

A watercolor illustration of a ship's bow, painted in shades of blue and green, with a large, dark, textured buoy in the foreground. The scene is set against a warm, yellowish background, suggesting a sunset or sunrise. In the distance, a building with a red roof is visible on the right.

Paolo Alfredini  
Emilia Arasaki

2ª edição

# Engenharia **PORTUÁRIA**

**Blucher**

**PAOLO ALFREDINI**

# ENGENHARIA PORTUÁRIA

**MANUAL TÉCNICO**

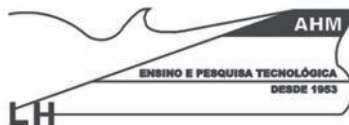


**EMILIA ARASAKI**  
Colaboração especial

2ª edição



ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



*Engenharia portuária: manual técnico*

© 2018 Paolo Alfredini e Emilia Arasaki, 2ª edição

Editora Edgard Blücher Ltda.

1ª edição – 2013

Imagem da capa: teste de *passing ship* no modelo físico do Porto de Santos (escala 1:170) do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica, estando atracada embarcação Capesize no Armazém 39 e com navio conteneiro de 336 passante carregado na curva do Canal de Acesso. O navio Capesize encontra-se instrumentado para a medição das forças nos cabos de amarração e deslocamentos. O navio conteneiro está sendo radiocontrolado por comandante prático da Santos Pilots. A imagem é a superposição de duas fotografias para se ter a noção do movimento. Testes na bacia de ondas direcionais espectrais do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica com os molhes guias-correntes projetados para o canal de acesso ao Porto de Santos (modelo físico na escala 1:120). Na porção inferior da fotografia, estão os dez atuadores de ondas independentes capazes de gerar o espectro direcional do mar.

---

# Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar  
04531-934 – São Paulo – SP – Brasil  
Tel.: 55 11 3078-5366  
contato@blucher.com.br  
www.blucher.com.br

Segundo Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.  
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,  
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer  
meios sem autorização escrita da editora.

---

Todos os direitos reservados pela Editora  
Edgard Blücher Ltda.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
ANGÉLICA ILACQUA CRB-8/7057

Alfredini, Paolo  
Engenharia portuária : manual técnico / Paolo  
Alfredini, Emilia Arasaki. – 2. ed. – São Paulo : Blucher,  
2018.  
1504 p. : il.

Bibliografia  
ISBN 978-85-212-1319-2 (impresso)  
ISBN 978-85-212-0812-9 (e-book)

1. Portos – Projetos e construção 2. Portos –  
Engenharia 3. Hidrovias – obras I. Título. II. Arasaki,  
Emilia.

18-0710

CDD 627.2

---

Índice para catálogo sistemático:  
1. Portos – Engenharia

# CONTEÚDO

## PARTE 1

HIDRÁULICA MARÍTIMA .....	43
Lista de símbolos .....	45
1 Hidrodinâmica e estatística das ondas curtas produzidas pelo vento....	47
1.1 Introdução sobre ondas de oscilação .....	48
1.2 Ondas monocromáticas e ondas naturais .....	56
1.2.1 Considerações gerais .....	56
1.2.2 Algumas expressões paramétricas para o espectro .....	58
1.2.2.1 Parâmetros derivados do espectro .....	58
1.2.2.2 Expressões paramétricas mais comuns para descrever o espectro .....	59
1.3 Dispersão da onda e velocidade de grupo .....	68
1.4 Energia da onda .....	71
1.4.1 Pressão subsuperficial .....	71
1.4.2 Energia e potência das ondas .....	72
1.5 Características estatísticas das alturas das ondas oceânicas.....	73
1.5.1 Distribuição das alturas de ondas em uma tempestade ..	73
1.5.1.1 Considerações gerais .....	73
1.5.1.2 Definição da onda individual.....	73
1.5.1.3 Propriedades probabilísticas das ondas características oceânicas.....	73
1.5.2 Distribuição estatística de longo período .....	77
1.5.3 Estimação das ondas extremas .....	82
1.5.3.1 Considerações gerais .....	82
1.5.3.2 Distribuições de probabilidade do valor extremo	83
1.5.3.3 Métodos para estimação dos parâmetros.....	86
1.5.3.4 Intervalos de confiança .....	86
1.5.3.5 Seleção da onda de projeto.....	86
1.5.3.6 Aplicações da estatística na estimação de ondas extremas .....	87
1.5.3.7 Exemplo de aplicação para a onda $H_p$ de uma estrutura de atracação estaqueada .....	93
1.5.3.8 O projeto otimizado .....	108
1.6 Efeitos de águas intermediárias e rasas .....	109
1.6.1 Empolamento e refração .....	109
1.6.1.1 Considerações gerais .....	109
1.6.1.2 Empolamento .....	109
1.6.1.3 Refração e empolamento conjuntos .....	110
1.6.1.4 Deformações provocadas pelas correntes .....	121
1.6.1.5 Efeitos de formas batimétricas particulares ...	125
1.6.2 Arrebentação.....	128
1.7 Difração .....	134
1.7.1 Características gerais .....	134
1.7.2 Difração no tardo de quebra-mar semi-infinito, rígido e impermeável .....	135
1.7.3 Difração normal no tardo de abertura em quebra-mar rígido e impermeável .....	147
1.7.4 Difração oblíqua no tardo de abertura em quebra-mar rígido e impermeável .....	154

	1.7.5	Difração e refração combinadas.....	154
	1.7.6	Considerações práticas .....	157
1.8		Reflexão.....	158
	1.8.1	Considerações gerais .....	158
	1.8.2	Reflexão total.....	158
	1.8.3	Oscilações em bacias portuárias .....	160
	1.8.3.1	Fundamentos.....	160
	1.8.3.2	Características da oscilação estacionária nos nós	161
	1.8.3.3	Bacias portuárias confinadas de forma simples retangular com profundidade constante e bordas verticais .....	161
	1.8.3.4	Bacias portuárias abertas de forma simples retangular estreita com profundidade constante e bordas verticais.....	161
	1.8.4	Transmissão.....	163
	1.8.4.1	Fundamentos.....	163
	1.8.4.2	Maciços de enrocamento.....	164
	1.8.4.3	Quebra-mares flutuantes .....	164
	1.8.4.4	Barreiras verticais.....	165
1.9		Correntes longitudinais produzidas pela arrebentação .....	166
1.10		Variabilidade do clima de ondas.....	166
1.11		Incertezas ligadas à hidrodinâmica e à estatística de ondas curtas	168
	1.11.1	Considerações gerais .....	168
	1.11.2	Incertezas nas medições de ondas .....	169
	1.11.3	Incertezas na reconstituição do estado do mar passado..	169
	1.11.4	Incertezas na estimativa das deformações das ondas ....	169
	1.11.5	Redução das incertezas pela verificação da modelação dos processos marítimos .....	169
2		Dinâmica das ondas longas de maré em embocaduras marítimas.....	171
2.1		Dinâmica da maré estuarina .....	172
	2.1.1	Considerações gerais sobre a maré astronômica.....	172
	2.1.1.1	Características principais.....	172
	2.1.1.2	Forças geradoras da maré.....	173
	2.1.1.3	Pontos anfidrômicos e propagação da maré astronômica na costa brasileira .....	178
	2.1.2	Considerações gerais sobre a maré não astronômica....	180
	2.1.2.1	Descrição geral.....	180
	2.1.2.2	Conceituação da maré não astronômica.....	180
	2.1.2.3	Aspectos físicos básicos sobre as variações de nível do mar induzidas pela atmosfera .....	181
	2.1.2.4	Remoção da maré astronômica: nível não astronômico.....	186
	2.1.3	Descrição matemática das marés astronômicas.....	191
	2.1.3.1	Considerações gerais .....	191
	2.1.3.2	Onda progressiva longa .....	191
	2.1.4	A maré astronômica real em estuários .....	192
	2.1.5	Modificações dinâmicas da maré astronômica em estuários	192
	2.1.6	Efeitos das larguras e profundidades nas massas estuarinas	193
	2.1.7	Previsão da maré astronômica por análise harmônica ...	193
2.2		Propagação da maré em estuários.....	199
	2.2.1	Circulação e misturação.....	199
	2.2.2	Tipos de circulação .....	208
	2.2.3	Variação relativa do nível médio do mar e seus impactos	209
	2.2.3.1	Contexto quanto às mudanças climáticas.....	209

	2.2.3.2	Estudo de caso da Baía e Estuário de Santos e São Vicente (SP) .....	221
2.3		Onda de maré em rio desaguardo no mar .....	232
	2.3.1	Considerações gerais .....	232
	2.3.2	Equações de Saint-Venant .....	232
	2.3.2.1	Sistema natural de coordenadas e hipóteses básicas .....	233
	2.3.2.2	Modelo unidimensional .....	234
	2.3.2.3	Caso particular .....	234
	2.3.3	Solução analítica adimensional das equações de Saint-Venant .....	234
	2.3.3.1	Formulação da solução .....	234
	2.3.3.2	Adimensionalização das equações .....	235
	2.3.3.3	Solução analítica no regime dominado pelo atrito para maré semidiurna ( $T = 12,42$ h) .....	235
2.4		Elementos de hidrografia .....	238
	2.4.1	Definições gerais .....	238
	2.4.2	Geodesia e topografia .....	238
	2.4.2.1	Forma da Terra .....	238
	2.4.3	Cartografia .....	240
	2.4.3.1	Generalidades .....	240
	2.4.3.2	Classificação das cartas .....	241
	2.4.3.3	Sistemas de projeções .....	241
	2.4.3.4	Projeção de Mercator para o elipsoide .....	241
	2.4.3.5	Folha de bordo .....	242
	2.4.3.6	Carta náutica .....	243
3		Transporte litorâneo de sedimentos e morfologia costeira .....	245
	3.1	Introdução .....	246
	3.2	Origens e características dos sedimentos de praia .....	247
	3.2.1	Considerações gerais .....	247
	3.2.2	Balanco sedimentar .....	249
	3.2.2.1	Elementos do balanço sedimentar .....	249
	3.2.2.2	Limites do balanço sedimentar .....	250
	3.2.2.3	Elenco das fontes dos sedimentos de praia .....	251
	3.2.2.4	Elenco dos sumidouros dos sedimentos de praia .....	252
	3.2.2.5	Processos convectivos .....	252
	3.2.3	Características dos sedimentos de praia .....	252
	3.2.3.1	Considerações gerais .....	252
	3.3	Circulação induzida pelas ondas junto à costa .....	253
	3.3.1	Considerações gerais .....	253
	3.3.2	Ataque frontal .....	254
	3.3.3	Ataque oblíquo .....	254
	3.4	Descrição do transporte litorâneo de sedimentos .....	255
	3.4.1	Considerações gerais .....	255
	3.4.2	Ao largo da arrebentação .....	256
	3.4.3	Região de arrebentação .....	256
	3.5	Perfis, alinhamentos de praia e formações costeiras típicas .....	259
	3.5.1	Perfis transversais e alinhamentos de praia .....	259
	3.5.1.1	Perfil de equilíbrio .....	259
	3.5.1.2	Importância e características dos perfis transversais de praia .....	260
	3.5.1.3	Alinhamento de praias em equilíbrio estático .....	262
	3.5.2	Formações costeiras típicas .....	264
	3.5.2.1	Considerações gerais .....	264

	3.5.2.2	Flechas.....	264
	3.5.2.3	Barras.....	264
	3.5.2.4	Restingas ou lidos.....	264
	3.5.2.5	Barreiras.....	268
	3.5.2.6	Tômbolos.....	268
	3.5.2.7	Baías e enseadas.....	268
	3.5.2.8	Cordões litorâneos, bancos e formações complexas.....	270
	3.5.2.9	Estudo de caso das praias de Suarão e Cibratel em Itanhaém (SP).....	270
3.6		Análise quantitativa do processo de transporte litorâneo.....	280
	3.6.1	Início do movimento de sedimentos não coesivos e conformações de fundo.....	280
	3.6.1.1	Considerações gerais.....	280
	3.6.1.2	Início do movimento de sedimentos não coesivos.....	282
	3.6.1.3	Conformações de fundo.....	282
	3.6.2	A estimativa da vazão do transporte litorâneo.....	284
	3.6.2.1	Considerações gerais.....	284
	3.6.2.2	Fórmulas para a estimativa da vazão do transporte litorâneo longitudinal de sedimentos.....	286
4		Hidrossedimentologia, dinâmica halina e morfologia em embocaduras marítimas.....	289
	4.1	Descrição geral das embocaduras marítimas.....	290
	4.1.1	Definição generalizada de estuário e a importância do seu estudo.....	290
	4.1.1.1	Definição clássica de estuário.....	290
	4.1.1.2	Importância de estudar águas estuarinas.....	290
	4.1.1.3	Características das zonas referentes à definição funcional de estuário.....	290
	4.1.2	Classificação dos estuários.....	290
	4.1.3	Características gerais dos processos estuarinos.....	293
	4.1.3.1	Propagação da maré.....	293
	4.1.3.2	Escoamento fluvial e seus efeitos.....	299
	4.1.3.3	Processos sedimentológicos.....	299
	4.2	Intrusão salina em estuários.....	299
	4.2.1	Descrição da dinâmica da intrusão salina.....	299
	4.2.1.1	Estratificação em estuários.....	299
	4.2.2	Mecanismo de uma cunha salina estacionária.....	302
	4.2.2.1	Considerações gerais.....	302
	4.2.2.2	Características de forma das cunhas salinas.....	302
	4.2.2.3	Estimativa do comprimento de cunhas salinas em canais largos.....	302
	4.2.2.4	Aproximação de Schijf e Schönfeld (1953).....	303
	4.2.3	Análise de estuários misturados.....	303
	4.2.3.1	Representação esquemática unidimensional da intrusão salina.....	303
	4.2.3.2	Fundamentos da análise unidimensional de estuários misturados.....	304
	4.3	Processos sedimentológicos.....	304
	4.3.1	Fontes sedimentares.....	304
	4.3.1.1	Considerações gerais.....	304
	4.3.1.2	Descrição das fontes sedimentares.....	304
	4.3.1.3	Levantamentos sedimentológicos de apoio.....	305

4.3.2	Dinâmica do transporte de sedimentos.....	306
4.3.2.1	Planícies de maré.....	306
4.3.2.2	Estuários.....	311
4.3.2.3	Deltas.....	313
4.3.2.4	Embocaduras de maré lagunares.....	314
4.4	Processos morfológicos.....	318
4.4.1	Considerações gerais.....	318
4.4.2	Conceito de equilíbrio dinâmico ou de regime em estuários	318
4.4.3	Conceito de estuário ideal.....	318
4.4.4	Processos morfológicos em deltas.....	319
4.4.4.1	Considerações gerais.....	319
4.4.4.2	Deltas dominados pelo rio.....	319
4.4.4.3	Deltas dominados pela maré.....	322
4.4.4.4	Deltas dominados por ondas.....	322
4.4.4.5	Outros tipos de deltas.....	323
4.4.5	Processos morfológicos em embocaduras de maré.....	323
4.4.5.1	Considerações gerais.....	323
4.4.5.2	Relações empíricas de condições de equilíbrio de regime.....	323
4.5	Estudos de casos.....	325
4.5.1	Aspectos relativos à dinâmica hidráulico-salina do Baixo Rio Cubatão (SP).....	325
4.5.1.1	Introdução.....	325
4.5.1.2	Descrição geral da área de influência deste estudo.....	325
4.5.1.3	O controle das intrusões salinas com as descargas da Usina Henry Borden.....	326
4.5.1.4	Comportamento hidráulico-salino do Baixo Rio Cubatão.....	326
4.5.1.5	Apresentação dos resultados do estudo.....	327
4.5.1.6	Análise e considerações finais.....	327
4.5.2	Modelo analítico para vazão de barreira hidráulica no Rio Cubatão (SP).....	328
4.5.2.1	Introdução.....	328
4.5.2.2	Dados utilizados.....	328
4.5.2.3	Teoria utilizada.....	329
4.5.2.4	Conclusões.....	329
4.5.3	Impacto da vazão da Barragem do Valo Grande na distribuição de salinidade no Complexo Estuarino-Lagunar de Iguape-Cananeia (SP).....	330
4.5.3.1	Introdução.....	330
4.5.3.2	Caracterização geral da região.....	330
4.5.3.3	Considerações sobre os dados utilizados.....	331
4.5.3.4	Resultados obtidos.....	331
4.5.3.5	Análise e conclusões.....	331
4.5.4	O Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (MA).....	332
4.5.4.1	Introdução.....	332
4.5.4.2	A obra portuária.....	332
4.5.4.3	Características hidráulicas e sedimentológicas em Ponta da Madeira.....	333
4.5.4.4	A adaptação no Espigão Norte.....	334
4.5.4.5	A adaptação no Espigão Sul.....	334
4.5.4.6	Consideração final.....	335
4.5.4.7	As ondas de areia do Canal de Acesso do Complexo Portuário do Maranhão.....	335
4.5.5	Estudo da dispersão de efluentes de emissários submarinos na Baixada Santista (SP).....	339



4.5.5.1	Introdução .....	339
4.5.5.2	Resultados .....	340
4.5.5.3	Representação do vento no modelo físico da Baixada Santista .....	340
4.5.5.4	Emissário de Santos .....	342
4.5.5.5	Conclusões .....	344

**PARTE 2**

	HIDRÁULICA FLUVIAL .....	345
	Lista de símbolos .....	347
5	Transporte fluvial de sedimentos .....	349
5.1	Introdução .....	350
5.1.1	Considerações gerais .....	350
5.1.2	Condicionantes do transporte de sedimentos.....	350
5.1.3	A erosão por ação hidráulica.....	351
5.1.4	A viabilidade de obras de Engenharia Hidráulica e o transporte de sedimentos.....	357
5.2	Modalidades do transporte sólido.....	362
5.3	Equilíbrio dos escoamentos com fundo móvel.....	362
5.4	Curva-chave sólida .....	363
5.5	Distribuição de tensões de arrastamento na fronteira .....	367
6	Início do movimento e rugosidade no leito fluvial .....	369
6.1	Hidráulica dos escoamentos com fundo móvel.....	370
6.1.1	Lei de distribuição de velocidades.....	370
6.1.2	Perdas de carga nos escoamentos com fundo móvel ....	370
6.1.3	Turbulência .....	370
6.2	Propriedades dos sedimentos.....	370
6.2.1	Caracterização.....	370
6.2.2	Origem.....	371
6.3	Início do transporte sólido por arrastamento.....	371
6.3.1	Considerações gerais .....	371
6.3.2	Início do transporte .....	371
6.3.3	Ressuspensão .....	375
6.4	Conformações de fundo.....	375
6.5	Resistência ao escoamento em leito móvel .....	377
6.5.1	Métodos de resistência global.....	377
6.5.2	Métodos com subdivisão da resistência .....	377
6.5.3	Exemplo de aplicação na determinação de curva-chave..	377
6.5.4	Exemplo de ajuste do método de Brownlie a rios do Estado de São Paulo .....	379
7	Quantificação do transporte fluvial de sedimentos .....	381
7.1	Capacidade de transporte por arrastamento de fundo .....	382
7.2	Transporte sólido em suspensão .....	383
7.2.1	Distribuição da concentração de sedimentos transportados em suspensão.....	383
7.2.2	Determinação da vazão sólida em suspensão.....	384
7.3	Transporte sólido total .....	384
7.3.1	Transporte sólido efetivo .....	384
7.3.2	Vazão sólida total e séries temporais hidrossedimentológicas .....	384
7.3.2.1	Considerações gerais .....	384

	7.3.2.2	Cálculo da vazão sólida total .....	385
	7.3.2.3	Correlações entre hietogramas, hidrógrafas e vazões sólidas .....	387
7.4		Fluxos de transporte de sedimentos e detritos em erosões por remoção em massa .....	388
	7.4.1	Caracterização e classificações .....	388
	7.4.2	As três zonas que compõem o processo das erosões por remoção em massa .....	391
	7.4.3	Estudo de caso da corrida de detritos de 18 de março de 1967, em Caraguatatuba (SP) .....	399
8		Morfologia fluvial e teoria do regime .....	403
	8.1	Introdução .....	404
	8.2	Teoria do regime .....	406
	8.2.1	Geometria Hidráulica .....	406
		8.2.1.1 Exemplos de formulações .....	406
		8.2.1.2 Exemplo de aplicação .....	407
	8.2.2	Resposta fluvial .....	407
		8.2.2.1 A influência da granulometria do material transportado .....	407
		8.2.2.2 Resposta fluvial por meio do estudo do transporte de sedimentos .....	407
		8.2.2.3 Avaliação qualitativa da resposta fluvial .....	407
	8.3	Evolução dos cursos d'água .....	408
		8.3.1 Princípios fundamentais que regem a modelação do leito .....	408
		8.3.2 Perfis longitudinais fluviais .....	412
		8.3.3 Efeito dos filetes líquidos no processo hidrossedimentológico .....	412
9		Engenharia de rios: características planialtimétricas fluviais em planície aluvionar .....	415
	9.1	Engenharia de rios .....	416
		9.1.1 Considerações gerais .....	416
	9.2	Leis de Fargue e geometria das curvas fluviais .....	416
	9.3	Meandros divagantes .....	420
<b>PARTE 3</b>			
		OBRAS PORTUÁRIAS E COSTEIRAS .....	423
		Lista de símbolos .....	425
10		Tipos de portos .....	429
	10.1	Classificação dos tipos de portos .....	430
		10.1.1 Definição .....	430
		10.1.2 Natureza dos portos .....	430
		10.1.3 Localização .....	430
		10.1.4 Utilização .....	430
	10.2	Obras de melhoramento dos portos .....	431
	10.3	Arranjo geral das obras portuárias .....	431
		10.3.1 Obras portuárias encravadas na costa ou estuarinas .....	431
		10.3.2 Obras portuárias salientes à costa e protegidas por molhes .....	443
		10.3.3 Obra portuária ao largo protegida por quebra-mar .....	443
		10.3.4 Outros tipos de arranjos gerais .....	450
	10.4	Localização de quebra-mares .....	450
	10.5	Marinas ou portos de recreio e lazer .....	456

10.6	Questões fundamentais do projeto das obras portuárias.....	456
10.7	Ações em estruturas portuárias marítimas ou fluviais.....	456
10.8	Revitalização urbanística de antigas áreas portuárias.....	463
11	Dimensões náuticas portuárias.....	467
11.1	Canais de acesso.....	468
11.1.1	Aspectos relacionados à dimensão vertical de canais de acesso portuários.....	468
11.1.1.1	Profundidade.....	468
11.1.1.2	Regras empíricas para a profundidade.....	472
11.1.1.3	Requisitos mínimos de serviço.....	473
11.1.1.4	Calado aéreo.....	473
11.1.2	Aspectos relacionados à largura de canais de acesso portuários.....	474
11.1.2.1	Fundamentos.....	474
11.1.2.2	Metodologia para o cálculo da largura de canais de acesso portuários.....	491
11.1.3	Exemplos de canais de acesso portuários.....	499
11.2	Bacias portuárias.....	503
11.2.1	Distância de parada e bacias de evolução.....	503
11.2.2	Bacias de espera ou fundeio.....	505
11.2.3	Bacias de berço.....	509
11.2.4	Requisitos mínimos de serviço.....	510
11.3	Profundidades em áreas lamosas: a abordagem do fundo náutico.....	514
11.3.1	Considerações gerais.....	514
11.3.2	Determinação Prática do Fundo Náutico (PIANC, 1997).....	515
11.3.2.1	Características da lama.....	515
11.3.2.2	Uso de ecobatimetria para determinar o fundo náutico.....	516
11.3.2.3	Critérios baseados em propriedades reológicas.....	518
11.3.2.4	Definição do fundo náutico com base na transição reológica.....	518
11.3.2.5	Critérios baseados numa cota de densidade da lama.....	518
11.3.2.6	Exemplos.....	518
11.3.3	Aplicabilidade quanto à representatividade das camadas de lama fluida nas cartas náuticas brasileiras.....	520
12	Tipos de obras de abrigo portuárias.....	521
12.1	Considerações gerais sobre as obras de abrigo.....	522
12.1.1	Função.....	522
12.1.2	Finalidades.....	522
12.2	Tipos convencionais de obras de abrigo.....	522
12.3	Tipos não convencionais de obras de abrigo.....	528
12.4	Escolha do tipo de obra.....	532
12.5	Instalações para pré-fabricação, transporte, assentamento e superestrutura de caixões de concreto armado.....	548
12.5.1	Características gerais das instalações para pré-fabricar os caixões de concreto armado.....	548
12.5.2	Transporte dos caixões.....	558
12.5.3	Assentamento dos caixões.....	559
12.5.4	Execução da superestrutura.....	559
12.6	Molhe com núcleo de areia – o caso de Maasvlakte 2 em Rotterdam.....	562

13	Dimensionamento de obras de abrigo portuárias .....	567
13.1	Anteprojeto de quebra-mar de talude .....	568
13.1.1	Características gerais da seção transversal .....	568
13.1.2	Composição do maciço. ....	569
13.1.3	Equipamentos e métodos construtivos .....	570
13.1.4	Fatores de projeto .....	570
13.1.5	Pré-dimensionamento da armadura. ....	570
13.1.6	Pré-dimensionamento da seção transversal .....	574
13.1.6.1	Espessura da armadura. ....	574
13.1.6.2	Alturas recomendáveis e superestrutura .....	575
13.1.6.3	Níveis de maré. ....	576
13.1.6.4	Largura da crista do maciço. ....	577
13.1.6.5	Cota da crista do maciço .....	577
13.1.6.6	Trechos do cabeço e cotovelos do maciço. ....	580
13.1.6.7	Proteção do pé de talude do maciço .....	580
13.1.7	A onda de projeto. ....	580
13.1.7.1	Probabilidade de ocorrência .....	580
13.1.7.2	Indicações normativas. ....	582
13.2	Metodologia de projeto de um quebra-mar de berma .....	583
13.3	Diagrama de cargas de pressão sobre uma parede vertical. ....	588
13.4	Dimensionamento do peso dos blocos de espigões de enrocamento .....	588
13.5	Exemplos de obras de quebra-mares de talude .....	589
13.5.1	Molhes de Rio Grande (RS). ....	589
13.5.2	Molhe de Punta Riso no Porto de Brindisi (Itália). ....	589
13.5.3	Molhe do Porto de Riposto, em Catania (Itália) .....	589
13.6	Exemplo de obras de quebra-mar de parede vertical. ....	591
13.6.1	Obras de abrigo no Porto de Genova (Itália) .....	591
13.6.2	Obra de abrigo e contenção no Porto de Savona (Itália) ..	596
13.6.3	Obra de abrigo e contenção no Estaleiro Naval de Castellammare di Stabia (Itália). ....	597
13.6.4	Obras de abrigo em Punta Riso e Costa Morena no Porto de Brindisi (Itália) .....	597
13.6.5	Quebra-mar externo a oeste do Porto Industrial de Taranto (Itália) .....	601
13.6.6	Molhes espanhóis no Mediterrâneo .....	601
13.6.7	Obras de abrigo no Japão .....	601
13.6.8	Obras de abrigo em marinas no Mar Mediterrâneo .....	604
13.6.9	Porto Pesqueiro de Terrasini em Palermo (Itália). ....	607
13.7	Exemplo de obra de quebra-mar flutuante .....	608
14	Estruturas e equipamentos de acostagem .....	613
14.1	Características gerais, classificação e tipos principais das obras acostáveis .....	614
14.1.1	Generalidades .....	614
14.1.2	Obras contínuas .....	615
14.1.3	Obras em estruturas discretas .....	615
14.1.4	Condições operacionais .....	615
14.1.5	Assistência dos rebocadores .....	619
14.1.6	<i>Bow thrusters</i> .....	624
14.2	Ação das embarcações nas obras acostáveis .....	624
14.2.1	Considerações gerais .....	624
14.2.2	Defensas .....	626
14.2.2.1	Caracterização. ....	626
14.2.2.2	Velocidades recomendadas de atracação .....	626

	14.2.2.3	Diagrama força (carga) de reação x deflexão (deformação).....	629
	14.2.2.4	Defensas elásticas .....	629
	14.2.2.5	Critérios de seleção das defensas.....	638
	14.2.2.6	Estimativa das ações de atracação.....	638
14.2.3		Cabos de amarração .....	642
	14.2.3.1	Movimentos fundamentais das embarcações e seus limites recomendados .....	642
	14.2.3.2	Função e arranjo de amarração .....	647
	14.2.3.3	Princípios gerais para a amarração segura dos navios.....	647
	14.2.3.4	Materiais e constituição dos cabos .....	649
	14.2.3.5	Características.....	650
	14.2.3.6	Estimativa de forças solicitantes por ação do vento .....	650
	14.2.3.7	Estimativa de forças solicitantes por ação de correntes.....	655
	14.2.3.8	Estimativa estática de forças de um plano de amarração.....	656
	14.2.3.9	Ação de ondas .....	662
14.2.4		Equipamento de amarração baseado em terra.....	663
14.2.5		<i>Passing ships</i> .....	675
14.2.6		Visibilidade.....	677
14.2.7		Disponibilidade do berço .....	677
14.2.8		Avaliação probabilística do risco de colisão da quilha do navio com o fundo.....	677
	14.2.8.1	Fatores influenciando a profundidade.....	677
	14.2.8.2	Aproximação ao problema .....	678
	14.2.8.3	Nível d'água em repouso de projeto .....	678
	14.2.8.4	Movimento do navio.....	679
	14.2.8.5	Irregularidades do fundo .....	679
	14.2.8.6	Folga líquida sob a quilha .....	679
	14.2.8.7	Crítério de otimização da profundidade.....	679
	14.2.8.8	Número de navios na área em estudo .....	681
	14.2.8.9	Variações de longo termo na onda.....	681
	14.2.8.10	Análise econômica.....	681
	14.2.8.11	A complexidade do problema .....	682
	14.2.8.12	Exemplo simplificado.....	682
14.3		Elementos básicos no projeto estrutural das obras de acostagem .....	685
	14.3.1	Considerações gerais .....	685
	14.3.2	Classificação do tipo estrutural .....	685
	14.3.2.1	Classificação.....	685
	14.3.2.2	Cais de gravidade.....	685
	14.3.2.3	Cais em cortinas de estacas-prancha .....	687
	14.3.2.4	Cais de paramento aberto.....	691
	14.3.2.5	Píeres estaqueados em estruturas discretas ...	691
	14.3.2.6	Rampas de terminais <i>Roll-on/Roll-off</i> (Ro/Ro) e <i>ferries</i> .....	692
14.4		Portos fluviais .....	692
	14.4.1	Considerações gerais .....	692
	14.4.2	Acesso e abrigo .....	702
	14.4.3	Obras de acostagem .....	703
14.5		Descrição de métodos construtivos de obras estaqueadas .....	708
	14.5.1	Construção do Píer I do Complexo Portuário de Ponta da Madeira (1980-1985).....	708
	14.5.2	Construção dos Berços Sul e Norte do Píer IV do Complexo Portuário de Ponta da Madeira (2010-2012) .....	716
	14.5.3	Construção do Berço 2 do Porto da Alumar em São Luís (MA) (2007-2009).....	724

14.5.4	Construção do Terminal da BTP no Porto de Santos (SP) (2010-2013) .....	732
14.6	Descrição de métodos construtivos de obras em parede vertical .	746
14.6.1	Construção do Berço 1 do Porto da Alumar em São Luís (MA) (1981-1984).....	746
14.6.2	Construção dos cinco salientes da Bacia Portuária de Sampierdarena no Porto de Genova (Itália) (1930-1937)	748
14.6.3	Construção do píer para atracação de navios carvoeiros e petroleiros de porte bruto até 60 mil tpb no Porto de La Spezia (Itália) (1960-1962 e 1969-1971).....	748
14.6.4	Construção de cais no Porto de Pasajes (Espanha) (1955-1959) .....	748
14.6.5	Construção de cais no Porto de Barcelona (Espanha) (1965-1969) .....	749
14.6.6	Construção de salientes no Porto Industrial de Taranto (Itália) (1962-1964 e 1970-1974).....	752
14.6.7	Construção da tomada d'água para o resfriamento dos condensadores da Usina Termoelétrica de Brindisi (Itália) (1966-1968 e 1972-1975).....	752
14.7	Construção de diques secos para construção e carenagem em estaleiros navais.....	752
14.7.1	Diques secos .....	752
14.7.2	Exemplos de obras de diques secos .....	756
14.7.2.1	Construção do dique seco para carenagem n.º 4 no Porto de Genova (Itália) (1935-1939).....	756
14.7.2.2	Construção do dique seco para carenagem n.º 5 no Porto de Genova (Itália) (1958-1962).....	756
14.7.2.3	Construção do dique seco para construção de navios de até 320 mil tpb no Estaleiro Naval de Monfalcone (Itália) (1965-1969).....	758
14.7.2.4	Construção do dique seco para construção de navios de até 300 mil tpb no Estaleiro Naval Breda de Venezia-Marghera (Itália) (1973-1974)	758
14.7.2.5	Construção do dique seco para carenagem de navios de até 300 mil tpb no Porto de Livorno (Itália) (1967-1975) .....	761
14.7.3	Carreiras .....	761
14.7.3.1	Construção da carreira n.º 4 para construção de navios do Estaleiro Naval de Castellammare di Stabia (Itália) (1957-1960).....	761
14.7.3.2	Construção da carreira para construção de navios do Estaleiro Naval de Riva Trigoso (Itália) (1974-1976) .....	763
14.7.4	Cais e píeres de acabamento e reparos .....	763
14.7.4.1	Construção do píer para reparos ou acabamento para navios de até 250 mil tpb do Porto de Genova (Itália) (1971-1973) .....	763
14.7.4.2	Construção do cais para acabamento de navios do Estaleiro Naval Breda no Porto Marghera (Itália) (1974) .....	763
14.7.4.3	Construção das obras do cais para acabamento de navios do Estaleiro Naval de Castellammare di Stabia (Itália) (1957-1958 e 1963-1964)...	763
14.7.4.4	Construção das obras de ancoragem para diques secos flutuantes no Porto de Palermo (Itália) (1956-1957) .....	765

	14.7.4.5	Construção das obras dos cais do complexo de carenagem do Porto de Livorno (Itália) (1975)	765
	14.7.4.6	Construção do píer para reparos de navios do Estaleiro Naval CNR em Palermo (Itália) (1955)	766
	14.7.4.7	Construção do píer para acabamento de navios do Estaleiro Naval de Castellammare di Stabia (Itália) (1958 e 1963-1964)	766
	14.7.5	Carreiras para lançamento lateral de cascos	766
14.8		Recomendações para a inspeção estrutural de obras de acostagem	766
	14.8.1	Recomendações norte-americanas (US Navy)	766
	14.8.2	Recomendações alemãs (DIN)	770
	14.8.3	Recomendações PIANC	771
14.9		Recuperação e reforço estrutural em cais	772
	14.9.1	Considerações gerais	772
	14.9.2	Inspeção visual subaquática	772
	14.9.3	Estudos geotécnicos	772
	14.9.4	Cálculo das estruturas	773
	14.9.5	Execução das obras	773
	14.9.6	Logística de execução	774
	14.9.7	Cuidados ambientais	775
14.10		Proteção contra erosão na fundação do cais	775
	14.10.1	Considerações gerais	775
	14.10.2	O sistema de colchões de concreto	776
15		Equipamentos de movimentação e instalações de armazenamento de cargas	777
	15.1	Introdução	778
	15.1.1	Considerações gerais	778
	15.1.2	Dimensões dos terminais	781
	15.1.2.1	Considerações gerais	781
	15.1.2.2	Cais e píeres	781
	15.1.2.3	Áreas dos terminais	782
	15.2	Berços para carga geral e terminais multipropósito	782
	15.2.1	Dimensionamentos	782
	15.2.1.1	Número de berços e comprimento do cais	782
	15.2.1.2	Área de estocagem e arranjo geral integral	783
	15.2.1.3	Terminais multipropósito	783
	15.2.2	Cota	784
	15.2.3	Larguras das plataformas	784
	15.2.4	Largura total da área no tardo da frente do cais	785
	15.2.5	Armazenamento coberto das cargas	785
	15.2.6	Pátios de estocagem	786
	15.2.7	Equipamento para movimentação de carga	786
	15.2.7.1	Considerações gerais	786
	15.2.7.2	Movimentação de carga entre a embarcação e a plataforma	788
	15.2.7.3	Movimentação de carga entre a plataforma e a área de estocagem	788
	15.2.7.4	Movimentação no interior das áreas de estocagem em trânsito	789
	15.2.7.5	Características de operação dos equipamentos	789
	15.2.7.6	Detalhes de projeto do berço	789
	15.3	Terminais de contêineres	796
	15.3.1	Considerações gerais	796
	15.3.2	Equipamentos do terminal de contêineres	800

15.3.3	Cota e largura da plataforma.....	805
15.3.3.1	Considerações gerais .....	805
15.3.3.2	Comprimento do cais e definição do número de portêineres.....	807
15.3.3.3	Área de operações no cais.....	807
15.3.3.4	Pátio de estocagem .....	807
15.3.3.5	Área de transferência e edificações.....	808
15.4	Terminais <i>Roll-on/Roll-off</i> e de <i>ferries</i> .....	811
15.4.1	Considerações gerais .....	811
15.4.2	Arranjo geral dos terminais Ro/Ro e de <i>ferries</i> .....	811
15.4.2.1	Caracterização.....	811
15.4.2.2	Instalações no berço de terminais Ro/Ro.....	811
15.4.2.3	Instalações nos terminais de <i>ferries</i> .....	817
15.4.3	Rampas e pontes .....	817
15.4.4	Proteção do fundo do berço.....	819
15.5	Terminais para granéis líquidos.....	819
15.5.1	Considerações gerais .....	819
15.5.2	Berços convencionais para óleo cru e derivados de petróleo e para gases liquefeitos refrigerados ou comprimidos .....	820
15.5.3	Estocagem de granéis líquidos .....	825
15.5.4	Terminais operando com boias.....	825
15.5.4.1	Terminal convencional com quadro de boias de amarração .....	825
15.5.4.2	Terminal com monoboia.....	827
15.6	Terminais para granéis sólidos.....	829
15.6.1	Considerações gerais .....	829
15.6.2	Terminais convencionais de exportação.....	831
15.6.3	Terminais convencionais de importação.....	831
15.6.3.1	Considerações gerais .....	831
15.6.3.2	Caçambas .....	847
15.6.3.3	Transportadores verticais .....	847
15.6.3.4	Sistemas pneumáticos.....	850
15.6.3.5	Capacidades de descarga .....	851
15.6.4	Movimentação e estocagem.....	851
15.6.4.1	Sistemas de transportadores.....	851
15.6.4.2	Empilhamento, estocagem e recuperação .....	851
15.6.5	Mesclagem, processamento e pesagem.....	852
15.7	Terminais e portos fluviais.....	852
15.8	Estaleiros navais.....	865
15.9	Bases de apoio logístico <i>offshore</i> .....	869
15.10	Porto ilha.....	869
15.11	Terminais pesqueiros.....	874
15.11.1	Considerações gerais .....	874
15.11.2	Tipos de portos pesqueiros .....	874
15.11.2.1	Atracadouros.....	874
15.11.2.2	Portos pesqueiros costeiros.....	875
15.11.2.3	Portos com distância de pesca próxima .....	875
15.11.2.4	Portos pesqueiros oceânicos.....	875
15.11.2.5	Dimensões típicas médias dos barcos na costa brasileira.....	875
15.11.3	Dimensões náuticas .....	876
15.11.3.1	Considerações gerais .....	876
15.11.3.2	Canais de acesso.....	876
15.11.3.3	Bacias e berços .....	876
15.11.4	Dimensões requeridas em terra.....	877
15.11.4.1	Área de operações no cais.....	877



	15.11.4.2 Manutenção e reparo dos barcos.....	878
	15.11.4.3 Fluxo do pescado .....	878
	15.11.4.4 Equipamentos de descarga.....	879
	15.11.4.5 Edificações e outras instalações.....	879
	15.11.4.6 Exemplos de instalações de portos pesqueiros	881
15.12	Marinas .....	886
15.13	Bases navais para Marinha de Guerra .....	890
	15.13.1 Considerações gerais .....	890
	15.13.2 Análise da frota que frequentará a base .....	890
	15.13.3 Concepção preliminar do tipo e do comprimento do cais	891
	15.13.4 Previsão para a bacia de estacionamento.....	891
	15.13.5 Previsão das instalações terrestres.....	892
	15.13.5.1 Considerações gerais .....	892
	15.13.5.2 Área administrativa .....	892
	15.13.5.3 Área militar .....	892
	15.13.5.4 Área operacional e industrial .....	892
	15.13.5.5 Área de equipamentos gerais e de apoio....	892
	15.13.5.6 Área de apoio a habitantes e frequentadores	
	da base.....	893
	15.13.5.7 Área residencial da vila militar.....	893
	15.13.5.8 Parque de tanques.....	893
	15.13.5.9 Estaleiros .....	893
	15.13.5.10 Exemplos de portos militares .....	894
15.14	Sistemas oceânicos .....	895
16	Funções, organização e planejamento portuário.....	901
	16.1 Funções de um porto .....	902
	16.2 Organização dos portos.....	902
	16.2.1 Considerações gerais .....	902
	16.2.2 Modelos de controle portuário.....	903
	16.2.2.1 Controle da União .....	903
	16.2.2.2 Controle dos estados ou municípios.....	903
	16.2.2.3 Autoridades portuárias autônomas	
	( <i>Landlord Port</i> ).....	903
	16.2.2.4 Controle privado ( <i>Captive Port</i> ) .....	904
	16.2.2.5 BOT ( <i>Built-Operate-Transfer</i> ).....	904
	16.2.3 Atividade portuária.....	904
	16.3 Mão de obra .....	913
	16.4 Tarifas portuárias .....	913
	16.5 A política de gestão integrada.....	914
	16.6 Planejamento portuário .....	915
	16.6.1 Considerações gerais .....	915
	16.7 Considerações sobre anteprojeto de dimensionamento	
	operacional.....	916
	16.7.1 Aspectos básicos .....	916
	16.7.2 Dimensionamento do número de berços .....	916
	16.7.3 Dimensionamento de instalações de armazenagem para	
	granéis .....	917
	16.7.4 Estudo logístico comparativo de embarque de soja .....	918
	16.8 Centro integrado de operação logística.....	918
	16.9 Controle de tráfego aquaviário.....	919
17	Tipos de obras de defesa dos litorais.....	925
	17.1 Introdução .....	926

17.1.1	Erosão costeira .....	926
17.1.2	Obras de defesa dos litorais .....	926
17.1.3	Intervenções não estruturais .....	926
17.2	Levantamento de dados para o projeto .....	926
17.3	As obras de defesa .....	926
17.3.1	Classificações genéricas .....	926
17.4	Obras longitudinais aderentes .....	927
17.4.1	Descrição .....	927
17.4.2	Funções .....	927
17.4.3	Limitações .....	927
17.4.4	Parâmetros funcionais do projeto .....	927
17.4.5	Materiais empregados .....	928
17.4.6	Modelos de obras longitudinais aderentes .....	928
17.5	Espigões .....	929
17.5.1	Descrição .....	929
17.5.2	Funções .....	937
17.5.3	Limitações .....	937
17.5.4	Utilização de espigão isolado .....	938
17.5.5	Utilização de um campo de espigões .....	939
17.5.6	Parâmetros funcionais do projeto .....	941
17.5.7	Materiais empregados .....	942
17.6	Quebra-mares costeiros .....	942
17.6.1	Descrição .....	942
17.6.2	Função .....	942
17.6.3	Funcionamento .....	942
17.6.4	Limitações .....	944
17.6.5	Parâmetros funcionais de projeto .....	945
17.6.6	Indicações para o estudo preliminar de um sistema de quebra-mares costeiros .....	945
17.6.7	Materiais empregados .....	945
17.7	Alimentação artificial das praias .....	945
17.7.1	Descrição .....	945
17.7.2	Funções .....	946
17.7.3	Limitações .....	946
17.7.4	Parâmetros funcionais de projeto .....	946
17.7.5	Modelos de engordamentos artificiais de praias .....	947
17.7.6	Aspectos da engenharia para a alimentação artificial de praia .....	952
17.7.6.1	Objetivos do projeto .....	952
17.7.6.2	Características do projeto .....	953
17.7.6.3	Berma praial .....	953
17.7.6.4	Alimentação da praia e conceito de praia alimentadora ou de transição .....	953
17.7.6.5	Estruturas existentes .....	954
17.7.6.6	Delimitação e extensão da alimentação .....	954
17.7.6.7	Interceptação das águas pluviais .....	954
17.7.6.8	Viabilização das potenciais jazidas de areia ...	954
17.7.6.9	Fatores ambientais nas áreas de empréstimo ..	955
17.7.6.10	Exploração da área de empréstimo .....	955
17.7.7	<i>Sand Engine</i> .....	957
17.8	Obras de proteção contra inundações e ação do vento .....	957
17.8.1	Diques .....	957
17.8.2	Fixação das dunas de areia .....	959
17.8.2.1	Descrição .....	959
17.8.2.2	Medidas para a fixação das dunas .....	960
17.9	Materiais não convencionais de contenção com geossintéticos ...	960
17.9.1	<i>Geotube</i> .....	960
17.9.2	Bolsacreto .....	964

18	Efeitos das obras costeiras sobre o litoral .....	967
18.1	Espigões .....	968
18.1.1	Descrição conceitual do impacto sobre a linha de costa ..	968
18.1.2	Exemplificação de obras de campos de espigões.....	969
18.2	Quebra-mares costeiros .....	977
18.2.1	Descrição conceitual do impacto sobre a linha de costa ..	977
18.2.2	Características funcionais de quebra-mar emerso costeiro	980
18.2.2.1	Quebra-mar situado ao largo.....	980
18.2.2.2	Quebra-mar costeiro.....	981
18.2.2.3	Quebra-mar de praia .....	981
18.2.3	Características funcionais de quebra-mares emersos segmentados .....	982
18.3	Alimentação artificial de praias .....	982
18.3.1	Dimensionamento conceitual para a alimentação artificial de praia .....	982
18.3.1.1	Elevação da berma.....	982
18.3.1.2	Largura da berma .....	983
18.3.1.3	Forma do perfil.....	983
18.3.1.4	Requisitos de volume do aterro .....	986
18.3.1.5	Realimentação periódica.....	986
18.3.1.6	Sobre-alimentação.....	987
18.3.1.7	Transições de aterro.....	987
18.3.1.8	Questões construtivas .....	988
18.3.1.9	Estruturas combinadas com a alimentação de praia .....	988
18.3.2	Exemplos de obras de alimentação artificial de praia ....	989
18.4	Instalação de comportas e solução integrada .....	989
18.5	Soluções analíticas do modelo de uma linha para as mudanças da linha de costa.....	991
18.5.1	Considerações gerais .....	991
18.5.2	Descrição da teoria de uma linha.....	992
18.5.3	Soluções para a evolução de linha de costa no tempo sem a presença de estruturas costeiras .....	994
18.5.3.1	Praia em forma semicircular .....	994
18.5.3.2	Vazão de descarga de sedimentos a partir de um rio funcionando como fonte pontual.....	994
18.5.3.3	Vazão de descarga de sedimentos a partir de um rio funcionando com largura finita .....	996
18.5.4	Soluções para a evolução de linha de costa no tempo com a presença de estruturas costeiras rígidas.....	997
18.5.4.1	Modificação da linha de costa junto a um muro de praia .....	997
18.5.4.2	Modificação da linha de costa por espigões e molhes .....	999
18.5.4.3	Modificação da linha de costa por um campo de espigões previamente preenchido.....	1003
18.5.4.4	Modificação da linha de costa por um quebra-mar costeiro .....	1003
18.5.4.5	Modificação da linha de costa por um aterro retangular de dimensão finita.....	1004
18.5.4.6	Modificação da linha de costa por um aterro triangular .....	1006
18.5.4.7	Modificação da linha de costa por um extenso aterro de praia com uma brecha .....	1006

18.5.4.8	Modificação da linha de costa ao fim de um aterro de praia retangular semi-infinito na área de $x > 0$ .....	1006
18.5.4.9	Modificação da linha de costa por um aterro de praia retangular semi-infinito na área $x > 0$ na praia adjacente com a manutenção da largura inicial .....	1008
18.5.4.10	Modificação da linha de costa por um aterro de praia retangular semi-infinito na área $x < 0$ na praia adjacente com a manutenção da largura inicial .....	1008
18.5.4.11	Modificação da linha de costa por um corte de forma retangular em praia .....	1008
18.6	Projeto de alimentação artificial de praia com função protetiva ..	1008
18.6.1	Considerações gerais .....	1008
18.6.2	Fator de sobre-enchimento $R_A$ .....	1009
18.6.3	Fator de realimentação $R_j$ .....	1010
18.7	Arenoduto.....	1011
18.7.1	Descrição dos objetivos da instalação do “Sabbiodotto di Riccione”, na Itália.....	1011
18.7.2	Premissas .....	1012
18.7.3	As obras.....	1013
19	Tipos de obras em embocaduras marítimas.....	1019
19.1	Princípios das obras de controle e aproveitamento dos estuários	1020
19.1.1	Princípios gerais.....	1020
19.1.1.1	Comportamento de circulação estratificação ..	1020
19.1.1.2	Princípios gerais de comportamento.....	1020
19.2	Métodos de controle.....	1021
19.3	Controle hidráulico .....	1021
19.3.1	Revestimentos de margem.....	1021
19.3.2	Diques direcionadores.....	1021
19.3.3	Espigões .....	1027
19.3.4	Aumento do volume do prisma de maré.....	1027
19.3.5	Alterações da defasagem entre variações de níveis e velocidades.....	1029
19.3.6	Delimitações lagunares .....	1029
19.3.6.1	Bacias intermediárias.....	1029
19.3.6.2	Bacias de baixa profundidade.....	1029
19.4	Controle do transporte de sedimentos .....	1029
19.4.1	Controle do fluxo de sólidos.....	1029
19.4.1.1	Transporte por arrastamento de fundo.....	1029
19.4.1.2	Sedimentos em suspensão .....	1030
19.5	Exemplos de obras em embocaduras estuarinas e seus impactos	1030
19.6	Eventos extremos.....	1037
19.6.1	Alguns casos portuários brasileiros .....	1037
19.6.2	<i>Storm surge barriers</i> .....	1039
19.6.2.1	Considerações gerais .....	1039
19.6.2.2	Caracterização de estruturas de <i>storm surge barriers</i> .....	1041
19.6.2.3	Funções principais e características.....	1046
19.6.2.4	Estimativa de custo.....	1049
19.6.2.5	<i>Oosterscheldekering Storm Surge Barrier</i> (em inglês, Eastern Scheldt, Países Baixos).....	1049

	19.6.2.6	<i>Maeslantkering</i> (Porto de Rotterdam, Países Baixos) .....	1058
	19.6.2.7	<i>Storm surge barrier</i> inflável de Ramspol .....	1061
	19.6.2.8	<i>Storm surge barrier</i> de St. Petersburg (Rússia) .....	1061
	19.6.2.9	<i>Storm surge barrier</i> do Tâmis (Reino Unido) ..	1070
	19.6.2.10	<i>Progetto MOSE</i> (Veneza, Itália) .....	1070
	19.6.2.11	Portas Vincianas na boca de Porto de Cesenatico (Itália) .....	1075
	19.6.3	Obras de defesa no Japão .....	1076
19.7		Obra de transpasse de areias ( <i>sand by-pass</i> ) .....	1079
20		Dispersão aquática de efluentes .....	1085
20.1		Emissários submarinos .....	1086
20.2		Conceituação sobre o comportamento de vazamentos de óleo ...	1086
20.3		Processo de licenciamento ambiental .....	1096
20.4		Impacto ambiental e gerenciamento ambiental integrado .....	1098
20.4.1		Impacto ambiental causado por emissário submarino ...	1098
20.4.2		Exemplo de utilização de modelação matemática para descargas de efluentes .....	1101
	20.4.2.1	Considerações gerais .....	1101
	20.4.2.2	Definição de modelo .....	1102
	20.4.2.3	Diluição inicial .....	1103
20.4.3		Características ambientais .....	1104
20.4.4		Recomendações para o pré-tratamento de efluentes de emissários .....	1105
20.4.5		Principais procedimentos a serem considerados no projeto de emissários .....	1107
20.4.6		Monitoramento de emissários submarinos .....	1108
20.4.7		Precauções na construção e na manutenção de emissários e estações de tratamento .....	1108
20.5		Avaliação em modelo físico do emissário de Santos (SP) .....	1111
 <b>PARTE 4</b>			
		OBRAS HIDROVIÁRIAS .....	1113
21		Obras de escavação submersas .....	1115
21.1		Dragagem .....	1116
21.1.1		Introdução .....	1116
21.1.2		Dragas mecânicas .....	1116
	21.1.2.1	Caracterização .....	1116
	21.1.2.2	Pá de arrasto ( <i>dragline</i> ) .....	1118
	21.1.2.3	Draga mecânica de colher .....	1119
	21.1.2.4	Draga de çaçamba de mandíbulas ( <i>clamshell</i> ou <i>orange peel</i> ) .....	1119
	21.1.2.5	Draga escavadeira flutuante ( <i>dipper</i> ) .....	1120
	21.1.2.6	Draga de alcatruzes ( <i>bucket ladder</i> ) .....	1121
21.1.3		Dragas hidráulicas .....	1124
	21.1.3.1	Caracterização e hidráulica aplicada à dragagem .....	1124
	21.1.3.2	Draga estacionária de sucção e recalque .....	1128
	21.1.3.3	Draga autotransportadora de sucção e arrasto ( <i>trailing suction</i> ou <i>hopper</i> ) .....	1132
	21.1.3.4	Processos alternativos de dragagem .....	1140
	21.1.3.5	Características de operação das dragas em função do solo .....	1140

21.1.3.6	Embarcações auxiliares.....	1143
21.1.3.7	Linhas de recalque.....	1143
21.1.3.8	Hidrociclone.....	1145
21.1.3.9	Lâmina regularizadora do fundo.....	1145
21.1.4	Eficiência da dragagem na operação com dragas <i>hopper</i>	1145
21.1.5	Trabalhos necessários para a execução de dragagem de implantação em áreas de navegação.....	1147
21.1.6	Medições dos volumes dragados.....	1148
21.2	Derrocamento.....	1149
21.2.1	Considerações gerais.....	1149
21.2.2	Métodos de derrocamento.....	1149
21.2.2.1	Desmante mecânico.....	1149
21.2.2.2	Desmante com explosivos.....	1150
21.3	Gestão ambiental de dragados não inertes.....	1161
21.4	Estudo de caso da avaliação do processo de assoreamento no canal de acesso e bacia de evolução do porto da Alumar, em São Luís (MA).....	1165
21.4.1	Considerações gerais.....	1165
21.4.2	Histórico das dragagens na Alumar.....	1165
21.4.3	Dragagem de manutenção.....	1166
21.4.4	Levantamento de dados.....	1167
21.4.5	Metodologia.....	1167
21.4.6	Resultados.....	1168
21.4.7	Evolução dos fundos.....	1170
21.4.8	Taxas de sedimentação.....	1170
21.4.9	Volumes sedimentados.....	1170
21.4.10	Dragagem de manutenção.....	1172
21.4.11	Conclusões.....	1173
21.5	Exemplos de cálculos sobre dragagem.....	1173
21.5.1	Aterro hidráulico.....	1173
21.5.1.1	Enunciado.....	1173
21.5.1.2	Dimensionamento da draga de sucção e recalque.....	1174
21.5.1.3	Dimensionamento da draga <i>hopper</i> .....	1175
21.5.1.4	Dimensionamento dos <i>boosters</i> .....	1175
21.5.1.5	Itens para o orçamento da obra (operação)....	1175
21.5.1.6	Itens para o orçamento da obra (paralisação) .	1176
21.5.1.7	Cronograma.....	1177
21.5.2	Comparação de dragas para emprego em manutenção de gabarito geométrico junto de obras.....	1177
21.5.2.1	Premissas.....	1177
21.5.2.2	Draga de sucção e recalque.....	1177
21.5.2.3	<i>Trailing suction hopper dredger</i> de pequeno porte.....	1178
21.5.2.4	<i>Suction hopper dredger</i> de pequeno porte.....	1179
21.5.2.5	Avaliação dos equipamentos.....	1179
21.5.3	Relação entre volume medido em cisterna de draga <i>hopper</i> e volume medido <i>in situ</i> .....	1180
21.5.3.1	Dados disponíveis.....	1180
21.5.3.2	Cálculo dos parâmetros de dragagem.....	1180
21.5.3.3	Conclusão da análise.....	1180
21.6	Equipamentos de dragagem para alimentação artificial de praia .	1181
21.6.1	Descrição geral.....	1181
21.6.2	Exemplos de dragas recomendadas.....	1181
21.6.3	Equipamentos auxiliares.....	1183
21.6.3.1	Bocas de dragagem.....	1183

	21.6.3.2	Métodos de descarga por bombeamento .....	1184
	21.6.3.3	Equipamentos de terraplenagem.....	1188
21.7		Performance da dragagem com dragas <i>hopper</i> .....	1188
21.8		Aspectos gerais da ressuspensão de sedimentos por dragagem ..	1190
21.9		Uso da válvula verde em dragas <i>hopper</i> .....	1195
21.10		Exemplo de uma dragagem ambiental – canal de Piaçaguera.....	1196
21.11		Exemplo de uma obra de derrocamento.....	1196
	21.11.1	Metodologia de execução .....	1196
	21.11.2	Premissas na formação dos preços.....	1197
	21.11.3	Condições gerais.....	1197
	21.11.3.1	Do contratante (normalmente) .....	1197
	21.11.3.2	Da empresa.....	1197
	21.11.4	Equipamentos.....	1197
	21.11.5	Quantificação de pessoal.....	1197
	21.11.5.1	Equipe para serviços de escavação para o turno .....	1197
	21.11.5.2	Pessoal administrativo e apoio geral .....	1197
	21.11.6	Planejamento da atividade.....	1197
	21.11.6.1	Mobilização .....	1197
	21.11.6.2	Posicionamento .....	1197
	21.11.6.3	Sequência de perfuração.....	1197
	21.11.6.4	Detalhes do carregamento .....	1198
	21.11.7	Planejamento das medidas de segurança a serem adotadas no processo.....	1198
22		Dimensões náuticas hidroviárias .....	1199
22.1		Embarcações fluviais .....	1200
	22.1.1	Considerações gerais .....	1200
	22.1.2	Características das embarcações fluviais .....	1201
	22.1.3	Automotores .....	1201
	22.1.4	Empurradores.....	1205
	22.1.5	Chatas.....	1207
	22.1.6	Comboios de empurra .....	1210
	22.1.7	Embarcações especializadas .....	1214
	22.1.8	Características das embarcações fluviais contemporâneas .....	1214
	22.1.8.1	Generalidades .....	1214
	22.1.8.2	Dimensões .....	1214
	22.1.8.3	Formas do casco.....	1214
	22.1.8.4	Propulsão .....	1215
	22.1.8.5	Sistema de manobra .....	1215
	22.1.8.6	Visibilidade.....	1215
	22.1.8.7	Tripulações.....	1216
	22.1.8.8	Custos operacionais .....	1216
	22.1.8.9	Comunicações e auxílios à navegação .....	1216
22.2		Dimensões básicas das hidrovias.....	1216
	22.2.1	Considerações gerais sobre a adaptação das embarcações às vias navegáveis .....	1216
	22.2.2	Profundidade mínima .....	1216
	22.2.3	Largura mínima .....	1217
	22.2.4	Área mínima da seção molhada .....	1217
	22.2.5	Raio de curvatura a partir do eixo do canal .....	1218
	22.2.6	Vão e altura livres nas pontes .....	1219
	22.2.7	Velocidade máxima das águas.....	1220
	22.2.8	Gabaritos propostos pelo Ministério dos Transportes ...	1220
22.3		Estruturas especiais de canais artificiais para a navegação.....	1220
22.4		Obras de melhoramento hidroviário para a navegação.....	1226

22.5	Sinalização hidroviária .....	1230
22.6	Simulações em modelo físico e matemático.....	1232
23	Obras de melhoramento hidroviário para a navegação .....	1235
23.1	Importância da navegação interior e técnicas de melhoramentos	1236
23.1.1	Caracterização geral da importância da navegação interior em nível global .....	1236
23.1.2	A rede hidroviária interior no Brasil e na América do Sul	1236
23.1.3	A rede hidroviária europeia.....	1236
23.1.4	Aspectos da rede hidroviária interior francesa .....	1241
23.1.5	Aspectos da rede hidroviária interior alemã.....	1241
23.1.6	Aspectos da rede hidroviária interior dos Países Baixos .	1241
23.1.7	Aspectos da rede hidroviária interior belga.....	1241
23.1.8	Aspectos da rede hidroviária interior norte-americana ..	1242
23.1.9	Técnicas de melhoramento das hidrovias interiores .....	1242
23.1.9.1	Considerações gerais .....	1242
23.1.9.2	Melhoramentos menores .....	1242
23.1.9.3	Melhoramentos maiores.....	1243
23.1.9.4	Classificação dos processos de melhoramento	1243
23.1.9.5	Abandono do leito menor: derivação e canalização.....	1243
23.1.9.6	Conservação do leito menor: Melhoramento a corrente livre e derrocamento .....	1243
23.1.10	Melhoramentos em corrente livre.....	1243
23.1.10.1	Considerações gerais .....	1243
23.1.10.2	Concentração das águas em leito único.....	1243
23.1.10.3	Eficácia do método .....	1245
23.1.11	Derrocamento.....	1245
23.1.11.1	Corredeiras.....	1245
23.1.11.2	Método de melhoramento das corredeiras .....	1245
23.1.11.3	Método da barragem.....	1245
23.1.11.4	Método da derivação eclusada .....	1246
23.1.11.5	Método de regularização do próprio leito .....	1246
23.1.12	Regularização de vazões por meio de reservatórios – canalização.....	1247
23.1.12.1	Considerações gerais .....	1247
23.1.12.2	Melhoramento dos lagos.....	1247
23.1.12.3	Localização e disposição dos reservatórios de barragens .....	1247
23.1.12.4	Barragens mistas para navegação e geração de energia hidrelétrica.....	1248
23.1.12.5	Aspectos construtivos das barragens móveis em vias navegáveis .....	1250
23.1.12.6	Passos navegáveis .....	1251
23.1.13	Canais.....	1252
23.1.13.1	Considerações gerais .....	1252
23.1.13.2	Canais laterais.....	1252
23.1.13.3	Canais de partilha .....	1252
23.1.13.4	Traçado em planta dos canais.....	1253
23.1.13.5	Perfil longitudinal .....	1254
23.1.13.6	Seção transversal.....	1254
23.1.13.7	Seção corrente.....	1257
23.1.13.8	Seções particulares.....	1257
23.1.13.9	Sobrelargura nas curvas .....	1257



	23.1.13.10 Alterações de profundidade.....	1258
	23.1.13.11 Cruzamento de vias terrestres .....	1258
	23.1.13.12 Cruzamento com rios .....	1258
23.2	Obras de normalização .....	1259
23.2.1	Considerações gerais .....	1259
23.2.2	Desobstrução e limpeza .....	1259
23.2.3	Limitação dos leitos de inundação .....	1259
23.2.4	Bifurcação fluvial e confluência de tributários.....	1260
	23.2.4.1 Bifurcação fluvial.....	1260
	23.2.4.2 Confluência de tributários .....	1261
	23.2.4.3 Barragens móveis .....	1261
23.2.5	Obras de proteção de margens .....	1262
	23.2.5.1 Considerações gerais .....	1262
	23.2.5.2 Elementos básicos.....	1262
	23.2.5.3 Classificação dos métodos de proteção de margem .....	1262
	23.2.5.4 Métodos diretos .....	1263
	23.2.5.5 Métodos indiretos .....	1272
23.2.6	Retificação de meandros.....	1273
23.2.7	Obras de proteção de pilares de pontes.....	1275
	23.2.7.1 Considerações gerais .....	1275
	23.2.7.2 Alternativas de proteções.....	1280
	23.2.7.3 Alargamento do vão principal de navegação... ..	1280
23.3	Obras de regularização do leito .....	1281
23.3.1	Considerações gerais .....	1281
23.3.2	Regularização em fundo fixo .....	1281
	23.3.2.1 Princípios gerais.....	1281
	23.3.2.2 Tipos de obras.....	1281
23.3.3	Regularização em fundo móvel.....	1282
	23.3.3.1 Princípios gerais.....	1282
	23.3.3.2 Tipos de obras.....	1284
	23.3.3.3 Diques .....	1294
23.4	Intervenções para prevenir e conter as erosões por remoção em massa .....	1314
23.4.1	Considerações gerais .....	1314
23.4.2	Medidas e obras na zona de formação.....	1314
23.4.3	Medidas e obras na zona de movimentação.....	1315
23.4.4	Medidas e obras na zona de depósito.....	1322
23.4.5	Exemplo de arranjo de obras na zona de movimentação e deposição.....	1322
23.5	Seção de escoamento das barragens móveis.....	1327
23.5.1	Âmbito .....	1327
23.5.2	Objetivo da barragem móvel .....	1327
23.5.3	Manobras de operação de uma barragem móvel.....	1327
23.5.4	Relação entre $S$ e $H_0$ .....	1328
23.5.5	Hidrologia do curso d'água .....	1328
23.5.6	Custo da obra.....	1328
23.5.7	Otimização do número de barragens $n$ .....	1328
23.6	Escolha entre a canalização de um rio e um canal lateral artificial	1328
23.6.1	Âmbito .....	1328
23.6.2	Raciocínio elementar .....	1329
23.6.3	Análise detalhada do problema .....	1329
23.7	Transposição de um divisor de águas.....	1331
23.7.1	Considerações gerais .....	1331
23.7.2	Estudo do custo das eclusas.....	1332
	23.7.2.1 Despesas de construção .....	1332
	23.7.2.2 Despesas de operação .....	1332

23.7.2.3	Potência de bombeamento.....	1332
23.7.2.4	Despesas de operação do bombeamento .....	1333
23.7.2.5	Capitalização das despesas anuais .....	1333
23.7.2.6	Valor do tempo .....	1333
23.7.2.7	Custo atualizado das eclusas para comboios de 3.000 t para 100 m de queda e 5 milhões de t de tráfego anual em vinte anos .....	1333
23.7.2.8	Custo atualizado integral do traçado AC e DB..	1333
23.7.3	Custo atualizado integral do traçado AC DB em subterrâneo de navegação .....	1334
23.7.4	Comparação dos dois traçados .....	1334
23.7.5	Considerações sobre comparações de traçados variando as hipóteses básicas .....	1334
23.7.6	Sobre a utilização dos subterrâneos.....	1336
23.8	Canal de Pereira Barreto (SP) .....	1337
23.8.1	Considerações gerais .....	1337
23.8.2	Dimensões da seção .....	1337
23.8.3	Declividade de fundo .....	1338
23.8.4	Rugosidade.....	1338
23.9	Portos fluviais .....	1338
23.9.1	Considerações gerais .....	1338
23.9.2	Requisitos para um porto hidroviário interior público ...	1340
23.9.3	Peculiaridades na seleção do local para um porto hidroviário interior .....	1341
23.10	Exemplo de pequenas carreiras fluviais .....	1341
23.10.1	Considerações preliminares .....	1341
23.10.2	Descrição das carreiras .....	1341
24	Obras de transposição de desnível com eclusas e capacidade de tráfego hidroviário.....	1343
24.1	Princípio de funcionamento das eclusas de navegação.....	1344
24.1.1	Caracterização geral .....	1344
24.1.2	Critérios de projeto.....	1357
24.2	Dimensões típicas das eclusas .....	1367
24.2.1	Eclusas brasileiras.....	1367
24.2.2	Eclusas da Europa Norte Ocidental.....	1369
24.2.2.1	Eclusas dos Países Baixos .....	1369
24.2.2.2	Eclusas da Bélgica .....	1373
24.2.3	Eclusas da França, de Portugal, da Áustria e do Danúbio .	1378
24.2.4	Eclusas norte-americanas, russas e chinesas .....	1380
24.3	Segurança nas eclusagens.....	1380
24.4	Equipamentos das eclusas de navegação .....	1382
24.4.1	Considerações gerais .....	1382
24.4.2	Portas .....	1382
24.4.3	Válvulas .....	1383
24.4.4	Equipamentos complementares de controle e segurança	1386
24.5	Funcionamento hidráulico das eclusas .....	1386
24.5.1	Considerações gerais .....	1386
24.5.2	Descrição do escoamento de enchimento.....	1387
24.5.3	Condições de aproximação ao emboque da tomada d'água.....	1389
24.5.4	Condições de escoamento nos aquedutos das válvulas...	1389
24.5.5	Condições de distribuição das vazões nos aquedutos de alimentação .....	1389

	24.5.6	Manobras das válvulas.....	1393
	24.5.7	Economizadores de água.....	1394
24.6		Capacidade de tráfego das eclusas.....	1394
	24.6.1	Considerações gerais.....	1394
	24.6.2	Estimativa da capacidade de tráfego das eclusas.....	1395
	24.6.3	Fatores a considerar no tempo de transposição total....	1395
	24.6.4	Estimativa do esforço em um cabo de amarração.....	1396
	24.6.5	Pré-dimensionamento de frota em uma hidrovia.....	1400
24.7		O Canal do Panamá.....	1400
25		Obras de arte e equipamentos especiais da infraestrutura associada à navegação hidroviária interior.....	1401
	25.1	Considerações iniciais.....	1402
	25.2	Elevadores de embarcações.....	1402
	25.2.1	Generalidades.....	1402
	25.2.2	Ascensores com êmbolos.....	1402
	25.2.3	Ascensores funiculares.....	1404
	25.2.3.1	Ascensor Niederfinow.....	1404
	25.2.3.2	Ascensor de Strépy-Thieu.....	1404
	25.2.3.3	Ascensor da barragem de Três Gargantas no Rio Yangtzé.....	1416
	25.2.4	Ascensores com grandes flutuantes.....	1416
	25.2.5	Elevador em rampa funicular longitudinal.....	1416
	25.2.5.1	Considerações gerais históricas.....	1416
	25.2.5.2	Elevador de Ronquières.....	1417
	25.2.5.3	Rolamento.....	1420
	25.2.5.4	Cabos.....	1420
	25.2.5.5	Contrapeso.....	1420
	25.2.5.6	Guias laterais.....	1420
	25.2.5.7	Modo de tração.....	1420
	25.2.5.8	Isolamento térmico.....	1420
	25.2.5.9	Comportas.....	1420
	25.2.5.10	Energia hidrelétrica e suprimento de água autônomos.....	1420
	25.2.5.11	Docas.....	1421
	25.2.5.12	Controle automatizado.....	1421
	25.2.6	Elevador em rampa funicular transversal.....	1421
	25.2.7	Elevador em rampa com cremalheira.....	1422
	25.2.8	Elevador com movimento circular das cubas.....	1422
	25.2.9	Rampa hidráulica.....	1422
	25.3	Aquedutos (pontes-canais).....	1423
	25.4	Vãos móveis de pontes de travessia em hidrovia.....	1425
	25.5	Comportas de segurança (ou de guarda).....	1425
	25.5.1	Comporta de Segurança de Blanc Pain.....	1425
	25.5.1.1	Generalidades.....	1425
	25.5.1.2	Descrição das estruturas.....	1430
	25.5.2	Comporta de Segurança de Blaton-Bernissart (Bélgica)..	1431
	25.6	Anteparas de barragens móveis.....	1433
	25.7	Subterrâneos de navegação ou túneis hidroviários.....	1433
	25.7.1	Considerações gerais.....	1433
	25.7.2	Subterrâneos de navegação que permitem o cruzamento	1437
	25.7.3	Subterrâneo duplo.....	1437
	25.7.4	Princípios dos subterrâneos ativos.....	1437
	25.8	Estações de bombeamento.....	1438

**PARTE 5**

ADAPTAÇÃO DO TRANSPORTE AQUAVIÁRIO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	1439
26 Indutores, impactos e mitigação na infraestrutura aquaviária marítima, portuária e hidroviária interior .....	1441
26.1 Considerações gerais sobre os paradigmas do transporte aquaviário.....	1442
26.2 A aquavia como instrumento de transporte .....	1442
26.3 O vetor d'água .....	1443
26.4 A luta contra as inundações.....	1443
26.5 Atividades relativas à aquavia.....	1443
26.6 O papel da aquavia no desenvolvimento territorial sustentável ..	1443
26.7 Alterações climáticas globais.....	1444
26.8 Potenciais impactos sobre a navegação e os portos marítimos ...	1445
26.9 Potenciais impactos sobre a navegação hidroviária interior.....	1445
26.10 Perspectivas de oportunidades para a navegação e a atividade portuária em termos de adaptação às mudanças climáticas.....	1449
26.11 As diretrizes.....	1450
Bibliografia .....	1453
Pequeno glossário de termos náuticos e portuários .....	1471
Lista de termos.....	1495

# *HIDRÁULICA MARÍTIMA*



*Modelo físico da Barra Lagunar de Cananeia (SP) para estudos de melhoramentos para a navegação (1955 a 1972).  
Escala horizontal 1:400, escala vertical 1:100, com simulação da maré, geração de ondas e fundo móvel.*

## **THE TEN COMMANDMENTS FOR COASTAL PROTECTION**

- I      Thou shalt love thy shore and beach.**
- II     Thou shalt protect it gainst the evils of erosion.**
- III    Thou shalt protect it wisely, yea, verily and work with nature.**
- IV    Thou shalt avoid that nature turns its full forte gainst ye.**
- V     Thou shalt plan carefully in thy own interest and in the interest of thine neighbour.**
- VI    Thou shalt love thy neighbour's beach as thou lovest thine own beach.**
- VII   Thou shalt not steal thy neighbour's property, neither shalt thou cause damage to his property by thine own protection.**
- VIII  Thou shalt do thy planning in cooperation with thy neighbour and he shalt do it in cooperation with his neighbour and thus forth. So be it.**
- IX    Thou shalt maintain what thou has built up.**
- X     Thou shalt show forgiveness for the sins of the past and cover them with sand. So help thee God.**

*Per Bruun (1972)*

# LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	amplitude da onda, aceleração centrípeta orbital, parâmetro do espectro JONSWAP, parâmetro de forma da distribuição de Weibull, amplitude da maré	$K_t$	coeficiente de transmissão da onda
$a_B$	amplitude orbital (metade da excursão total) das partículas fluidas no topo da camada limite oscilatória (aproximadamente no fundo)	$K_z$	fator de resposta de pressão das ondas
$a'$	compacidade dos sedimentos	$l$	comprimento de uma bacia portuária
$A$	semieixo horizontal do movimento orbital em onda de oscilação, parâmetro utilizado por Keulegan na análise de cunha salina estacionária em estuários, fator de amplificação em onda estacionária, parâmetro dos espectros tipo Pierson e Moskowitz e do espectro de Darbyshire	$L$	comprimento da onda
$B$	semieixo vertical do movimento orbital em onda de oscilação, comprimento em baixa-mar para a máxima salinidade oceânica atingir a extremidade oceânica do estuário, largura de abertura em um quebra-mar (brecha), largura do coroamento de um maciço, parâmetro dos espectros tipo Pierson e Moskowitz e do espectro de Neumann	$L'_0$	comprimento de onda em água profunda sem refração
$c$	celeridade, ou velocidade de propagação, ou velocidade de fase das ondas	$L_0$	comprimento de cunha salina
$c_g$	celeridade de grupo de ondas, ou velocidade de propagação da energia total das ondas (no fluxo de energia)	$m$	declividade da praia, momento espectral, quociente entre velocidade de corrente e celeridade, número de nós de oscilação estacionária na direção transversal de uma bacia portuária
$C$	coeficiente de Chézy	$M$	massa, transporte de sedimentos litorâneos longitudinal em volume anual
$C_f$	coeficiente de transmissão da onda	$n$	relação entre a velocidade de grupo e a de fase das ondas, coeficiente de Manning, número de nós de oscilação estacionária na direção longitudinal de uma bacia portuária
$D_i$	diâmetro de sedimento com $i\%$ em peso de diâmetro menor	$N$	número de ondas numa tempestade, parâmetro utilizado por Ippen na análise de estuários misturados
$D'_0$	coeficiente de difusão aparente	$p$	pressão das ondas, parâmetro de arrebentação de Swart, função densidade de probabilidade
$E$	energia contida em uma onda por unidade de área, espectro de densidade de energia da onda em função da frequência, probabilidade de encontro esperada	$P$	potência contida em uma onda por unidade de largura
$E_T$	energia contida em uma onda por unidade de largura (comprimento de crista)	$P()$	probabilidade de excedência de um parâmetro
$f$	frequência. Encimado por uma barra corresponde à frequência média	$Q$	vazão líquida
$F$	pista de sopro ( <i>fetch</i> ), borda livre	$Q()$	probabilidade acumulada de um parâmetro
$F_g$	força gravitacional	$Q_d$	vazão de transporte de sedimentos litorâneos longitudinal rumando para a direita da praia de quem olha para o mar
$F_0$	parâmetro de <i>fetch</i> adimensional	$Q_e$	vazão de transporte de sedimentos litorâneos longitudinal rumando para a esquerda da praia de quem olha para o mar
$g$	aceleração da gravidade	$Q_g$	vazão de transporte de sedimentos litorâneos longitudinal global
$G$	constante universal de gravitação, função de dispersão direcional do espectro direcional de onda	$Q_s$	vazão de transporte de sedimentos litorâneos longitudinal resultante
$h$	profundidade d'água	$r$	intervalo de tempo entre registros sucessivos de amostragem das ondas, ângulo agudo de refração da direção da frente de onda com a direção da corrente
$H$	altura da onda. Quando encimado por uma barra horizontal corresponde à altura média de onda	$R$	distância entre dois corpos que se atraem, vazão de água doce
$H'_0$	altura de onda em água profunda sem refração	$Re$	número de Reynolds densimétrico
$H_p$	onda de projeto	$s$	salinidade, desvio-padrão
$i$	ângulo agudo de incidência da direção da frente de onda com a direção da corrente	$S$	área de seção transversal, função densidade da variância espectral com a frequência da onda
$J$	declividade da superfície livre	$t$	ordenada temporal
$k$	número de onda, parâmetro do espectro ITTC	$t_B$	instante, contado a partir da baixa-mar, em que se atinge a salinidade oceânica na extremidade oceânica do estuário
$K_d$	coeficiente de difração	$T$	período de cruzamento do zero ou de maré. Quando encimado por uma barra horizontal corresponde a período médio
$K_f$	coeficiente de reflexão	$T_p$	período de pico do espectro de onda. Encimado por uma barra corresponde ao período médio
$K_r$	coeficiente de refração das ondas	$T_v$	vida útil de uma obra
$K_s$	coeficiente de empolamento das ondas	$T_z$	período médio de onda de oscilação, período de cruzamento do zero
		$u$	componente horizontal da velocidade orbital da onda de oscilação, velocidade longitudinal
		$u_B$	máximo valor da velocidade orbital das partículas fluidas no topo da camada limite oscilatória (aproximadamente no fundo)

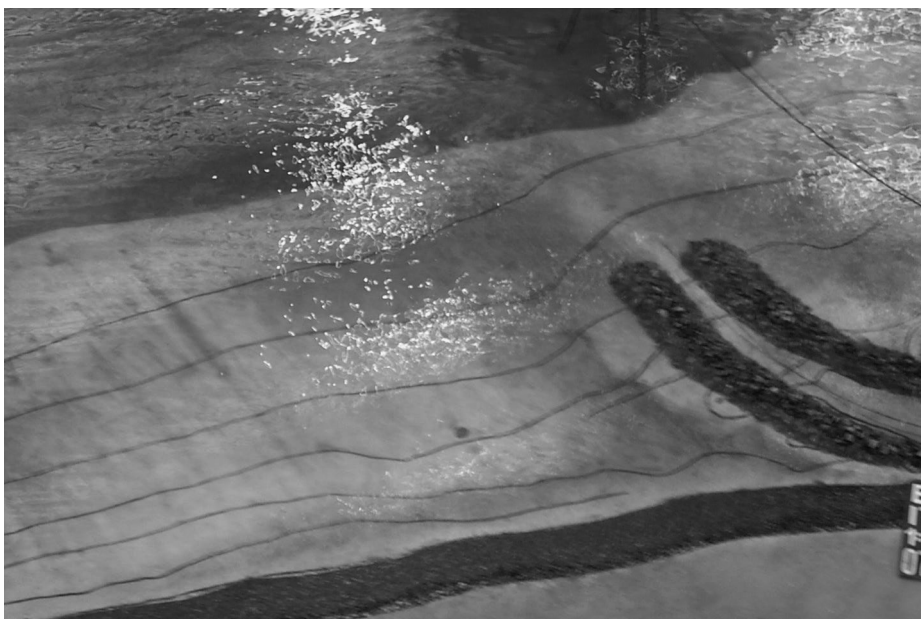
$U$	velocidade do vento a uma altura padrão de 10 m sobre o nível d'água, velocidade de transporte de massa pelas ondas curtas	$\theta$	fase da onda de oscilação, defasagem angular entre o nível e a velocidade em uma onda de maré, rumo de propagação de onda, ângulo de atrito
$U_*$	velocidade de atrito do vento	$\lambda$	comprimento de onda de maré, parâmetro de forma do espectro de Ochi e Hubble
$U_A$	velocidade ajustada do vento a dez metros acima do nível do mar	$\mu$	viscosidade dinâmica
$V$	velocidade de corrente litorânea longitudinal gerada na arrebentação das ondas, velocidade de corrente	$\nu$	viscosidade cinemática do fluido, parâmetro de largura do espectro de energia das ondas
$V_r$	velocidade de água doce	$\xi$	parâmetro de semelhança da arrebentação de Battjes
$V\Delta$	velocidade densimétrica	$\rho$	massa específica do fluido
$w$	componente vertical da velocidade orbital da onda de oscilação	$\rho_s$	massa específica dos grãos pesados ao ar
$W$	largura de estuário	$\sigma$	parâmetro de largura do espectro JONSWAP, frequência angular da maré, desvio-padrão
$x$	ordenada horizontal	$\sigma'$	coeficiente de variação
$z$	ordenada vertical	$\tau_s$	tensão de arrastamento de estabilização sobre o fundo exercida pelas correntes
$Z_0$	distância vertical entre o <i>datum</i> e o nível médio do mar	$\varphi$	função a potencial de velocidades
$\alpha$	ângulo formado pelas cristas das ondas com a isóbata, ângulo com a horizontal de um talude, constante de Phillips	$\phi$	funções espectrais
$\alpha^*$	parâmetro do espectro JONSWAP derivado aproximadamente por Goda	$\omega$	frequência angular das ondas
$\beta$	parâmetro do espectro de Pierson e Moskowitz, parâmetro de escala da distribuição de Weibull	$\Omega$	prisma de maré
$\gamma$	parâmetro de agudez do pico do espectro JONSWAP com relação ao espectro de Pierson e Moskowitz, índice de arrebentação, peso específico da água, parâmetro de correção da máxima densidade espectral correspondente ao espectro de Pierson e Moskowitz aplicado no espectro JONSWAP, parâmetro usado na distribuição de Rayleigh para a determinação de $H_{m\acute{a}x}$ e parâmetro de locação na distribuição de Weibull		
$\gamma_s, \gamma'_s$	pesos específicos dos grãos pesados ao ar e submersos		
$\delta$	esbeltez, ou encurvamento, ou declividade da onda		
$\Delta$	fase de componente de maré		
$\varepsilon$	largura da banda espectral		
$\eta$	ordenada da partícula d'água com referência ao nível médio da órbita da onda		

#### SUBÍNDICES:

$b$	relativo à arrebentação
$B$	topo da camada limite oscilatória (aproximadamente o fundo)
$c$	assinala valor crítico quanto ao início de arrastamento dos sedimentos, denota grandeza relacionada à influência de corrente marítima sobre a onda
(o), (0)	indicativo das características das ondas em águas profundas (o), relativo à grandeza na embocadura oceânica (0) de um estuário, momento de ordem zero do espectro em frequência
RMS	raiz do valor quadrático médio na arrebentação
$s$	indicativo de onda significativa



*HIDRODINÂMICA E ESTATÍSTICA  
DAS ONDAS CURTAS  
PRODUZIDAS PELO VENTO*



*Modelo físico da barra do rio Itanhaém (SP) para estudos de melhoramentos para a navegação (2000 a 2004). Escala horizontal 1:300, escala vertical 1:50, com simulação da maré, geração de ondas e fundo fixo utilizando traçadores sedimentológicos. Visualização das ortogonais das ondas com corante de permanganato de potássio na aproximação da zona de arrebetação da Praia do Centro.*

## 1.1 INTRODUÇÃO SOBRE ONDAS DE OSCILAÇÃO

A superfície livre do mar ou de grandes corpos d'água, como lagos ou reservatórios, apresenta-se, normalmente, ondulada em razão das perturbações no plano d'água em repouso originadas de diversas causas.

Os efeitos das ondas de superfície são de capital importância para o projeto de obras marítimas e lacustres, como portos, vias navegáveis, defesa dos litorais e de margens, obras *offshore* e na Engenharia Naval.

Um conhecimento adequado dos processos físicos fundamentais envolvidos com as ondas de superfície é muito importante para o planejamento e projeto das obras marítimas e lacustres.

As ondas de superfície da interface água-ar transferem energia da fonte que as gerou para alguma estrutura ou linha de costa (ou margem), que dissipa ou reflete uma significativa parcela dessa energia. Assim, as ondas constituem o principal agente modelador da costa, pelo transporte de sedimentos que promovem e produzem muitas das forças às quais as estruturas marítimas ou lacustres estão submetidas.

As ondas de oscilação são movimentos periódicos cuja propagação não envolve grande deslocamento de massas líquidas de sua posição inicial por ocasião de sua passagem.

As ondas de superfície geralmente derivam sua energia dos ventos que sopram sobre a superfície do mar e propagam-se, principalmente, no rumo em que sopram. Convencionou-se indicar como rumo de propagação das ondas ou ventos o azimute com o Norte Verdadeiro da área de onde provêm.

Assumindo-se um mar de profundidade, velocidade do vento e pista de sopro (*fetch*) ilimitados, o estado do mar será caracterizado por uma condição de mar plenamente desenvolvido, que é aproximadamente atendida em mar aberto em grandes profundidades, sendo as ondas resultantes representadas pela Escala Internacional Beaufort de Força do Vento com referência à agitação do mar (altura significativa e período aproximados), e os valores em negrito para mares em altas latitudes entre os Trópicos e os Círculos Polares (KAMPHUIS, 2012), conforme a seguinte caracterização:

- Força 0: calma de 0 a 1 nó, mar espelhado com agitação nula.
- Força 1: bafagem de 1 a 3 nós, mar encrespado em pequenas rugas com aparência de escamas, mas sem cristas espumosas, com agitação inferior a 0,1 m e 2 s.
- Força 2: aragem de 4 a 6 nós, ligeiras ondas curtas, porém mais pronunciadas sem quebra das cristas, com agitação de 0,1 m a 0,3 m e 3 s.
- Força 3: fraco de 7 a 10 nós, ondas maiores com cristas começando a quebrar e espumas brancas irregularmente esparsas ("carneiros"), com agitação de 0,4 m a 0,6 m e 4 s.

- Força 4: moderado de 11 a 16 nós, pequenas vagas em aumento e "carneiros" bastante frequentes, com agitação de 1,0 m a 1,5 m e 5 s.
- Força 5: fresco de 17 a 21 nós, vagas moderadas tendendo a formas mais longas e pronunciadas com muitos "carneiros" e prováveis borrifos, com agitação de 2,0 m a 2,4 m e 6 s.
- Força 6: muito fresco de 22 a 27 nós, grandes vagas formando-se com extensas cristas de espumas brancas e borrifos, com agitação de 3,6 m a 4,0 m e 8 s.
- Força 7: forte de 28 a 33 nós, mar grosso com pequenos vagalhões e a espuma branca da quebra das ondas começa a ser espalhada em faixas no rumo do vento, com agitação de 4,8 m e **7,0** m e 10 s.
- Força 8: muito forte de 34 a 40 nós, vagalhões moderados e as cristas se quebram em borrifos, com a espuma branca espalhada em faixas bem definidas no rumo do vento, com franca arrebenção, com agitação de 5,5 m a 7,7 m e **11** m e 13 s.
- Força 9: duro de 41 a 47 nós, vagalhões com faixas brancas de espuma no mesmo rumo do vento e suas cristas começam a rolar, com os borrifos começando a afetar a visibilidade, com agitação de 7,0 m a 10,0 m e **18,0** m e 16 s.
- Força 10: muito duro de 48 a 55 nós, grandes vagalhões com grandes cristas que demoram a se desfazer, sendo a espuma branca resultante espalhada em faixas densas no mesmo rumo do vento, tornando-se o conjunto da superfície do mar branco. O rolar das cristas torna-se pesado e a visibilidade é afetada, com a agitação atingindo 9,0 m a 12,0 m e **25,0** m e 18 s.
- Força 11: tempestuoso de 56 a 63 nós, vagalhões excepcionais, podendo encobrir a vista de embarcações pequenas e médias, com o mar completamente coberto por faixas de espuma espalhadas no mesmo rumo do vento, com a crista dos vagalhões se desfazendo em espuma borbulhante e afetando bastante a visibilidade. A interface da agitação entre mar e ar atinge 16,0 m e **35,0** m e 20 s.
- Força 12: furacão 1 de 64 a 71 nós, o ar fica tomado de espuma e borrifos e o mar torna-se completamente branco, com a visibilidade seriamente afetada, com a interface da agitação entre mar e ar atingindo 40 m e 22 s.

Em águas profundas, a máxima altura atingida pelo movimento da onda está limitada pela máxima esbeltez, ou encurvamento, ou declividade da onda ( $\delta_{o \text{ máx}}$ ), que é o quociente entre a altura e o comprimento da onda. Quando o crescimento da esbeltez atinge esse limiar, a onda começa a arrebentar, dissipando parte de sua energia. Michell (1893, apud U. S. ARMY, 1984) sugeriu:

$$\delta_{o \text{ máx}} = 0,142 \sim 1/7$$

Essa condição ocorre quando o ângulo interno entre as duas tangentes à superfície da onda se propagando forma 120°, conforme será explicado no item sobre a arrebentação. Miche (1944, apud KAMPHUIS, 2012) generalizou esse critério para:

$$\frac{H_b}{L_b} = 0,14 \tanh\left(\frac{2\pi h_b}{L_b}\right)$$

Na área de influência do vento sobre a superfície da água, zona de geração (*seas*) das ondas forçadas pelo vento, estas se apresentam com formas irregulares, denominadas vagas (em inglês *seas*), e constantemente mutáveis por causa das irregularidades da ação do vento e da sua variabilidade no rumo de propagação (tridimensionalidade). A descrição da superfície do mar é dificultada pela interação das vagas individuais, podendo-se associar um rumo de propagação a uma média dos rumos das vagas individuais. As vagas mais rápidas sobrepõem-se e passam sobre as mais lentas vindo de diferentes rumos. Algumas vezes, essa interação é construtiva, e outras vezes, destrutiva. Quando as ondas movem-se para fora da zona em que são diretamente afetadas pelo vento, assumem um aspecto mais ordenado, e são denominadas ondulações ou marulhos (em inglês *swell*), com a configuração de cristas e cavados definidos e com uma subida e descida mais rítmicas. Essas ondulações são aproximadamente paralelas e propagam-se de modo sensivelmente uniforme e sem grandes deformações em direção à costa ou às margens, sendo, portanto, ondas bidimensionais. Chegam à costa com intensidade variável em função das características adquiridas quando de sua geração. Tais ondas podem viajar centenas ou milhares de quilômetros, após deixarem a área em que foram geradas, sendo sua

energia dissipada internamente ao fluido, pela interação com o ar, no leito em águas rasas e na arrebentação.

O clima de ondas em uma determinada localidade é caracterizado por três parâmetros independentes: período, altura e rumo de propagação, que se correlacionam direcionalmente através das rosas de alturas e períodos de ondas, como é usual representar também para os ventos. É interessante observar que frequentemente denomina-se altura da onda o seu valor na superfície, que corresponde à máxima altura, uma vez que em profundidade esta altura vai se reduzindo.

Na zona de geração das vagas, não é possível o estabelecimento de um equacionamento analítico do movimento, pois as rajadas da ação do vento são um fenômeno essencialmente aleatório, que deve ser tratado estatisticamente. Nesta zona, as vagas comportam-se como oscilações forçadas, em que a força perturbadora do vento é continuamente aplicada. Já as ondulações podem ser mais aproximadas ao conceito de ondas cilíndricas (bidimensionais) simples, sucessivas, equidistantes e de formas idênticas que se propagam com celeridade constante e sem deformações em águas profundas, constituindo um trem de ondas. Neste caso, as ondulações comportam-se muito mais como oscilações livres, ou seja, sem a ação da força perturbadora do vento que as produziu e dependendo apenas da força da gravidade, o que permite o estabelecimento de formulações analíticas para o equacionamento do fenômeno.

As teorias formuladas para descrever analiticamente o mecanismo das ondas de oscilação são baseadas em ondas simples descritas por funções matemáticas elementares que podem ser usadas para descrever o movimento das ondas. Para muitas situações práticas, essas formulações simplificadas fornecem previsões confiáveis para as aplicações em Engenharia.

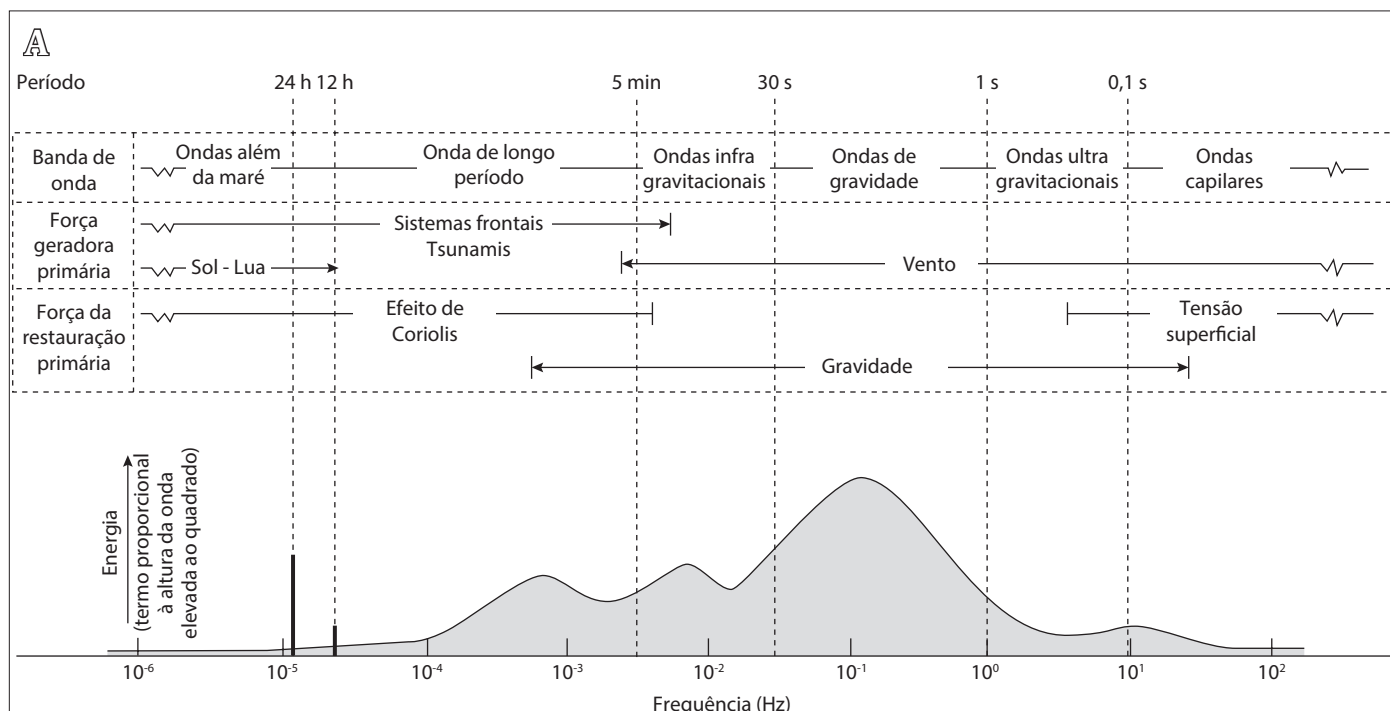


Figura 1.1 (A) Distribuição aproximada da energia superficial das ondas oceânicas ilustrando a classificação das ondas superficiais.

Em geral, o fenômeno das ondas de oscilação é complexo e difícil de ser descrito matematicamente em virtude das características de não linearidade, tridimensionalidade e aleatoriedade. Entretanto, há duas teorias clássicas, uma desenvolvida por Airy, em 1845, e outra por Stokes, em 1847, que descrevem as ondas simples e que preveem bem o comportamento das ondas, principalmente em lâminas d'água maiores relativamente ao comprimento de onda. Entre as teorias de ordem superior, ou de amplitude finita, citam-se a de Stokes de ordem superior (de segunda, terceira e quinta ordens), mais adequada para ondas maiores em grandes profundidades, nas quais a crista, mais afilada, se afasta mais do nível médio que os cavados, mais compridos; a cnoidal, que contempla a distorção da forma da onda pela interação do movimento da água com o fundo em águas rasas; e a solitária, desenvolvida por Boussinesq, em 1872, para o limite de águas muito rasas em que a onda está prestes a arrebentar, e todas as partículas de água têm  $z > 0$ , correspondendo não realmente a uma onda periódica, mas a uma forma harmônica de deslocamento.

Em particular, todas as teorias clássicas consideram as ondas como progressivas simples, ou seja, inteiramente cilíndricas, reproduzindo-se de forma idêntica em qualquer ponto da superfície líquida ortogonal ao plano de propagação. Isso permite a grande simplificação de poder considerar o movimento apenas em duas dimensões, o que é uma consideração que na natureza somente pode ser admitida em situações muito particulares.

A técnica de modelação física foi, e ainda é, essencial e um fator preponderante no avanço do conhecimento e aprimoramento das teorias clássicas, e das aproximações analíticas, em todo o campo da hidráulica marítima. A ligação teórico-experimental sempre conduz a resultados técnicos essenciais para o projeto, construção e operação das obras marítimas.

A teoria de onda mais elementar, referida como de pequena amplitude ou linear, foi desenvolvida por Airy e é de fundamental importância, uma vez que não somente é de fácil aplicação, mas também confiável, abrangendo um grande campo de todo o regime de ondas. Matematicamente, essa teoria pode ser considerada como uma primeira aproximação de uma completa descrição teórica do comportamento da onda. A experiência ao longo das décadas mostrou que essa teoria é aplicável com confiabilidade tanto a vagas, quanto a marulhos, não havendo necessidade de aplicar uma teoria mais complexa, as quais são normalmente aplicadas somente para pesquisa e projetos muito complexos.

A observação de um flutuador na superfície das ondas revela que sua posição oscila horizontal e verticalmente em torno de uma posição fixa, ver Figura 1.1(C). Isso pode parecer paradoxal, já que o perfil das ondas move-se progressivamente junto ao flutuador com velocidade definida. Obviamente, a velocidade orbital do flutuador, que corresponde à velocidade da partícula d'água, e a velocidade com que a crista da onda se propaga, que corresponde à velocidade de fase ou celeridade da onda, são muito diferentes.

Assim, o conceito de ondas de oscilação ou quase oscilatórias pode ser entendido: corresponde àquelas ondas em que as trajetórias descritas pelas partículas são órbitas fechadas ou quase fechadas em cada período de onda.

Ondas sinusoidais ou harmônicas simples, como as tratadas neste capítulo, são ondas simples cujo perfil superficial pode ser descrito por uma única função seno ou cosseno. Elas são periódicas porque o seu movimento e o seu perfil superficial são recorrentes em iguais intervalos de tempo, definindo o período.

Por outro lado, uma forma de onda que se move relativamente a um ponto fixo, definindo um rumo de propagação, é denominada onda progressiva, que, portanto, reproduz-se no tempo e no espaço. A onda é denominada estacionária quando sua forma não tem rumo de propagação, e sua celeridade é nula.

A teoria linear de Airy descreve ondas puramente oscilatórias. Muitas teorias de ondas de amplitude finita descrevem ondas quase oscilatórias, já que, na realidade, o fluido desloca-se por um pequeno comprimento no rumo de propagação das ondas em cada passagem sucessiva de onda. É importante distinguir os vários tipos de ondas que podem ser gerados e propagados. Na classificação das ondas, o período, intervalo de tempo que uma onda dispense para progredir uma distância de um comprimento de onda, ou o seu recíproco, a frequência, relacionam-se à quantidade relativa de energia contida nas ondas. As forças geradoras primárias e de restauração também caracterizam os tipos de ondas. É importante distinguir os vários tipos de ondas que podem ser gerados e propagados. A Figura 1.1(A) evidencia uma classificação das ondas pelo período, intervalo de tempo que uma onda dispense para progredir uma distância de um comprimento de onda, ou pelo seu recíproco, a frequência. Nessa classificação evidencia-se a quantidade relativa de energia contida nas ondas correspondentemente aos períodos ou frequências. São também indicadas as forças geradoras primárias e de restauração para as várias regiões desse espectro de energia.

De primária importância são as ondas de gravidade geradas pelo vento, que têm períodos de 1 a 30 s – os períodos mais frequentes são de 5 a 15 s –, pois são normalmente as mais importantes nos estudos de Hidráulica Marítima e de grandes lagos. São denominadas ondas de gravidade porque a principal força restauradora é a da gravidade, ou seja, a força que tenta restabelecer o estado de equilíbrio em repouso da superfície da água. Essas ondas propagam-se quase exclusivamente pela ação da gravidade, fazendo com que percorram enormes distâncias com pouquíssima perda de energia, sem alterações sensíveis em sua forma. Tudo se altera nas proximidades das costas, excetuando-se o período da onda, que, uma vez atingida a condição de mar plenamente desenvolvido, se mantém até a arrebentação. Esse tipo de ondas apresenta uma grande quantidade de energia a elas associada. Essas ondas propagam-se quase exclusivamente pela ação da gravidade, fazendo com que percorram enormes distâncias com pouquíssima perda de energia, sem alterações sensíveis em sua forma. Tudo se altera nas proximidades das costas, excetuando-se o período da onda,

que, uma vez atingida a condição de mar plenamente desenvolvido, se mantém até a arrebentação.

O espectro de energia de ondas genérico é essencialmente contínuo das ondas capilares (períodos menores a 1 s), passando pelas ondas gravitacionais, ondas de longo período (como as oscilações de superfície em bacias portuárias, tsunamis gerados por terremotos ou erupções vulcânicas submarinas, maremotos gerados por perturbações meteorológicas de grande escala como furacões), até as marés astronômicas. Entretanto, nem todos os períodos de ondas estão presentes em um dado local e em um determinado instante, embora usualmente coexistam diversos períodos diferentes, mesmo que somente com baixos níveis de energia. Por exemplo, a análise detalhada de uma série histórica de níveis d'água em um ponto de uma baía pode mostrar ondas de vento de 2 a 6 s, oscilações geradas pelo deslocamento de uma perturbação meteorológica com período de 1 h e uma maré com componentes de período de 12 a 24 h.

Como vimos, as ondas de gravidade podem ser subdivididas em vagas e ondulações. As primeiras são denominadas ondas de crista curta por conta das interseções de ondas que se propagam em diferentes rumos, e são usualmente compostas por ondas mais esbeltas (sua esbelteza ou encurvamento – relação entre a altura e o comprimento de onda – é maior) com períodos e comprimentos de ondas mais curtos e superfície d'água muito mais perturbada pela ação direta do vento. As ondulações são denominadas ondas longas e são muito mais regulares, pois não estão sujeitas à ação intensa do vento, suas cristas longas se estendem tipicamente por mais de 100 m.

As principais características das ondas de gravidade podem ser resumidas como segue:

- a) São de períodos relativamente curtos, podendo-se citar as seguintes ordens de grandeza máxima:

<b>Tabela 1.1</b> <b>Ordens de grandeza máximas de parâmetros de ondas produzidas pelo vento</b>				
	<b>Oceano Pacífico</b>	<b>Mar do Norte</b>	<b>Mar Mediterrâneo</b>	<b>Cananeia (SP)</b>
Período (s)	22	20	14	12
Comprimento (m)	900	500	300	170
Altura <sup>(*)</sup> (m)	25	20	10	7

(\*) Altura máxima assinalada: 34 m no Oceano Pacífico.

Em águas rasas, os comprimentos das ondas – e, conseqüentemente, suas celeridades – reduzem-se até mesmo à metade. A amplitude também é reduzida.

- b) Em águas profundas, a sua influência está restrita a uma camada superficial e não a toda profundidade.

- c) Os movimentos das partículas d'água associadas são de magnitude semelhante nas direções vertical e horizontal.
- d) As acelerações verticais das partículas d'água são significativas e aproximam-se da ordem de magnitude da aceleração da gravidade ( $g$ ), podendo atingir 0,1 a 0,2 ( $g$ ) nas maiores ondas.

Já vimos que as ondas reais são complexas, entretanto, muitos aspectos da mecânica dos fluidos necessários para a discussão completa têm influência reduzida na solução da maioria dos problemas de Engenharia. Portanto, uma teoria simplificada que omite muitos dos fatores complicadores é útil. As hipóteses feitas no desenvolvimento da teoria simplificada apresentada devem ser entendidas porque nem todas são justificáveis em todos os problemas. Quando uma hipótese não for válida num problema particular, uma teoria mais completa deve ser empregada.

A mais restritiva das hipóteses comuns é a de que as ondas são pequenas perturbações da superfície da água em repouso. Isso conduz à teoria de onda genericamente denominada de pequena amplitude, linear, de Airy ou de Stokes de primeira ordem. Essa teoria fornece informações para o comportamento de todas as ondas periódicas e uma descrição da mecânica das ondas que é apropriada para a maioria dos problemas de Engenharia. Ela não permite levar em conta o transporte de massa por causa das ondas, ou o fato de que as cristas das ondas afastam-se mais do nível d'água em repouso do que os cavados, ou a própria existência da arrebentação das ondas, para cujas previsões são necessárias teorias mais gerais.

As principais hipóteses formuladas comumente no desenvolvimento da teoria de uma onda simples são:

- a) O fluido é homogêneo e incompressível, portanto, de massa específica ( $\rho$ ) constante.
- b) A tensão superficial é negligenciável, o que é aceitável para comprimentos de onda superiores a 2 cm e períodos superiores a 0,1 s.
- c) Pode-se negligenciar o efeito da aceleração de Coriolis.
- d) A pressão na superfície livre é uniforme e constante (atmosférica).
- e) O fluido é ideal e não viscoso.
- f) A onda considerada não interage com as outras.
- g) O leito é horizontal, fixo, impermeável, e isso implica que a velocidade orbital vertical junto ao leito é nula.
- h) A amplitude da onda é pequena comparativamente com seu comprimento e a profundidade da água, e sua forma é invariante no tempo e no espaço.
- i) As ondas são planas (ou de crista longa ou bidimensionais), com forma lisa e regular, porque o movimento das partículas líquidas que formam a onda apresenta simetria cilíndrica, ou seja, repete-se identicamente em planos paralelos ao rumo de propagação.



**Figura 1.1**

(B) Vistas do canal de ondas do LHEPUSP (São Paulo, Estado/DAEE/SPH/CTH).

Como veremos, as velocidades das partículas de água são relacionadas às amplitudes das ondas, e suas velocidades de fase ou celeridades são relacionadas com a profundidade da água e o comprimento da onda. Isso implica, pela hipótese (h), que as velocidades das partículas são pequenas quando comparadas à velocidade de fase da onda.

De um modo geral, pode-se dizer que as três primeiras hipóteses são aceitáveis para virtualmente todos os problemas. As hipóteses (d), (e) e (f) somente não são consideradas em problemas muito específicos. Já as três últimas hipóteses não são consideradas em vários casos, principalmente em águas mais rasas e perto da arrebentação, em que as velocidades das partículas e a velocidade de fase da onda são próximas.

As características, definições e os equacionamentos básicos relacionados com uma onda oscilatória progressiva sinusoidal simples estão ilustrados nas Figuras 1.1(B) e 1.1(C). É interessante relevar que a energia transmitida pelo vento por tensões tangenciais na superfície da massa líquida amortece-se exponencialmente à medida que aumenta a profundidade, caracterizada pela cota  $z$  negativa, até anular-se na cota  $z = -L/2$  (em águas profundas), ou até atingir o fundo em águas intermediárias (transicionais) e rasas. Do mesmo modo, o movimento orbital da onda ao entrar em contato com o fundo, “sentindo” o atrito com o fundo, passa a sofrer um amortecimento, igualmente exponencial, à medida que a lâmina d’água  $h$  diminui. Matematicamente, as funções que mais se adequam a traduzir esses decaimentos exponenciais são as funções hiperbólicas. Lembre-se que a denominação de altura da

onda, quando não especificada, corresponde à altura na superfície livre ( $z = 0$ ).

A partir dos conceitos fundamentais da mecânica dos fluidos ideais, a equação de conservação de massa (continuidade) para fluido incompressível e bidimensional, pode ser escrita como:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Sendo  $u$  e  $w$  as componentes das velocidades orbitais das partículas d’água nas direções horizontal e vertical, respectivamente.

Por outro lado, o movimento da partícula fluida é irrotacional, isto é, a rotação angular da partícula sobre seu centro de massa é nula e este desloca-se ao longo de uma trajetória. Nesse caso, há um potencial de velocidades, representado no escoamento bidimensional por:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}; w = \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

Assim, das equações anteriores resulta a equação de Laplace:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2}$$

A solução da equação de Laplace é dada por funções harmônicas.

C

**Movimento orbital real com órbita não fechada (deriva resultante)**

$$u = \frac{ag \cosh k(z+h)}{c \cosh(kh)} \cos \theta$$

$$w = \frac{ag \sinh k(z+h)}{c \cosh(kh)} \sin \theta$$

**u, w:** componentes horizontal e vertical da velocidade orbital tangencial (Airy)

$$a_x = \frac{g\pi H \cosh k(z+h)}{L \cosh(kh)} \sin \theta$$

$$a_z = \frac{-g\pi H \sinh k(z+h)}{L \cosh(kh)} \cos \theta$$

**a<sub>x</sub>, a<sub>z</sub>:** componentes horizontal e vertical da aceleração centrípeta orbital (Airy)

**Movimento orbital em águas profundas ( $h > \frac{L}{2}$ ):**

$\tanh(kh) \sim 1,0$  e  $\sinh(kh) \sim \cosh(kh) \gg (kh)$ . As ondas "não sentem" o fundo

$$\eta = a \cos \left[ \frac{2\pi}{L} x - \frac{2\pi}{T} t \right] \quad (\text{o movimento é harmônico no espaço e no tempo})$$

*fase(θ)*

$\eta$  = ordenada da linha d'água

$k = (2\pi / L)$  = número de onda

$\omega = (2\pi / T)$  = frequência angular

$L_o = \frac{gT^2}{\omega}$  (o movimento somente depende de T, sem influência de h)

Raio de órbita =  $a \exp(kz)$



**Movimento orbital em águas intermediárias**

( $L/25 < h < L/2$ ) e rasas ( $h < \frac{L}{25}$ )

$$\eta = a \cos \left[ \frac{2\pi}{L} x - \frac{2\pi}{T} t \right] \quad \text{fase}(\theta)$$

$\eta$  = ordenada da linha d'água

$k = (2\pi / L)$  = número de onda

$\omega = (2\pi / T)$  = frequência angular

$$L = \frac{gT^2}{\omega} \tanh(kh)$$

e  $L = (gh)^{0.5}$  (Equação de Lagrange) em águas rasas,

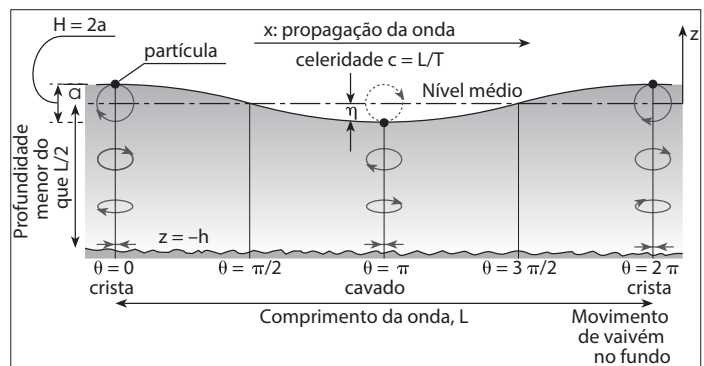
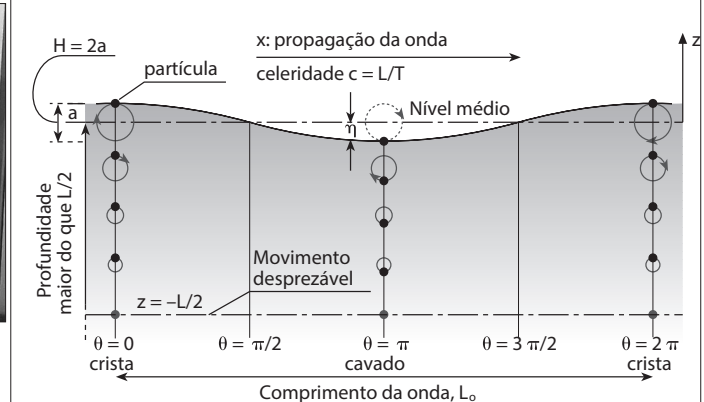
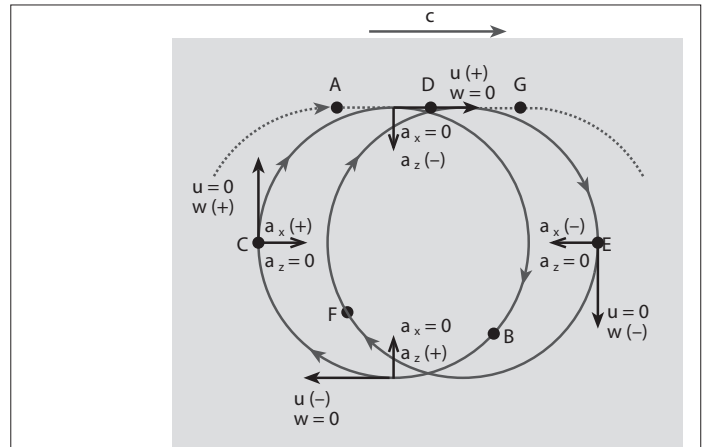
pois  $\cosh(kh) \sim 1$ , e  $\sinh(kh) \sim \tanh(kh) \sim kh$

Semieixos da elipse orbital:

$$A = \frac{a \cosh k(z+h)}{\sinh(kh)} \quad (\text{horizontal}) \quad B = \frac{a \sinh k(z+h)}{\sinh(kh)} \quad (\text{vertical})$$

**Figura 1.1**

(C) Definições e equacionamentos básicos de uma onda oscilatória progressiva sinusoidal simples, segundo Airy.

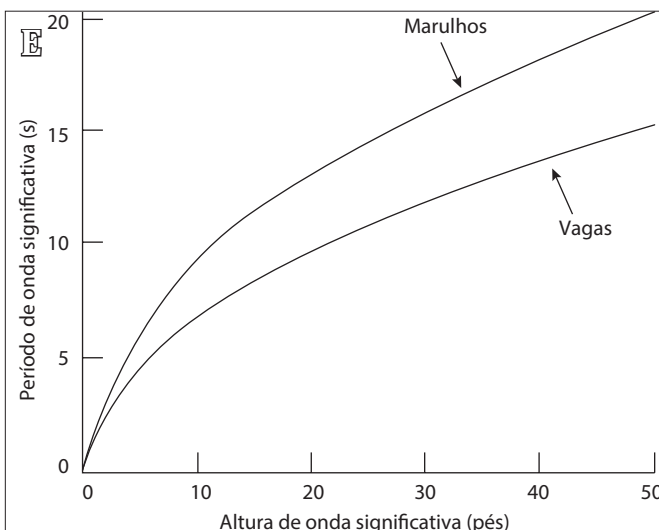
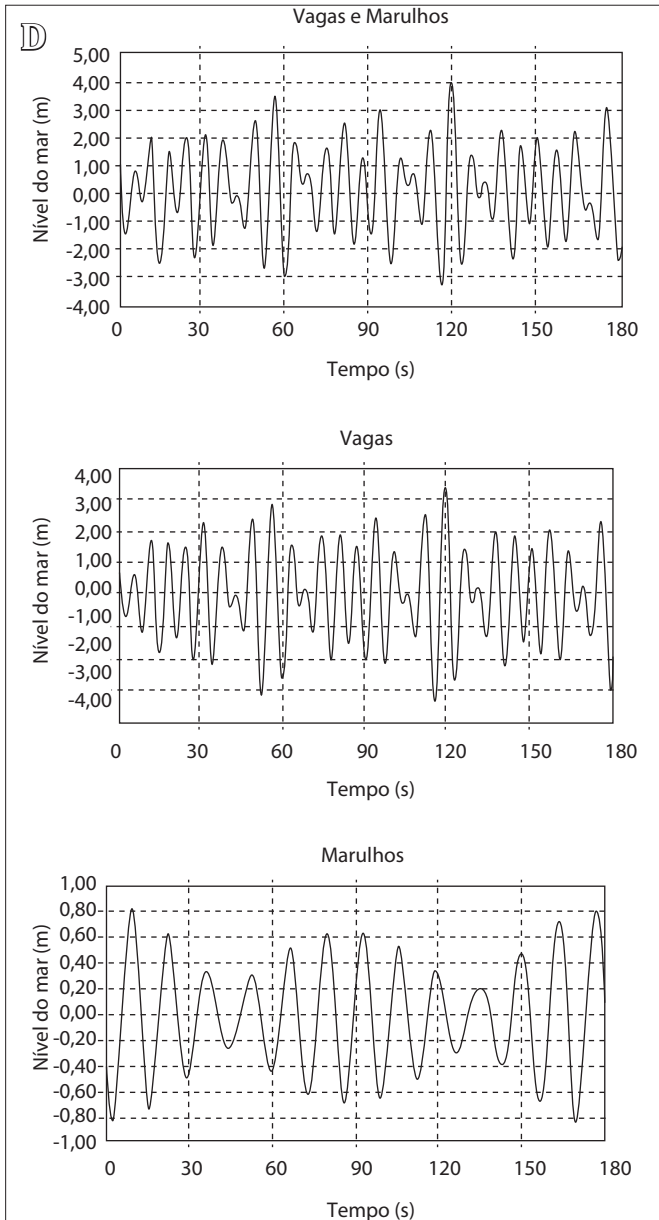


**Simplificação de Eckart (erro em torno a 5%)**  $L = \frac{gT^2}{\omega} \sqrt{\tanh\left(\frac{\omega^2 h}{g}\right)}$

Com acurácia de 5% (boa aproximação de engenharia):

Limite de águas profundas:  $\frac{h}{L_o} = \frac{1}{4}$  e  $\frac{h}{L} = \frac{1}{3,73}$

Limite de águas rasas:  $\frac{h}{L_o} = \frac{1}{20}$  e  $\frac{h}{L} = \frac{1}{11}$



**Figura 1.1**  
 (D) Desdobramento entre vagas e marulhos de um mesmo registro.  
 (E) Correlações entre período e altura significativas de vagas e marulhos.

A equação de Bernoulli generalizada pode ser escrita como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} + gz = 0$$

Na teoria das ondas de Airy o escoamento é suposto irrotacional, existindo, portanto, um potencial de velocidades  $\phi(x, z, t)$ . Consideram-se a equação de Laplace e a equação de Bernoulli generalizada, a qual pode ser reduzida a:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gz = 0$$

pois, na teoria linear, são negligenciáveis os termos envolvendo o quadrado da velocidade das partículas d'água.

As condições de contorno para a integração e solução do problema resultam da aplicação da equação de Bernoulli simplificada nos extremantes:

- a) Superior (superfície livre): a pressão é nula (atmosférica), obtendo-se:

$$\eta = -\frac{1}{g} \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{z=0}$$

Note-se que, como as ondas são consideradas de pequena amplitude, a condição de contorno da superfície livre ( $z = \eta$ ) é aproximadamente igual à condição da linha d'água em repouso ( $z = 0$ ).

- b) Inferior (leito): considerado fixo, impermeável e horizontal, tem-se:

$$w = \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)_{z=-h}$$

A solução harmônica de  $\phi$  resulta:

$$\phi(x, z, t) = \frac{ag}{\omega} \frac{\cosh[k(h+z)]}{\cosh(kh)} \text{sen}(kx - \omega t)$$

sendo:  $k = 2\pi/L$  denominado número de onda e  $\omega = 2\pi/T$  frequência angular da onda.

Recorde-se da definição das funções hiperbólicas:

$$\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}; \quad \cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}; \quad \tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$$



<b>Tabela 1.2</b> <b>Comportamento das funções hiperbólicas</b>					
<b>Classificação</b>	<b>h/L</b>	<b>kh</b>	<b>tanh kh</b>	<b>senh kh</b>	<b>cosh kh</b>
Águas profundas (o)	$>1/2$	$>\pi$	$\approx 1$	$e^{kh}/2$	$e^{kh}/2$
Águas intermediárias	1/20 a 1/2	$\pi/10$ a $\pi$	tanh kh	senh kh	cosh kh
Águas rasas	$< 1/20$	$< \pi/10$	$\approx kh$	$\approx kh$	$\approx 1$

A Tabela 1.3 apresenta os valores das funções hiperbólicas aplicáveis na Teoria de Airy.

<b>Tabela 1.3</b> <b>Valores das funções hiperbólicas aplicáveis na Teoria de Airy</b>													
$h/L_0$	tanh kh	h/L	kh	senh kh	cosh kh	H/H'_0	$h/L_0$	tanh kh	h/L	kh	senh kh	cosh kh	H/H'_0
0,000	0,000	0,0000	0,000	0,000	1,00	$\infty$	0,20	0,888	0,225	1,41	1,94	2,18	0,918
002	112	0179	112	113	01	2,12	21	899	234	47	2,05	28	920
004	158	0253	159	160	01	1,79	22	909	242	52	18	40	923
006	193	0311	195	197	02	62	23	918	251	57	31	52	926
008	222	0360	226	228	03	51	24	926	259	63	45	65	929
0,010	0,248	0,0403	0,253	0,256	1,03	1,43	0,25	0,933	0,268	1,68	2,60	2,78	0,932
015	302	0496	312	317	05	31	26	940	277	74	75	2,93	936
020	347	0576	362	370	07	23	27	946	285	79	2,92	3,09	939
025	386	0648	407	418	08	17	28	952	294	85	3,10	25	942
							29	957	303	90	28	43	946
0,030	0,420	0,0713	0,448	0,463	1,10	1,13							
035	452	0775	487	506	12	09	0,30	0,961	0,312	1,96	3,48	3,62	0,949
040	480	0833	523	548	14	06	31	965	321	2,02	69	3,83	952
045	507	0888	558	588	16	04	32	969	330	08	3,92	4,05	955
							33	972	339	13	4,16	28	958
0,050	0,531	0,0942	0,592	0,627	1,18	1,02	34	975	349	19	41	53	961
055	554	0993	624	665	20	1,01							
060	575	104	655	703	22	0,993	0,35	0,978	0,358	2,25	4,68	4,79	0,964
065	595	109	686	741	24	981	36	980	367	31	4,97	5,07	967
070	614	114	716	779	27	971	37	983	377	37	5,28	37	969
							38	984	386	43	61	5,70	972
0,075	0,632	0,119	0,745	0,816	1,29	0,962	39	986	395	48	5,96	6,04	974
080	649	123	774	854	31	955							
085	665	128	803	892	34	948	0,40	0,988	0,405	2,54	6,33	6,41	0,976
090	681	132	831	929	37	942	41	989	415	60	6,72	6,80	978
095	695	137	858	0,968	39	937	42	990	424	66	7,15	7,22	980
							43	991	434	73	7,60	7,66	982
0,10	0,709	0,141	0,886	1,01	1,42	0,933	44	992	443	79	8,07	8,14	983
11	735	150	940	08	48	926							
12	759	158	0,994	17	54	920	0,45	0,993	0,453	2,85	8,59	8,64	0,985
13	780	167	1,05	25	60	917	46	994	463	91	9,13	9,18	986
14	800	175	10	33	67	915	47	995	472	2,97	9,71	9,76	987
							48	995	482	3,03	10,3	10,4	988
0,15	0,818	0,183	1,15	1,42	1,74	0,913	49	996	492	09	11,0	11,0	990
16	835	192	20	52	82	913							
17	850	200	26	61	90	913	0,50	0,996	0,502	3,15	11,7	11,7	0,990
18	864	208	31	72	1,99	914							
19	877	217	36	82	2,08	916	1,00	1,000	1,000	6,28	268	268	1,000
0,20	0,888	0,225	1,41	1,94	2,18	0,918	$\infty$	1,000	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$	1,000

A agitação das ondas de oscilação desempenha ação dominante em movimentar os sedimentos do fundo das áreas costeiras, bem como originando as correntes de arrebentação longitudinais, transversais e nas velocidades de transporte de massa, as quais transportam os sedimentos. A assimetria das velocidades sob a crista e o cavado das ondas é outra fonte geradora do transporte resultante de sedimentos.

As ondas podem ser geradas por efeito de ventos locais soprando sobre o mar em uma certa pista de sopro (*fetch*) em um determinado tempo, as vagas; ou ser produzidas por tempestades distantes, quando as ondulações (ou marulhos) têm maior período (digamos, certamente acima de 10 s) e, conseqüentemente, maior comprimento (digamos, acima de 200 m), com menor dispersão de períodos, rumos e alturas e, por isso, menor esbeltez ( $\delta = H/L$ ) do que as vagas. Na Figura 1.1(D) exemplifica-se situação de estado do mar com superposição de vagas e marulhos e seu desdobramento, podendo-se avaliar nitidamente a maior regularidade dos últimos. As alturas de ondas e respectivos períodos para o estado do mar de projeto devem ser acuradamente determinados a partir de dados de medições, ou inferidos meteorologicamente. Para situações em que não haja essa disponibilidade, a Figura 1.1(E) fornece uma ordem de grandeza orientativa da correlação entre alturas e períodos para vagas e marulhos, de acordo com API (1987).

O monitoramento sistemático da agitação evidencia que os ventos locais e as vagas têm pouco efeito sobre as dimensões e propagação das ondulações, sendo mínima a interação, porque essas últimas ondas, deixando a área da tempestade geradora, têm sua energia atenuada, com conseqüente redução de altura a alguns centímetros e pouca área exposta ao vento.

## 1.2 ONDAS MONOCROMÁTICAS E ONDAS NATURAIS

### 1.2.1 Considerações gerais

A onda de oscilação do tipo mais simples é a monocromática (ou regular, ou de frequência única), que possui um único valor de altura,  $H$  e período,  $T$ , sendo cada onda idêntica às outras. Se a onda tem uma altura muito reduzida comparada com o seu comprimento, aproxima-se bem de uma oscilação do nível d'água senoidal, e seus parâmetros podem ser fornecidos pela teoria linear de ondas. As ondulações aproximam-se razoavelmente bem das ondas monocromáticas.

As ondas naturais no mar são randômicas e compreendem um espectro de períodos, rumos e alturas de ondas. Denomina-se análise das ondas no domínio da frequência quando se utiliza a caracterização do estado do mar do ponto de vista da frequência. O espectro de densidade de energia em função da frequência,  $E(f)$ , fornece a distribuição da energia da onda como função da frequência  $f$ , independentemente do rumo de propagação. Este é o espectro unidimensional, ou escalar, utilizado como modelo de descrição do estado do

mar. Ele determina a energia por unidade de superfície contida em cada uma das infinitas ondas monocromáticas de frequência diferenciada componentes da agitação.

A Figura 1.2 ilustra dados de mar, registrados por onôgrafo em 25, 26 e 27/01/1973 na Plataforma Marítima P-3 da Petrobras, no litoral do Estado do Espírito Santo. No dia 26, nota-se um deslocamento do sistema de alta pressão polar para NE. Como a alta do Atlântico Sul permanece na sua posição, gera-se uma linha de instabilidade estendendo-se na altura do litoral do Rio de Janeiro. Essa linha provoca um aumento na velocidade do vento na costa do Espírito Santo, atingindo às 9h GMT a máxima velocidade de N e NNE com intensidade de 15 nós. A frente fria passa pela área de interesse no dia 27, produzindo mudança na direção dos ventos para SW e SSW, influenciando diretamente na mudança da pista de sopro livre dos ventos sobre a superfície do mar. A costa do Espírito Santo nestas latitudes praticamente tem orientação N-S, resultando em uma pista de sopro livre de aproximadamente 40 MN, para os ventos de SW e SSW, enquanto para ventos de NE e NNE a pista é praticamente ilimitada. Os aspectos de distribuição de energia com a frequência evidenciam como a energia ondulatória atinge seu máximo na condição pré-frontal, pela intensificação dos ventos de N e NNE, reduzindo-se com a passagem da frente fria pela redução da extensão da pista de sopro livre e da velocidade dos ventos.

Os chamados momentos espectrais definem a forma do espectro.

O momento de ordem zero do espectro em frequência é denominado de  $m_0$ , correspondendo graficamente à área sob a curva espectral, estando assinalados na Figura 1.2(C). A energia média do registro de ondas é igual à variância espectral (desvio-padrão ao quadrado), ou seja:

$$m_0 = \sigma_f^2 = \int_1^{nf} S(f)df,$$

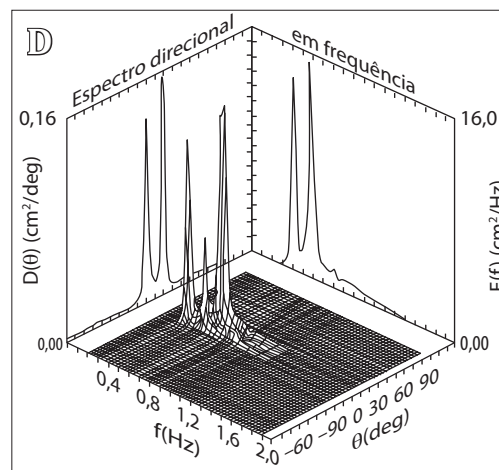
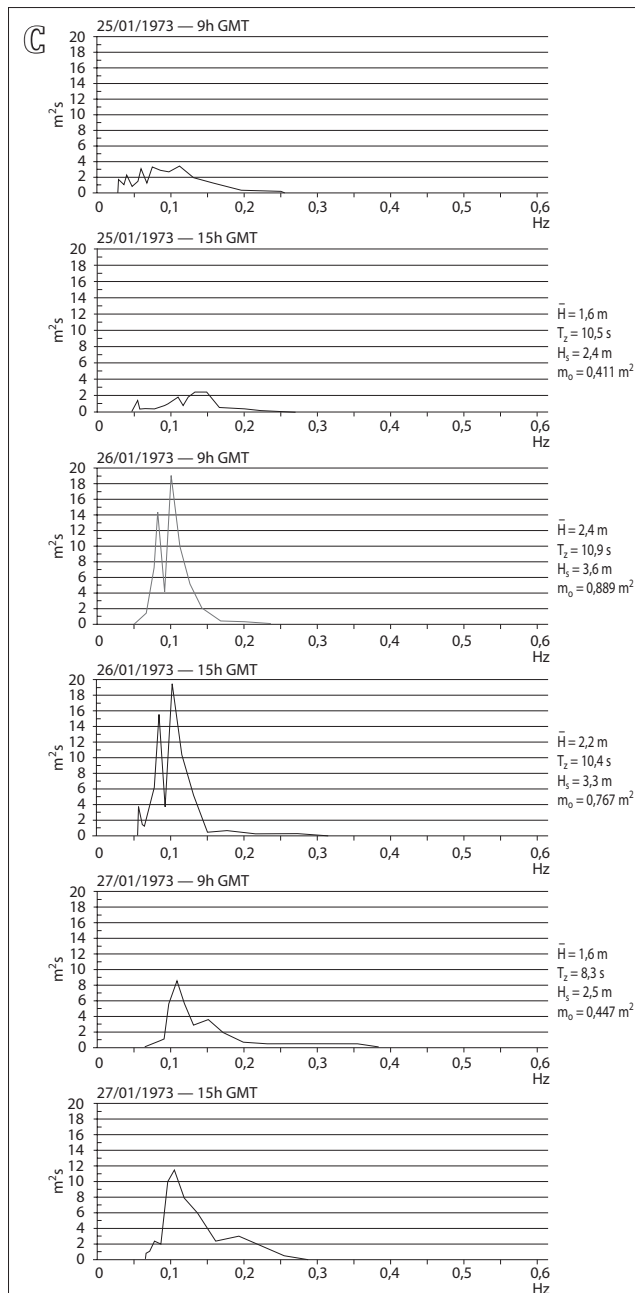
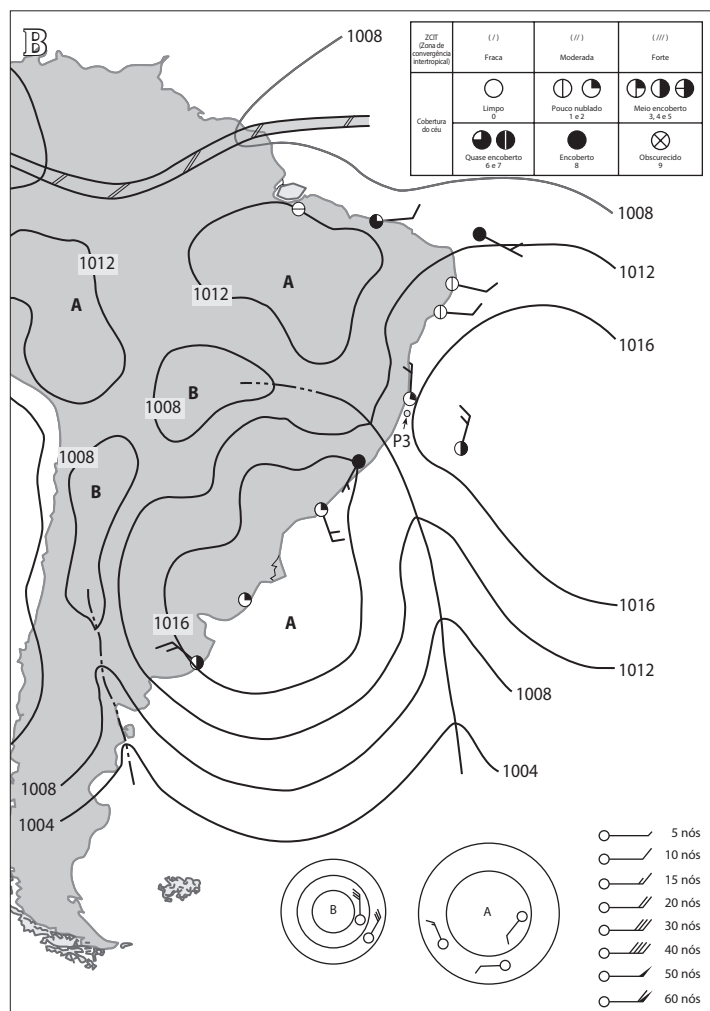
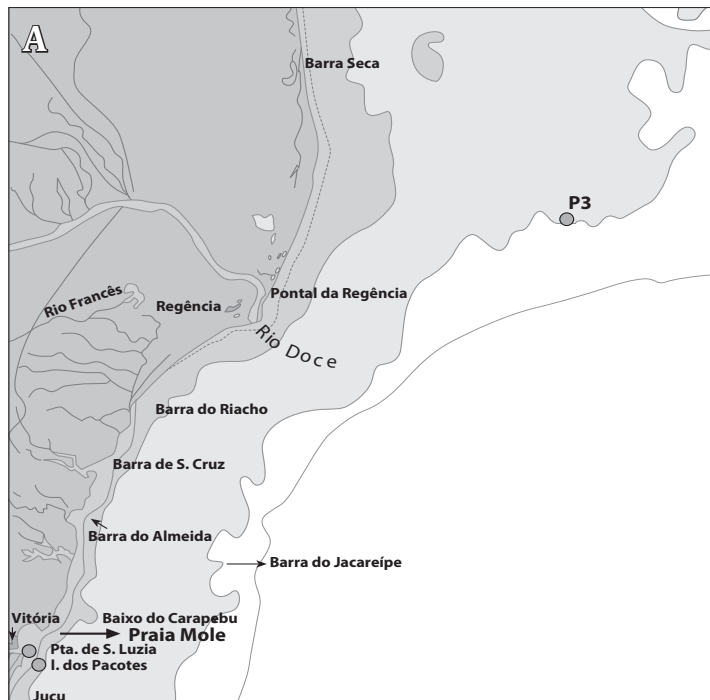
sendo  $nf$  o número de frequências componentes.

A mais completa descrição do estado do mar, identificando as frequências e rumos proeminentes, deve descrever o espectro direcional de energia, ou 2D, pois nem todas as ondas se propagam no mesmo rumo. Portanto, a energia total é obtida pela integração:

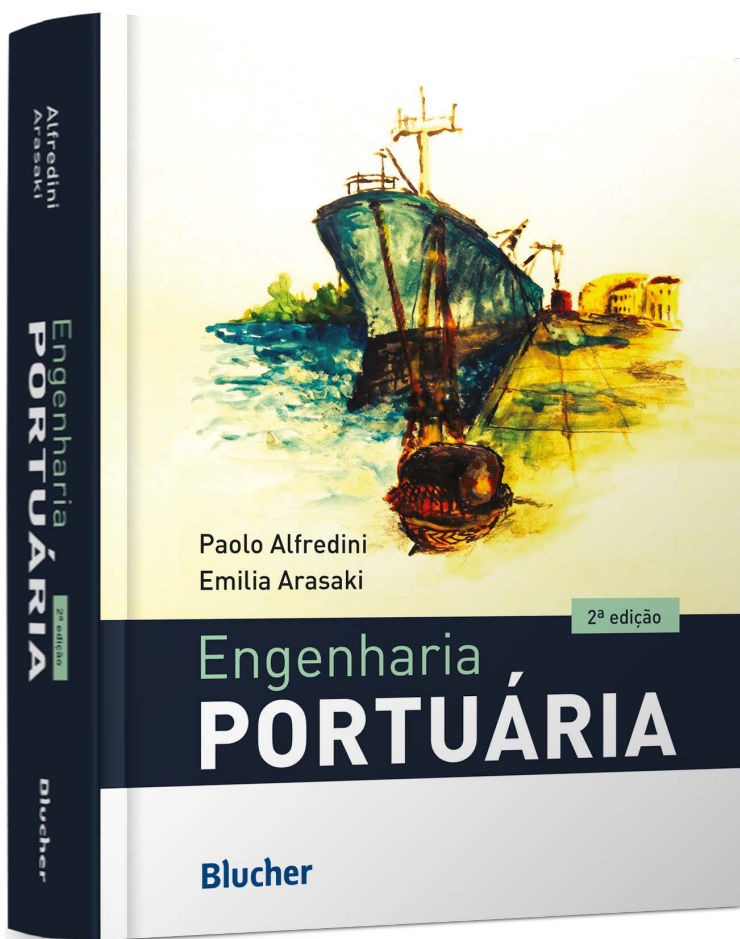
$$S = \int_0^{2\pi} \int_1^{nf} S(\theta, f)df d\theta.$$

Na Figura 1.2(D) está exemplificado um espectro direcional pelos rumos  $\theta$  em graus decimais.

Assim, na realidade, as ondas naturais reais são compostas pela soma contínua de componentes em diferentes frequências, em que cada frequência é composta por uma soma contínua de componentes propagando-se em diferentes rumos. Desse modo, quando ondas propagam-se para fora de uma tempestade, o resultado não é um trem de ondas destacado em um rumo, mas um espectro de onda direcional dispersando-se em diferentes rumos por causa



**Figura 1.2**  
 (A) Posição da plataforma P-3 (19°22' S; 39°12' W).  
 (B) Carta sinótica do dia 26/01/1973 às 9h GMT.  
 (B1) Representação da intensidade da ZCIT e da cobertura do céu no círculo da cabeça do vetor vento.  
 (B2) Representação dos ventos nas cartas sinóticas.  
 (C) Desenvolvimento do mar ilustrado pelos espectros de distribuição de energia pela frequência.  
 (D) Espectro direcional-exemplo.



Clique aqui e:

[Veja na loja](#)

# Engenharia Portuária

---

**Emilia Arasaki**  
**Paolo Alfredini**

ISBN: 9788521213192

Páginas: 1504

Formato: 20,5x25,5 cm

Ano de Publicação: 2019

---