

MELHORIA DAS CONDIÇÕES DE MANOBRA DE NAVIOS NO ACESSO A PORTOS

LUIZ PAULO PINTO FERREIRA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Fernando Francisco Machado Veloso
Gomes

JUNHO DE 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor. Documento produzido em português brasileiro.

A D. Nair e D. Maria (*in memoriam*) e ao Lulo e D. Sônia

“Os grandes navegadores devem sua reputação aos temporais e tempestades”

Epicuro

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tanto ter me dado a oportunidade quanto ter me dado a força e iluminar meu caminho para superar todas as dificuldades.

À Fernanda, pelo amor, carinho e apoio incondicional. Sem sua presença e incentivo não sei se teria alcançado mais esse objetivo.

À minha mãe, Sônia Pinto, por todo seu amor, que mesmo de longe sempre esteve presente em cada um dos momentos. Também por ser um dos meus modelos de dedicação aos estudos.

Ao meu pai, José Luiz, pelo suporte dado e pelas horas que gastamos discutindo sobre o assunto. Também, por ser meu exemplo maior de competência e meu modelo de engenheiro civil.

À minha avó materna, Nair Salles, que foi quem me ensinou a sonhar e acreditar que é possível concretizar esses sonhos.

A minha avó parterna, Maria Ferrazani, que me mostrou que nada se consegue sem luta e que todo esforço vale a pena e é, de alguma forma, recompensado.

A Rigel Construtora, pelo apoio que, apostando em mim, proveu todos os recursos necessários para minha vinda e estadia a Porto.

A meu orientador, Professor Veloso Gomes, pela aposta em me orientar, pelo conhecimento transmitido, por sua dedicação e compreensão comigo.

A Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pelo apoio dado e por oportunizar, com sua estrutura e corpo docente, minha evolução acadêmico-profissional.

Ao professor Eduardo Aoun Tannuri da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela gentileza de disponibilizar dados.

Aos meus amigos que mesmo distantes deram todo o incentivo, suporte e apoio de sempre. Também aos meus colegas e amigos “tugas”, que amenizaram a dificuldade de adaptação e enfrentaram junto comigo as dificuldades.

Obrigado!

RESUMO

Historicamente o transporte marítimo e fluvial são a escolha para trocas comerciais entre países. A globalização tornou as relações económicas entre países mais estreitas. Como consequência, houve um aumento no comércio internacional, gerando a necessidade de tornar cada vez mais eficiente o transporte por navios, força económica para o desenvolvimento de navios que carreguem mais produtos por viagem, construção de portos próximos a regiões economicamente ativas e operação de portos mais longas e mais seguras.

O presente trabalho tem como mote as intervenções de engenharia que garantiram o aumento das dimensões portuárias, para abrigar navios maiores, a operação portuária em locais aonde as condições da natureza são desfavoráveis e os novos, e mais restritos, parâmetros de segurança operacional portuária.

A realização deste trabalho, a partir de revisão bibliográfica, os fatores socioeconómicos, físicos e as interações que obrigam a execução de construção de estruturas ou serviços para garantir a operação portuária. Também, demonstra como as soluções escolhidas passam pelo escrutínio do teste de hipóteses e apresenta estudo de casos.

Assim sendo, o principal objetivo desta dissertação, mais do que reunir de forma estruturada as demandas a serem vencidas da engenharia portuária, mostra diferentes soluções para problemas análogos.

PALAVRAS-CHAVE: Engenharia Portuária, Hidrodinâmica, Quebramares, Dragagem, Modelagem de Hipóteses

ABSTRACT

Historically, maritime and river transport are the choice for commercial trade between countries. Globalization has made economic relations between countries narrower. Therefore, there has been an increase in international trade, generating the need to make ship transport more and more efficient, generating an economic force for the development of ships that carry more products per trip, constructing of ports near economically active regions and operation of larger and safer ports.

This work has as motivation the engineering interventions that ensured the increase of the port dimensions, to receive larger ships, the port operation in places where the conditions of nature are unfavorable and the new, more restricted, parameters of port operational safety.

The accomplishment of this work, based on a bibliographic review, describes the socioeconomic and physical factors and interactions that require the construction of structures or services to ensure port operation. Also, it shows how the chosen solutions go through the scrutiny of the hypothesis test and presents case studies.

Thus, the main objective of this dissertation, rather than to gather in a structured way the demands to be overcome of port engineering, shows different solutions to similar problems.

KEY WORDS: Port Engineering, Hydrodynamics, Breakwaters, Dredging, Hypothesis Modeling.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO GERAL	1
1.2. OBJETIVOS.....	2
1.3. ESTRUTURA DO DOCUMENTO.....	2
2 EVOLUÇÃO DA OPERAÇÃO PORTUÁRIA	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. COMÉRCIO INTERNACIONAL E A ATIVIDADE PORTUÁRIA.....	5
2.2.1. CONTENTORIZAÇÃO	7
2.3. PORTOS	8
2.3.1. TIPOS DE PORTOS.....	9
2.3.1.1. Porto natural.....	10
2.3.1.2. Porto semi natural	10
2.3.1.3. Porto artificial.....	11
2.3.2. ZONAS MARÍTIMAS DE PORTOS.....	11
2.3.2.1. Anteporto	12
2.3.2.2. Canal de navegação	12
2.3.2.3. Docas	13
2.3.3. ESTRUTURAS PORTUÁRIAS E SUAS INTERVENÇÕES DE ENGENHARIA	13
2.3.3.1. Estruturas exteriores de abrigo	14
2.3.3.2. Infraestrutura de acesso.....	14
2.4. NAVIOS MERCANTES	14
2.4.1. TIPOLOGIA DOS NAVIOS	15
2.4.1.1. Navio graneleiro	15
2.4.1.2. Navio tanque	17
2.4.1.3. Navio porta- <i>container</i>	19
2.4.1.4. Navio cargueiro	21
2.4.1.5. Navio cruzeiro	22

2.4.2. NAVIOS TIPO	23
--------------------------	----

3 ELEMENTOS SOBRE NÁUTICA E MEIO FÍSICO25

3.1. INTRODUÇÃO	25
------------------------------	-----------

3.2. GEOMETRIA NAVAL	25
-----------------------------------	-----------

3.2.1. LINHA DE FLUTUAÇÃO	26
---------------------------------	----

3.2.2. PLANOS DO CASCO	26
------------------------------	----

3.2.3. SUPERFÍCIE MOLHADA	26
---------------------------------	----

3.2.4. VOLUME DE CARENA	27
-------------------------------	----

3.2.5. CENTRO DE GRAVIDADE, DE CARENA E METACENTRO	27
--	----

3.3. PROPULSÃO NAVAL	28
-----------------------------------	-----------

3.3.1. COGOG	28
--------------------	----

3.3.2. CODOG	28
--------------------	----

3.4. CONJUNTO TURBINA-LEME	29
---	-----------

3.4.1. LEME.....	29
------------------	----

3.4.2. CONJUNTO LEME-HÉLICE	29
-----------------------------------	----

3.5. FORÇAS.....	31
-------------------------	-----------

3.5.1. EMPUXO OU IMPULSÃO	31
---------------------------------	----

3.5.2. FORÇA LATERAL.....	32
---------------------------	----

3.5.3. PROPULSÃO	32
------------------------	----

3.5.4. RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO	33
---------------------------------------	----

3.6. AGITAÇÃO MARÍTIMA	33
-------------------------------------	-----------

3.6.1. ONDA.....	33
------------------	----

3.6.2. CORRENTES	35
------------------------	----

3.7. VENTO	36
-------------------------	-----------

3.8. MARÉ.....	38
-----------------------	-----------

3.8.1. TIPOS DE MARÉ	39
----------------------------	----

3.8.1.1. Maré astronômica.....	39
--------------------------------	----

3.8.1.2. Maré atmosférica.....	39
--------------------------------	----

4 FENÔMENOS RELATIVOS A DINÂMICA DE FLUIDOS E NAVIOS.....41

4.1. INTRODUÇÃO.....	41
-----------------------------	-----------

4.2. MANOBRABILIDADE	41
-----------------------------------	-----------

4.3. EFEITO SQUAT	42
4.3.1. NAVIO EM MOVIMENTO	42
4.3.1.1. Águas profundas	43
4.3.1.2. Águas rasas.....	44
4.3.1.3. Águas confinadas.....	44
4.3.2. INFLUÊNCIA DA CONSTITUIÇÃO DO LEITO	46
4.3.2.1. Características da lama.....	46
4.3.2.2. Interação navio lama.....	47
5 INTERVENÇÕES DE ENGENHARIA.....	49
5.1. INTRODUÇÃO	49
5.2. OBRAS DE ABRIGO.....	49
5.2.1. TIPOS DE OBRAS DE ABRIGO – QUEBRAMAR.....	50
5.2.1.1. Quebramar de talude	50
5.2.1.2. Quebramar vertical.....	51
5.2.1.3. Quebramar de estrutura mista	52
5.2.1.4. Quebramar misto.....	52
5.2.2. TIPOS DE BLOCOS PARA QUEBRAMARES	53
5.2.3. FATORES PARA DEFINIÇÃO DO TIPO DE SOLUÇÃO UTILIZADA	53
5.2.4. SOLO DE FUNDAÇÃO	53
5.2.5. ÁREA DE OCUPAÇÃO	55
5.2.6. BINÔMIO CUSTO X SEGURANÇA	55
5.3. DRAGAGEM	57
5.3.1. MOTIVAÇÃO.....	57
5.3.1.1. Dragagem de aprofundamento, estabelecimento ou inicial.....	57
5.3.1.2. Manutenção.....	58
5.3.1.3. Recuperação ambiental ou ecológica	58
5.3.2. FASES DA DRAGAGEM	58
5.3.3. TIPO DE DRAGAGEM	59
5.3.3.1. Dragagem mecânica	59
5.3.3.2. Dragagem hidráulica	60
5.3.3.3. Dragagem pneumática	61
5.3.4. ESTABILIDADE DA ÁREA DRAGADA.....	62
5.3.4.1. Fenômeno de assoreamento	62

5.3.4.2. Métodos de controle 63

6 MODELOS DE EXPERIMENTAÇÃO DE HIPOTHESES 65

6.1. INTRODUÇÃO 65

6.2. SITUAÇÕES MOTIVADORAS 65

6.2.1. EXPANSÃO PORTUÁRIA 65

6.2.2. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS MAIS SEVERAS 65

6.3. TIPO DE EXPERIMENTAÇÃO 67

6.3.1. MODELAGEM FÍSICA 67

6.3.1.1. Leis gerais da modelagem experimental 67

6.3.2. MODELAGEM NUMÉRICA 68

6.3.3. COMPARATIVO ENTRE MODELAGEM NUMÉRICA E EXPERIMENTAL 69

7 CASOS DE ESTUDO 71

7.1. INTRODUÇÃO 71

7.2. EXPANSÃO DO QUEBRAMAR DO PORTO DE SALVADOR, BRASIL 71

7.2.1. ANÁLISE DO QUEBRAMAR ATUAL 72

7.2.1.1. Vento 73

7.2.1.2. Maré astronômica 73

7.2.1.3. Ondas 73

7.2.1.4. Modelagem Numérica 74

7.2.1.5. Resultados e conclusões 76

7.2.2. EXTENSÃO DO QUEBRAMAR 77

7.2.2.1. Condições de contorno 77

7.2.2.2. Modelo numérico 78

7.2.2.3. Possíveis arranjos 79

7.2.2.4. Movimentos das embarcações tipo 83

7.2.2.5. Cálculo do diâmetro de giro 83

7.2.2.6. Condições de manobra 86

7.2.2.7. Conclusões 87

7.3. MANOBRABILIDADE NO PORTO DE ZEEBRUGGE 87

7.3.1. ANÁLISE DA NAVEGABILIDADE E MANOBRABILIDADE EM NAVEGAÇÃO EM LAMA 92

7.3.1.1. Camada de lama 92

7.3.1.2. Interação navio lama 92

7.3.1.3. Resposta da navegação em lama.....	93
7.3.1.4. Manobra de acesso ao porto	95
7.3.2. CONCLUSÃO	96
8 CONCLUSÃO	97
8.1. CONCLUSÃO.....	97
9 BIBLIOGRAFIA	99
9.1. BIBLIOGRAFIA	99
9.2. SITES.....	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Esquema da dissertação	1
Figura 1-2 Organograma da dissertação	3
Figura 2-1 Mapa dos Maiores Portos do Mundo, 2017 (Fonte: [S1]).....	6
Figura 2-2 Marketshare dos fretes dentro da EU dos modais de transporte, 2013 (Fonte: [42])	7
Figura 2-3 Custo Total de Frete por TEU como Função da Capacidade do Navio e Tamanho da Rota (Fonte: [31])	8
Figura 2-4 Esquema da Cadeia Logística Hidroviária (Fonte: [14], Adaptado)	9
Figura 2-5 Valor Pecuniário do Comércio Internacional Americano, por modais de transporte (Fonte: [6])	9
Figura 2-6 Rotas Marítimas Comerciais (Fonte: [S3]).....	10
Figura 2-7 Porto de Aratu (Fonte: [S4]).....	10
Figura 2-8 Porto de Narazé (Fonte: [S5]).....	11
Figura 2-9 Porto de Leixões (Fonte: [S6]).....	11
Figura 2-10 Zona do Anteporto do Porto de Salvador (Fonte: [21], Adaptado)	12
Figura 2-11 Canal de Navegação do Porto de Aratu (Fonte: [22], Adaptado).....	12
Figura 2-12 Canal de Navegação do Porto de São Francisco (Fonte: [23], Adaptado)	13
Figura 2-13 Zona das Docas do Porto de Nazaré (Fonte: [24], Adaptado)	13
Figura 2-14 Evolução da Tipologia Frota Mundial de Navios Mercantes (Fonte: [50], Adaptado)	15
Figura 2-15 Navio Graneleiro Tipo (Fonte: [48])	15
Figura 2-16 Navio Tanque Tipo (Fonte: [48])	17
Figura 2-17 Esquema do Tamanho dos Navios Por Categoria (fonte: [S8])	18
Figura 2-18 Esquema do Navio Tanque LPG (fonte: [S8])	18
Figura 2-19 Esquema do Navio Tanque LNG (fonte: [S8]).....	18
Figura 2-20 Navio-Container Tipo (Fonte: [48])	20
Figura 2-21 Rotas de Navios Containers (Fonte: [32])	20
Figura 2-22 Navio Cargueiro Tipo (Fonte: [48])	21
Figura 2-23 Navio Cruzeiro Tipo (Fonte: [48])	22
Figura 2-24 Crescimento de Volume de Passageiros em Cruzeiros entre 2009 e 2014 (Fonte: [S10], Adaptado)	23
Figura 2-25 Crescimento do Comprimento dos Navios Cruzeiro no Tempo (Fonte: [S10], Adaptado)	23
Figura 2-26 Crescimento do Calado dos Navios Cruzeiros no Tempo (Fonte: [S10], Adaptado)	23
Figura 3-1 Linha de Flutuação (Fonte: [16]).....	26
Figura 3-2 Desenho Esquemático dos Planos do Casco (Fonte: [16]).....	26

Figura 3-3 Desenho Esquemático de um Navio (Fonte: [3]).....	27
Figura 3-4 Desenho Esquemático do Centro de Gravidade (G), de Carena (C) e Metacentro (M) (Fonte: [16])	28
Figura 3-5 Esquemático de um sistema a propulsão COGOG (Fonte: [41])	28
Figura 3-6 Esquemático do sistema de propulsão CODOG (Fonte: [41])	29
Figura 3-7 Comportamento do Fluxo, influenciado pelo Leme, em deslocamentos diferentes (Fonte: [16])	29
Figura 3-8 Esquema de comportamento de navio em início de deslocamento AV (Fonte: [16])	30
Figura 3-9 Esquema de comportamento de navio em início de deslocamento AR (Fonte: [16])	30
Figura 3-10 Esquema do Equilíbrio das Forças (Fonte: [3])	31
Figura 3-11 Desenho Esquemático da Mecânica de Flutuação (Fonte: [3])	31
Figura 3-12 Força Lateral Tipo Deslocamento (Fonte: [3])	32
Figura 3-13 Força Lateral Tipo Tombamento (Fonte: [S11])	32
Figura 3-14 Esquemático de propulsão naval por hélices (Fonte: [3])	33
Figura 3-15 Relação velocidade do vento com altura de onda, dada mesmas condições de conrtono (Fonte: [S12]).....	34
Figura 3-16 Relação Área x Tempo x Velocidade do Vento com Tamanho e Período de Onda (Fonte: [20])	34
Figura 3-17 Interação onda com um navio (Fonte: [S13])	35
Figura 3-18 Registo de alturas da de onda ao largo do porto de Leixões (Fonte: [25])	35
Figura 3-19 Influência da folga sob a quilha nas forças laterais produzidas por correntes num navio (Fonte: [37])	36
Figura 3-20 Exemplo da influência da velocidade do vento nos esforços exercidos num navio petroleiro 100.000 toneladas. (Fonte: [37])	37
Figura 3-21 Espectro de potência da rajada, para diferentes velocidades médias do vento (Fonte: [37])	38
Figura 3-22 Esquemático sobre Maré (Fonte: [S14]).....	38
Figura 3-23 Relação altura de coluna de água entre quilha e o fundo (UKC), com a capacidade de manobrabilidade (Fonte: [S15])	39
Figura 3-24 Influência da posição do sol e lua na maré (Fonte: [35]).....	39
Figura 3-25 Registo de maré metereológica em Niterói - RJ (Fonte: [35]).....	40
Figura 4-1 Esquema do efeito <i>squat</i> (Fonte: [18])	42
Figura 4-2 Valor máximo do efeito <i>squat</i> em águas confinadas e águas abertas (Fonte: [44])	43
Figura 4-3 Valor da Pressão acima da pressão hidrostática, em Pascal, a metade de navio para um navio de container do Duisburg Test Case em águas profundas. Desenho esquemático aproximadamente em escala (Fonte: [19], Adaptado)	44

Figura 4-4 Valor da Pressão acima da hidrostática, em Pascal, a metade de navio para um navio de container do Duisburg Test Case em águas restritas. Desenho esquemático aproximadamente em escala (Fonte: [19], Adaptado)	44
Figura 4-5 Comparativo do efeito squat em um navio VLCC, com 250.000 ton, em águas abertas e águas confinadas (Fonte: [44]).....	45
Figura 4-6 Esquema estático de um návio em um canal (Fonte: [44])	46
Figura 4-7 Comparativo do comportamento da lama com líquidos newtonianos (Fonte: [11])	47
Figura 4-8 Curva de isodensidade na interface água/lama variando no tempo (Fonte: [12])	47
Figura 4-9 Influência da lama na velocidade do navio (Fonte: [10])	48
Figura 5-1 Quebra-mar do Porto de Zeebrugge	50
Figura 5-2 Perfil transversal esquemático dos quatro tipos de quebramares (Fonte: [33]).....	50
Figura 5-3 Corte Transversal do quebramar em talude (Fonte: [5])	51
Figura 5-4 Desenho esquemático entre camada de enrocamento e seu peso (Fonte: [9])	51
Figura 5-5 Desenho Esquemático de Bermas (Fonte: [51])	51
Figura 5-6 Perfil Transversal esquemático quebramar vertical (Fonte: [9]).....	52
Figura 5-7 Desenho Esquemático de um Quebramar estrutura mista (Fonte: [40]).....	52
Figura 5-8 Desenho Esquemático Quebramar Misto (Fonte: [9]).....	53
Figura 5-9 Tipos de Blocos de Concreto Armado (Fonte: [9])	53
Figura 5-10 Tipos de Colapso por Causa Geológicas (Fonte: [8])	54
Figura 5-11 Planta de Situação Marina de Povia do Varzim (Fonte: [4])	55
Figura 5-12 Quebramar do Porto de Bilbao	56
Figura 5-13 Porto de Ilhéus (Fonte:[S16]).....	56
Figura 5-14 Fases da dragagem (Fonte: [36])	57
Figura 5-15 Tipos de Dragagem em Portugal (Fonte: [34])	57
Figura 5-16 Tipo dos materiais dragados em Portugal. Tipos 1 e 2 pouca contaminação, tipo 3 muito contaminado (Fonte: [34])	58
Figura 5-17 Composição Material Dragados (Fonte: [34]).....	59
Figura 5-18 Tipos de Dragas Mecânicas (Fonte: [36]).....	60
Figura 5-19 Ilustração das seções transversal e longitudinal do material dragado em dragas autotransportadoras (Fonte: [17]).....	60
Figura 5-20 Draga Hidráulica de Sucção Estacionária (Fonte: [36])	61
Figura 5-21 Draga Hidráulica de Sucção em Movimento (Fonte: [36]).....	61
Figura 5-22 Esquema de Operação Draga Pneumática (Fonte: [39])	62
Figura 5-23 Comparação entre erosão e deposição de material em condições de equilíbrio (Fonte: [28])	62

Figura 5-24 Exemplo da evolução de um canal com fluxo unidirecional (Fonte: [28])	63
Figura 5-25 Exemplo de gráfico de deposição de material em canais dragados com profundidade finita (Fonte: [28])	63
Figura 5-26 Rastreio de distribuição espacial de sedimento por radioatividade. As linhas são pontos com mesma radiotividade. (Fonte: [28])	64
Figura 6-1 Frequência Anual de Tempestades Tropicais do Atlântico Norte (Fonte: [S17])	66
Figura 6-2 Aumento da altura média da linha d'água dos oceanos (Fonte: [S18])	66
Figura 7-1 Projeção da expansão do cais de containers do Porto de Salvador (Fonte: [S19])	71
Figura 7-2 Foto de satélite do cais de containers de Salvador (Fonte: Google maps).....	72
Figura 7-3 Grades numéricas utilizadas na modelagem (Fonte: [47])	75
Figura 7-4 Batimetria associada a grade numérica. (Fonte: [47]).....	75
Figura 7-5 Localização dos pontos selecionados para realização da análise dos resultados do modelo de ondas (Fonte: [47])	76
Figura 7-6 Instantâneo do resultado do modelo Delft3D para a região do Porto de Salvador. A altura significativa é representada pela escala de cores e as setas representam a direção de propagação da onda. (Fonte: [47])	76
Figura 7-7 Valores de Alturas Significativas críticos obtidos pelo INPH - Análise representativa de um período de retorno de 100 anos (Fonte: [49])	78
Figura 7-8 Malha da superfície livre e quebramar (esquerda) e malha do navio (direita) para método de Rankine (Fonte: [49]).....	79
Figura 7-9 Progressão do efeito de difração no modelo de Rankine (Fonte: [49])	79
Figura 7-10 Arranjos analisados (Fonte: [49]).....	79
Figura 7-11 Recorte da malha numérica utilizada nas simulações com a Ext. Original apresentando a linha de medição de altura significativa para comparação de resultados. Em vermelho a linha dos pontos discretizados (Fonte: [49])	80
Figura 7-12 Altura significativa para a simulação com período de pico de $T_p=8s$ e altura significativa na região externa ao quebramar de $H_s=2m$. (Fonte: [49]).....	81
Figura 7-13 Altura significativa para a simulação com período de pico de $T_p=10s$ e altura significativa na região externa ao quebramar de $H_s=2m$. (Fonte: [49]).....	81
Figura 7-14 Altura significativa para a simulação com período de pico de $T_p=12s$ e altura significativa na região externa ao quebramar de $H_s=2m$. (Fonte: [49]).....	82
Figura 7-15 Mapa de altura significativa em todos os pontos da malha numérica para o caso Ext4 T_p10s (Fonte: [49])	82
Figura 7-16 Mapa de altura significativa em todos os pontos da malha numérica para o caso de controle T_p10s (Fonte: [49])	83
Figura 7-17 Cenário 1 e Ext. 3 (Fonte: [49])	84
Figura 7-18 Cenário 1 e Ext.4 (Fonte: [49])	84
Figura 7-19 Cenário 2 e Ext.4 (Fonte: [49])	85

Figura 7-20 Cenário 3 e Ext.4 (Fonte: [49])	85
Figura 7-21 Trajetória da manobra (Fonte: [46]).....	86
Figura 7-22 Esquema da Manobra (Fonte: [46]).....	87
Figura 7-23 Esquema da manobra (Fonte: [46]).....	87
Figura 7-24 Localização porto de Zeebrugge (Fonte: [S20])	88
Figura 7-25 Imagem aérea do porto de Zeebrugge (Fonte: [S21]).....	88
Figura 7-26 Variação do nível do mar na região do porto de Zeebrugge. Em vermelho as janelas de elevada salinidade. (Fonte: [S22])	89
Figura 7-27 Média sazonal de concentração de partículas em suspensão. À esquerda verão e à direita inverno. (Fonte: [S22]).....	89
Figura 7-28 Mapa de concentração de sedimentos durante a fase de cheia da maré, duas horas antes da máxima prea-mar. (Fonte: [29]).....	89
Figura 7-29 Imagem aérea do porto de Zeebrugge, com demonstração do movimento das águas em maré cheia e baixa e a entrada de material siltoso na bacia de evolução (Fonte: [S22])	90
Figura 7-30 Foto de satélite, a esquerda, e batimetria, à direita, da região do porto de Zeebrugge (Fonte: [29])	90
Figura 7-31 Planta de situação do porto de Zeebrugge, os canais de acesso ao porto e locais de deposição do material dragado. (Fonte: [29])	91
Figura 7-32 Resultado da simulação experimental do perfil de velocidades na envolvente do porto de Zeebrugge. (Fonte: [S22])	91
Figura 7-33 Perfil pedológico do leito marinho do porto de Zeebrugge (Fonte: [27])	92
Figura 7-34 Ensaio, em modelo reduzido, de navegação dentro de camada de lama (Fonte: [27])....	92
Figura 7-35 Velocidade do fluxo de lama ao redor da quilha do navio, no ensaio experimental (Fonte: [S22])	93
Figura 7-36 Análise do comportamento fluido da camada de lama. (Fonte: [27])	93
Figura 7-37 Velocidade do navio ao passar pela camada de lama (Fonte: [27])	94
Figura 7-38 Comportamento do navio, relativo á influência do leme (Fonte: [27])	94
Figura 7-39 Teste em giro de um navio porta-container (Fonte: [27])	95
Figura 7-40 Rota do teste, navio porta-container, UKC -7% e apoiado por 2 rebocadores de 45 ton (Fonte: [S22]).....	95

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2-1 Maiores Portos do Mundo, em volume de cargas 2015 (Fonte: [S2])	6
Tabela 2-2 Países líderes em comércio exterior, 2016 (Fonte: [53], Adaptado)	7
Tabela 2-3 Evolução 2012 - 2014 da Frota de Navios (Fonte: [26], Adaptado)	14
Tabela 2-4 Tipos de Graneleiros (Fonte: [30], Adaptado)	16
Tabela 2-5 Tipologia do Graneleiro de Material Sólido (fonte: [S7], Adaptado)	16
Tabela 2-6 Frota Mundial de Navios Graneleiros Sólidos, Exceto Embarcações Confinadas nos Grandes Lagos, em 01/01/2016 (Fonte: [7], Adaptado)	16
Tabela 2-7 Classificação de Navios Tanque Por Capacidade (fonte: [S8], Adaptado)	17
Tabela 2-8 Descrição dos Navios LPG (Fonte: [S8], Adaptado)	19
Tabela 2-9 Descrição dos Navios LNG (Fonte: [S8], Adaptado)	19
Tabela 2-10 Frota Mundial de Navios-Containersa até 01/01/2016 (Fonte: [S9] Adaptado)	21
Tabela 2-11 Tipologia de Cargueiros (Fonte: [26], Adaptado).....	22
Tabela 2-12 Capacidade de Carga por Tipo de Navios Cargueiros (fonte: [26], Adaptado)	22
Tabela 3-1 Área morta de um navio petroleiro 100.00 toneladas, totalmente carregado e com o calado mínimo (Fonte: [37])	36
Tabela 4-1 Valor de Cb por tipo de navio (Fonte: [44], Adaptado)	43
Tabela 6-1 Relação de número adimensionais (Fonte: [43], Adaptado)	68
Tabela 6-2 Comparação entre modelo físico e numérico (Fonte: [43], Adaptado).....	69
Tabela 7-1 Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (o) do vento METAR para o período de 1° de janeiro a 31 de janeiro de 2010, intervalo de amostragem horária (Fonte: [47], Adaptado)	73
Tabela 7-2 Ocorrência conjunta de altura significativa (m) e direção (°) da onda, para o período de 01o de janeiro a 31 de dezembro de 2010. A direção é medida em graus a partir do Norte geográfico e segue a convenção meteorológica. (Fonte: [47]).....	74
Tabela 7-3 A Alturas significativas (m) na área externa à Baía de Todos os Santos (Fonte: [49])	77
Tabela 7-4 Características do navio tipo (Fonte: [46])	86

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

MHW – Mean High Water level [m]

MLW – Mean Low Water level [m]

MSL – Mean Sea Level [m]

DWA – Dynamic Wave Absorption

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

SHRHA – Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente

DEC – Departamento de Engenharia Civil

DWT – *Deadweight Tonnage*

TEU – *Twenty-foot Equivalent Unit*

UKC – *Under Keel Clearance*

US DoT – *United States Department of Transport*

WTS – *World Trade Statistical*

WTO – *World Trade Organization*

EU – *European Union*

ZH – Zero Hidrográfico

UNCTAD – *United Nations Conference on Trade and Development*

WOR – *World Ocean Review*

BoTS – *Bureau of Transportation Statistics*

Hs – Altura Significativa de Onda

Tp – Período de Pico de Onda

1 INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO GERAL

A sociedade moderna se caracteriza pelas relações comerciais entre países. Fruto do fenômeno da globalização, a troca de matérias e serviço são a força motriz do crescimento econômico mundial.

Nesse diapasão, a forma de transporte dessas matérias tem relevante importância. Isso, pois, para que haja viabilidade financeira nas trocas comerciais o valor do transporte deve ser o menor possível. E o meio de transporte que possibilita capacidade de transporte global com baixo custo por unidade de produto transportada e menor impacto ambiental é o transporte marítimo e fluvial.

Com o objectivo de diminuir cada vez mais o preço do frete dos produtos, aumentaram-se as dimensões dos navios para que transportem mais produtos em cada viagem e construíram-se portos em regiões economicamente ativas. Houve necessidade de expansão de portos existentes, a que se associam intervenções de engenharia para garantir a segurança operacional de novos portos construídos em locais onde não necessariamente há condições favoráveis. Pelo aumento da dimensão dos navios, dos portos e pela existência de operações portuárias em locais inóspitos houve também um aumento dos requisitos mínimos de segurança para a operação portuária.

O presente trabalho discute as intervenções de engenharia necessárias para a operação em condições favoráveis das atividades portuárias, Figura 1-1.

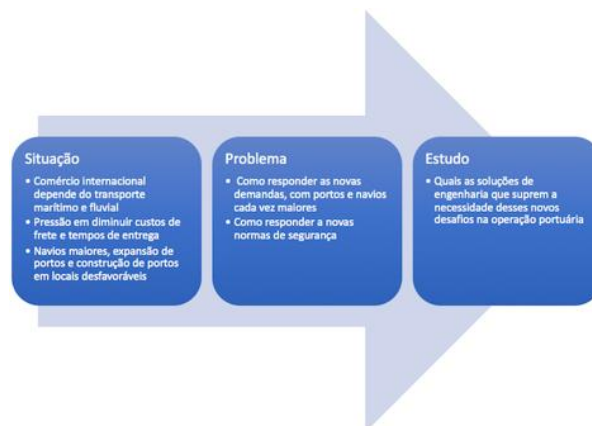


Figura 1-1 Esquema da dissertação

1.2. OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivo principal discutir quais são as intervenções de engenharia necessárias para atender as demandas cada vez maiores da sociedade sobre a operação portuária.

Também o presente trabalho se propõe discutir como essas intervenções de engenharia são desenvolvidas, quais são os desafios que devem superar e porque tais desafios existem.

Por fim, apresentam-se diversas soluções de engenharia, de vários países, a título de mostrar que existem diferentes abordagens.

1.3. ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Esta dissertação divide-se em oito capítulos, que se descrevem a seguir.

No Capítulo 2 aborda-se a importância do transporte marítimo-fluvial para o comércio internacional. Discutem-se conceitos básicos sobre portos, a sua classificação, seguindo-se a distinção entre diferentes tipos de portos existentes, as suas principais características e classificam-se as áreas existentes num porto. Ainda neste capítulo são apresentados os tipos de navios existentes, suas características e evolução de suas características e o conceito de navio-tipo.

No Capítulo 3 são tratados os conceitos relativos a mecânica naval, arquitetura naval e os fenômenos relativos ao meio físico aquático.

No Capítulo 4, é realizada a análise das consequências da interação hidrodinâmica com a embarcação.

No Capítulo 5 são apresentadas as intervenções de engenharia, tanto as obras de abrigo existentes, suas características e o seu funcionamento, como o serviço de dragagem e discutidas o assoreamento das áreas dragadas.

No Capítulo 6 são exibidos exemplos de teste de soluções, suas vantagens e desvantagens.

No Capítulo 7 são apresentados estudos de casos reais que abordam as intervenções de engenharia que são executadas na intenção de expansão de um Porto, aumento da segurança da operação portuária e adequação da estrutura portuária aos novos requisitos de segurança mais exigentes. Também a experimentação de navegação com quilha dentro de lama para minimizar a execução de dragagem de profundidade de fundo de canal de navegação.

No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões do presente trabalho.

O organograma da dissertação está na Figura 1-2

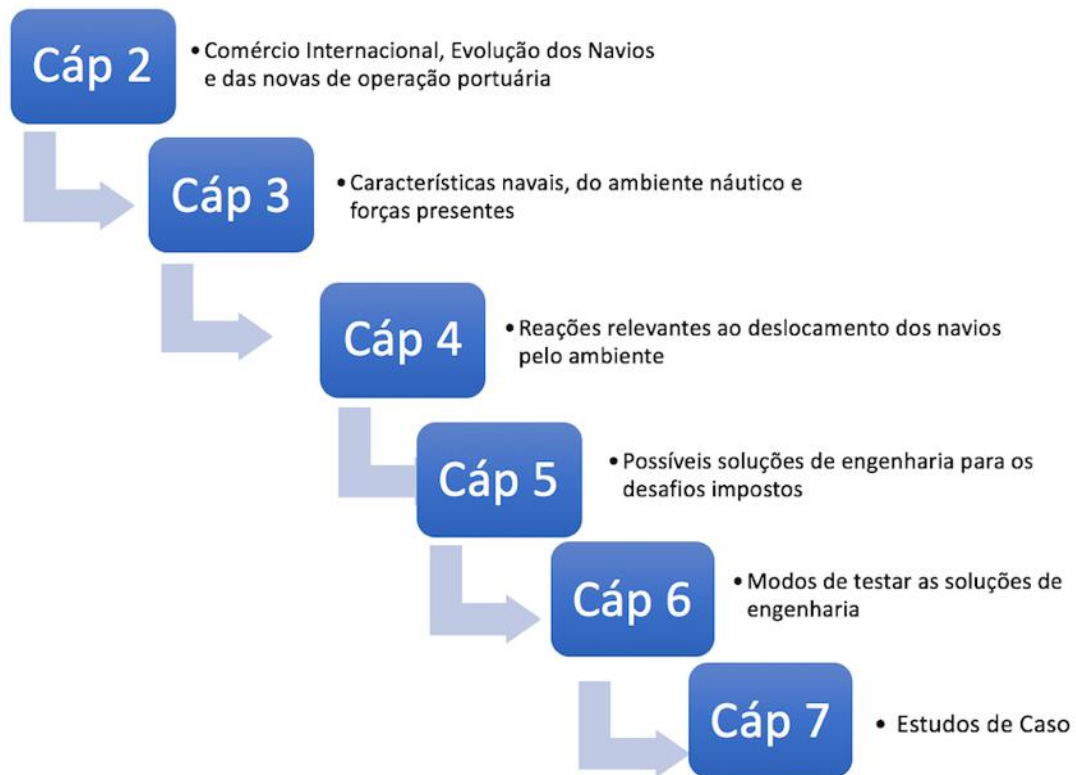


Figura 1-2 Organograma da dissertação

2

EVOLUÇÃO DA OPERAÇÃO PORTUÁRIA

2.1. INTRODUÇÃO

Os transportes marítimos e fluviais, historicamente, têm papel de destaque para o deslocamento de pessoas e mercadorias. Desde os fenícios, a atividade mercantil e a mobilidade humana têm relação intrínseca com esse modal de transporte. Como a fator de ligação entre o transporte aquático e os continentes, os portos têm importância proporcional à importância dos transportes marítimo e fluvial. Assim, pode-se dizer que a operação portuária faz parte da logística para troca de mercadorias e deslocamento de pessoas. [52]

Objetivando o atendimento da demanda de novos locais para recebimento de mercadorias e para garantir o volume de trocas do comércio mundial, o sistema internacional de transporte vê-se obrigado a criar rotas marítimas. Como reflexo, torna-se necessária a implantação de portos nessas novas regiões ou a modernização e expansão dos portos existentes.

Também na busca de maior eficiência no transporte e com a evolução tecnológica os navios, ocorre o aumento das dimensões das embarcações. Este aumento das dimensões é claro quando se comparam os navios mercantes pré-revolução industrial, pós-revolução industrial e pós 1950.

Por consequência, tanto da implantação de portos em regiões adversas como do aumento dos navios, ocorre uma necessidade por condições de trabalho e operacionais e de segurança mais conservativas. Desta forma, as condições operação portuária modificam-se também para atender requisitos de segurança mais restritivos.

Por ser ponto de chegada ou saída dos navios e na busca de atender as demandas de seu tempo, verifica-se uma mudança desde a escolha de locais para implantação de novos portos até às novas estruturas portuárias na busca de uma evolução na capacidade e segurança de portos em movimentar e armazenar mercadorias em maior quantidade e com maior eficiência.

2.2. COMÉRCIO INTERNACIONAL E A ATIVIDADE PORTUÁRIA

Numa economia globalizada, o comércio internacional tem fundamental importância para a sociedade. Por possibilitar o transporte de virtualmente qualquer tipo de carga com segurança e em grandes quantidades, o transporte marítimo tem papel de destaque na troca de mercadorias

entre os países. Pela necessidade de construção de portos para que haja a utilização de transporte marítimo, existe uma pulverização de grandes portos ao redor do globo, conforme Figura 2-1.

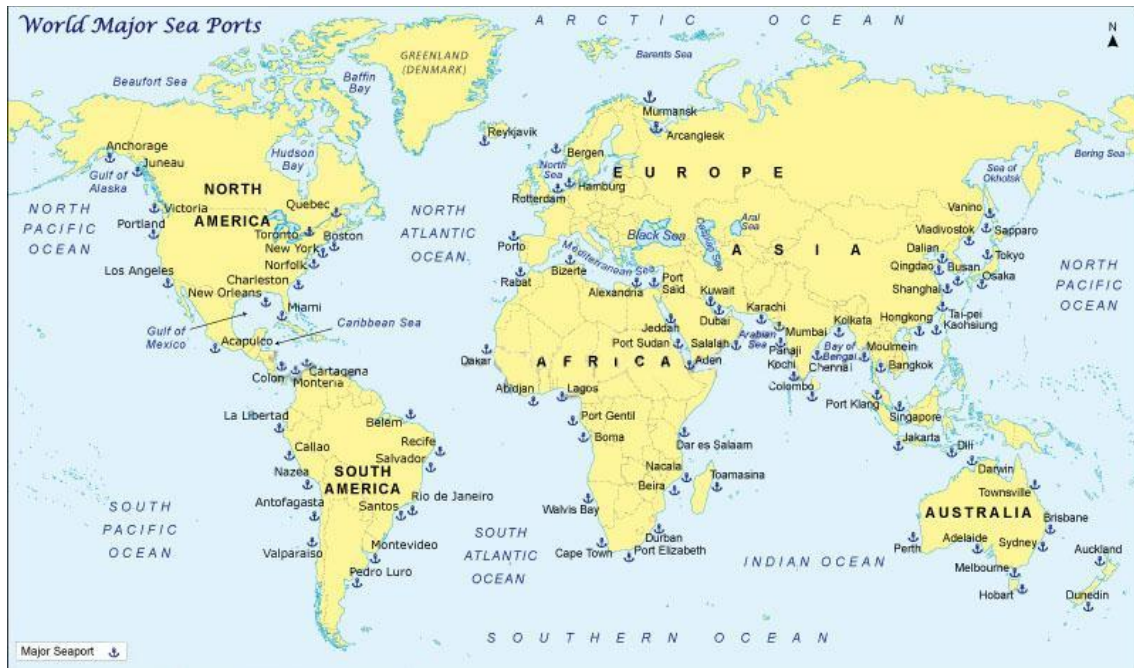


Figura 2-1 Mapa dos Maiores Portos do Mundo, 2017 (Fonte: [S1])

Ao analisar a localização dos maiores portos do mundo, pode-se ver que existe uma correlação entre o comércio internacional e a atividade portuária. Pode-se evidenciar isso ao estabelecer a comparação entre o país dos portos com maior volume de operação, Tabela 2-1, e os maiores países com movimentação de mercadorias (soma de quantidade de importação e exportação), Tabela 2-2.

Tabela 2-1 Maiores Portos do Mundo, em volume de cargas 2015 (Fonte: [S2])

Posição	Porto	País
1	Shanghai	China
2	Singapura	Singapura
3	Qingdao	China
4	Guanzhou	China
5	Rotterdam	Holanda
6	Port hedland	Austrália
7	Ningbo	China
8	Tianjin	China
9	Busan	Coréia do Sul
10	Dallan	China

Tabela 2-2 Países líderes em comércio exterior, 2016 (Fonte: [53], Adaptado)

Posição	País	Valor (10 ⁹ USD)
1	China	3,957
2	União europeia	3,899
3	Estados unidos	3,813
4	Japão	1,273
5	Hong Kong, China	1,070
6	Coreia do Sul	963
7	Canada	844
8	México	786
9	Índia	659
10	Singapura	648

Ainda, analisando o transporte de mercadorias dentro da União Europeia, mesmo com uma vasta rede ferroviária, o transporte aquaviário é o segundo modal mais utilizado, conforme Figura 2-2.

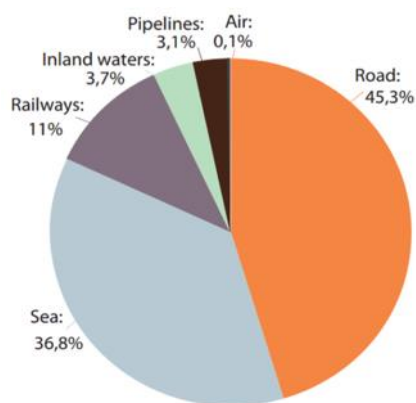


Figura 2-2 Marketshare dos fretes dentro da EU dos modais de transporte, 2013 (Fonte: [42])

2.2.1. CONTENTORIZAÇÃO

Com a invenção do *container*, ou contentor, caixa metálica de dimensões padronizada aonde são acomodados produtos, os transportes marítimo e fluvial assistiram a um salto em produtividade. Essa evolução dá-se em função da maior velocidade na carga e descarga de mercadorias nos portos e principalmente pela melhor acomodação das mercadorias nos porões dos navios. A World Ocean Review, no seu periódico WOR 1, que o “*container* é um dos grandes fatores para a revolução no transporte de mercadorias. O uso do container com dimensões padronizada diminui substancialmente os custos, visto que as mercadorias são empacotadas apenas uma vez e podem ser transportadas em viagens de grandes distâncias, utilizando diferentes tipos de transporte de uma forma integrada— rodoviário, ferroviário e hidroviário. O tempo de desempacotar e voltar a empacotar é minimizado, reduzindo tanto custos diretos de taxas portuárias para arrumação e estoque, quanto o custo indireto de penalização por sobre-estadia dos navios nos portos. É estimado que um navio de cargas tradicional, que demanda mais tempo para seu descarregamento, passa entre metade e dois terços de seu tempo operacional atracado”.

Com a evolução na acomodação das mercadorias nos navios veio a possibilidade do aumento de escala de produtos na mesma viagem. A consequência desse maior volume carregado é uma diminuição do preço do frete por unidade de mercadoria, conforme mostra a Figura 2-3.

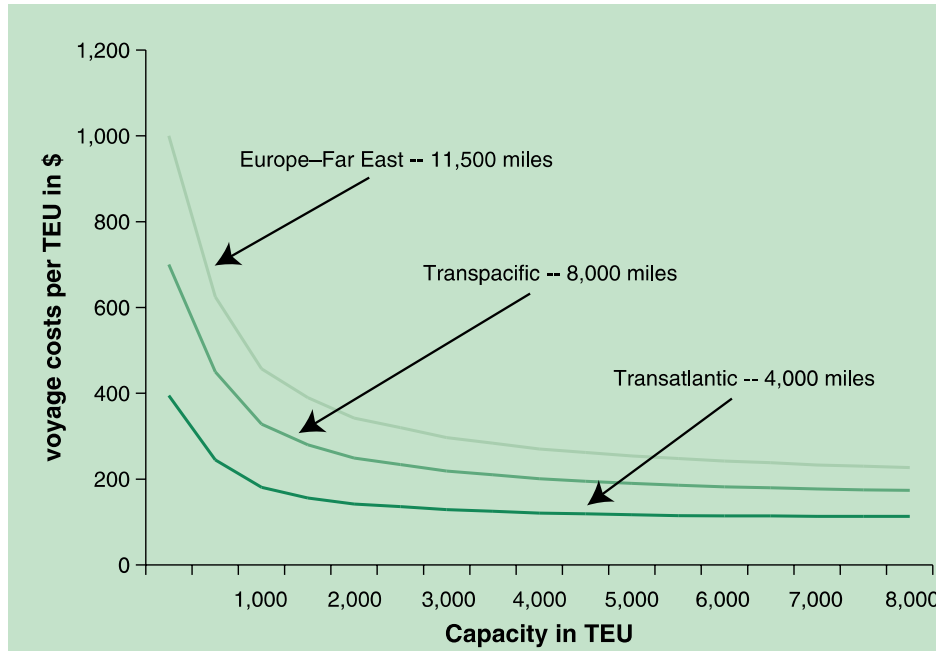


Figura 2-3 Custo Total de Frete por TEU como Função da Capacidade do Navio e Tamanho da Rota
(Fonte: [31])

A WOR 1 fala sobre esse fato “A containerização dos produtos em navios é realmente lucrativa em fretes marítimos, quando os maiores e mais velozes navios de containers diminuem substancialmente o valor do frete entre portos.”.

2.3. PORTOS

Porto, derivado do latim *portus*, é uma zona de terra e água dotada de instalações e equipamentos que permitem principalmente a recepção de navios, sua carga e descarga, e o armazenamento, recepção e entrega de mercadorias, assim como o embarque e desembarque de passageiros e interface com rodovias e ferrovias.

Portos, por suas características, são parte integrante da cadeia logística de transportes de mercadorias, conforme Figura 2-4. Têm, também, um papel dual, no recebimento e armazenamento das mercadorias em terra e na garantia da continuidade do trajeto do navio com as mercadorias embarcadas, com o fornecimento de combustíveis e mantimentos necessários para a navegação da embarcação [1]. A Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento (UNCTAD) aborda essa versatilidade e esse papel multidimensional portuário na cadeia logística dizendo que “os portos são interfaces entre os distintos modelos de transporte e são tipicamente centros de transporte combinado. Em suma, são áreas multifuncionais, comerciais e industriais, onde as mercadorias não estão apenas em transito, como também são manipuladas, manufaturadas e distribuídas”.



Figura 2-4 Esquema da Cadeia Logística Hidroviária (Fonte: [14], Adaptado)

Em função da sua importância nas relações comerciais, a escolha de novos portos, diferentemente do passado, está relacionada com as demandas econômicas de uma região. Como exemplo, pode-se citar o caso do Estados Unidos da América em 40% do valor total do comércio exterior ocorrer por via hidroviária em 2014, conforme a Figura 2-5.

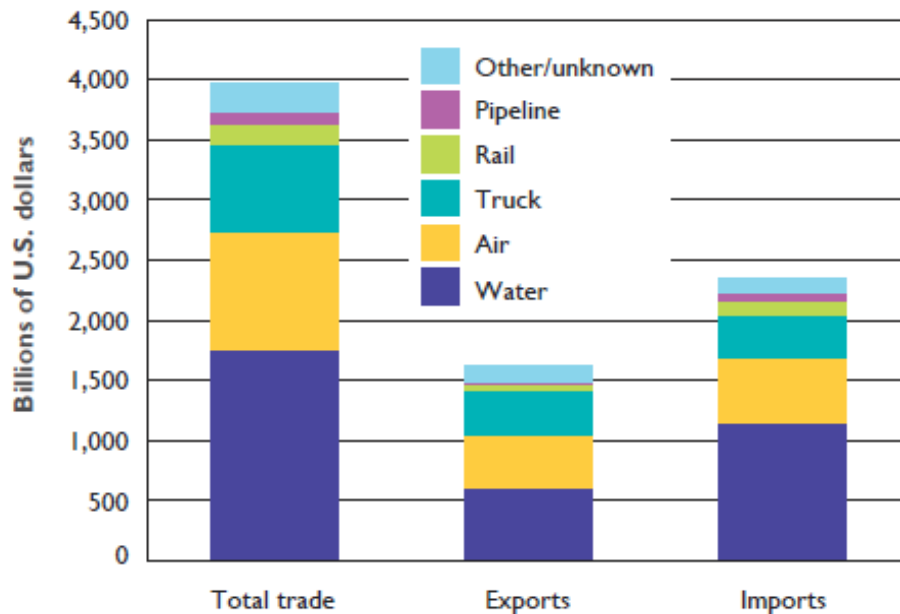


Figura 2-5 Valor Pecuniário do Comércio Internacional Americano, por modais de transporte (Fonte: [6])

2.3.1. TIPOS DE PORTOS

Historicamente os portos eram situados em águas naturalmente calmas, como estuários fluviais ou reentrâncias da costa marítima (nomeadamente baías), a fim de que a demanda operacional, navegação, carga e descarga, ocorresse de forma segura [38]. Com o crescimento do fluxo de cargas e da dimensão dos navios, apareceu a necessidade da criação de novos portos, maiores, em águas mais profundas e mais próximos de zonas economicamente ativas, a fim de conectá-las ao comércio internacional, conforme se pode inferir da Figura 2-6.

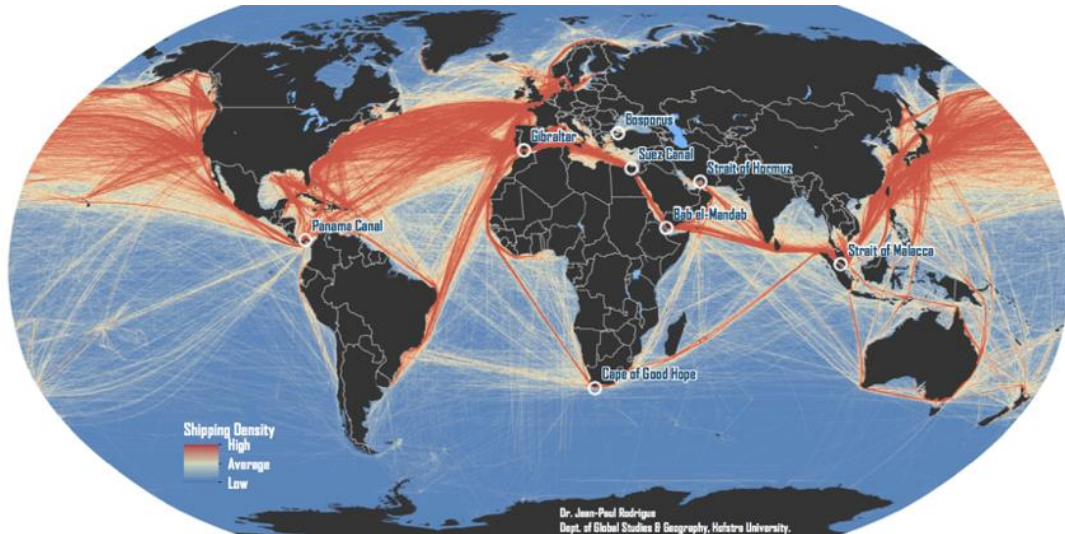


Figura 2-6 Rotas Marítimas Comerciais (Fonte: [S3])

Poder-se-á classificar os portos, a partir da demanda de obras de engenharia para a implantação em uma região, como naturais, semi-naturais e artificiais. [38]

2.3.1.1. Porto natural

Implantados em regiões naturalmente abrigadas, os portos naturais têm relativamente poucas intervenções de engenharia para garantir sua operação. Os primeiros portos que surgiram são classificados desse tipo. Normalmente estão localizados em estuários ou em baías com acessibilidade boa e permanente. Como exemplo, apresenta-se na Figura 2-7, o porto de Aratú, no Estado da Bahia, Brasil.



Figura 2-7 Porto de Aratu (Fonte: [S4])

2.3.1.2. Porto semi natural

Implantados em regiões com abrigo natural, porém com agitação suas águas têm maior agitação que o desejado. É então necessária a construção de obras de proteção na entrada da bacia de evolução (quebramares portuários). Normalmente estão localizados em baías de dimensões diminutas. Como exemplo, na Figura 2-8 o porto de pesca da Nazaré, em Portugal.



Figura 2-8 Porto de Narazé (Fonte: [S5])

2.3.1.3. Porto artificial

Implementados por questões econômicas, para que a região tenha possibilidade de utilização de transporte marítimo, são portos em regiões com águas revoltas. Exigem intervenções de engenharia que podem atingir grandes dimensões e complexidade técnica (quebramares, diques de guiamento) para garantir abrigo de águas calmas e acessibilidade. Como exemplo, podemos utilizar o porto de Leixões, Figura 2-9.



Figura 2-9 Porto de Leixões (Fonte: [S6])

2.3.2. ZONAS MARÍTIMAS DE PORTOS

Um porto marítimo, como já dito, pode demandar por intervenções de engenharia para garantir a sua operação. Com a complexidade de implantação de portos artificiais, com as obras de engenharia especializadas garantido sua operação, nasce a necessidade de classificar a superfície aquática das áreas do porto e seu entorno a partir da sua localização.

Existem três zonas aquáticas marinhas individualizadas, mas dependendo da disposição do complexo portuário podem-se parcialmente sobrepor: o anteporto, os canais de navegação e as docas.

2.3.2.1. Anteporto

Região próxima à estrutura portuária, mas ainda em mar aberto, zona onde os navios são manobrados para acessar o complexo portuário. Compreende tanto os fundeadouros quanto a rota de acesso para o canal de navegação. Ambos devem ter cotas de fundos que garantam que o navio tipo do porto possa ter acesso com segurança, podendo haver a necessidade de dragagens periódicas para manter essas cotas. A Figura 2-10 representa o anteporto da Porto de Salvador – Bahia – Brasil.



Figura 2-10 Zona do Anteporto do Porto de Salvador (Fonte: [21], Adaptado)

2.3.2.2. Canal de navegação

Como ligação entre o Anteporto e as Docas com as suas águas calmas, o canal de navegação constitui a porta de acesso e saída de um porto. Tem papel fundamental na garantia da operação portuária, devendo ter águas suficientemente calmas para garantir a navegação do navio tipo, podendo ou não ser protegida por quebra-mares. Nas Figura 2-11 e Figura 2-12, canal de navegação do porto de Aratu – Bahia e do porto de Rio Grande – Rio Grande do Sul, ambos no Brasil, podemos ver os canais de navegação como uma rota definida a partir das cotas de fundo do leito marinho.



Figura 2-11 Canal de Navegação do Porto de Aratu (Fonte: [22], Adaptado)



Figura 2-12 Canal de Navegação do Porto de São Francisco (Fonte: [23], Adaptado)

2.3.2.3. Docas

São planos de água com águas calmas, podendo ser protegida por obras de abrigo, aonde os navios manobram para carga e descarga de mercadorias. É uma componente da infraestrutura portuária importante para a operação portuária, tanto na questão de segurança quanto eficiência. Nas suas envolventes existem bacias de evolução/manobra. A Figura 2-13 representa a área de cais do porto de Nazaré – Portugal.

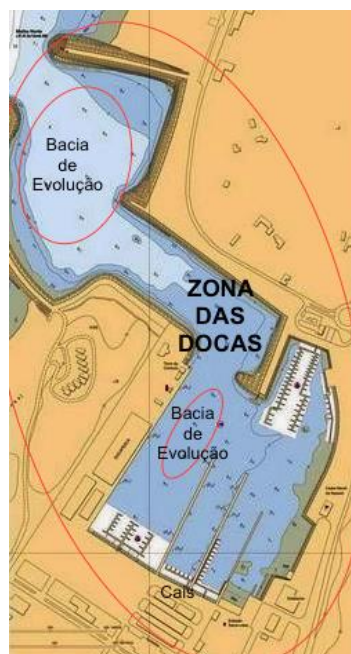


Figura 2-13 Zona das Docas do Porto de Nazaré (Fonte: [24], Adaptado)

2.3.3. ESTRUTURAS PORTUÁRIAS E SUAS INTERVENÇÕES DE ENGENHARIA

Todos os portos dependem de intervenções de engenharia para garantir sua operação, integridade física e, em última instância, sua existência.

Analisando portos marítimos focando em navegabilidade e manobrabilidade, existem dois tipos de construções especializadas que devem ser destacadas. São elas: estruturas exteriores de abrigo e infraestrutura de acesso.

2.3.3.1. Estruturas exteriores de abrigo

Estruturas exteriores, ou estruturas de abrigo, têm como função dissipar a energia das oscilações das águas da região onde se localiza o porto. Essas estruturas sofrem com impacto de ondas e correntes. Dividem o anteporto do canal de acesso e cais.

Como consequência da implementação dessas estruturas, a área atrás (sotamar) da estrutura tem águas calmas. É uma forma de compensar as condições naturais desfavoráveis para a implementação de um porto.

2.3.3.2. Infraestrutura de acesso

A infraestrutura de acesso são estruturas ou serviços que têm como função garantir o acesso e navegação do navio tipo dentro da área do canal de acesso. As estruturas criam as condições para que o navio tipo saia do anteporto para entrar no canal de acesso e os serviços garantem a capacidade de navegação do navio tipo dentro do canal de acesso e cais.

Como consequência da implementação da infraestrutura de acesso, a operação do porto torna-se menos suscetível às condições desfavoráveis climáticas ou de correntes.

2.4. NAVIOS MERCANTES

Navio mercantes, ou navio comerciais, são todos as embarcações de grande porte que não tenham como finalidade estar a serviço das forças armadas. Essas embarcações são classificadas pelo tipo de carga que transportam, visto que tem características parecidas entre si, mas também especificações diferenciadas.

Segundo componente do binômio operação portuária, junto com a infraestrutura portuária, os navios mercantes têm papel fundamental na capacidade operacional portuária. É possível identificar, conforme Tabela 2-3, que uma tendência atual da frota mundial de aumento capacidade de transporte por navio.

Tabela 2-3 Evolução 2012 - 2014 da Frota de Navios (Fonte: [26], Adaptado)

Tipo de Navio	Frota Mundial 2014	Capacidade (dwt 10 ⁶)	Varição Frota 2012/2014	Varição Capacidade 2012/2014 (dwt 10 ⁶)
Tanque	14.039	600,1	2,20%	2,90%
Graneleiros	10.919	752,9	3,80%	5,80%
Containers	5.239	244,2	0,80%	5,60%
Cargueiros	16.892	112,3	-0,30%	2,10%
Cruzeiros	1675	2,2	2,10%	3,10%
Cargueiro/RoRo e Passageiro	2641	4,3	2,30%	1,20%
TOTAL	51.405	1716,0	1,50%	4,40%

A tipologia, e suas características, deve ser levada em conta quando se desenvolve o projeto portuário.

2.4.1. TIPOLOGIA DOS NAVIOS

Como já foi referido, o tipo de carga transportada categoriza os navios mercantes. O tipo de material e a forma como esse material é disposto nos porões dos navios determinam as dimensões da embarcação. Um navio tem atributos físicos destacáveis: calado, boca e comprimento.

As categorias mais relevantes dos navios mercantes, conforme dados estatísticos da Conferência das Nações Unidas Sobre Comércio e Desenvolvimento (UNCTAD), Figura 2-14, são cargueiros, petroleiros, graneleiro e porta-containers. Além desses, a título de melhor representação das categorias de embarcações, também serão alvo de análise os navios cruzeiros, especializados em transporte de pessoas.

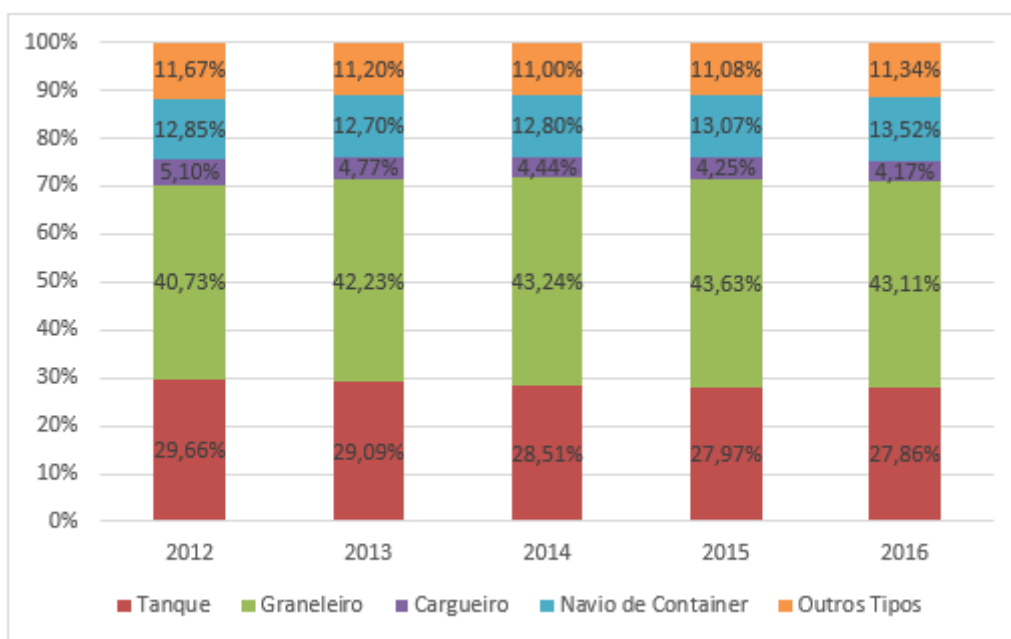


Figura 2-14 Evolução da Tipologia Frota Mundial de Navios Mercantes (Fonte: [50], Adaptado)

2.4.1.1. Navio graneleiro

Navio versátil, utilizado para transporte de material solto que por suas características não é indicado o transporte utilizando contentores. O material fica nos porões do navio e o carregamento e descarregamento ocorre verticalmente através das escotilhas. Figura 2-15

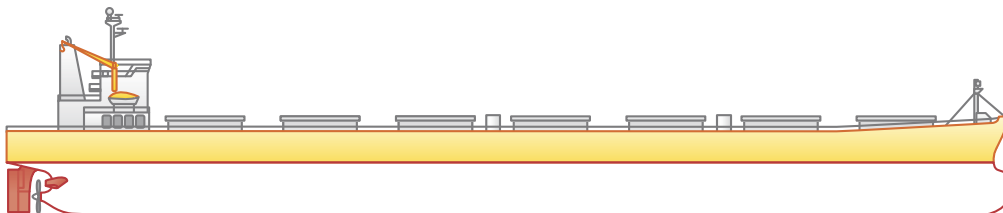


Figura 2-15 Navio Graneleiro Tipo (Fonte: [48])

Um graneleiro pode ser classificado em função do estado do material que esteja carregando, granel sólido e granel líquido, a partir do tipo material, conforme Tabela 2-4.

Tabela 2-4 Tipos de Graneleiros (Fonte: [30], Adaptado)

Classificação	Material Transportado
Mineraleiro	Minerais brutos
Cimenteiro	Cimento
Misto	Container e Granel
OBO (Ore/Bulk/Oil)	Minerais, Graneis e Petróleo
OO (Ore/Oil)	Minerais e Petróleo

Os navios graneleiros de material sólido têm a sua tipologia classificada a partir de sua capacidade de carga, conforme Tabela 2-5.

Tabela 2-5 Tipologia do Graneleiro de Material Sólido (fonte: [S7], Adaptado)

Tipo de Navio	Capacidade (dwt)
Handy Size	10,000 a 29,999
Handymax	30,000 a 59,999
Panamax	60,000 79,999
Cape Size	80,000 e acima

Na Tabela 2-6 está indicada a tabulação da frota mundial de navios graneleiros sólidos, organizada por capacidade de transporte da embarcação.

Tabela 2-6 Frota Mundial de Navios Graneleiros Sólidos, Exceto Embarcações Confinadas nos Grandes Lagos, em 01/01/2016 (Fonte: [7], Adaptado)

Classificação por Porte (DWT)	Dimensões e Velocidades Médias				Número de Navios	Total de DWT (10 ³)	Média de DWT
	Comprimento (m)	Boca (m)	Calado (m)	Velocidade (nós)			
10,000-19,999	138.7	21.4	8.2	13.1	614	9,031	14,708
20,000-24,999	158.2	24.7	9.5	13.6	348	7,954	22,855
25,000-29,999	170.9	26.3	9.8	13.9	745	20,834	27,965
30,000-39,999	181.2	28.6	10.3	14.2	1,551	54,049	34,848
40,000-49,999	190.6	31.2	11.4	14.2	838	38,388	45,809
50,000-59,999	193.1	32.3	12.6	14.3	2,482	141,021	56,818
60,000-79,999	225.2	32.4	13.9	14.2	1,329	99,195	74,639
80,000-99,999	239.1	34.5	14.4	14.3	1,124	96,222	85,607
100,000-119,000	252.3	43.0	14.3	14.6	125	14,079	112,635
120,000-159,999	270.,9	43.5	17.0	14	69	10,193	147,720
160,000 ou acima	298.5	47.7	18.4	14.8	1,437	285.094	198,395
	TOTAL				10,662	776,060	72,787

Se analisada a frota de navios graneleiros sólidos a nível mundial, infere-se que a variação das dimensões médias, comprimento, boca e calado, dos navios mais que duplica com as diferentes classes, mas que a velocidade média se manter praticamente a mesma. Também, é possível tirar as seguintes conclusões: aproximadamente 45% é da classe Handymax, onde quase 25% de todos os navios tem a capacidade entre 50,000 e 60,000 dwt; a média de capacidade por navio é de aproximadamente 73,000 dwt e verifica-se uma tendência para mais navios com capacidade acima de 160,000 dwt, o que obriga portos, canais de navegação e bacias de evolução maiores e mais profundas.

2.4.1.2. Navio tanque

Também conhecidos como navios graneleiros de graneis líquidos, os navios tanque por sua importância, são descritos como categoria própria. Estão incluídos nesta classe os navios petroleiros, os navios que transportam produtos químicos líquidos e aqueles que carregam gases liquefeitos, Figura 2-16. Todo o transporte de material gasoso em Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), por medida de segurança, devem ser liquefeitos antes de ser transportados.

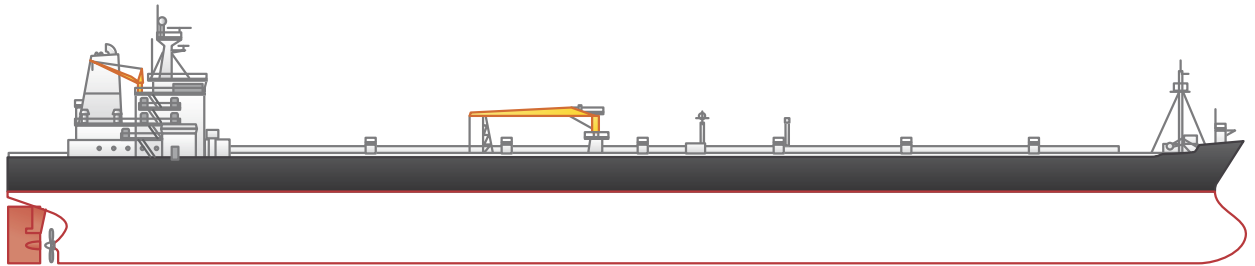


Figura 2-16 Navio Tanque Tipo (Fonte: [48])

A classificação por capacidade de carga dos navios tanque de materiais líquidos na CNTP, em função da densidade de sua carga ser menor, tem intervalos de classes menores que os navios graneleiros. Em contrapartida, pela sua importância econômica, tendo em vista que a maior parte do comércio internacional de petróleo é feito por transporte marítimo, existem navios com maior capacidade que os navios graneleiros, conforme Tabela 2-7 e Figura 2-17.

Tabela 2-7 Classificação de Navios Tanque Por Capacidade (fonte: [S8], Adaptado)

Tipo de Navio	Capacidade (dwt)
Handy Size	10,000 a 29,999
Handymax	30,000 a 59,999
Panamax	60,000 a 79,999
Aframax	80,000 a 119,000
Suezmax	120,000 a 199,999
VLCC (Very Large Crude Carreir)	200,000 a 320,000
ULCC (Ultra Large Crude Carreir)	330,000 e acima

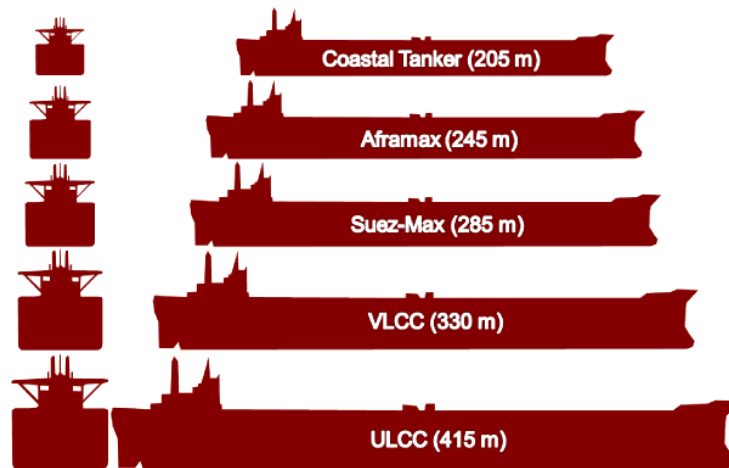


Figura 2-17 Esquema do Tamanho dos Navios Por Categoria (fonte: [S8])

Os navios que transportam gases liquefeitos, são de menor porte, pois há a necessidade de equipamentos para manutenção da carga no estado líquido. Os materiais transportados são Gases de Petróleo Liquefeito (LPG em inglês) e Gás Natural Liquefeito (GLP em inglês). As embarcações de LPG e GLP são completamente diferentes, pois os equipamentos que garantem a manutenção do gás em seu estado líquido variam para cada um dos materiais, conforme Figura 2-18 e Figura 2-19.

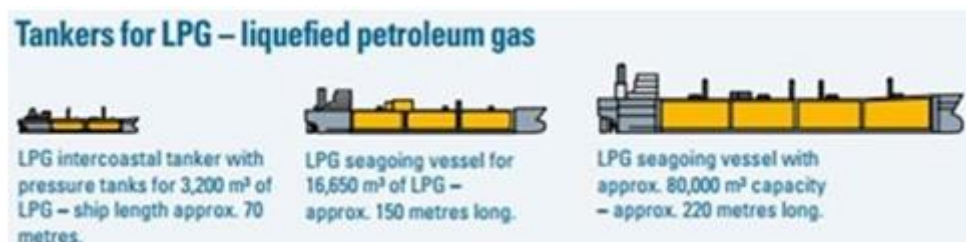


Figura 2-18 Esquema do Navio Tanque LPG (fonte: [S8])

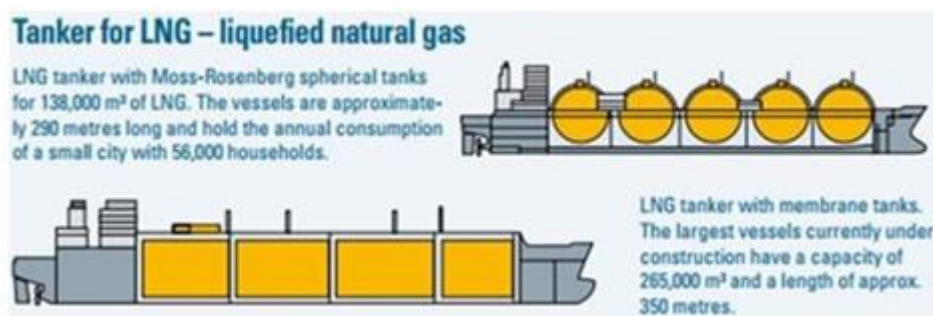


Figura 2-19 Esquema do Navio Tanque LNG (fonte: [S8])

A classe, designação e descrição dessas embarcações para transporte de materiais gasosos liquefeitos variam, para cada um dos materiais, por sua capacidade de carga, conforme Tabela 2-8 e Tabela 2-9.

Tabela 2-8 Descrição dos Navios LPG (Fonte: [S8], Adaptado)

Classe – Designação		Descrição
Classe	Técnica	
Costeiros	Não Refrigerados	Pequeno porte, 6.000 m ³ . Percursos curtos ou margeando a costa.
	Semi Refrigerados	
	Refrigerados	
Oceanicos	Refrigerados	Médio Porte, 20.000 m ³ e 60.000 m ³ . Carca LPG ou amoônia anidra.
VLGC (Very Large Gas Carrier)	Refrigerados	Grande Porte, 75.000 m ³ a 100.000 m ³ .

Tabela 2-9 Descrição dos Navios LNG (Fonte: [S8], Adaptado)

Classe - Designação			Descrição
Classe	Técnica	Comercial	
SGC			2.000 m ³ a 20.000 m ³
MGC			20.000 m ³ a 40.000 m ³
LGC			50.000 m ³ a 70.000m ³
VLGC			70.000 m ³ a 135.000 m ³
			Ultra Large Gas Carrier mais de 135.000 m ³
	Q-Flex		Capacidades: Q-Flex 215.000 m ³ e Q-Max 266.000 m ³
	Q-Max		
ULGC	Tipo A	Moss	Sistemas de construção e contenção dos tanques de carga, pressurização e refrigeração.
	Tipo B	SPB	
	Tipo C	Conoco Phillips	
	Tipo Membrana	Technigaz Mark III	

2.4.1.3. Navio porta-container

São navios que têm como principal característica o acondicionamento de sua carga em *containers* ou contentores. O porão dessas embarcações é, em função da padronização da carga, equipado com guias ou células para facilitar a carga e descarga, conforme Figura 2-20. São navios com calados relativamente pequenos, comparados aos tipos de navios de carga, e com alta eficiência de transporte. Como já definido, grande parte do transporte marítimo de cargas depende desse tipo de navio.

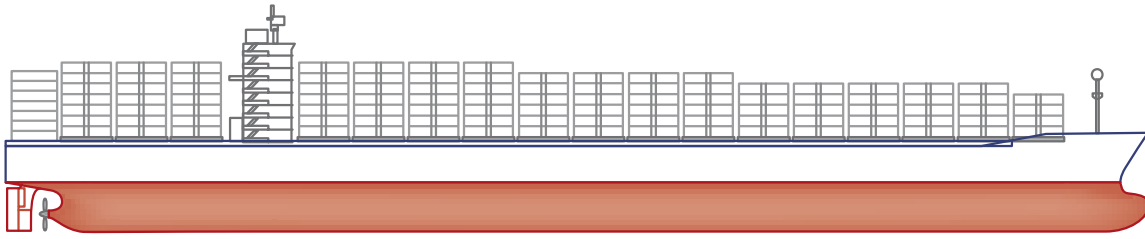


Figura 2-20 Navio-Container Tipo (Fonte: [48])

Uma peculiaridade de navios porta-containers são suas rotas, Figura 2-21. Por depender de canais artificiais para garantir suas rotas, especificamente dos canais de Suez e Panamá, as dimensões dos navios variam conforme a adequação para navegar nessas infraestruturas.

A frota mundial, dispersa em mais de 30 companhias diferentes, tem uma média de 11 anos de uso, sendo que os navios mais antigos, que são também os navios com menor capacidade média de transporte de TEU, tem em média 16 anos de uso. Os navios mais novos, que coincidem com os navios de maior capacidade, tem em média 3 anos de uso.

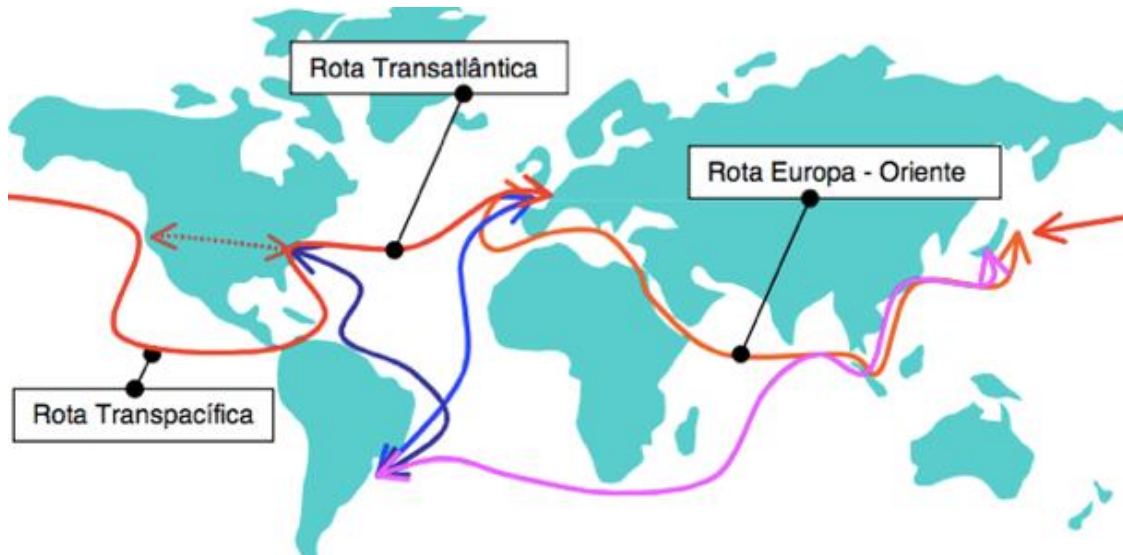


Figura 2-21 Rotas de Navios Containers (Fonte: [32])

Quando tabulada as informações da frota mundial atual, Tabela 2-10, é notório que a variação de comprimento e boca triplica e o calado duplica quando se comparam as dimensões, enquanto a velocidade média cresce apenas 50%, da maior com a menor classe de navios. Essa comparação, em contrapartida, quando analisada pela ótica de média de TEU, aumenta impressionantes 20 vezes. O que significará que a justificação à maior eficiência desse tipo de navio é o aumento de dimensões e não a diminuição de tempo de viagens.

Tabela 2-10 Frota Mundial de Navios-Containersa até 01/01/2016 (Fonte: [S9] Adaptado)

Classe	Intervalo de Capacidade (TEU)	Dimensões e Velocidade Médias				Número de Navios	Total de TEUs	Média de TEU
		Comp(m)	Boca (m)	Calado (m)	Velocidade (nós)			
Feeder	100 - 999	122.2	19.6	7.0	16.1	1,070	648,809	606
Handy +	1,000 – 2,999	166.2	25.6	9.3	19.2	1,883	3,374,966	1,792
Sub-Panamax	2,000 – 2,999	207.9	30.5	11.4	21.7	1,883		
Panamax	3,000 e acima	265.7	32.2	12.5	23.8	844	3,549,442	4,206
Post-Panamax	> 8,000	280.1	39.7	13.7	24.1	680	3,916,853	5,760
Post-Panamax	8,000 – 11,999	329.2	45.2	14.5	23	533	4,788,135	8,983
Post-Panamax	12,000 e acima	374.3	51.5	15.4	23.9	239	3,456,960	14,464
TOTAL						5.249	19,735,165	3,760

2.4.1.4. Navio cargueiro

Os navios cargueiros ou de carga geral são embarcações de múltiplas funções, caracterizados por transportar todo o tipo de carga, descarregados por escotilhas de convés, Figura 2-22. Por ter múltiplos fins, suas dimensões características e velocidade variam, com comprimento entre 80 metros e 160 metros, podendo ser desde um navio com boca pequena e velocidade medianas a navios de grande porte e pequena velocidade.

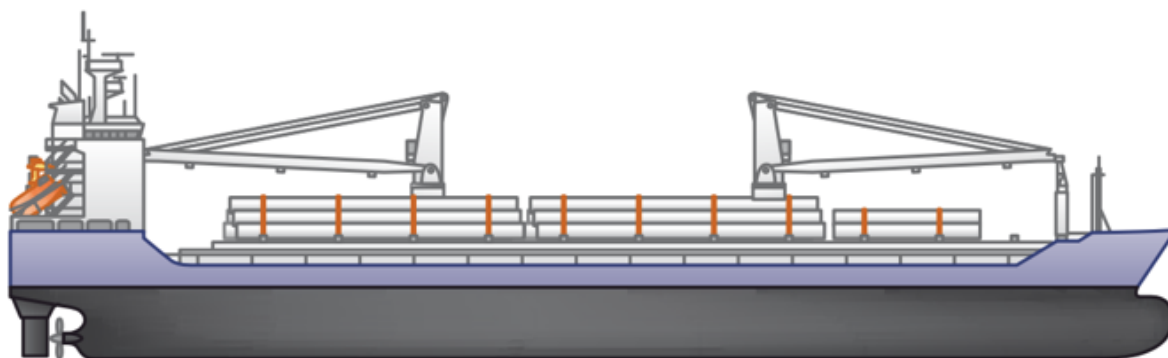


Figura 2-22 Navio Cargueiro Tipo (Fonte: [48])

Historicamente, foram os primeiros navios construídos e por muitos anos foram os responsáveis pelo transporte de mercadorias marítima e fluvial. Com o advento do container, esse tipo de embarcação começa a ser usado para cargas mais específicas, e sua frota, contrariando a tendência mundial de navios de carga, vem diminuindo, conforme Figura 2-14.

Os navios cargueiros são classificados a partir do tipo de carga que transportam, Tabela 2-11. Atualmente quase 50% da capacidade de transporte de navios cargueiros está localizada em cargas não convencional, Tabela 2-12.

Tabela 2-11 Tipologia de Cargueiros (Fonte: [26], Adaptado)

Tipologia	Característica da Carga
Convencional	Carga Seca em Geral
Especial	Carga Seca com Características Específicas
Caminhão Cegonha	Apenas Transporte de Veículos Automóveis
Refrigerada	Carga Seca com 80% ou mais com Isolamento Térmico
Ro-Ro	Carga Roll-on e Roll-off de Veículos Rodoviários e Ferroviários

Tabela 2-12 Capacidade de Carga por Tipo de Navios Cargueiros (fonte: [26], Adaptado)

Tipo de Carga	% de Capacidade
Convencional	46.2%
Especial	32.3%
Navio Cegonha	10.8%
Refrigerada	4.6%
Ro-Ro	6.2%

2.4.1.5. Navio cruzeiro

Os navios de cruzeiro que têm como finalidade exclusiva o transporte de pessoas para fins de lazer, têm assumido uma crescente importância pois incrementam os serviços de turismo. São navios com calado relativamente reduzido, porém com grande área acima da linha de água e superestrutura muito alta, Figura 2-23.

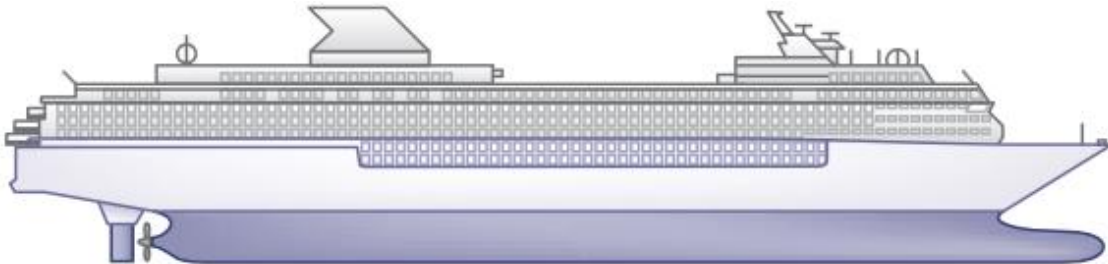


Figura 2-23 Navio Cruzeiro Tipo (Fonte: [48])

O transporte de pessoas por esses navios desde 1970 até hoje cresceu mais que 1,000%, e entre 2009 e 2014 houve um crescimento no volume de passageiros de 4.24 milhões, ou 23.8%, Figura 2-24. Esse crescimento teve um impacto na economia mundial de 119,9 bilhões de dólares. Como esse mercado ainda tem um crescimento sustentado, como consequência ocorre a construção de navios maiores, conforme Figura 2-25 e Figura 2-26, não só para suprir a demanda, mas, também, para reduzir o custo da viagem por passageiro,

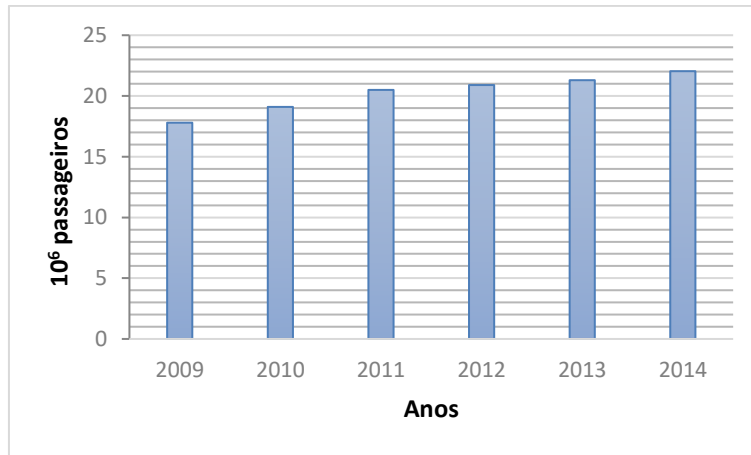


Figura 2-24 Crescimento de Volume de Passageiros em Cruzeiros entre 2009 e 2014 (Fonte: [S10], Adaptado)

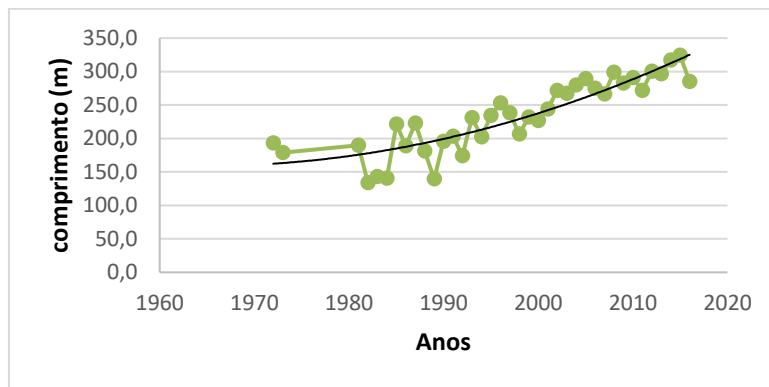


Figura 2-25 Crescimento do Comprimento dos Navios Cruzeiro no Tempo (Fonte: [S10], Adaptado)

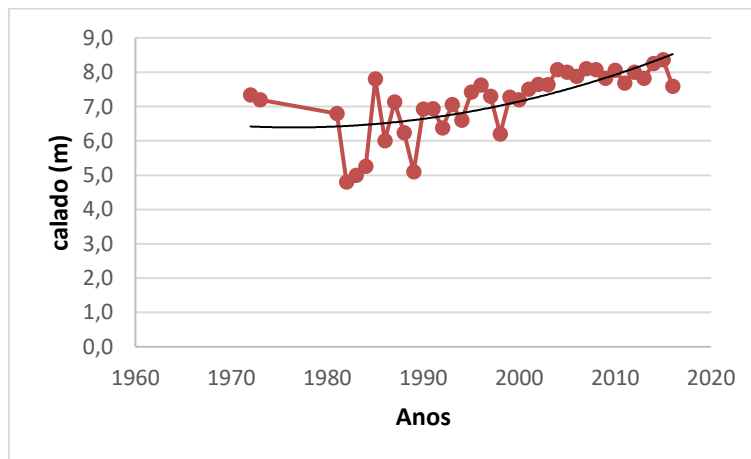


Figura 2-26 Crescimento do Calado dos Navios Cruzeiros no Tempo (Fonte: [S10], Adaptado)

2.4.2. NAVIOS TIPO

Conforme já referido, os vários tipos de navios têm características peculiares que estão relacionadas a carga transportada. Quando se projeta um porto, o tipo de carga que

previsivelmente será fretada indica qual tipo de navio a ser utilizado como modelo base para determinar largura dos canais de acesso, cotas de fundo, dimensões da área de manobra da bacia de evolução e cais. Tais características estão relacionadas com o calado, a boca e o comprimento dos navios os quais são representados pelo denominado “navio tipo”. [2]

A exemplo, um porto de navios *containers* projetado tendo o Panamax como navio tipo não terá condições, caso não ocorram obras de expansão, de receber os navios Post-Panamax com capacidade de transporte acima de 12,000 TEUs.

A dimensão dos navios tipo considerados nos planos de modernização e expansão portuária tem vindo a aumentar face à constatação de que as dimensões dos navios têm progressivamente aumentado ao longo dos anos.

3

ELEMENTOS SOBRE NÁUTICA E MEIO FÍSICO

3.1. INTRODUÇÃO

A navegação e a manobrabilidade estão relacionadas com a interação do navio com o meio aquático. A segurança da operação portuária depende fundamentalmente da compreensão dessas interações. É então relevante conhecer os fenômenos relativos à mecânica naval já que com o aumento das dimensões dos navios as condições de operação se tornam cada vez mais extremas.

Os portos operam em condições cada vez mais complexas, seja pela sua localização, seja pelo crescimento das dimensões dos navios. Fica cada vez menor a margem para ocorrência de eventos naturais que perturbem as águas abrigadas ou os navios. Assim, entender quais são os fenômenos naturais que ocorrem no ambiente físico, e que influenciam diretamente as embarcações, é essencial a segunda parte do binômio navio e ambiente aquático.

Na busca de descrever os eventos, primeiro serão apresentadas algumas definições associadas à geometria dos navios. Em seguida, será discutida a propulsão e o conjunto propulsão-leme dos navios, para poder-se entender os fundamentos de navegação e manobra. Por fim, serão apresentadas as forças presentes na interação entre o navio e o meio aquático, pois interferem diretamente tanto na capacidade quanto na segurança da navegabilidade e manobrabilidade de um porto.

Também, serão discutidos os fenômenos naturais ondas, correntes, ventos e marés. Os dois primeiros precisam ser mitigados, para que as águas abrigadas não tenham um acréscimo de energia cinética suficiente para prejudicar as atividades portuárias. Os ventos incidem nas diretamente nas (para além de gerarem oscilações locais no plano de água) embarcações e equipamentos elevatórios. As marés têm influência direta na capacidade de manobrar das embarcações (navegação à maré) e no estabelecimento de cotas de coroamento de cais.

3.2. GEOMETRIA NAVAL

Como primeiro passo para entender as complexas interações das embarcações com o meio aquático, a geometria naval explicita conceitos relativos aos navios.

3.2.1. LINHA DE FLUTUAÇÃO

Linha de flutuação é a localização da linha de água no casco do navio em flutuação estática. A linha de flutuação varia conforme a peso da embarcação, sendo chamada de linha de flutuação leve a localização da linha de água num navio vazio e a linha de flutuação carregada, ou em plena carga, quando o navio está com sua carga nominal totalmente utilizada, Figura 3-1.

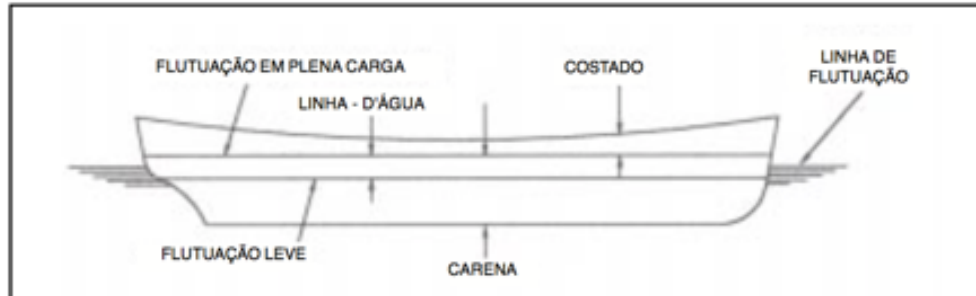


Figura 3-1 Linha de Flutuação (Fonte: [16])

Quando o navio está em prumo, a linha de flutuação é chamada direta. Quando um navio está inclinado e toda o volume de água que saiu de um lado foi compensado para o outro lado, designa-se como de linha de flutuação isocarena.

3.2.2. PLANOS DO CASCO

Um casco de navio tem três planos, o plano longitudinal, de flutuação e transversal. O plano longitudinal, ou diametral, é o plano de simetria dos cascos. Isso quer dizer que o plano de diametral tem como origem a quilha do casco. Em um navio aprumado, o plano diametral é perpendicular ao plano formado pela linha de flutuação, ou plano de flutuação. Por fim, o plano transversal é aquela perpendicular tanto ao plano de flutuação e diametral, Figura 3-2.

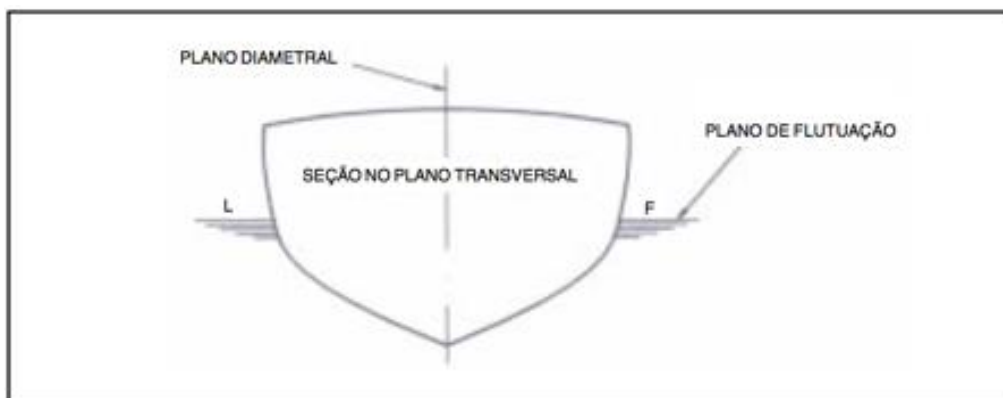


Figura 3-2 Desenho Esquemático dos Planos do Casco (Fonte: [16])

3.2.3. SUPERFÍCIE MOLHADA

Dada uma configuração de plano de flutuação, a superfície molhada é toda a área de carena, ou área de casco efetivamente abaixo da linha de flutuação, em contato com a água. Isso quer dizer que quanto maior for o calado do navio, maior será a superfície molhada. É a partir da superfície molhada que se calcula a resistência ao deslocamento do navio.

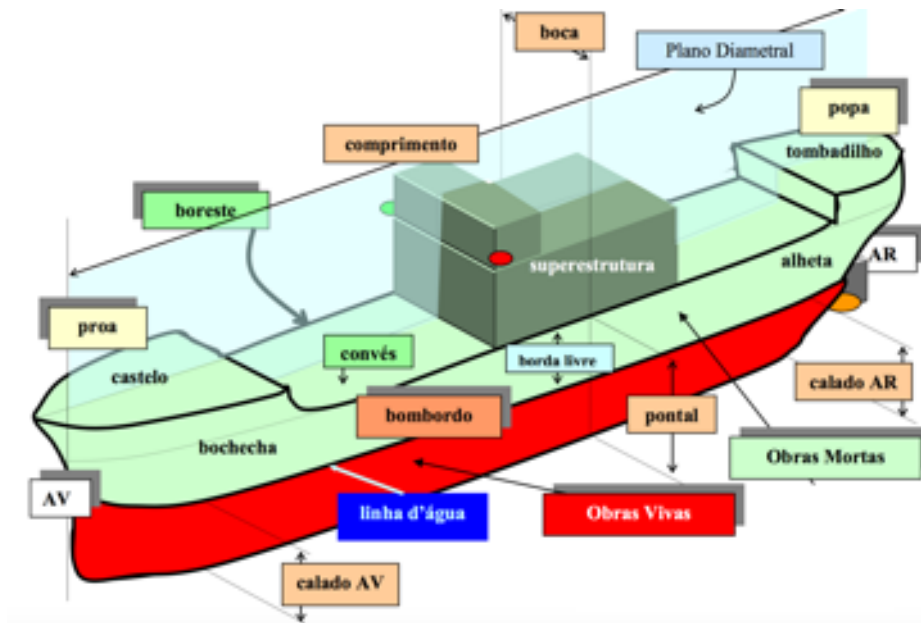


Figura 3-3 Desenho Esquemático de um Navio (Fonte: [3])

Na Figura 3-3 a superfície molhada é toda área assinalada a vermelho, também conhecido como obras vivas.

3.2.4. VOLUME DE CARENA

Dada uma configuração de plano de flutuação, o volume de carena é o volume de água entre a superfície molhada e o plano de flutuação. Também chamado de apenas carena, é utilizado para os cálculos relacionados ao deslocamento da embarcação.

3.2.5. CENTRO DE GRAVIDADE, DE CARENA E METACENTRO

Centro de gravidade é o ponto no corpo do navio onde o seu peso poderá ser considerado concentrado. A localização do centro de gravidade depende da distribuição das cargas do navio e tem papel fundamental tanto na capacidade de flutuação quanto na estabilidade. Usualmente encontra-se no plano diametral. É o ponto G na Figura 3-4.

O centro de carena ou de impulsão é ponto no corpo do navio onde é equivalente a aplicação da resultante do empuxo ou impulsão. Também, é o centro de gravidade da massa de água deslocada pelo navio. Está obrigatoriamente abaixo da linha de flutuação. A localização do centro de carena depende do volume de carena e também tem papel fundamental na flutuação e equilíbrio do navio. Idealmente o centro de carena deve estar próximo do centro de gravidade e alinhados verticalmente. É o ponto C na figura Figura 3-4.

Em um navio em prumo, o centro de gravidade deve estar acima do centro de carena e abaixo da linha de flutuação. Como o centro de carena depende do volume de carena, caso o navio esteja fora do prumo, adernado, ele terá um novo centro de carena. O ponto onde a linha perpendicular do centro de carena adernado toca o eixo original do centro de carena é chamado de metacentro, conforme Figura 3-4. O metacentro deverá sempre estar acima do centro de gravidade, caso contrário o navio será instável.

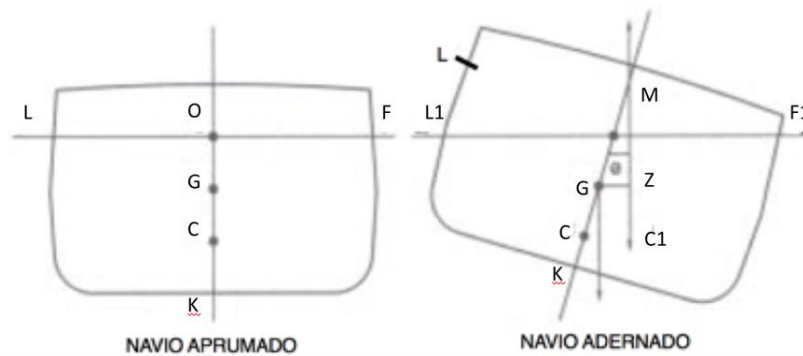


Figura 3-4 Desenho Esquemático do Centro de Gravidade (G), de Carena (C) e Metacentro (M) (Fonte: [16])

3.3. PROPULSÃO NAVAL

Define-se propulsão naval como o meio de transformação de algum tipo de energia em energia mecânica, que impulsiona uma embarcação. Esse impulso é geralmente resultado da rotação de hélices.

Navios mercantes de grande porte utilizam sistemas de transformação de turbinas a gás, COGOG, ou sistema híbrido entre turbinas a gás e motores a diesel, CODOG, para movimentar as suas hélices.

3.3.1. COGOG

O COGOG é o sistema de propulsão que utiliza turbinas a gás, aonde ocorre o processo de transformação da energia química do gás em energia cinética.

O processo ocorre com a compressão do combustível, passando por um queimador que mistura o combustível ao ar e explode essa massa de ar-combustível, por fim a energia libertada é canalizada para um sistema de turbinas. Essas turbinas fazem girar um eixo contínuo, transferindo essa energia cinética para uma caixa de redução de velocidade, engrenagens e por fim a caixa de velocidade acoplada a turbina, conforme Figura 3-5.

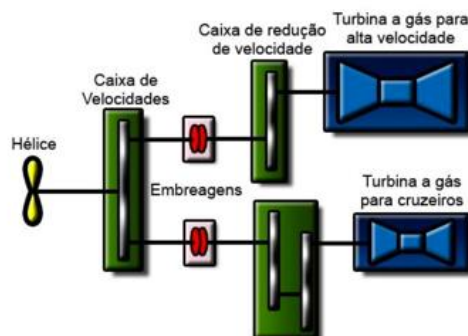


Figura 3-5 Esquemático de um sistema a propulsão COGOG (Fonte: [41])

3.3.2. CODOG

O CODOG é o sistema de propulsão que utiliza tanto turbinas alimentadas a gás quanto motor a combustão interna, alimentado por diesel, para o processo de transformação da energia química em energia cinética.

Os motores a diesel utilizam o ciclo Diesel e o sistema de turbinas utilizam o processo anteriormente descrito. Pode-se escolher um dos dois tipos para movimentar as hélices, Figura 3-6.

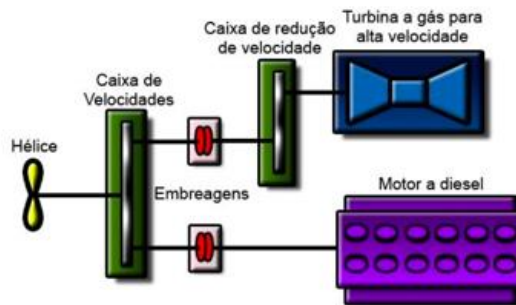


Figura 3-6 Esquemático do sistema de propulsão CODOG (Fonte: [41])

Utiliza-se o motor a diesel em velocidades baixas, enquanto as turbinas a gás são mais utilizadas em manobras rápidas.

3.4. CONJUNTO TURBINA-LEME

O conjunto turbina-leme é o fator de maior importância na capacidade de manobrabilidade de um navio. Sejam separados, ou em conjunto, são protagonistas na influência do rumo que o navio toma

3.4.1. LEME

O leme é uma placa móvel que gira em torno de um eixo perpendicular ao plano de flutuação, quando a embarcação está em prumo. Essa placa móvel, quando paralela a quilha do navio não tem influência relevante na propulsão do navio. Quando, porém, em ângulo com a quilha, direciona o fluxo de água deslocado pelas hélices.

Quando o deslocamento é a vante, AV na Figura 3-3, há uma quebra de continuidade do fluxo, mas não ocorrendo turbulência. Quando, porém, o deslocamento é a ré, AR na Figura 3-3, ocorre alguma turbulência em função do fluxo ser descontinuado antes das turbinas, conforme Figura 3-7.

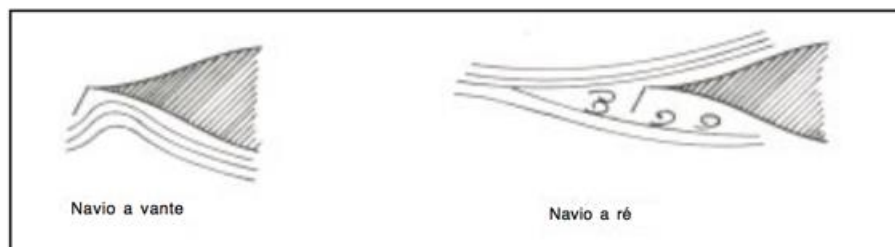


Figura 3-7 Comportamento do Fluxo, influenciado pelo Leme, em deslocamentos diferentes (Fonte: [16])

3.4.2. CONJUNTO LEME-HÉLICE

Quando analisado o conjunto leme-hélice junto, verifica-se que o fluxo ao ser direcionado pela hélice para passar pelo leme é a forma mais efetiva para operarem. Quando o deslocamento é AV

ou AR, há um binômio de forças de corrente e de sucção que fazem o navio modificar a direção de seu deslocamento.

Em situação de início de marcha, porém, o conjunto leme-hélice tem comportamento diferente a depender do sentido do deslocamento. Quando o navio está iniciando o deslocamento ocorre o aparecimento de uma pressão lateral gerada pela rotação das hélices, que deslocam água, mas não há grande deslocamento do navio.

Quando AV, essa pressão lateral no início da marcha dificulta a mudança de direção à direita e empurra o navio para esquerda se o leme está paralelo à quilha e quando a AR a pressão lateral dificulta a o deslocamento à esquerda e empurra o navio à direita se leme paralelo a quilha, conforme a Figura 3-8 e Figura 3-9.

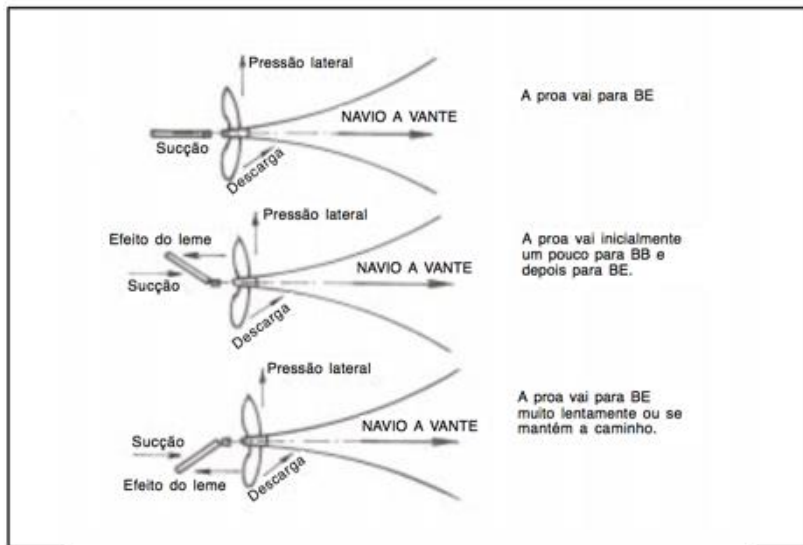


Figura 3-8 Esquema de comportamento de navio em início de deslocamento AV (Fonte: [16])

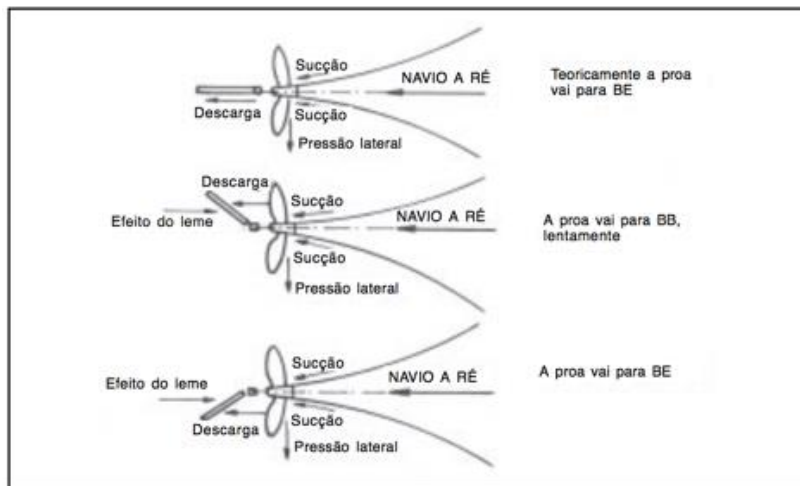


Figura 3-9 Esquema de comportamento de navio em início de deslocamento AR (Fonte: [16])

3.5. FORÇAS

A navegação dos navios ocorre pela capacidade de as embarcações flutuarem e conseguirem gerar movimento no meio aquático. Em contrapartida, a navegação é afetada por forças que dissipam a força motriz da embarcação. Podem-se definir quatro forças atuantes no deslocamento de um navio em águas salgadas ou doces: Impulsão, Forças lateral, Propulsão e Atrito.

3.5.1. EMPUXO OU IMPULSÃO

A flutuação dos navios no meio aquático ocorre pelo o equilíbrio, estático ou dinâmico, das forças presentes. O empuxo ou impulsão é a força gerada pela submersão do navio, conforme Figura 3-10.

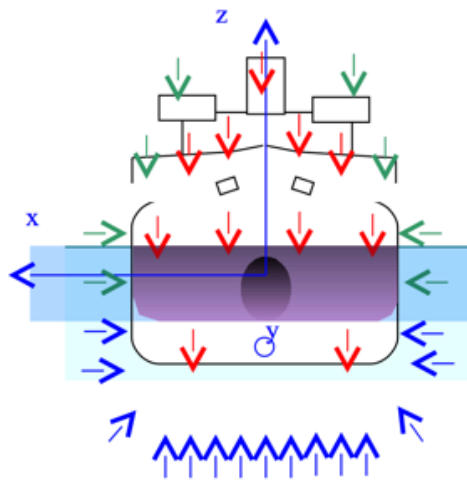


Figura 3-10 Esquema do Equilíbrio das Forças (Fonte: [3])

Conforme definido no Princípio de Arquimedes, impulso é uma força vertical, com sentido inverso ao peso de um objeto emerso, que tem intensidade igual ao produto do peso volúmico do líquido pelo volume do casco imerso no líquido. Pode-se interpretar o empuxo como uma reação da presença do navio na água, visto que a submersão de parte do casco, medida pelo calado, causa um deslocamento de água proporcional ao peso da embarcação, conforme Figura 3-11.

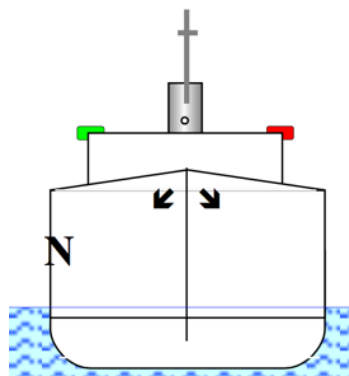


Figura 3-11 Desenho Esquemático da Mecânica de Flutuação (Fonte: [3])

3.5.2. FORÇA LATERAL

Trata-se da força horizontal, originada por um fluxo incidente horizontalmente no corpo emerso, com sentido e direção igual ao fluxo originário e intensidade igual ao produto em intensidade do fluxo e sua área de incidência.

A força lateral pode tanto deslocar lateralmente um objeto, Figura 3-12, quanto causar uma rotação do objeto, tombando-o, Figura 3-13. No caso de embarcações, é o produto da intensidade do fluxo e a sua área incidente no casco da embarcação, emerso e submerso.

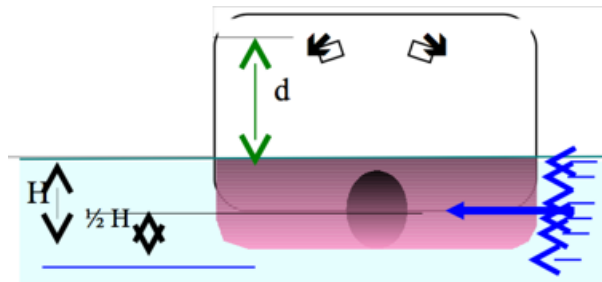


Figura 3-12 Força Lateral Tipo Deslocamento (Fonte: [3])

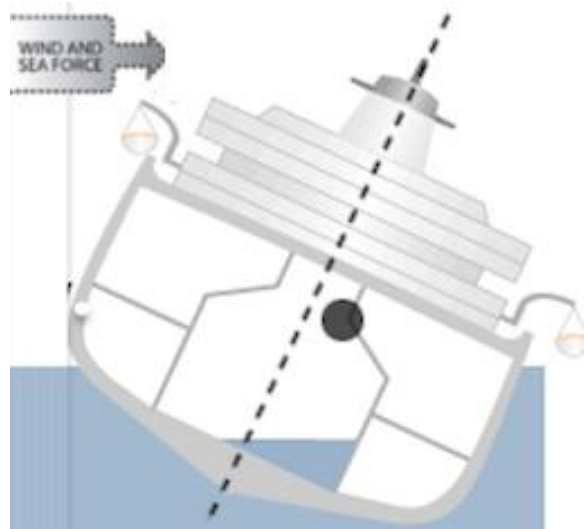


Figura 3-13 Força Lateral Tipo Tombamento (Fonte: [S11])

3.5.3. PROPULSÃO

A propulsão naval é a geração de energia mecânica que impulsiona embarcações na direção, sentido e intensidade desejada.

No caso dos navios mercantes, a propulsão é feita por hélices, que geram um fluxo direcionado por pás, conforme Figura 3-14 ou, e podendo ser em conjunto, empurrados ou tracionados por rebocadores.

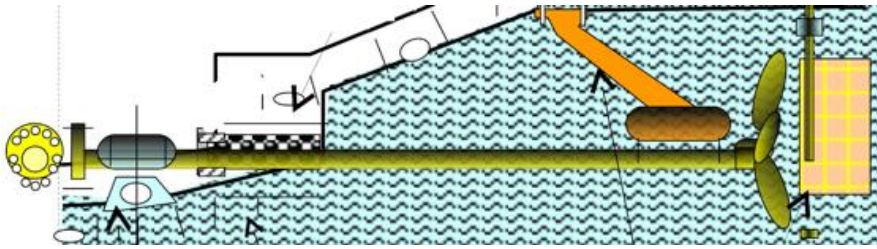


Figura 3-14 Esquemático de propulsão naval por hélices (Fonte: [3])

3.5.4. RESISTÊNCIA AO MOVIMENTO

Trata-se de uma força horizontal, contrária à propulsão, como reação do sistema aquático ao deslocamento de um objeto.

Na navegação, a resistência ao movimento de embarcações está relacionada com as propriedades da água, hidrodinâmica do casco e velocidade do navio.

3.6. AGITAÇÃO MARÍTIMA

A agitação marítima (ondas, vagas), é o agente natural que mais pode prejudicar ou mesmo inviabilizar as operações portuárias. Inadequados níveis de oscilação podem impossibilitar o acesso ao porto ou a navegação com segurança no canal de acesso ou inviabilizar as operações de estiva portuária (carga e descarga de mercadorias). O aumento das dimensões das embarcações e as exigências de expansão e realocização de novos portos e terminais portuários suscitam uma análise ponderada das condições naturais de abrigo e a análise da construção de estruturas que mitiguem as oscilações nos planos de água.

Com a intenção de entender como as intervenções de engenharia podem conduzir a uma melhoria das condições de operacionalidade e de segurança, é imprescindível versar de uma forma sumária sobre o assunto. Os dois eventos que causam agitação ou oscilação aquática são as ondas e as correntes.

3.6.1. ONDA

Define-se onda como uma perturbação do equilíbrio do ambiente aquático, causado pela transferência de energia, usualmente pelo atrito do vento com a água, conforme Figura 3-15, excitando a superfície do plano de flutuação, tendo como consequência a transmissão de energia cinética entre dois pontos nos rios ou oceanos. Há uma relação entre a área onde o vento incide (comprimento da área de atuação é o *fetch*), o tempo que a velocidade do vento se mantém aproximadamente constante e o tamanho da onda, Figura 3-16.

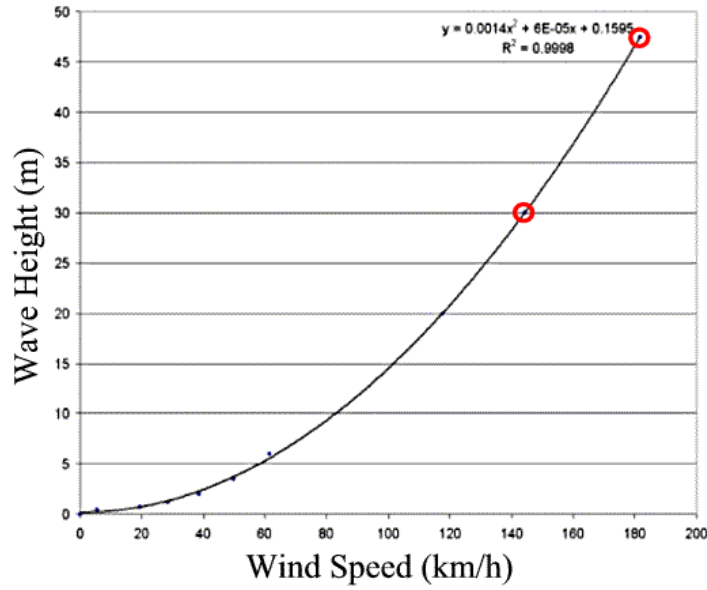


Figura 3-15 Relação velocidade do vento com altura de onda, dada mesmas condições de conrtono (Fonte: [S12])

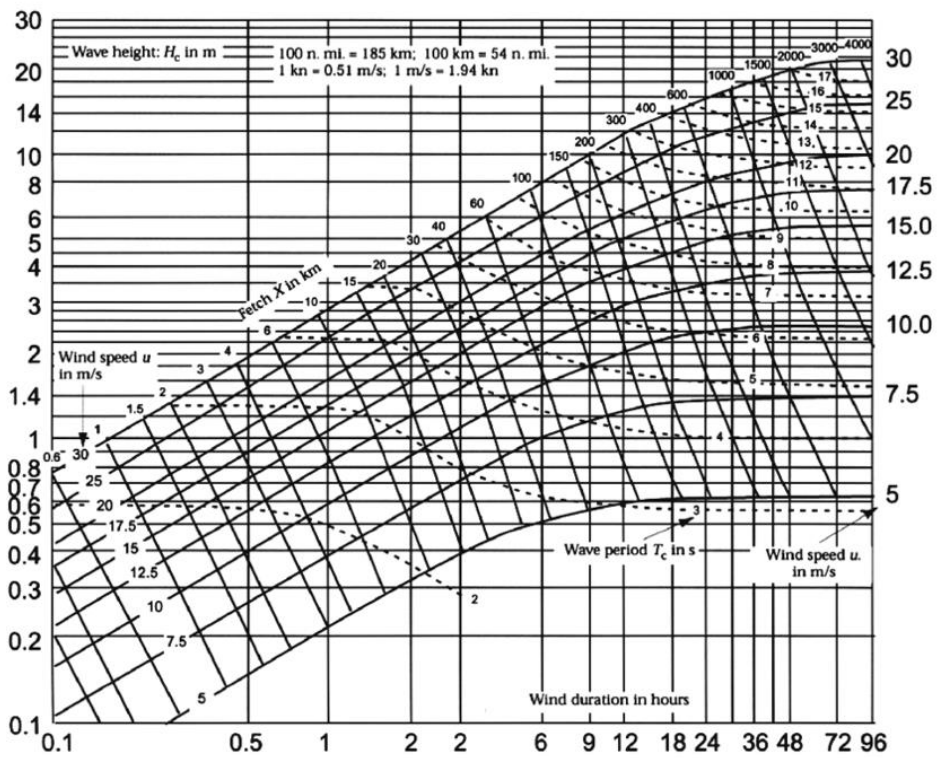


Figura 3-16 Relação Área x Tempo x Velocidade do Vento com Tamanho e Período de Onda (Fonte: [20])

As ondas quando incidem em embarcações têm efeitos de cargas dinâmicas, transferindo à embarcação parte de sua energia cinética, retratado na Figura 3-17. Ocorre, portanto, um desequilíbrio no sistema embarcação e meio aquático, o que diminui a navegabilidade.

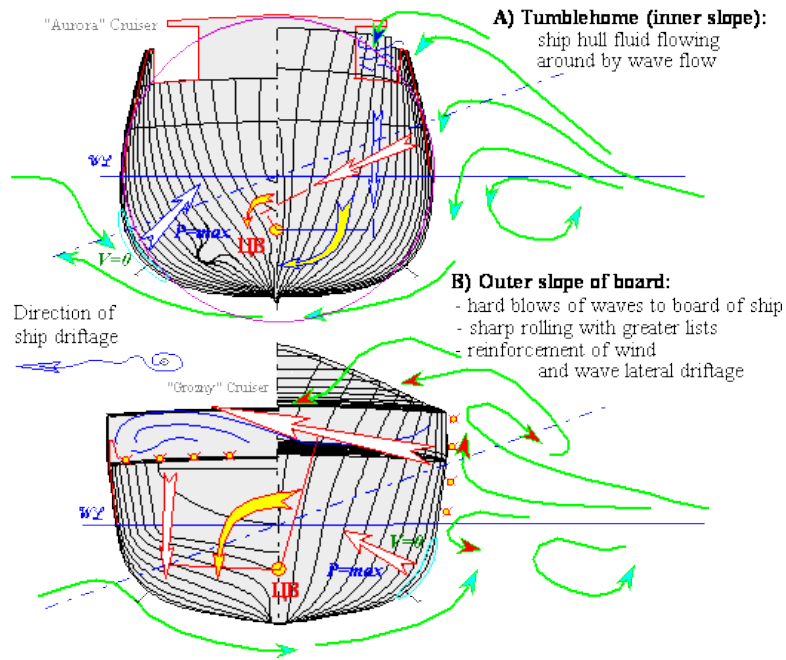


Figura 3-17 Interação onda com um navio (Fonte: [S13])

A diminuição da navegabilidade da região pode ser parcial ou total, dependendo se as forças resultantes sejam ou não suficientes para impedir que a embarcação continue a navegar, que haja possibilidade de tombamento da embarcação ou que a agitação marítima gere imprevisibilidade na navegação. Na Figura 3-18 mostra-se o registo de altura significativa e altura máxima ao largo do porto de Leixões entre 1999 e 2016, o que justifica a existência de quebramares de abrigo.

No canal de acesso e nas docas a agitação marítima proveniente de mar aberto poderá ter de ser mitigada para garantir o máximo possível da operacionalidade do porto, mesmo sob forte incidência de ondas.

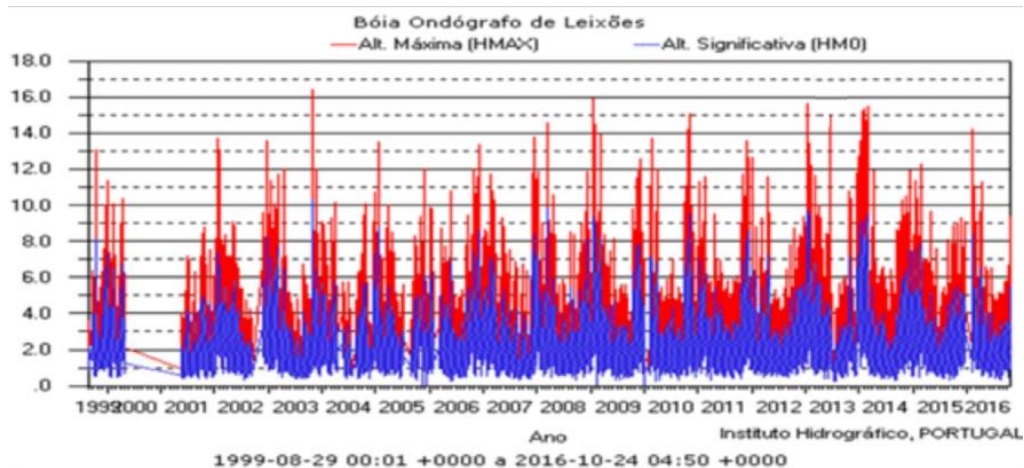


Figura 3-18 Registo de alturas da de onda ao largo do porto de Leixões (Fonte: [25])

3.6.2. CORRENTES

As correntes são fluxos contínuos e direcionados de água. Em oceanos, podem ocorrer por gradiente de temperatura e salinidade, diferenças de cotas do fundo do mar, transferência de

energia cinética por atrito do vento e maré. Em rios primordialmente as correntes estão ligadas aos caudais e à geometria do leito do rio. Nos estuários há que adicionar as correntes de fluxo e refluxo das marés.

As correntes podem incidir no sentido proa-popa da embarcação, podendo dificultar a capacidade de manobra da embarcação e fechar a operação do canal de acesso do porto. A corrente de barravento no sentido popa-proa ou lateral não ocorrem em águas abrigadas, mas podem impedir que navios cheguem ao canal de acesso, conforme Figura 3-19.

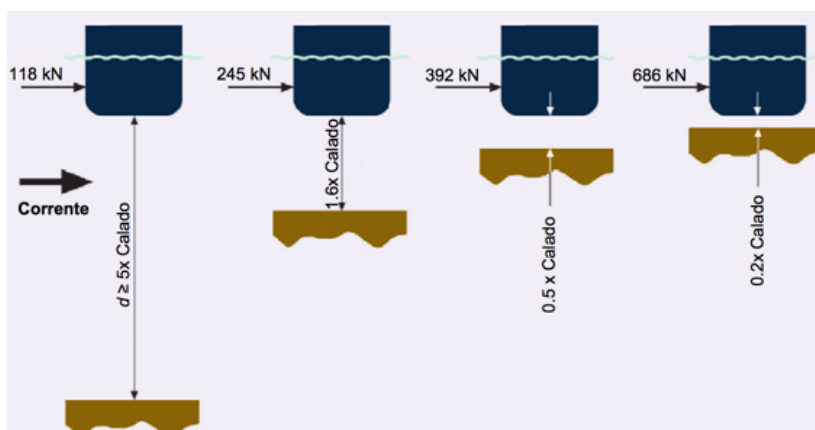


Figura 3-19 Influência da folga sob a quilha nas forças laterais produzidas por correntes num navio (Fonte: [37])

A velocidade da corrente não é uniforme, variando em termos de localização geográfica e da profundidade. Em estuários as correntes associadas à propagação das marés podem ser relevantes. [45].

Os canais de acesso e as bacias de evolução ou rotação devem ter o mínimo possível de correntes, visto que sua atuação é simultânea com ondas e os seus efeitos ocorrem de maneira conjugada. Pode ocorrer o fechamento do porto por condições meteorológicas que gerem correntes que acessem o canal de acesso, impedindo navio para acessar o canal de acesso de um porto com segurança.

3.7. VENTO

A ocorrência de ventos fortes em portos pode gerar dificuldades da navegação, em especial em terminais portuários de containers devido à elevada altura morta dos navios. Em eventos extremos, pode obrigar o fechamento da operação do porto, em função da impossibilidade de navegação segura ou à interrupção da movimentação de guias e pórticos de descarga de mercadorias. A Figura 3-20 relaciona velocidade dos ventos incidentes num navio e forças resultantes em um navio petroleiro 100.000 toneladas, com comprimento de 254 metros totalmente carregado e com calado mínimo, áreas mortas conforme Tabela 3-1.

Tabela 3-1 Área morta de um navio petroleiro 100.00 toneladas, totalmente carregado e com o calado mínimo (Fonte: [37])

Carga Máxima		Lastro	
Área Transversal	Área Longitudinal	Área Transversal	Área Longitudinal

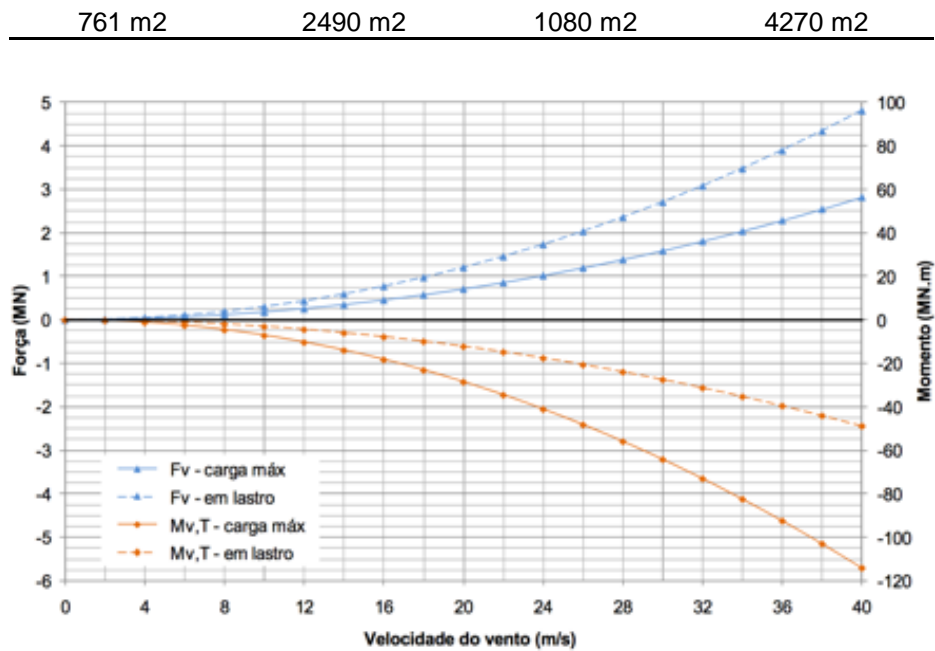


Figura 3-20 Exemplo da influência da velocidade do vento nos esforços exercidos num navio petroleiro 100.000 toneladas. (Fonte: [37])

A ocorrência do vento longe da costa, *off-shore*, geralmente verifica-se com maior intensidade que ventos *onshore*, pois não há edificações, relevos ou vegetação para dissipar sua energia cinética. Esses ventos se muito intensos impedem a chegada de navios aos portos, por desestabilizar a embarcação. Ventos on-shore são, normalmente, de menor intensidade, porém ao incidir nos navios dentro do canal de acesso, caso tenham uma intensidade relevante podem obrigar ao porto a interromper as suas operações. [15]

A velocidade característica do vento varia tanto geograficamente, quanto a depender da altura. Quanto menor a altura, por fricção com o solo ou água, menor a velocidade do vento.

Os portos devem estar localizados em regiões em que os ventos sejam amenos, podendo um terminal ser inviabilizado pela incidência de ventos que causem prejuízo à eficiência e segurança da operação do porto. A Figura 3-21 mostra um exemplo densidade espectral de energia do vento, quantificação da energia cinética associada à componente horizontal da velocidade do vento de um registro significativo da velocidade do vento.

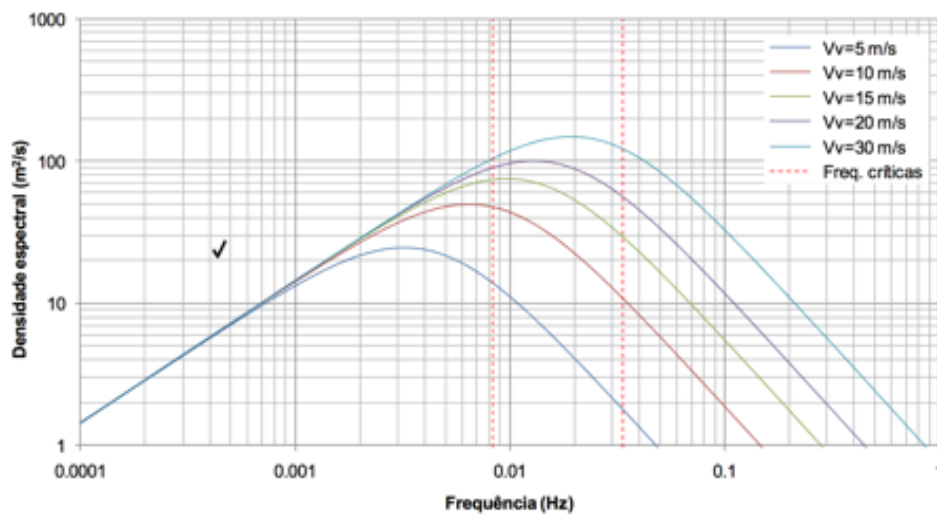


Figura 3-21 Espectro de potência da rajada, para diferentes velocidades médias do vento (Fonte: [37])

3.8. MARÉ

A maré revela-se pela variação da cota da superfície livre da água, no tempo, em relação ao seu nível médio, Figura 3-22. Essa variação tem como origem a resultante da força gravitacional de sol e lua, podendo também ser influenciada pela pressão atmosférica.

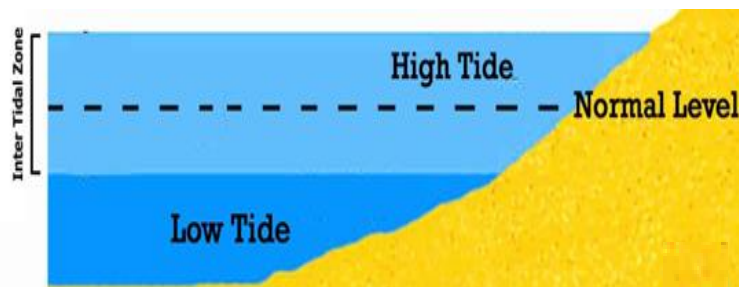


Figura 3-22 Esquemático sobre Maré (Fonte: [S14])

A variação da altura de coluna de água tem três efeitos diretos, podendo o acesso portuário ser condicionado sendo possível apenas em condições de preamar. Caso em baixa-mar a coluna de água seja menor que o calado do navio tipo mais uma determinada folga, a entrada e saída do porto é interdita.

Também, a diminuição da coluna de água acentua a força da corrente, conforme Figura 3-19.

Finalmente, mesmo que a coluna de água seja maior que o calado, mas não haja folga entre quilha e o solo marinho ou fluvial, a operação pode ser fechada condicionada pela falta de segurança. A capacidade de manobrabilidade de um navio tem relação direta com a altura de coluna de água entre quilha e leito. Figura 3-23.

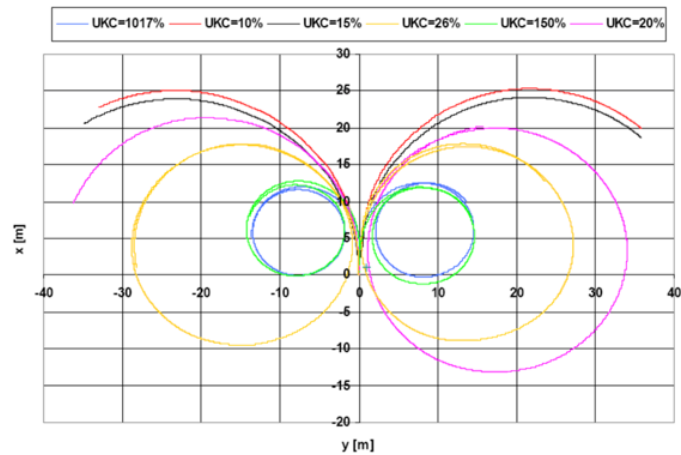


Figura 3-23 Relação altura de coluna de água entre quilha e o fundo (UKC), com a capacidade de manobrabilidade (Fonte: [S15])

3.8.1. TIPOS DE MARÉ

As forças atuantes no ambiente influenciam e caracterizam as marés. Existem dois tipos de marés, a maré astronômica e a maré atmosférica,

3.8.1.1. Maré astronômica

Segundo a Lei de Gravitação Universal a força de atração gravitacionais de um corpo é diretamente proporcional à massa e inversamente proporcional a distância analisada. Isso quer dizer que corpos com grande massa ou corpos com massa relevante e próximos geram forças de atração consideráveis. O sol e a lua, em função da sua grande massa, geram forças de atração sobre o mar. Então, quando esses corpos celestes estão alinhados a força de atração é maior, conforme Figura 3-24.

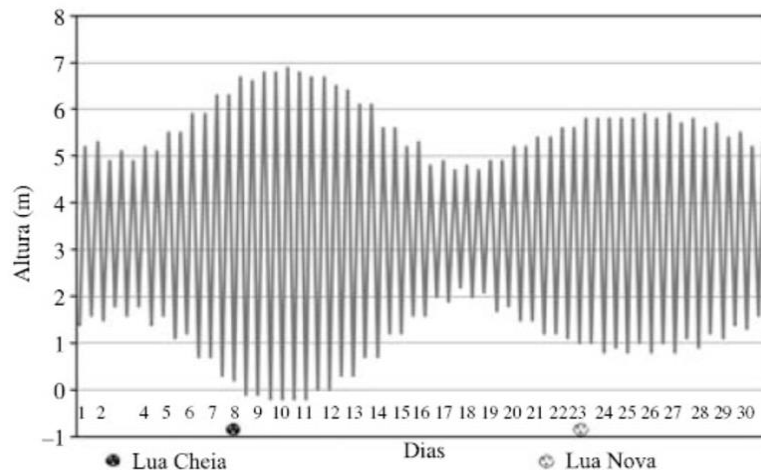


Figura 3-24 Influência da posição do sol e lua na maré (Fonte: [35])

3.8.1.2. Maré atmosférica

O nível das águas dos mares é afetado pela pressão atmosférica. Isso, pois, por ser um líquido, quanto maior a pressão sobre o líquido, menor seu volume e quanto menor a pressão sobre o líquido maior seu volume. Portanto, caso a pressão atmosférica esteja abaixo do valor de

4

FENÔMENOS RELATIVOS A DINÂMICA DE FLUIDOS E NAVIOS

4.1. INTRODUÇÃO

O movimento dos fluidos gera inúmeras interações entre o meio, navio e as condições de contorno. Essas interações geram alguns fenômenos, os mais relevantes no tocante de segurança e operação portuária são o efeito *squat* e a interação entre solo-água. Esses dois eventos colocam em risco tanto a possibilidade de a quilha chocar com o leito marinho ou fluvial e ter tão pouca água abaixo da quilha que o volume movido pelas hélices não conseguem gerar impulso suficiente para modificar o rumo da embarcação.

Um navio que tenha diminuída a sua capacidade de modificar seu trajeto dentro de um porto gera risco tanto a embarcação quanto ao porto e os navios ali presentes. A necessidade de corrigir rotas ou fazer manobras é o que garante, em última instância, que não ocorram colisões

Não ter volume de água suficiente que mantenha a capacidade de alterar o rumo de um navio ou que possa causar um choque com o leito é uma condição inaceitável de segurança ou de operação portuária. Portanto, discutir os dois efeitos supracitados é de grande importância tanto a segurança da operação quanto para o estudo das implicações do crescimento das dimensões navais e portuárias.

4.2. MANOBRABILIDADE

A manobrabilidade é a capacidade de um corpo flutuante, em meio aquático, modificar a direção de sua navegação. Em termos mais simples, é a capacidade de um navio fazer uma curva. Quanto maior for a manobrabilidade, maior será a capacidade de modificar a direção de seu trajeto e menor será o raio de um imaginário círculo para a concretização de uma manobra.

A manobrabilidade é influenciada pela capacidade de cada embarcação modificar a direção de seu trajeto e com a interação turbinas /pás /leito. Quanto maior a coluna de água entre a quilha do navio e o leito marinho, melhor será a manobrabilidade.

A manobrabilidade é afetada pela velocidade do navio, pelo tipo de propulsão, pelo efeito *squat* e pelo tipo de material que compõe o leito.

4.3. EFEITO SQUAT

Efeito *squat* é a necessidade de aumento de área molhada de um navio como consequência do movimento da água. Isso, pois, quando um fluido se movimenta em torno da embarcação, ocorre uma diminuição da pressão na região abaixo do casco do navio, pela resistência gerada pela presença de um corpo rígido desequilibrando o sistema. Como consequência dessa diminuição de pressão, que gera diminuição do empuxo, o objeto rígido submerge pela ação da gravidade até o ponto que a força gerada pelo empuxo volte a ser igual ao peso do objeto. Como efeito prático, o efeito *squat* faz com que exista uma carga empurrando o navio para baixo.

Existem duas formas da ocorrência do efeito *squat*, o navio estando em movimento ou ele estando aportado em um *dolphin*, porém, com correntes movimentando a água abaixo da embarcação. Para o presente trabalho, apenas a primeira ocorrência tem relevância.

4.3.1. NAVIO EM MOVIMENTO

Um navio em movimento, pela inércia do meio aquoso, cria ondas de impacto fazendo com que parte da água à sua frente seja empurrada na direção do movimento. Esse deslocamento dessa massa gera uma diminuição de pressão a frente do navio, tendo como consequência uma geração de corrente para deslocar essa massa para a região com menor pressão.

Ocorre, então, o efeito *squat* pelo movimento do navio e pela corrente gerada pela massa de água empurrada pelo navio voltando para baixo do navio. Pelo navio estar em movimento, por inércia, quando direção do deslocamento for a vante a proa levanta e quando for a ré a popa levanta, conforme Figura 4-1.

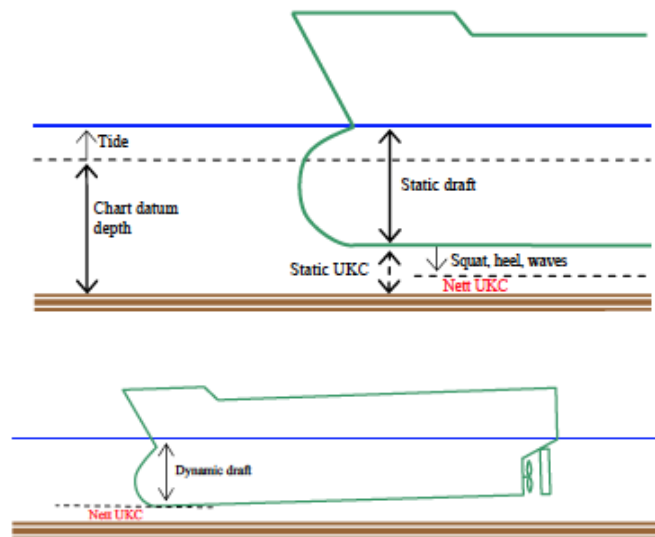


Figura 4-1 Esquema do efeito *squat* (Fonte: [18])

Por fim, o efeito *squat* tem diferentes magnitudes, caso ocorra em ambiente confinado, em águas rasas, confinadas ou em águas profundas. Também, varia em função do tipo de navio e da velocidade da embarcação, conforme Figura 4-2. O tipo de navio influencia porquê quanto menor

o coeficiente de bloco, C_b , volume de água deslocado pela área viva do navio, menor a diminuição de pressão gerada pelo deslocamento do navio e a velocidade do navio é relevante pois a diminuição da pressão ao redor do casco do navio é proporcional a velocidade.

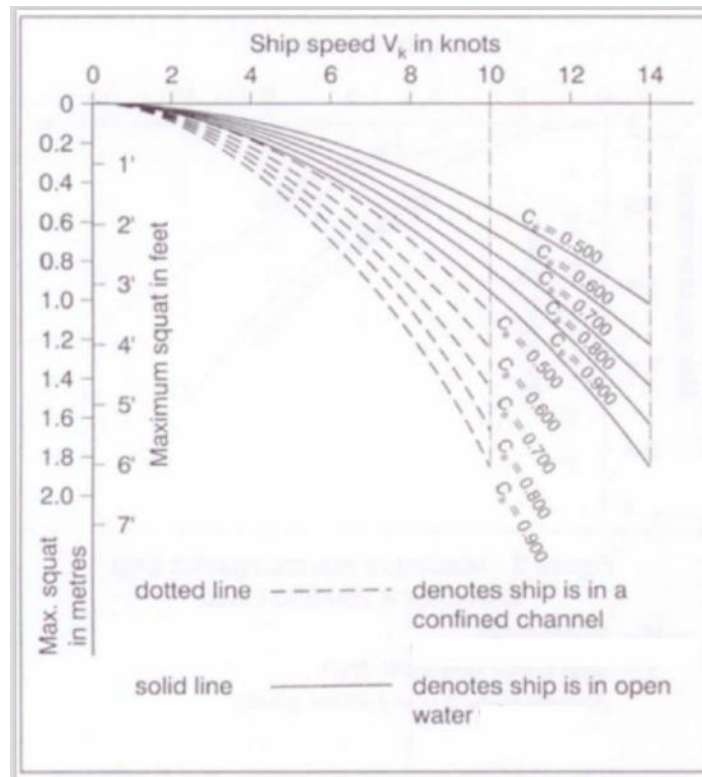


Figura 4-2 Valor máximo do efeito squat em águas confinadas e águas abertas (Fonte: [44])

Os valores do coeficiente de bloqueio, C_b , variam conforme o tipo de navio, conforme Tabela 4-1.

Tabela 4-1 Valor de C_b por tipo de navio (Fonte: [44], Adaptado)

Tipo de Navio	Valor Típico de C_b de máxima carga nominal
ULCC	0.86
Supertanker	0.825
Petroleiro	0.8
Graneleiro	0.75
Cargueiro	0.7
Cruzeiro	0.625
Porta-Container	0.565

4.3.1.1. Águas profundas

O efeito *squat* é um evento relacionado com a dinâmica dos fluidos. É possível, então, dizer que as condições de contorno que o ambiente impõe a esse fluido irá influenciar seu deslocamento e, portanto, seus efeitos. Em águas profundas, aonde a coluna de água é suficientemente grande para que não tenha influência no perfil de velocidade do fluido, as consequências do efeito *squat* tem relação apenas com o navio, Figura 4-3.

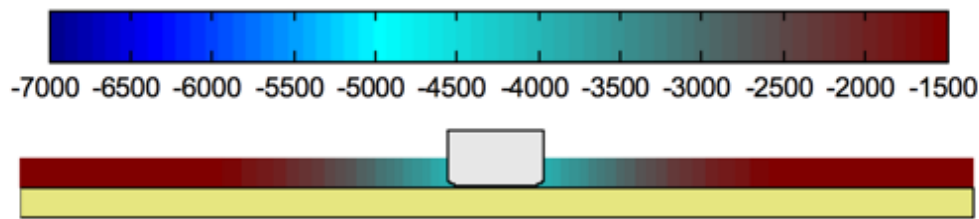


Figura 4-3 Valor da Pressão acima da pressão hidrostática, em Pascal, a metade de navio para um navio de container do Duisburg Test Case em águas profundas. Desenho esquemático aproximadamente em escala (Fonte: [19], Adaptado)

4.3.1.2. Águas rasas

Diferentemente das águas profundas, onde a coluna de água é grande suficiente para que não tenha influência no perfil de velocidade do fluido, em águas rasas o solo está tão próximo da quilha que parte do perfil de velocidade é afetado. Isso quer dizer que nessa condição o tipo de material que compõe o solo também tem influência no efeito *squat*. Esse é o caso de bacias de evolução onde a profundidade seja próxima do calado dos navios.

Nesta situação, por haver estrangulamento do fluxo há um aumento da velocidade abaixo do navio, aumentando o efeito *squat*.

4.3.1.3. Águas confinadas

Diferentemente das águas profundas e águas rasas, tanto o solo quanto os limites laterais restringem o fluxo gerado pelo movimento do navio. Isso quer dizer que nessa condição o material que compõe solo e, também, as paredes laterais tem influência no efeito *squat*, conforme Figura 4-4. Esse é caso dos canais de acesso.

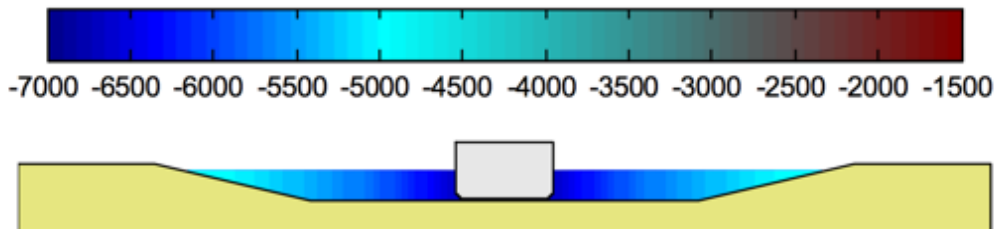


Figura 4-4 Valor da Pressão acima da hidrostática, em Pascal, a metade de navio para um navio de container do Duisburg Test Case em águas restritas. Desenho esquemático aproximadamente em escala (Fonte: [19], Adaptado)

Nesta situação, por haver estrangulamento do fluxo tanto abaixo quanto nas zonas laterais ao navio, há num aumento da velocidade no entorno do navio. Conseqüentemente, aumenta ainda mais o efeito *squat*. Esse acréscimo torna-se ainda mais evidente com o aumento da velocidade do navio, Figura 4-5.

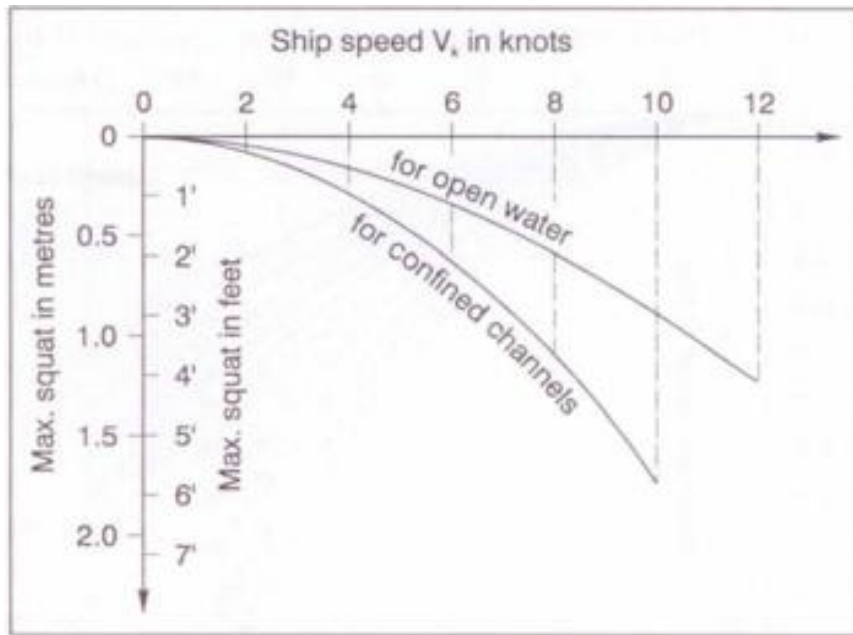


Figura 4-5 Comparativo do efeito squat em um navio VLCC, com 250.000 ton, em águas abertas e águas confinadas (Fonte: [44])

É possível calcular o efeito squat máximo a partir da fórmula (4.1)

$$S' = \frac{C_b}{30} \times S_2^{2/3} \times V_k^{2,08} \text{ metros} \quad (4.1)$$

Onde:

S_2 : Fator Velocidade - Retorno

V_k : Velocidade do navio, em relação ao solo, (nós)

Para calcular o valor de S_2 é necessário utilizar a fórmula (4.2)

$$S_2 = \frac{S}{1 - S} \quad (4.2)$$

Onde S é coeficiente de bloqueio e pode ser calculado a partir da fórmula 4.3

$$S = \frac{A_s}{A_c} \quad (4.3)$$

Onde:

A_s : Área da seção do navio à metade da embarcação

A_c : Área da seção do Canal

Os parâmetros para cálculo de A_s e A_c estão na Figura 4-6, e seus valores são calculador pelas fórmulas 4.4 e 4.5.

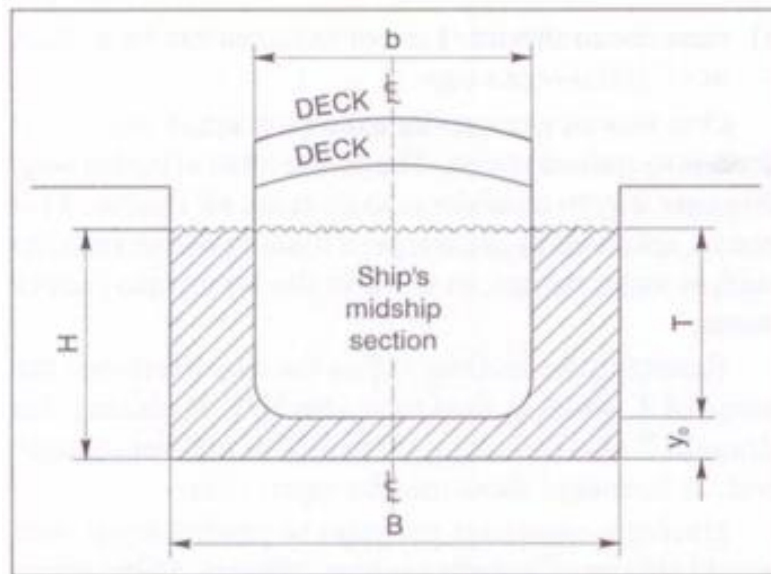


Figura 4-6 Esquema estático de um navio em um canal (Fonte: [44])

Onde:

H: Altura da coluna d'água

B: Largura do Canal

T: Calado do navio

b: Largura do Navio

y_0 : UKC estático, ou seja, antes do efeito squat acontecer

$$A_S = b \times T \quad (4.4)$$

$$A_C = B \times H \quad (4.5)$$

4.3.2. INFLUÊNCIA DA CONSTITUIÇÃO DO LEITO

Como já referido, em águas rasas e em águas confinadas o fundo náutico tem influência direta na navegação de navios. O fundo náutico é caracterizado como a cota limite onde o navio pode navegar sem que haja danos sua estrutura ou afete de maneira inaceitável a sua controlabilidade e navegabilidade. Isso quer dizer que caso a primeira camada do leito marinho ou fluvial seja composta de lama, é possível navegar com a quilha dentro dessa camada. As características da lama terão influência enquanto é aceitável navegar com a quilha dentro dessa camada.

4.3.2.1. Características da lama

A lama é um fluido não-newtoniano, porém, tem comportamento de líquido newtoniano, caso tenha baixa reologia, conforme a Figura 4-7. É possível, portanto, que navios naveguem com a quilha dentro da lama, caso a reologia dessa seja favorável.

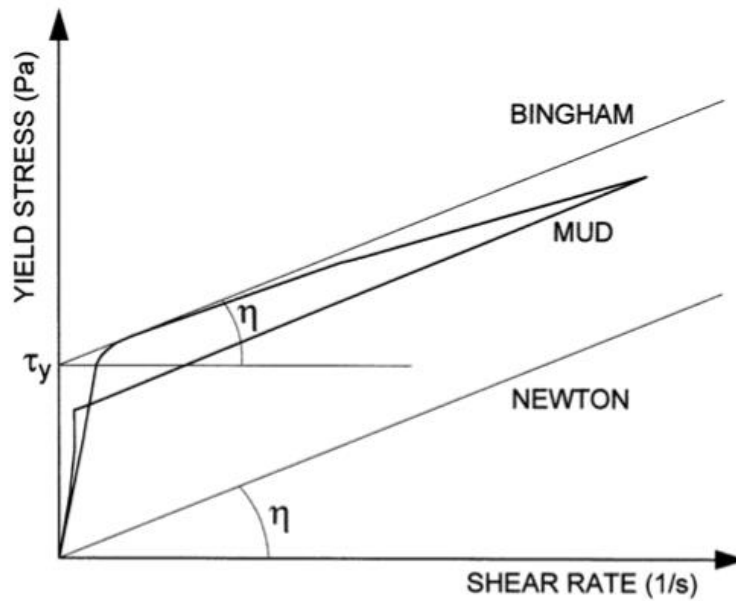


Figura 4-7 Comparativo do comportamento da lama com líquidos newtonianos (Fonte: [11])

Importante frisar que quanto mais densa a camada de lama, maior será sua reologia. É possível ver essa mudança de comportamento da lama a partir da Figura 4-8. As regiões 1 e 2 são a lama com comportamento fluido e na região 3 com comportamento de gel.

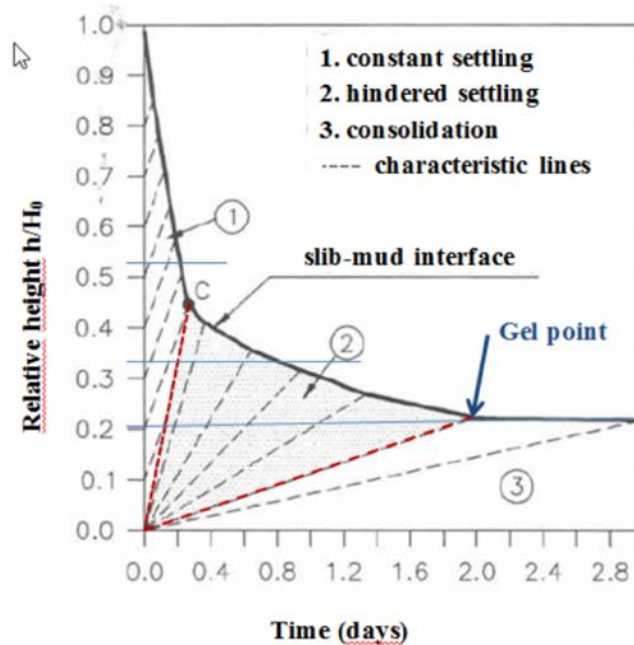


Figura 4-8 Curva de isodensidade na interface água/lama variando no tempo (Fonte: [12])

4.3.2.2. Interação navio lama

O navio ao navegar em camadas de lama tem comportamento distinto de quando está em água. A capacidade de aceleração diminui, visto que como a viscosidade da lama é maior que a água. Se torna, então, necessária maior energia para gerar fluxo, conforme Figura 4-9.

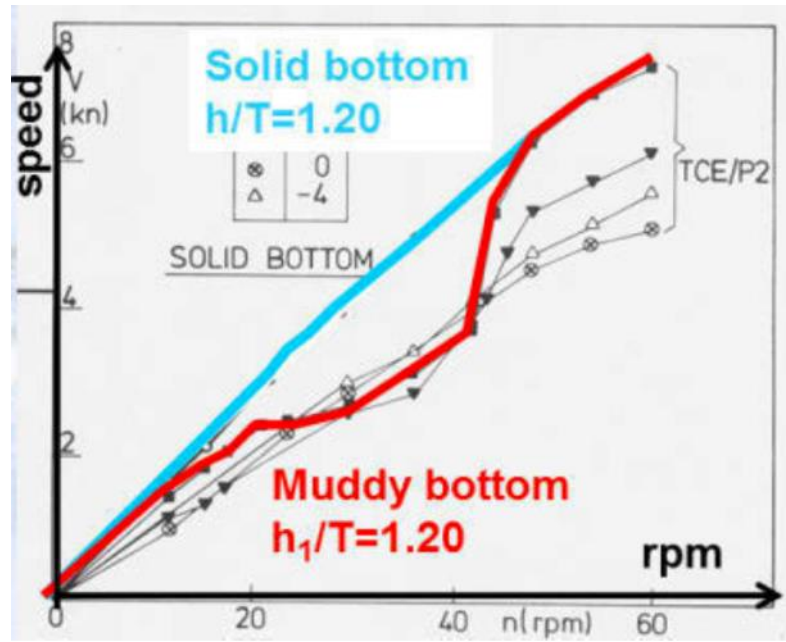


Figura 4-9 Influência da lama na velocidade do navio (Fonte: [10])

5

INTERVENÇÕES DE ENGENHARIA

5.1. INTRODUÇÃO

Como já referido, a atividade portuária só pode ser exercida quando a energia cinética das águas sejam tão pequenas que não tenha influência na navegação das embarcações que aportarão ou na movimentação de mercadorias entre a embarcação e os cais. Assim, nos locais onde haja necessidade econômica de construção ou ampliação de um porto e em que as águas da região não sejam naturalmente calmas, as intervenções de engenharia tornam-se necessárias para a mitigação dessa energia cinética.

Também, a necessidade de diminuição do custo unitário de frete originou uma evolução dos navios com o aumento expressivo de suas dimensões. Para tais “monstros dos mares” poderem acessar e terem mobilidade suficiente para garantir a segurança portuária, é frequentemente necessário proceder ao aumento da profundidade do canal de acesso e da bacia de evolução. Então, para a construção de portos em regiões não favoráveis em termos fisiográficos e geomorfológicos (batimetria dos fundos) é necessário que se rebaixe a cota do fundo do leito marinho ou fluvial para que haja viabilidade econômica para funcionamento desses portos.

Desta forma, são necessárias intervenções de engenharia para garantir a existência do canal de acesso e da bacia de evolução.

5.2. OBRAS DE ABRIGO

As estruturas de abrigo designadas como quebramares portuários ou molhes têm como função a garantia de que os planos de água são suficientemente calmos para a operação portuária e devem minorar o possível carreamento de sedimentos para o canal de acesso e bacia de evolução. Essas estruturas impedem que correntes e ondas perturbem as áreas do canal de acesso e cais, dissipando a energia desses fenômenos naturais.

A implantação e características dessas estruturas em ambiente fluvial ou marítimo está relacionado com o material utilizado em sua construção, a reologia do leito marinho, a área de ocupação da estrutura e a relação custo benefício entre o nível de segurança e a estrutura implementada. Sem estas estruturas não seria possível nem o crescimento das dimensões de portos

e navios, nem a execução portos em locais que naturalmente não abrigariam um porto, visto que é o quebramar que assegura a navegabilidade tanto do canal de acesso quanto cais.

5.2.1. TIPOS DE OBRAS DE ABRIGO – QUEBRAMAR

Existem diversas tipologias de estruturas de abrigo, porém para a engenharia portuária e, mais especificamente, canais de acesso e bacias de evolução, o quebramar é a de maior relevância. A Figura 5-1 ilustra o quebramar do porto de Zeebrugge, na Bélgica.



Figura 5-1 Quebra-mar do Porto de Zeebrugge

Existem vários tipos de quebramar, definidos por suas características construtivas e dissipativas, nominalmente quebramar de talude ou enrocamento, quebramar vertical, quebramar de estrutura mista e quebramar misto, (Figura 5-2).

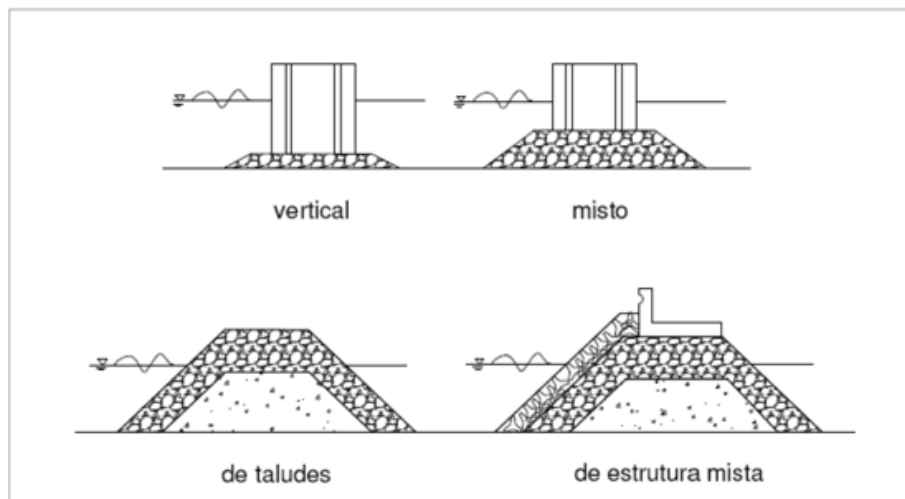


Figura 5-2 Perfil transversal esquemático dos quatro tipos de quebramares (Fonte: [33])

5.2.1.1. Quebramar de talude

É uma estrutura constituída por blocos, com função de dissipação e reflexão da energia cinética das ondas incidentes num paramento exposto inclinado rugoso e por isso constituído por blocos de concreto e/ou blocos naturais.

O quebramar de talude é caracterizado por ter várias camadas, sendo designadas por carapaça ou manto protetor, camadas subsequentes, filtro e núcleo, conforme Figura 5-3.

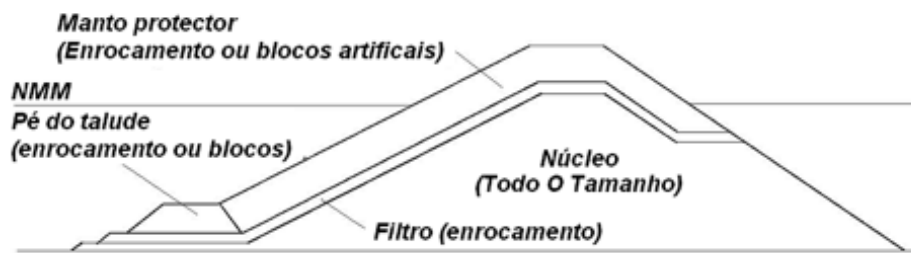


Figura 5-3 Corte Transversal do quebramar em talude (Fonte: [5])

A Figura 5-4 é um desenho esquemático com a relação dos pesos dos materiais e localização no quebramar.

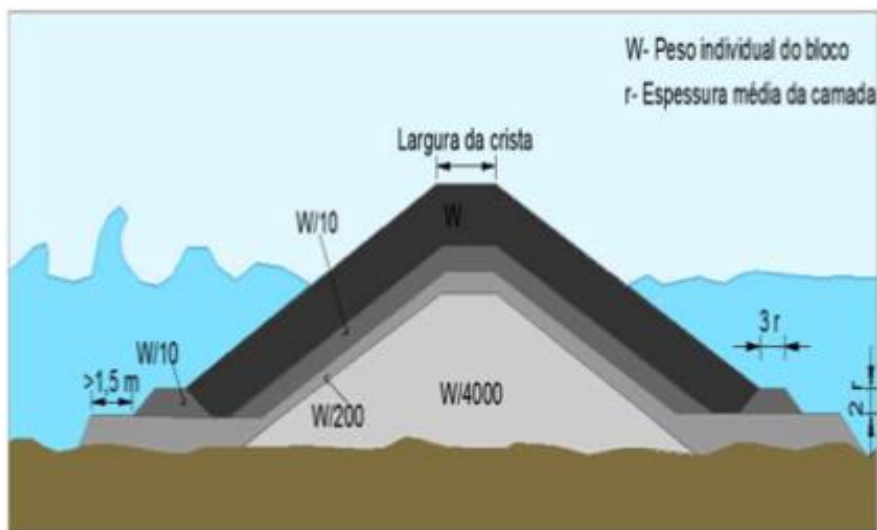


Figura 5-4 Desenho esquemático entre camada de enrocamento e seu peso (Fonte: [9])

Caso o quebramar e taludes esteja num local com muita agitação e esteja antes da zona da rebentação das ondas, a boa técnica indica que sejam implementadas risbermas para proteção da camada principal. Exemplo de uma seção transversal de quebramar com risberma é Figura 5-5.



Figura 5-5 Desenho Esquemático de Bermas (Fonte: [51])

5.2.1.2. Quebramar vertical

É uma estrutura monolítica vertical, impermeável, de concreto armado, usualmente constituída caixotões preenchidos com areia. Tem como função a total reflexão das ondas incidentes.

Os caixotões são moldados em estaleiro fixo ou flutuante e transportados flutuando até o local de implantação, onde são preenchidos com areia. A superestrutura é moldada in loco, simplificando tanto o transporte e dando um comportamento único às células. Uma possível seção transversal está representada na Figura 5-6.

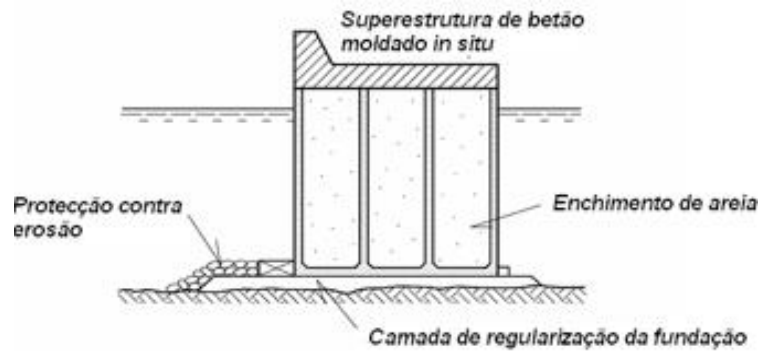


Figura 5-6 Perfil Transversal esquemático quebramar vertical (Fonte: [9])

5.2.1.3. Quebramar de estrutura mista

Trata-se de um quebramar de taludes, porém como característica marcante a presença de superestrutura de dimensões relevantes. Essa superestrutura tem como função o impedimento de galgamentos e por ser monolítica reflete as ondas incidentes. Uma possível seção transversal está representada na Figura 5-7.

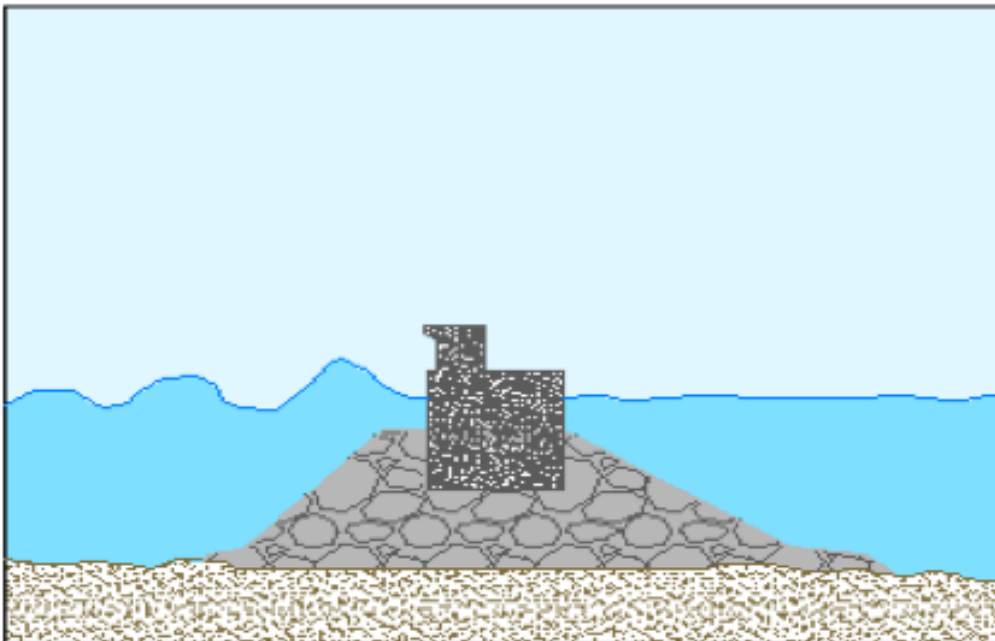


Figura 5-7 Desenho Esquemático de um Quebramar estrutura mista (Fonte: [40])

5.2.1.4. Quebramar misto

Da base até certa uma determinada altura um quebramar misto tem um comportamento de quebramar de taludes. Acima dessa altura tem comportamento de quebramar vertical, com reflexão total das ondas e correntes incidentes. Uma possível seção transversal está representada na Figura 5-8.

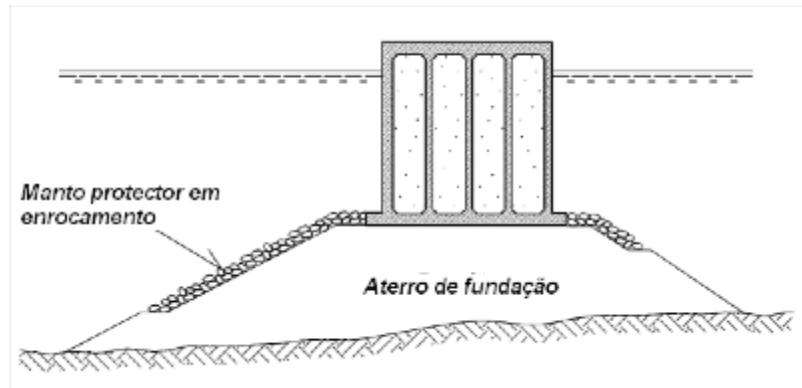


Figura 5-8 Desenho Esquemático Quebramar Misto (Fonte: [9])

5.2.2. TIPOS DE BLOCOS PARA QUEBRAMARES

A definição do tipo de bloco utilizado num quebramar de taludes, Figura 5-9, tem influência na sua geometria, estabilidade e custos. A seleção deverá ter em conta o comportamento hidráulico, a capacidade de dissipar a energia incidente por rebentação e percolação, a capacidade de interligação entre blocos e a robustez estrutural.



Figura 5-9 Tipos de Blocos de Concreto Armado (Fonte: [9])

5.2.3. FATORES PARA DEFINIÇÃO DO TIPO DE SOLUÇÃO UTILIZADA

A construção de um quebramar tem finalidade garantir águas abrigadas para manter a segurança e operação de um porto, mantendo-as calmas. Tanto um quebramar vertical quanto um quebramar de enrocamento atendem esse requisito. A definição do tipo de solução utilizada, então, está condicionada parâmetros pragmáticos.

São três análises que determinam qual tipo de solução deverá ser utilizada: reologia do solo de fundação, área reservada para a estrutura e o binômio segurança-custo. Em complemento e em paralelo deverão ser considerados os impactos ambientais e a inserção paisagística.

5.2.4. SOLO DE FUNDAÇÃO

O solo aonde se será construído o quebramar tem grande influência na forma que deverá ser escolhida a solução. Caso o solo tenha grande capacidade portante é possível a utilização de um quebramar vertical, visto que a estrutura rígida só admite a ocorrência de recalque diferencial

mínima; numa situação aonde o solo tem capacidade portante de médio porte é possível utilizar uma estrutura mista, já que a parte da estrutura em enrocamento comporta recalques diferenciais de maior porte e em solos de baixa capacidade portante apenas quebrar de enrocamento são possíveis, visto que o recalque diferencial será tão importante que apenas estruturas moveis o comportam.

Também, é importante indicar que mesmo sendo uma estrutura que permite recalques mais relevantes, estruturas de enrocamento podem entrar em colapso caso ocorra grandes movimentações de materiais na estrutura, conforme Figura 5-10.

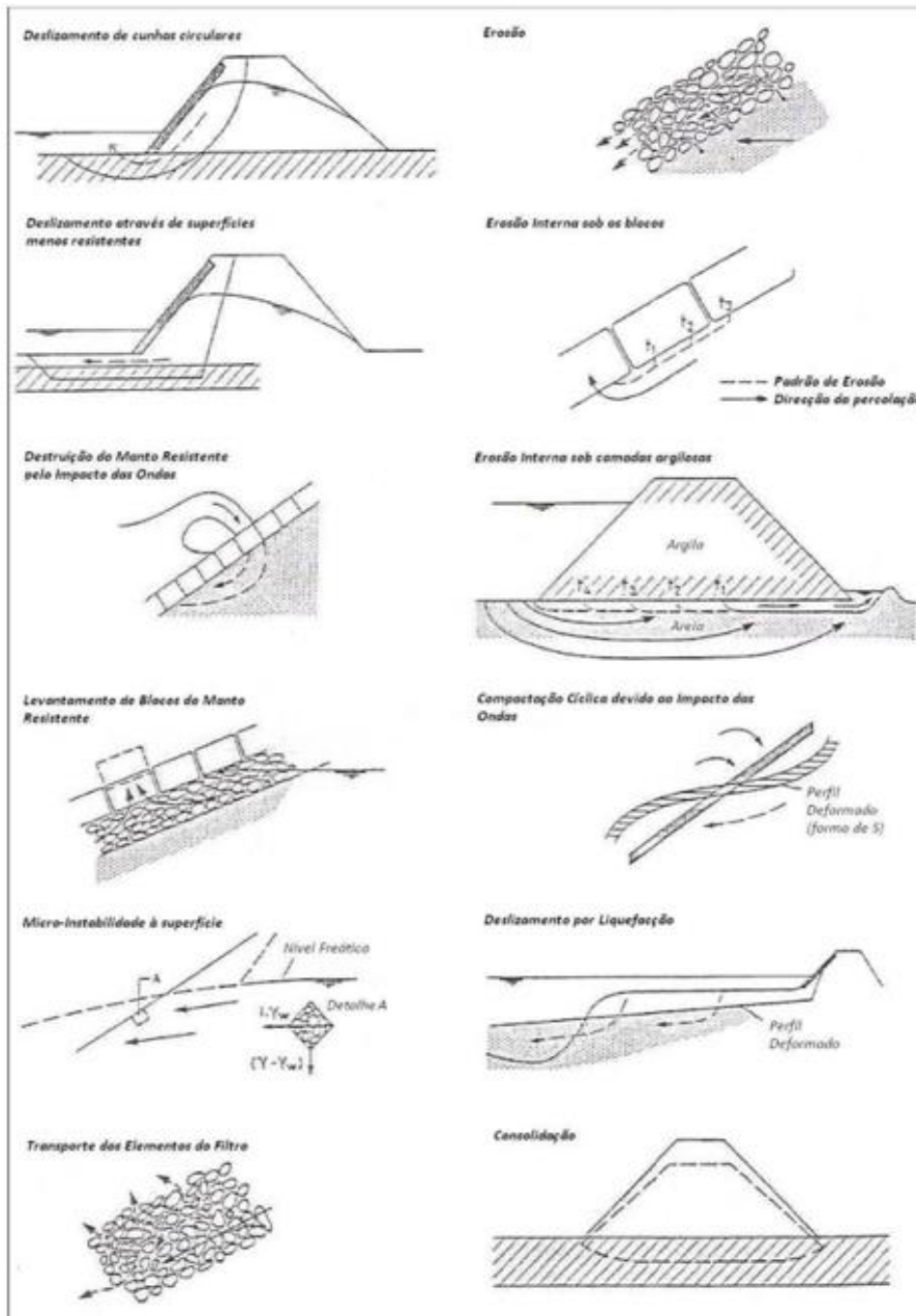


Figura 5-10 Tipos de Colapso por Causa Geológicas (Fonte: [8])

5.2.5. ÁREA DE OCUPAÇÃO

A implantação de um quebramar, deve levar em conta a área a ocupar pela estrutura.

O porto de pesca e a marina da Póvoa do Varzim estão protegidos por um quebramar de taludes. A área determinada para construção da obra de abrigo acolhia as dimensões laterais da estrutura e esta solução revelou-se como a mais adequada para o clima de agitação local, Figura 5-11.

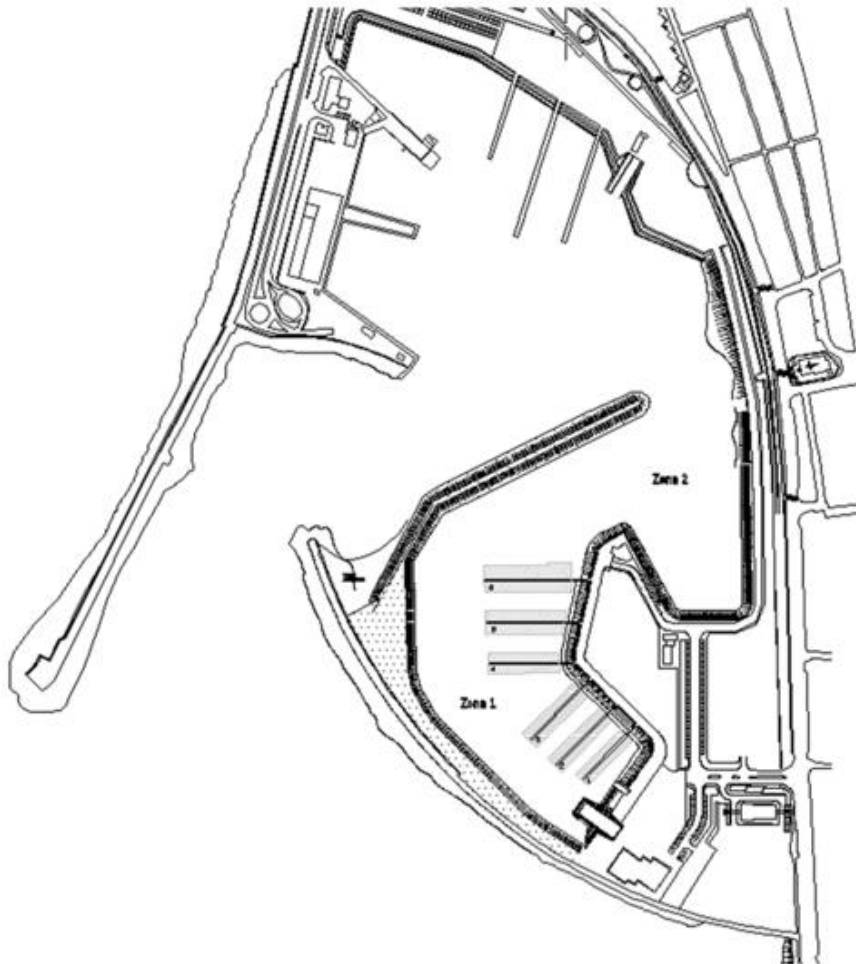


Figura 5-11 Planta de Situação Marina de Póvoa do Varzim (Fonte: [4])

5.2.6. BINÓMIO CUSTO X SEGURANÇA

O aumento da proteção de uma área em relação à agitação consegue-se com estruturas mais extensas, robustas e com cotas de coroamento elevadas.

Porém a esses requisitos correspondem aumentos de volumes de materiais e de custos, bem como possíveis implicações paisagísticas mais marcantes. Também haverá potenciais impactos a nível de alteração do trânsito sedimentar na costa com o potencial agravamento de acumulações e erosões.

A solução a adotar deverá ter em consideração o grau de proteção versus custos da solução, avaliando também os impactos negativos a nível da paisagem e do balanço sedimentar.

O Porto de Bilbao, localizado numa área costeira com um clima de agitação severo tem um quebramar com características diferenciadas ao longo da sua extensão, Figura 5-12.



Figura 5-12 Quebramar do Porto de Bilbao

O porto de Ilhéus, com um quebramar de enrocamento consegue atender às demandas operacionais de segurança, Figura 5-13.



Figura 5-13 Porto de Ilhéus (Fonte:[S16])

5.3. DRAGAGEM

A intervenção de engenharia que tem como finalidade a retirada de material do fundo dos mares e rios é designada como dragagem. A tipologia das dragagens está relacionada com o tipo de equipamentos utilizados ou material retirado.

Uma dragagem é o processo de retirada de material sedimentar de um leito marinho ou fluvial e o seu transporte e deposição em local apropriado, conforme Figura 5-14. O material retirado pode ter origem geológica local ou poderão ser sedimentos trazidos por correntes marítimas ou fluviais.

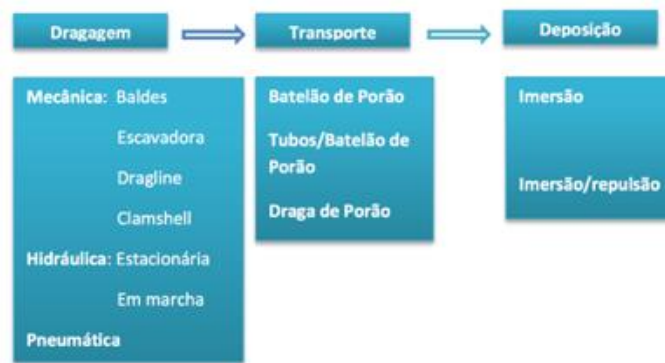


Figura 5-14 Fases da dragagem (Fonte: [36])

5.3.1. MOTIVAÇÃO

Em áreas portuárias o serviço de dragagem pode ter três grandes motivações: aprofundamento, manutenção e recuperação ambiental. Em Portugal maior parte das dragagens são actualmente de manutenção, conforme Figura 5-15.

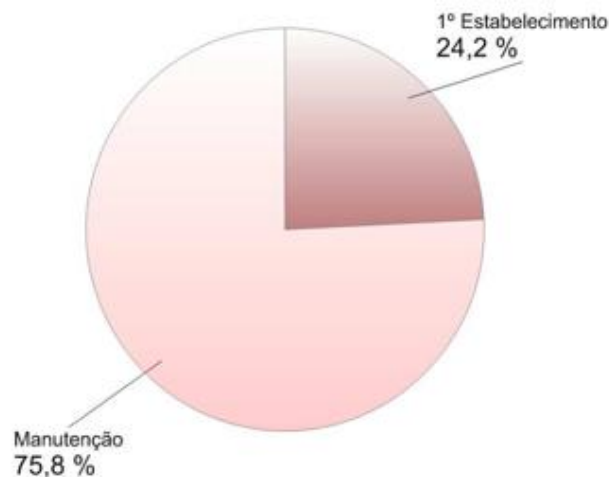


Figura 5-15 Tipos de Dragagem em Portugal (Fonte: [34])

5.3.1.1. Dragagem de aprofundamento, estabelecimento ou inicial

Designa-se como dragagem de aprofundamento, estabelecimento, inicial ou virgem quando o serviço de dragagem ocorre numa área onde nunca tenham ocorrido anteriormente intervenções de dragagem e o seu motivo seja o aprofundamento do leito marinho ou fluvial. Em regra, esse tipo de serviço utiliza equipamentos mais robustos, pois o material escavado tende a estar mais compactado ou ter maior poder de coesão.

Fundamentalmente esse tipo de operação ocorre para a criação, ampliação ou rebaixo das cotas de fundo de canais de navegação e bacias de manobra.

5.3.1.2. Manutenção

Serviço executado com frequência periódica, a dragagem de manutenção tem como função a retirada de sedimento trazidos por correntes, assim garantindo o calado necessário para receber as embarcações do navio tipo. É uma intervenção mais simples do que a dragagem de material virgem pois há pouca coesão entre o material retirado.

Tem, em última análise, a função de manter as cotas de projeto e, por consequência, o serviço inicial feito pela dragagem de aprofundamento.

5.3.1.3. Recuperação ambiental ou ecológica

Serviço extemporâneo, a dragagem ambiental tem como função a retirada de material contaminado do fundo aquático, a fim de garantir condições ambientais e de saúde humana. Trata-se de uma intervenção com características exclusivas, visto que o material retirado tem transporte e deposição específica.

Em Portugal tem baixíssima frequência dragagem de material, conforme a Figura 5-16, classificado como Classe 3, mas sua ocorrência tem de grande relevância pelas características do serviço. O serviço normalmente tem reduzido volume de material dragado e é uma atividade de reabilitação ambiental.

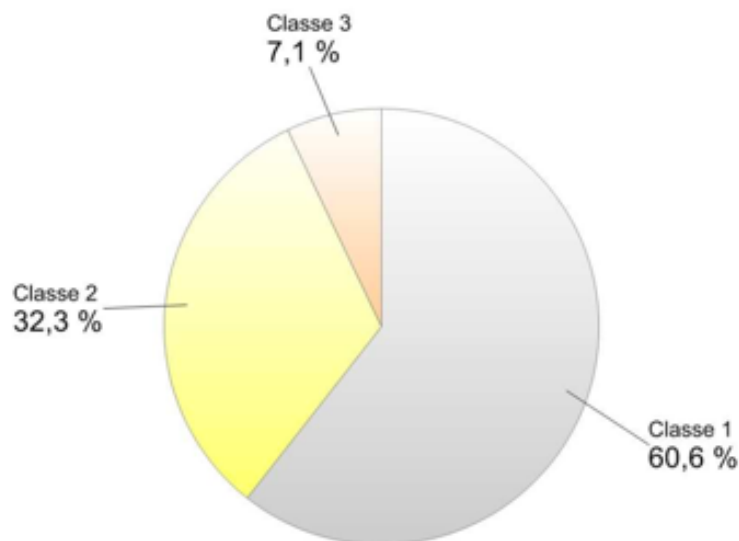


Figura 5-16 Tipo dos materiais dragados em Portugal. Tipos 1 e 2 pouca contaminação, tipo 3 muito contaminado (Fonte: [34])

5.3.2. FASES DA DRAGAGEM

A primeira fase, retirada de material, deve ocorrer após a execução de um levantamento e estudo de batimetria para determinar quanto será necessário de rebaixamento do fundo marinho ou fluvial. É necessário, também, estudos do material do leito marinho para determinar que tipo de material será dragado o qual influenciará diretamente o tipo de equipamento a utilizar. O equipamento de dragagem atua fazendo a escavação do material.

A segunda fase, transporte, não é muito condicionada pelo material dragado. Consiste em transportar a mistura de material escavado e água para uma região pré-determinada que garanta, se possível que o material dragado não seja carregado para a região dragada e que a deposição não cause desequilíbrio ambiental. Pode-se utilizar para o transporte dos sedimentos o próprio navio-draga, se tiver capacidade de porão ou podem ser utilizados batelões de porão.

A terceira e última fase, a deposição, consiste no lançamento do material escavado e transportado na área previamente determinada. Essa pode acontecer por gravidade, imersão, bombeado ou repulsão.

5.3.3. TIPO DE DRAGAGEM

Existem três tipos de dragagem: mecânica, hidráulica e pneumática. Cada uma delas tem características e aplicações específicas.

5.3.3.1. Dragagem mecânica

A dragagem mecânica realiza-se com equipamentos de baixo poder de escavação, atuando na remoção de areia, cascalho e sedimentos silte argilosos. A percentagem em termos de granulometria dos sedimentos retirados por dragagem mecânica em Portugal está indicada na Figura 5-17.

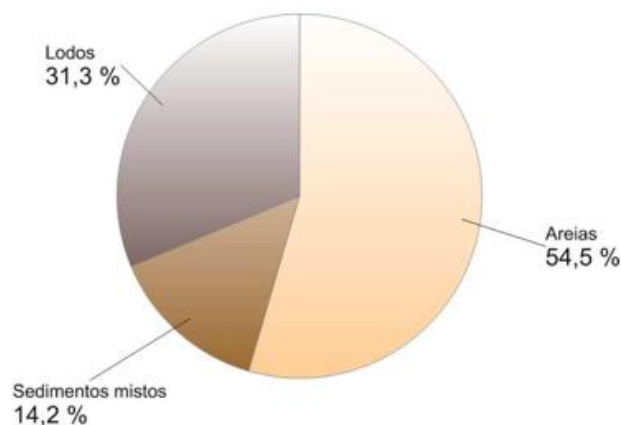


Figura 5-17 Composição Material Dragados (Fonte: [34])

Apesar de sua baixa capacidade, é o tipo de equipamento mais utilizado. Tem como *Modus Operandi* a aplicação de força mecânica para retirada do material e transporte do material a partir de barcas ou batelões acostados a contrabordo das dragas.

Os equipamentos utilizados são guas com balde (*Grab ou Clamshell*), para solos brandos e com baixa produtividade; dragas de mandíbula (*Dragline*), podendo ser utilizado baldes para solos de menor resistência e pinças para solos mais resistentes e baixa produtividade e dragas mecânicas mais robustas (*Bucket Dredges*), com capacidade de penetração, corte e produtividade maior, Figura 5-18.



Figura 5-18 Tipos de Dragas Mecânicas (Fonte: [36])

5.3.3.2. Dragagem hidráulica

A dragagem hidráulica recorre a equipamentos que utilizam de bombas para criar um jato com capacidade de desagregação da matriz rochosa ou solo com *California Bearing Ratio* alto. Podem, para facilitar o processo de desagregação do material, recorrer à ação mecânica. Por terem mais potência que as dragas mecânicas, são mais eficientes.

Seu *Modus Operandi* é a utilização das bombas tanto para lançar os jatos de água quanto para a sucção do material que deverá ser dragado, podendo o material ser lançado para batelões ou ser autotransportadoras. No processo há sucção de grande quantidade de água junto aos sedimentos dragados, obrigando à existência de um reservatório para acondicionar esse material, enquanto ocorre a decantação. Há vertedores ou descarregadores na parte de cima do reservatório para retirada da água do reservatório, Figura 5-19.

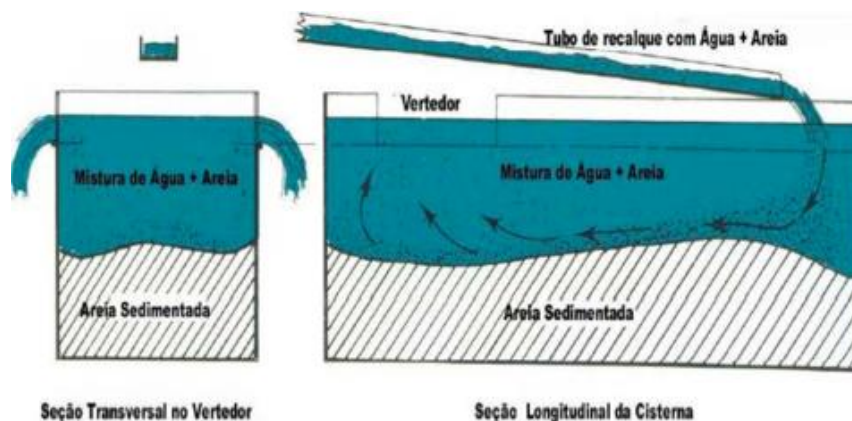


Figura 5-19 Ilustração das seções transversal e longitudinal do material dragado em dragas autotransportadoras (Fonte: [17])

Os equipamentos utilizados são dragas autotransportadoras de arrasto ou AT (*Hopper Trailing*

Suction Dredges) e Dragas de Sucção e Recalque com Desagregador ou SR (*Cutter Suction Dredges*), podendo trabalhar tanto estacionárias, Figura 5-20, quanto em movimento, Figura 5-21.



Figura 5-20 Draga Hidráulica de Sucção Estacionária (Fonte: [36])

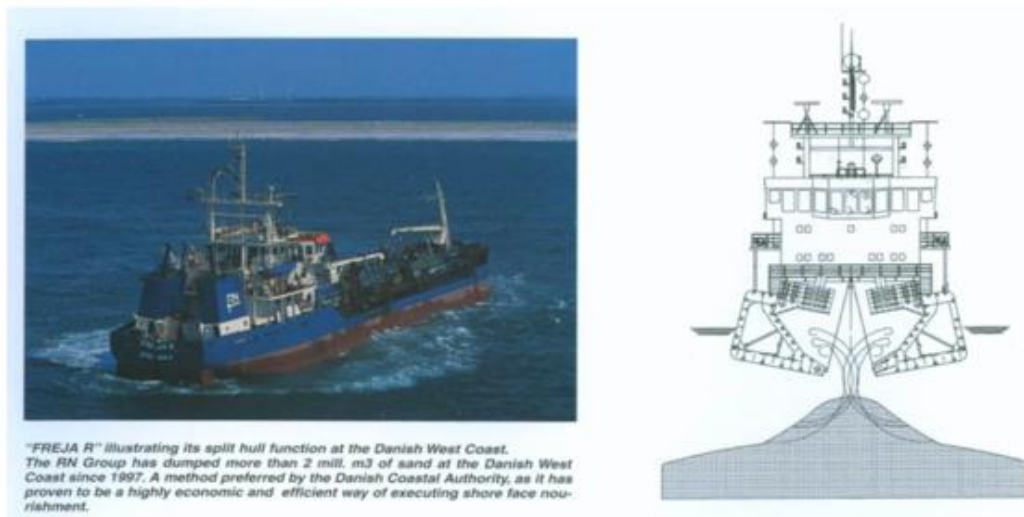


Figura 5-21 Draga Hidráulica de Sucção em Movimento (Fonte: [36])

5.3.3.3. Dragagem pneumática

A dragem pneumática recorrendo a equipamento de alta capacidade de corte, utiliza uma bomba pneumática que aplica o um jato de ar para desagregar o material a ser dragado, Figura 5-22. Esse tipo de operação causa pouco dispersão de sedimentos na água, pois não há utilização de meios mecânicos. São os equipamentos com o maior poder de imprimir esforço para retirada de material.

O *Modus Operandi* desse tipo de equipamento é designado como *Air-lift*, cuja função é promover a aspiração do material dragado por ar comprimido. Pelas suas características, são as únicas a serem utilizadas nas atividades de recuperação ambiental.

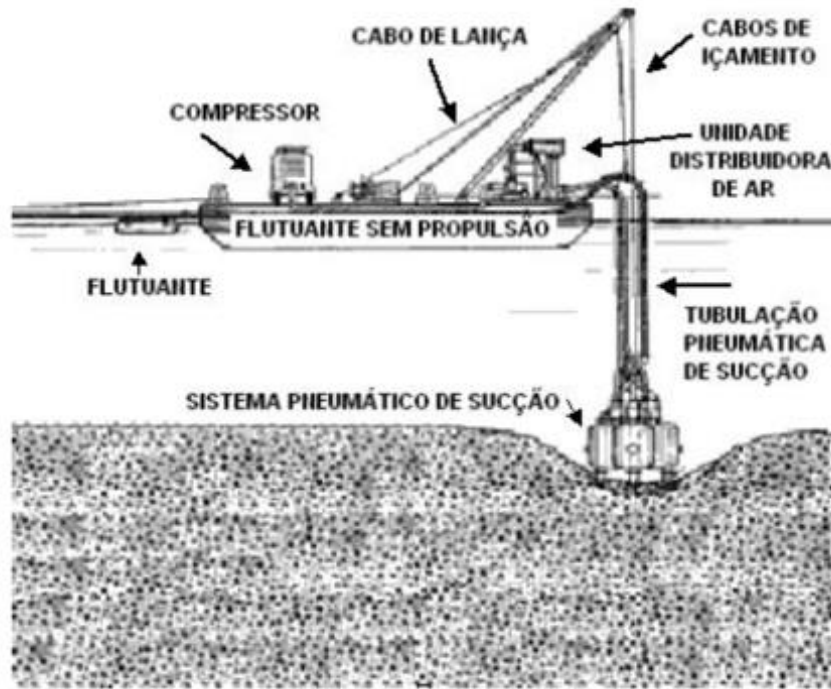


Figura 5-22 Esquema de Operação Draga Pneumática (Fonte: [39])

5.3.4. ESTABILIDADE DA ÁREA DRAGADA

O assoreamento dos canais de acesso e bacias de evolução ou rotação pode constituir um perigo para a operação do porto, originando condições desfavoráveis de manobra dos navios e colocando em perigo as embarcações por possíveis choques entre o casco e o leito marítimo ou fluvial. Para impedir que esse evento ocorra, é imprescindível efectuar um controle da evolução dos fundos para poder fazer uma projeção da futura necessidade de uma dragagem de manutenção.

5.3.4.1. Fenômeno de assoreamento

A retirada de material feita em uma dragagem é uma alteração no ambiente aquático, que por definição se torna menos estável do que no estado inicial, Figura 5-23.

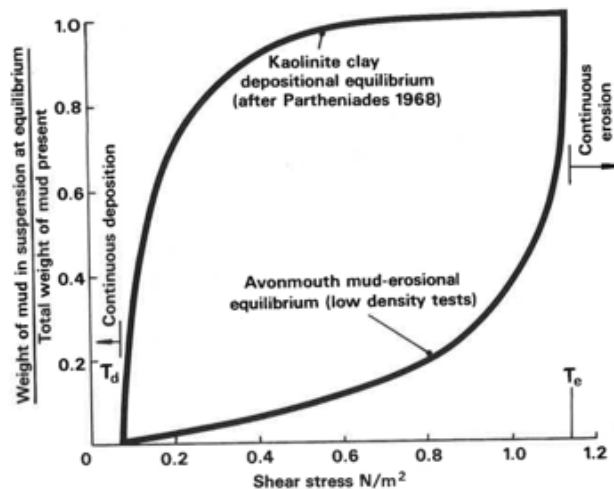


Figura 5-23 Comparação entre erosão e deposição de material em condições de equilíbrio (Fonte: [28])

As áreas aonde foram executadas as dragagens podem sofrer, com o tempo, deposição de material carreado por correntes, conforme Figura 5-24.

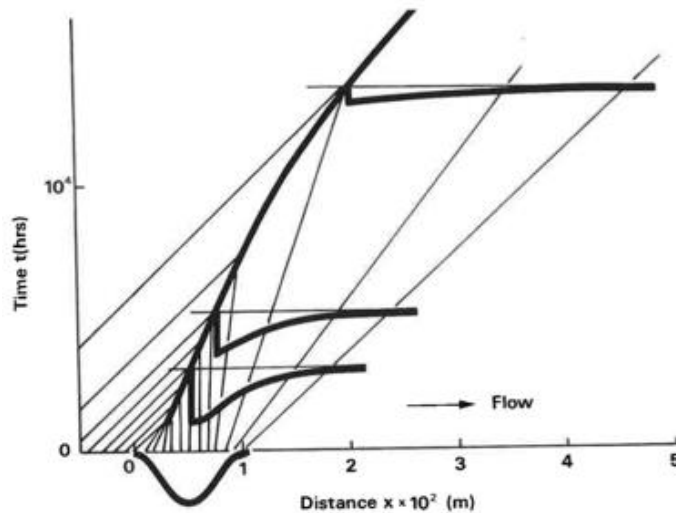


Figura 5-24 Exemplo da evolução de um canal com fluxo unidirecional (Fonte: [28])

Quanto maior a profundidade de dragagem em relação ao nível inicial, maior poderá ser a deposição de material, conforme Figura 5-25.

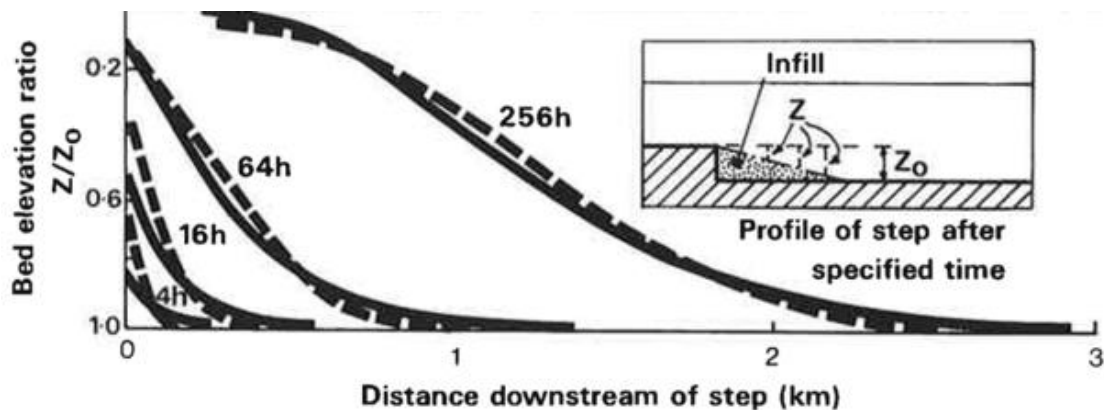


Figura 5-25 Exemplo de gráfico de deposição de material em canais dragados com profundidade finita (Fonte: [28])

5.3.4.2. Métodos de controle

Um método de controle do assoreamento é a medição da quantidade de material suspenso na corrente para um período de tempo, podendo ser um intervalo de horas até um ciclo completo de marés vivas e mortas. Estabelecendo uma taxa de quantidade de material por unidade de tempo extrapola-se essa medição, considerando que essa quantidade medida seja constante.

Com esta forma projeção podem correr em erros por variação do ambiente aquático.

O método mais frequente consiste na obtenção de batimetria em diversos intervalos de tempo, estabelecendo a comparação de volumes acima de um determinado nível de referência. Se o balanço da comparação for nulo, significa que não ocorreram assoreamentos nesse intervalo de tempo. Se o balanço for positivo houve acumulação sedimentar que poderá exigir, ou não, uma intervenção de dragagem de manutenção.

Existem outras formas menos usuais para controlar a taxa de assoreamento, a exemplo do rastreo de distribuição espacial de sedimentos com marcadores radioativos, Figura 5-26.

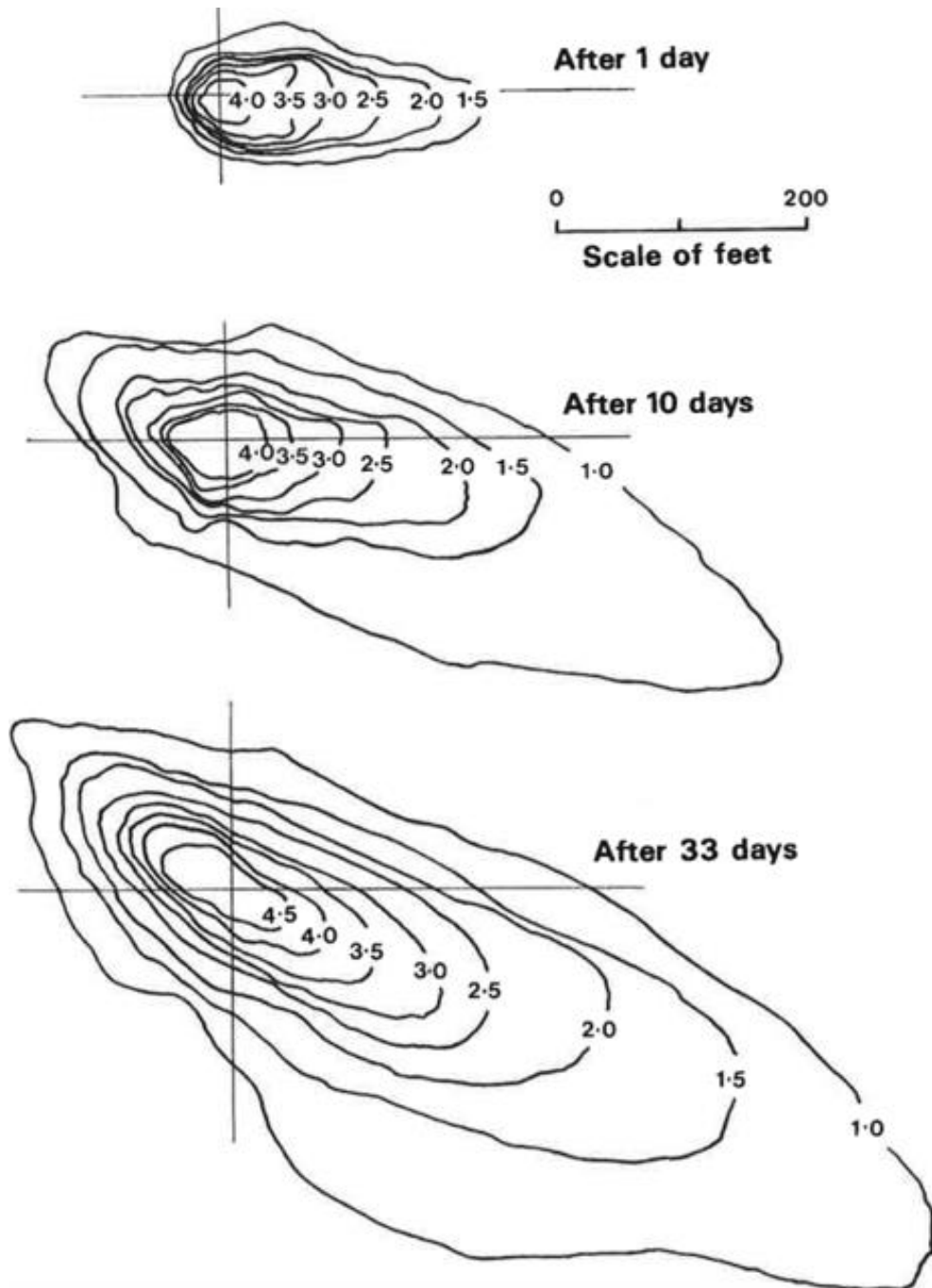


Figura 5-26 Rastreio de distribuição espacial de sedimento por radioatividade. As linhas são pontos com mesma radiotividade. (Fonte: [28])

A utilização de modelos numéricos calibrados pode constituir uma ferramenta poderosa para a determinação do potencial de assoreamento de um canal de acesso ou bacia de evolução, desde que a situação em estudo seja análoga aos casos que formularam o modelo. Por ser um método mais económico que a aquisição de dados em campo, hoje é muito utilizado.

6

MODELOS DE EXPERIMENTAÇÃO DE HIPÓTESES

6.1. INTRODUÇÃO

A complexidade da execução de intervenções de engenharia portuária, bem como a complexidade de análise das forças atuantes e impactos na área e na envolvente justificam a experimentação ou simulação das hipóteses de solução tanto para as obras de abrigo quanto para as intervenções de dragagem.

Também, o elevado valor financeiro e o impacto ambiental das intervenções de engenharia impõe que antes de iniciá-los se tenha algum tipo de experimentação da solução adotada.

6.2. SITUAÇÕES MOTIVADORAS

Os projetos de construção de estruturas portuárias muitas vezes envolvem tantas incógnitas que apenas a aplicação de conceitos técnicos simples não basta. Tanto pela complexidade dos fenómenos como pelas interações que a estrutura terá com o meio ambiente, toda construção em portos deve passar pelo escrutínio do modelação ou da simulação do seu comportamento e da envolvente a fim de garantir a sua integridade, a sua eficácia, a minimização dos impactos negativos e a maximização dos impactos positivos.

6.2.1. EXPANSÃO PORTUÁRIA

Com a expansão da operação portuária, força motriz do comércio internacional, constroem-se cada vez mais portos ou ampliam-se portos em locais com condições ambientais desfavoráveis. A indústria naval, por procura do mercado, cada vez mais aumenta as dimensões dos navios o que obriga à construção de quebra-mares em maiores dimensões e complexidade e à execução de dragagens com volumes maiores, situações novas e desafiadoras.

6.2.2. CONDIÇÕES CLIMÁTICAS MAIS SEVERAS

Hoje é consenso que se vive um momento de mudança climática. Por consequência desse evento, poderão ocorrer em diversos locais cada vez mais e com mais intensidade eventos climáticos extremos, como tempestades, Figura 6-1. Assim, as estruturas vigentes deverão sofrer com novas e solicitações mais energéticas e as correntes poderão carrear mais sedimentos pelo aumento da dinâmica das águas.

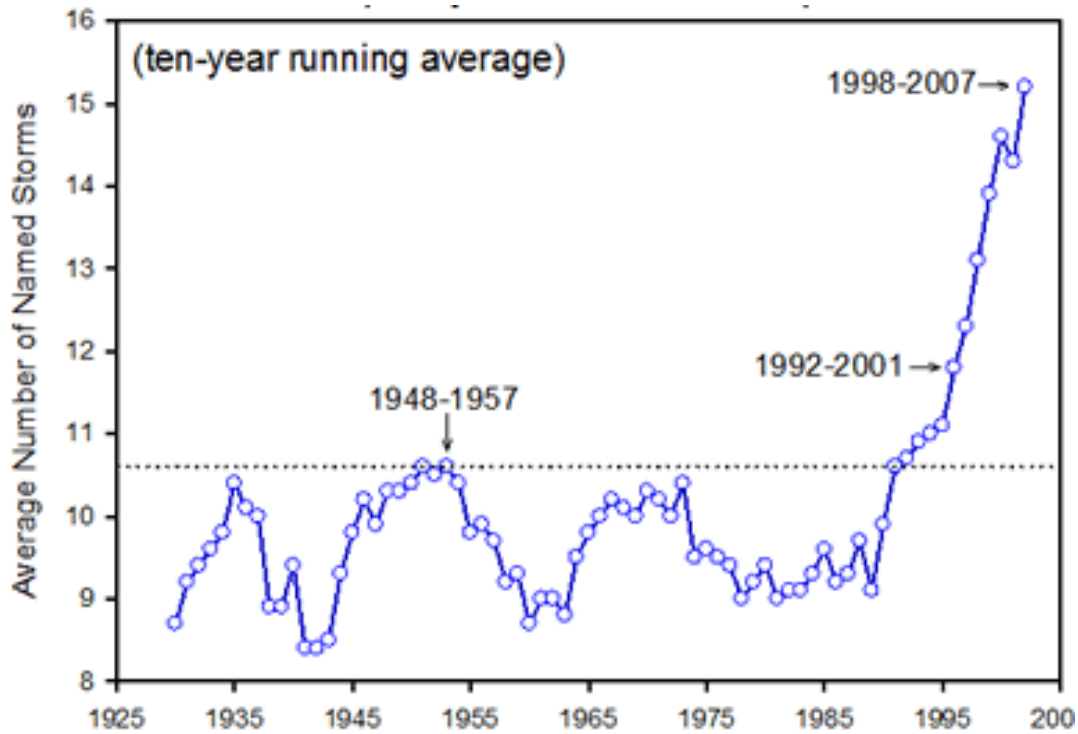


Figura 6-1 Frequência Anual de Tempestades Tropicais do Atlântico Norte (Fonte: [S17])

A comunidade científica também considera que pela alteração climática há uma aceleração no aumento do nível médio da superfície das águas dos oceanos, Figura 6-2. As estruturas portuárias não foram projetadas para esse aumento e essa nova situação pode causar problemas. É necessária a reavaliação dessas estruturas para garantir o bom funcionamento dos portos mesmo com essa nova condição.

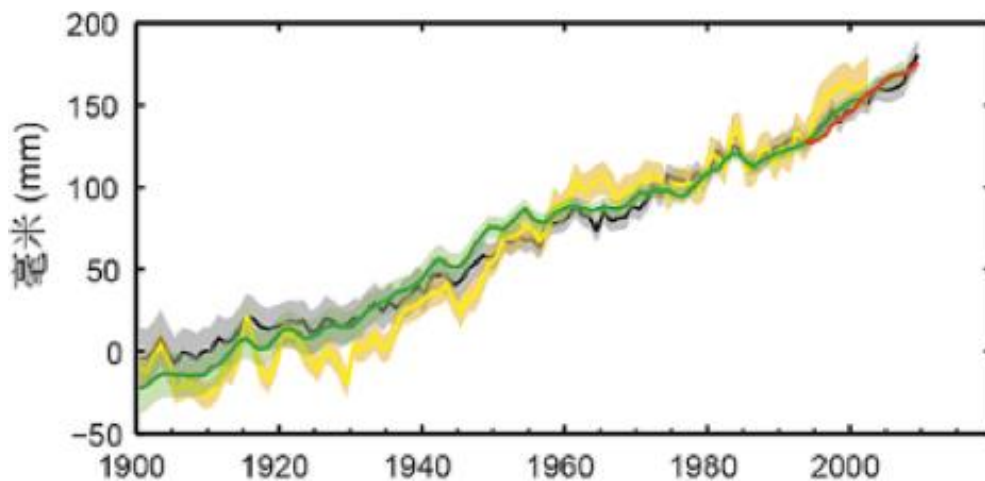


Figura 6-2 Aumento da altura média da linha d'água dos oceanos (Fonte: [S18])

Com a evolução dos métodos numéricos e pesquisas no campo de materiais e estruturas, novos conhecimentos foram agregados à engenharia portuária, na tentativa de atender as novas demandas que não foram atendidas com o conhecimento atual. A título de garantir que a aplicação desses novos conhecimentos não cause problemas, deve-se passar pelo escrutínio da experimentação toda nova tecnologia.

Com o aumento da dimensão e especialização dos navios e com o aumento do número de dias de portos abertos mesmo com condições adversas, as normas de segurança tornaram-se mais restritivas para garantir que não ocorressem acidentes. Assim, a requisição de experimentação se tornou também uma medida de segurança.

6.3. TIPO DE EXPERIMENTAÇÃO

A experimentação de soluções de engenharia busca trazer para o projetista e executor de serviços e obras portuárias o mais fidedigno dos comportamentos dos materiais e solicitações do ambiente. Ocorre, porém, que não necessariamente há um único caminho, tendo duas correntes de modelagem: experimental e numérica.

6.3.1. MODELAGEM FÍSICA

Mais antiga, e cara, a experimentação em laboratório tem como objetivo simular as interações e fenômenos mais relevantes relacionados com a estrutura ou intervenção a analisar. É basicamente a construção de um modelo físico, em escala da geométrica adequada, com os materiais que serão utilizados, e colocada sob as mesmas condições de fronteira, respeitando as leis de escala dos fenômenos físicos.

Para ter valor científico a experimentação depende da instrumentação do modelo para colher os dados, necessita de repetição de ensaios para ter coerência estatística e deve utilizar o material e as escalas apropriadas para não ocorrerem problemas de inconsistência de resultados e defeitos de escala e de modelo. Também, os equipamentos utilizados para aquisição de dados devem adequadamente calibrados. Pela dificuldade de montagem, necessidade de repetições e tratamento de dados a modelagem experimental poderá ser cara.

A modelagem de estruturas em meio aquático é dividida em modelos rígidos e modelos elásticos. Os modelos rígidos, por trabalhar com a mecânica corpos rígidos, devem ter as características físicas e do corpo análogas à estrutura estudada e os modelos elásticos, por trabalhar com a mecânica de corpos deformáveis, devem manter as características mecânicas de deformação e resiliência da estrutura estudada.

6.3.1.1. Leis gerais da modelagem experimental

Para que uma modelo experimental tenha represente a estrutura estudada e, portanto, validade científica, é necessário que respeite as leis gerais da modelagem experimental. São elas a similaridade geométrica, cinética, dinâmica, proporção de escala, e hidroelasticidade.

Similaridade geométrica é aquela aonde o corpo real e modelo tem a mesma escala em suas proporções. Basicamente o modelo tem o mesmo formato que o corpo real, apenas com dimensões proporcionalmente menores.

Similaridade cinética impõe que a razão entre velocidade no modelo seja a mesma que no corpo real. Como consequência o fluxo incidente no modelo gerará o mesmo movimento que ocorre no corpo real.

Similaridade dinâmica implica que todas as forças incidentes na estrutura real venham a incidir no modelo e que se respeitem as escalas apropriadas.

A proporção de escala é a garantia de que a razão dos índices adimensionais relevantes entre o modelo e estudo de caso sejam iguais entre si, Tabela 6-1.

Tabela 6-1 Relação de número adimensionais (Fonte: [43], Adaptado)

Símbolo	Número adimensional	Razão entre forças
Re	Número de Reynolds	Inércia/Viscosidade
F_N	Número de Froude	Inércia/Gravidade
M_n	Número de Mach	Inércia/Elasticidade
W_n	Número de Weber	Inércia/Tensão Superficial
St	Número de Strouhall	
KC	Número de Keulegan-Carpenter	Arraste/Inércia

Hidroelasticidade é o respeito da razão da capacidade de deformação do modelo físico e estrutura e força incidente no modelo e força incidente na estrutura. Obriga, então, que o material do modelo físico tenha o seu módulo de elasticidade igual ao material utilizado na estrutura estudada.

6.3.2. MODELAGEM NUMÉRICA

A modelagem numérica é a tentativa de métodos computacionais simularem as condições ambientais e de comportamento de estruturas a partir da utilização de modelos numéricos.

Com a evolução da computação e com as pesquisas na área, hoje em dia existem diversos tipos de modelos numéricos que conseguem representar grande parte das estruturas estudadas. É o método mais económico, mas, em contrapartida, não tem a ampla aplicação que a modelagem experimental pois os resultados apenas têm aderência com a realidade se aplicados para as condições específicas que os modelos foram criados.

A modelagem numérica parte de equações para expressar a realidade. Em função disso, há a necessidade de apresentar quais foram as premissas adotadas pelo modelo. Em software comercial não há apresentação das equações que fundamentam o modelo, mas, em contrapartida, os relatórios de resultados são apresentados referenciando o software.

Também, a modelagem numérica é tão boa quanto a densidade e adequação da malha de nós que discretizam a realidade contínua. Quanto maior o número de nós, maior será a precisão dos resultados. Caso a estrutura tenha sido mal interpretada e a malha mal implementada ou as condições de contorno (fronteira) mal implementadas, os resultados poderão não ser credíveis.

6.3.3. COMPARATIVO ENTRE MODELAGEM NUMÉRICA E EXPERIMENTAL

Qualquer modelagem tem como única intenção simular a realidade. Os resultados alcançados num modelo experimental deveriam ser semelhantes aos resultados a obter do modelo numérico “equivalente”.

Pelas suas diferentes características, para o estudo de problemas muito complexos não será dispensar o modelo experimental em detrimento ao modelo numérico. Em contrapartida, para situações e estruturas rotineiras, aonde os modelos numéricos já tenham alcançado uma maturidade tal que os resultados apresentados tenham adequação com a realidade, não há necessidade de construção de modelos experimentais.

A Tabela 6-2 compara os pontos relevantes de um ensaio com modelos numéricos e experimentais.

Tabela 6-2 Comparação entre modelo físico e numérico (Fonte: [43], Adaptado)

Qualidades	Modelo Físico	Modelo Numérico
Representatividade	Muito boa	Limitada pela teorias vigentes e poder computacional
Precisão	Boa	Boa, dentro dos limites de validade
Efeitos de Escala	Sim	Não
Confiabilidade	Muito boa	Risco de erro humano
Credibilidade	Muito boa	Demanda tempo para ter credibilidade
Flexibilidade	Não é boa	Boa
Execução	Demorada	Rápida em programas padrão
Custo	Alto	Desenvolvimento tem alto custo

7

CASOS DE ESTUDO

7.1. INTRODUÇÃO

Na busca de exemplificar os assuntos discutidos no presente trabalho, reuniu-se um trabalho de modelagem numérica que fundamentou a construção de um quebramar e modelagem física para rebaixo do fundo náutico.

São objeto de estudo a expansão do quebramar do Porto de Salvador, Brasil e condições de manobrabilidade no Porto de Zeebrugge, Bélgica.

7.2. EXPANSÃO DO QUEBRAMAR DO PORTO DE SALVADOR, BRASIL

O Porto de Salvador, em função da sua posição privilegiada, tem sua operação crescendo, mesmo com a economia brasileira em retração, e vem batendo recordes de movimentação de cargas. Mesmo o PIB brasileiro encolhido em 2014, nesse ano o Porto teve um movimento, a época recorde, de 4,3 milhões de toneladas de carga. Em 2016 ocorre a mesma situação e o porto mais uma vez bate recorde de movimentação de carga, com 4,5 milhões de toneladas, num ano que mais uma vez o PIB brasileiro diminui. Se comparamos o valor do PIB de 2014 com o valor de 2016, há uma retração de 26,55%, mas o movimento de cargas no Porto de Salvador cresceu 4,65%.

A autoridade portuária decidiu, para atender a demanda, a expansão do terminal de containers, Figura 7-1.



Figura 7-1 Projeção da expansão do cais de containers do Porto de Salvador (Fonte: [S19])

Essa expansão, porém, necessita que seja estendido o quebramar para proteger o novo cais, Figura 7-2. A partir do estímulo econômico e da configuração do porto, então, que fundamentam a extensão do quebramar atual.

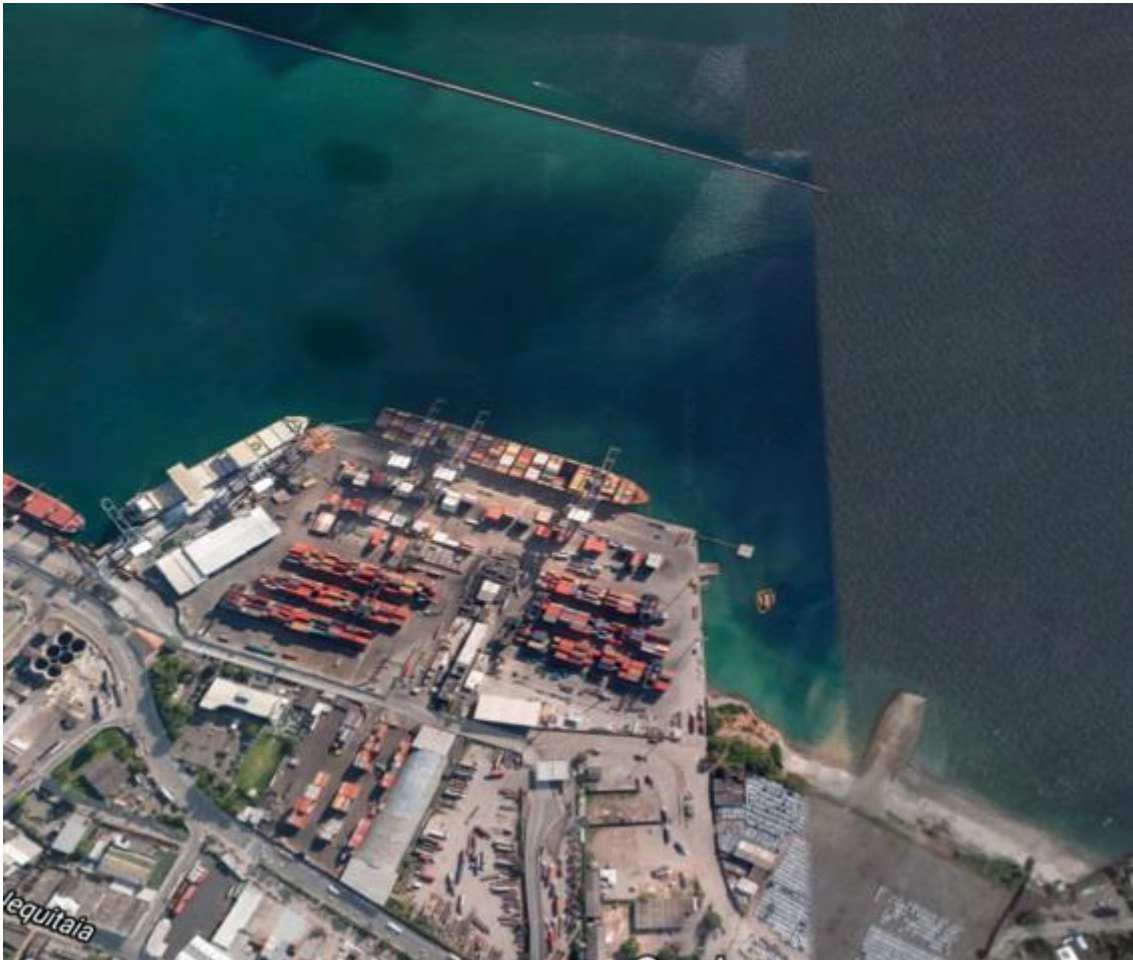


Figura 7-2 Foto de satélite do cais de containers de Salvador (Fonte: Google maps)

O processo de análise da extensão do quebramar passa, primeiro, pela análise atual do quebramar e levantamento e teste de diferentes arranjos da expansão do quebramar.

7.2.1. ANÁLISE DO QUEBRAMAR ATUAL

Para a análise do quebramar atual, o TPN utilizou dados do ano de 2010 para a modelagem. Assim, foram selecionados os registros de vento no banco de dados do aeroporto de Salvador e de maré da estação maregráfica presente no Porto de Salvador. Como as ondas são basicamente geradas pela ação do vento, com alguma influência da maré, o TPN implementou esses dados brutos dentro de um modelo numérico, WaveWatch III, para determinar as ondas incidentes no quebramar.

Com os dados das ondas incidentes, o TPN utilizou os dados das cartas náuticas da região para determinar a batimetria da região e gerou um modelo batimétrico de todo o leito marinho e suas possíveis flutuações no tempo, a partir do sistema de modelos numéricos Delft3D, Delft3D-WAVE.

Por fim, discretizaram 7 pontos ao redor do quebramar para obter os resultados da modelagem numérica, além do campo espacial com altura de onda significativa e direção do instante mais crítico, maior altura significativa incidindo no quebramar. A partir dos resultados obtidos, são feitas as considerações finais.

7.2.1.1. Vento

A partir da base de dados METAR (METeorological Aerodrome Report - Informe meteorológico regular de aeródromo) da estação meteorológica do Aeroporto de Salvador geraram o diagrama *stick plot* do ano de 2010 de Salvador, tendo como referência de direção e sentido o norte geográfico e a intensidade de 5 m/s para os vetores.

Com os mesmos dados, foi possível tabular a incidência conjunta intensidade direção de vento, medidos por hora, em pontos subcolaterais, utilizando a convenção meteorológica. Também foram apresentados valores máximos, médios por direção e direção média por faixa de velocidade, Tabela 7-1.

Tabela 7-1 Diagrama de ocorrência conjunta de intensidade (m/s) e direção (o) do vento METAR para o período de 1º de janeiro a 31 de janeiro de 2010, intervalo de amostragem horária (Fonte: [47], Adaptado)

VELOC. (M/S)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	TOT,	%	DIREÇÃO MÉDIA
0,0 - 1,0	8	4	0	2	1	0	3	2	3	1	0	2	1	5	4	5	41	0,5	343
1,0 - 2,0	149	100	49	49	39	21	30	31	26	23	8	13	83	89	69	66	845	9,7	354
2,0 - 3,0	60	74	65	74	139	132	158	100	75	30	21	20	31	24	12	7	1022	11,7	110
3,0 - 4,0	21	35	63	124	293	311	254	192	139	45	11	8	7	5	0	3	1511	17,4	19
4,0 - 5,0	9	7	40	146	508	378	284	239	161	42	14	4	0	0	0	1	1833	21,1	119
5,0 - 6,0	2	5	16	137	497	355	250	195	160	44	24	5	1	0	0	1	1692	19,4	119
6,0 - 7,0	0	1	12	119	314	153	92	130	115	32	11	1	0	0	0	0	980	11,3	117
7,0 - 8,0	0	0	5	65	176	56	30	79	84	10	7	1	0	0	0	0	513	5,9	118
8,0 - 9,0	1	0	0	37	70	7	5	30	41	4	2	0	0	0	0	0	197	2,3	117
9,0 - 10,0	0	0	0	6	14	1	2	13	16	1	0	0	0	0	0	0	53	0,6	136
10,0 - 11,0	0	0	0	3	0	0	1	6	3	0	0	0	0	0	0	0	13	0,1	141
11,0 - 12,0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0,0	125
TOTAL	250	226	250	762	###	###	###	###	823	232	98	54	123	123	85	83	8702		
%	2,9	2,6	2,9	8,8	23,6	16,2	12,7	11,7	9,5	2,7	1,1	0,6	1,4	1,4	1,0	1,0			
VELOC. MÉDIA	1,8	2,1	3,2	4,8	5	4,5	4,3	4,8	5	4,2	4,4	2,7	1,6	1,5	1,4	1,4			
VELOC. MÁX	8,2	6,2	7,7	10,3	11,3	9,8	10,3	10,8	11,3	9,3	8,2	7,2	5,1	3,6	2,6	5,1			

7.2.1.2. Maré astronômica

A partir dos dados da estação maregráfica no Porto de Salvador – BA, apresentaram-se os dos níveis de referência e das amplitudes (cm) e fases (°) das principais componentes harmônicas que caracterizam a elevação na região.

Fizeram a caracterização da maré astronômica para uma determinada região por meio da análise das suas componentes harmônicas, através das quais a maré se divide na soma de ondas com diferentes frequências, fases e amplitudes.

7.2.1.3. Ondas

A partir dos dados de vento e de maré, utilizaram-se do modelo numérico WaveWatch III desenvolvido pela NOAA/NCEP, que resolve a equação do balanço de densidade espectral. Foram utilizadas velocidade de ventos a 10 m de altura, utilizando a base de dados da reanálise

atmosférica global NCEP/NCAR. Como resultado, foram obtidos os parâmetros costumeiros na caracterização dos padrões de propagação de ondas: altura significativa, período de pico e direção.

A partir desses parâmetros obtidos, foi possível tabular a ocorrência conjunta de altura significativa (m) e direção (°) da onda, para o ano de 2010. A direção segue a convenção meteorológica, aonde o marco zero é o norte geográfico. Também foram apresentados valores de altura máximas e médias por direção e direção média por faixa de altura significativa. Na Tabela 7-2.

Tabela 7-2 Ocorrência conjunta de altura significativa (m) e direção (°) da onda, para o período de 01o de janeiro a 31 de dezembro de 2010. A direção é medida em graus a partir do Norte geográfico e segue a convenção meteorológica. (Fonte: [47])

ALTURA, (CM)	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	TOT.	%	DIREÇÃO MÉDIA
0,0-20,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0
20,0-40,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0
40,0-60,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0
60,0-80,0	0	0	0	0	0	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0,4	117
80,0-100,0	0	0	0	0	42	62	11	0	0	0	0	0	0	0	0	115	7,9	107
100,0-120,0	0	0	0	0	61	165	14	0	0	0	0	0	0	0	0	240	16,4	107
120,0-140,0	0	0	0	0	75	153	22	0	0	0	0	0	0	0	0	250	17,1	107
140,0-160,0	0	0	0	0	162	107	19	0	0	0	0	0	0	0	0	288	19,7	105
160,0-180,0	0	0	0	0	53	127	31	4	0	0	0	0	0	0	0	215	14,7	110
180,0-200,0	0	0	0	0	36	90	20	5	0	0	0	0	0	0	0	151	10,3	112
200,0-220,0	0	0	0	0	17	42	5	1	0	0	0	0	0	0	0	65	4,5	109
220,0-240,0	0	0	0	0	2	57	0	3	0	0	0	0	0	0	0	62	4,2	108
240,0-260,0	0	0	0	0	3	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	2,3	105
260,0-280,0	0	0	0	0	5	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	1,1	104
280,0-300,0	0	0	0	0	2	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16	1,1	103
300,0-320,0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0,2	103
TOTAL	0	0	0	0	458	866	123	13	0	0	0	0	0	0	0	1460		
%	0,0	0,0	0,0	0,0	31,4	59,3	8,4	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
ALTURA MÉDIA	0	0	0	0	147,6	156,2	148,9	194	0	0	0	0	0	0	0			
ALTURA MÁXIMA	0	0	0	0	285,5	313	217	228,2	0	0	0	0	0	0	0			

A partir desses parâmetros obtidos, tabularam a ocorrência conjunta de período significativo (s) e direção (°) da onda, para o ano de 2010. A direção segue a convenção meteorológica, aonde o marco zero é o norte geográfico. Também foram apresentados valores de períodos máximos e médios por direção e direção média por faixa de período significativo.

7.2.1.4. Modelagem Numérica

Para a modelagem dos efeitos do quebramar, utilizaram o módulo Delft3D-WAVE do sistema de modelos numéricos Delft3D. Esse sistema de modelos calcula os efeitos na propagação e refração das ondas devido a profundidade e os processos de geração de ondas pelo vento, a partir da equação de balanço da ação espectral discreta, sendo totalmente espectral ou que conjunto de ondas com direções, de origens locais ou remotas podem propagar simultaneamente.

Para ter fidelidade às interações, necessitaram da modelagem da influência das ondas na batimetria da região, a partir de modelos numéricos. Foram feitas duas malhas de grades numéricas, Grade 1 e Grade 2. A Grade 1, utilizada na modelagem da baía de todos os santos, tem dimensão horizontal de 57 x 71 e espaçamento de 875 metros, Figura 7-3, e a Grade 2, utilizada apenas na região próxima do Porto, tem dimensão horizontal de 177 x 141 e espaçamento de 86

metros. Foram utilizadas as Cartas Náuticas n. 1.100, .101, 1.102, 1.103, 1.104, 1.105, 1.106, 1.107, e 1.110 do DHN como estágio inicial.

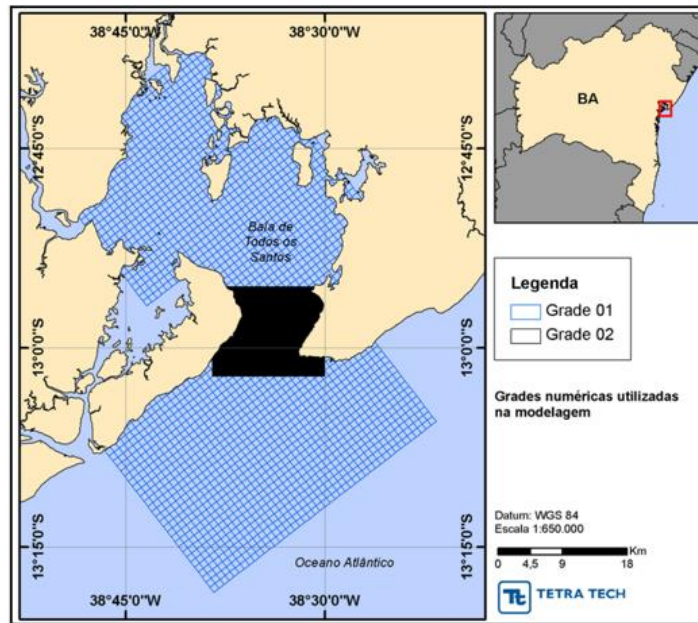


Figura 7-3 Grades numéricas utilizadas na modelagem (Fonte: [47])

A utilização de malhas distintas é relacionada pela necessidade de precisão. Locais que tenham pouca relação com o quebramar tem malhas mais espalhadas, mas locais aonde os efeitos do quebramar sobre as ondas são preponderantes precisa de um resultado mais refinado, por isso a utilização de malhas com espaço menor.

A Figura 7-4 representa o resulta da modelagem da batimetria.

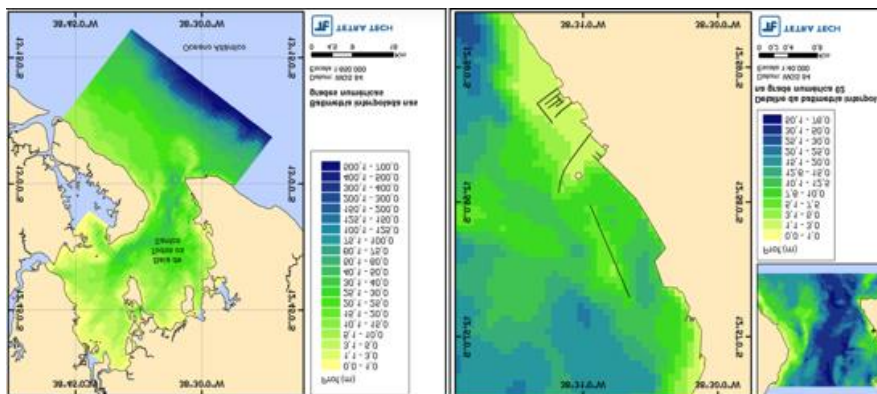


Figura 7-4 Batimetria associada a grade numérica. (Fonte: [47])

Com a finalização da modelagem da batimetria no tempo, reuniram-se as condições de contorno, vento, marés, altura significativa de onda, período significativo de onda, para utilizarmos modelagem numérica para ver os efeitos do quebramar.

Para analisarem o comportamento da interação das ondas e quebramar, foram discretizados setes pontos, conforme Figura 7-5. A distribuição destes pontos foi a seguinte: um ponto na entrada do

porto, local abrangido pela a extensão do quebra mar, P1; quatro pontos ao longo do quebramar, P2, P3, P4 e P6; um ponto no anteporto, P6 e um ponto dentro da bacia de evolução do porto, P7.

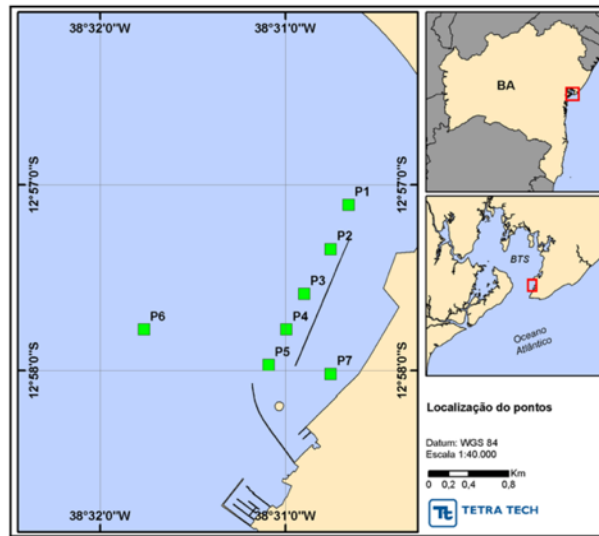


Figura 7-5 Localização dos pontos seleccionados para realização da análise dos resultados do modelo de ondas (Fonte: [47])

7.2.1.5. Resultados e conclusões

Como resultado obtiveram o campo espacial para o momento de maior altura significativa na região do anteporto, pior caso para o quebramar, Figura 7-6. No campo espacial pode-se ver os parâmetros altura significativa e o vetor direção das ondas na região lindeira ao quebramar. portuárias o mais fidedigno dos comportamentos dos materiais e solicitações do ambiente.

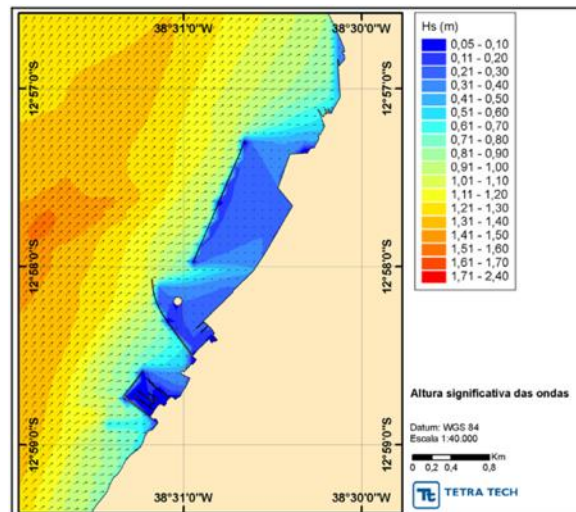


Figura 7-6 Instantâneo do resultado do modelo Delft3D para a região do Porto de Salvador. A altura significativa é representada pela escala de cores e as setas representam a direção de propagação da onda. (Fonte: [47])

O padrão de agitação das águas na região dos berços de atracação (P7), a classe de altura significativa mais frequentes foi 0 a 20 cm (80,9%), e a maior altura foi de 49,9 cm proveniente de W. Comparando com o (P1) localizado na cabeça do quebramar e que após a extensão já estará

abrigado, a classe de altura significativa mais frequentes 10 a 30 cm (64,9%), o que já geraria problemas caso um navio estivesse com velocidade de atracação e a maior altura foi de 98,5 cm proveniente de WSW, jogaria o navio contra o cais. Fica claro a necessidade da construção do novo quebramar.

Na região do anteporto (P6), que não tem influência do quebramar, teve valores mais intensos. A classe de altura significativa mais frequente foi 30 a 60 cm (58,7%), e a maior altura foi de 151,7 cm proveniente de SW.

7.2.2. EXTENSÃO DO QUEBRAMAR

Fica claro com a análise do resultado da modelagem das condições atuais que para que haja segurança na operação do berço do novo cais é necessária a extensão do quebramar. A questão que se levanta agora é qual deverá ser tanto a dimensão quanto a disposição da extensão do quebramar. Isso, pois, há necessidade de garantir tanto o acesso ao porto quanto a portagem das embarcações com segurança. Para que o acesso e a portagem sejam seguros, devem ser analisadas a capacidade de os navios manobrem sem que entrem em risco.

Portanto a modelagem numérica deve responder as seguintes perguntas: “a extensão do quebramar e sua geometria protegem o canal de acesso e novo cais?” e “para qual navio tipo é possível executar as manobras de acesso e portagem com segurança?”.

7.2.2.1. Condições de contorno

Já foi definido, na análise da atual estrutura, a altura significativa de onda utilizando os dados de 2010. Isso, porém, não traz segurança que as ondas analisadas terão recorrência maior que um ano. Necessitaram buscar em outras bibliografias para determinar a altura significativa para um horizonte de 100 anos. A Tabela 7-3. apresenta-se altura significativas x período de retorno por diferentes estudos.

Tabela 7-3 A Alturas significativas (m) na área externa à Baía de Todos os Santos (Fonte: [49])

Referência	Período de Retorno (Anos)			
	10	45	50	100
INPH (2011)	6,4		7,4	8
Piccinini (2006)	4,5		4,8	5
ECMWF (2003)		3,7		

O INPH, nesse mesmo estudo de 2011, fez uma carta de isoalturas de onda significativas na região do porto de Salvador, Figura 7-7. Nota-se que a altura significativa de onda é 2,0 metros, maior do que o valor resultante da modelagem dos dados de 2010.



Figura 7-7 Valores de Alturas Significativas críticos obtidos pelo INPH - Análise representativa de um período de retorno de 100 anos (Fonte: [49])

7.2.2.2. Modelo numérico

Para analisar a interação da água com o quebramar, é preciso de um método que seja apropriado para relacionar um problema de hidrodinâmica relacionando fluidos incompressíveis e estruturas sólidas fixas.

Escolheram como modelo numérico o método de Rankine. Sua metodologia necessita a montagem de uma malha separando a superfície do quebramar da superfície do mar lindeira, em grade quadrilátera plana, com características impermeáveis. Desta forma a onda é totalmente difratada, por impossibilidade de penetração no corpo do quebramar, gerando na região de sombra uma propagação da energia cinética radial e progressiva.

Uma malha computacional que aplicaram para análise de navegação na região de sombra de um quebramar, modelado o casco do navio, o quebramar e a superfície do mar. Figura 7-8

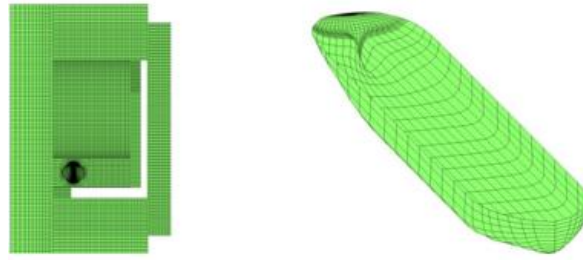


Figura 7-8 Malha da superfície livre e quebramar (esquerda) e malha do navio (direita) para método de Rankine (Fonte: [49])

Utilizaram o método de Rankine para modelar onda com incidência a 90° em um quebramar, percebe-se a difração da onda na região abrigada, Figura 7-9.

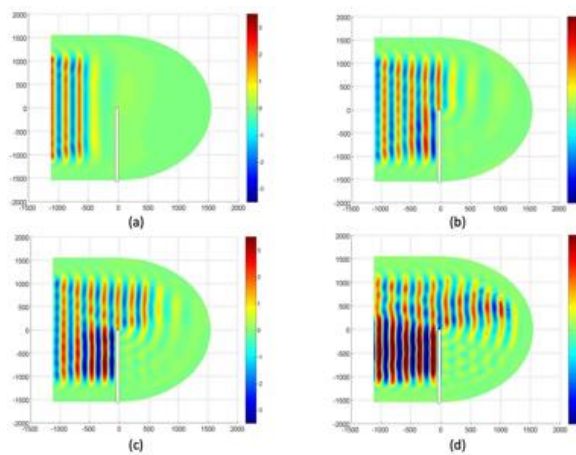


Figura 7-9 Progressão do efeito de difração no modelo de Rankine (Fonte: [49])

7.2.2.3. Possíveis arranjos

Foram considerados 7 arranjos (*ou lay-outs*), divididos em dois grupos: extensão de 405 metros e extensão de 305 metros. O primeiro grupo tem a extensão a 10° , 20° , 30° e 45° do quebramar atual e o segundo grupo tem a extensão a 10° , 20° , 30° e 45° do quebramar atual, Figura 7-10.

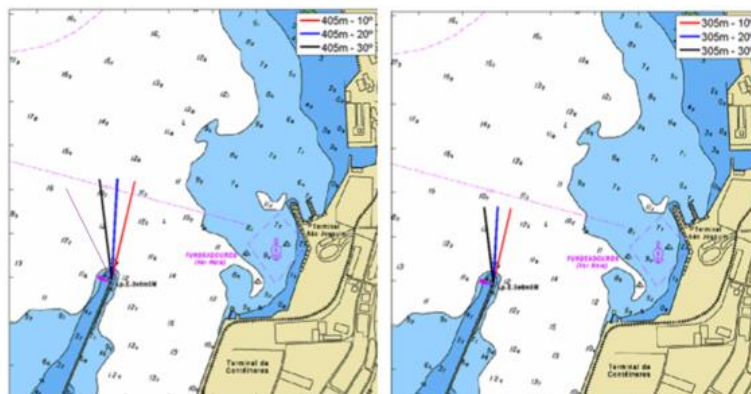


Figura 7-10 Arranjos analisados (Fonte: [49])

Foram gerados 8 modelos, correspondentes a 7 arranjos mais a situação atual, como parâmetro de controle. Para simplificação do estudo, a partir de agora cada modelo será simplificado

referenciado por:

- **Sem Extensão:** Refere-se ao quebramar já existente no Porto de Salvador
- **Ext. Original:** Refere-se ao quebramar com a extensão de 405 m e 10° de inclinação.
- **Ext. Original Reduzida:** Refere-se ao quebramar com extensão de 305 m e 10° de inclinação.
- **Ext 2:** Refere-se ao quebramar com extensão de 405 m e 20° de inclinação.
- **Ext 2 Reduzida:** Refere-se ao quebramar com extensão de 305 m e 20° de inclinação.
- **Ext 3:** Refere-se ao quebramar com extensão de 405 m e 30° de inclinação.
- **Ext 3 Reduzida:** Refere-se ao quebramar com extensão de 305 m e 30° de inclinação.
- **8. Ext 4:** Refere-se ao quebramar com extensão de 405 m e 45° de inclinação.

Valendo a ressalva que essas malhas foram rotacionadas a título de alinhamento da frente de ondas geradas com um dos eixos do sistema de coordenadas adotado pelo modelo numérico. É possível perceber isso na Figura 7-11.

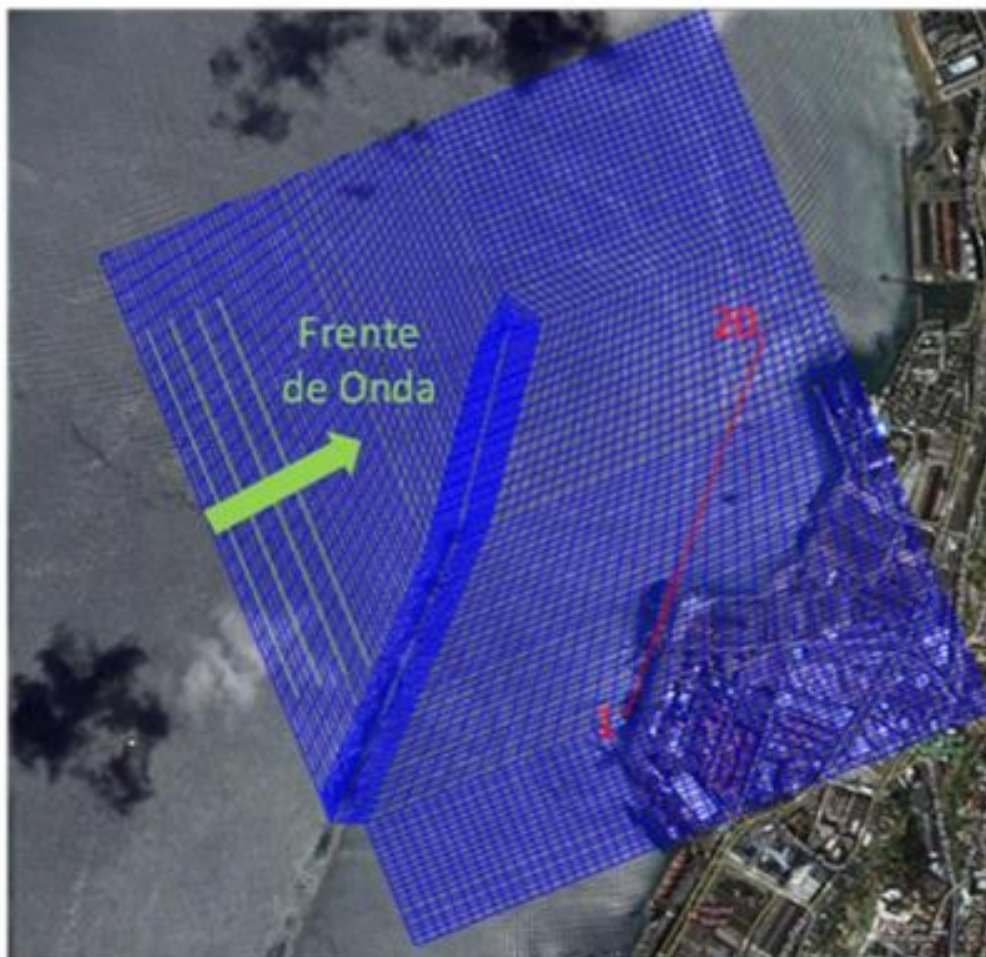


Figura 7-11 Recorte da malha numérica utilizada nas simulações com a Ext. Original apresentando a linha de medição de altura significativa para comparação de resultados. Em vermelho a linha dos pontos discretizados (Fonte: [49])

Foram consideradas ondas de altura significativa de 2 metros, variando o período de pico em 8s, Figura 7-12, 10s, Figura 7-13 e 12s, Figura 7-14.

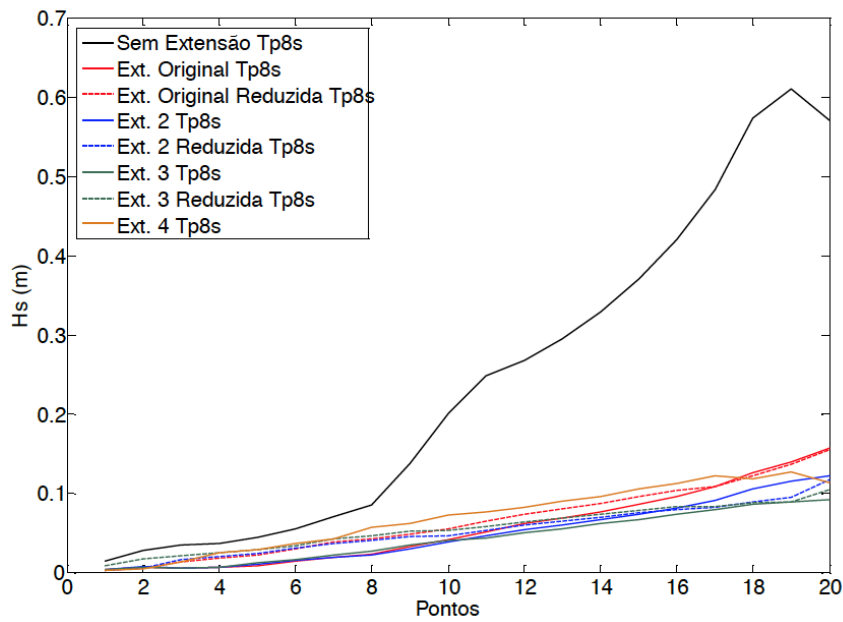


Figura 7-12 Altura significativa para a simulação com período de pico de $T_p=8s$ e altura significativa na região externa ao quebramar de $H_s=2m$. (Fonte: [49])

Com o período de 8 segundos, todos os resultados de arranjos foram semelhantes e o quebramar mais efetivo foi o Ext. 3, tendo o menor valor de altura significativa de onda no futuro cais. Também, a altura significativa do modelo de controle é aproximadamente 6 vezes maior que o pior dos resultados do arranjo, Ext. Original.

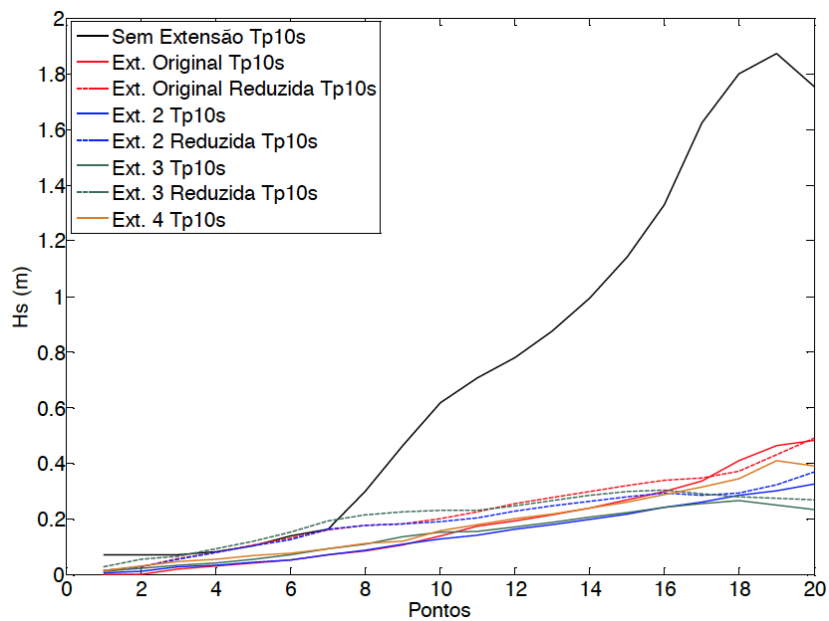


Figura 7-13 Altura significativa para a simulação com período de pico de $T_p=10s$ e altura significativa na região externa ao quebramar de $H_s=2m$. (Fonte: [49])

Com o período de 10 segundos, os resultados de arranjos evidenciam grande variabilidade de resultados. O arranjo mais efetivo foi o Ext. 3. Também, a altura significativa do modelo de controle é aproximadamente 4,5 vezes maior que o pior dos resultados de arranjo, Ext Original.

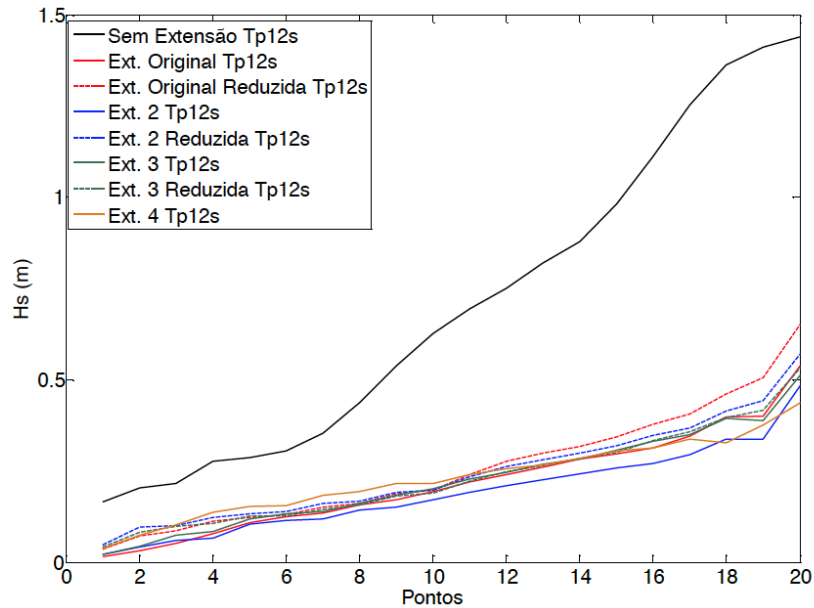


Figura 7-14 Altura significativa para a simulação com período de pico de $T_p=12s$ e altura significativa na região externa ao quebramar de $H_s=2m$. (Fonte: [49])

Com o período de 12 segundos, os resultados de arranjos têm grande variabilidade. O arranjo mais efetivo foi o Ext. 4. Também, a altura significativa do modelo de controle é aproximadamente 3 vezes maior que o pior dos resultados de arranjo, Ext. Original Reduzida.

A título de comparação, foi produzido o mapa de altura significativa em todos os pontos da malha numérica o arranjo Ext. 4 no caso que teve resultado menos efetivo, Altura significativa de onda de 2 m e período de pico de 10 segundos, e comparou-se com o arranjo de controle, Figura 7-15 e Figura 7-16. A linha vermelha representa o local do novo cais.

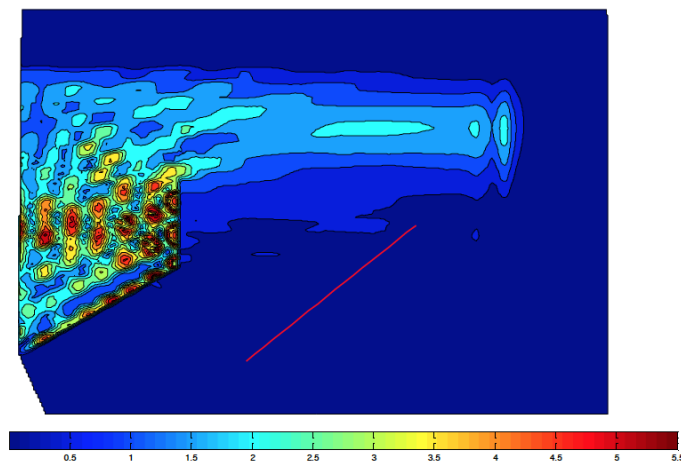


Figura 7-15 Mapa de altura significativa em todos os pontos da malha numérica para o caso Ext4 $T_p=10s$ (Fonte: [49])

É notório que a implantação da extensão de 405 metros e inclinação a 45° do original tanto impede que haja agitação no cais, quanto a minora muito no canal de acesso. Mesmo em seu pior caso, esse arranjo garante a segurança operacional do Porto.

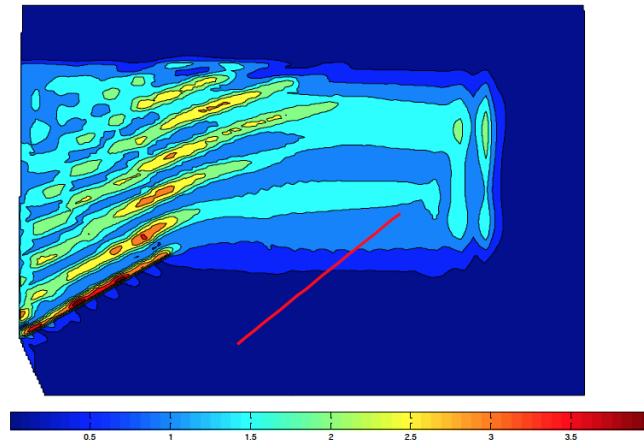


Figura 7-16 Mapa de altura significativa em todos os pontos da malha numérica para o caso de controle Tp10s (Fonte: [49])

Caso não seja construído a extensão do quebramar, ocorrerá incidência de ondas com altura significativa relevante e a operação torna-se arriscada. Fica claro que para que haja a expansão do cais é necessária a execução de extensão do quebramar.

7.2.2.4. Movimentos das embarcações tipo

Utilizando como navio tipo o MSC Methoni, um porta-containers de 305 metros de comprimento e 40 metros de boca, totalmente carregado, calado de 10,4 m e posicionando-o na região de atracação ao terminal. Nesta área adotou-se a embarcação estava as posições paralela e perpendicular ao cais, ocorrendo a situação mais perigosa no giro do navio na parte abrigada. As posições reproduziriam incidências próximas a mar de través (máximo roll) e mar de proa (máximo pitch), gerando os movimentos mais extremos para o navio.

Os deslocamentos de cada grau de liberdade do navio foram calculados para todos os arranjos com extensão de 405m, onde foram registrados apenas os valores máximos. No cálculo dos movimentos do navio na área do berço foi adotada a situação que apresentou a maior elevação ao longo da linha de medição mostrada anteriormente, a título de segurança.

Fica claro que sem a extensão do quebramar não há condições de segurança para atracação da embarcação. Também, pode-se afirmar que todos os tipos de extensões propostas propiciarem uma região abrigada ao navio próxima à linha de atracação e a extensão a 45° é a mais segura.

7.2.2.5. Cálculo do diâmetro de giro

Como última verificação, deve-se garantir que haja espaços para o giro da embarcação. É calculado utilizando a premissa um diâmetro total de 2 vezes o comprimento do navio tipo distanciado de 3 vezes a boca do navio, pois está muito próximo ao terminal, que pode ter outros navios portados.

Foram utilizados cenários ou 3 navios tipo:

- **Cenário 1 ou MSC Methon:** LOA= 305 m e B = 40 m. Diâmetro mínimo de 610 m com distância mínima ao cais de atracação de 120 m.
- **Cenário 2 ou Sovereign Maersk:** LOA= 347 m e B = 43 m. Diâmetro mínimo de 694 m com distância mínima ao cais de atracação de 129 m.
- **Cenário 3 ou Emma Maersk:** LOA= 397 m e B = 56,4 m. Diâmetro mínimo de 794 m com distância mínima ao cais de atracação de 170 m.

Foram utilizados o cenário 1 para Ext. 3, Figura 7-17 e Ext. 4, Figura 7-18. Foi feito o cenário 2, Figura 7-19, e cenário3, Figura 7-20, apenas com o Ext.4.

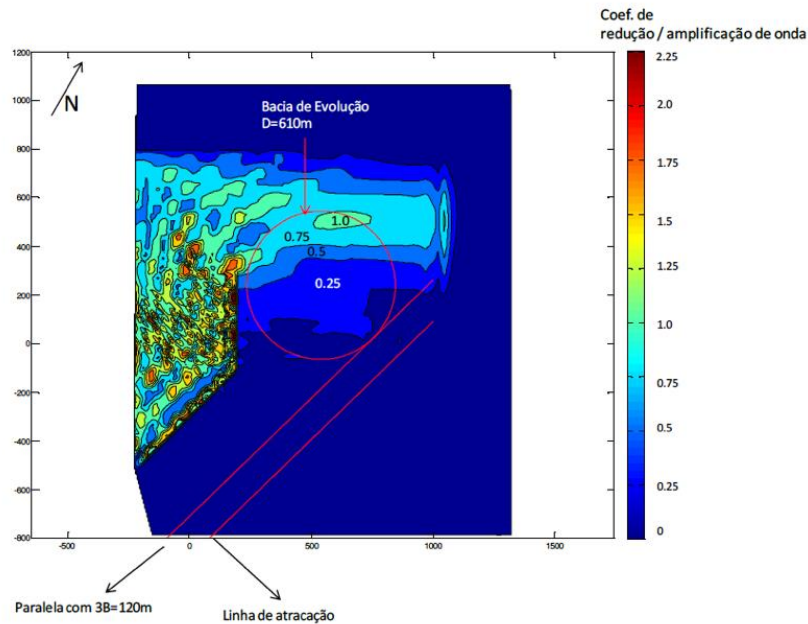


Figura 7-17 Cenário 1 e Ext. 3 (Fonte: [49])

Percebe-se que no cenário 1 e Ext. 3 grande parte da manobra é feita em águas sem deflato de agitação. Já no caso menos crítico esse cenário já é inseguro.

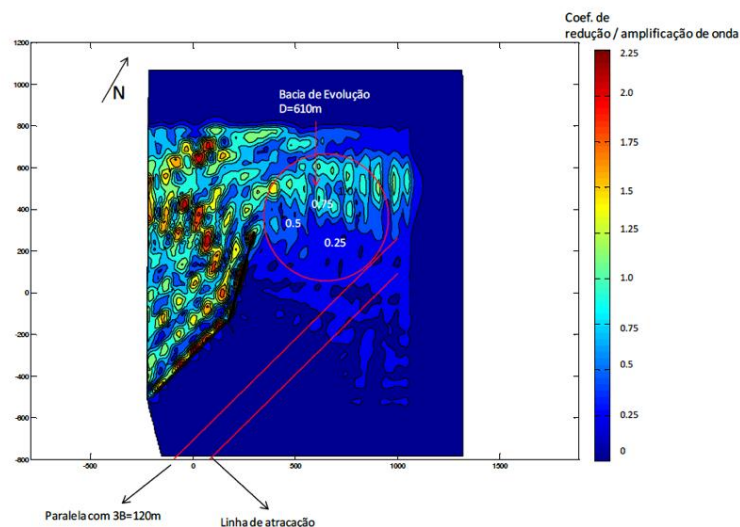


Figura 7-18 Cenário 1 e Ext.4 (Fonte: [49])

Diferente do primeiro arranjo, no cenário 1 e Ext. 4 grande parte da manobra é feita em águas abrigadas e uma pequena parte da manobra é feita em águas sem deflator de agitação.

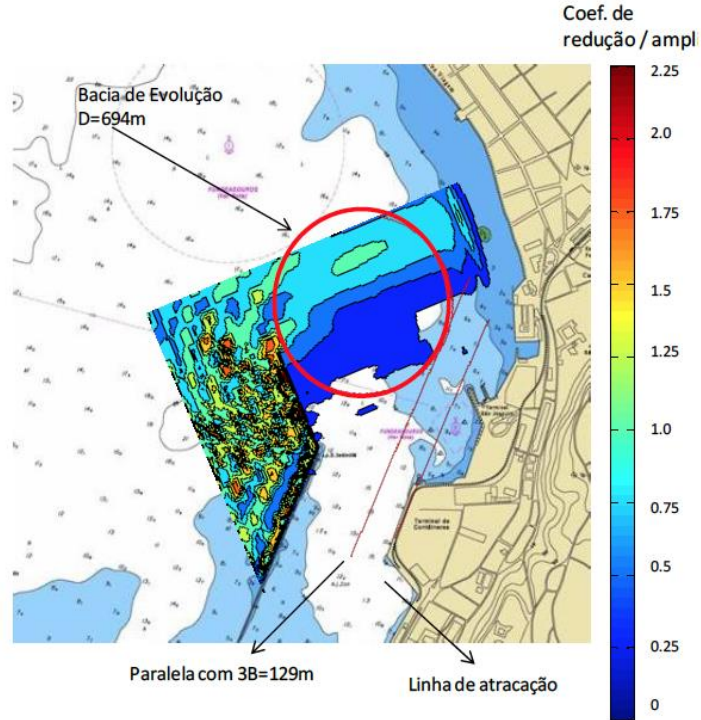


Figura 7-19 Cenário 2 e Ext.4 (Fonte: [49])

Percebe-se que no arranjo Cenário 2 - Ext.4 é possível fazer a manobra, mas pelo menos metade dela será em águas sem deflator de agitação.

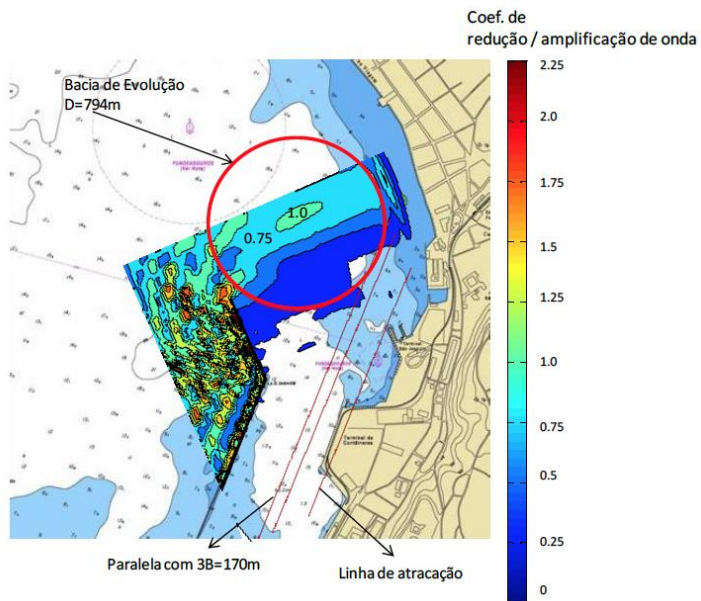


Figura 7-20 Cenário 3 e Ext.4 (Fonte: [49])

Arranjo mais crítico, em Cenário 3 - Ext.4 é possível fazer a manobra, mas pelo menos metade dela será em águas sem deflator de agitação.

7.2.2.6. Condições de manobra

Com os dados da modelagem do quebramar atual, buscou-se analisar se qual a condição de manobrabilidade para acesso ao novo cais. Simulou-se uma manobra, com ajuda de rebocadores, com um navio tipo com características descritas na Tabela 7-4.

Tabela 7-4 Características do navio tipo (Fonte: [46])

Informação	Valor
Deslocamento (ton)	118,4
Calado (m)	13,9
Comprimento total (m)	300
Boca (m)	48
Área morta Lateral (m ²)	7446
Área morta Frontal (m ²)	1419

Foi simulada uma manobra de acesso ao porto sem a assistência de rebocadores. A simulação mostra que sem a presença de rebocadores é impossível o acesso ao porto, o navio se choca contra o quebramar, conforme Figura 7-21, pois, o leme perde totalmente sua eficiência.

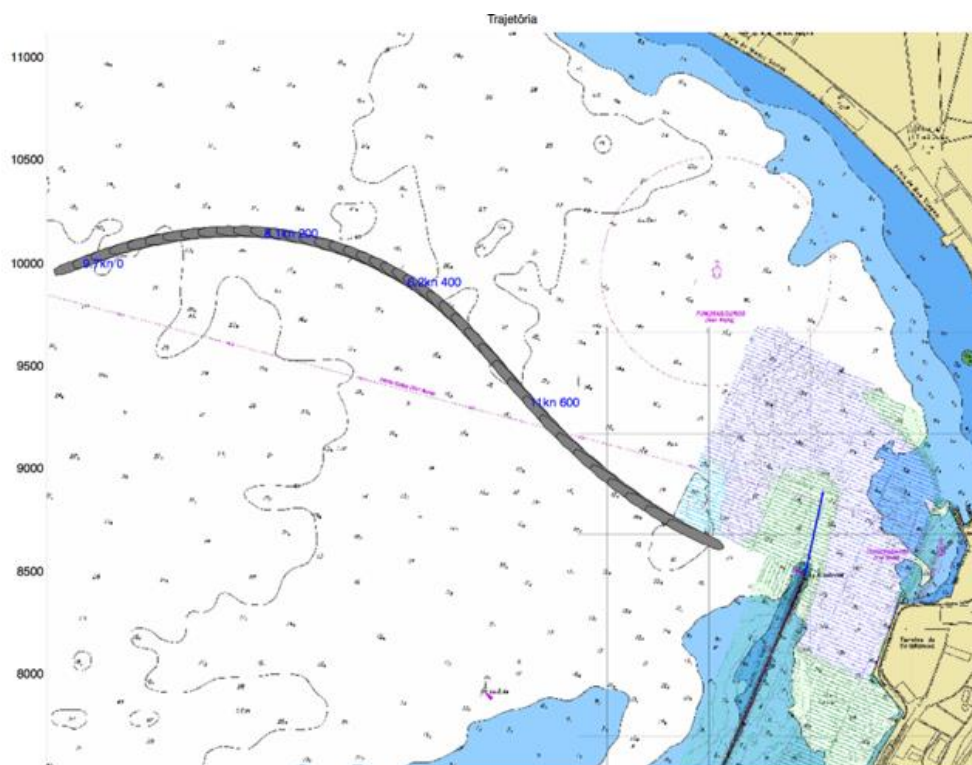


Figura 7-21 Trajetória da manobra (Fonte: [46])

Na simulação da segunda manobra, foram utilizados 2 rebocadores curtos, um com 30 toneladas de potência a proa e um com 40 toneladas de potência a proa, conforme Figura 7-22.

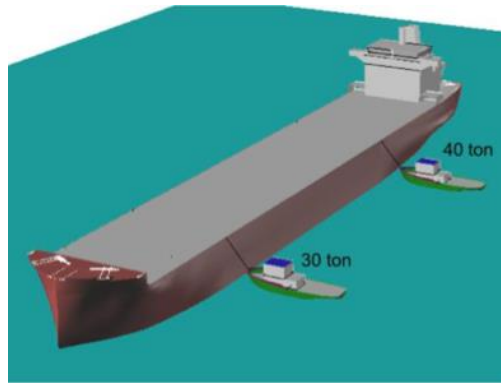


Figura 7-22 Esquema da Manobra (Fonte: [46])

É possível a atracagem do navio no novo cais, conforme Figura 7-23.

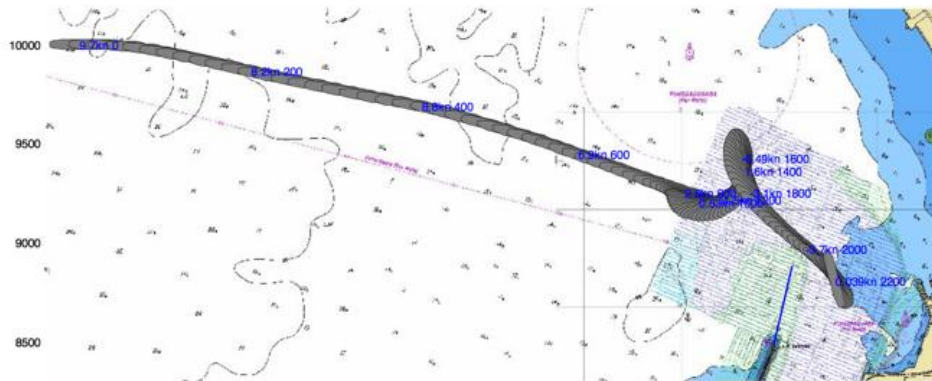


Figura 7-23 Esquema da manobra (Fonte: [46])

7.2.2.7. Conclusões

Após feitas todas as análises dos cenários possíveis, são adequados todos os possíveis ângulos de abertura da expansão do quebramar Norte do Porto de Salvador, desde que com a extensão de 405 m. Atendem tanto ao critério de navegação como de operação na região do futuro cais. Na solução com 45° em relação ao quebramar atual, há área excedente nos cenários 1 e 2.

É obrigatória a utilização de rebocadores para auxiliar o acesso ao porto, mesmo numa região de águas calmas, por conta da interação da corrente com o leito marinho e navio. Caso se pretenda que o acesso ao porto seja feito mesmo sem a necessidade de rebocadores, torna-se necessária uma dragagem do anteporto para garantir condições mínimas de navegação não assistida.

Conclui-se, assim, que mesmo em portos naturais, condição mais favorável, o aumento das dimensões dos navios gera complicações operacionais.

7.3. MANOBRABILIDADE NO PORTO DE ZEEBRUGGE

O Porto de Zeebrugge, único porto belga com acesso direto ao mar, conforme Figura 7-24 e Figura 7-25, tem grande importância económica para importação e exportação europeia. O Porto tem como característica recebimento de automóveis, nos seus terminais Ro-Ro, sendo líder nesse segmento, e de gás natural liquefeito, em seus terminais específicos, sendo responsável pela movimentação de 15% do gás natural europeu.



Figura 7-24 Localização porto de Zeebrugge (Fonte: [S20])



Figura 7-25 Imagem aérea do porto de Zeebrugge (Fonte: [S21])

O porto está localizado em uma região que se caracteriza pela grande influência da maré, chegando a 4 metros de altura, conforme Figura 7-26.

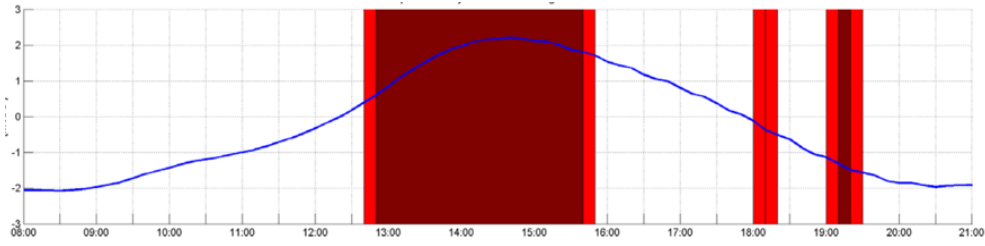


Figura 7-26 Variação do nível do mar na região do porto de Zeebrugge. Em vermelho as janelas de elevada salinidade. (Fonte: [S22])

Trata-se de uma área de elevada turbidez o que gera uma grande concentração de partículas em suspensão na água, conforme Figura 7-27.

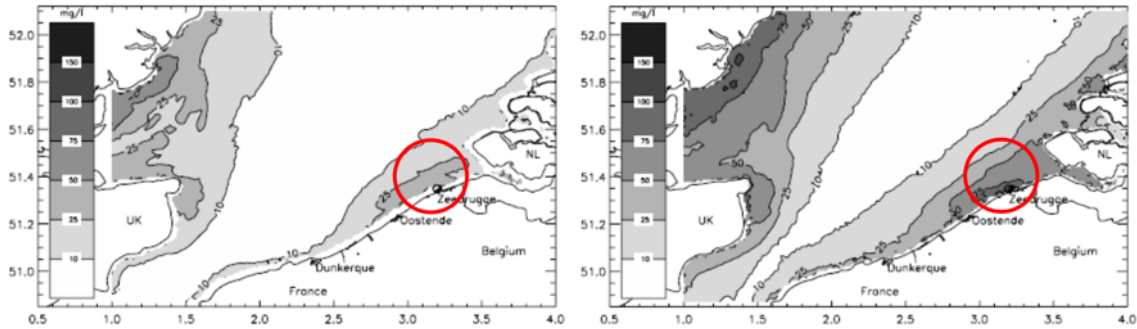


Figura 7-27 Média sazonal de concentração de partículas em suspensão. À esquerda verão e à direita inverno. (Fonte: [S22])

Como consequência desses altos índices de partículas em suspensão, há uma grande deposição de material silteoso nas regiões envolventes ao porto de Zeebrugge. E, mesmo com a presença da proteção da bacia de evolução por obras de abrigo, há deposição do material dentro do porto, conforme Figura 7-28. A quantidade de material em suspensão nas águas é tão grande que é visível, conforme Figura 7-29.

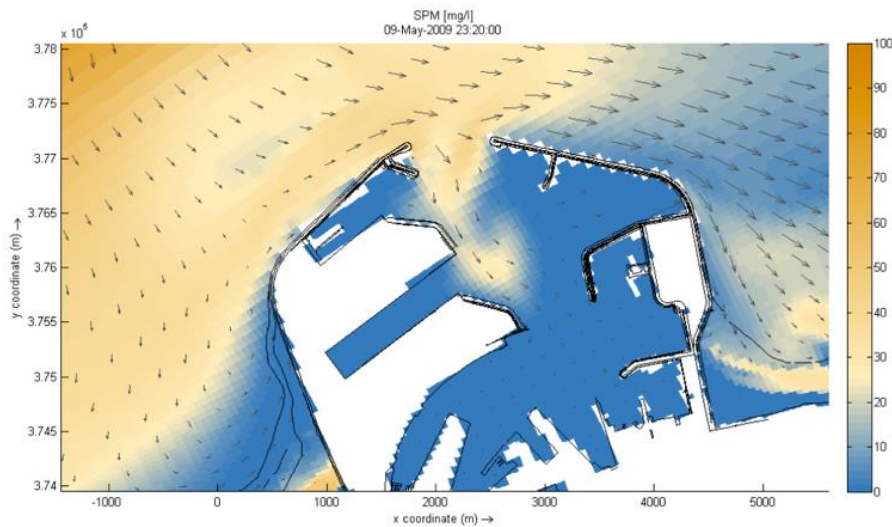


Figura 7-28 Mapa de concentração de sedimentos durante a fase de cheia da maré, duas horas antes da máxima preamar. (Fonte: [29])



Figura 7-29 Imagem aérea do porto de Zeebrugge, com demonstração do movimento das águas em maré cheia e baixa e a entrada de material siltooso na bacia de evolução (Fonte: [S22])

Devido à presença acentuada de matéria sólida nas águas, há uma deposição elevada de material de maneira na região do porto, Figura 7-30. Por consequência, para manter a acessibilidade do porto torna-se necessária a dragagem de 4.000.000 toneladas de sedimentos [S22], sendo a deposição em determinados locais, conforme Figura 7-31.

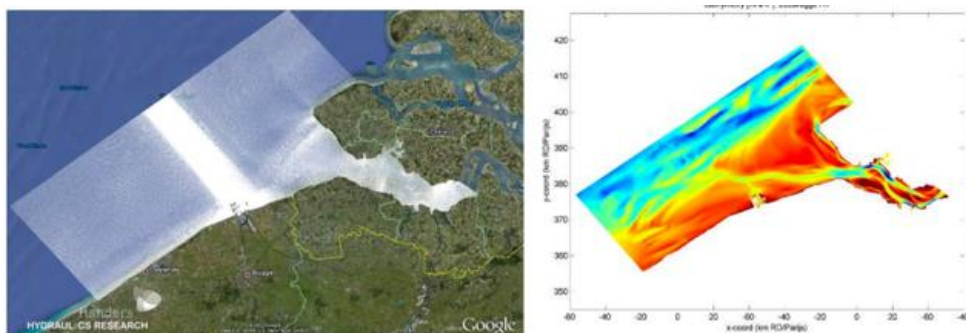


Figura 7-30 Foto de satélite, a esquerda, e batimetria, à direita, da região do porto de Zeebrugge (Fonte: [29])

Através de ensaios de campo pode-se determinar que os sedimentos depositados na região do porto de Zeebrugge são siltoosos, gerando uma lama com densidade de $1,2 \text{ ton/m}^3$ [13].

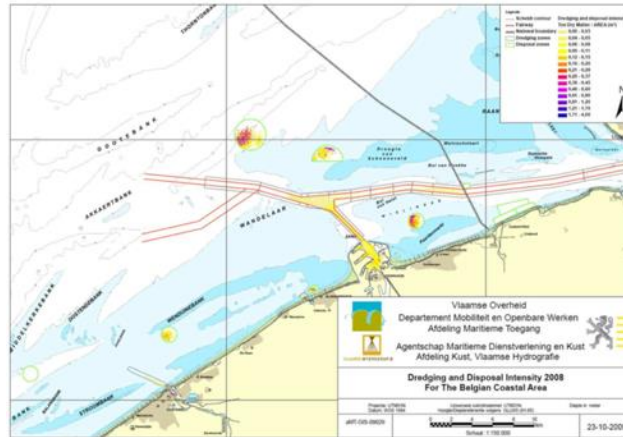


Figura 7-31 Planta de situação do porto de Zeebrugge, os canais de acesso ao porto e locais de deposição do material dragado. (Fonte: [29])

Ainda, na entrada do porto há correntes consideráveis, Figura 7-32, tornando, a navegação para o acesso do porto numa operação delicada. Torna-se, portanto, necessário que haja capacidade de navegação e de manobra para que o acesso atenda minimamente os parâmetros de segurança e de operação.

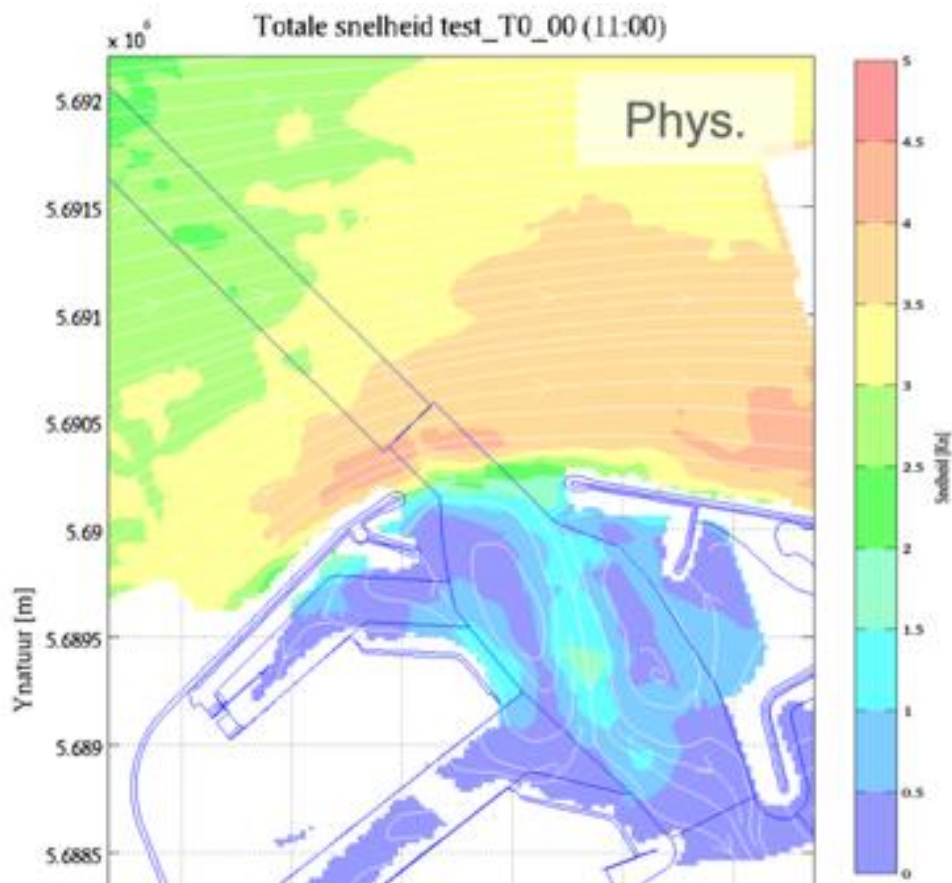


Figura 7-32 Resultado da simulação experimental do perfil de velocidades na envolvente do porto de Zeebrugge. (Fonte: [S22])

Para avaliar a possibilidade de diminuir a necessidade da execução de dragagens e manter a segurança operacional, foi realizado um estudo experimental sobre a possibilidade de navegação com a quilha dentro da camada de sedimentos, rebaixando assim a cota do leito náutico.

7.3.1. ANÁLISE DA NAVEGABILIDADE E MANOBRABILIDADE EM NAVEGAÇÃO EM LAMA

O ponto de partida do estudo é determinar se existe a possibilidade de rebaixar o leito náutico a partir da navegação de embarcações com a quilha em contato com a camada de lama.

7.3.1.1. Camada de lama

Considerou-se como dados iniciais, o tipo de material que compões o leito marinho, a densidade e a viscosidade *in situ* desse material. Fazendo batimetrias utilizando diferentes e específicas frequências, é possível determinar e distinguir a camada de lama e rocha do leito, conforme Figura 7-33.

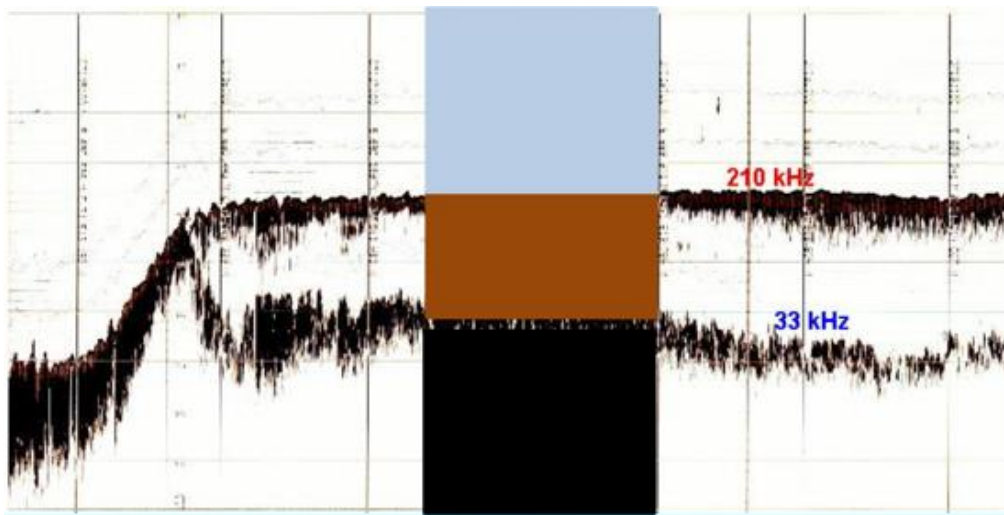


Figura 7-33 Perfil pedológico do leito marinho do porto de Zeebrugge (Fonte: [27])

7.3.1.2. Interação navio lama

Na tentativa de determinar as condições de navegabilidade e manobrabilidade em navegação em lama foi efetuado um estudo experimental em modelo reduzido para analisar o comportamento dos navios e da camada de lama, conforme Figura 7-34.

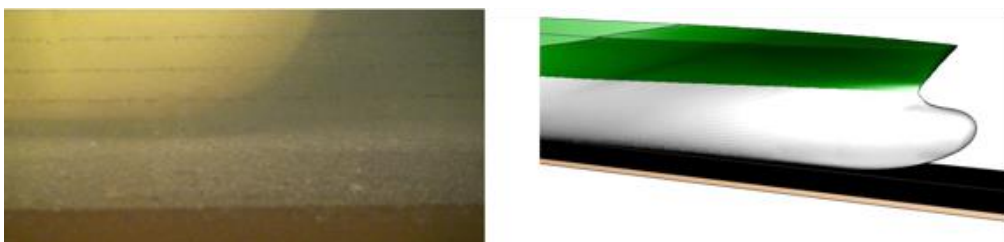


Figura 7-34 Ensaio, em modelo reduzido, de navegação dentro de camada de lama (Fonte: [27])

O primeiro resultado determinado com o ensaio experimental foi o comportamento da interação quilha e camada de lama. Com esse dado determinou-se o padrão da velocidade do fluxo da lama na envolvente da quilha, conforme a Figura 7-35.

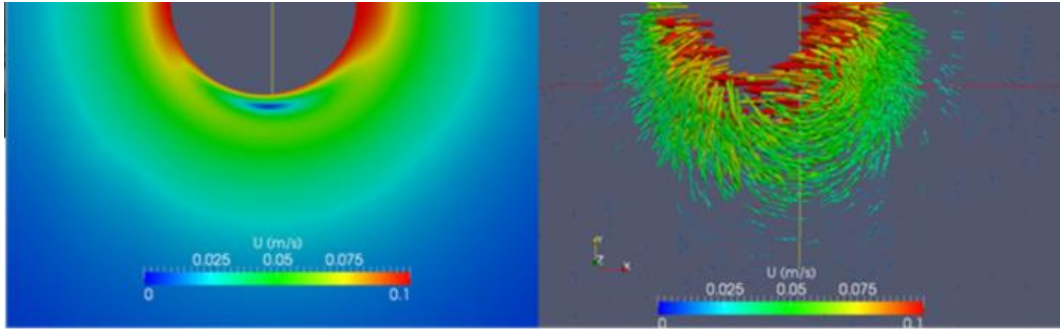


Figura 7-35 Velocidade do fluxo de lama ao redor da quilha do navio, no ensaio experimental (Fonte: [S22])

Foi estudado também o comportamento da lama com diferentes arranjos de UKC e diferentes velocidades, conforme Figura 7-36. Quanto mais negativo é o UKC, ou seja, quanto maior for o calado dentro da camada de lama, ou quanto maior a velocidade da embarcação, maior será o comportamento não newtoniano da camada de lama.

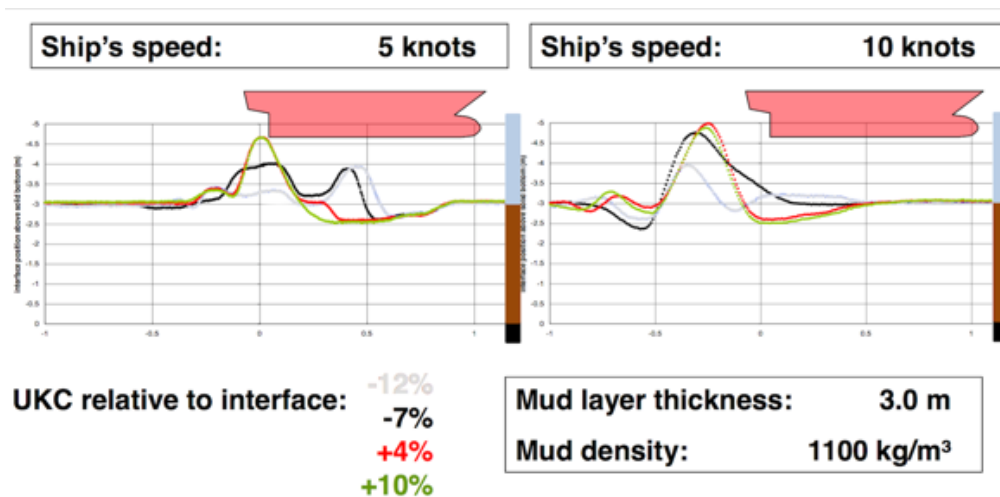


Figura 7-36 Análise do comportamento fluido da camada de lama. (Fonte: [27])

7.3.1.3. Resposta da navegação em lama

Na presença de lama pode-se perceber uma mudança de comportamento na velocidade do navio. Pelo aumento da viscosidade da lama, em relação a água, há uma perda relevante de eficiência das hélices do navio, sendo necessária o aumento da acentuado da impulsão para haver

aceleração da embarcação, Figura 7-37.

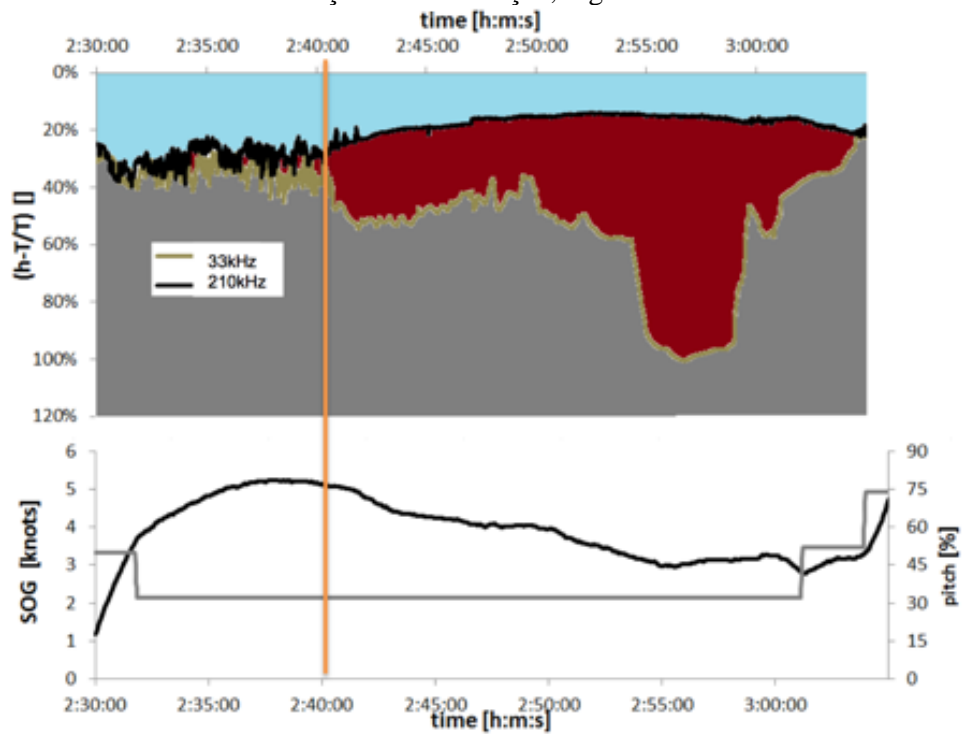


Figura 7-37 Velocidade do navio ao passar pela camada de lama (Fonte: [27])

Com a ineficiência das hélices, somada com o aumento da viscosidade do fluido, o comportamento dependente do leme torna-se imprevisível. Ocorreu, conforme Figura 7-38, a movimentação do navio no sentido contrário ao do leme.

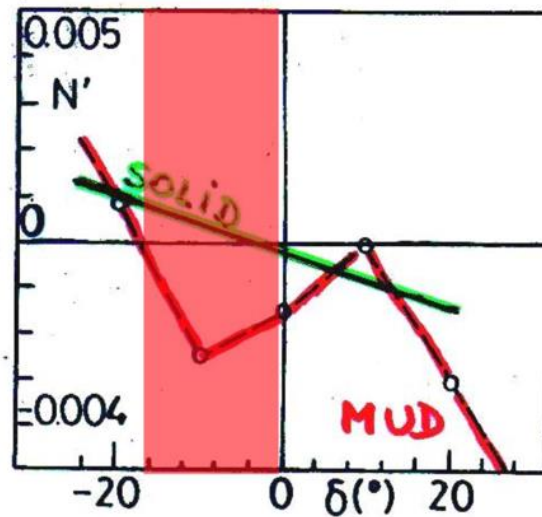


Figura 7-38 Comportamento do navio, relativo à influência do leme (Fonte: [27])

Ocorre, em contrapartida, um aumento na sustentação do navio por aumento da força atuante no casco, pelo aumento da densidade do fluido, o que torna menor o raio do círculo do teste em giro livre, conforme Figura 7-39.

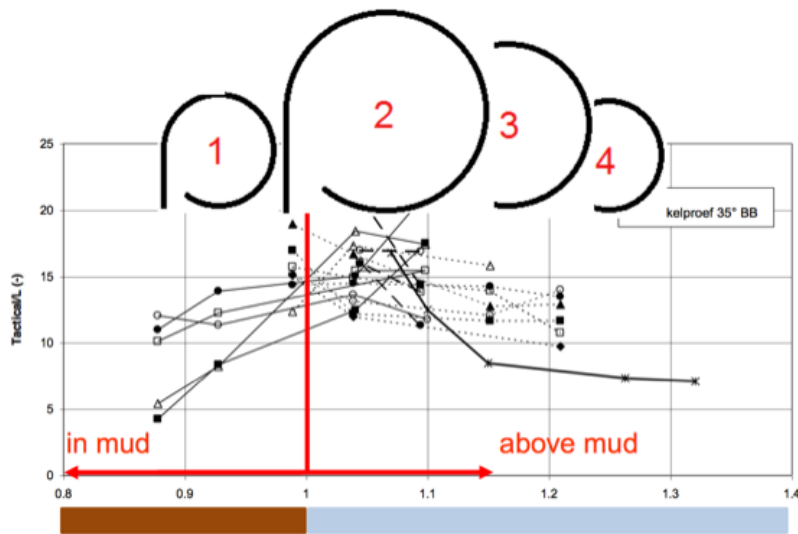


Figura 7-39 Teste em giro de um navio porta-container (Fonte: [27])

7.3.1.4. Manobra de acesso ao porto

A partir dos dados recolhidos no modelo experimental, foi levantada a hipótese de fazer a manobra de acesso com o navio assistido por rebocadores. Desta forma, utilizando um navio porta-containers com 300 metros de comprimento, na condição de UKC -7% e como suporte, 2 rebocadores de 45 toneladas. O resultado do teste com a trilha da rota do navio está representado na Figura 7-40.

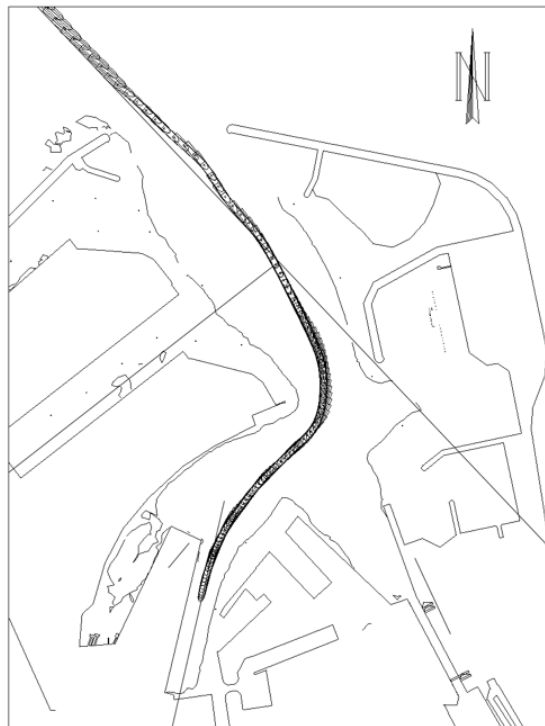


Figura 7-40 Rota do teste, navio porta-container, UKC -7% e apoiado por 2 rebocadores de 45 ton (Fonte: [S22])

7.3.2. CONCLUSÃO

É possível rebaixar a cota do fundo náutico, com segurança, desde que as cartas náuticas retratem fidedignamente a realidade e as dragagens de manutenção sejam feitas com a periodicidade correta. Também, para navegar com UKC negativo, é necessário que sejam realizados estudos individuais para cada tipo de navio, para entender como o mesmo interage e se comporta sob essa condição de navegação e manobra. Por fim, e não menos importante, é necessário que os comandantes tenham treinamento nesse tipo de condição de navegação e manobra.

O aumento dos navios suscita esta problemática, visto que a área onde se localiza o porto não é a mais adequada, em função da quantidade de material sólido suspenso em suas águas. Por fim, caso não haja uma modificação na forma de projetar portos haverá um limite para a recepção de navios de maiores dimensões imposta pela natureza ou por racionalidade econômica, já que atualmente o porto de Zeebrugge já está no limite operacional.

8 CONCLUSÃO

8.1. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal discutir o *trade-off* entre o aumento de dimensões dos navios e as condições de navegação e acesso. Fica claro que mesmo com as intervenções de engenharia para atender a essas novas características das embarcações, aumentando assim as dimensões das estruturas de abrigo e rebaixando a cota do fundo náutico, geram-se desequilíbrios com o meio físico e diminuem-se as condições de navegação.

Em resumo, o aumento das dimensões dos navios inexoravelmente impõe o aumento das dimensões portuárias e que em muitas situações não há possibilidade de haver o crescimento dos portos sem que haja também um aumento de dimensão dos quebramares e de quantidade de serviço de dragagem. Também, foi possível perceber que os modelos numéricos hoje conseguem simulações com relevante precisão as atuais e novas realidades, seja na avaliação da construção de quebramares ou no serviço de dragagem, mas que a modelagem experimental continua cada vez mais importante com a construção de estruturas pouco usuais.

Com a contínua tendência de aumento das dimensões dos navios, os casos de estudo mostraram que as limitações na navegação no acesso aos portos podem ser minimizadas com o apoio de rebocadores

O aumento das dimensões dos portos, para receber navios cada vez maiores, pode gerar grandes desequilíbrios entre a infraestrutura e o meio físico, existindo limites para as expansões. Esses limites são impostos pelas condições naturais e pela razoabilidade econômica, quando os benefícios das novas benfeitorias não compensam o valor investido.

9

BIBLIOGRAFIA

9.1. BIBLIOGRAFIA

- [1] Aaby, B. C. (2012). *An analysis of Shipping Lines` selection criteria when choosing European Container Terminals*. Dissertação de Mestrado, Molde University College, Molde, Noruega
- [2] Alfredini, P., Arasaki E. (2009) *Obras e Gestão de Portos e Costas*, 2ª Edição. Edgard Blüchler, São Paulo, Brasil
- [3] Almeida, P. R. L., Souza, L. P. (2011). *Mecânica do Navio* – trabalho de iniciação científica. Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, Brasil
- [4] Barros, J. M. (2012). *Projecto das Obras de Melhoria das Condições de abrigo e Expansão da Marina da Póvoa de Varzim*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal
- [5] Burchart, H. F. e Hughes, S. A. (2006). *Coastal Engineering Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, EUA
- [6] Bureau of Transportation Statistics (2015). *Freight Facts and Figures*. U.S. Department of Transportation, Washington, DC, EUA
- [7] Clarksons Research (2016). *The Bulk Carrier Register*. Clarkson Research Services Limited, Londres, Reino Unido, pp. 13, 17-18
- [8] Coastal Engineering Research Center. (1975). *Shore Protection Manual*. Waterways Experiment Station, Vicksburg Miss., U.S.A.
- [9] Coastal Engineering Research Center. (2011). *Shore Protection Manual*. Waterways Experiment Station, Vicksburg Miss., U.S.A.
- [10] Delefortrie, G. (2007). *Manoeuvring Behaviour of Container Vessels in Muddy Navigation Areas*. Tese de Doutoramento, Ghent University, Bélgica
- [11] Delefortrie, G. e Vantorre, M. (2016). *Ship Manoeuvring Behaviour in Muddy Navigation Areas: State of the Art*. 4th MASHCON, Hamburg, Alemanha
- [12] Druyts, M. e Brabers, P. (2016). *The Definition of the Nautical Bottom in Muddy Navigational Areas*. 4th MASHCON, Hamburg, Alemanha

- [13] Eloot, K., Vantorre, M. (2011). *Ship behaviour in Shallow and Confined Water: an Overview of Hydrodynamic Effects through EFD*. In: *Assessment of stability and control prediction methods for NATO air and sea vehicles*. RTO-AVT Specialists' meeting on Assessment of Stability and Control Prediction Methods for Air and Sea Vehicles, Portsmouth, Reino Unido
- [14] *Estudo Sobre Concorrência no Setor Portuário 2015 (Consulta Pública)*. Autoridade da Concorrência, Portugal
- [15] Ferreira, P., Vieira, F. (2009). *Análise da viabilidade de um Parque Eólico na costa portuguesa*. Universidade do Minho, Portugal
- [16] Fonseca, M. M. (2002). *Arte Naval*. Serviço de Documentação da Marinha, 6ªed, Rio de Janeiro, Brasil
- [17] Goes Filho, H. A. (2004). *Dragagem e gestão dos sedimentos*. Tese de Mestrado, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- [18] Gourlay, T. P. (2007). *Ship Underkeel Clearance in Waves*. Proc. Coasts and Ports, Melbourne, July 2007. Austrália
- [19] Gourlay, T. P. (2013). *Ship Squat in Non-Uniform Water Depth*. Proceedings, Coasts and Ports. Manly, September 2013.
- [20] Gröen, P. & Dorrestein, R. (1976). *Zeegolven*. KNMI Opstellenop oceanografisch en maritiem meteorologisch Gebied 11. Holanda
- [21] Instituto Hidrográfico da Marinha Brasileira. *Carta Náutica 1102*. Marinha do Brasil, Rio de Janeiro, Brasil
- [22] Instituto Hidrográfico da Marinha Brasileira. *Carta Náutica 1103*. Marinha do Brasil, Rio de Janeiro, Brasil
- [23] Instituto Hidrográfico da Marinha Brasileira. *Carta Náutica 1804*. Marinha do Brasil, Rio de Janeiro, Brasil
- [24] Instituto Hidrográfico Português. *Carta Náutica 26302*. Marinha de Portugal, Portugal
- [25] Instituto Hidrográfico Português. (2016). *Boia Ondográfica de Leixões*. Marinha de Portugal, Portugal
- [26] ISL. (2016) *Shipping Statistics and Marketing Review 2016 Volume 60*. ISL Institute of Shipping Economics and Logistics, Bremen, Germany
- [27] Lataire, E. (2014). *Effect of Fluid Mud on Navigation of Deep - Drafted Vessels*. International Panel on Ports and Waterways: a look at the integrated and sustainable use of the sea and fluvial network, Rio de Janeiro, Brasil
- [28] Lean, G. H. (1980). *Estimation of Maintenance Dredging for Navigation Channel*. Hydraulics Research Station, Wallingford, UK
- [29] Maerschallck, B. e Vanlede, L. (2013). *Zeebrugge Harbour Sediment Transport Model*. Coastal Dynamics 2013

- [30] Martingo, J. D. A. (2014). *Elementos Geométricos para o Planeamento Físico de Terminais Portuários*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, Portugal
- [31] *Module 2: The Evolution of Ports in a Competitive World* (2007). In: Port Reform Toolkit 2nd ed. The World Bank, Washington, DC, EUA
- [32] Paiva, R. T. (2006). *Zonas de Influência Portuárias (Hinterlands) e um Estudo de Caso em um Terminal de Contêineres com a Utilização de Sistemas de Informação Geográfica*. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil
- [33] Pereira, P. M. S. (2008). *Análise dos Processos de Rotura e de Escoamento em Quebramares de Taludes- Estudo do Quebramar Norte do Porto de Leixões*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, Portugal
- [34] Portela, L. I. (2011). *Dragagens nos Portos Comerciais de Portugal Continental: Dados Preliminares*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal
- [35] Queima, A. M. e Cabral, I. S. (2014). *Projeto de Prolongamento dos Guia-Correntes do Canal de Maré da Lagoa de Itaipú-RJ*. Dissertação, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil
- [36] Santos, João Alfredo. (2013) *Apontamentos da Disciplina de Obras marítimas e Portuárias do Mestrado em Engenharia Civil*. ISEL, Lisboa, Portugal
- [37] Santos, P. J. R. (2010). *Análise da interação de navios com dispositivos de acostagem e amarração. Estudo em modelo físico do posto "A" do terminal de petroleiros do porto de Leixões*. Dissertação de Doutorado, FEUP, Porto, Portugal
- [38] Silva, R. M. (2014). *Caracterização de Estruturas Portuárias- Caso de Estudo- Ampliação do Terminal XXI, Sines*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal
- [39] Soares, C.R.L. (2006) *Avaliação do Processo de Dragagem por Injeção de Água em Estuários*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil
- [40] Sousa, N. M. B. (2011). *Obras Marítimas de Acostagem: o Caso do Porto de Abrigo da Ilha do Porto Santo*. Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, Funchal, Madeira, Portugal
- [41] Souza, S. P. (2010). *Sistemas de Propulsão Marinha COGOG e CODOG*. Universidade Estadual da Zona Oeste, Rio de Janeiro, Brasil
- [42] *Statistical pocket book: EU transport in figures (2016)*. European Commission, European Union, Bietlot, Bélgica
- [3] Steen, S. (2014). *Lecture notes TMR7 Experimental methods in marine hydrodynamics*. Marine Technology Center, NTNU, Noruega.
- [44] Svetak, J. (2001). *Ship Squat*. Traffic Engineering Review, Vol 13.
- [45] Talley, L. D. (2002). *Ocean Circulation*. Encyclopedia of Global Environmental Change, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, Inglaterra 2002

- [46] TECHNOMAR e TPN-USP. (2013). *Modelagem computacional de extensão do quebra-mar no Porto de Salvador (BA): análise dos efeitos no abrigo de ondas em novo terminal e nas manobras de navios contêineres. Relatório 2 - Análise de Manobras*. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- [47] TETRATECH. (2013). *Modelagem do Campo de Ondas na Região do Porto de Salvador, Baía de Todos os Santos, BA*. São Paulo, Brasil
- [48] The Future Ocean research group (2010) *World ocean review: Living with the oceans*. Maribus, Hamburgo, Alemanha
- [49] TPN-USP. (2013). *Análise do Prolongamento do Quebra-Mar Norte do Porto de Salvador*. Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- [50] UNCTAD/RMT (2016). *Review of Maritime Transport*. United Nations, Genebra, Suíça
- [51] van der Meer, J. W., Sigurdarson, S. (2014). *Geometrical Design of Berm Breakwaters*. Coastal Engineering Proceedings, 1(34), structures.25
- [52] Vieira, G. B. B. (2002). *Transporte Internacional de Cargas*. 2. ed. Editora Aduaneiras, São Paulo, Brasil
- [53] *World Trade Statistical Review 2016*. World Trade Organization

9.2. SITES

- [S1] https://www.revistamilitar.pt/artigo.php?art_id=645 consultado em 16/03/2017
- [S2] <http://aapa.files.cms-plus.com/Statistics/WORLD%20PORT%20RANKINGS%202015.xlsx> consultado em 16/03/2017
- [S3] <https://people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch1en/appl1en/maritimeroutes.html> consultado em 18/03/2017
- [S4] <http://www.correio24horas.com.br/blogs/farol-economico/?tag=porto-de-aratu> consultado em 18/03/2017
- [S5] <http://www.cm-nazare.pt/en/porto-da-nazare> consultado em 18/03/2017
- https://www.icjp.pt/sites/default/.../a_gestao_e_a_concessao_das_areas_portuarias.pdf consultado em 19/03/2017
- [S6] <http://www.publituris.pt/2015/07/09/novo-terminal-do-porto-de-leixoes-com-nova-data-de-abertura/> consultado em 20/03/2017
- [S7] <http://aapa.files.cms-plus.com/Statistics/WORLD%20BULK%20CARRIER%20FLEET%202016%20ENG.pdf> consultado em 20/03/2017
- [S8] https://transportemaritimoglobal.files.wordpress.com/2013/11/tipologia-de-navios_antonio-costa.pdf consultado em 22/03/2017

- [S9] <http://aapa.files.cms-plus.com/Statistics/WORLD%20CELLULAR%20CONTAINERSHIP%20FLEET%202016.pdf> consultado em 22/03/2017
- [S10] <http://www.cruisemapper.com/wiki/753-cruise-ship-sizes-comparison-dimensions-length-weight-draf> consultado em 24/03/2017
- [S11] <http://keywordsuggest.org/gallery/938490.html> consultado em 24/03/2017
- [S12] <http://worldwideflood.com/flood/waves/waves.htm> consultado em 25/03/2017
- [S13] <http://khramushin.narod.ru/Paper/ApHydro-2004.html> consultado em 25/03/2017
- [S14] <https://www.clearias.com/up/Inter-tidal-zone.png> consultado em 01/04/2017
- [S15] <http://www.shallowwater.ugent.be/img/fs2.jpg> consultado em 10/04/2017
- [S16] <https://www.portamaritimo.com/2017/01/24/porto-de-ilheus-sera-dragado-para-12-metros> consultado em 10/05/2017
- [S17] http://1.bp.blogspot.com/_68RzbydtW4/TUKk20h-II/AAAAAAAAAKU/3hDs6A8ztyo/s400/north-atlantic-tropical-storms.gif consultado em 12/08/2017
- [S18] <http://i.cs.hku.hk/~sealevel/Images/f3.png> 10/08/2017 consultado em 12/08/2017
- [S19] <http://www.bahiaeconomica.com.br/ckfinder/userfiles/images/porto-salvador.png> consultado em 12/08/2017
- [S20] <https://www.portofzeebrugge.be/sites/default/files/2017-03/Port%20of%20Zeebrugge%20-%20Breakbulk%20port.pdf> consultado em 15/08/2017
- [S21] <https://www.portofzeebrugge.be/sites/default/files/2017-03/Port%20map%20quay%20nrs%202017.pdf> consultado em 15/08/2017
- [S22] http://www.waterbouwkundiglaboratorium.be/sites/default/files/atoms/files/Willems_Port%20of%20Zeebrugge_BelgianHydraulicDay2014.pdf consultado em 15/08/2017