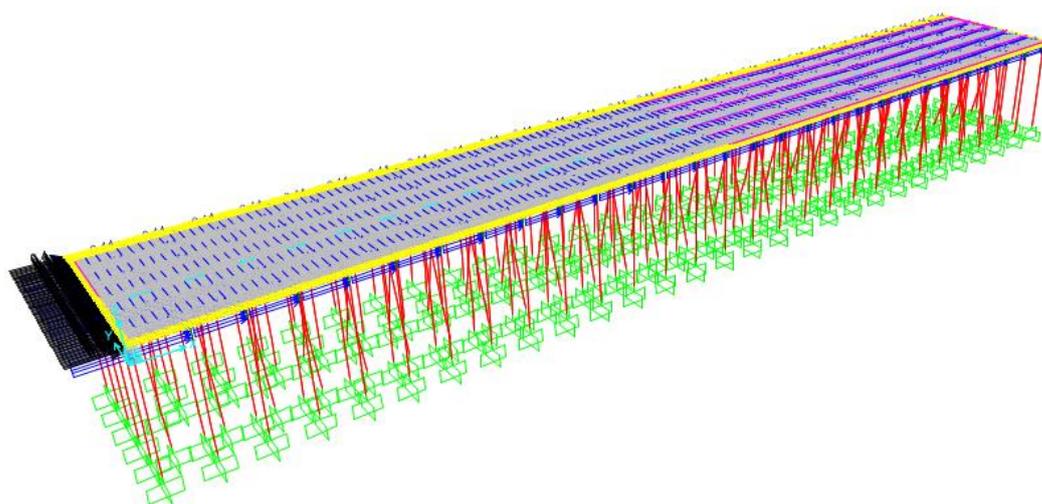


Figura A. 5: Carregamento +Vx – Conjuntos de Normas A1/A2.

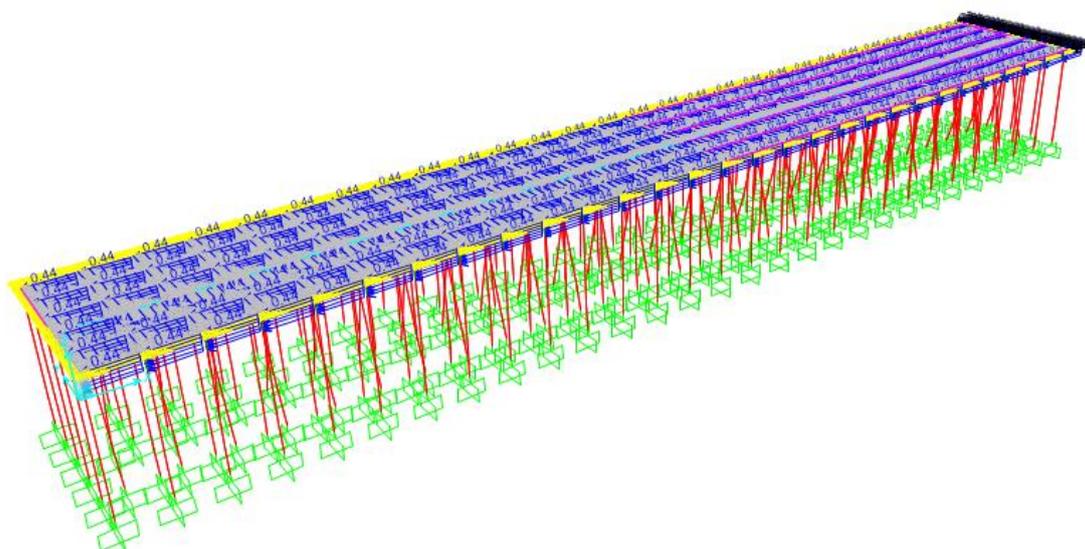


Figura A. 6: Carregamento -Vx – Conjuntos de Normas A1/A2.

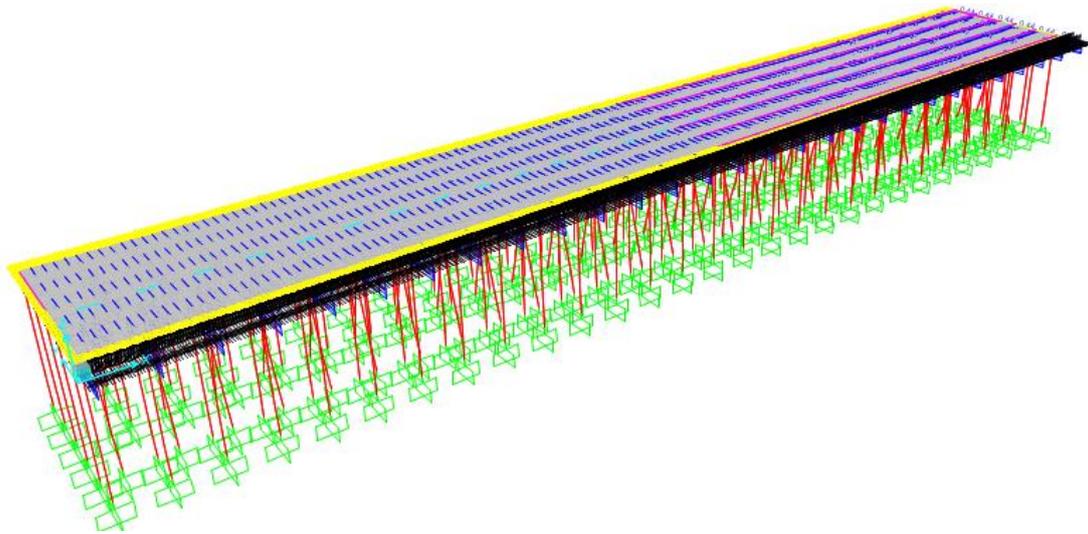


Figura A. 7: Carregamento +Vy – Conjuntos de Normas A1/A2.

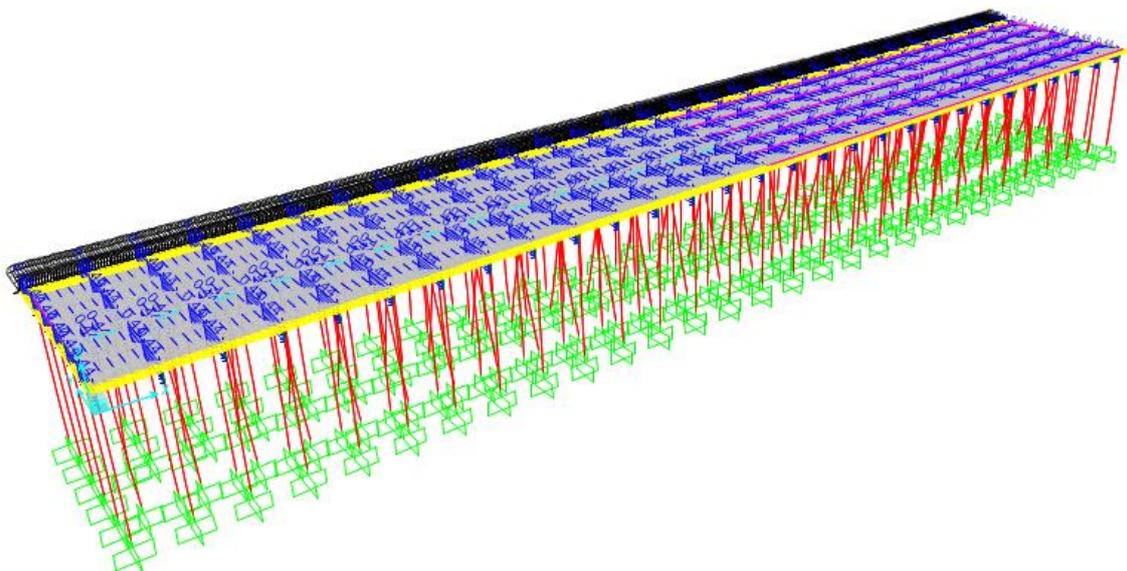


Figura A. 8: Carregamento -Vy – Conjuntos de Normas A1/A2.

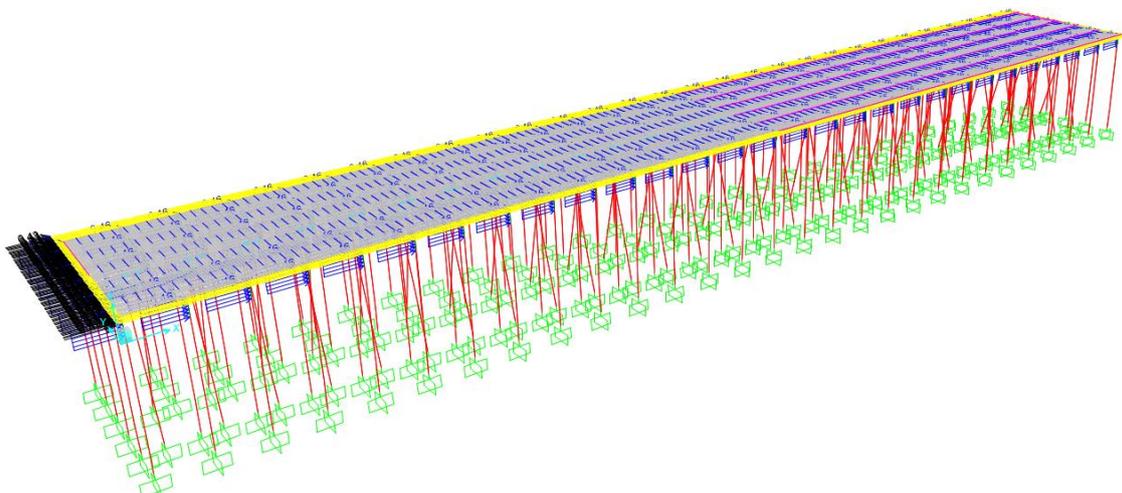


Figura A. 9: Carregamento +Vx – Conjuntos de Normas B1/B2.

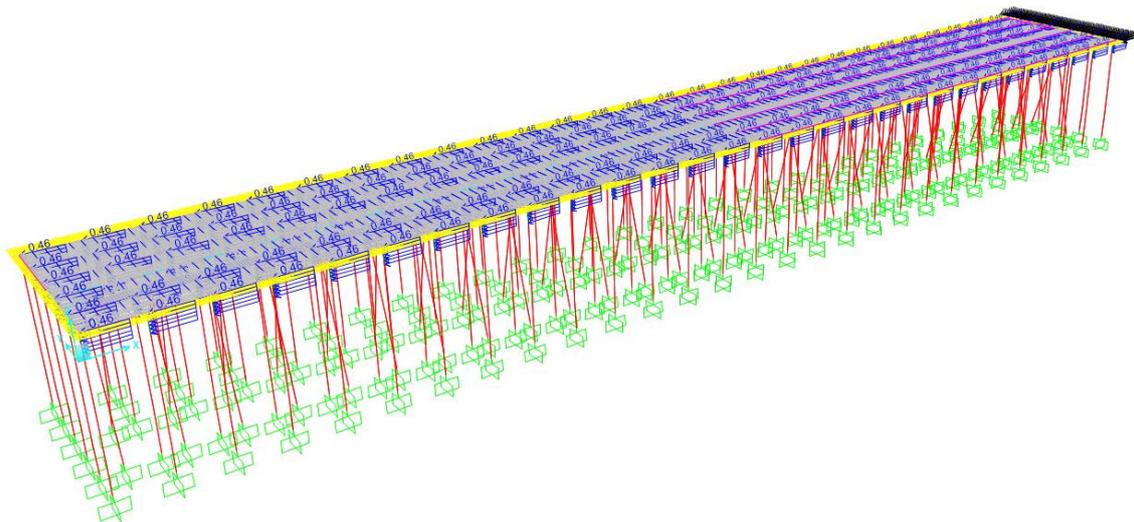


Figura A. 10: Carregamento $-V_x$ – Conjuntos de Normas B1/B2.

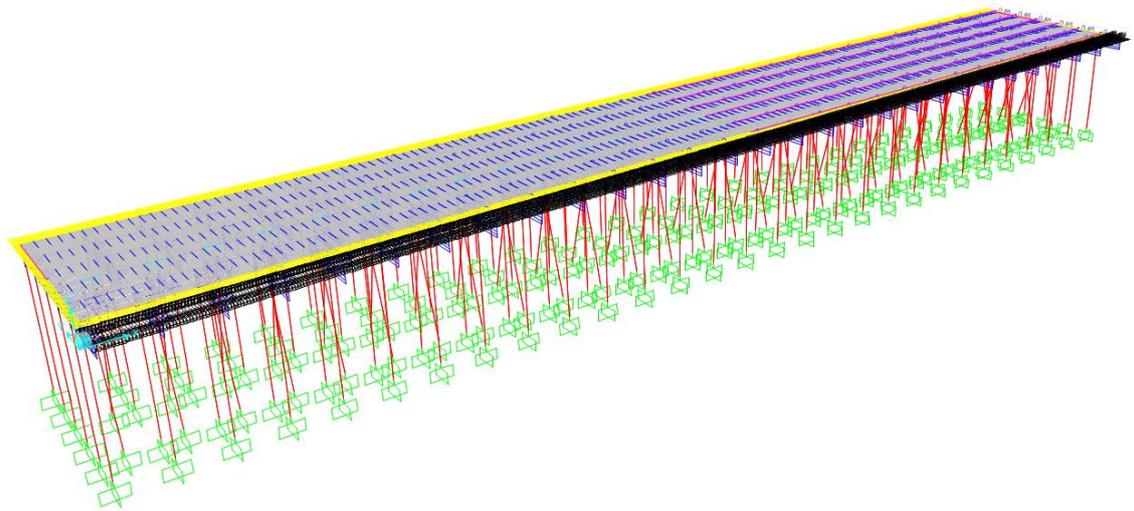


Figura A. 11: Carregamento $+V_y$ – Conjuntos de Normas B1/B2.

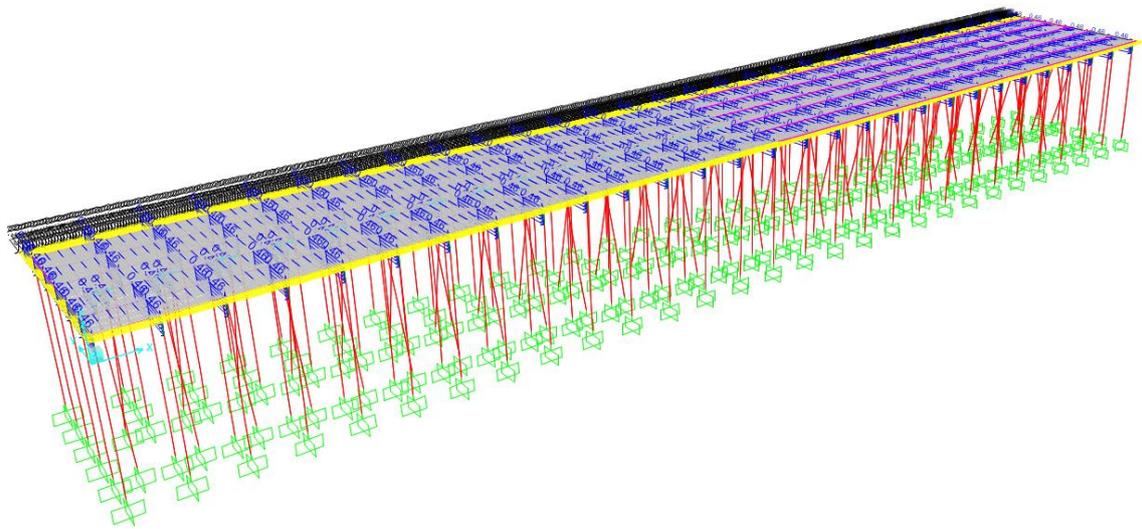


Figura A. 12: Carregamento $-V_y$ – Conjuntos de Normas B1/B2.

A.2 Ação da Corrente (C)

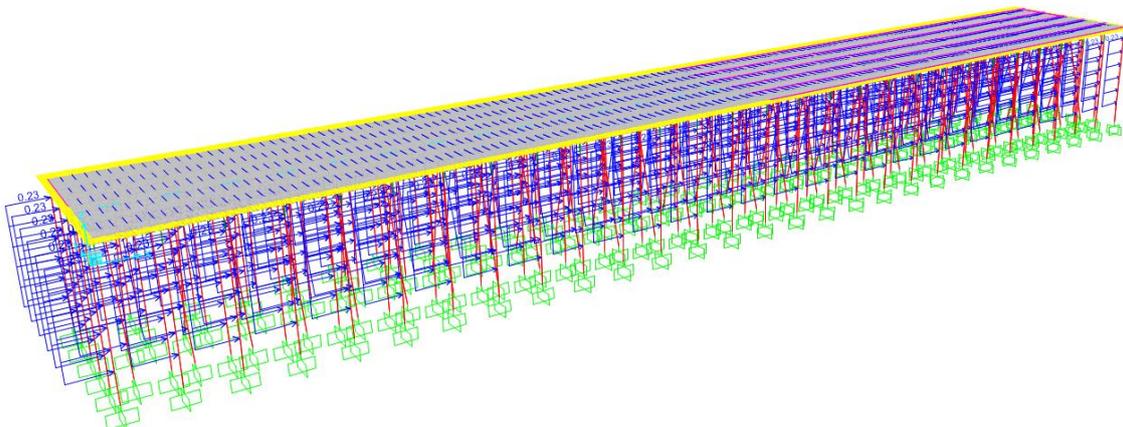


Figura A. 13: Carregamento +Cx – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

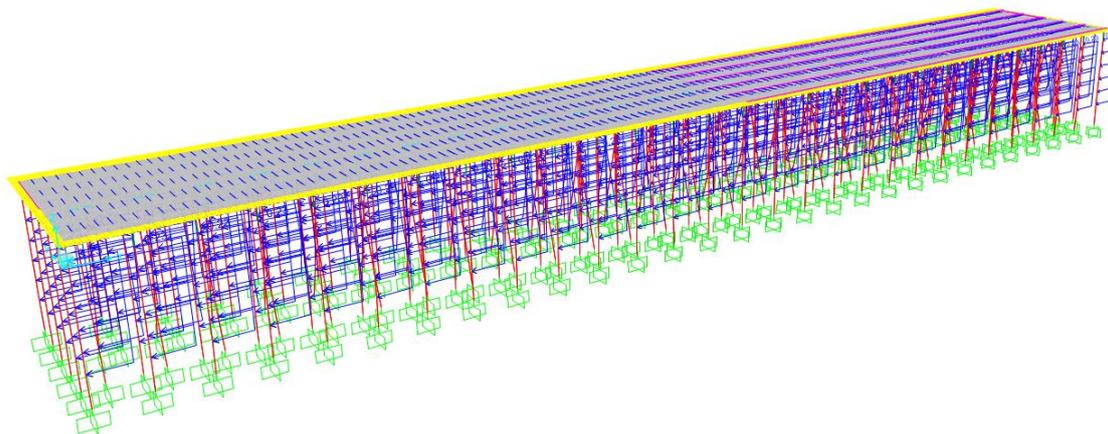


Figura A. 14: Carregamento -Cx – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

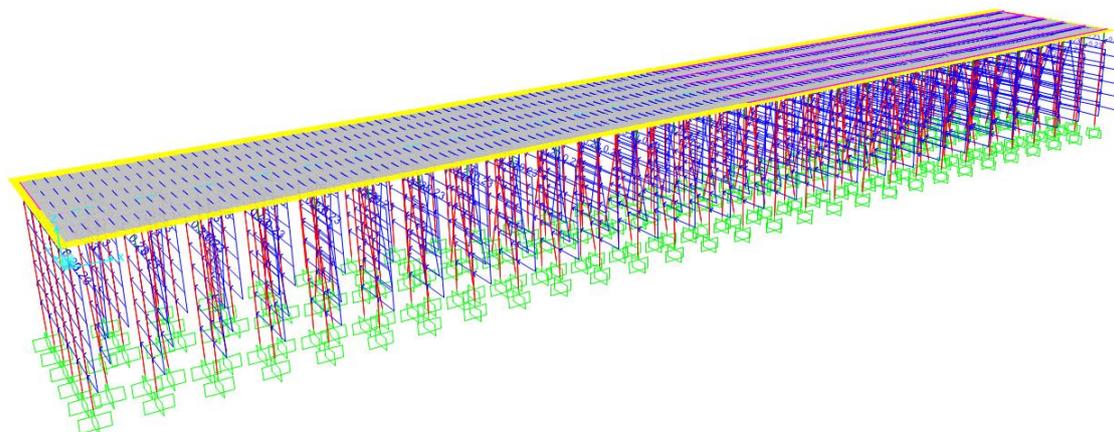


Figura A. 15: Carregamento +Cy – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

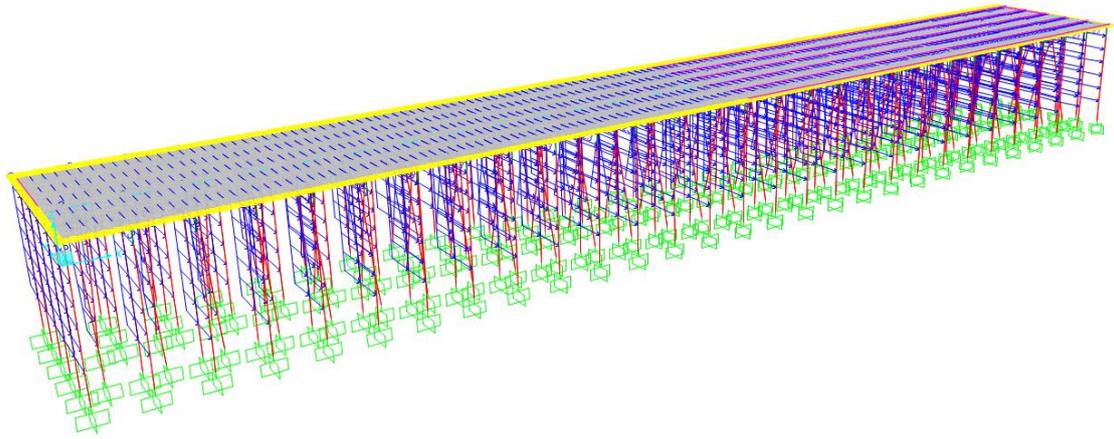


Figura A. 16: Carregamento -Cy – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

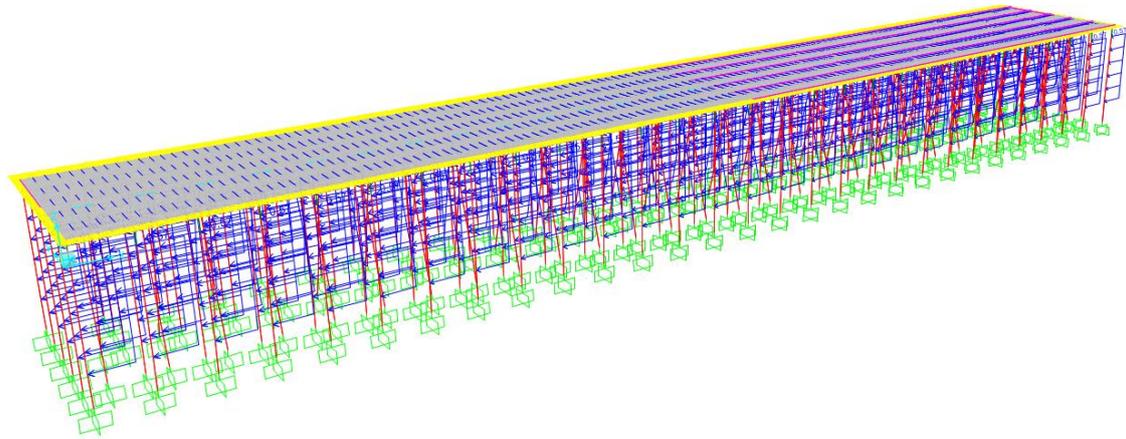


Figura A. 17: Carregamento +Cx – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

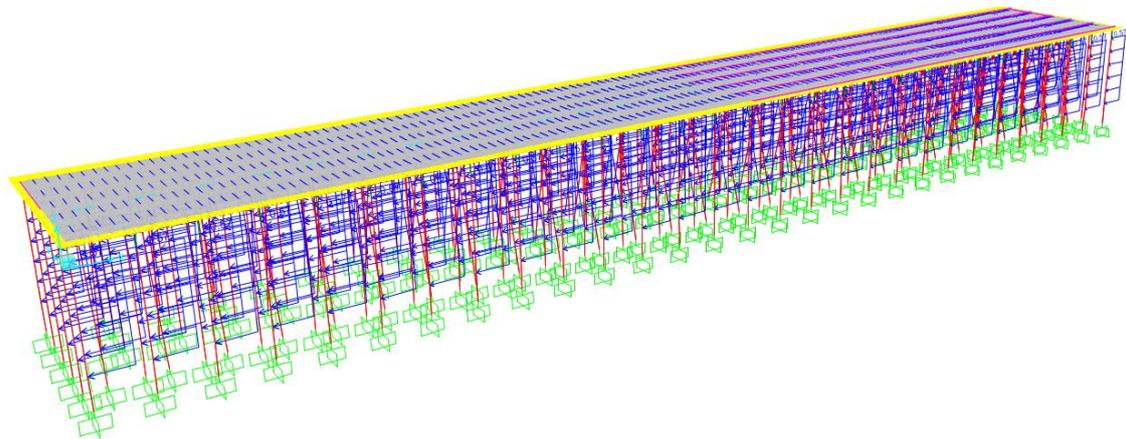


Figura A. 18: Carregamento -Cx – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

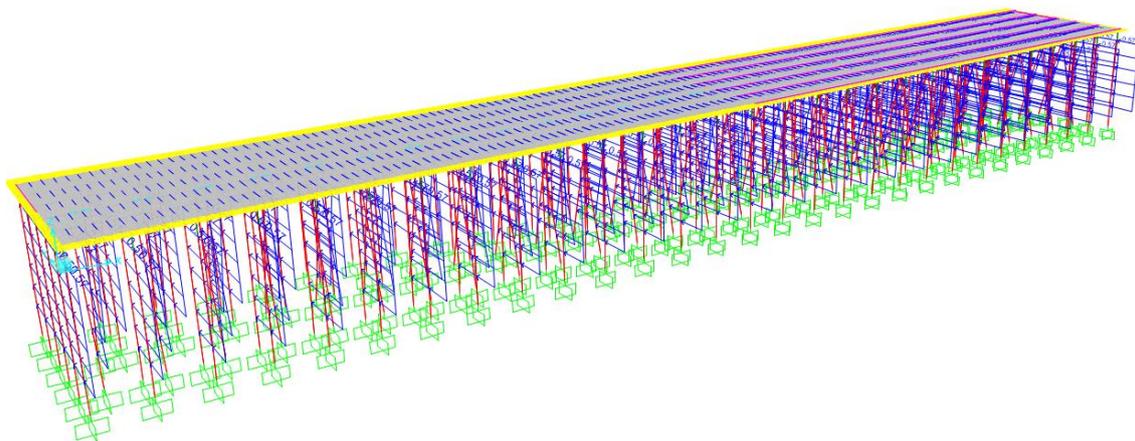


Figura A. 19: Carregamento +Cy – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

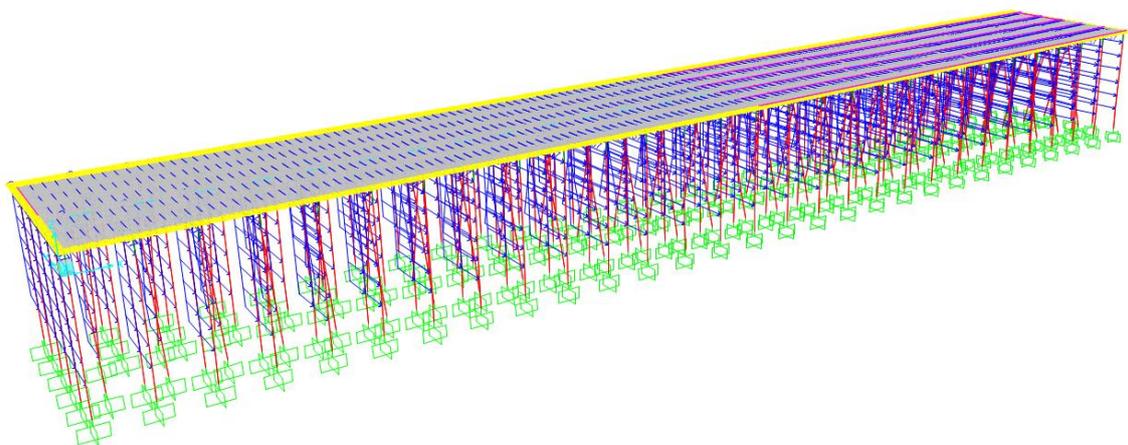


Figura A. 20: Carregamento -Cy – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

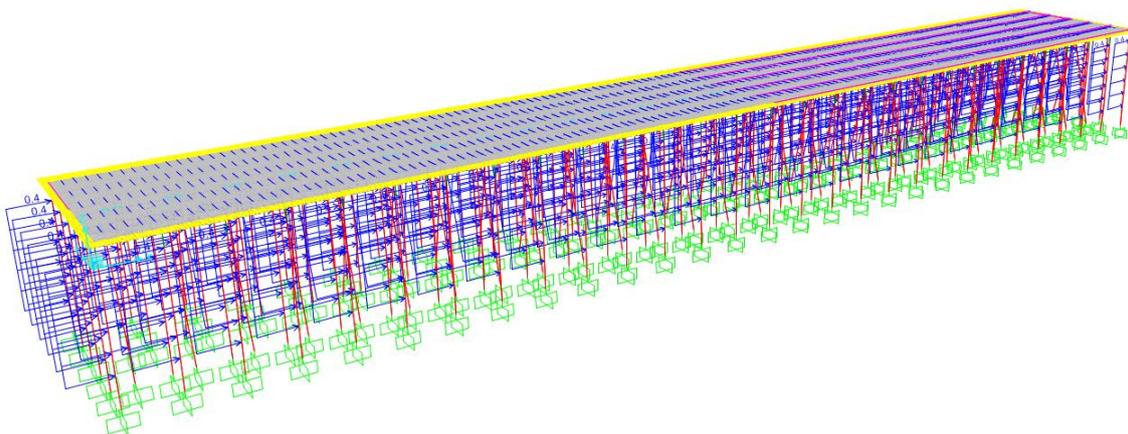


Figura A. 21: Carregamento +Cx – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.

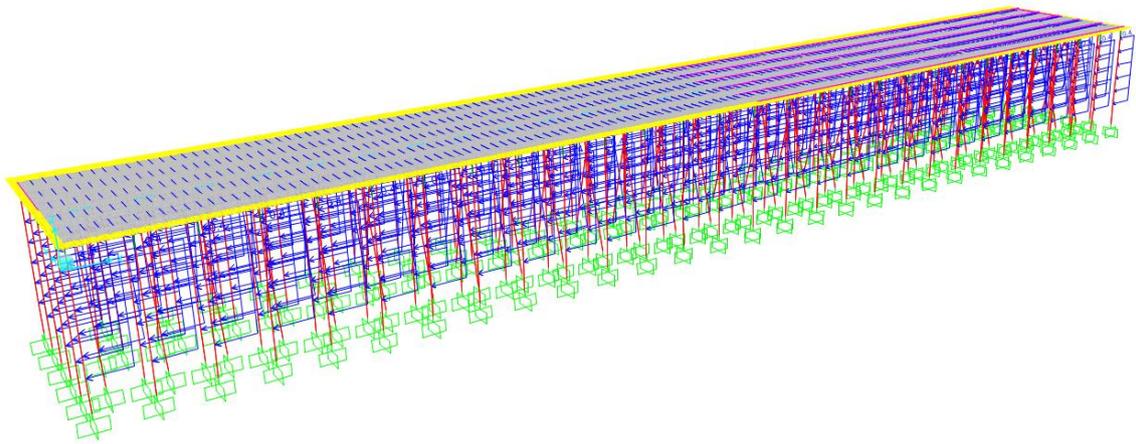


Figura A. 22: Carregamento -Cx – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.

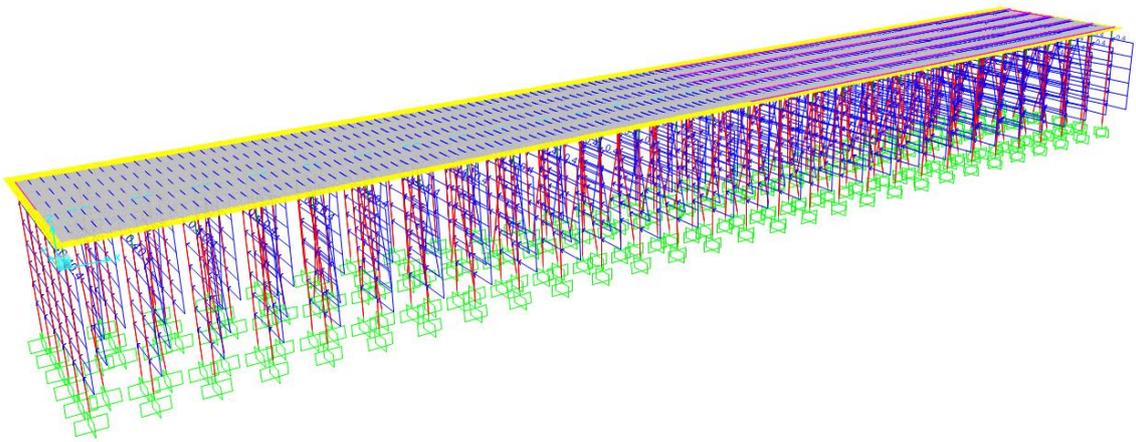


Figura A. 23: Carregamento +Cy – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.

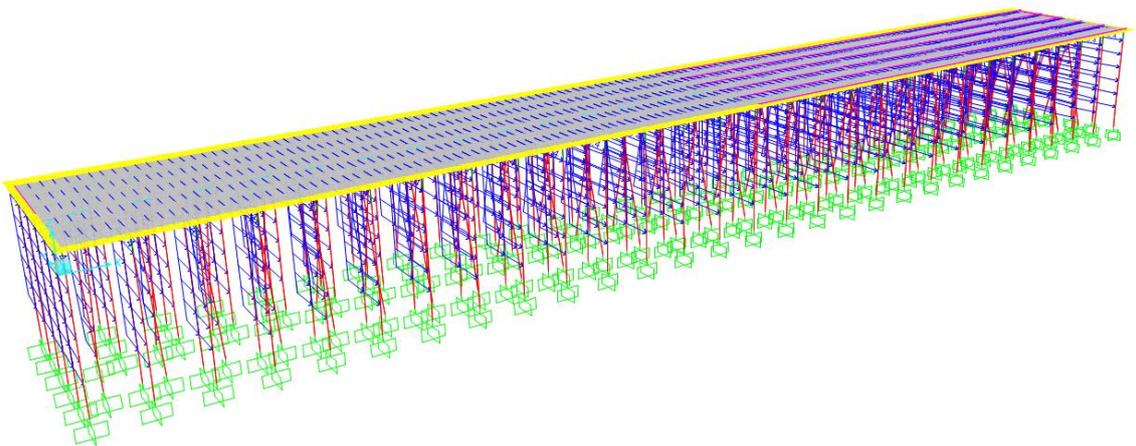


Figura A. 24: Carregamento -Cy – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.

A.3 Sobrecarga de Utilização (SC)

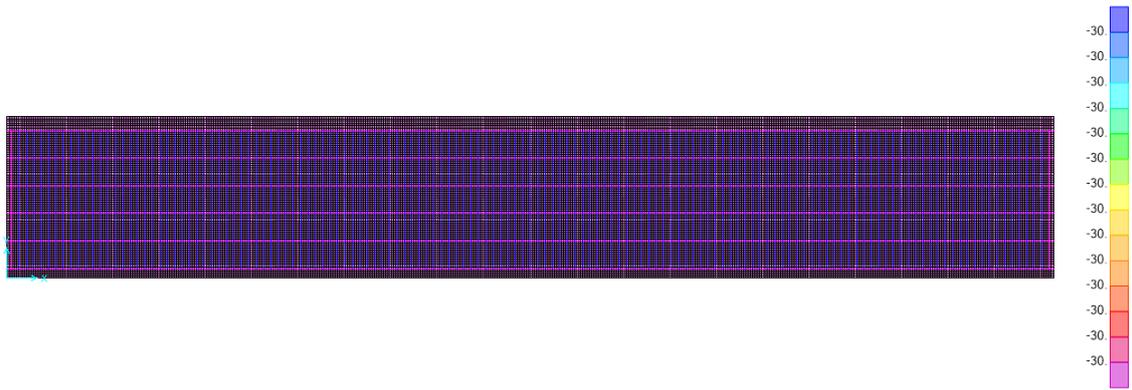


Figura A. 25: Carregamento SC – Conjuntos de Normas e Recomendações A1/A2.

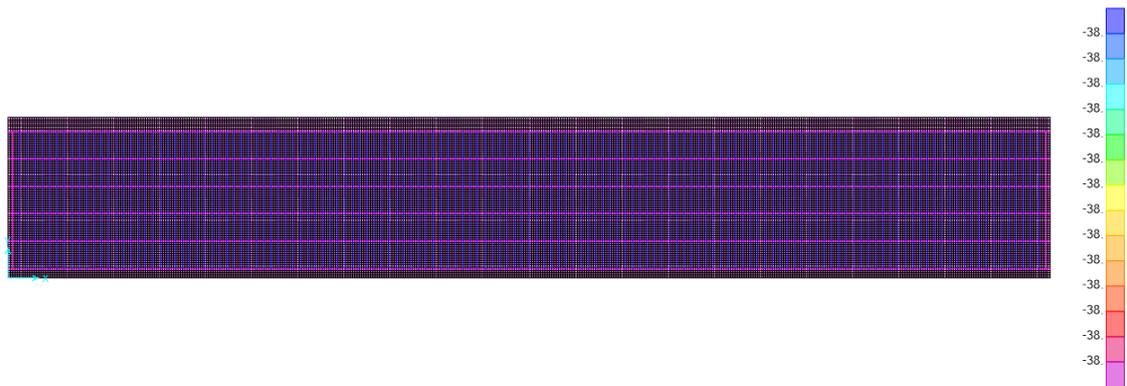


Figura A. 26: Carregamento SC – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.

A.4 Atracção (ATR)

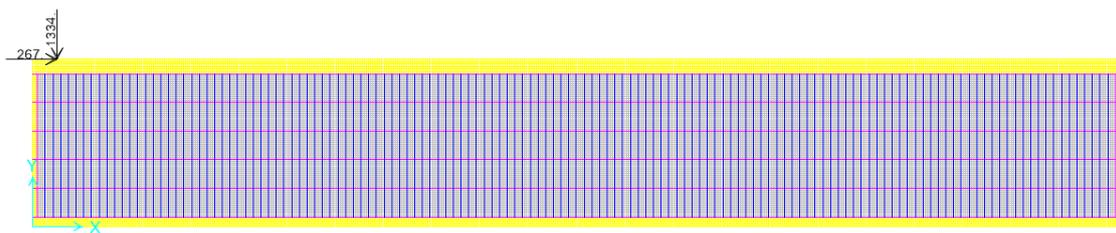


Figura A. 27: Carregamento ATR1 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

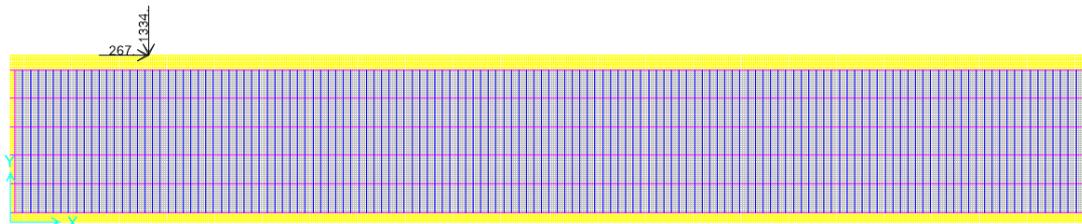


Figura A. 28: Carregamento ATR2 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

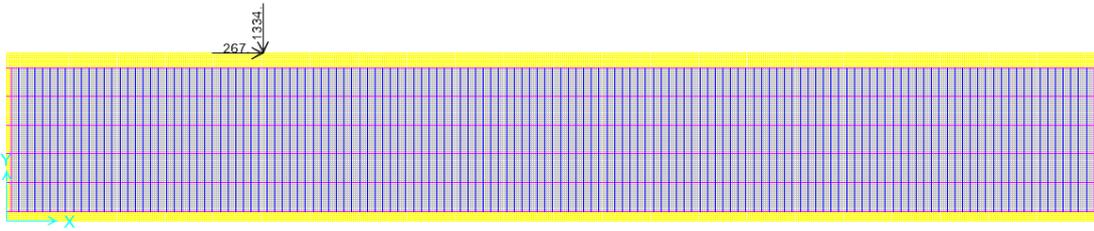


Figura A. 29: Carregamento ATR3 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

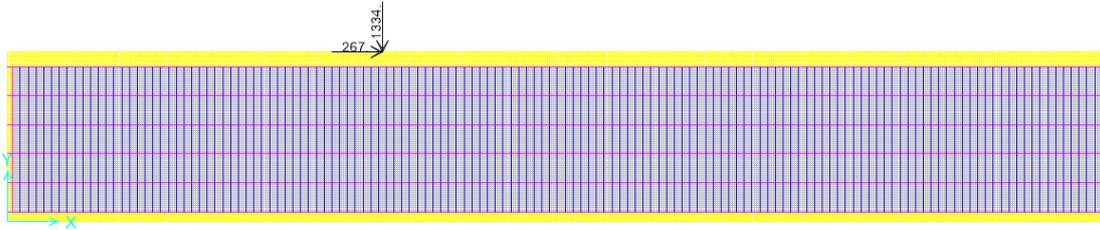


Figura A. 30: Carregamento ATR4 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

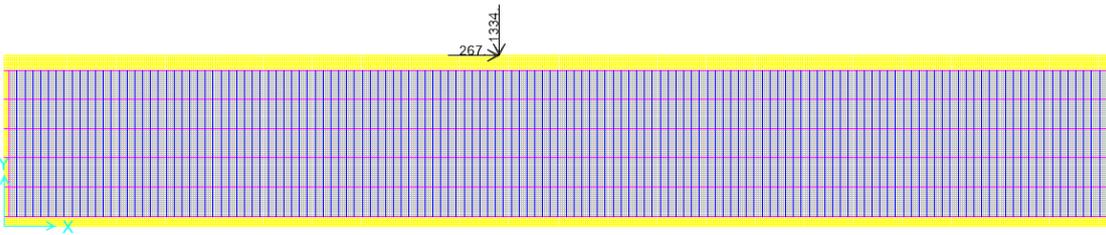


Figura A. 31: Carregamento ATR5 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

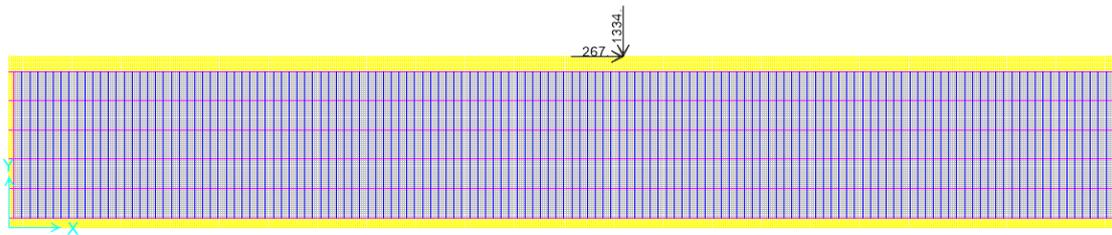


Figura A. 32: Carregamento ATR6 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

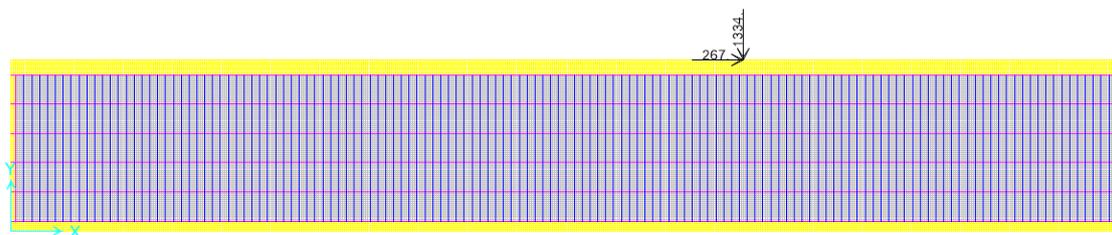


Figura A. 33: Carregamento ATR7 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

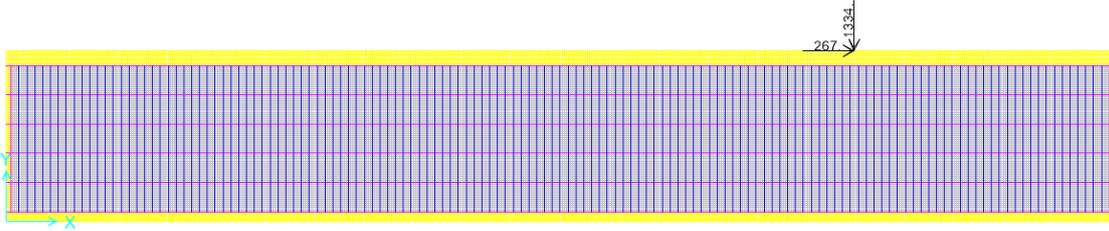


Figura A. 34: Carregamento ATR8 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

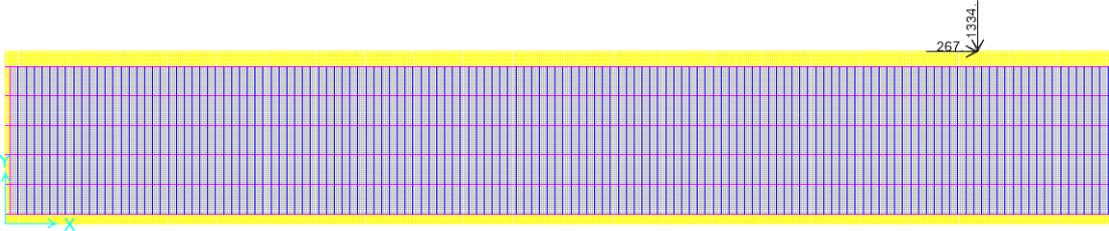


Figura A. 35: Carregamento ATR9 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

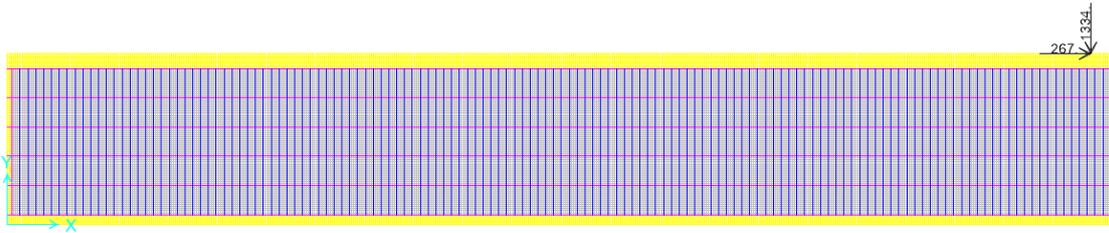


Figura A. 36: Carregamento ATR10 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

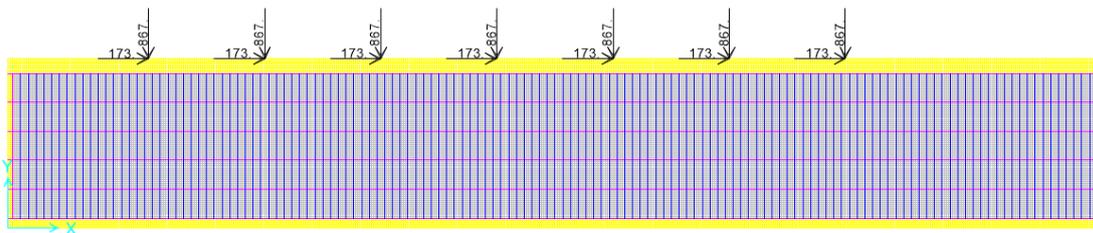


Figura A. 37: Carregamento ATR11 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

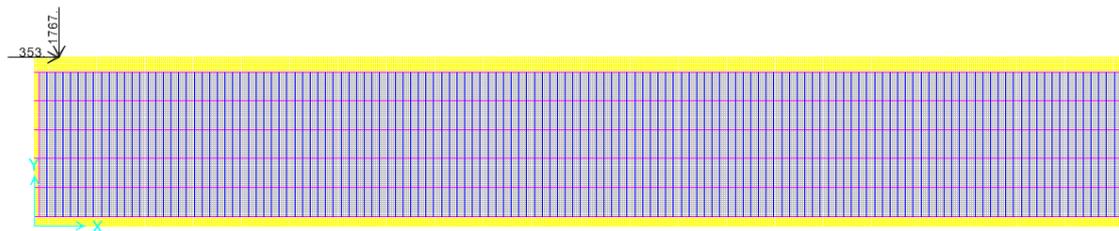


Figura A. 38: Carregamento ATR1 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

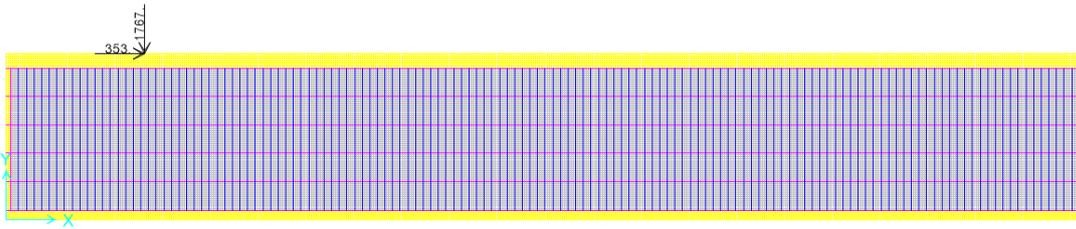


Figura A. 39: Carregamento ATR2 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

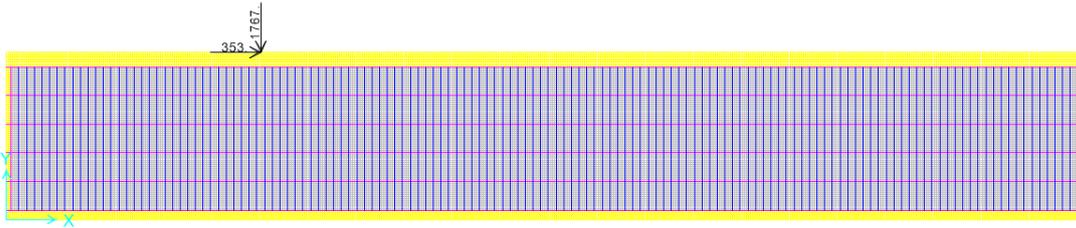


Figura A. 40: Carregamento ATR3 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

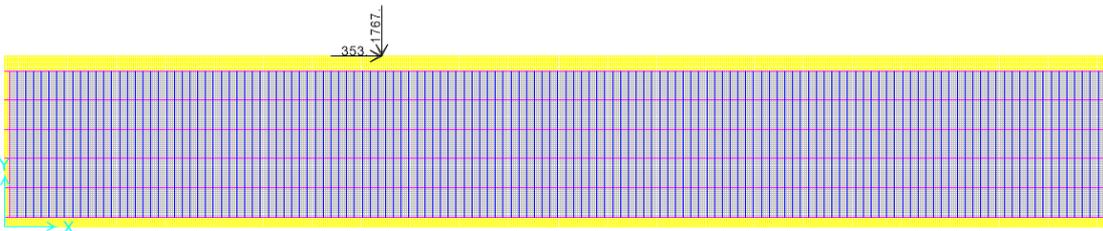


Figura A. 41: Carregamento ATR4 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

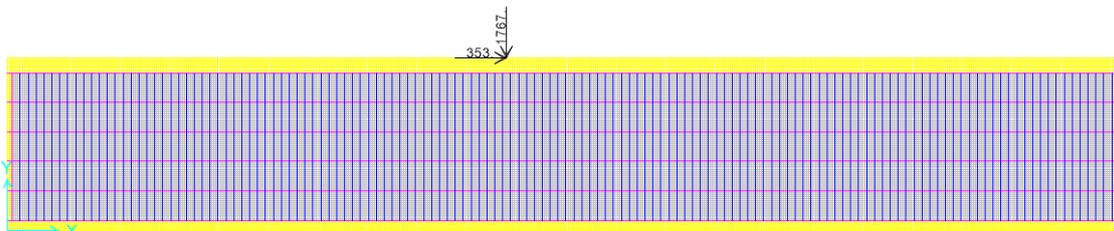


Figura A. 42: Carregamento ATR5 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

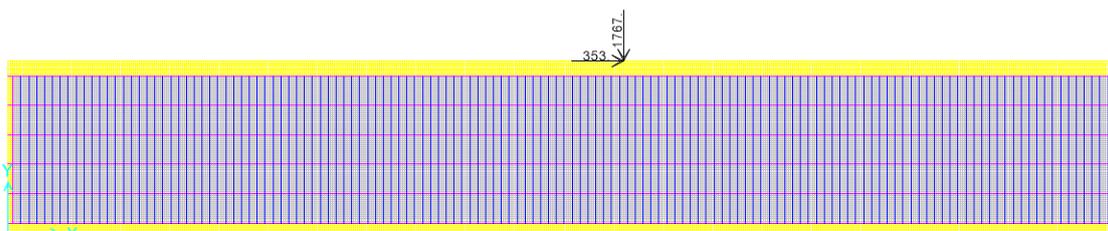


Figura A. 43: Carregamento ATR6 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

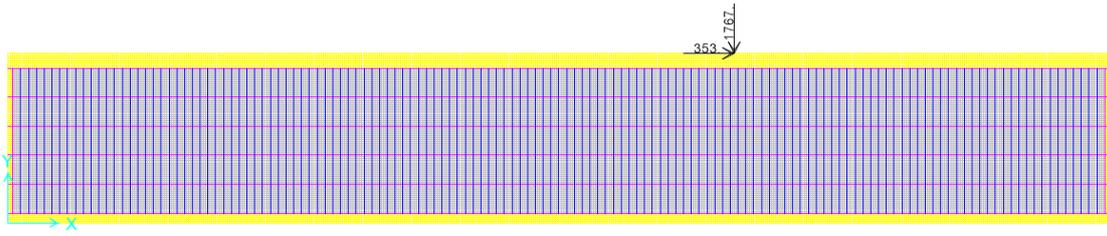


Figura A. 44: Carregamento ATR7 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

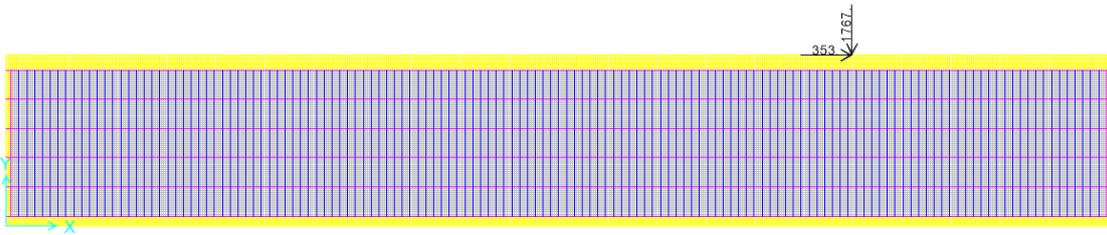


Figura A. 45: Carregamento ATR8 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.



Figura A. 46: Carregamento ATR9 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

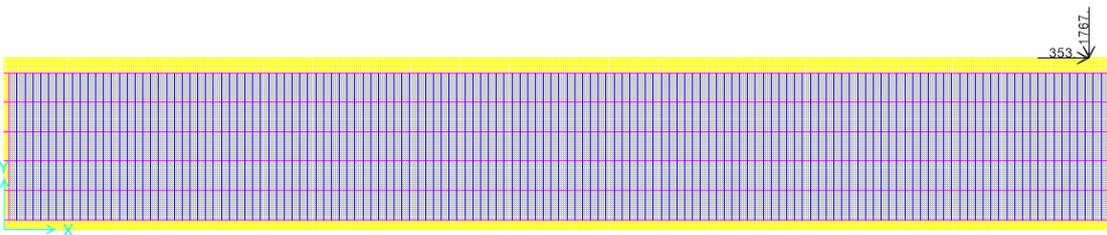


Figura A. 47: Carregamento ATR10 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

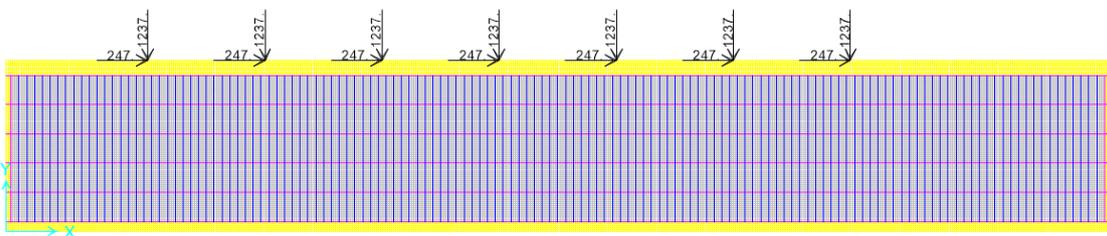


Figura A. 48: Carregamento ATR11 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

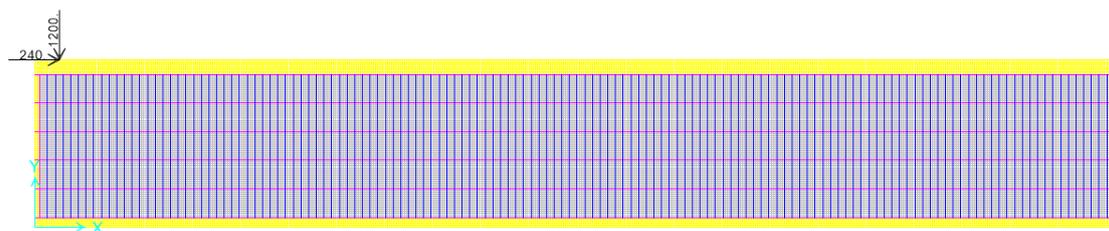


Figura A. 49: Carregamento ATR1 – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.

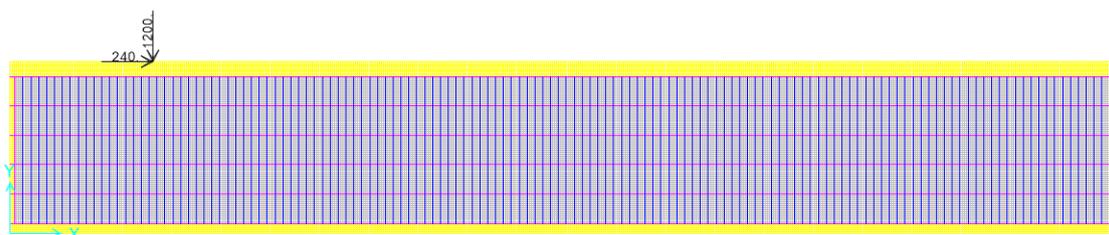


Figura A. 50: Carregamento ATR2 – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.

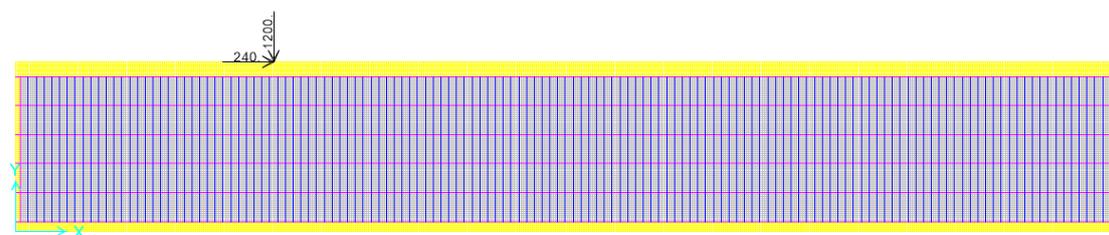


Figura A. 51: Carregamento ATR3 – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.

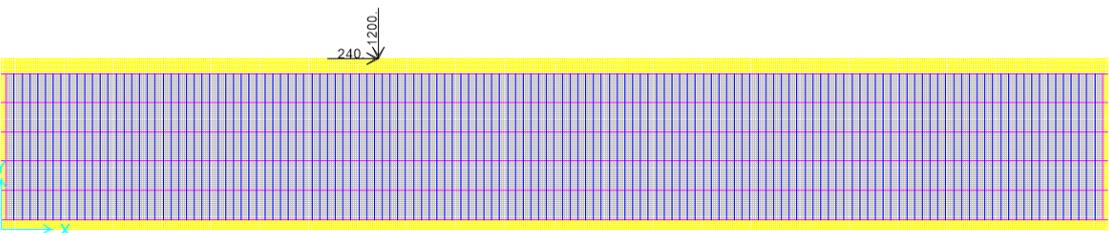


Figura A. 52: Carregamento ATR4 – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.

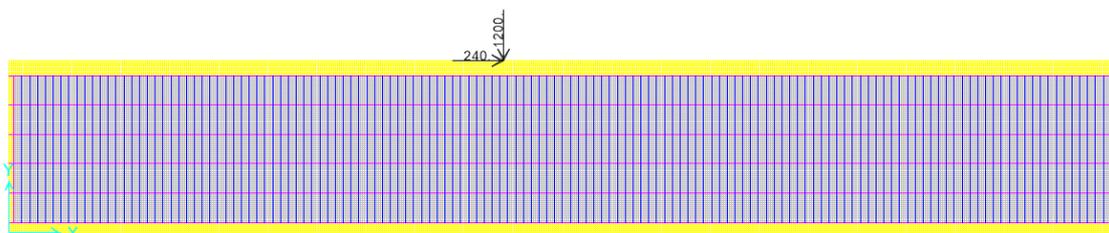


Figura A. 53: Carregamento ATR5 – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.

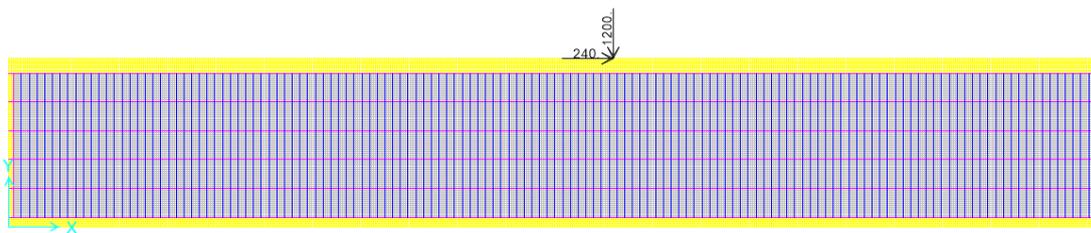


Figura A. 54: Carregamento ATR6 – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.

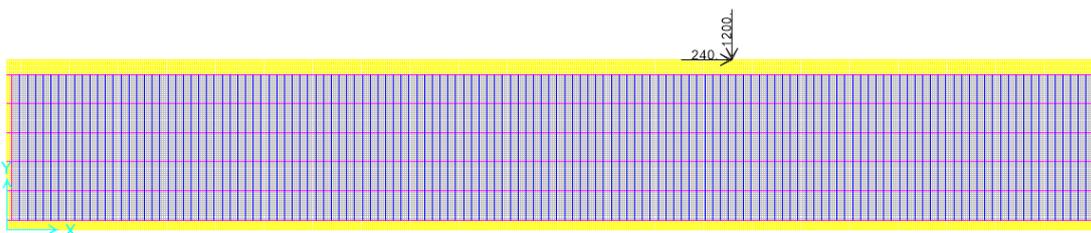


Figura A. 55: Carregamento ATR7 – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.

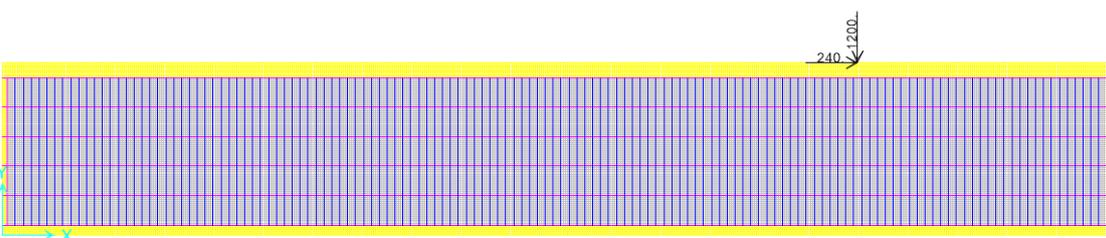


Figura A. 56: Carregamento ATR8 – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.



Figura A. 57: Carregamento ATR9 – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.

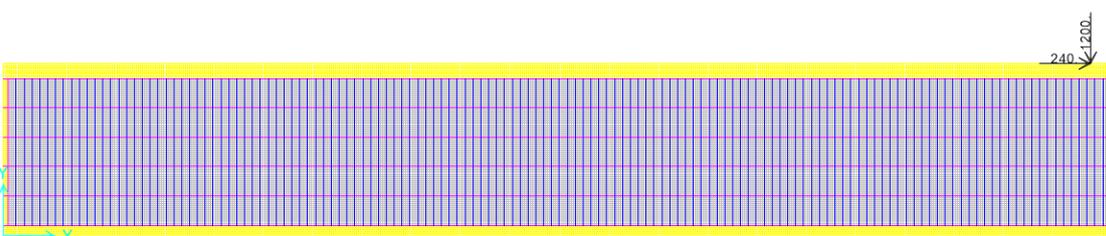


Figura A. 58: Carregamento ATR10 – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.

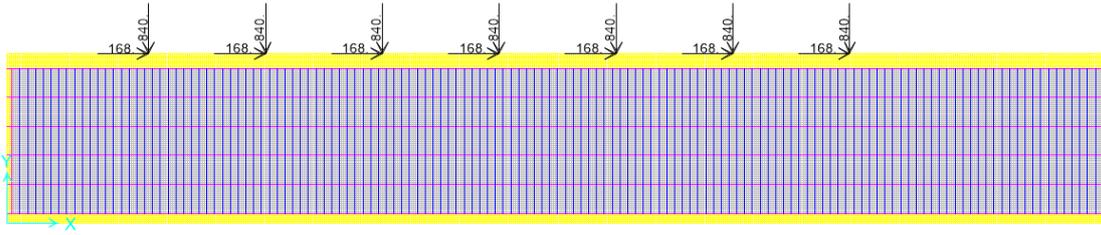


Figura A. 59: Carregamento ATR11 – Conjuntos de Normas e Recomendações B1/B2.

A.5 Amarração (AM)

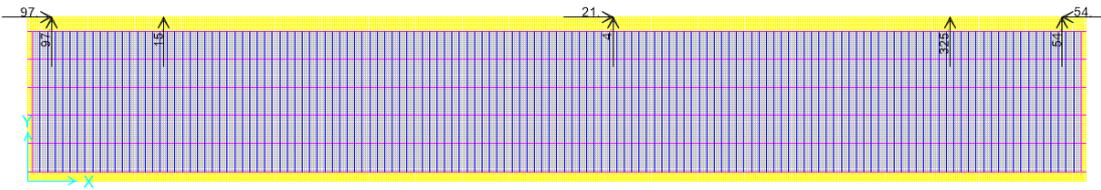


Figura A. 60: Carregamento AM1 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

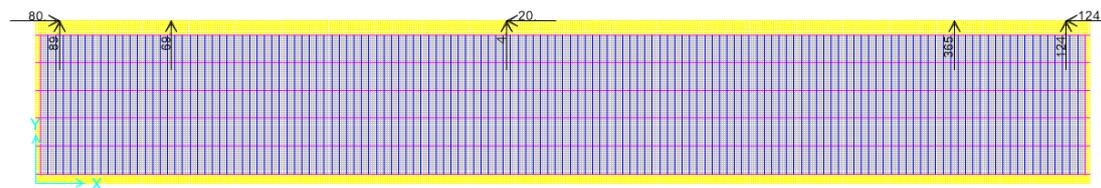


Figura A. 61: Carregamento AM2 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

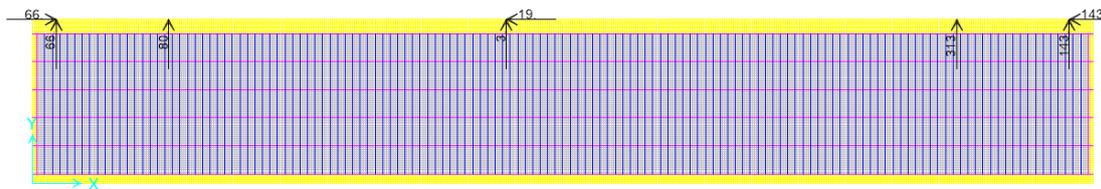


Figura A. 62: Carregamento AM3 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

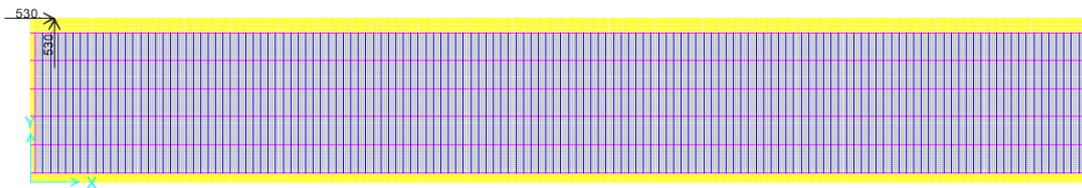


Figura A. 63: Carregamento AM4 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

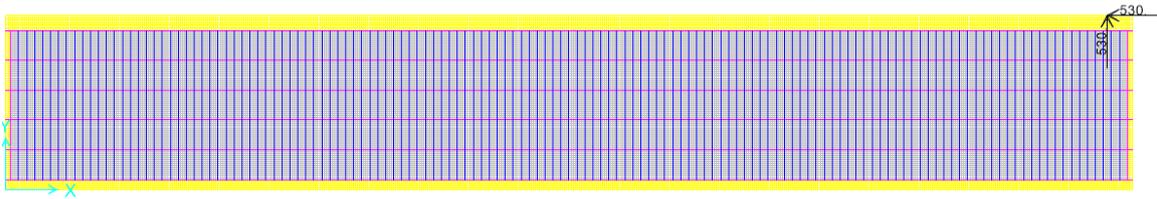


Figura A. 64: Carregamento AM5 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

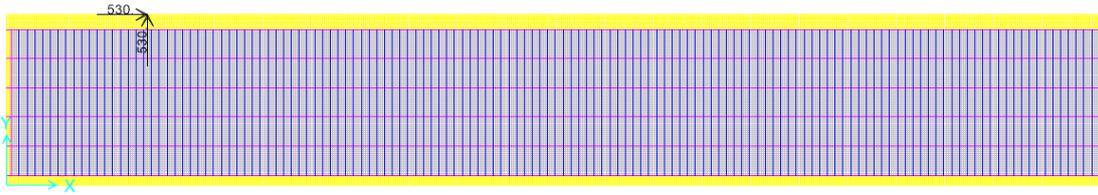


Figura A. 65: Carregamento AM6 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

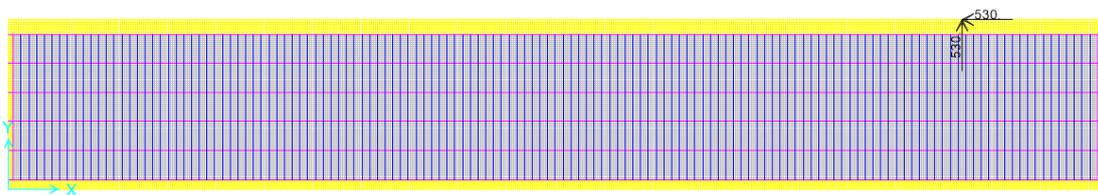


Figura A. 66: Carregamento AM7 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

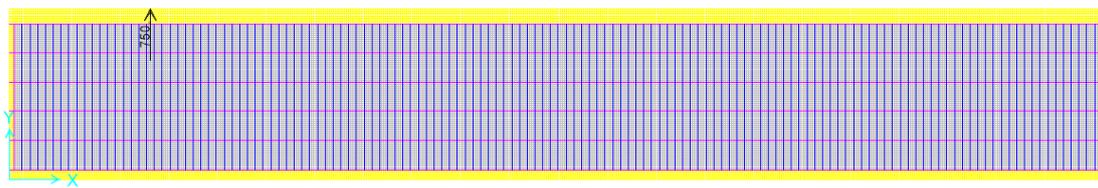


Figura A. 67: Carregamento AM8 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

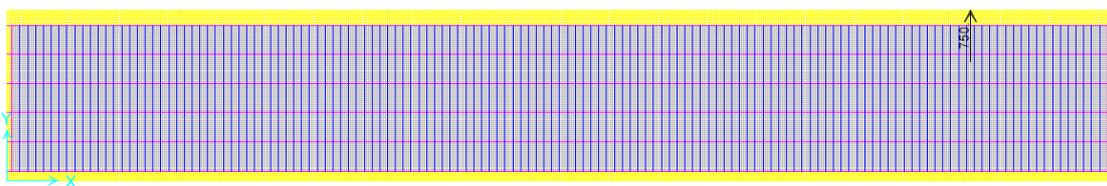


Figura A. 68: Carregamento AM9 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

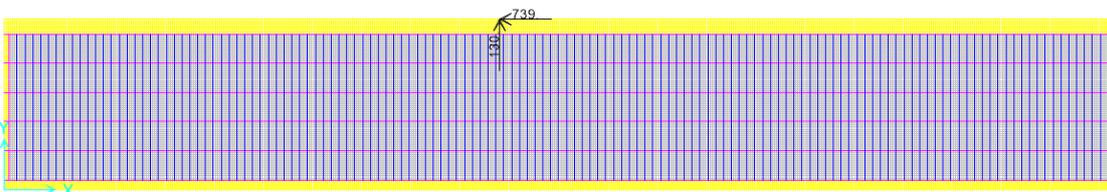


Figura A. 69: Carregamento A10 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

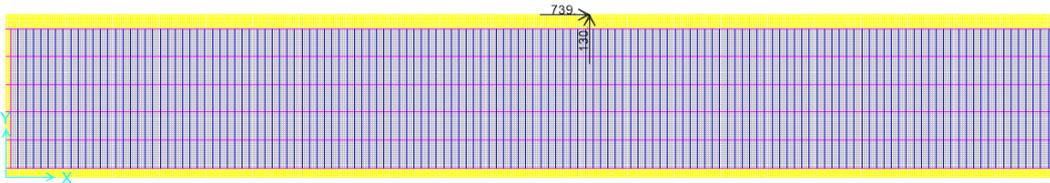


Figura A. 70: Carregamento AM11 – Conjunto de Normas e Recomendações A1.

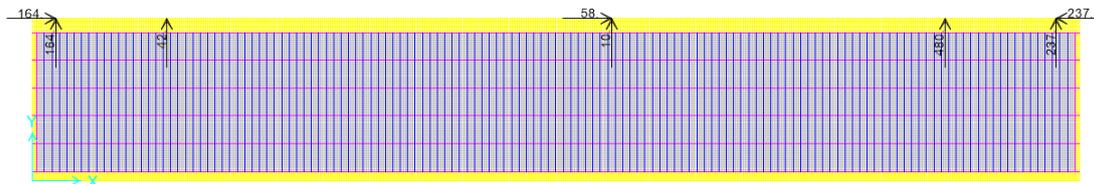


Figura A. 71: Carregamento AM1 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

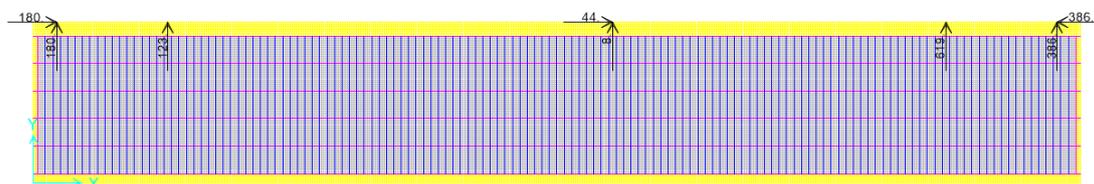


Figura A. 72: Carregamento AM2 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

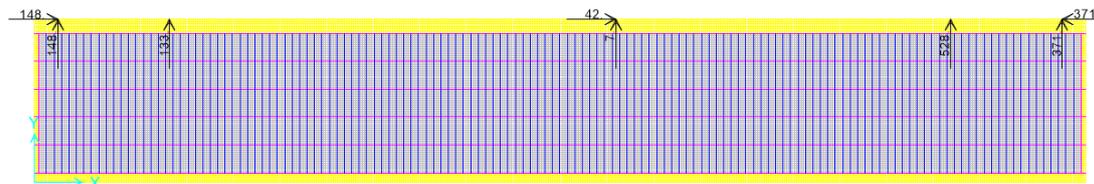


Figura A. 73: Carregamento AM3 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

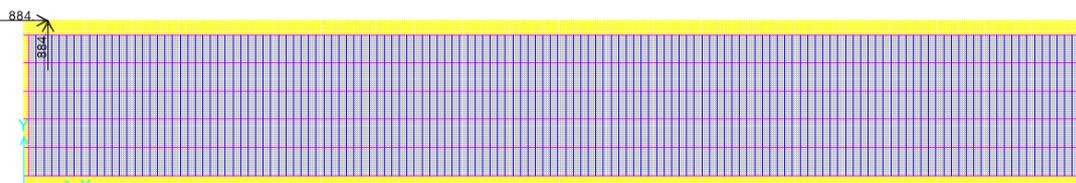


Figura A. 74: Carregamento AM4 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

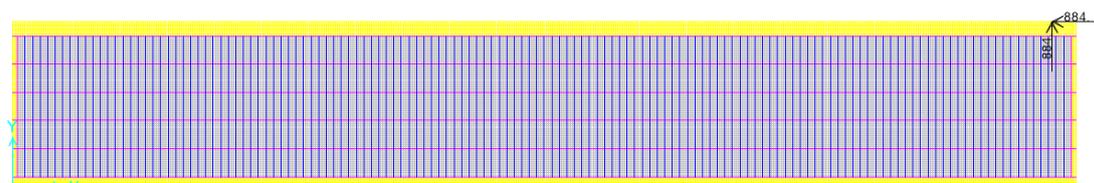


Figura A. 75: Carregamento A5 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

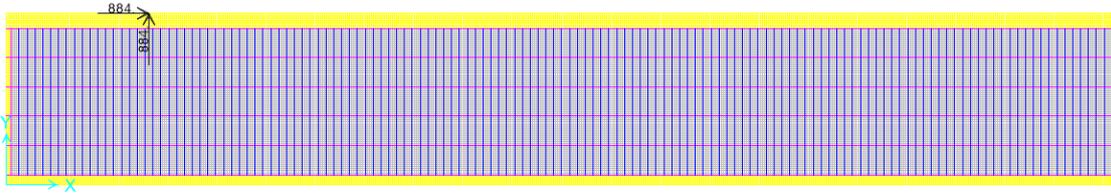


Figura A. 76: Carregamento AM6 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

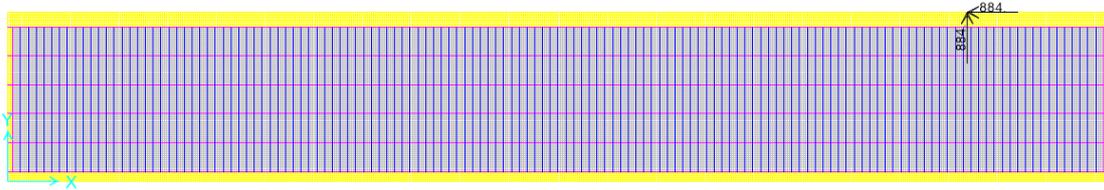


Figura A. 77: Carregamento AM7 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

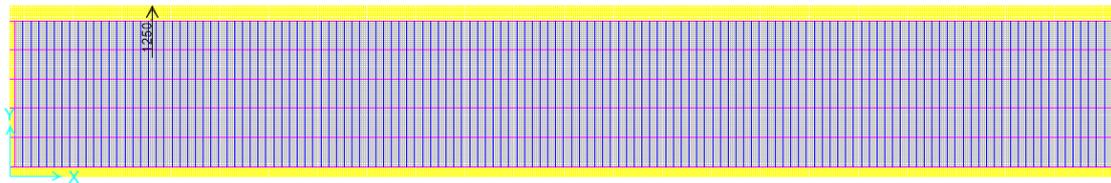


Figura A. 78: Carregamento AM8 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

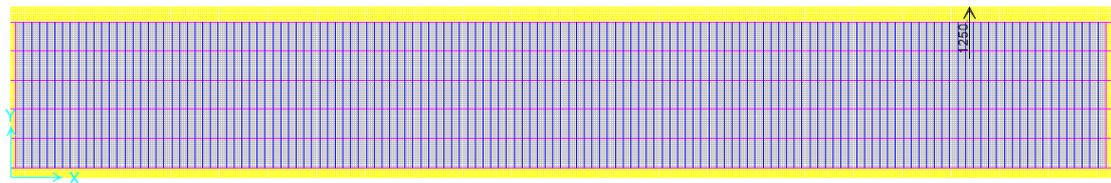


Figura A. 79: Carregamento AM9 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

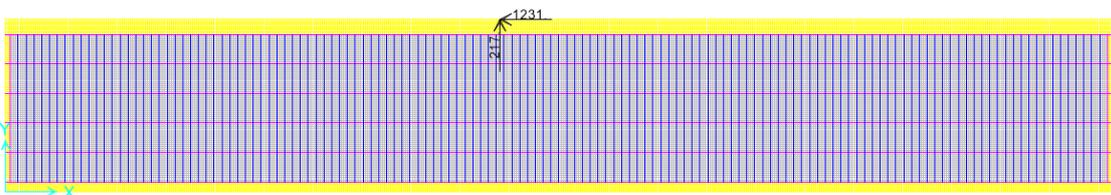


Figura A. 80: Carregamento AM10 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

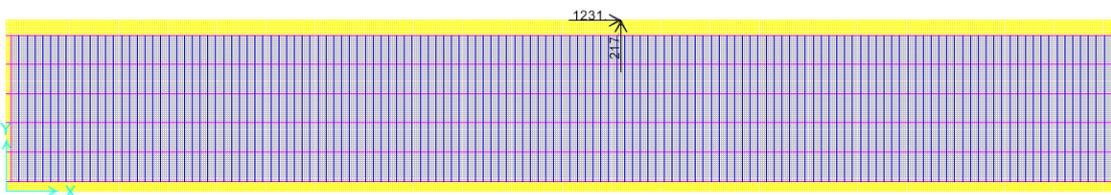


Figura A. 81: Carregamento AM11 – Conjunto de Normas e Recomendações A2.

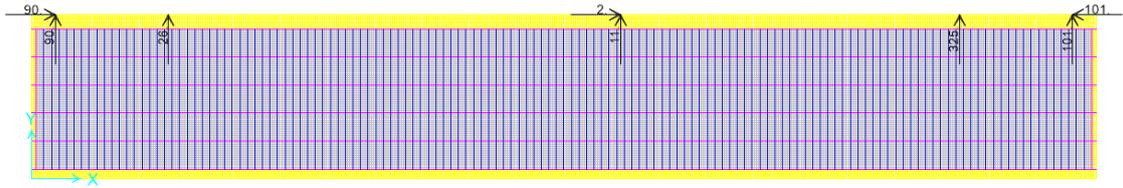


Figura A. 82: Carregamento AM1 – Conjunto de Normas e Recomendações B1.

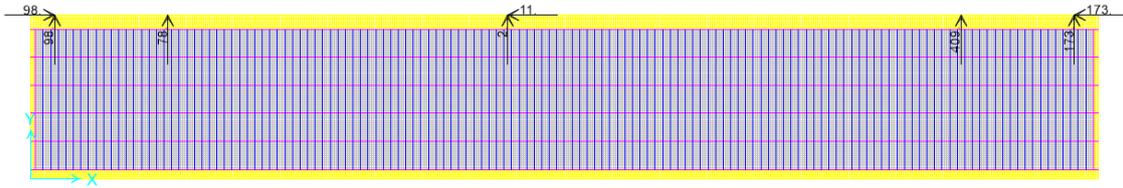


Figura A. 83: Carregamento AM2 – Conjunto de Normas e Recomendações B1.

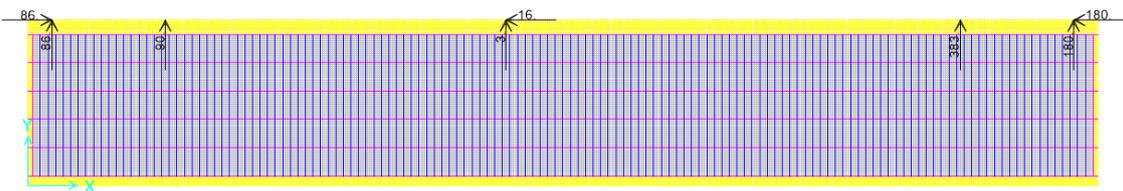


Figura A. 84: Carregamento AM3 – Conjunto de Normas e Recomendações B1.

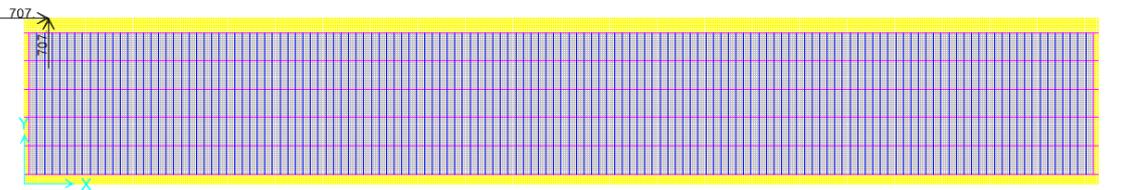


Figura A. 85: Carregamento A4 – Conjunto de Normas e Recomendações B1.

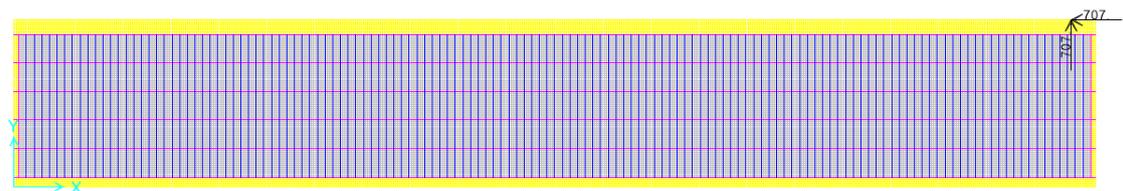


Figura A. 86: Carregamento AM5 – Conjunto de Normas e Recomendações B1.

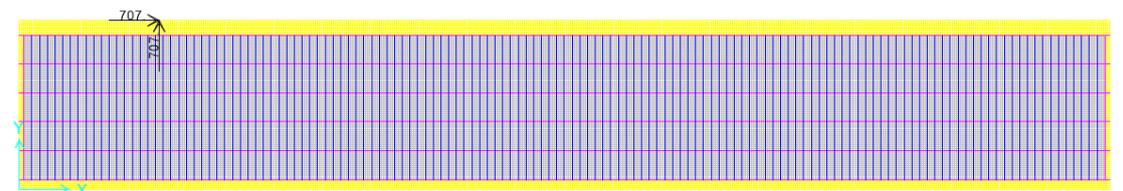


Figura A. 87: Carregamento AM6 – Conjunto de Normas e Recomendações B1.

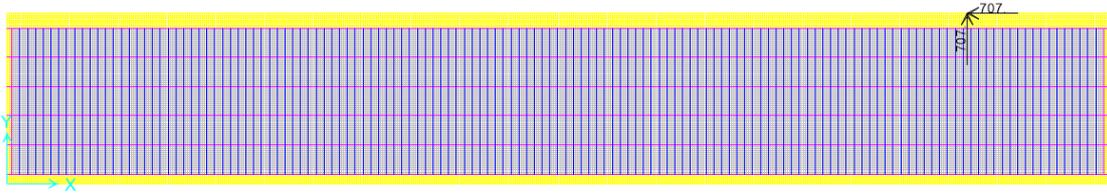


Figura A. 88: Carregamento AM7 – Conjunto de Normas e Recomendações B1.

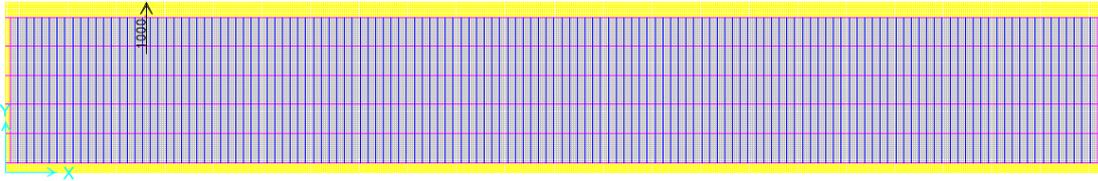


Figura A. 89: Carregamento AM8 – Conjunto de Normas e Recomendações B1.

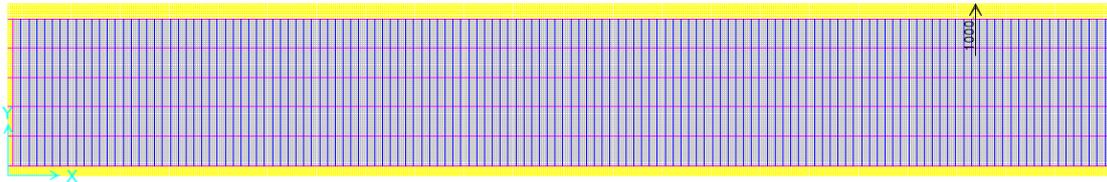


Figura A. 90: Carregamento AM9 – Conjunto de Normas e Recomendações B1.

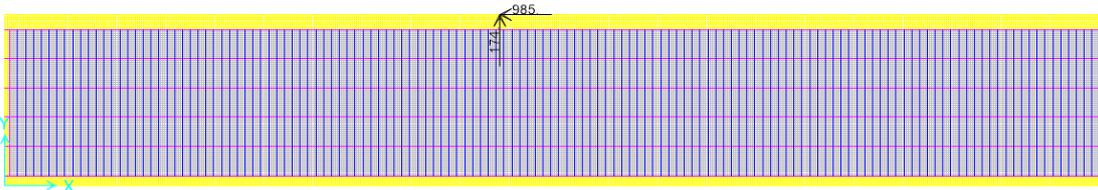


Figura A. 91: Carregamento AM10 – Conjunto de Normas e Recomendações B1.

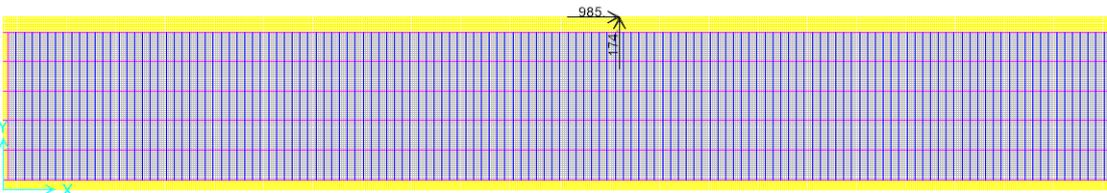


Figura A. 92: Carregamento AM11 – Conjunto de Normas e Recomendações B1.

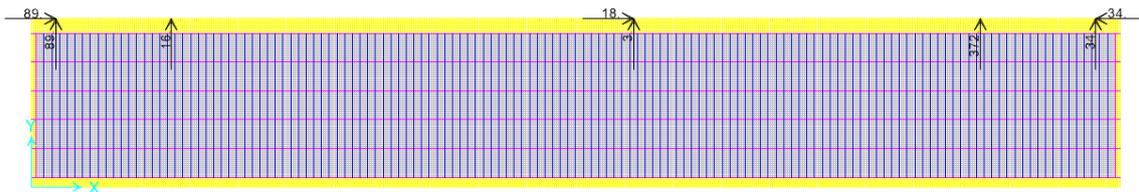


Figura A. 93: Carregamento AM1 – Conjunto de Normas e Recomendações B2.

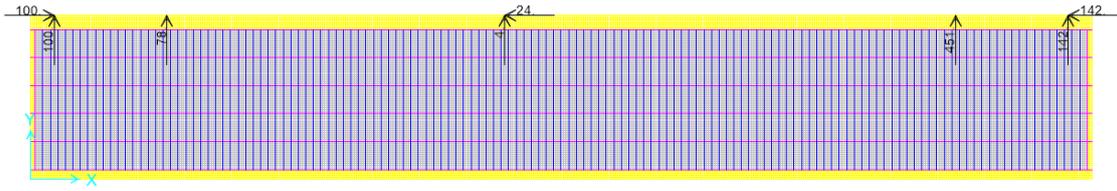


Figura A. 94: Carregamento AM2 – Conjunto de Normas e Recomendações B2.

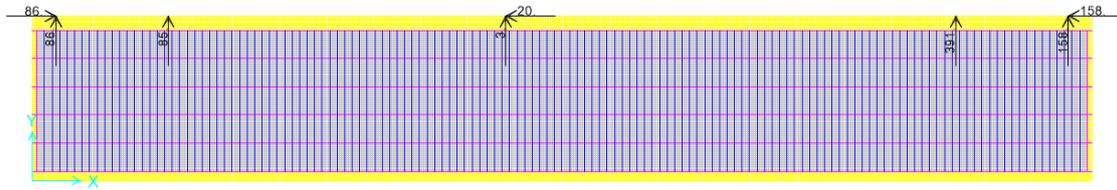


Figura A. 95: Carregamento AM3 – Conjunto de Normas e Recomendações B2.

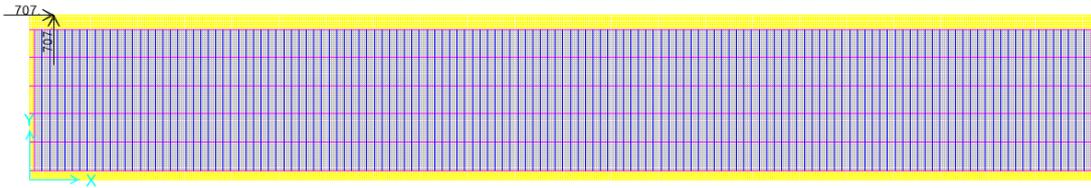


Figura A. 96: Carregamento AM4 – Conjunto de Normas e Recomendações B2.

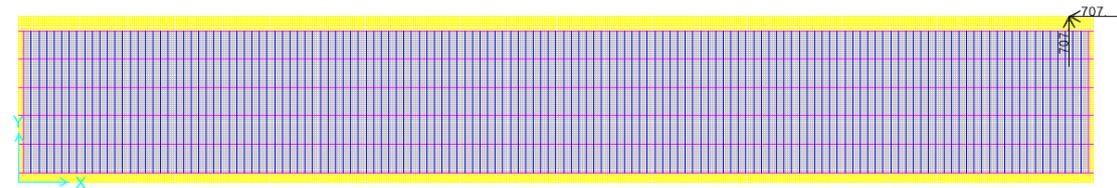


Figura A. 97: Carregamento AM5 – Conjunto de Normas e Recomendações B2.

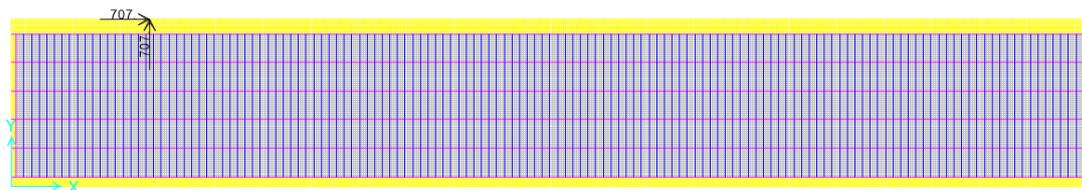


Figura A. 98: Carregamento AM6 – Conjunto de Normas e Recomendações B2.

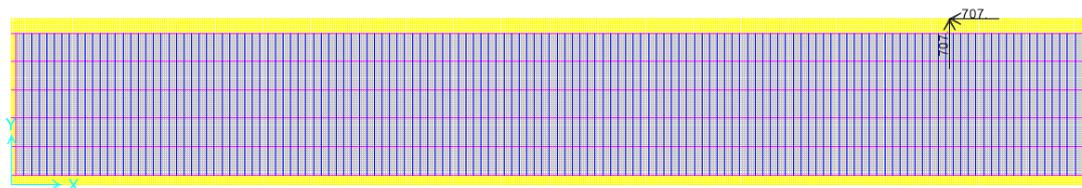


Figura A. 99: Carregamento AM7 – Conjunto de Normas e Recomendações B2.

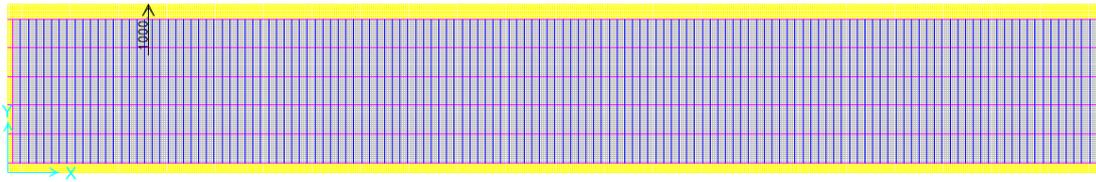


Figura A. 100: Carregamento AM8 – Conjunto de Normas e Recomendações B2.

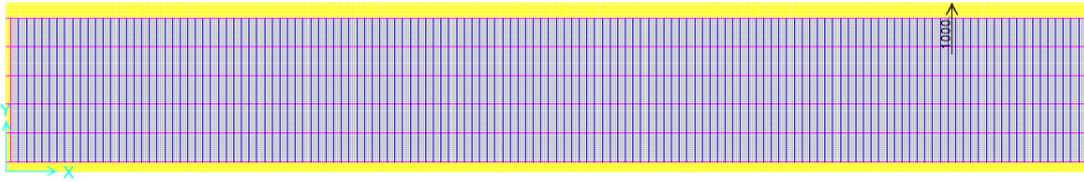


Figura A. 101: Carregamento A9 – Conjunto de Normas e Recomendações B2.

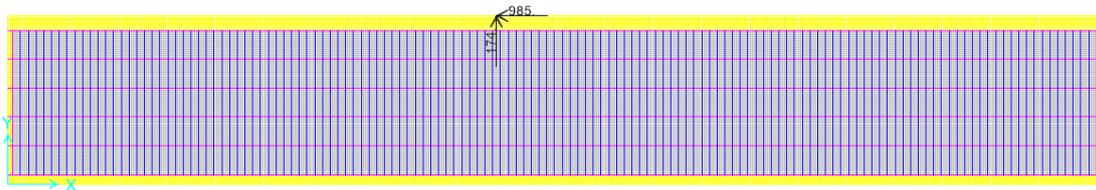


Figura A. 102: Carregamento AM10 – Conjunto de Normas e Recomendações B2.

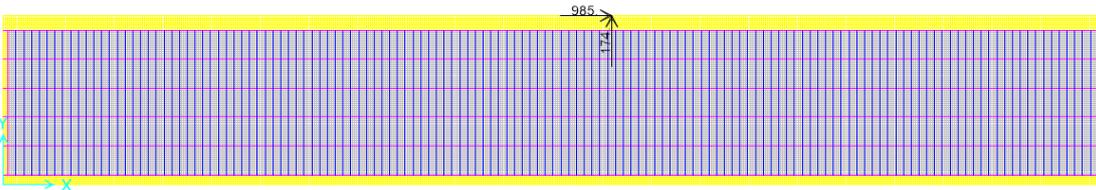


Figura A. 103: Carregamento AM11 – Conjunto de Normas e Recomendações B2.