

Projeto

# SMCBrasil

Sistema de Modelagem Costeira

## RECUPERAÇÃO DE PRAIAS



DOCUMENTO TEMÁTICO



**REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL**

Presidente  
MICHEL TEMER

**MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE**

Ministro  
EDSON DUARTE

**SECRETARIA EXECUTIVA**

Secretário-Executivo  
ROMEU MENDES DO CARMO

**SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E QUALIDADE AMBIENTAL**

Secretário  
JAIR VIEIRA TANNÚS JUNIOR

**DEPARTAMENTO DE GESTÃO AMBIENTAL TERRITORIAL**

Diretor  
RAIMUNDO NONATO C. CORDEIRO FILHO

**COORDENAÇÃO-GERAL DE GERENCIAMENTO COSTEIRO**

Coordenador  
RÉGIS PINTO DE LIMA

Ministério do Meio Ambiente  
Universidade da Cantabria  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Universidade de São Paulo

Projeto SMC Brasil

# **RECUPERAÇÃO DE PRAIAS**

DOCUMENTO TEMÁTICO

Brasília  
MMA  
2018

© 2018 Ministério do Meio Ambiente – MMA  
Permitida a reprodução sem fins lucrativos, parcial ou total, por qualquer meio, se citados a fonte do Ministério do Meio Ambiente ou sítio da Internet no qual pode ser encontrado o original em: <http://www.mma.gov.br/publicacoes-mma>

Acordo de Cooperação Técnica Científica e Tecnológica nº 02/2011 entre os governos brasileiro e espanhol. Projeto "Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira". Financiado pela Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento – AECID, Ministério do Meio Ambiente - MMA, Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão – MP, Universidade de São Paulo – USP e Universidade do Vale do Itajaí - Univali.

**COORDENAÇÃO TÉCNICA**  
Ministério do Meio Ambiente  
Coordenação-Geral de Gerenciamento Costeiro

Universidade da Cantabria  
Instituto de Hidráulica Ambiental da Cantabria

Universidade Federal de Santa Catarina  
Laboratório de Oceanografia Costeira

Universidade de São Paulo  
Instituto Oceanográfico

**RESPONSÁVEIS TÉCNICOS**  
Ministério do Meio Ambiente  
Diego Pereira de Oliveira, Régis Pinto de Lima, Angelita de Souza Coelho, Salomar Mafaldo de Amorim Júnior, Bárbara Oliveira de Rezende, Mateus Pereira Rodrigues Borges, Rodrigo Cesar Azevedo Miguel.

Universidade da Cantabria  
Professor: Mauricio González (líder do projeto) Rodríguez, Raúl Medina, Omar Gutiérrez, Nabil Kakeh, Cynthia Martínez, Roland Garnier, Lara Ruiz, Jara Martínez, Verónica Canovas, Laura Ribas de Almeida, Belén López, Fernando Méndez, Antonio Espejo, Melisa Menéndez, Ana Abascal, Sonia Castanedo.

Universidade Federal de Santa Catarina  
Professor: Antonio Henrique da Fontoura Klein (líder do projeto), Clarissa Brelinger De Luca, Priscila Hoerbe Soares, Paula Gomes da Silva, Jonas Gomes Oliveira, Maiara Werner Pinto, Charline Dalinghaus, Caio Trajano Siqueira Salgado, Julia Gil dos Santos.

Universidade de São Paulo  
Professor: Moisés Gonzalez Tessler (líder do projeto), Samara Cazzoli y Goya.

Colaboração (Fornecimento de dados)  
Marinha do Brasil  
Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias (INPH)

Ministério do Meio Ambiente  
SEPN 505 – Bloco B  
Edifício Marie Prendi Cruz – sala 107  
Brasília - DF - Brasil - 70730-542

Nenhum dos participantes, nem as instituições as quais representam o desenvolvimento do SMC-Brasil, são responsáveis pela utilização dada a esta publicação.

A base de dados de ondas em águas profundas (GOW) e de níveis (GOT; GOS) incluída no SMC-Brasil são de propriedade do IH Cantabria. O SMC-Brasil permite o processamento e análise de tais dados ao longo da costa brasileira. Todavia, esses dados não estão disponíveis para os usuários do sistema, apenas o dado processado e analisado por cada usuário. O uso inadequado desses dados ou dos resultados obtidos a partir destes, bem como as ferramentas não são de responsabilidade do IH Cantabria ou do grupo que desenvolveu o projeto nem do MMA. Os usuários não podem utilizar técnicas de engenharia reversa, descompilar ou fazer o *download* da base de dados de ondas e níveis do *software* SMC-Brasil.

**Foto da Capa**  
Autor: Pedro Pereira  
Cedida por: MMA  
Local: Recife

#### Dados Internacionais para Catalogação na Publicação - CIP

---

P964s Projeto SMC-Brasil : recuperação de praias : documento temático [recurso eletrônico] / Ministério do Meio Ambiente ... [et al.]. – Brasília, DF: MMA, 2018.

143 p. : il. (algumas color.) ; gráficos, tabelas  
ISBN: 978-85-7738-360-3 (*on line*)  
Modo de acesso: <http://www.mma.gov.br/publicacoes/>

1.Dinâmica litorânea (erosão e progradação). 2.Recuperação. 3.Gestão costeira. 4.Formulação de projeto. I.Ministério do Meio Ambiente. II.Universidade de Cantabria. III.Universidade Federal de Santa Catarina. IV.Universidade de São Paulo. V.Título.

CDU: 502.1(210.5:81)

---

Biblioteca Ministério do Meio Ambiente  
Maria Ivana. CRB 1/1556

# Apresentação

Cerca de 25% da população brasileira vive na zona costeira e para isso, o conhecimento deste território é imprescindível para os gestores públicos e sociedade frente às mudanças do clima e amortecimento dos eventos extremos que a costa vem sofrendo.

Com o intuito de divulgar o conhecimento dessa parte do território tão complexa e rica, o Projeto Sistema de Modelagem Costeira - SMC-Brasil, fruto de acordo entre os governos Espanhol e Brasileiro, gerou um conjunto de 05 documentos temáticos que tratam de conceitos relacionados à inundação costeira, bem como das metodologias de cálculo e análise desse processo na costa brasileira, e 08 Manuais Técnicos para apoiar a instrumentalização dos gestores costeiros e promover a adequada transferência de conhecimento desejada no Projeto SMC-Brasil.

Esses 13 (treze) documentos estão com orientações e instruções para proposição de projeto de proteção da linha de costa e informações relevantes que podem orientar e apoiar os instrumentos de ordenamento territorial previstos no Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro.

Dessa forma, essas publicações que têm por objetivo principal prover o acesso a ferramentas que permitam melhorar e qualificar a tomada de decisão por parte de gestores e administradores das três esferas de governo na gestão da linha de costa, auxiliando nos processos de autorização e permissão de uso de bens e imóveis da União, licenciamento, zoneamento.

Além disso, esses documentos permitirão avaliar os problemas de impacto ambiental associados a obras e intervenções costeiras, delimitação de zonas de domínio público e privado ao longo do litoral, favorecendo à recuperação espaços públicos já ocupados, e proteção às populações assentadas em áreas com risco de inundações.

# Sumário

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>19</b>
1.1. Marco do Documento .....	19
1.2. Limitações do Uso do Documento .....	23
1.3. Estrutura do Documento .....	23
1.4. Escopo do documento .....	24
1.5. Processo de planejamento, projeto e execução de uma recuperação de praia .....	25
<b>CAPÍTULO 2: CONCEITOS PRÉVIOS, DINÂMICAS E PROCESSOS LITORÂNEOS</b> .....	<b>28</b>
<b>2. Conceitos Prévios, Dinâmicas e Processos Litorâneos</b> .....	<b>29</b>
2.1. Introdução .....	29
2.2. Conceitos Prévios .....	29
2.3. Dinâmicas .....	29
2.4. Processos Litorâneos .....	32
<b>3. Critérios Gerais de Desenho e Cálculo</b> .....	<b>35</b>
3.1. Introdução .....	35
3.2. Funções de uma praia e critérios de avaliação .....	38
3.2.1. Introdução .....	38
3.2.2. Funções de uma praia .....	39
3.2.3. Critérios de avaliação .....	42
3.3. Cálculo de estabilidade e evolução de uma praia .....	50
3.3.1. Conceitos Prévios .....	50
3.3.2. Metodologia de cálculo .....	52
3.3.3. Formulações de projeto e pré-projeto .....	53
3.3.3.1. Formulações do projeto e pré-projeto em curto prazo .....	54
3.3.3.2. Formulações do projeto e pré-projeto em médio prazo .....	61
3.3.3.3. Formulações do projeto e pré-projeto em longo prazo .....	67
3.3.3.4. Formulações de projeto e pré-projeto em prazo muito longo .....	71
3.3.4. Estratégias de uso das formulações .....	80
3.3.4.1. Curto prazo .....	80
3.3.4.2. Médio prazo .....	82
3.3.4.3. Longo prazo .....	82
3.3.4.4. Prazo muito longo .....	84

<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>88</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>93</b>
<b>1. Nomenclatura .....</b>	<b>95</b>
1.1. Introdução .....	95
1.2. Perfil das Praias .....	96
1.2.1. Definições .....	96
1.2.2. Variações do perfil: Praia dissipativas e refletivas .....	97
1.3. A forma em planta das praias .....	99
1.3.1. Definições Morfológicas .....	100
1.3.2. Conceitos de equilíbrio em planta .....	100
1.4. A hidrodinâmica das praias .....	105
1.4.1. Definições .....	105
1.4.2. A quebra das ondas .....	107
<b>Anexo 2</b>	
<b>FORMULAÇÕES .....</b>	<b>111</b>
<b>2. Formulações .....</b>	<b>112</b>
2.1. Introdução .....	112
2.2. Perfil de equilíbrio (Pré-projeto) .....	112
2.2.1. Aplicações do perfil de equilíbrio .....	116
2.3. Perfil de equilíbrio modificado (Projeto) .....	119
2.4. Forma em planta .....	130
2.4.1. Praias em equilíbrio estático .....	130
2.4.2. Praias em equilíbrio dinâmico ou desequilíbrio .....	136

# Lista de Figuras

Figura 1: Fluxograma esquemático do Projeto SMC - Brasil.....	21
Figura 2: Marco geral de uma atuação no litoral.....	26
Figura 3: Ondulação quebrando em uma passarela na orla.....	30
Figura 4: Zona intermareal típica de uma praia macromareal.....	31
Figura 5: Exemplo de praia de enseada.....	32
Figura 6: Esquema preliminar do Projeto de Recuperação.....	36
Figura 7: Esquema dos diferentes Níveis de Cálculo.....	37
Figura 8: Esquema preliminar do processo de Projeto Funcional.....	38
Figura 9: Escarpa de praia após a ação de um temporal.....	40
Figura 10: Vegetação de duna típica de praia.....	41
Figura 11: Interface como local de intensa utilização como área de recreação.....	42
Figura 12: Diagrama de valores recomendados em função do caráter geral de uma obra. Para mais detalhes, consultar a ROM 0.0.....	44
Figura 13: Fotografia oblíqua evidenciando a largura excessiva da praia (75-100 metros).....	48
Figura 14: Escalas espaciais e temporais típicas de algumas mudanças morfológicas das praias.....	52
Figura 15: Esquema da Metodologia de Cálculo de Estabilidade de Praia.....	53
Figura 16: Erosão da base de uma duna frontal pela ação da onda.....	55
Figura 17: Módulos do modelo de evolução do perfil de praia.....	58
Figura 18: Modelo de evolução em curto prazo da forma em planta.....	60
Figura 19: Exemplo de praias de enseada associada a quebramares.....	68
Figura 20: Esquema de simulação da evolução temporal.....	84
Figura 21: Toponímia do perfil em função da morfologia (adaptado de Komar, 1998).....	95
Figura 22: Perfil dissipativo.....	97
Figura 23: Quebra de ondas em praia dissipativa.....	98
Figura 24: Perfil refletivo.....	98
Figura 25: Quebra de ondas em praia refletiva.....	99
Figura 26: Representação esquemática de um trecho da costa.....	102
Figura 27: Esquema da forma em planta de equilíbrio “estático” (a) sem difração; e (b) com difração (gradientes de altura de onda).....	103

Figura 28: Esquema da forma de planta de equilíbrio “dinâmico”.....	104
Figura 29: Toponímia do perfil de praia em função da hidrodinâmica.....	106
Figura 30: Definição dos tipos de quebra de onda.....	108
Figura 31: Quebra de onda do tipo frontal.....	109
Figura 32: Quebra de onda do tipo mergulhante.....	109
Figura 33: Quebra de onda do tipo deslizante.....	110

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Metodologia de cálculo de estabilidade em escalas de processos de curto prazo.....	61
Tabela 2: Metodologia de cálculo de estabilidade em escalas de processos de médio prazo.....	67
Tabela 3: Metodologia de cálculo de estabilidade em escalas de processos de longo prazo.....	71
Tabela 4: Metodologia de cálculo de estabilidade em escalas de processos de prazo muito longo...	79
Tabela 5: Resumo dos possíveis efeitos em uma praia em um prazo muito longo.....	79
Tabela 6: Dados necessários em função do tipo de fórmula usada.....	80

# Lista de Quadros

Quadro 1: Índice de repercussão econômica (IRE) para determinar a vida útil de uma obra (ROM 0.0).....	46
Quadro 2: Índice de repercussão social e ambiental (ISA) para determinar a probabilidade de falha da obra (ROM 0.0).....	46
Quadro 3: Resumo dos parâmetros incluídos nos critérios de avaliação de uso humano de uma praia. ....	49
Quadro 4: Quadro 4 - Nível de segurança em função da altura de onda do estado morfodinâmico da praia (proposto por Short e Hogan, 1994). ....	50
Quadro 5: Modelo aproximado de retração da linha de costa frente a uma tempestade. ....	58
Quadro 6: Níveis de cálculo do pré-projeto.....	60
Quadro 7: Estados morfodinâmicos de praias sem maré. ....	65
Quadro 8: Estados morfodinâmicos de praias sem maré (Continuação). ....	66
Quadro 9: Estados morfodinâmicos de praias com maré. ....	67
Quadro 10: Retração da linha de costa devido ao aumento do nível do mar em prazo muito longo. ...	75
Quadro 11: Retração da linha de costa de praias completamente preenchidas devido ao aumento da altura de onda $H_{s12}$ . ....	76
Quadro 12: Efeitos de prazo muito longo na forma em planta de uma praia.....	79
Quadro 13: Modelos de regressão. ....	86
Quadro 14: Exemplo de aplicação das formulações para avaliar a retração da linha de costa em prazo muito longo devido a um aumento do nível do mar.....	87
Quadro 15: Perfil de equilíbrio. ....	115
Quadro 16: Aplicações do perfil de equilíbrio: Variação do Nível do Mar. ....	118
Quadro 17: Aplicações do perfil de equilíbrio: Adição de Areia. ....	119
Quadro 18: Aplicações do Perfil de equilíbrio: Perfil com Barreira.....	122
Quadro 19: Aplicações do Perfil de Equilíbrio: Perfil apoiado na Laje Rochosa. ....	123
Quadro 20: Aplicações do Perfil de Equilíbrio: Perfil com Refração-Difração. ....	124
Quadro 21: Aplicações do Perfil de Equilíbrio: Perfil com Reflexão. ....	125
Quadro 22: Aplicações do Perfil de Equilíbrio: Perfil com Face da Praia Linear. ....	126
Quadro 23: Aplicações do perfil de equilíbrio: Perfil Bi-parabólico. ....	127
Quadro 23 (Cont.) - Aplicações Perfil de Equilíbrio: Perfil bi-parabólico. ....	128

Quadro 24: Aplicações Perfil de Equilíbrio: Perfil de Cascalhos.....	129
Quadro 25: Forma em Planta de Equilíbrio Estático: Praias de Enseada. ....	134
Quadro 26: Tômbolos e Saliências. ....	136
Quadro 27: Fundamentos dos modelos de uma linha.....	138
Quadro 28: Modelos de uma linha: Soluções Analíticas sem Difração.....	141
Quadro 29: Modelos de uma linha: Soluções Analíticas com Difração. ....	143
Quadro 30: Modelos de uma linha: Soluções Numéricas.....	144

# Lista de Abreviaturas

- ABC – Agência Brasileira de Cooperação
- AECID – Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento
- BMS – Média das Baixamares de Sizígia
- CEM – *Coastal Engineering Manual*
- CEPAL – *Comisión Económica para América Latina*
- CERC – *Coastal Engineering Research Center*
- COPLA – Modelo de Correntes por Quebra em Praias
- DH – Dimensão Horizontal
- DL – Divisão de Levantamento do Exército
- DV – Dimensão Vertical
- EROS – Modelo de Erosão/Sedimentação de Praias
- GI-GERCO – Grupo de Integração do Gerenciamento Costeiro
- IABS – Instituto Ambiental Brasil Sustentável
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IH – Instituto Hidráulico
- IPCC – Painel Intergovernamental de Mudança Climática (*Intergovernmental Panel on Climate Change*)
- IRE – Índice de Repercussão Econômica
- ISA – Índice de Repercussão Social e Ambiental
- MM – Maré Meteorológica
- MMA – Ministério do Meio Ambiente
- MNI – Média dos Níveis Máximos Anuais em Sistemas Fluviais
- MOPLA – Modelo de Morfodinâmica de Praias
- MP – Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão
- NM – Nível Médio do Mar referido ao Zero Hidrográfico das Costas
- NRM – Nível do Mar Relativo
- NmaxA – Nível Máximo de Cheia (do rio) correspondente ao Período de Retorno associado ao Risco Máximo Admissível
- NME – Nível Médio de Estiagem em Sistemas Fluviais
- NminE – Nível Mínimo de Estiagem correspondente ao Período de Retorno associado ao Risco Máximo Admissível
- NMR – Nível Médio de Referência
- NRA – *National Rivers Authority*

OLUCA – Modelo de Propagação de Ondas em Praias

PMS – Média das Preamares de Sizígia

RMS – Raiz Quadrática Média (*Root Mean Square*)

ROM – Recomendações para Obras Marítimas

SEDR – Secretaria de Extrativismo e Desenvolvimento Rural Sustentável

SMC – *Sistema de Modelado Costero* / Sistema de Modelagem Costeira

SPU – Secretaria do Patrimônio da União

UC – Universidade da Cantabria

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

USP – Universidade de São Paulo

# Lista de Símbolos

- $a$  – Amplitude da onda
- $A$  – Nível de dissipação
- $A$  – Parâmetro de forma do perfil de Dean
- $A$  – Seção transversal da praia
- $A_J$  – Areia de jazida
- $A_N$  – Areia nativa
- $A_r$  – Parâmetro de forma do perfil de quebra (associado à dissipação por quebra)
- $A_r$  – Parâmetro dependente do coeficiente de refração na zona de quebra
- $b$  – Subíndice que indica a condição de quebra
- $B$  – Altura da berma/duna
- $B$  – Metade do comprimento do quebramar
- $B$  – Nível de reflexão
- $B$  – Parâmetro de forma do perfil de quebra (associado à reflexão)
- $B_I$  – Metade do comprimento de praia alterado pela formação de tombolo ou saliência
- $B_K$  – Metade da largura de ligação do tombolo ao quebramar
- $C$  – Parâmetro de forma do perfil de empinamento (associado à dissipação por fricção)
- $C_0$  – Parâmetro de dimensionamento econômico
- $C_0/C_1/C_2$  – Coeficientes gerados a partir de análises de regressão dados em função do ângulo  $\beta$
- $C_g$  – Velocidade de grupo da onda
- $C_{gb}$  – Velocidade de grupo da onda em quebra
- $C_{RD}$  – Repercussão econômica por reconstrução da obra
- $C_{RI}$  – Redução ou não das atividades econômicas
- $D$  – Parâmetro de forma do perfil de empinamento (associado à reflexão)
- $D$  – Profundidade de fechamento
- $D_{50}$  – Tamanho médio do sedimento
- $D_{n50}$  – Diâmetro nominal médio do sedimento
- $E$  – Carga ou risco da obra
- $E$  – Energia
- $E$  – Erosão de fundo
- $f_i$  – Frequência de apresentação da i-combinação de onda-direção
- $F_m$  – Fluxo médio anual de energia de onda
- $\bar{F}$  – Vetor fluxo de energia

$g$  – Aceleração da gravidade

$G$  – Coeficiente de difusão que mede a escala temporal das mudanças da linha de costa frente a uma perturbação

$h$  – Profundidade

$h_a$  – Profundidade final do perfil de empinamento (em relação à maré baixa)

$h_b$  – Profundidade de fechamento

$h_b$  – Profundidade de quebra da onda

$h_c$  – Elevação da crista

$h_r$  – Profundidade de quebra da onda (em relação à maré baixa)

$h_t$  – Profundidade de transmissão

$h^*$  - Profundidade de fechamento

$h'$  – Profundidade adimensional de quebra em tempestade

$H$  – Altura da onda

$H_b$  – Altura de quebra da onda

$H_b$  – Altura significativa de onda na arrebentação

$H_s$  – Altura significativa de onda

$H_{s12}$  – Altura significativa de onda superada 12 horas ao ano  $H_R$  – Altura de onda representativa do transporte médio

$H_{rmsb}$  – Média quadrática da altura de onda em quebra

$I$  – Comprimento do engordamento retangular

$I_r$  – Número de Iribarren

$I_{rb}$  – Número de Iribarren em quebra

$ISA_1$  – Subíndice de possibilidade e alcance das perdas de vidas humanas

$ISA_2$  – Subíndice de danos ao meio ambiente e patrimônio histórico-artístico

$ISA_3$  – Subíndice de alarme social

$K$  – Constantes

$K_r$  – Coeficiente de refração na zona de quebra

$L$  – Comprimento de onda

$L$  – Comprimento da praia

$L_c$  – Linha de costa

$L_f$  – Vida útil da obra

$L_{om}$  – Comprimento de onda média em profundidades indefinidas

$L_\infty$  - Comprimento da onda em profundidades indefinidas

$m$  – Declividade do perfil

$M$  – Fração do material

$M$  – Variação da maré  
 $M'$  - Parâmetro de variação relativa da maré  
 $MSR$  – Variação da maré  
 $N$  – Todas as ondulações do ano  
 $p$  – Porosidade do sedimento  
 $p_b$  – Posição da profundidade de fechamento  
 $p_c$  – Posição da crista  
 $p_r$  – Limite do *runup*  
 $p_t$  – Posição de transição  
 $P_{f,ELS}$  – Probabilidade conjunta de falha relativa aos estados limites de serviço  
 $P_{f,ELU}$  – Probabilidade conjunta de falha relativa aos estados limites últimos  
 $P_i$  – Fluxo de energia longitudinal  
 $q$  – Fluxo de sedimento  
 $q_l$  – Transporte potencial igual ao real  
 $q_s$  – Transporte de areia fora da praia  
 $Q$  – Transporte potencial longitudinal  
 $Q_a$  – Transporte potencial atual  
 $Q_i$  – Transporte da iésima-combinação de onda-direção  
 $\bar{Q}$  – Transporte médio  
 $R$  – Retração do perfil de praia  
 $R$  – Raios a partir da linha da crista de ondas predominante ligados a outros pontos ao longo da praia  
 $R_0$  – Raio inicial, linha que une o ponto de controle até a extremidade final da parte retilínea da praia  
 $R(t)$  – Retração do perfil de praia  
 $R_\infty$  – Retração do perfil de praia  
 $Re_{\Delta h^*}$  – Retração do perfil de praia  
 $R_{\Delta\eta}$  – Retração da linha de costa  
 $R_{max}$  – Retração máxima da linha de costa  
 $R_{2\%}$  - *Runup* superado por 2% das ondas  
 $RTR$  – Parâmetro de Variação Relativa da Maré (*Relative Tidal Range Parameter*)  
 $S$  – Aumento do nível do mar  
 $S$  – Empilhamento (*setup*)  
 $S'$  – Maré adimensional de tempestade  
 $S_1$  – Obras sem repercussão social e ambiental significativas  
 $S_2$  – Obras com repercussão social e ambiental baixa  
 $S_3$  – Obras com repercussão social e ambiental alta

$S_4$  – Obras com repercussão social e ambiental muito alta

$t$  – Tempo

$T$  - Tempo

$T$  – Período médio de retorno da onda

$T$  – Período de pico da onda

$T_D$  – Duração do aumento do nível do mar

$T_m$  – Período médio da onda

$T_p$  – Período de pico da onda

$T_s$  – Tempo em que o perfil leva para alcançar 63% da retração

$T_s$  – Período de pico da onda

$T_s$  – Período significativo de onda

$V$  – Volume

$V_A$  – Volume de acreção

$V_E$  – Volume de erosão

$V_H$  – Corrente por difração

$V_i$  – Corrente líquida

$V_m$  – Vida útil mínima da obra em função do IRE

$V_\theta$  – Corrente por obliquidade

$w$  – Velocidade de queda do grão

$W_s$  – Velocidade de queda do grão

$W^*$  - Distância horizontal da linha de costa à profundidade de fechamento

$x$  – Distância a partir da linha de praia

$x$  – Eixo longitudinal do perfil de praia

$x^*$  - Distância horizontal da linha de costa à profundidade de fechamento

$X$  – Distância a partir da linha de praia

$X$  – Distância do quebramar à linha de costa original

$X_0$  – Distância da origem do perfil de quebra à origem do perfil de empinamento

$y$  – Eixo transversal do perfil de praia

$y$  – Posição da linha de costa

$Y$  – Distância horizontal da praia

$Y$  – Distância do quebramar à linha de costa original

$Y_0$  – Largura da saliência teórica

$Y_1$  – Largura da saliência junto a linha de costa para o caso de dupla saliência

$Y_2$  – Largura da saliência junto ao quebramar para o caso de dupla saliência

$\alpha_{min}$  – Ângulo que forma a normal de todas as frentes de onda que passam pelo ponto de controle

$\alpha_R$  – Ângulo entre a frente de onda e a linha de costa  
 $\beta$  – Ângulo formado entre a linha da crista de ondas predominante e a linha de controle  $R_0$   
 $\beta$  – Declividade da praia  
 $\beta_1$  – Direção do fluxo médio de energia inicial de onda  
 $\beta_2$  – Direção do fluxo médio de energia final de onda  
 $\beta_{ELS}$  – Índice de fiabilidade relativa aos estados limites de serviço  
 $\beta_{ELU}$  – Índice de fiabilidade relativa aos estados limites últimos  
 $\gamma$  – Índice de quebra da onda  
 $\delta/\Delta$  - Variação  
 $\Delta$  – Densidade relativa  
 $\Delta\eta$  – Variação do nível médio do mar  
 $\Delta y_0$  – Largura do pós-praia  
 $\varepsilon$  – Parâmetro de escala de arrebentação  
 $\eta_b$  – Descida do nível do mar na zona de quebra  
 $\theta$  – Ângulo formado entre a linha da crista de ondas e os demais raios R  
 $\theta$  – Direção de onda  
 $\theta_b$  – Ângulo entre a linha de costa e a frente das ondas  
 $\theta_{bs}$  – Ângulo entre a linha de costa e a frente das ondas em quebra  
 $\theta_m$  – Direção do fluxo médio de energia de onda  
 $\theta_0$  – Direção média de onda  
 $\rho$  – Densidade da água  
 $\rho_s$  – Densidade do sedimento  
 $\Omega$  – Parâmetro adimensional de queda de grão  
 $\Omega^*$  - Parâmetro adimensional de queda de grão  
 $\omega$  – Frequência angular da onda  
 $\omega_s$  – Velocidade de queda do grão

# CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

# 1. Introdução

## 1.1. Marco do Documento

A Zona Costeira brasileira é uma região de alta densidade populacional para a qual convergem grande parte dos investimentos, infraestruturas e fluxos econômicos preponderantes no país. A vulnerabilidade natural da zona costeira é relevante ao bem-estar da população e ao crescimento econômico do país, onde impactos se potencializam frente aos efeitos das mudanças do clima.

O Projeto Orla estabeleceu uma faixa de gestão da zona costeira com a finalidade de identificar uma possível linha de segurança da costa, abrangendo as áreas de grande dinamismo geomorfológico (com tendências de transgressão ou regressão marinhas), cobrindo espaços de desequilíbrio em termos de processos morfogenéticos e hidrodinâmicos.

Cerca de 40% da costa brasileira tem problema de erosão, sendo os seus efeitos mais significativos nas regiões urbanizadas (MUEHE, 2006). Embora a urbanização em si não provoque erosão, as edificações e construções dentro da faixa de resposta da dinâmica da praia às tempestades tendem a ser retomadas pelo mar, se tratando, portanto, de ocupações em áreas de risco a erosão e inundação (MUEHE, 2006).

Quando se trata de obras de engenharia costeira e sua interação com os instrumentos de gestão ambiental é importante considerar que as intervenções costeiras devem sempre ser avaliadas sob a ótica da unidade fisiográfica em que se inserem. Obras isoladas em áreas costeiras devem ser evitadas, sendo necessário favorecer as ações conjuntas em unidades fisiográficas definidas, em planos e projetos envolvendo União, estados e municípios, a exemplo do próprio Projeto Orla.

Em 2000, no I Simpósio Brasileiro sobre Praias Arenosas, bem como em 2008, no I Simpósio Nacional sobre Erosão Costeira, que reuniu academia e gestores, foi identificado como desafio vencer a falta de conhecimento sobre os processos litorâneos, que moldam a costa brasileira (ondas, marés, batimetria, ventos, entre outros), que permitisse uma melhor caracterização de fenômenos ou tendências erosivas ao longo do litoral. Também foi apontada a necessidade urgente de formar profissionais especializados em processos litorâneos e em obras e intervenções na costa, na perspectiva de qualificar os projetos de intervenção, melhorando o processo de tomada de decisão e assegurando a proteção da linha de costa.

No evento foi apresentada a experiência da Espanha nas ações de gestão costeira para proteção da linha de costa, estruturadas a partir de um programa contínuo de formação e na instrumentalização para tomada de decisão (MMA, 2013). Na Espanha, o “Modelo de Ajuda para a Gestão do Litoral” inclui o “*Sistema de Modelado Costero*” (SMC), composto por um conjunto de ferramentas que permite o estudo, desenho e elaboração de alternativas para projetos de engenharia costeira.

O processo de avaliação e implementação de obras de recuperação da linha de costa espanhola utilizando o SMC acumula uma experiência de mais de 15 anos, a partir da parceria entre o governo espanhol e o Instituto Hidráulico da Universidade da Cantabria (IH Cantabria). O programa de gestão envolve a produção de conhecimento para tomada de decisão, considerando a dinâmica natural, a gestão da costa e a gestão urbana. Esse processo envolveu a reapropriação de áreas de

domínio público e indenização a particulares. A iniciativa foi uma resposta ao acelerado processo de urbanização experimentado pela Espanha nos anos 70, que fundamentou a Lei da Costa em 1988. A estratégia foi a de atuar na gestão de conflitos no litoral, de forma a garantir a defesa da costa, *habitats* de fauna e flora e a ocupação humana. Além de atender às demandas de resoluções e diretivas da União Européia, a exemplo da gestão costeira integrada e, posteriormente, a de avaliação de risco à inundação.

Motivados por essa experiência, em 2010, os governos brasileiro e espanhol estabeleceram o Acordo de Cooperação Técnica, Científica e Tecnológica para executar o Projeto “Transferência de Metodologias e Ferramentas de Apoio à Gestão da Costa Brasileira” entre a Agência Brasileira de Cooperação (ABC) e a Agência Espanhola de Cooperação Internacional para o Desenvolvimento (AECID), com a participação do Ministério do Meio Ambiente através da Secretaria de Extrativismo e Desenvolvimento Rural Sustentável (MMA/SEDR), da Secretaria do Patrimônio da União e do Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão (SPU/MP), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), da Universidade de São Paulo (USP), da Universidade da Cantabria (UC-IH Cantabria/Espanha) e do Instituto Ambiental Brasil Sustentável (IABS). O objetivo era contribuir para a melhoria da gestão de implementação de obras costeiras no Brasil, a partir de insumos que incentivassem o entendimento e a proposição de soluções a problemas de erosão costeira e seus impactos ambientais, promovendo a recuperação da funcionalidade dos espaços públicos já ocupados e protegendo as populações em áreas de risco.

O projeto, denominado SMC - Brasil, gerou um conjunto de publicações para apoiar estudos de processos costeiros e quantificar as variações que sofre o litoral como consequência de eventos naturais ou de atuações humanas na costa. O material é voltado para os gestores costeiros e academia, apresentando os referenciais teóricos para entendimento da dinâmica costeira e construção de cenários da linha de praia. Essas informações são importantes para o planejamento e qualificação da tomada de decisão da orla marítima. O conjunto de documentos é composto por:

i. Estudo “*Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regime probabilístico de área de inundação costeira do Brasil*” que tem como objetivo disponibilizar informações sobre a faixa de inundação e nível do mar ao longo de toda a costa brasileira.

ii. Documentos Temáticos com objetivo de apresentar e detalhar metodologias de projeto para diversas atuações na costa, incluindo as metodologias para o pré-tratamento dos dados de dinâmicas marinhas (ondas e níveis do mar).

iii. Manuais de Modelos Numéricos usados na ferramenta SMC-Brasil com objetivo de disponibilizar a base de dados das cartas batimétricas e dinâmicas marítimas (ondas e nível do mar) ao longo da costa brasileira; e oferecer um pacote de programas numéricos que permita a correta utilização da metodologia proposta nos Documentos Temáticos.

Os conteúdos apresentados no conjunto de documentos sintetizam a transferência de conhecimento da experiência espanhola que são de grande valia para o debate e o desenvolvimento de ações costeiras no Brasil relacionado à dinâmica da praia. Ressalta-se que os documentos estão centrados em praias de sedimento inconsolidado (areia, cascalho) localizadas em zonas abertas, nas quais a ondulação é a dinâmica predominante. Por isso, é importante compreender que existem limitações nos dados adquiridos e nos resultados alcançados, já que foram assumidas algumas

simplificações metodológicas. Para que o usuário utilize corretamente as informações contidas nesses documentos, em especial no presente documento, deve-se levar em consideração as limitações apresentadas na seção 1.2 deste capítulo.

## O Projeto SMC–Brasil

O Projeto SMC – Brasil tem como componentes fundamentais a formação de pessoal e a instrumentalização de gestores públicos em técnicas de proteção e gestão do litoral que facilite a tomada de decisões. A proposta é apresentar subsídios que possam apoiar a construção de um modelo que auxilie na dinamização e qualificação de procedimentos de licenciamento ambiental e de planejamento territorial, avaliando os impactos de obras na zona costeira (Figura 1).

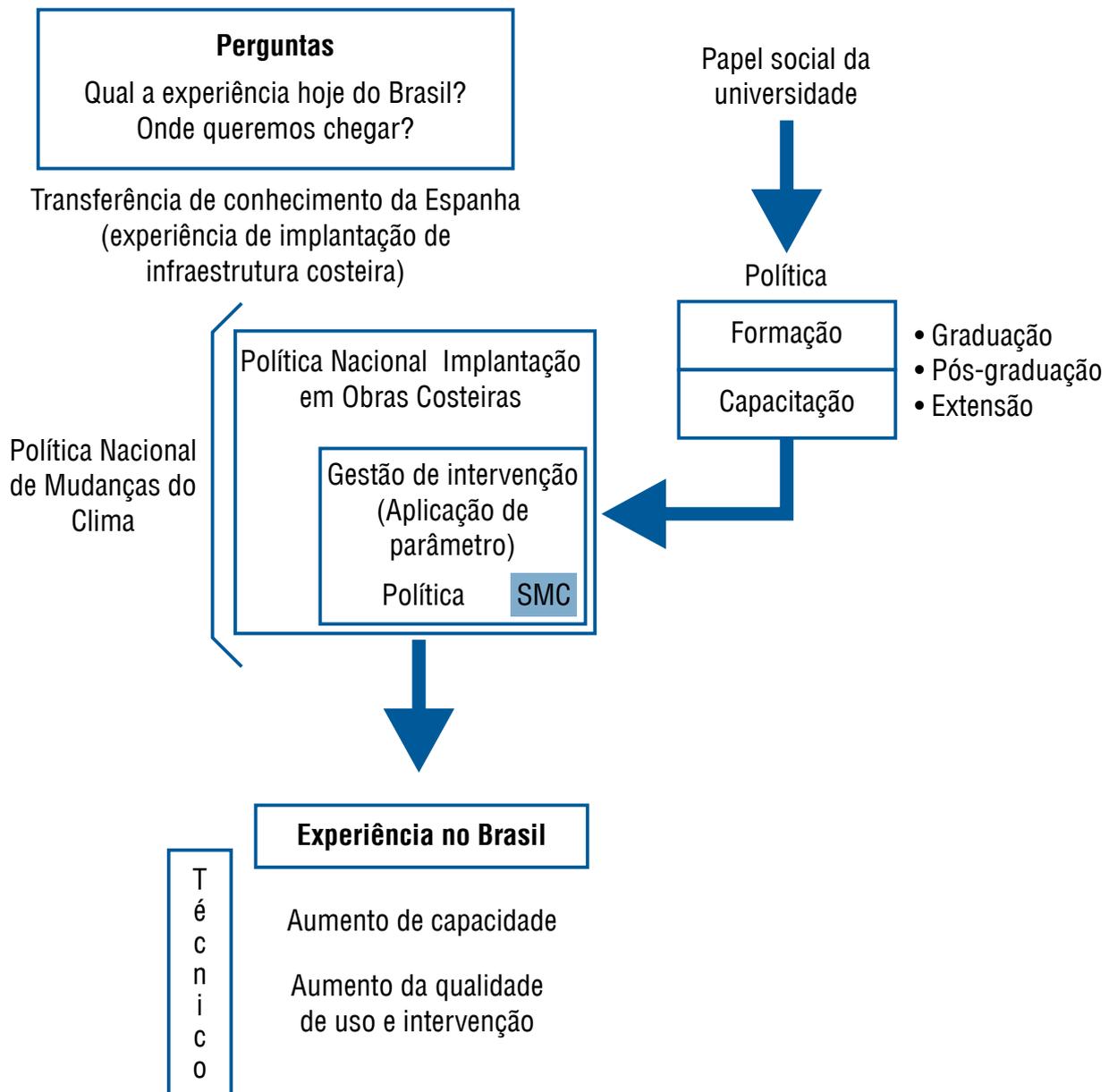


Figura 1: Fluxograma esquemático do Projeto SMC - Brasil.

A ferramenta computacional SMC - Brasil combina metodologias de trabalho, bases de dados de cartas náuticas e modelos numéricos orientados para o estudo e/ou solução de problemas

na zona costeira. As metodologias permitem abordar o estudo de um problema de forma sistemática, respondendo perguntas sobre dados de entrada, escalas de análise de processos, aplicação de modelos, entre outros. As escalas espaço-temporais na linha de costa consideram aspectos como a recuperação de praias, o clima de ondas na costa e a cota de inundação.

As ferramentas do SMC-Brasil podem ser divididas em duas:

(1) o SMC Tools que inclui uma base de dados de batimetria, ondas, nível do mar, transporte de sedimentos, etc.; e duas ferramentas de processamento de dados integradas, uma para realizar a análise estatística das variáveis ambientais, e outra ferramenta que permite realizar a transferência de uma série de ondas a partir de profundidades indefinidas para pontos na costa;

(2) o Sistema de Modelagem Costeira (SMC) propriamente dito, que integra uma série de modelos numéricos e permite dar um suporte prático à correta aplicação da metodologia de trabalho proposta nos Documentos Temáticos.

A execução do Projeto SMC - Brasil trouxe aprendizados importantes para o Brasil, colaborando na sensibilização e dimensionamento de problemas relevantes para ações de gestão da orla marítima, que devem balizar a estratégia para construção de um modelo de atuação para avaliação da proteção da linha de costa.

A primeira dificuldade esteve relacionada à falta de uma base de dados que permitisse o compartilhamento de informações, com metadados adequados. A oportunidade de disponibilizar uma base de dados via a ferramenta SMC – Brasil representa um incremento para o Brasil, enquanto se atua em ações mais estruturantes tanto para a disponibilização de dados, como na validação de modelagens que possam cobrir as lacunas de informações.

A base de dados de ondas e de nível de marés (maré astronômica e meteorológica) para a costa brasileira, que pode ser acessada via SMC Tools, foi obtida por meio de técnica de reanálise. Tendo como referência o ano de 2008, a série gerada representa o comportamento de ondas e marés dos últimos sessenta anos, a cada hora, com malha de 1km próximo a costa.

A iniciativa do SMC – Brasil mobilizou academia e órgãos gestores, possibilitando levantar a demanda de formação continuada de profissionais que irão atuar na gestão costeira. O acesso à ferramenta SMC – Brasil despertou a necessidade de ações mais sinérgicas entre a pesquisa e gestão, que possibilite aos estados costeiros, de forma cooperada com as universidades locais, realizar análises e estudos da dinâmica costeira para orientações mais precisas e eficazes no que diz respeito aos processos de licenciamento, zoneamento e planejamento territorial.

É importante deixar claro que o conjunto de produtos do Projeto SMC – Brasil não supre a necessidade dos dados em escala local, na precisão adequada. Tratam-se, portanto, de insumos para apoiar o Brasil na construção de um modelo de gestão brasileira para análise da proteção da linha de costa, que promova a difusão da informação e a qualificação do processo de tomada de decisão.

Em resumo, para o uso adequado da ferramenta SMC – Brasil é necessário investir na formação e capacitação de gestores, técnicos e pesquisadores no que se refere às técnicas de proteção e manejo das costas brasileiras e em conhecimentos básicos sobre dinâmica costeira. É

fundamental também que o país avance na estratégia de coleta e disponibilização de informações básicas sobre oceanografia, fundamental para a melhor aplicação de modelos e simulações. Ainda, reforça-se a necessidade de que este documento seja aplicado estritamente de acordo com seus objetivos e limitações, descritas a seguir.

## 1.2. Limitações do Uso do Documento

O projeto SMC – Brasil, juntamente com seus programas e documentos traz informações que são de grande valia ao considerar o desenvolvimento costeiro no Brasil. No entanto, é importante compreender que existem limitações nos dados adquiridos e resultados alcançados uma vez que foram assumidas algumas simplificações metodológicas. Para que o usuário utilize corretamente a informação contida neste documento deve-se levar em consideração as seguintes limitações:

- Falta de uma base única de elevação de terreno que contenha dados de batimetria e topografia. Embora, a zona costeira tenha levantamento batimétrico, sob a responsabilidade da Diretoria de Hidrografia e Navegação – DHN, e cartográfico, elaborado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e pela 5ª Divisão de Levantamento do Exército – V-DL, estes instrumentos não possuem referências geodésicas comuns, nem horizontais, nem verticais, o que significa dizer que o nível zero de uma base não coincide com o nível zero da outra. Essa diferença é relevante na análise de variações do nível do mar.
- Apesar da base de dados do SMC – Brasil possuir uma longa série de dados de ondas (60 anos), esta foi simulada a partir de dados de vento e da batimetria global, e não propriamente medidos. Entretanto foi calibrada e validada para águas profundas;
- A base de dados, proveniente de reanálise global, não apresenta grande resolução local. Além disso, o modelo utilizado na geração dessa base de dados é relativamente simples, desconsiderando processos de difração, por exemplo, por promontórios e ilhas.

## 1.3. Estrutura do Documento

O documento temático de Recuperação de Praias foi organizado, na medida do possível, tentando agrupar os elementos metodológicos comuns existentes em diferentes fases dos estudos técnicos de uma recuperação de praia, isto é:

- Diagnóstico.
- Pré-projeto.
- Projeto.

Desta forma, no Capítulo 3 encontram-se os critérios gerais de concepção e cálculo, que reúne os aspectos conceituais e metodológicos que serão utilizados tanto no diagnóstico como no pré-projeto e projeto de recuperação. A qual é complementada com o Capítulo 2, dedicado a revisar os conceitos prévios considerados conhecidos pelo leitor.

Esta organização considera que tanto o diagnóstico, como o pré-projeto ou o projeto possuem o mesmo objetivo: conhecer a morfodinâmica atual da praia e sua evolução, diferenciando-se, fundamentalmente, no âmbito espaço-temporal e nível de estudo.

Assim, o diagnóstico tem um caráter de “passado”, buscando as causas que deram origem ao estado atual de uma praia (embora também possa ter um componente de “futuro”, possibilitando o conhecimento do que irá acontecer se não houver uma ação). O projeto e pré-projeto enfocam a evolução futura de uma determinada ação (na qual se pode incluir a opção de não agir). Todavia, a metodologia de análise da mesma, será apresentada de forma única. No Capítulo 3 serão diferenciadas, no entanto, as distintas formulações que podem ser utilizadas nos estudos do pré-projeto e/ou do projeto.

Por último, salienta-se que o diagnóstico requer dados históricos (construções, ondas, etc.), enquanto a seleção e definição de alternativas demandam uma previsão de acontecimentos futuros da dinâmica atuante, aspectos estes que serão tratados com detalhe no Capítulo 3.

#### 1.4. Escopo do documento

O presente Documento Temático de Recuperação de Praias tem o objetivo específico de apresentar a metodologia e ferramentas que permitam realizar, com confiabilidade, todas as fases de estudos técnicos em uma recuperação de praia: Diagnóstico, Pré-projeto, Projeto e Acompanhamento e Avaliação da obra.

Apesar dos documentos que tratam das ferramentas e módulos do SMC - Brasil apresentarem informações atualmente existentes no campo da engenharia costeira, é necessário fixar alguns critérios prévios específicos que permitam decidir qual é a informação estritamente necessária para alcançar os objetivos propostos.

##### **a) Público-Alvo**

O documento é destinado a Engenheiros Costeiros e Técnicos que desenvolvem e analisam atividades de projeto, construção, manutenção e acompanhamento de praias.

##### **b) Conteúdos**

O documento tem um caráter de “manual”, predominando os aspectos metodológicos, a descrição das ferramentas e procedimentos a serem utilizados frente ao desenvolvimento dos aspectos teóricos ou comparação de ferramentas e formulações existentes. O documento irá descrever, por exemplo, a formulação de transporte de sedimentos ou do perfil de praia a ser utilizado em função das características da praia, mas não realizará uma descrição de todas as formulações existentes ou uma comparação entre as mesmas.

Por outro lado, na seleção de formulações, levou-se em conta o tipo de uso e usuário do presente documento, reunindo os últimos avanços no assunto, mas sem incluir as formulações de caráter acadêmico ou em fase de pesquisa.

É importante notar que o documento aborda aspectos ambientais e sociais, mas sempre do ponto de vista da engenharia costeira (por exemplo, impacto ambiental, critérios de uso das praias, etc.).

### **c) Área de Aplicação**

A área de aplicação do documento está centrada nas praias de sedimento inconsolidado (areia, cascalho) localizadas em zonas abertas, nas quais a ondulação é a dinâmica predominante. Nessas áreas, a metodologia desenvolvida é aplicável tanto para a costa brasileira como a qualquer outra costa, dependendo, obviamente, da disponibilidade de informações relativas à onda e marés.

## **1.5. Processo de planejamento, projeto e execução de uma recuperação de praia**

Antes de começar com o desenvolvimento do documento propriamente dito, é conveniente rever, mesmo que de forma superficial, os diferentes aspectos técnicos, sociais, econômicos e ambientais que são relevantes em qualquer obra de engenharia costeira e, em especial, para uma obra como a recuperação de praia. Estes aspectos são reunidos, de forma esquemática, na Figura 2 onde se distingue os aspectos relacionados ao trabalho de gestão costeira, das questões técnicas específicas que envolvem a resolução de um problema na costa.

Toda atuação na costa começa quando o gestor, ao identificar problemas na linha de costa ou quando deseja planejar novos projetos de urbanização e/ou de infraestrutura, apresenta o problema à equipe técnica em engenharia costeira. A partir deste momento iniciam uma série de etapas que, sucessivamente, deverão ser realizadas visando à resolução do problema. Em cada uma destas etapas é importante que a área técnica forneça ao gestor as informações relativas ao problema de engenharia, de modo que o gestor a partir deste entendimento e considerando outras condições, tais como demandas e necessidades sociais, prioridades políticas, disponibilidade econômica, aspectos estratégicos etc., decida sobre a conveniência de continuar com o processo de definição da resposta de engenharia costeira ao problema apresentado.

Nesse contexto este documento tem como foco os aspectos técnicos relativos à resolução de um problema costeiro, com orientações sobre metodologia e ferramentas que abordem as fases de um projeto de recuperação de praias: diagnóstico; proposta (pré-projeto); projeto (concepção) e acompanhamento e avaliação do projeto de recuperação de praia. Portanto, não serão tratadas as atividades relacionadas à gestão, tais como a avaliação de aspectos sociais, socioeconômicos, viabilidade ambiental/e territorial (licenciamento, cessão de uso) etc., que podem ser encontrados em outras publicações, a exemplo dos manuais do Projeto Orla.

Os aspectos técnicos abordaram as seguintes fases:

### **a) Diagnóstico**

A fase de diagnóstico tem como objetivo a determinação das causas que originaram o estado atual de uma praia. Esta fase é de extrema importância e nela é demonstrada a capacidade da equipe técnica de entender e avaliar os processos costeiros que originaram esta situação. Se o diagnóstico realizado não for correto, dificilmente a ação proposta será adequada.

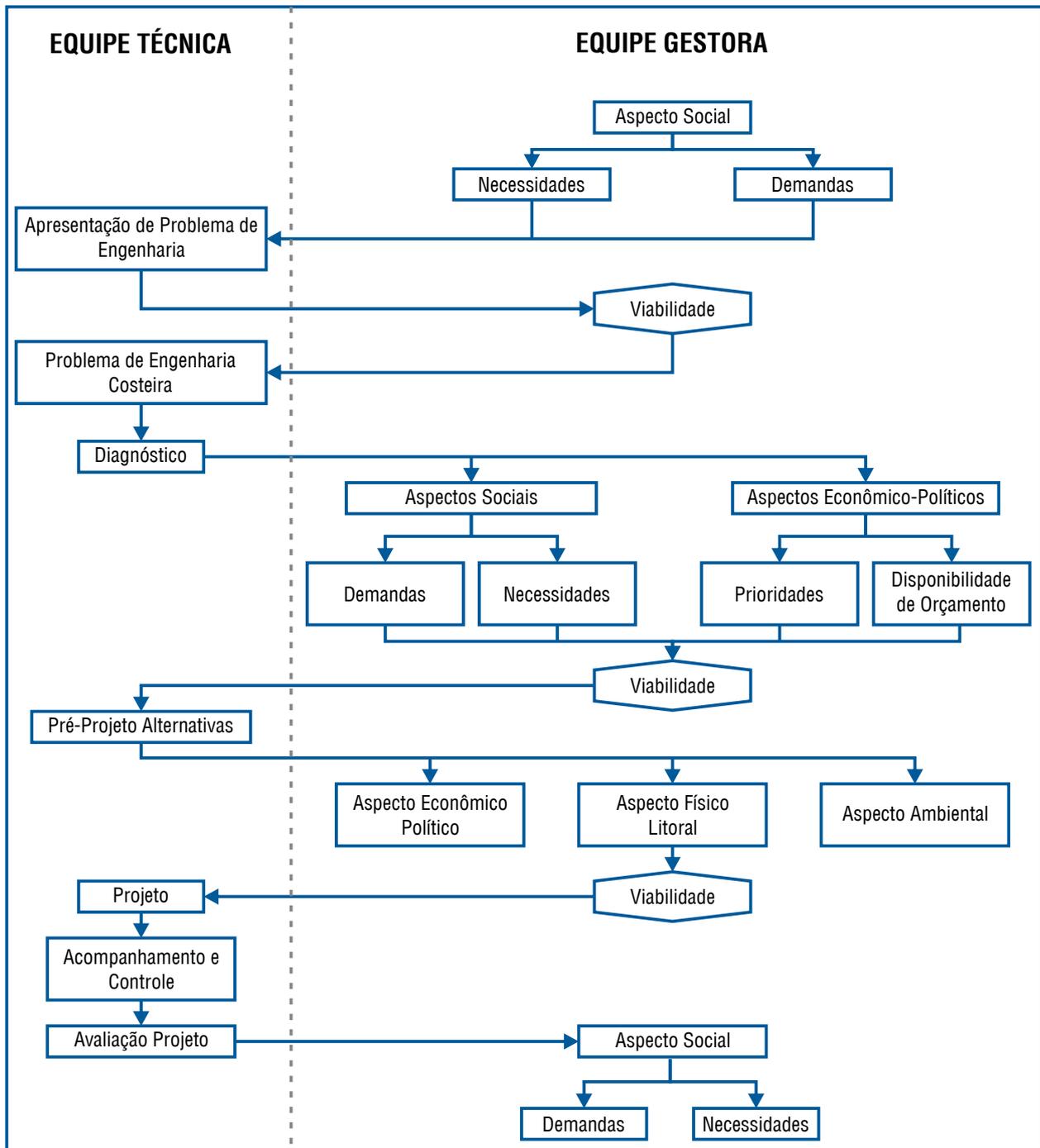


Figura 2: Marco geral de uma atuação no litoral.

### b) Proposta (pré-projeto)

A fase de proposta ou pré-projeto visa o estabelecimento de uma série de alternativas com soluções para o problema. Nesta fase, se prioriza por levantar diferentes alternativas, mas ainda sem precisão sobre a definição da solução, uma vez que o objetivo final é que o gestor possa comparar as alternativas e, de acordo com outras condições, escolher a que será estabelecida como a solução-projeto.

### **c) Projeto (concepção)**

A fase de projeto ou concepção tem como objetivo o cálculo detalhado da alternativa na solução selecionada. Para o cálculo detalhado são utilizados ferramentas ou modelos de cálculos sofisticados, que exigem um maior número de dados de partida.

### **d) Acompanhamento e avaliação do projeto**

A fase de acompanhamento e avaliação do projeto tem como objetivo verificar se a ação está evoluindo de acordo com o previsto no projeto. Esta fase é necessária, pois toda obra marítima está sujeita às ações dinâmicas (ondas, vento etc.), assim, sempre existe um determinado risco da ação evoluir com variações em relação à evolução prevista no projeto.

# CAPÍTULO 2: CONCEITOS PRÉVIOS, DINÂMICAS E PROCESSOS LITORÂNEOS

## 2. Conceitos Prévios, Dinâmicas e Processos Litorâneos

### 2.1. Introdução

Conforme discutido no Capítulo 1, o objetivo de fornecer ao leitor um texto prioritariamente metodológico e prático proporciona como resultado um grande número de aspectos teóricos, de inquestionável importância, que não serão analisados, pois caso isso fosse feito, o documento teria uma extensão que certamente perderia seu caráter prático.

Presume-se que o usuário desse documento é conhecedor dos aspectos técnicos necessários para entendimento de problemas de engenharia costeira, por esta razão, aqui é realizada apenas uma breve revisão de ações e processos costeiros mais relevantes nas praias.

### 2.2. Conceitos Prévios

A descrição dos processos litorâneos requer a utilização de uma nomenclatura e terminologia específica que defina corretamente a morfologia e/ou a dinâmica do objeto de interesse. Infelizmente, a maior parte da terminologia utilizada vem da língua inglesa, não havendo em português a tradução para muitos destes termos. No Anexo 1 do presente documento é reunida a nomenclatura inglesa e portuguesa dos termos relativos à morfologia litorânea e os processos costeiros mais importantes.

Por outro lado, é importante que o leitor conheça os aspectos relacionados aos sedimentos que geralmente formam as praias. Alguns destes aspectos, como as suas propriedades químicas, determinam processos importantes a exemplo da cimentação das areias por supersaturação de carbonatos. Outras características, como suas propriedades físicas (por exemplo, distribuição granulométrica, velocidade de sedimentação, etc.) têm um papel relevante no transporte de sedimentos existentes nas praias.

### 2.3. Dinâmicas

As praias estão sujeitas à ação de um grande número de dinâmicas, tanto marinhas (por exemplo, marés, ondas de infra-gravidade, etc.) como atmosféricas (por exemplo, vento, pressão, etc.). Cada uma delas tem sua própria escala espacial e temporal de ação e gera uma resposta na praia em tais escalas de variabilidade.

#### **Ondas**

A ondulação, no que diz respeito a este documento, é a dinâmica mais importante na estabilidade e evolução de uma praia. A geração da onda se deve à ação do vento sobre a superfície do mar, estando às características da mesma (altura, período, forma espectral, etc.) intimamente ligadas a aspectos como a intensidade do vento, a duração do mesmo, a distância de ação ou a distância entre a zona de geração e a praia. A natureza aleatória do vento e o mecanismo de geração e propagação da onda resultam que essa seja também um fenômeno aleatório. A complexidade envolvida no estudo de propagação da onda, a partir de um ponto de vista probabilístico, possibilitou que historicamente as ondulações tenham sido estudadas através de soluções analíticas, para um conjunto de fenômenos observados.

Existem diversas teorias de ondas lineares, Stokes, Boussinesq, etc., que podem ser utilizadas para representar a ação da onda. O uso de uma ou outra teoria é condicionado pelo parâmetro de Ursell, que relaciona a altura, a profundidade e o comprimento da onda.

A teoria de ondas permite analisar os fenômenos de transformação da ondulação em sua propagação desde águas profundas até a praia. Estes fenômenos de propagação incluem o empinamento, a refração, a difração, a reflexão e a perda de energia por atrito. Os quatro primeiros condicionam o fluxo de energia que a praia recebe, tanto em magnitude como em direção, sendo de vital importância sua correta determinação. Neste sentido, cabe ressaltar que embora existam diversas soluções analíticas para casos de praias com geometrias simples, o estudo da propagação de onda em praias reais deve ser realizado por meio de modelos numéricos que satisfaçam os fenômenos anteriormente mencionados, de acordo com alguma teoria de ondas.

A arrebentação ou quebra da onda determina o modo em que a energia da onda é dissipada e transformada em turbulência, resultando na geração de correntes e na variação do nível médio do mar na zona de arrebentação, que por sua vez, são os principais motivadores das mudanças que ocorrem na morfologia das praias (Figura 3).



Figura 3: Ondulação quebrando em uma passarela na orla.

Na última década se produziu um notável avanço na descrição espectral da onda e na caracterização espectral dos fenômenos de propagação da mesma, baseado tanto nos avanços teóricos do tema, como na maior capacidade de medida da onda, e na potência e capacidade de cálculo dos computadores atuais. Este avanço permitiu a incorporação deste tipo de formulação no âmbito da engenharia.

A natureza aleatória da onda resulta na incerteza no que diz respeito às características (altura, direção, período, forma espectral, etc.) futuras da ondulação e uma necessidade de tratamento estatístico do problema. Este tratamento estatístico é normalmente dividido em dois, um relativo à estatística de curto prazo ou regimes médios e o outro é relativo à estatística de longo prazo ou regimes extremos. Neste documento é incorporado um terceiro tratamento relativo às mudanças que ocorrem em prazos muito longos, ou seja, que estão relacionadas com os efeitos da mudança climática na costa. Cada uma destas três abordagens será utilizada neste documento.

Mais informações podem ser encontradas no Documento Temático de Onda (IH CANTABRIA – MMA, 2017a) que contém uma descrição detalhada das metodologias utilizadas para gerar a base de dados de onda.

## Maré

A ação da maré se manifesta em dois aspectos bem distintos: mudança no nível do mar e a geração de correntes.

A mudança no nível do mar devido à ação da maré astronômica tem importantes consequências na morfologia das praias porque modifica substancialmente a propagação da onda (empinamento, refração etc., e muito particularmente a zona de arrebentação) ao variar continuamente a batimetria da praia. Este fato resulta que os perfis praias em mares com grande amplitude de maré, bem como os estágios morfodinâmicos, sejam diferentes daqueles que apresentam pequena amplitude de maré (Figura 4).

Às mudanças de nível originadas pela maré astronômica devem ser acrescentadas as geradas pela dinâmica atmosférica, tanto pela ação do vento como pela ação da pressão atmosférica. Este fator adicional, conhecido como maré meteorológica, tem um caráter aleatório devido à própria natureza dos fenômenos que a geram e seu estudo deve ser realizado em termos probabilísticos.

As correntes de maré são, em geral, desprezadas na zona de arrebentação devido à sua pequena magnitude em relação às correntes geradas pela quebra de ondas. Esta circunstância não é aplicável, no entanto, às praias próximas às desembocaduras de lagunas e estuários, onde as correntes de maré são preponderantes. Nestas zonas é estabelecido um equilíbrio entre as dinâmicas das ondas e a dinâmica das marés, dando origem a uma morfologia muito particular nas praias, com formação de grandes terraços de baixamar na zona de maré baixa (Figura 4).



Figura 4: Zona intermareal típica de uma praia macromareal.

## Dinâmica na zona de arrebentação

A zona de arrebentação constitui o espaço de maior interesse no que se refere a estabilidade e evolução de uma praia. Nesta zona, a quebra de ondas coloca em suspensão uma grande quantidade de sedimentos que, desta forma, é suscetível de ser transportado pelas correntes existentes. As correntes mais importantes da zona de arrebentação são as geradas pela própria quebra de ondas, tanto no sentido transversal (correntes de ressaca e de retorno), como no sentido longitudinal. Este tipo de correntes pode ser estudado hoje em dia com um grau de precisão elevado, gerado por meio de modelos numéricos.

Adicionado a estas correntes, se encontra um conjunto de ondas e oscilações cuja importância na geração de formas características de praias, tais como bancos, bancos concêntricos, cúspides, etc., são admitidas hoje em dia. Estas ondas, incluindo as de infra-gravidade, as sub-harmônicas e as ondas de borda ou marginais, estão sendo objeto de um importante esforço científico, assim, espera-se que em um curto período de tempo se disponha de formulações e dados suficientes que possam ser incluídos no projeto das obras de recuperação de praias. Hoje em dia, a importância relativa deste tipo de oscilação pode ser inferida através da análise dos estados morfodinâmicos da praia.

## 2.4. Processos Litorâneos

A ação das dinâmicas descritas na seção anterior sobre os sedimentos de uma praia leva a um transporte de sedimentos e, conseqüentemente a uma variação da morfologia do fundo.

O estudo deste conjunto de ações e respostas, geralmente conhecido como processos litorâneos, deve ser realizado de forma aproximada, pois hoje em dia, com os conhecimentos atuais, não se permite abordar o problema em toda a sua complexidade. As aproximações existentes baseiam-se em duas hipóteses de partida. A primeira se refere à tridimensionalidade dos processos litorâneos e admite-se que o estudo dos mesmos possa ser realizado analisando separadamente os processos transversais (perfil de praia) e os processos longitudinais (forma em planta) (Figura 5). A segunda refere-se à escala temporal e espacial dos processos e a necessidade de utilizar formulações específicas em função da escala de interesse.



Figura 5: Exemplo de praia de enseada.

Uma das técnicas de análise dos processos em longo prazo é a busca pela posição de equilíbrio, ou posição que a praia adotaria se as dinâmicas permanecessem constantes durante um tempo suficiente. No caso do perfil de praia, o conceito de perfil de equilíbrio é amplamente utilizado nos estudos de estabilidade e evolução de praias, existindo diversas formulações para descrever tal perfil de equilíbrio. No caso de forma em planta, a existência de uma forma de equilíbrio estável exige que não ocorra uma perda (ou ganho) líquida de sedimento na praia. Esta circunstância é normalmente observada em praias de enseada, nas quais são aplicáveis diversas equações de forma em planta em equilíbrio (ver Figura 5).

As praias que não são de enseada estão sujeitas a mudanças em sua forma devido à existência de gradientes no transporte longitudinal de sedimentos. O ponto chave em qualquer estudo de praias é a correta determinação de tal transporte longitudinal, pois é o que condiciona a evolução temporal da mesma. Na atualidade existem diversas formulações para a determinação do transporte longitudinal em praias que vão desde relações simples com o fluxo de energia da ondulação, até modelos que incluem os diferentes tipos de transporte (suspensão, saltação, arrasto) na relação conjunta onda-corrente. Estas formulações podem ser incluídas em modelos numéricos de uma linha ou modelos de n-linhas para a determinação da evolução a médio - longo prazo da forma em planta de uma praia.

Os processos litorâneos com escalas de tempo menores, tais como a erosão do perfil de praia frente um temporal (ressaca), formação de bancos etc., requerem a utilização de formulações empíricas ou de modelos numéricos de evolução de curto prazo.

Nas escalas temporais maiores, ou seja, em prazo muito longo, as praias são afetadas, por exemplo, pela mudança climática. O aumento do nível do mar, o aumento da intensidade e mudança na direção da ondulação, aumento da frequência de tempestades, em geral, produzem retração e rotação da linha da costa. A análise destes processos é realizada por meio de formulações empíricas e sua avaliação só é possível se existirem séries temporais longas destas variáveis

# CAPÍTULO 3: CRITÉRIOS GERAIS DE DESENHO E CÁLCULO

## 3. Critérios Gerais de Desenho e Cálculo

### 3.1. Introdução

Os objetivos do presente capítulo são dois:

- a) Estabelecer uma metodologia que permita a concepção de um projeto de recuperação de uma praia.
- b) Apresentar as formulações de cálculo necessárias para a realização de tal projeto.

A metodologia proposta tem como ponto de partida os seguintes pontos (Figura 6):

- **Entendendo os processos costeiros**

O sucesso de um projeto de recuperação de praia depende da nossa capacidade no momento de compreender as causas que originam o estado de erosão da praia em estudo, bem como da nossa capacidade de avaliar os processos costeiros que deram origem a esta situação. Quanto menor nosso entendimento e nossa capacidade de avaliação desses processos, menor será nosso acerto na previsão da evolução do projeto de engordamento da praia.

A metodologia de concepção deve explicitar ao máximo os processos envolvidos, obrigando ao projetista a análise dos mesmos nas escalas espaciais e temporais que sejam relevantes. Neste ponto é importante enfatizar que este manual não pretende coletar todas as condições e geometrias costeiras possíveis, mas sim estabelecer uma metodologia que permita a análise de todas elas.

- **Funções de uma praia**

Toda praia cumpre, em maior ou menor medida, as seguintes funções:

- Proteção da costa
- Habitat de flora e fauna
- Uso recreativo humano

A necessidade de recuperação está sempre originada pela falta do cumprimento de alguma destas funções e o seu objetivo é o reestabelecimento de tal função, pelo menos durante um período de tempo. O projetista deve, portanto, conhecer tais funções, os parâmetros que as regem e realizar, antes de qualquer cálculo de estabilidade da praia, um projeto funcional da mesma. Todos estes aspectos estão desenvolvidos na seção 3.2.

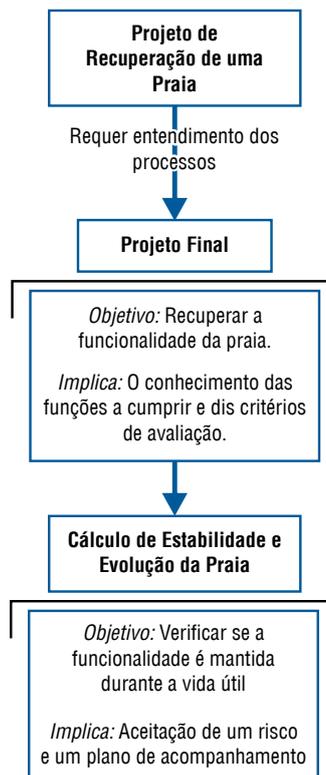


Figura 6: Esquema preliminar do Projeto de Recuperação.

- **Cálculo de estabilidade de uma praia**

Uma vez feito o projeto funcional da praia, o projetista deve garantir que tal funcionalidade seja mantida durante toda a vida útil da obra. Isto requer a realização do cálculo de estabilidade do engordamento e de sua evolução no tempo. Para isso, foi desenvolvida a metodologia apresentada na seção 3.3.

É importante notar que o cálculo da estabilidade de uma praia demanda a aceitação de um risco de falha, entendendo como tal qualquer variação entre a evolução prevista da recuperação e a evolução real. Este risco tem sua origem:

- No desconhecimento de todos os processos envolvidos.
- Na validade das hipóteses simplificativas realizadas nos cálculos.

- Na natureza aleatória das dinâmicas atuantes (ondulação, vento, pressão, fluxo fluvial, etc.).

Este risco de falha envolve a necessidade de:

- Um fator de proteção do projeto.
- Um acompanhamento da obra e o estabelecimento de um plano de monitoramento e controle.
- Níveis de cálculo. Pré-projeto e projeto

O processo de concepção de qualquer projeto de engenharia é sempre um processo interativo em que se estabelece uma série de alternativas as quais são posteriormente avaliadas. A Figura 7 apresenta o esquema das diferentes escalas de trabalho. Este tipo de aproximação para uma solução definitiva requer a existência de uma série de métodos ou modelos simples e rápidos que será denominado de pré-projeto, o qual permite identificar as possíveis alternativas de solução. Posteriormente, modelos mais sofisticados são usados para verificar a eficácia de um número limitado de alternativas. Observe que o cálculo detalhado exige um custo temporal e econômico mais elevado, sendo que muitas vezes está vinculado a maiores necessidades de dados de entrada nem sempre disponíveis. Surge então a necessidade de avaliar o escopo destes métodos em função da importância da obra (social ou econômica) resultando em diferentes níveis de estudo, em função de tal importância.

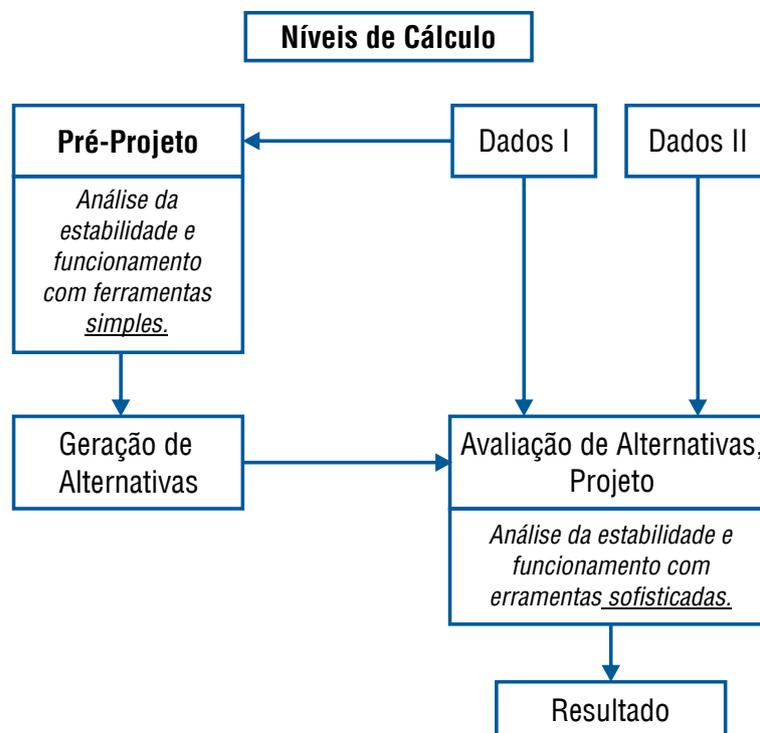


Figura 7: Esquema dos diferentes Níveis de Cálculo.

## 3.2. Funções de uma praia e critérios de avaliação

### 3.2.1. Introdução

As praias, como qualquer outro elemento do território, apresentam uma série de funções naturais e também podem ser utilizadas de diversas maneiras pelo homem. Se o grau de cumprimento de tais funções e uso não é adequado, de acordo com determinados critérios de avaliação, a praia precisará ser recuperada.

A Figura 8 apresenta o esquema do processo de um projeto funcional. Para sua execução o projetista deve, portanto, conhecer:

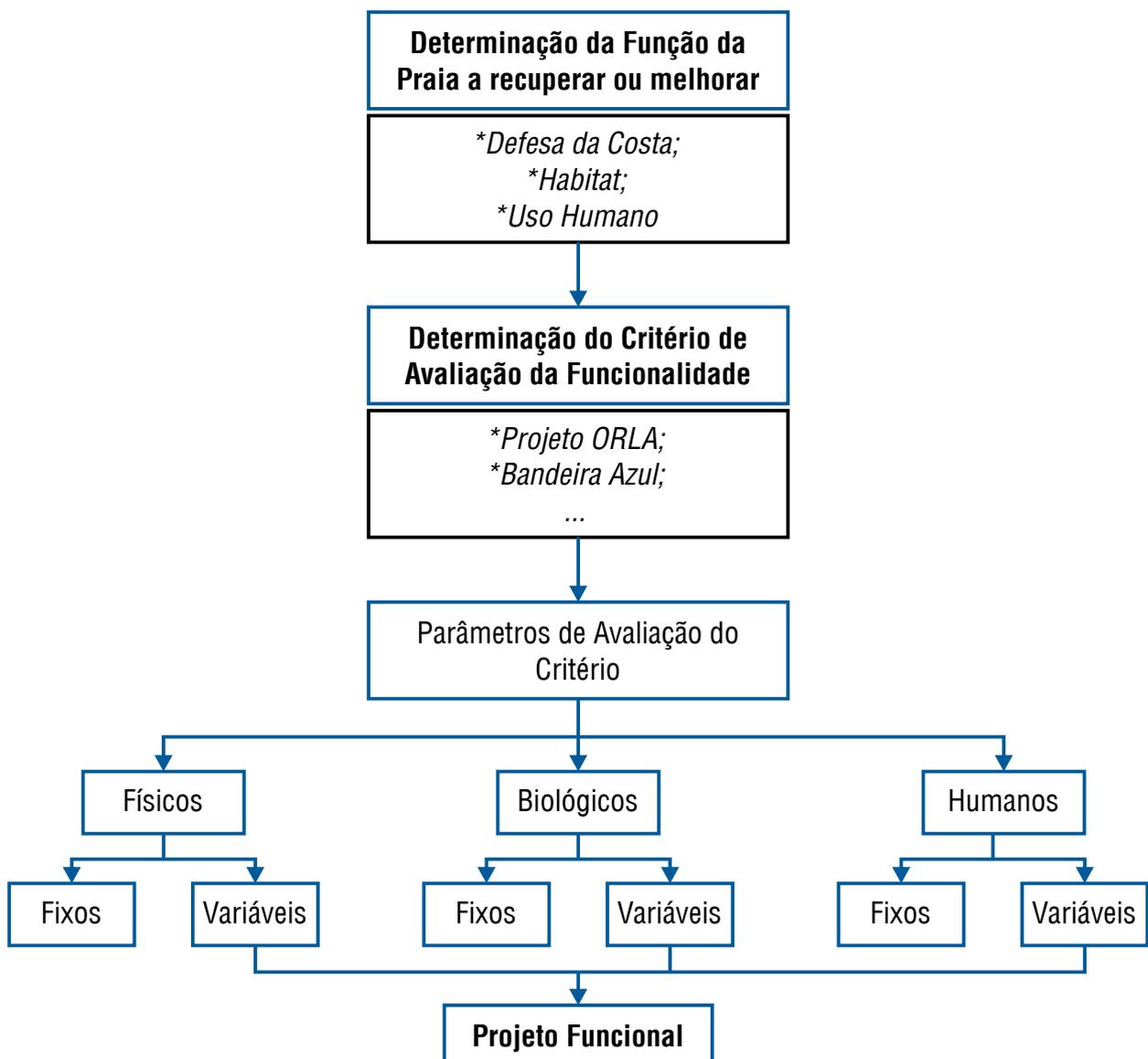


Figura 8: Esquema preliminar do processo de Projeto Funcional.

- Quais são as funções de uma praia?
- Quais são os critérios que lhe permitirão avaliar se a praia cumpre ou não suas funções?

- c. Quais são os parâmetros incluídos nos critérios de avaliação que são suscetíveis a modificação dentro do projeto de recuperação?

Nesta seção são analisadas as funções de uma praia, critérios de avaliação e, especialmente, os parâmetros que o projetista pode incluir em seu projeto para melhorar a funcionalidade de uma praia.

Antes de começar com o desenvolvimento da seção, é importante realizar uma série de considerações:

- Os usos de uma praia, bem como os critérios de avaliação do cumprimento de tal uso, variam com o tempo, não sendo os mesmos na atualidade que há algumas décadas. Espera-se que estas mudanças de usos e critérios continuem.

- Os critérios de avaliação são, em certa medida, subjetivos. Assim, por exemplo, as condições ideais de ondulação para banho não são as mesmas para uma pessoa que pratica surfe ou para uma criança que está aprendendo a nadar. O projetista deve, *a priori*, escolher qual será o perfil do usuário da praia e projetar de acordo com tal perfil.

- Os critérios de avaliação da funcionalidade e/ou qualidade de uma praia devem reunir parâmetros complementares ao projeto de uma recuperação, tais como presença de lixeiras, serviços etc., os quais não são analisados no presente documento. É recomendado que o projetista examine tais requisitos no Anexo 2.

### 3.2.2. Funções de uma praia

As funções de uma praia podem ser agrupadas em três categorias:

- Defesa da costa;
- Habitat de flora e fauna;
- Uso recreativo humano.

A seguir estão brevemente descritos alguns conceitos gerais destas funções.

#### **Defesa da costa**

Uma das funções realizadas de modo natural pelas praias são a dissipação e reflexão da energia de onda que incide sobre elas. Uma modificação da energia incidente evita, ou pelo menos reduz, os efeitos da dinâmica marinha sobre as infraestruturas existentes na praia, em particular:

- A inundação da costa;
- A ação direta da onda sobre as estruturas.

É importante notar o modo em que uma praia realiza esta função, a qual consiste na variação de sua morfologia, principalmente de seu perfil (Figura 9). Neste sentido, embora o tema seja desenvolvido em detalhe posteriormente, em uma primeira análise pode ser dito que: para que um perfil de praia possa 'defender corretamente' a costa, deve contar com um volume de sedimentos suficiente, tanto em seu perfil ativo, como no perfil submerso e na duna. A disposição de tal volume (largura e cota da berma/duna) constitui junto com as características dos sedimentos (tamanho médio, permeabilidade) os parâmetros que determinam a capacidade de defesa de uma praia.



Figura 9: Escarpa de praia após a ação de um temporal.

Outro aspecto a considerar dentro da função de defesa da costa, é que tal função seja realizada de modo mais relevante, sob a ação de eventos extraordinários de temporais, e conseqüentemente, sua avaliação deve ser feita sob os critérios estatísticos de apresentação de tais eventos. Nas praias em erosão, a avaliação do grau de defesa da costa deve ser feita não somente na situação atual, mas ao longo de toda a vida útil da mesma e prevendo possíveis eventos extremos devidos, por exemplo, às mudanças climáticas.

### **Habitat de flora e fauna**

As praias constituem o habitat de diversas espécies, tanto de flora como de fauna (Figura 10). Independentemente da figura de proteção existente, o projetista deve levar em conta esta função das praias em seu conceito, analisando os impactos negativos que a disposição de sedimento possa causar sobre um habitat existente e os impactos positivos da geração de um novo habitat.

Para aquelas recuperações cujo objetivo fundamental seja a restauração de um habitat específico, deve-se levar em conta que:

1. Os fatores mais relevantes no momento em que uma praia serve como habitat de uma determinada espécie são: diâmetro do sedimento, horas de inundação e mobilidade do sedimento.
2. A mobilidade do sedimento controlará o tipo de flora e fauna, bem como as suas densidades.

3. O tamanho do sedimento e em particular o percentual de areia fina, condiciona a quantidade de oxigênio e matéria orgânica disponível para as espécies que vivem enterradas no substrato.
4. As condições anteriores são necessárias, mas nunca suficientes para garantir um determinado habitat.
5. As necessidades de diâmetro de sedimento, horas de inundação e mobilidade do sedimento são específicas para cada espécie.



Figura 10: Vegetação de duna típica de praia.

### Uso recreativo humano

As praias e zonas adjacentes dão lugar a um grande número de atividades humanas, principalmente de caráter recreativo (Figura 11). De forma geral, estas atividades podem ser agrupadas em função do lugar onde são realizadas:

- **Aquáticas:** Navegação, *windsurf*, *kitesurf*, motonáutica...
- **Terrestres:** Passeio, voleibol de praia, frescobol, futebol...
- **Interface:** Banho, surfe...

As atividades aquáticas requerem, na maioria dos casos, determinadas condições de agitação de ondas. O cumprimento destas condições é imposto pela dinâmica marinha da área, mas não costuma ser objeto de estudo em uma recuperação de praia. No entanto, o conhecimento destes requisitos pode aumentar o potencial uso da recuperação. As atividades terrestres podem ser favorecidas ou penalizadas de acordo com vários fatores suscetíveis de projeto, tais como o diâmetro do sedimento, largura da praia, comprimento da praia, etc. Também cabe comentar sobre as atividades

de interface, cuja segurança e até mesmo a possibilidade de execução podem ser modificados com o tamanho do sedimento e a geometria dos contornos da praia.



Figura 11: Interface como local de intensa utilização como área de recreação.

### 3.2.3. Critérios de avaliação

Entende-se por critério de avaliação o indicador ou o conjunto de indicadores que permitem estabelecer se uma praia cumpre ou não uma determinada função. Nesta seção são estabelecidos critérios de avaliação que devem ser adotados para verificar a funcionalidade de uma praia, de acordo com as três categorias listadas na seção anterior:

- Defesa da costa;
- Habitat de flora e fauna;
- Uso recreativo humano.

#### **Defesa da costa**

No Brasil não existe critérios bem estabelecidos para recomendações de obras costeiras, o assunto se encontra em fase de discussão no GI-GERCO. Na Espanha, a avaliação da funcionalidade de uma praia como “obra de defesa da costa” deve ser realizada em conformidade com os critérios estabelecidos nas *Recomendaciones de Obras Marítimas* (ROM) e nos EUA através do *Coastal Engineering Manual* (CEM).

A ROM (<http://www.puertos.es/es-es/ROM>) recomenda uma série de normas e critérios técnicos de aplicação na construção, manutenção e reparação de obras costeiras. A publicação descreve que, para as obras submetidas à ação de forças variáveis, como é o caso de ondas, o cálculo da funcionalidade deve ser realizado utilizando o valor característico máximo das forças, ou seja, o valor extremo correspondente ao período médio de retorno ( $T$ ) associado a uma probabilidade de risco ( $E$ ) durante a vida útil da obra ( $L_r$ ).

A relação entre risco, vida útil e período de retorno é dada por:

$$E = 1 - \left(1 - \left(\frac{1}{T}\right)\right)^{L_f} \quad (1)$$

Na publicação mencionada é definido além da vida útil da obra, o nível de risco máximo admissível em função do:

- a) tipo de obra;
- b) nível de segurança exigido;
- c) repercussão econômica da inutilização da obra;
- d) a possibilidade de perdas humanas.

Estes valores de vida útil e nível de risco estão incluídos na Figura 12 e nos Quadros 1 e 2. O Fluxograma e os quadros mostram a título de exemplo como determinar a vida útil e a probabilidade de falha em função do caráter geral da obra, representada pelo Índice de Repercussão Econômica (IRE) e o Índice de Repercussão Social e Ambiental (ISA). O projetista deverá, em função das características da obra antes mencionada, escolher a vida útil e o risco que melhor definam a recuperação em questão. Com estes valores será determinado o período de retorno e, conseqüentemente, o valor das forças dinâmicas (ondas, níveis etc.) que deverão ser utilizados no cálculo da funcionalidade da praia como obra de defesa da costa.

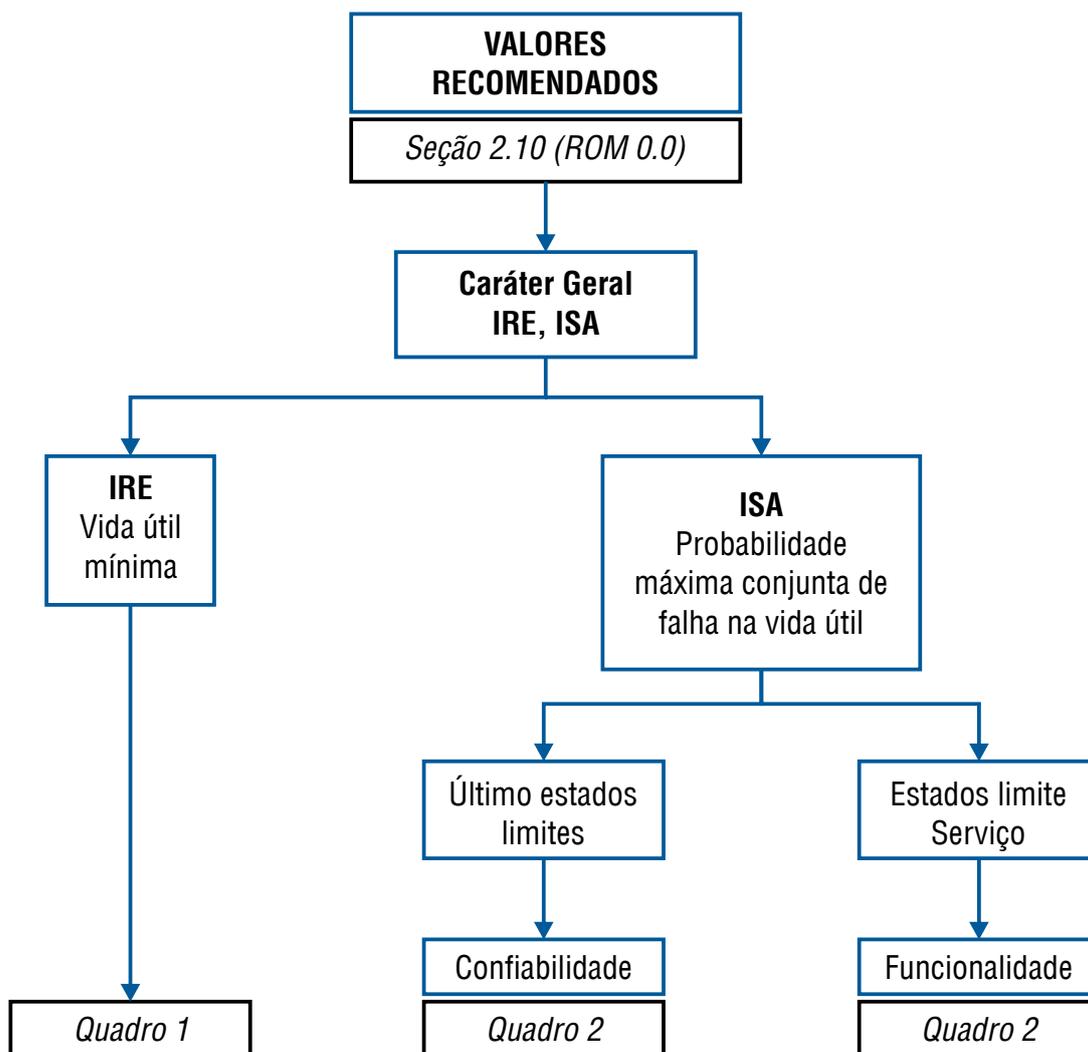


Figura 12: Diagrama de valores recomendados em função do caráter geral de uma obra. Para mais detalhes, consultar a ROM 0.0.

Tal funcionalidade ficará garantida se a cota de inundação e a retração da linha de costa associada à carga do projeto não resultarem em inundação nas áreas após a praia e/ou a ação direta da onda sobre as infraestruturas de tal zona.

A determinação dos parâmetros que servem como critérios de avaliação, ou seja:

- Cota de inundação;
- Retração da linha da costa;

serão realizadas de acordo com o método de cálculo desenvolvido neste capítulo.

Nota-se que a funcionalidade deve ser assegurada durante toda a vida útil da obra. Caso uma praia esteja em processo de retração, deverá ser levado em conta este fato e verificar se a obra é funcional em todo e qualquer um dos anos de sua vida útil.

**Quadro 1:** Índice de repercussão econômica (IRE) para determinar a vida útil de uma obra (ROM 0.0).

Índice de repercussão econômica, IRE			
<p>Avalia quantitativamente as repercussões econômicas por reconstrução da obra, <math>C_{RD}</math> e por redução ou não das atividades econômicas diretamente relacionadas com ela, <math>C_{RI}</math>, previsíveis, no caso de produzir a destruição ou perda de operabilidade total da mesma. O <math>IRE</math> é definido pela seguinte expressão:</p> $IRE = \frac{C_{RD} + C_{RI}}{C_0}$ <p>Onde <math>C_0</math> é um parâmetro de dimensionamento econômico, cujo valor depende da estrutura econômica e do nível de desenvolvimento econômico do país.</p>			
Classificação em função do IRE			
<p>Em função do valor do índice de Repercussão Econômica, IRE, as obras marítimas são classificadas em:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>R_1</math> obras com repercussão econômica baixa: <math>IRE \leq 5</math></li> <li>• <math>R_2</math> obras com repercussão econômica média: <math>5 &lt; IRE \leq 20</math></li> <li>• <math>R_3</math> obras com repercussão econômica alta: <math>IRE &gt; 20</math></li> </ul>			
Vida Útil Mínima			
<p>A duração da fase de serviço do projeto, <math>V_m</math> ou vida útil, será, no mínimo, o valor consignado na Tabela abaixo, em função do <math>IRE</math>, índice de repercussão econômica da obra marítima.</p>			
<b>IRE</b>	$\leq 5$	6-20	>20
<b>Vida Útil em Anos</b>	15	25	50

**Quadro 2:** Índice de repercussão social e ambiental (ISA) para determinar a probabilidade de falha da obra (ROM 0.0).

Índice de repercussão social e ambiental, ISA				
<p>Estima de maneira qualitativa o impacto social e ambiental esperado no caso de ocorrer a destruição ou perda de funcionalidade total da obra marítima, avaliando a possibilidade e alcance de: (1) perdas de vidas humanas; (2) danos ao meio ambiente e ao patrimônio histórico-artístico e; (3) do alarme social gerado, considerando que a falha ocorra, uma vez consolidadas as atividades econômicas diretamente relacionadas com a obra.</p> <p>O <math>ISA</math> é definido pelo somatório de três subíndices:</p> $ISA = \sum_{i=1}^3 ISA_i$ <p>Onde <math>ISA_1</math>, é o subíndice de possibilidade e alcance das perdas de vidas humanas; <math>ISA_2</math>, o subíndice de danos ao meio ambiente e ao patrimônio histórico-artístico; e <math>ISA_3</math>, o subíndice de alarme social.</p>				
Classificação em função do ISA				
<p>Em função do valor do índice de repercussão social e ambiental, <math>ISA</math>, as obras marítimas são classificadas em quatro tipos, correspondentes a quatro subintervalos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>S_1</math> obras sem repercussão social e ambiental significativas, <math>ISA &lt; 5</math>;</li> <li>• <math>S_2</math> obras com repercussão social e ambiental baixa, <math>5 \leq ISA &lt; 20</math>;</li> <li>• <math>S_3</math> obras com repercussão social e ambiental alta, <math>20 \leq ISA &lt; 30</math>;</li> <li>• <math>S_4</math> obras com repercussão social e ambiental muito alta, <math>ISA \geq 30</math>.</li> </ul>				
Nos estados limite de serviço				
<p>A probabilidade conjunta de falha <math>P_{f,ELS}</math>, do trecho de obra frente aos modos de falhas principais relativos aos estados limite de serviço, não poderá exceder os valores consignados na tabela durante a fase de serviço do projeto.</p>				
<b>ISA</b>	$\leq 5$	5-19	20-29	$\geq 30$
$P_{f,ELS}$	0,20	0,10	0,07	0,07
$\beta_{ELS}$	0,84	1,28	1,50	1,50

### Nos estados limites últimos

A probabilidade conjunta de falha  $P_{f,ELU}$  do trecho de obra, frente aos modos de falhas principais, relativos aos estados limites últimos, não poderá exceder os valores contidos na tabela em sua vida útil.

ISA	$\leq 5$	5-19	20-29	$\geq 30$
$P_{f,ELU}$	0,20	0,10	0,01	0,0001
$\beta_{ELU}$	0,84	1,28	2,32	3,71

### Habitat de fauna e flora

Não existe na literatura um critério de avaliação que permita, *a priori*, estimar o grau de funcionalidade que alcançará uma recuperação realizada para restaurar um determinado habitat. Várias são as razões para esta ausência:

- A escassez de estudos específicos na área;
- A grande quantidade de fatores, alguns desconhecidos, que afetam a sobrevivência das espécies;
- A diferente condição dos mesmos parâmetros para diferentes espécies, dando origem a diversos critérios para cada espécie.

Por este motivo, a maior parte das recuperações realizadas com esta finalidade foram feitas tentando “imitar” as características existentes na praia natural no que diz respeito à:

- Distribuição granulométrica de sedimentos;
- Disposição da recuperação (horas de inundação).

O primeiro fator é o mais importante dentro dos suscetíveis de modificação no projeto, e muito particularmente, a parte dos grãos finos existentes no sedimento, pois é o que condiciona a porosidade, permeabilidade e nível de turbidez. Em qualquer caso, outra série de fatores, tais como o grau de compactação ou a angularidade da areia, que geralmente não são contemplados nos projetos de recuperação, foram determinantes no fracasso de alguns projetos de recuperação.

Dado o escopo do presente Documento Temático, não é possível abordar as características das diferentes espécies de flora e fauna, assim são dadas referências ao leitor sobre documentos específicos no assunto, por exemplo: *Physical and biological guidelines for beach restoration projects* (NELSON, 1985) e o livro *Beaches and Dunes of Developed Coasts* (NORDSTROM, 2000), que trata da zonação morfológica e biológica introduzida na recuperação de praias / dunas<sup>1</sup>.

### Uso recreativo humano

Existem diferentes critérios de avaliação destinados à medida da capacidade de uma praia para seu uso como um espaço recreativo, esta diversidade é consequência de que parte desses

<sup>1</sup> Sugere-se que sejam incentivados os estudos do impacto de recuperação de praias/dunas, bem como da jazida, no que se refere à fauna, flora e zonação destas no Brasil.

critérios é subjetivo, variando tanto espacialmente como temporalmente. Desta forma, a praia “ideal” de hoje não é a mesma de algumas décadas atrás, sendo diferente dependendo das características da maré, da temperatura do ar e da água que permitem ou impedem certos usos. A idade, sexo e *hobbies* do usuário também modificam o conceito de praia ideal.

O Quadro 3 apresenta os critérios de avaliação utilizados na Espanha (Bandeira azul, NRA, escala da Universidade de Glamorgan, etc) e no Brasil (Projeto Orla). O projetista deverá levar em conta todos estes fatores no momento de projetar a recuperação e estabelecer o perfil do usuário ao qual está direcionada a praia.

Os diferentes critérios existentes baseiam-se na utilização de uma série de indicadores que reúnem aspectos muito variados. Os indicadores mais utilizados podem ser agrupados em três categorias:

- Fatores físicos;
- Fatores biológicos;
- Fatores de uso humano.

Do ponto de vista do projeto de uma recuperação de praia, alguns destes fatores são impostos pela localização da praia (temperatura da água, pluviosidade, etc.) e outros que escapam do âmbito de um projeto de recuperação (qualidade da água, cheiro, tráfego nas proximidades, etc).

Os indicadores mais importantes suscetíveis de serem modificados dentro do projeto de uma recuperação são fundamentalmente fatores físicos e fatores de uso humano, relativos à segurança no banho e intensidade de utilização. Assim, de acordo com os trabalhos de Leatherman (1997) e a Universidade de Glamorgan (1993) tem-se:

- *Geometria da praia*

*Largura:* Os usuários classificam como estreita uma praia com menos de 20-30 m de largura e excessivamente larga se possui mais de 75-100 metros (Figura 13).

*Comprimento e forma:* As praias retas e compridas são mais adequadas para alta intensidade de uso (superfície útil de menos de 7m<sup>2</sup>/pessoa). As praias curtas e de enseada são preferidas se a intensidade de utilização for baixa.



Figura 13: Fotografia oblíqua evidenciando a largura excessiva da praia (75-100 metros).

Quadro 3: Resumo dos parâmetros incluídos nos critérios de avaliação de uso humano de uma praia.

	Projeto Orla	Bandeira Azul	Prêmio “Beira-Mar” (Grupo Britânico Tidy)	NRA	Chaverri (1989)	Williams <i>et al</i> (1993)	Escala de classificação da qualidade de uma praia (Universidade de Glamorgan)	Leatherman (1997)
Qualidade da Água	ℙ	ℙ	ℙ		ℙ	ℙ	ℙ	ℙ
Educação e Informação		ℙ	ℙ					
Acessos	ℙ	ℙ	ℙ		ℙ	ℙ	ℙ	ℙ
Salva-vidas / Primeiros Socorros		ℙ	ℙ			ℙ	ℙ	ℙ
Lixeiras / Recipientes		ℙ	ℙ		ℙ	ℙ	ℙ	ℙ
Sanitários		ℙ	ℙ				ℙ	
Águas residuais e entulhos	ℙ	ℙ	ℙ	ℙ	ℙ	ℙ	ℙ	ℙ
Segurança das águas de banho					ℙ	ℙ	ℙ	ℙ
Clima					ℙ	ℙ	ℙ	ℙ
Qualidade da Paisagem	ℙ				ℙ	ℙ	ℙ	ℙ
Material da praia					ℙ	ℙ	ℙ	ℙ
Temperatura da água					ℙ	ℙ	ℙ	ℙ
Fauna e Flora					ℙ	ℙ	ℙ	ℙ
Quiosques	ℙ	(Alguns)	(Alguns)			(Alguns)	ℙ	(Alguns)
Regulamento de uso da praia (pets, veículos, etc.)		ℙ	ℙ			ℙ	ℙ	(Alguns)
Ponderação dos fatores	ℙ						ℙ	ℙ
Classificação em função das preferências e prioridades dos usuários	ℙ						ℙ	ℙ
Quantificação de todos ou alguns dos fatores	ℙ			ℙ		ℙ	ℙ	
Diferença entre praia turística e praias virgens	ℙ		ℙ				ℙ	

- *Sedimento*

*Tamanho e cor:* As praias com areia fina de cor branca ou dourada são as mais apreciadas.

- *Intensidade de uso*

A avaliação do conceito “intensidade de uso” é subjetiva, dependendo do usuário e do tipo de praia (selvagem, turística, etc.). Nas praias do tipo turístico entende-se que a praia está:

*Saturada:* para superfície útil menor que 5 m<sup>2</sup>/pessoa;

*Alto uso:* para superfície útil na faixa de 7 - 15 m<sup>2</sup>/pessoa;

*Baixo uso:* para superfície útil maior que 20 m<sup>2</sup>/pessoa.

- *Segurança no banho*

A maior parte dos critérios de avaliação de praias reúnem indicadores relativos à segurança no banho, tais como: largura de zona de arrebentação, correntes longitudinais, correntes de retorno, declividade da praia, tipo de quebra de onda, etc. Todos estes parâmetros estão relacionados com o estado morfodinâmico da praia e são suscetíveis no projeto a alterações da altura da onda que a praia recebe e o tamanho do sedimento. Os estudos realizados relacionando o número de resgates ocorridos pelas equipes de socorristas com o estado morfodinâmico da praia mostram uma clara dependência, sendo notável o fato de que 90% dos casos estavam associados à presença de correntes de retorno.

A avaliação do nível de segurança de uma praia e o tipo de risco estão reunidos no Quadro 4.

**Quadro 4:** Quadro 4 - Nível de segurança em função da altura de onda do estado morfodinâmico da praia (proposto por Short e Hogan, 1994).

					(1), (2)	(2)
3,0	10	10	10	10	10	9
2,5	10	9	10	10	7	7
2,0	9	7	10	9	6	5
1,5	7	5	7	6	5	4
1,0	4	2	4	4	3	1
0,5	2	0	2	2	2	0
	R	LTT	TBR	RBB	LTB	D
	<b>Estado da Praia</b>					

**R** = Refletiva  
**LTT** = Terraço de Baixamar  
**TBR** = Banco Transversal e Corrente  
**RBB** = Banco e Praia Rítmicos  
**LTB** = Banco e Cava Longitudinais  
**D** = Dissipativa

**Classificação:**

0: Muito segura  
 10: Muito perigosa

**Bandeiras:**

□ 0 – 4 Verde  
 ▨ 4 – 7 Amarela  
 ■ > 7 Vermelha

**Notas:**

- (1) Para  $H > 1m$ , é assumido que o banho se restringe entre a cava e o banco da praia;
- (2) Pode haver zonas com correntes de retorno localizadas nas quais será necessário proibir o banho para  $H > 1,5m$ .

### 3.3. Cálculo de estabilidade e evolução de uma praia

De acordo com o exposto anteriormente, o projeto de recuperação envolve um projeto funcional, que tem como objetivo a recuperação da funcionalidade da praia e um cálculo da estabilidade e da evolução do aterro para garantir que tal funcionalidade se mantenha durante a vida útil da obra.

É importante salientar que o projeto de engorda/alimentação de praias é como qualquer outro projeto de engenharia, tem uma vida útil que pode ser determinada. Após este período deve ser dada manutenção.

Dado que a determinação da estabilidade e evolução de um engordamento requer o uso de um conjunto importante de formulações e ferramentas numéricas, parece razoável apresentar em um anexo (Anexo 2) independente tal conjunto de formulações com suas hipóteses e suas interrelações para abordar, nesta seção, apenas os aspectos metodológicos.

#### 3.3.1. Conceitos Prévios

Na presente seção, é apresentada a metodologia que será utilizada no cálculo da estabilidade e da evolução de uma praia. É importante destacar que as formulações propostas (Anexo 2) aceitam uma série de hipóteses iniciais que devem ser conhecidas pelo projetista a fim de evitar usos indevidos das mesmas. Estas hipóteses prévias são especificadas como:

- Dimensionalidade dos processos;
- Escala espacial e temporal dos processos.

##### **Dimensionalidade dos processos**

Todos os processos hidrodinâmicos e sedimentares que ocorrem em uma praia são, em maior ou menor medida, processos tridimensionais. No entanto, as limitações das ferramentas, formulações e até mesmo a própria capacidade de entendimento de tais processos não permite analisá-los em toda a sua complexidade. Deste modo, surge como primeira e mais importante hipótese de trabalho no estudo da estabilidade de uma praia a ortogonalidade dos movimentos longitudinais e transversais da mesma.

De acordo com esta hipótese de ortogonalidade, qualquer movimento de uma praia, como por exemplo, o que ocorre após uma tempestade, pode ser analisado estudando os movimentos longitudinais e transversais da mesma, os quais se supõem serem independentes entre si. Observe que a hipótese da ortogonalidade permite analisar a estabilidade de uma praia estudando separadamente:

- Estabilidade do perfil de praia (eixo transversal);
- Estabilidade da planta da praia (eixo longitudinal).

A hipótese da ortogonalidade é, em geral, suficientemente próxima da realidade, especialmente em praias expostas com estados morfodinâmicos extremos (dissipativas ou refletivas). Nas praias com estados morfodinâmicos intermediários, ou em praias de enseada com uma forma em planta de

grande curvatura, existe, no entanto, uma notável interação planta-perfil, de forma que a análise em separado do perfil e da planta deve ser realizada com cautela.

### **Escala espacial e temporal dos processos**

As diferentes dinâmicas que afetam uma praia se apresentam em escalas espaciais que vão desde centímetros (turbulência), até dezenas de quilômetros (maré) e em escalas de tempo que vão desde segundos (ondas) até décadas (aumento do nível médio do mar). Como resposta a estas dinâmicas a morfologia da praia muda dentro de todas estas escalas: centímetros-quilômetros, segundos-décadas (Figura 14).

Apesar da atual capacidade de cálculo dos computadores e das tentativas realizadas neste sentido, não é possível (nem adequado) calcular as mudanças que ocorrem nas escalas superiores, pela integração dos processos das escalas inferiores. Isto é devido à falta de uma teoria unificada de transporte de sedimentos que retenha a influência de todos os efeitos produzidos nas diferentes escalas espaciais e temporais.

Esta falta de teoria unificada faz com que os processos ocorrentes em diferentes escalas (de tempo ou espaço) devam ser analisados com distintas ferramentas ou formulações. É necessário, portanto, conhecer qual a escala de interesse em cada problema específico e utilizar a formulação adequada para tal escala de interesse.

As escalas das diferentes dinâmicas e respostas morfológicas das praias costumam ser classificadas em: Microescala, Mesoescala e Macroescala; conforme a dimensão temporal em: curto prazo, médio prazo, longo prazo e prazo muito longo, conforme observado na Figura 14.

Em uma recuperação de praia as escalas de interesse são a Mesoescala (dezenas-centenas de metros) e Macroescala (km), na dimensão espacial; em curto prazo (horas-dias), médio prazo (meses), longo prazo (anos) e prazo muito longo (décadas), na dimensão temporal. Uma vez que estas são as escalas que definem a evolução do preenchimento ao longo da vida útil da obra. Os elementos de escalas inferiores (por exemplo, a erosão produzida por uma tempestade) só são relevantes, caso seus efeitos permaneçam no tempo ou no espaço, em unidades próximas às de interesse (por exemplo, meses), ou se seu efeito provoca a falha funcional da obra (por exemplo, a ondulação alcança o pós-praia).

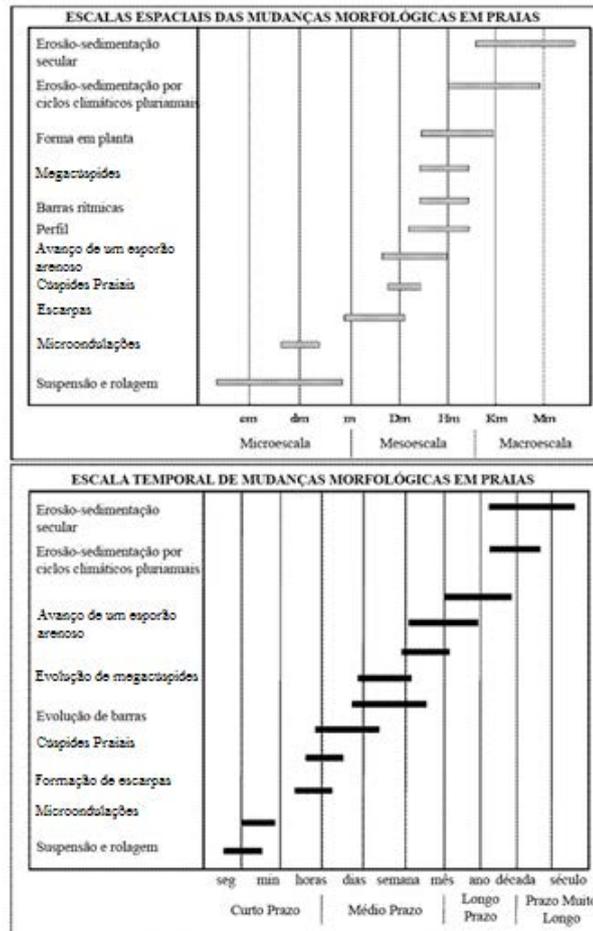


Figura 14: Escalas espaciais e temporais típicas de algumas mudanças morfológicas das praias.

O projeto de uma recuperação ocorrerá, portanto, com critérios e ferramentas de longo prazo, verificando-se posteriormente, se os eventos de curto prazo não provocam a falha da obra.

### 3.3.2. Metodologia de cálculo

A metodologia proposta para o cálculo de estabilidade e evolução de uma praia é apresentada na Figura 15. Os elementos mais relevantes da mesma são:

- É aceita como hipótese inicial, a ortogonalidade dos movimentos longitudinais e transversais de uma praia. Consequentemente, se admite que a estabilidade da mesma possa ser analisada estudando a estabilidade de sua forma em planta e seu perfil;
- Os fenômenos, processos e morfologias tridimensionais são incluídos *a posteriori* através de análises dos estados morfodinâmicos da praia;

- Separa-se a análise da estabilidade e evolução da praia de acordo com as diferentes escalas de variabilidade da mesma. Em especial se analisa a estabilidade em Muito Longo Prazo, Longo Prazo, Médio Prazo e Curto Prazo;
- Para cada uma destas escalas de interesse, se analisa a estabilidade e evolução da forma em planta e do perfil;
- O esquema apresentado na Figura 15 é independente do nível de cálculo e deve ser aplicado tanto no nível do pré-projeto como no nível de projeto. Obviamente as ferramentas e formulações a serem empregadas em cada caso, bem como os dados de partida necessários, variam.

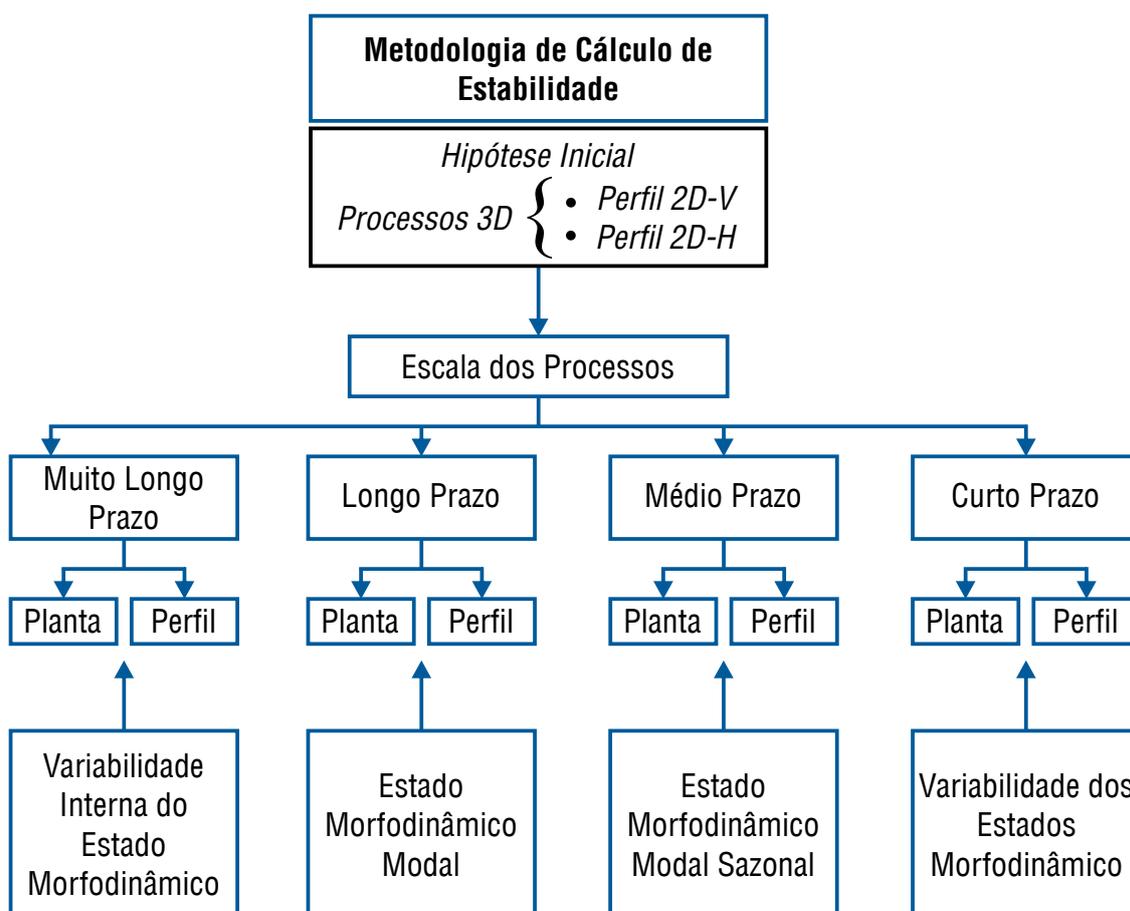


Figura 15: Esquema da Metodologia de Cálculo de Estabilidade de Praia.

### 3.3.3. Formulações de projeto e pré-projeto

Na presente seção é reunido, de modo resumido, o conjunto de formulações e ferramentas numéricas que permitem realizar o cálculo da estabilidade e da evolução de uma praia de acordo com a metodologia proposta na seção anterior e apresentada na Figura 15. É importante salientar que em muitos casos, existem diferentes formulações as quais podem ser utilizadas para calcular o mesmo fenômeno (por exemplo, o transporte longitudinal nas praias). Neste documento, no entanto, será apresentada somente uma formulação (que, na opinião da equipe relatora, melhor representa o fenômeno e melhor se adequa as condicionantes expressas no Capítulo 1, relativas ao tipo de usuário,

conteúdos e âmbito de utilização do documento). As formulações apresentadas nesta seção estão desenvolvidas com maior detalhe no Anexo 2, onde são incluídos quadro e gráficos explicativos.

A estrutura de apresentação das formulações é a seguinte:

Em primeiro lugar as formulações são separadas de acordo com a escala temporal dos processos que se pretende analisar (muito longo prazo, longo prazo, médio prazo e curto prazo);

Dentro de cada uma destas escalas de tempo são apresentadas formulações aproximadas, adequadas para a realização de um pré-projeto e formulações mais sofisticadas que devem ser usadas em projetos finais;

Independentemente do nível de estudo, é abordado, separadamente, o cálculo do perfil e da planta para as diversas geometrias da praia.

Todas estas informações estão apresentadas em uma série de tabelas (Tabelas 1, 2, 3 e 4) nas quais se inclui, além disso, os dados de partida necessários, o tipo dos dados e o quadro explicativo do Anexo 2, onde pode ser encontrada a formulação. No que diz respeito ao tipo de dados, na seção 3.3.4 são desenvolvidas diferentes estratégias de tratamento dos dados de entrada que podem ser utilizadas em função da tipologia indicada nas tabelas.

O processo prático de uso das informações contidas nesta seção seria, portanto:

1. Seleção da escala de estudo;
2. Seleção do nível de análise (pré-projeto, projeto);
3. Seleção da formulação do perfil e planta a utilizar de acordo com a geometria da praia objeto de estudo;
4. Revisão da formulação no Anexo 2;
5. Revisão do tratamento exigido nos dados de entrada (seção 3.3.4).

### 3.3.3.1. Formulações do projeto e pré-projeto em curto prazo

O objetivo do projeto em curto prazo é duplo: por um lado, analisar a resposta da praia frente à ação de um evento e verificar que são cumpridos os requisitos de funcionalidade; bem como fornecer informações sobre os processos costeiros (sistema de correntes, transporte potencial, etc.) permitindo que o projetista entenda a morfodinâmica da praia, realize um diagnóstico da mesma e proponha alternativas de solução (ex: Figura 16).

A seguir são analisadas as alternativas de estudo existentes, tanto para a análise do perfil, como da planta da praia em curto prazo, apresentando, no final, um resumo na Tabela 1.



Figura 16: Erosão da base de uma duna frontal pela ação da onda.

### a) Perfil

O estudo da resposta do perfil de praia frente a um evento de tempestade centra-se na determinação de:

1. Retração da linha da costa;
2. Forma final do perfil;
3. Cota de inundação.

#### *Retração da linha da costa e forma final do perfil*

A determinação da resposta da forma de um perfil frente à ação de uma tempestade e em particular a estimativa da retração da linha de costa frente a um evento de tempestade requer o uso de um modelo de evolução morfológica do perfil.

Existem dois tipos diferentes de modelos de evolução morfológica de perfil:

1. *Modelos empíricos ou fechados.*

Estes modelos estabelecem, *a priori*, o perfil de equilíbrio que o perfil alcançará, caso a ação dure tempo suficiente, e determinam as mudanças do perfil em função do grau de desequilíbrio do mesmo.

2. *Modelos de processos ou abertos.*

Estes modelos não estabelecem, *a priori*, o perfil final, mas determinam, em cada instante, o transporte de sedimentos devido às condições hidrodinâmicas e sedimentares locais, deixando o perfil evoluir livremente.

A via empírica ou fechada permite abordagens simples para o problema, como a proposta por Kriebel e Dean (1993), segundo a qual a retração da linha da costa é produzida a uma velocidade proporcional ao desequilíbrio do mesmo, o que leva a uma evolução de caráter exponencial (Quadro 5).

O caminho dos processos requer a existência de vários modelos numéricos interligados (Figura 17):

- *Módulo hidrodinâmico: que calcula a ondulação e as correntes ao longo do perfil;*
- *Módulo de transporte: que avalia o transporte pelo fundo e em suspensão ao longo do perfil;*
- *Módulo morfológico: que atualiza a batimetria em cada passagem de tempo.*

Este é o caminho seguido no modelo PETRA incluído no SMC-Brasil.

#### *Cota de inundação*

A cota de inundação, ou cota máxima alcançada pela ação conjunta da maré astronômica, maré meteorológica e aumento do nível devido à quebra da ondulação em uma praia, é uma variável aleatória que se obtém com a soma das variáveis deterministas e aleatórias anteriormente mencionadas.

No Documento Temático de Níveis e Cota de Inundação (IH CANTABRIA – MMA, 2017a) é desenvolvida com detalhes a metodologia de cálculo desta variável. Enquanto no estudo “Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regime probabilístico de área de inundação costeira do Brasil” (MMA, 2017) são incluídos cálculos e diagramas da cota de inundação em praias do litoral brasileiro, obtidos com base nos dados de onda e maré das reanálises numéricas inclusas no SMC-Brasil.

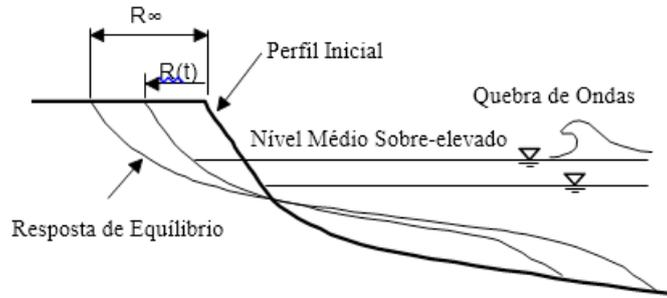
No nível de pré-projeto e com o valor de referência, pode-se adotar como nível da cota de inundação, o obtido no estudo “Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regime probabilístico de área de inundação costeira do Brasil” (MMA, 2017) ou realizar uma aproximação como a mostrada no Quadro 6. Este quadro se aplica quando não há dados suficientes dos níveis, mostrando a forma de aproximar a cota de inundação com a soma do nível do mar (maré astronômica e meteorológica) e o aumento produzido pela quebra das 2% maiores ondas (*runup* 2%).

Em vez disso, no nível de projeto, é necessário avaliar a cota de inundação em perfis de praia, como descrito no Documento Temático de Níveis e Cota de Inundação (IH CANTABRIA – MMA, 2017b). Esta avaliação é feita combinando-se a série temporal das dinâmicas marinhas, levando em conta a declividade da praia (NIELSEN; HANSLOW, 1991).

Quadro 5: Modelo aproximado de retração da linha de costa frente a uma tempestade.

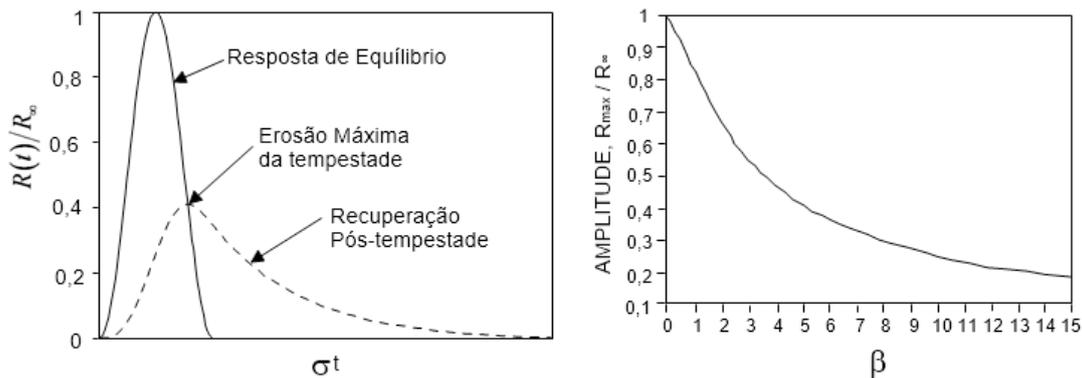
### RESPOSTA DO PERFIL DE PRAIA

Quando se produz um aumento do nível do mar, o perfil de praia sofre erosão na parte superior e acumula areia na porção submersa. Se o aumento tem duração suficiente, o perfil adotará uma nova posição de equilíbrio depois da costa ter regredido uma magnitude  $R_\infty$  (ver Quadro 16). Se a duração não for suficiente, o perfil terá regredido uma magnitude  $R(t)$ .



Kriebel e Dean (1993) propõem que a velocidade de mudança (erosão) do perfil é proporcional ao grau de desequilíbrio do mesmo e desenvolveram uma aproximação a  $R(t)$  baseada no método de convolução. O resultado mais relevante deste modelo é que, como a resposta do perfil não é instantânea, a retração máxima frente a um aumento do tipo  $\text{sen}^2(\pi t / T_D)$ , como apresentado na figura, é menor que o previsto na teoria de equilíbrio.

### Retração devido à tempestade e Previsão da Recuperação do Perfil de Praia



A erosão máxima,  $R_{max}$ , é função do parâmetro  $\beta$ , que mede a relação entre a duração do aumento,  $T_D$ , e a escala de variação do perfil,  $T_s$  (tempo que o perfil leva para alcançar 63% da retração).

$$\beta = \frac{2\pi T_s}{T_D}$$

$$T_s \approx 320 \frac{H_b^{3/2}}{g^{1/2} A^3} \left( 1 + \frac{h^*}{B} + \frac{mW^*}{h^*} \right)^{-1}$$

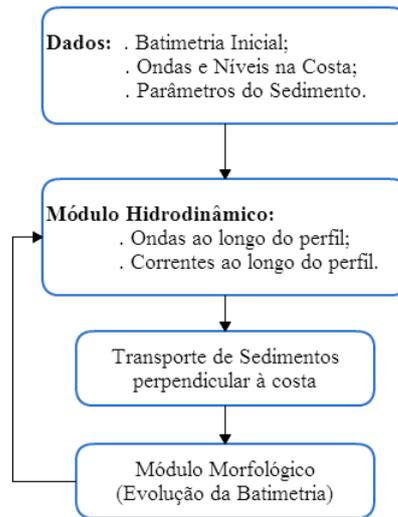


Figura 17: Módulos do modelo de evolução do perfil de praia.

## b) Planta

A evolução em curto prazo da forma na planta de uma praia pode ser analisada através da utilização conjunta de uma série de modelos numéricos que interagem entre si (Figura 18). Estes modelos incluem:

- Propagação de onda (OLUCA);
- Sistema de correntes (COPLA);
- Transporte de sedimentos e evolução morfológica (MOPLA)

A metodologia de utilização dos programas anteriores é apresentada nos manuais de referência e usuário do SMC - Brasil.

## Quadro 6: Níveis de cálculo do pré-projeto.

Na ausência de dados mais específicos, pode-se adotar como cota máxima alcançada pelas ondas em uma praia, a soma do nível da maré (associado à maré astronômica e meteorológica) e o aumento de 2% devido à quebra da onda (*Runup* de 2%) obtido a partir da formulação de Holman (1986).  
**Cota máxima**  $\approx$  Nível de maré + Aumento de nível devido a quebra da onda ( $R_{2\%}$ )

		Mar com maré astronômica	Mar sem maré astronômica significativa	Zonas com maré astronômica submetida a correntes fluviais	Corrente fluvial não afetada por marés
Em condições normais de operação	Nível máximo	<i>PMS</i>	$NM + 0,3 \text{ m}$	<i>PMS</i> e <i>MNI</i>	<i>MNI</i>
	Nível mínimo	<i>BMS</i>	$NM - 0,3 \text{ m}$	<i>BMS</i> e <i>NME</i>	<i>NME</i>
Em condições extremas	Nível máximo	$PMS + 0,5 \text{ m}$	$NM + 0,8 \text{ m}$	<i>PMS</i> e <i>NmaxA</i>	<i>NmaxA</i>
	Nível mínimo	$BMS - 0,5 \text{ m}$	$NM - 0,8 \text{ m}$	<i>BMS</i> e <i>NminE</i>	<i>NminE</i>

### LEGENDA

*PMS*: Média das Preamares de sizígia;

*BMS*: Média das Baixamars de sizígia;

*NM*: Nível Médio do Nível do Mar referido ao zero hidrográfico das costas;

$$NM = \frac{PMS + BMS}{2}$$

Amplitude<sup>2</sup> da maré (Astronômica):  $h = PMS - BMS$ ;

*MNI*: Média dos níveis máximos anuais em sistemas fluviais;

*NME*: Nível Médio de Estiagem em sistemas fluviais;

*NmaxA*: Nível Máximo de cheia (do rio) correspondente ao período de retorno associado ao risco máximo admissível;

*NminE*: Nível Mínimo de Estiagem correspondente ao período de retorno associado ao risco máximo admissível.

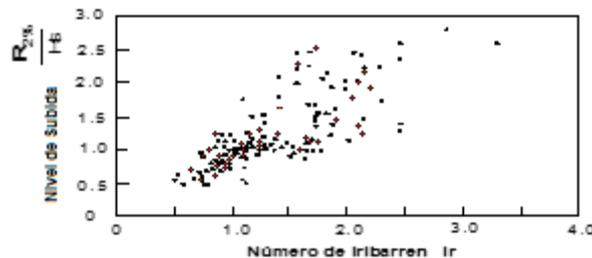
Com base nos dados de campo, Holman (1986) propôs, para a determinação do aumento do nível do mar devido a quebra das ondas - 2% (aumento que é superado por 2% das ondas), a expressão:

$$R_{2\%} = (0,78 I_r + 0,2) H_s$$

Onde:  $H_s$  é a altura significativa de onda e  $I_r$  é o número de Iribarren, definido como:

$$I_r = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_s / L_{\infty}}}$$

Onde  $\tan \beta$  é a declividade da praia e  $L_{\infty}$  é o comprimento da onda em profundidades indefinidas



2 Distância vertical entre uma preamar e uma baixamar consecutiva.

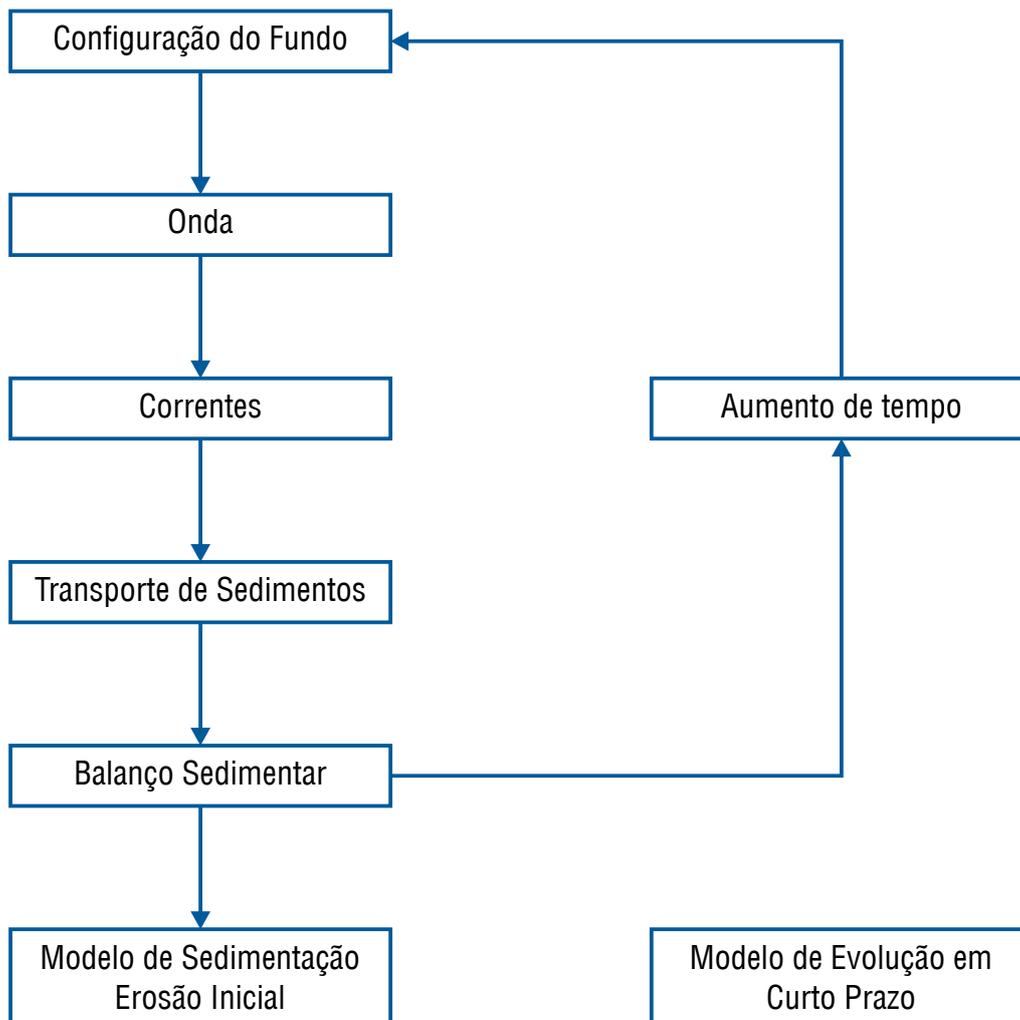


Figura 18: Modelo de evolução em curto prazo da forma em planta.

Tabela 1: Metodologia de cálculo de estabilidade em escalas de processos de curto prazo.

Nível de cálculo	Geometria	Seção	Formulação	Dados necessários	Tipo de dados	Quadro
Pré-projeto	Praia de Enseada	Perfil	Evolução do perfil de equilíbrio Cota de inundação	$H_s, T_D, T_s$ $H_s, I_{r_b}$	Condição extrema	5 e 6 e o estudo “Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regime probabilístico de área de inundação costeira do Brasil”
		Planta	--			
	Praia Exposta	Perfil	Evolução perfil de equilíbrio Cota de inundação	$H_s, T_D, T_s$ $H_s, I_{r_b}$	Condição extrema	5 e 6 e o estudo “Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regime probabilístico de área de inundação costeira do Brasil”
		Planta	--			
Projeto	Praia de Enseada	Perfil	Modelo de evolução do perfil Cota de inundação probabilística	$H_b(t), D_\theta, geometria$ --	Condição extrema	Ver Manual PETRA e SMC Tools.
		Planta	Modelo 2DH de praias	$H_0(t), \theta_0(t), T(t), D_\theta, geometria$	Condição extrema + Condição média	Ver Manuais OLUCA, COPLA, EROS e SMC Tools.
	Praia Exposta	Perfil	Modelo de evolução do perfil Cota de inundação. probabilística	$H_b(t), D_\theta, geometria$ ---	Condição extrema	Ver Manual PETRA e SMC Tools.
		Planta	Modelo 2DH de praias	$H_0(t), \theta_0(t), T(t), D_\theta, geometria$	Condição extrema + Condição média	Ver Manual OLUCA, COPLA, EROS e SMC Tools.

### 3.3.3.2. Formulações do projeto e pré-projeto em médio prazo

O objetivo da análise em médio prazo é determinar a variabilidade que a praia apresenta em seu ciclo inverno-verão, tanto no que se refere à sua forma em planta, como ao seu perfil e ao seu estado morfodinâmico, a fim de verificar se a funcionalidade da praia é cumprida adequadamente (por exemplo, defesa da costa no inverno ou o uso recreativo no verão).

A evolução dos fenômenos que ocorrem nesta escala de tempo apresenta sérias dificuldades, dado que sua escala é grande demais para poder utilizar os modelos de processos (onda a onda) e pequena para poder assumir que foi alcançado um equilíbrio em certos fenômenos. Em seguida, é realizada uma revisão das possíveis vias existentes para a análise de:

- a. Perfil;
- b. Planta;
- c. Estado morfodinâmico modal sazonal.

Para, posteriormente, apresentar uma tabela resumo, Tabela 2.

#### **a) Perfil**

Uma das características mais comumente conhecidas dos perfis de praia é sua variabilidade sazonal com erosão em sua parte emersa e acúmulo na submersa durante o inverno e vice-versa no verão. Este conhecimento, no entanto, não se materializou em uma capacidade de previsão da mesma. O motivo desta lacuna está na escala temporal do fenômeno e na não linearidade dos processos envolvidos na erosão-deposição de um perfil. Deste modo, apesar de terem sido propostos vários parâmetros para determinar se um perfil sofrerá deposição ou erosão em sua parte emersa frente a uma tempestade (ver seção 3.3.3.1), não é possível conhecer a resposta frente a uma sucessão de eventos de erosão-deposição. Além disso, foi comprovado numericamente que, partindo de uma mesma posição inicial do perfil e frente à mesma sucessão de eventos, mas em ordem diferente, a resposta final é distinta. O problema não pode ser tratado, portanto, de um ponto de vista determinista e deve ser analisado a partir de uma ótica estatística.

Apesar de não existir nenhuma formulação que permita estimar a variabilidade no inverno – verão da linha da costa, como critério geral pode-se dizer que:

- É maior quanto maior for a variabilidade das ondas incidentes;
- É maior quanto maior for a profundidade de fechamento;
- É maior nos estados morfodinâmicos intermediários que nos estados refletivos ou dissipativos.

Deste modo, as praias apoiadas em substratos rochosos têm menor variabilidade que as praias com um perfil completo por areia. E uma praia em uma zona exposta apresenta uma maior variabilidade que outra em uma zona protegida.

É importante salientar que para que tal variabilidade exista, deve ser produzida uma alternância entre ondulações erosivas e ondulações deposicionais. Em alguns casos, a ação da ondulação deposicional pode ser insuficiente para eliminar de forma eficaz os bancos longitudinais, resultando em bancos morfológicos ou permanentes que apresentam pequenas oscilações, mas que não sofrem uma migração efetiva em direção à costa. Este fato, a exemplo do que ocorre em diversas praias do Mediterrâneo, pode estar associado à ausência de um marulho (*swell*) suficientemente energético para mobilizar os sedimentos existentes.

#### **b) Planta**

A forma em planta de uma praia pode, também, modificar sua geometria com um ritmo sazonal. Há vários fatores a considerar:

1. Parte das alterações na forma em planta é devido às variações diferenciais na geometria dos perfis, (zonas abrigadas - zonas expostas), especialmente em praias abrigadas com grande curvatura em planta;
2. A escala temporal das alterações de forma em planta pode chegar a ser na ordem de meses, dependendo da onda incidente, granulometria da praia e extensão da mesma.

Dado que se desconhece, *a priori*, se uma praia alcançará durante uma estação (por exemplo, o verão) a última posição de equilíbrio associada a tal ondulação sazonal, cabem duas possibilidades de análise:

- a) *Assumir que a posição de equilíbrio sazonal é alcançada.*

Neste caso serão propostas as condições da onda, fundamentalmente, a direção e o período de cada estação e sua planta de equilíbrio serão determinados. Esta opção é aplicável às praias de enseada e dá uma cota superior de variabilidade em planta, podendo ser utilizada no nível de pré-projeto.

- b) *Assumir que a posição de equilíbrio sazonal não é alcançada.*

Neste caso é necessário o uso de um modelo de evolução da linha de costa (modelo de uma linha) que permita determinar o nível de mudança da forma em planta, frente a uma variação das características da onda incidente. Esta opção é a mais adequada no nível de projeto.

### **c) Estado morfodinâmico modal sazonal**

A velocidade de mudança dos estados morfodinâmicos de uma praia está relacionada, na maioria das vezes, com a resposta do perfil de praia. Neste sentido, é razoável assumir que o estado morfodinâmico de uma praia é capaz de responder às mudanças sazonais de tal modo, que se alcance um estado modal em equilíbrio com as condições médias de verão e outro em equilíbrio com as condições médias de inverno.

A caracterização do estado modal da praia será analisada por meio dos parâmetros  $\Omega$  e  $M'$ ,

$$\Omega = \frac{H_b}{W_s T} \quad (2)$$

$$M' = \frac{M}{H_b} \quad (3)$$

Onde:

$H_b$	=	altura significativa de onda na arrebentação;
$T$	=	período de pico;
$W_s$	=	velocidade de queda do sedimento;
$M$	=	variação da maré.

A determinação do estado morfodinâmico é realizada utilizando os Quadros 7 e 8 em praias sem maré e o Quadro 9 em praias com maré.

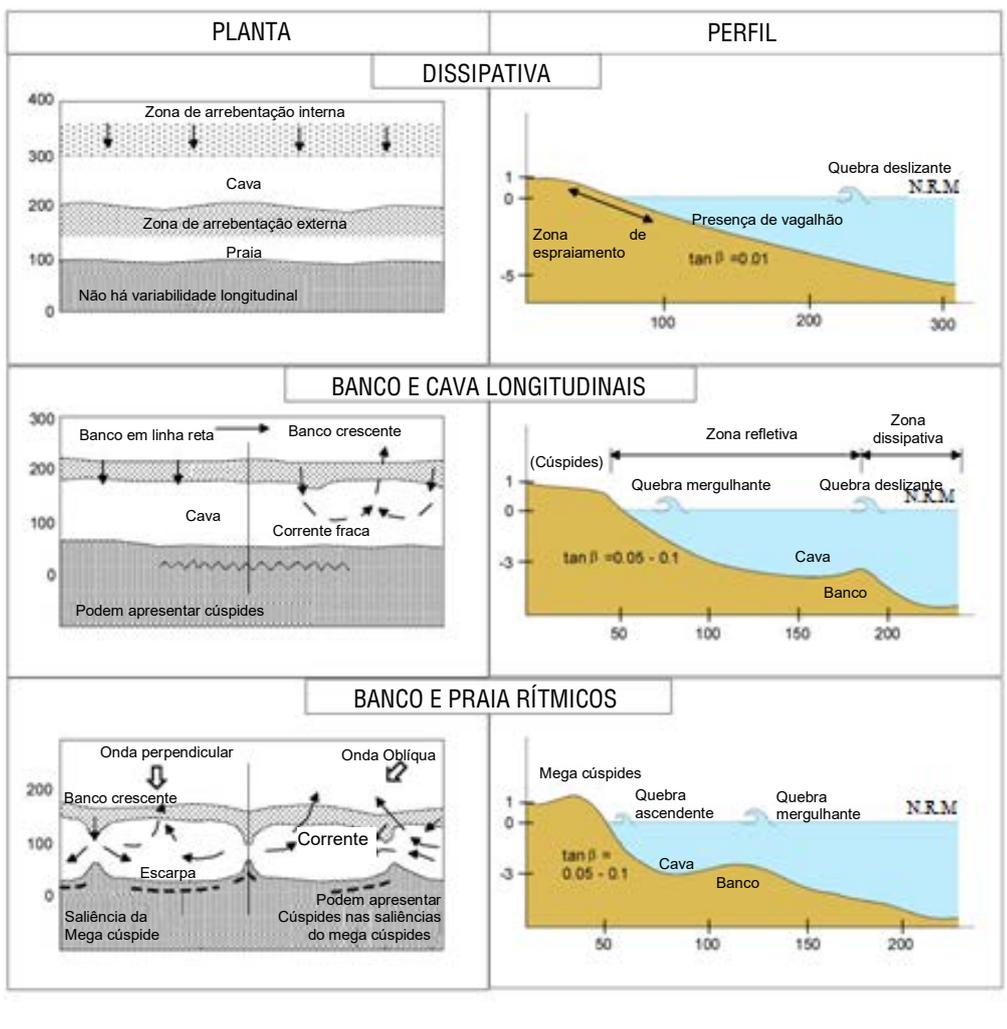
**Quadro 7:** Estados morfodinâmicos de praias sem maré.

Os modelos de “estados morfodinâmicos” de uma praia são modelos empíricos que relacionam a forma (perfil e planta) da praia com a hidrodinâmica da mesma. Estes modelos permitem, baseando-se em parâmetros simples da onda incidente e das características do sedimento da praia, estabelecer de modo qualitativo a morfologia da praia e a relevância das diferentes dinâmicas na zona de arrebenção.

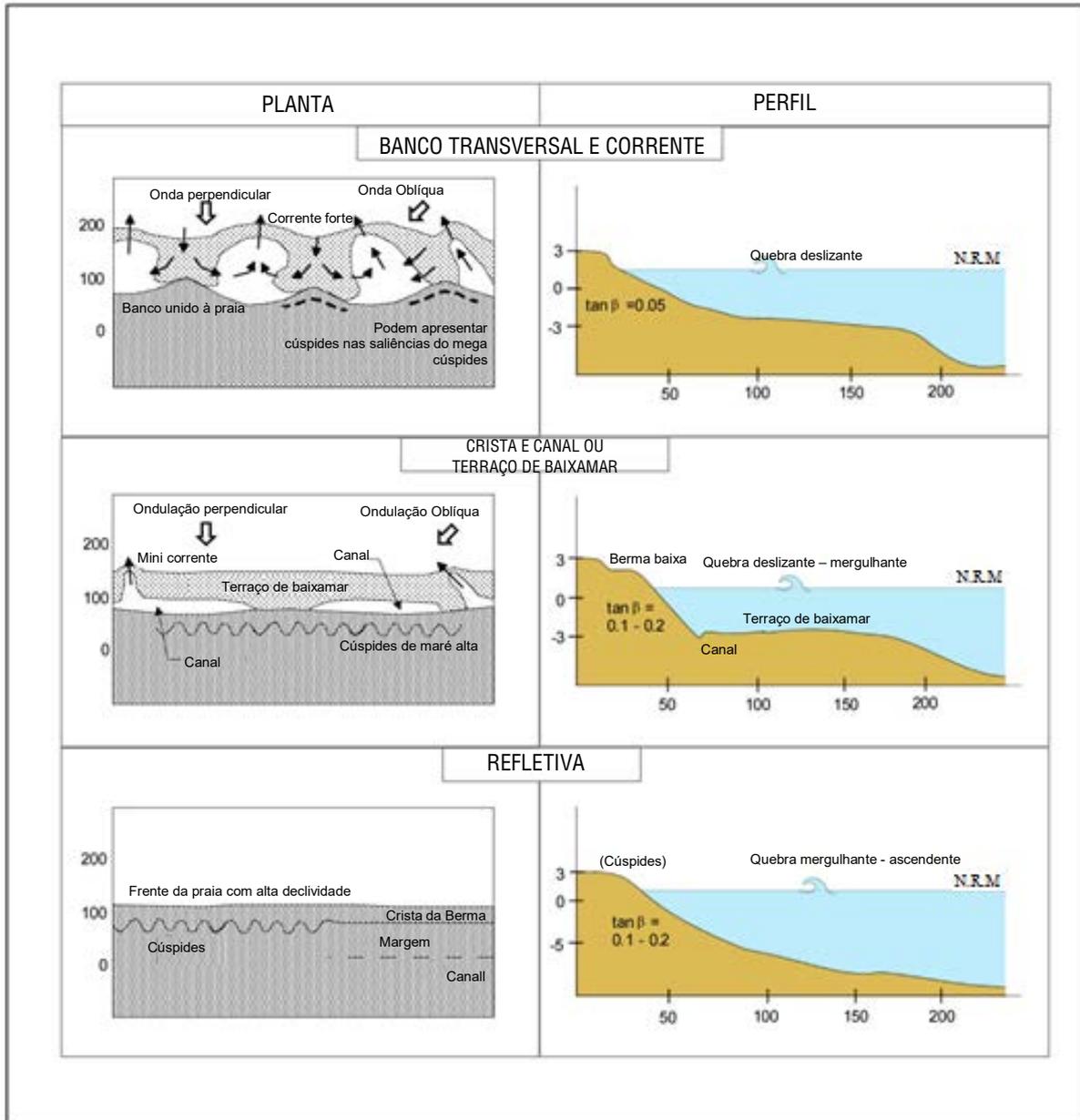
Para as praias de micro marés, Wright e Short (1984), definiram seis tipos de praias, em função do parâmetro adimensional de queda do grão.  $\Omega^*$ .

	$\Omega^* = \frac{H_b}{wT}$
a) Dissipativa	>5,5
b) Banco e cava longitudinais	4,7
c) Banco e praia rítmicos	3,5
d) Banco transversal e corrente	3,1
e) Terraço de baixamar	2,4
f) Refletiva	<1,5

$H_b$  = altura significativa de onda na arrebenção;  
 T = período de pico;  
 w = velocidade de queda do grão.

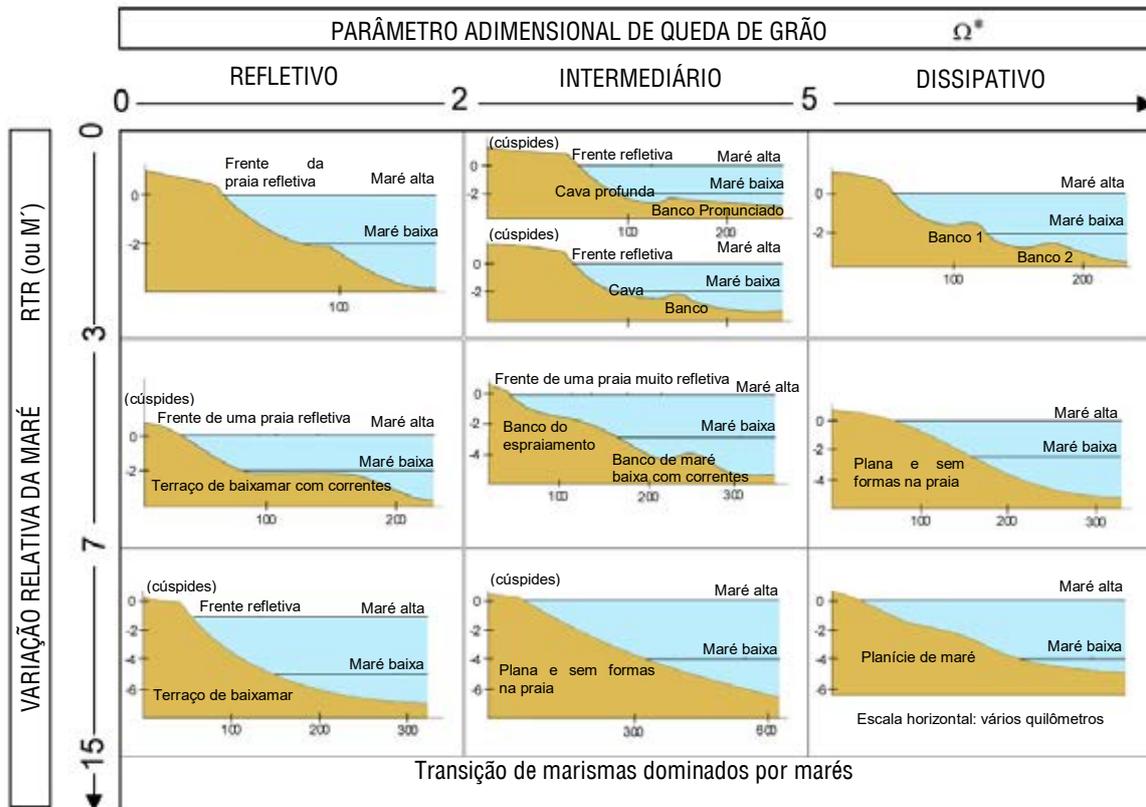


Quadro 8: Estados morfodinâmicos de praias sem maré (Continuação).



**Quadro 9: Estados morfodinâmicos de praias com maré.**

Masselink e Short (1993) complementaram o modelo de Wright e Short (1984) introduzindo o efeito da maré por meio do parâmetro adimensional RTR (ou M') que mede a variação relativa da maré à altura da onda. Utilizando os parâmetros RTR (ou M') e  $\Omega^*$ , definiram os seguintes estados morfodinâmicos:



Parâmetro adimensional de queda do grão:

$$\Omega^* = \frac{H_b}{wT}$$

Parâmetro de variação relativa da maré:

$$RTR = \frac{MSR}{H_b}$$

Onde:

$H_b$  = altura significativa de onda na arrebentação;

$T$  = período de pico;

$w$  = velocidade de queda do grão;

$MSR$  (ou  $M$ ) = variação da maré.

Tabela 2: Metodologia de cálculo de estabilidade em escalas de processos de médio prazo

Nível de cálculo	Geometria	Seção	Formulação	Dados necessários	Tipo de dados	Quadro	Observações
Pré-projeto	Praia de Enseada	Perfil					<ul style="list-style-type: none"> <li>· O resultado é uma cota superior.</li> <li>· Não são obtidas informações no tempo.</li> </ul>
		Planta	Planta equilíbrio estático	$\theta_0, (Y/L)$	Equilíbrio	25	
	Praia exposta	Perfil					<ul style="list-style-type: none"> <li>· Pode ser necessário um modelo de propagação de ondas</li> <li>· Pode ser necessário um modelo de propagação de ondas</li> </ul>
		Planta	Modelo de uma linha soluções analíticas	$H_b, \theta_b, D_\theta$	Evolução	27 a 30	
Projeto	Praia de Enseada	Perfil				<ul style="list-style-type: none"> <li>· Pode ser necessário um modelo de propagação de ondas</li> </ul>	
		Planta	Modelo de uma linha solução numérica	$H_b(t), \theta_b(t), D_\theta, geometria$	Evolução		
	Praia exposta	Perfil				<ul style="list-style-type: none"> <li>· Pode ser necessário um modelo de propagação de ondas</li> </ul>	
		Planta	Modelo de uma linha solução numérica	$H_b(t), \theta_b(t), D_\theta, geometria$	Evolução		27 a 30

### 3.3.3.3. Formulações do projeto e pré-projeto em longo prazo

O objetivo da análise em longo prazo é determinar qual será a forma final (planta-perfil) da praia e/ou a evolução temporal de tal forma em escala de anos, a fim de garantir que a funcionalidade da praia se mantenha durante a vida útil da mesma.

As formulações existentes para esta escala de tempo não tentam analisar os processos (por exemplo, transporte de sedimentos onda a onda), mas as magnitudes agregadas dos mesmos. Para a análise do perfil e da planta de uma praia são dois os tipos de modelos mais utilizados: os baseados na hipótese de equilíbrio e os baseados na equação da difusão.

A hipótese de equilíbrio postula que, se a ação das dinâmicas atuantes se mantém indefinidas, a forma da praia alcançará uma posição final constante, em equilíbrio com tais dinâmicas (Figura 19). Na prática não é necessário que a ação seja mantida indefinidamente, mas que a resposta da forma seja muito mais rápida que a escala de interesse.

No caso do perfil, é assumido que as modificações do mesmo são produzidas em escalas de tempo que podem ser consideradas como instantâneas em um estudo de longo prazo, implicando que o perfil sempre alcança a posição de equilíbrio. No caso de forma em planta, também é possível analisar a forma final de equilíbrio, mesmo que esta somente tenha sentido em praias de enseada, onde não há uma perda líquida de material.

A equação da difusão baseia-se, de certa forma, no mesmo conceito e estabelece que a forma de uma praia tende ao equilíbrio quanto mais rápido e quanto mais distante se encontre de tal posição de equilíbrio. Estes tipos de formulações permitem determinar a evolução temporal da forma da praia e, por esse motivo, são chamados modelos de evolução (por exemplo, os modelos de evolução da linha de costa).

As formulações selecionadas para a análise do perfil e da planta em uma análise em longo prazo estão reunidas na Tabela 3 e estão descritas em detalhe no Anexo 2. Neste anexo são apresentadas, também, as indicações sobre seu uso e algumas aplicações das mesmas.



Figura 19: Exemplo de praias de enseada associada a quebramares.

É importante destacar que a análise em longo prazo do perfil e da planta da praia deve estar acompanhada de um estudo relacionado a:

- a) Balanço sedimentar da zona de estudo;
- b) Estado morfodinâmico modal da praia.

#### **a) Balanço sedimentar**

O balanço sedimentar da zona de estudo é um cálculo, em termos de macro escala, dos acréscimos e perdas existentes na zona de estudo. Este cálculo deve ser de forma a permitir: (1) estabelecer as condições de contorno dos modelos de evolução, no caso de praias abertas, ou (2) a constatação de que a praia é uma praia de enseada sem contribuições ou perdas externas.

A realização de um balanço sedimentar tem como primeiro elemento a identificação dos elementos mais relevantes, ou seja, as fontes de sedimentos, os sumidouros de sedimentos, tipos de sedimentos e mecanismos de transporte.

Entre as fontes usuais encontram-se:

- Erosão de falésias;

- Contribuições fluviais;
- Contribuições biogênicas;
- Contribuições a partir da plataforma continental;
- Contribuições devido ao vento;
- Contribuições humanas (recomposições, material de dragagem, etc.)

Entre os sumidouros usuais encontram-se:

- Depósito em estuários, portos e outras estruturas;
- Depósito atrás da praia/dunas frontais pelo vento e/ou ondas;
- Transporte na direção da plataforma continental;
- Decomposição da areia;
- Exploração humana.

Os mecanismos de transporte fundamentais a considerar são:

- Transporte longitudinal devido à onda;
- Transporte transversal devido à onda;
- Transporte devido à ação de correntes de maré e vento;
- Transporte eólico;
- Transporte humano.

O SMC - Brasil incorpora uma ferramenta que permite calcular o transporte potencial em longo prazo para praias expostas. Esta ferramenta avalia o transporte potencial a partir da formulação do CERC (USACE, 1984) sobre um perfil de praia. Esta formulação depende da altura e direção da arrebentação, fornecendo informações do transporte em função da incidência oblíqua da onda, mas não devido aos gradientes de altura de onda.

### **b) Direção do fluxo médio de energia (forma em planta)**

O vetor fluxo de energia  $\vec{F} = F_x \vec{i} + F_y \vec{j}$ , associado a uma determinada onda, tem como direção a correspondente ao vetor número de onda (que coincide com a direção da ondulação) e como magnitude  $1/8 \rho g H^2 C_g$ . Onde  $C_g$  é a velocidade de grupo e  $H$  é a altura da onda. O fluxo médio anual é definido então como a soma dos vetores de fluxo de energia de todas as ondas em um ano. Portanto, se para cada hora de um ano existe um fluxo de energia  $F_{x,t} \vec{i} + F_{y,t} \vec{j}$ , o fluxo médio está definido como:

$$\vec{F}_m = \frac{1}{8760} \left( \sum_{t=1h}^{8760} F_{x,t} \vec{i} + \sum_{t=1h}^{8760} F_{y,t} \vec{j} \right) \quad (4)$$

$$\vec{F}_m = \overline{F_x} \vec{i} + \overline{F_y} \vec{j} \quad (5)$$

E a direção deste fluxo médio de energia é:

$$\overline{\theta}_m = \tan^{-1} \left( \frac{\overline{F_y}}{\overline{F_x}} \right) \quad (6)$$

Esta direção define a orientação da forma em planta de equilíbrio de uma praia. Esta forma em planta pode manter um equilíbrio estático, dinâmico ou estar em desequilíbrio. No Anexo 1.3.2 estão descritas as características de cada uma das formas de equilíbrio.

O SMC - Brasil conta com uma ferramenta que permite calcular a direção do fluxo médio de energia em um ponto ou em um perfil dado e desta forma avaliar a posição da forma em planta de uma praia.

### c) Estado morfodinâmico modal da praia

Como se desenvolveu anteriormente, a evolução real de um trecho costeiro é um processo tridimensional em que interage a morfologia e a dinâmica, tanto no perfil como em planta.

A simplificação que supõe o estudo separado de perfil e planta deve ser sempre revisada por meio de uma análise do estado morfodinâmico modal da praia que forneça informações sobre o grau de tridimensionalidade dos processos, as formas de praia existentes (cúspides praias, bancos, etc.) e a hidrodinâmica associada (correntes de retorno, ondas de infragravidade, etc). Aspectos estes de grande relevância não somente no cálculo de estabilidade da praia, mas no projeto funcional da mesma (ver seção 3.2.3).

Na análise em longo prazo não é de interesse a variabilidade da morfodinâmica da praia em função das características de onda e maré, mas o estado modal ou mais frequente, que será o resultado das condições modais energéticas de ondulação que a praia está submetida. Para realizar esta análise se deve definir as condições energéticas ( $H_b$ ,  $T$ ) e proceder de acordo com os Quadros 7, 8 e 9.

A partir da classificação obtida em tais quadros pode-se obter:

- Nível de segurança de banho, seção 3.2.3;
- Estado modal e morfologia associada (Modelo de Wright e Short, 1984);
- Hidrodinâmica dominante da praia (Modelo de Wright e Short, 1984).

Tabela 3: Metodologia de cálculo de estabilidade em escalas de processos de longo prazo.

Nível de cálculo	Geometria	Seção	Formulação	Dados necessários	Tipo de dados	Quadro	Observações
Pré-projeto	Praia de Enseada	Perfil	Perfil equilíbrio	$D_b, H_{s2}$	Equilíbrio	15	<ul style="list-style-type: none"> <li>Em alguns casos pode ser necessário perfil de equilíbrio modificado.</li> <li>Não são obtidas informações no tempo.</li> </ul>
		Planta	Perfil equilíbrio estático	$\theta_0, (Y/L)$	Equilíbrio	25	
	Praia exposta	Perfil	Perfil equilíbrio	$D_b, H_{s2}$	Equilíbrio	15	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pode ser necessário perfil de equilíbrio modificado.</li> </ul>
		Planta	Modelo uma linha soluções analíticas	$H_b, \theta_b, D_b$	Evolução	27 a 30	
Projeto	Praia de Enseada	Perfil	Perfil equilíbrio modificado	$A, A_r, B, \Omega, H_{s2}, geometria$	Equilíbrio	18 a 24	<ul style="list-style-type: none"> <li>O perfil deve ser ajustado com dados de praias próximas.</li> <li>Necessita de um modelo de linha para obter informações de evolução temporal.</li> </ul>
		Planta	Planta equilíbrio estático	$\theta_0, (Y/L)$	Equilíbrio	25	
	Praia exposta	Perfil	Perfil equilíbrio modificado	$A, A_r, B, \Omega, H_{s2}, geometria$	Equilíbrio	18 a 24	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pode necessitar um modelo de propagação de ondas</li> </ul>
		Planta	Modelo uma linha solução numérica	$H_b(t), \theta_0(t), D_b, geometria$	Evolução	27 a 30	

### 3.3.3.4. Formulações de projeto e pré-projeto em prazo muito longo

O objetivo da análise de prazo muito longo é determinar os efeitos na praia frente à mudança climática. A mudança climática é um fenômeno global, portanto, para analisar os efeitos desta sobre uma praia é necessário conhecer a dinâmica marinha em nível regional, ou seja, a onda e o nível do mar. Quaisquer mudanças em alguma ou algumas destas variáveis são traduzidas em mudanças nas praias. Estas mudanças ocorrem em escalas temporais de décadas.

Em especial as praias são afetadas pela mudança climática, uma vez que é produzido:

- Aumento na frequência de tempestades: aumento na quantidade de eventos extremos;
- Aumento na intensidade das tempestades: aumento da altura das ondas em eventos extremos;

- Modificação na trajetória das tempestades e ventos: mudanças na direção da onda média e extrema;
- Aumento no nível do mar: aumento no nível de inundação na costa.

Estas variações poderiam alterar a estabilidade das praias, produzindo mudanças na posição da linha de costa ou produzindo rotação na forma em planta das praias. Portanto, para estudar a influência da mudança climática nas praias, é necessário analisar as tendências a muito longo prazo das dinâmicas marinhas e seu efeito na forma em planta, bem como o perfil de equilíbrio e a cota de inundação.

Para determinar o efeito da mudança climática na costa é necessário contar com séries temporais suficientemente longas e contínuas, para analisar os parâmetros antes mencionados e ter uma maior confiabilidade nas previsões.

Os efeitos da mudança climática em praias são medidos em termos da tendência de mudança dos elementos morfológicos e das dinâmicas costeiras que estão relacionadas. Estas tendências são geralmente determinadas seguindo duas abordagens:

1. Reconstruindo séries históricas das variáveis dinâmicas de interesse em frente à praia, como por exemplo, a cota de inundação em praias, altura de onda, direção do fluxo médio de energia das ondas, taxas de transporte litorâneo de sedimentos, etc. Para isto são aplicadas técnicas que permitem estimar as tendências em muito longo prazo destas variáveis.
2. Inferindo futuras mudanças morfológicas nas praias, como por exemplo, a retração da linha da costa em uma praia, devido às mudanças em seu perfil ou da rotação de sua forma em planta a partir das tendências previamente calculadas das variáveis dinâmicas, que são dependentes. Para isto, é aplicado o método das perturbações, o qual permite que uma formulação, como a Regra de Bruun, estime as tendências ou resposta morfológica em prazo muito longo.

Dos diferentes elementos morfológicos de praias que poderiam ser afetados a muito longo prazo, serão analisados os seguintes:

- Perfil de equilíbrio;
- Planta de equilíbrio;
- Evolução de estados morfodinâmicos.

A análise detalhada do efeito da mudança climática em cada um destes elementos em uma praia é descrita no Documento Temático de Mudanças Climáticas em Praias, portanto, aqui é realizada somente uma breve descrição dos efeitos e formulações e é apresentado um breve resumo no final da seção, na Tabela 4

- a. Perfil de equilíbrio

O perfil de equilíbrio é um conceito de engenharia do perfil de praia médio representativo em escalas de longo prazo (anos a décadas). A forma e profundidade do perfil ativo dependem de variáveis dinâmicas como a onda e o nível do mar. Portanto, se a mudança climática produz mudanças, seja nas condições da onda (altura da onda) ou do nível em que a onda se propaga (nível médio do mar), irá produzir mudanças no perfil que devem ser avaliadas.

A seguir é descrito o processo pelo qual as mudanças nas variáveis dinâmicas produzem retração na posição da linha de costa. Em especial é analisado a retração produzida pelo aumento do nível do mar e pelo aumento da altura da onda extrema ( $H_{s12}$ ).

### **Retração da linha de costa decorrente do aumento do nível do mar**

Se o nível médio do mar aumenta, é produzido um incremento na profundidade em qualquer ponto do perfil da praia, perdendo-se a condição de equilíbrio. O perfil, portanto, tentará alcançar uma nova forma de equilíbrio, o que exigirá um fornecimento adicional de sedimento. Este sedimento, em geral, é fornecido pela parte emersa do perfil, podendo-se afirmar que um aumento do nível do mar ( $\Delta\eta$ ) produzirá uma retração ( $R_{\Delta\eta}$ ) da linha de costa (Quadro 10). A regra de Bruun é uma aproximação que permite quantificar esta retração. Em função disso, é possível determinar o volume de sedimento erodido e estimar a quantidade de material que seria necessário repor.

### **Retração da linha de costa devido ao aumento da altura de onda $H_{s12}$**

Nas praias de enseada e praias completamente preenchidas, se aumentar a profundidade de fechamento, pode ser que os limites laterais da praia não sejam capazes de manter a praia contida nestes. Nesta situação será produzida uma perda de sedimento pela parte baixa do perfil, que implicará em uma retração da linha de costa. Dado que nesta situação, a forma do perfil original da praia continue se mantendo, assume-se que a forma do perfil depende do tamanho médio do grão que não muda, portanto, o perfil responde deslocando-se terra adentro.

Assumindo a profundidade de fechamento do perfil como uma função de  $H_{s12}$  ( $h^* \sim 1,57H_{s12}$  aproximação de Birkemeier, 1985), um aumento do número ou a magnitude das tempestades que afetem ao  $H_{s12}$ , devido à mudança climática, produzirá um aumento da profundidade de fechamento do perfil e a respectiva retração da linha de costa. O Quadro 11 explica o processo pelo qual esta retração ocorre e como pode ser quantificada.

Para mais referências e detalhes dos procedimentos no intuito de avaliar a retração da linha de costa devido à mudança climática, deve – se consultar o Documento Temático de Mudanças Climáticas em Praias (IH CANTABRIA – MMA, 2017c).

**Quadro 10:** Retração da linha de costa devido ao aumento do nível do mar em prazo muito longo.

Um aumento no nível do mar produz um desequilíbrio na forma do perfil, o que implica em um rearranjo dos sedimentos do mesmo. Este rearranjo envolve um movimento de sedimento da parte superior à inferior do perfil, o que implica na retração da posição da linha de costa (Figura A).

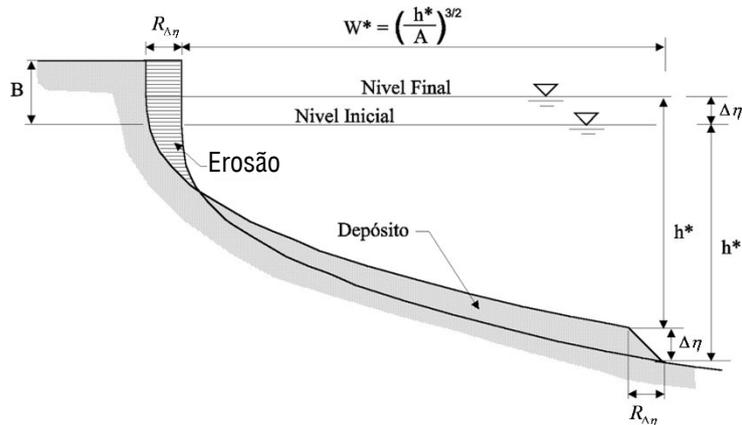


Figura A - Esquema da retração em um perfil de praia gerado pelo aumento do nível médio do mar.

A retração ( $R_{\Delta\eta}$ ) pode ser estimada a partir da regra de Bruun. Esta regra relaciona as mudanças do nível do mar com a posição da linha de costa. Supondo que, além disso, seja mantido o perfil de equilíbrio de Dean (1977), em que o volume de areia é preservado e que a profundidade de fechamento corresponde à dada pela aproximação de Birkemeier (1985), obtém-se:

$$R_{\Delta\eta} = \frac{\Delta\eta W_*}{h^*} = \Delta\eta \frac{(1,57H_{s12})^{1,5}}{(0,51w^{0,44})^{1,5}(1,57H_{s12} + B)}$$

Onde

$w_*$  = distância horizontal da linha de costa a  $h^*$ ;

$h^* \sim 1,57H_{s12}$  é a aproximação à profundidade de fechamento do perfil dada por Birkemeier (1985);

$B$  = é a altura da berma;

$H_{s12}$  = é a altura significativa de onda superada 12 horas ao ano;

$A$  é o parâmetro de forma do perfil de Dean;

$w$  = é a velocidade de queda de grão, que depende somente do tamanho médio do sedimento ( $D_{50}$ );

$\Delta\eta$  = é o aumento no nível médio do mar.

**Quadro 11: Retração da linha de costa de praias completamente preenchidas devido ao aumento da altura de onda  $H_{s12}$ .**

Em uma praia completamente preenchida de sedimentos, o comprimento do perfil ativo está limitado pelas dimensões dos elementos que a mantêm contida (Figura A). Este comprimento está determinado pela profundidade do fechamento do perfil ( $h^*$ ). Esta profundidade indica o limite em que ocorre o transporte de sedimento devido à quebra das ondas.

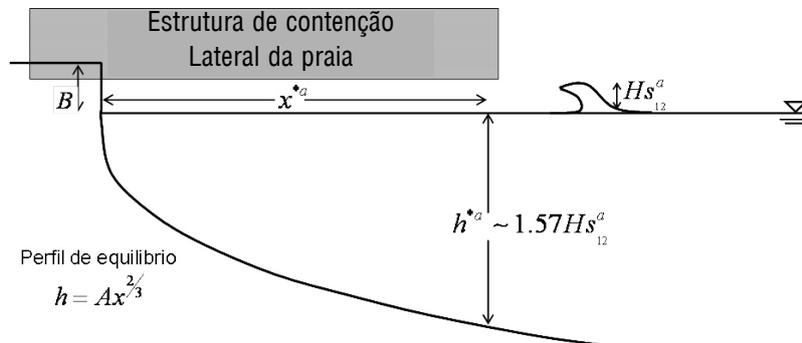


Figura A - Perfil típico de uma praia completamente preenchida.

A profundidade de fechamento do perfil pode ser estimada a partir da formulação de Birkemeier (1985), para qual pode-se aproximar como 1,57 vezes a altura significativa superada 12 horas ao ano ( $H_{s12}$ ) dado que está diretamente relacionada com a magnitude e o número de tempestades.

Portanto, se em prazo muito longo ocorre um aumento em  $H_{s12}$  (Figura B), de forma que,  $H_{s12}^{futura} = H_{s12}^{atual} + \delta H_{s12}$  a profundidade de fechamento aumentará fazendo com que a parte baixa do perfil fique fora da zona confinada, então haverá erosões. Esta erosão implica em uma retração ( $Re_{\Delta h^*}$ ) de todo o perfil. Esta retração continua até alcançar a situação em que o perfil volte a estar contido.

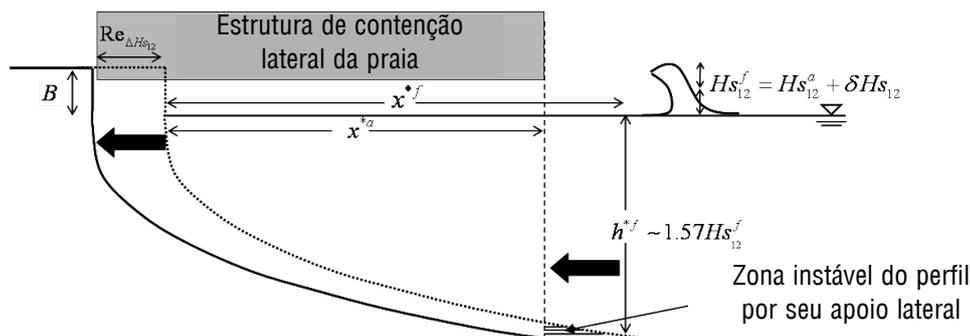


Figura b.

Aceitando um perfil de praia em equilíbrio de Dean (1977), a retração ( $Re_{\Delta h^*}$ ) pode ser avaliada como:

$$Re_{\Delta h^*} = x^{*f} - x^{*a} = \frac{(h^{*f})^{3/2} - (h^{*a})^{3/2}}{A^{3/2}}$$

onde  $A = 0,51w^{0,44}$  é o parâmetro de forma do perfil de Dean,  $x^*$  é a distância horizontal da linha de costa à profundidade de fechamento inicial  $h^*$ . O subíndice 1 indica os valores originais, enquanto que o subíndice 2 os valores finais posteriores a retração devido ao aumento  $\delta H_{s12}$  e considerando que  $h^* \sim 1,57H_{s12}$  e  $h^*_2 = h^*_1 + \Delta h$  chega-se a

$$Re_{\Delta h^*} = 2,95 \frac{\sqrt{H_{s12}^a} \delta H_{s12}}{(0,51w^{0,44})^{3/2}}$$

onde  $w$  é a velocidade de queda de sedimento, que depende somente do diâmetro  $D_{50}$ .

**b) Forma em planta de equilíbrio**

A forma em planta de equilíbrio de uma praia está condicionada principalmente à direção do fluxo médio de energia da onda. Portanto, os efeitos da mudança climática nesta variável produzirão mudanças importantes na forma em planta da praia.

Para analisar o efeito da mudança climática na forma em planta de uma praia é necessário saber se a mesma encontra-se em equilíbrio estático ou dinâmico, ou em processo de erosão (ver Anexo 1.3.2) ou se estão ou não completamente preenchidas de sedimento.

Uma Praia Completamente Preenchida de sedimento é aquela que se encontra confinada entre contornos laterais, onde a linha de costa e o perfil submerso não podem avançar mais na direção do mar porque a areia escaparia pelos contornos laterais (haveria transposição de sedimentos entre os obstáculos). Enquanto uma Praia Não Preenchida é aquela em que os apoios laterais são suficientemente longos para conter o perfil ativo da praia e permitir um avanço da linha de costa. Eventualmente, se for adicionada uma quantidade suficiente de sedimento na praia se conseguiria preenchê-la, ou seja, saturá-la.

As praias em equilíbrio estático frente a uma mudança na direção do fluxo médio de energia de onda tendem a girar tentando atingir uma forma em planta que mantenha o novo equilíbrio. Agora, se os contornos laterais são capazes de conter a praia rotacionada e não há entradas adicionais de sedimentos (praia não completamente preenchidas), será produzido um avanço e retração nos extremos opostos da praia. De tal forma que o volume erodido em um extremo seja igual ao depositado no extremo oposto. Se qualquer um dos contornos não for capaz de conter a praia (praia completamente preenchidas) será perdido o sedimento por este contorno e será produzida uma retração da linha de costa. Este processo irá parar quando a praia encontrar-se em um estado não preenchido.

As praias em equilíbrio dinâmico ou em desequilíbrio exigem uma abordagem diferente. Ou seja, nestas praias há um transporte líquido de sedimento, assim para seu estudo é necessário realizar um balanço sedimentar. Nestes casos, deve-se determinar o transporte potencial de sedimento ou a capacidade do sistema de transporte de sedimento. Nestas análises é utilizada, por exemplo, a fórmula de transporte do CERC, a qual somente inclui o transporte litorâneo pela obliquidade da onda. As variações no transporte de sedimentos, resultante da mudança climática, podem ser geradas por:

- Variações na altura da onda;
- Variações na profundidade de quebra da onda;
- Variação do ângulo de incidência da onda em quebra.

Aplicando o método das perturbações para a formulação do CERC, pode-se estimar, a partir do período, altura de quebra e da variação do ângulo de incidência da onda, a variação da taxa de transporte de sedimentos na praia.

No Quadro 12, são mostrados estes processos de forma esquemática, no entanto, para obter mais detalhes sobre os procedimentos no intuito de avaliar os efeitos da mudança climática na forma em planta, o leitor deve consultar o Documento Temático de Mudanças Climáticas em Praias (IH CANTABRIA – MMA, 2017c).

- b) Evolução dos estados morfodinâmicos

A mudança climática pode afetar as características morfodinâmicas das praias e sua evolução, bem como o ciclo sazonal de evolução morfodinâmica ou o estado modal de uma praia. Por esta razão, é importante analisar qual o efeito da mudança climática nos parâmetros que determinam o estado morfodinâmico de uma praia.

Se o método das perturbações é aplicado ao parâmetro adimensional de queda de grão  $\Omega$ , e se assumir que não há variações no período  $T$ , constata-se que a variação deste parâmetro está determinada pela variação da altura da quebra.

$$\delta\Omega = \frac{\delta H_b}{\omega_s T} \quad (7)$$

Deste parâmetro pode-se inferir que as praias que serão afetadas em maior medida pela mudança climática são aquelas que possuem sedimento muito fino e que recebem ondas de períodos curtos.

Finalmente, com a finalidade de resumir, são mostrados na Tabela 5 os efeitos nos elementos de uma praia em prazo muito longo, bem como as variáveis necessárias para sua avaliação.

## Quadro 12: Efeitos de prazo muito longo na forma em planta de uma praia.

Em muito longo prazo, a forma em planta de uma praia pode ser afetada por variações da direção do fluxo médio de energia. Para entender o comportamento de uma praia em prazo muito longo é necessário conhecer as condições atuais da praia em questão, ou seja, se a praia está em equilíbrio estático ou dinâmico ou não está em equilíbrio, e também se está completamente preenchida ou não. A seguir é descrito o comportamento de uma praia reta frente a uma situação em que a direção do fluxo médio de energia muda em um prazo muito longo.

### 1. Praia em Equilíbrio Estático – Não completamente preenchida

Uma praia nesta situação implica que os limites laterais da praia são capazes de conter o perfil. Assim, se varia a direção do fluxo de energia, será produzida uma rotação da forma em planta da praia de tal forma que mantenha o equilíbrio (Figura a). Esta rotação envolve uma zona de erosão e outra de acreção nas extremidades. A retração máxima ( $R_{max}$ ) pode ser avaliada como

$$R_{max} = \frac{L}{2} \text{tg}(\Delta\beta)$$

onde  $L$  é o comprimento da praia.

### 2. Praia em Equilíbrio Estático – Completamente preenchida

Se uma praia em equilíbrio estático rotaciona o suficiente, de forma que  $h^*$  ultrapasse os limites laterais, ou se um dos limites laterais de praia não seja capaz de conter o perfil de equilíbrio (Figura b), esta é uma praia completamente preenchida. Se ocorrer uma mudança na direção média do fluxo de energia em uma praia destas características, será produzida uma rotação da linha de costa (posição intermediária na Figura b). No entanto, a areia escapará pelo limite lateral e, então, a linha de costa e todo o perfil retrocedem até voltar à situação de não preenchimento.

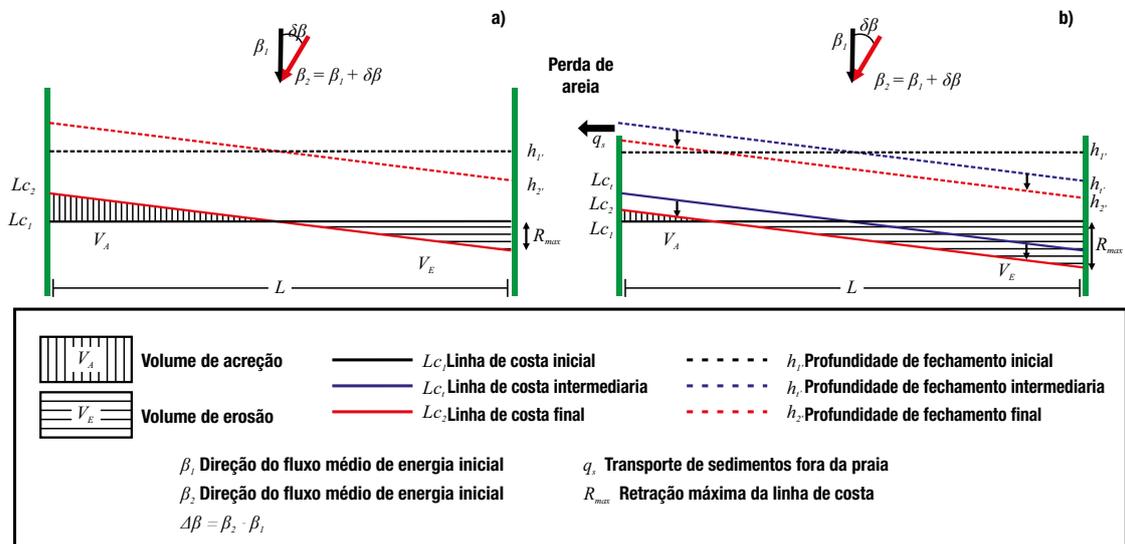


Figura A - Processo de rotação de uma praia em equilíbrio: a) não está completamente preenchida devido às mudanças na direção média do fluxo de energia; b) completamente preenchida devido às mudanças na direção média do fluxo de energia.

### 3. Praia em equilíbrio dinâmico ou em desequilíbrio

Em ambos os casos, o estudo da forma em planta da praia requer a determinação do transporte potencial longitudinal  $Q$  e das possíveis mudanças na linha de costa cujo transporte gerou. Mudanças na taxa de transporte potencial indicarão as mudanças ou retrações na posição da linha de costa. A variação do transporte é obtida através da equação do CERC em função do ângulo de incidência das ondas e a altura de quebra da onda. De modo que

$$\frac{\delta Q}{Q_a} = \frac{\delta Q_1}{Q_a} + \frac{\delta Q_2}{Q_a}$$

onde

$$\frac{Q_1}{Q_a} = 2,5 \frac{\delta H_b}{H_{b,a}} \quad , \quad \frac{Q_2}{Q_a} = 2 \frac{\delta \alpha_R}{\tan(2\alpha_R)}$$

e  $H_b$  é a altura da quebra (ou arrebentação),  $\alpha_R$  é o ângulo entre a frente de onda e a linha de costa e  $Q_a$  é o transporte potencial atual.

Tabela 4: Metodologia de cálculo de estabilidade em escalas de processos de prazo muito longo.

NÍVEL DE CÁLCULO	SEÇÃO	FORMULAÇÃO	DADOS	TIPO DE DADOS	QUADRO	OBSERVAÇÕES
Pré-projeto	Perfil	Tendência de condições de equilíbrio	$D_{50}$ , $H_{s12}$ , nível do mar e geometria do perfil	Valores médios e tendências multianuais médias	10 11	As tendências podem ser obtidas no documento: “Efeitos da mudança climática na costa da América Latina e Caribe: Dinâmicas, tendências e variabilidade climática (CEPAL, 2015)”, enquanto que no Documento Temático de Mudanças Climáticas em Praias (IH CANTABRIA – MMA, 2017c) encontram-se os cálculos correspondentes.
	Planta	Tendência de condições de equilíbrio	Direção do fluxo de energia, comprimento da praia, $H_s$ , $\theta$	Valores médios e tendências multianuais de valores médios	12	
Projeto	Perfil	Tendência de condições de equilíbrio	$D_{50}$ , $H_{s12}$ , nível do mar e geometria do perfil	Tendência multianual de valores médios e sua dispersão	10 11	Os cálculos são realizados a partir da base de dados e as ferramentas incorporadas no SMC - Brasil.
	Planta	Tendência de condições de equilíbrio	Direção do fluxo de energia, comprimento da praia, $H_s$ , $\theta$	Tendência multianual de valores médios e sua dispersão	12	

Tabela 5: Resumo dos possíveis efeitos em uma praia em um prazo muito longo.

ELEMENTO	Ondulação			Regime Extremo	Nível do mar	Maré Meteorológica
	Regime Médio					
	$\Delta H_{s12}$	$\Delta H_{RMS}$	$\Delta \theta$	$\Delta H_{sT=50 \text{ anos}}$	$\Delta \eta$	$\Delta MM$
Cota de inundação				Possível aumento da Cota de inundação	Possível aumento da Cota de inundação	Possível aumento de Cota de inundação
PERFIL	Produz um aumento na profundidade de fechamento, possível retração líquida da linha de costa e perda de sedimento em praias completamente preenchidas				Produz a retração da linha de costa	
FORMA EM PLANTA			Rotação em planta. Possível retração da linha de costa		Mudança nos tômbolos, saliências e duplas saliências.	
TRANSPORTE LITORAL		Variação na capacidade de transporte	Variação na capacidade de transporte			

### 3.3.4. Estratégias de uso das formulações

As formulações apresentadas nos quadros anteriores utilizam diferentes tipos de dados de entrada e possuem objetivos como a determinação da interação da linha de costa frente a um evento extraordinário de onda ou a descrição do sistema de correntes de praia em situação média de verão. É evidente que, a estratégia de uso das formulações e/ou dos dados de entrada não é a mesma e deve estar em conformidade com o objetivo pretendido. Nesta seção é detalhada a estratégia de uso das fórmulas de cálculo de estabilidade e evolução de praia, de acordo com os objetivos propostos em cada escala de tempo de estudo, como visto na Tabela 6.

**Tabela 6:** Dados necessários em função do tipo de fórmula usada.

Escala do estudo	Tipo de fórmula	Dados Pré-projeto	Dados Projeto
Curto Prazo	Condições extremas	Ação correspondente a períodos de retorno	Ação correspondente a períodos de retorno
	Condições médias	Valores característicos: Frequentes + Excepcionais de interesse	Valores característicos: Frequentes + Excepcionais de interesse
Médio e Longo Prazo	Equilíbrio	Valores médios de parâmetros envolvidos ( $D_{50}$ , $\theta_0$ , ...)	Valores médios + Variabilidade dos valores médios + Ajustes praias próximas
	Evolução	Agrupamento de dados de séries temporais ( $H_b(t)$ , $\theta_b(t)$ , ...)	Agrupamento de dados + Simulação de eventos aleatórios
Prazo Muito Longo	Tendência em condições de equilíbrio	Tendências multianuais de valores médios	Tendências multianuais de valores médios e sua dispersão

#### 3.3.4.1. Curto prazo

##### Fórmulas de condições extremas

Um dos objetivos da análise de curto prazo é determinar a resposta da praia frente à ação de uma tempestade com o intuito de verificar que sua função de defesa da costa está garantida, tanto no que se refere a retração da linha de costa, como a cota de inundação alcançada.

Estas formulações de variáveis aleatórias (onda, maré meteorológica, etc.) e a seleção dos valores representativos das mesmas devem ser realizadas, de acordo com a ROM e a partir dos dados estatísticos das mesmas. A publicação mencionada estabelece a vida útil e o risco aceitável nas obras de defesa costeira em função de uma série de parâmetros. A partir de tal vida útil e risco, se determina o período de retorno, que é o valor representativo da carga a ser utilizada na formulação de condições extremas. Estes aspectos foram desenvolvidos com detalhes na seção 3.2.3, Critérios de avaliação (ver também a Figura 12 e os Quadros 1 e 2).

A cota de inundação em função do período de retorno pode ser obtida do estudo “Uma proposta de abordagem para o estabelecimento de regime probabilístico de área de inundação costeira do Brasil” (MMA, 2017).

## **Formulações de condições médias**

O segundo objetivo do estudo da estabilidade de uma praia em curto prazo é a análise dos processos morfodinâmicos da mesma, que permite a correta caracterização da dinâmica litorânea da zona de estudo. A impossibilidade de analisar todas as combinações da altura de onda – direção – período – maré implica na necessidade de selecionar um número reduzido de casos que permitam, de uma maneira adequada, alcançar os objetivos previstos.

É importante salientar que a seleção dos casos para o estudo não será realizada com critérios de agregação, como foi feito nos modelos de evolução, uma vez que o objetivo buscado é diferente. No presente tipo de análise busca-se a caracterização da dinâmica litorânea, para isso, é necessário selecionar o que se chama de «casos característicos». Estes casos característicos devem cobrir as:

- a) Situações mais frequentes;
- b) Situações de interesse especial.

A seguir é apresentado uma série de critérios para a seleção dos casos característicos, no entanto, é importante salientar que algumas das situações excepcionais de interesse respondem às circunstâncias geométricas locais (por exemplo, altura de onda máxima que quebra no substrato rochoso em que se encontra a praia, etc.), sendo o projetista quem deve definir estes casos excepcionais.

### **a) Situações mais frequentes**

**Maré:** Nos mares com maré deve-se analisar, pelo menos, a dinâmica litorânea na situação de maré alta e maré baixa. Nas praias próximas a desembocaduras ou afetadas por correntes de maré de baías e estuários deve-se analisar, além disso, a situação de meia maré enchente e meia maré vazante, com a inclusão das correntes de maré.

**Altura**

**de onda:** Será considerada, pelo menos, uma situação de baixa energia (por exemplo, altura média anual, onda média de verão, etc.) e uma situação de alta energia (por exemplo, tempo de retorno de 1 a 5 anos, ondulação média de inverno) para cada uma das direções de interesse.

**Período:** Considerado como uma situação excepcional de interesse se adotará como período aquele associado à altura de onda escolhida, de acordo com a ROM.

**Direção:** Serão considerados, pelo menos, todos os setores que apresentem uma probabilidade de ocorrência maior que 15% do tempo, calculando tal porcentagem com os valores propostos na ROM para os setores possíveis na praia estudada e excluindo as calmarias.

### **b) Situações de interesse**

Entre estas situações destaca-se:

- Temporal (onda de tempestade) relativo a um dado período de retorno;
- Direções pouco frequentes, mas excepcionalmente energéticas.
- Períodos diferentes ao período médio associado à altura significativa de onda, no caso de espectros bimodais.

### 3.3.4.2. Médio prazo

Na análise de médio prazo é utilizado o mesmo tipo de formulações de equilíbrio e de evolução que na análise em longo prazo e os objetivos da análise são semelhantes, para isso a estratégia de uso dos mesmos é idêntica ao expresso na seção indicada em longo prazo (ver a Tabela 2).

### 3.3.4.3. Longo prazo

#### **Formulações de equilíbrio**

As formulações de equilíbrio, tanto em perfil como em planta, não dependem de nenhuma variável temporal, podendo ser assimiladas às formulações com forças permanentes (ver ROM), ou seja, forças constantes em posição e magnitude que variam lentamente ou insignificamente em comparação com seu valor médio.

Para este tipo de formulação, no nível de pré-projeto, bastará utilizar o valor médio das variáveis de entrada ( $D_{50}$ ,  $\theta_0$ ,  $H_{s12}$ ). No nível de projeto, no entanto, será necessário analisar a variabilidade ou dispersão das variáveis em relação ao seu valor médio. De acordo com a ROM são estudados os valores correspondentes às probabilidades de excedência de 5% e de 95% respectivamente.

É importante lembrar neste ponto, que a variabilidade dos resultados pode estar originada não somente pela variabilidade dos dados de entrada ( $D_{50}$ ,  $\theta_0$ ), mas pela própria variabilidade dentro da formulação que está baseada nos ajustes (por exemplo, o parâmetro  $A - D_{50}$ ). Neste sentido, no nível do projeto, é imprescindível que os parâmetros das formulações ( $A$ ,  $\theta_0$ ) estejam verificados, com os ajustes em praias próximas à zona de estudo.

#### **Formulações de evolução**

As formulações de evolução em longo prazo têm como objetivo a determinação da posição média ou mais provável da praia ao longo do tempo e utilizam dados de variáveis ( $H_b(t)$ ,  $\theta_0(t)$ ,  $T(t)$ ) temporais aleatórias. A utilização desta formulação requer dois tipos de atuações sendo uma complementar à outra.

- a) Agrupamento de dados;
- b) Simulação de eventos aleatórios.

A primeira está relacionada com a impossibilidade de abordar o problema de maneira contínua (por exemplo, altura da onda de cm em cm, direção de min em min) o que dá origem a um agrupamento dos dados em setores e intervalos de ondas.

A segunda corresponde à natureza aleatória e não linear do problema, levando em conta que a energia que uma praia recebe em um ano não é igual à energia média anual. Além disso, dois anos de mesma energia média, com eventos de tempestade de diferente sequência resultam em uma evolução diferente.

### a) Agrupamento de dados

O objetivo do agrupamento de dados é representar o clima de ondas de uma zona por meio de um número reduzido de condições representativas, de tal modo, que tais condições representativas permitam estimar adequadamente o transporte de sedimentos e a evolução da linha de costa em longo prazo.

O ponto de partida de todos os métodos de agrupamento de dados é uma tabela de probabilidade de ondas, por alturas de onda, direção e período. Esta tabela representa, por si só, um primeiro agrupamento de dados e o objetivo é reduzir o número de casos de tal tabela. Os diferentes critérios de agrupamento baseiam-se na expressão:

$$\bar{Q} = \left( \frac{\sum_i f_i Q_i}{\sum f_i} \right) \quad (8)$$

onde  $Q_i$  é o transporte da  $i$ ésima-combinação de onda-direção,  $f_i$  é a frequência de apresentação da  $i$ -combinação e  $\bar{Q}$  é o transporte médio.

Steijn (1992) propõe utilizar o parâmetro  $P_i$  (Fluxo de Energia longitudinal  $P = (EC_g \text{ sen} 2\theta_i)$ ) para representar  $Q_i$ . Chesher e Miles (1992) propõem que, para cada setor de interesse,  $\theta_0$ , o transporte depende fundamentalmente de  $H^2$  pelo qual se pode obter uma altura de onda representativa do transporte médio como:

$$H_R = \left( \frac{\sum f_i H_i^2}{\sum f_i} \right)^{1/2} \quad (9)$$

O processo de agrupamento seria neste caso:

- Selecionar as direções de interesse;
- Obter a altura de onda representativa para cada setor.

### b) Simulação de eventos aleatórios

A menos que no processo de agrupamento dos dados se tenha selecionado uma única direção e altura de onda representativa, onde o caso só exista em um evento com probabilidade de ocorrência igual à unidade (opção válida no pré-projeto com modelos analíticos), existirão diversos eventos possíveis de direção e altura de onda representativa, cada um dos quais tem uma probabilidade de ocorrência.

A maneira de proceder neste caso é realizar uma simulação de Monte Carlo que gere uma série temporal de eventos possíveis, de acordo com a probabilidade de ocorrência. Esta simulação deverá se repetir por um número suficiente de vezes com o objetivo de poder avaliar qual será a

evolução média e a dispersão da evolução em torno de tal média (Figura 20) Erro! Fonte de referência não encontrada.

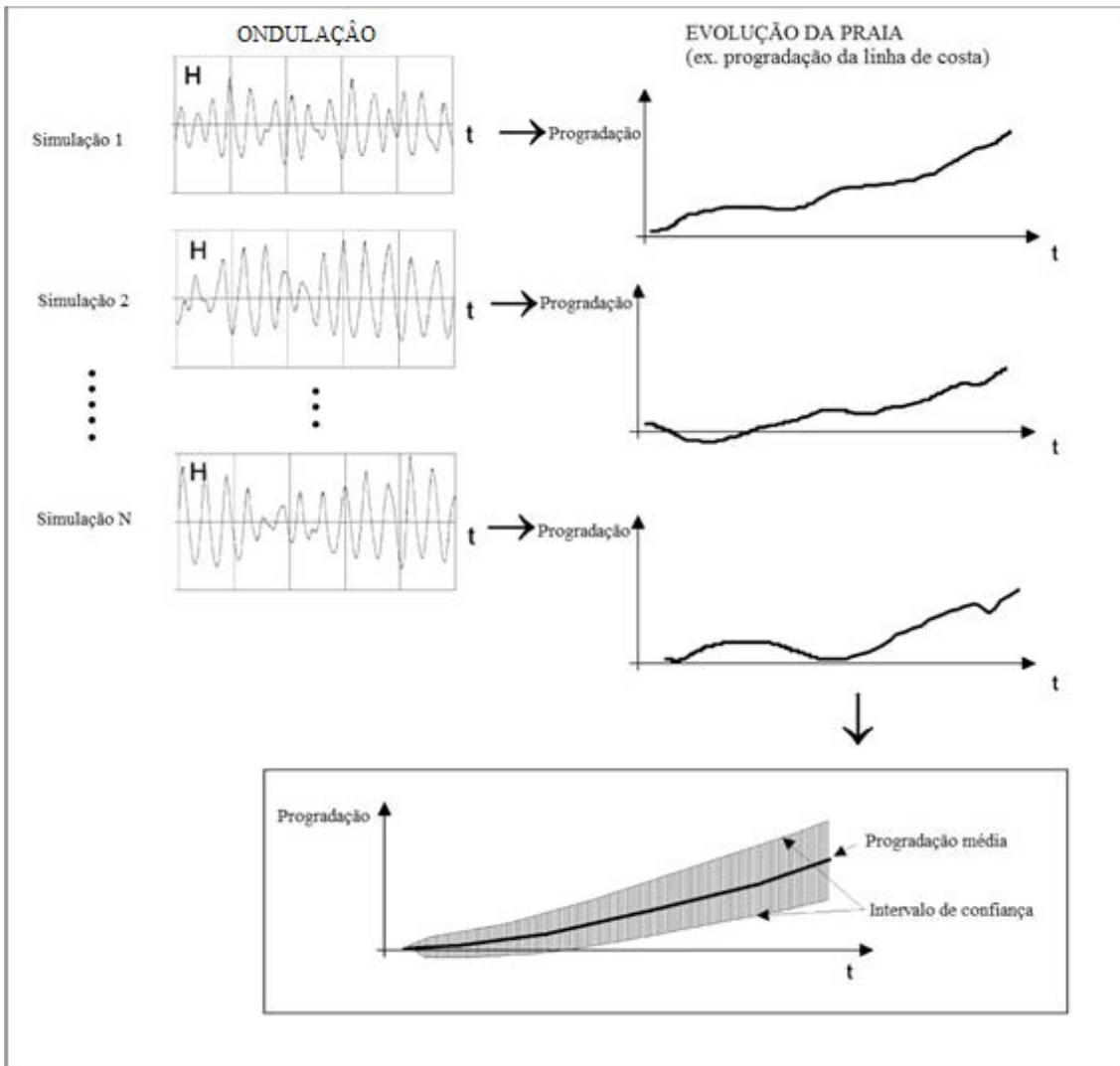


Figura 20: Esquema de simulação da evolução temporal.

#### 3.3.4.4. Prazo muito longo

As formulações disponíveis para avaliar os efeitos de prazo muito longo nas praias proporcionam informações sobre a retração ou rotação, com base na estimativa das mudanças ou tendências das variáveis dinâmicas que controlam a morfologia de uma praia.

Estas tendências são obtidas por meio do ajuste dos modelos de regressão às séries dinâmicas ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $\theta_0$ , direção média do fluxo de energia, nível do mar). Existem diversos modelos de regressão, entre os mais utilizados estão o linear, quadrático e harmônico. O Quadro 13 descreve as formulações destes modelos.

Quadro 13: Modelos de regressão.

Modelo de regressão	Formulação
Linear	$f(t) = a_0 + b_1 t$
Quadrático ou parabólico	$f(t) = a_0 + b_1 t + b_2 t^2$
Harmônico ou sazonal	$f(t) = a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + a_2 \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + b_1 t$

Destes modelos são obtidas as mudanças ou aumentos nas variáveis dinâmicas em um período de tempo.

No nível de pré-projeto, podem-se utilizar as estimativas de aumentos das variáveis envolvidas nas formulações, publicadas pelo Painel Intergovernamental de Mudança Climática (IPCC) ou outros como os descritos no documento CEPAL “Efeitos da mudança climática na costa da América Latina e no Caribe: Dinâmicas, tendências e variabilidade climática” (<http://www.cepal.org/id.asp?id=45542>) (CEPAL, 2015) e os cálculos disponíveis no Documento Temático de Mudanças Climáticas em Praias (IH CANTABRIA – MMA, 2017c), para obter uma estimativa dos efeitos da mudança climática em uma praia.

Em contraste, para o nível do projeto, é necessário calcular as tendências das variáveis em frente a praia e levar em conta tanto os valores médios, como sua variabilidade, de tal forma que aplicando as formulações se obtenha uma estimativa, seja da retração, ou da rotação praial, bem como sua variabilidade. A título de exemplo, no Quadro 14 é mostrado o cálculo para a retração da linha da costa devido um aumento do nível do mar nos dois níveis de cálculo.

**Quadro 14:** Exemplo de aplicação das formulações para avaliar a retração da linha de costa em prazo muito longo devido a um aumento do nível do mar.

Conhecendo-se as condições atuais de uma praia e tendo interesse em encontrar a retração da linha de costa produzida pelo aumento do nível médio do mar pode-se fazer:

**1. Estimativa em nível de Pré-projeto**

No nível de pré-projeto pode-se obter a estimativa de  $\Delta\eta$  na zona de interesse a partir do projeto da CEPAL “Efeitos da mudança climática na costa da América Latina e o Caribe: Dinâmicas, tendências e variabilidade climática” (veja também Losada *et al.*, 2013) ou dos cenários propostos pelo IPCC (AR5). Nestes documentos são fornecidas informações das dinâmicas previsíveis para o futuro nas zonas próximas à costa. A Figura a mostra o mapa de tendência para o aumento do nível do mar  $\Delta\eta$  retirado do documento da CEPAL (2015).

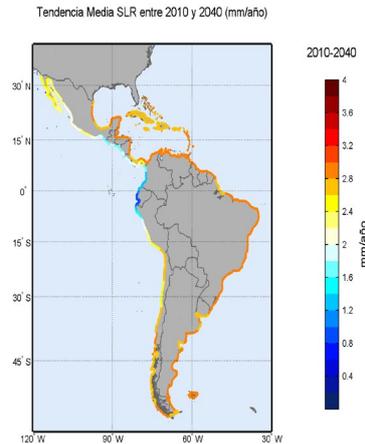


Figura A. Estimativa de  $\Delta\eta$  na América Latina para o período 2010 a 2040. Fonte CEPAL (2015)

A estimativa da retração é obtida a partir do diagrama (ábaco) que relaciona a retração da linha de costa ( $R_{\Delta\eta}$ ) com o aumento do nível do mar ( $\Delta\eta$ ) em função da altura da onda  $H_{s12}$ , o tamanho médio do sedimento ( $D_{50}$ ) e altura da berma/duna ( $B$ ). Este ábaco (reproduzido na Figura B) encontra-se disponível no Documento Temático de Mudanças Climáticas em Praias (IH CANTABRIA – MMA, 2017c).

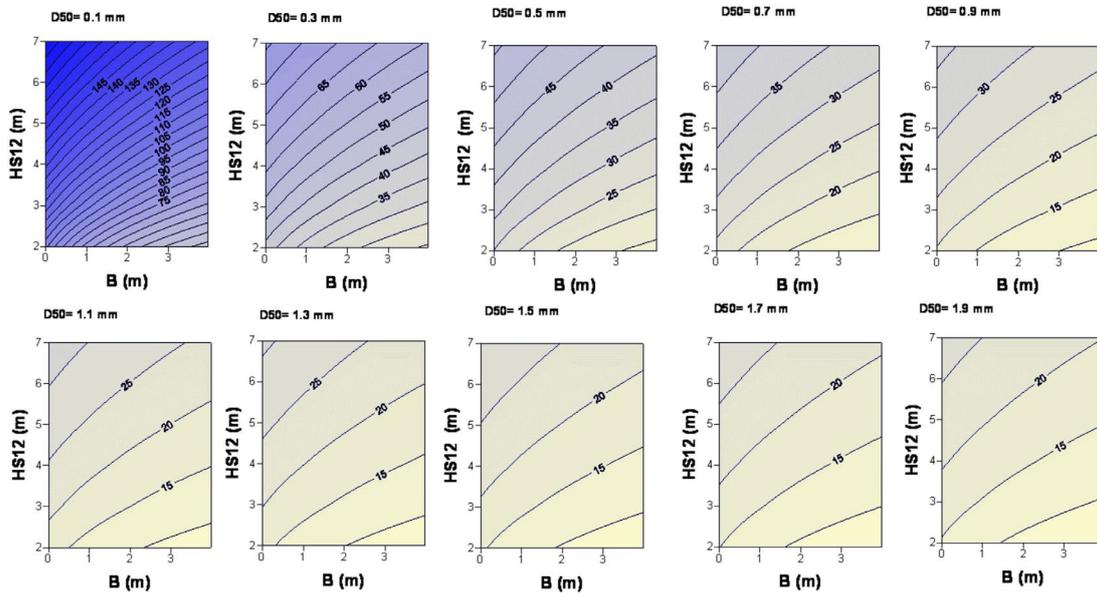


Figura b. Ábacos que permitem quantificar a relação entre a retração da praia e o aumento do nível do mar em função da altura da Berma  $B$ , o tamanho médio do sedimento  $D_{50}$  e a altura da onda  $H_{s12}$ .

## 2. Estimativa em nível de Projeto

No nível de projeto, é necessário contar com a série de nível do mar e ajustá-la a um dos modelos de retração disponíveis. Na Figura C é mostrado um ajuste para modelo linear, onde a partir deste é obtido o aumento médio anual do nível do mar ( $\delta\eta$ ) e sua variabilidade.

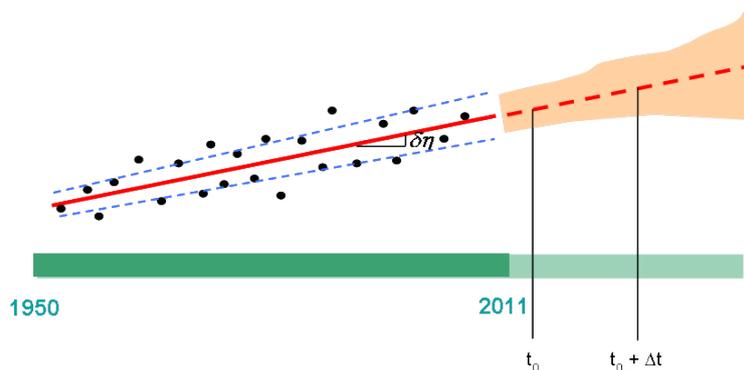


Figura C. Exemplo de uma série de nível do mar e o resultado do ajuste de um modelo de retração linear.

Portanto, pode-se determinar o aumento do nível médio do mar como:

$$\Delta\eta = \Delta t \cdot \delta\eta$$

e aplicando a formulação, se obtém o retração média correspondente a este aumento do nível do mar

$$R_{\Delta\eta} = \frac{\Delta\eta W^*}{h^*} = \Delta\eta \frac{(1,57H_{s12})^{1,5}}{(0,51w^{0,44})^{1,5}(1,57H_{s12} + B)}$$

onde

$W^*$  = distância horizontal da linha de costa a  $h^*$ ;

$h^* \sim 1,57H_{s12}$  é a aproximação à profundidade de fechamento do perfil dada por Birkemeier (1985);

$B$  = é a altura da berma;

$H_{s12}$  = é a altura significativa de onda superada 12 horas ao ano;

$w$  = é a velocidade de queda de grão, que depende somente do tamanho médio do sedimento ( $D_{50}$ );

$\Delta\eta$  = é o aumento no nível médio do mar.

O SMC - Brasil conta com as ferramentas e dados necessários para realizar os cálculos do projeto de forma direta para um projeto na costa brasileira.

# REFERÊNCIAS

BERNABEU, A.M. **Desarrollo, validación y aplicaciones de un modelo general de perfil de equilibrio en playas**. 1999. (Ph.D. Thesis) – Univesidad de Cantabria, 1999.

BERNABEU, A.M.; MEDINA, R.; VIDAL, C. Wave reflection on natural beaches: an equilibrium beach profile model. **Estuarine, Coastal and Shelf Sciences**, v. 57, p.577–585, 2003.

BIRKEMEIER, W.A. Field data on seaward limit of profile change. **Coastal Ocean Engineering**, ASCE: 111, p. 598–602, 1985.

BRUUN, P. **Coast Erosion and the Development of Beach Profiles**. Technical Memorandum No. 44, Beach Erosion Board, 1954.

CEPAL. **Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: Dinámicas, tendencias y variabilidad climática**. Santiago: ONU, 2015.

CHAVERRI, R. Coastal management: the Costa Rica experience. In: Magoon, O. T. (Ed.), COASTAL ZONE '87. **Proceedings...** New York, American Society of Civil Engineering, 1989. p.1112-1124.

CHESHER, T.J.; MILES, G.V. The concept of a single representative wave for use in numerical models of long term sediment transport predictions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDRAULIC AND ENVIRONMENTAL MODELLING OF COASTAL, ESTUARINE AND RIVER WATERS, 2, 1992, Bradford, UK. **Proceedings...** Bradford, 1992.

DEAN, R.G. **Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf Coasts**. Ocean Engineering Report n.12. Newark: Department of Civil Engineering, 1977.

DEAN, R.G. Coastal Sediment Processes: Toward Engineering Solutions. In: COASTAL SEDIMENTS '87. **Proceedings...** American Society of Civil Engineers, 1987. p. 1-24.

DEAN, R.G. Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications. **Journal of Coastal Research**, v.7, n.1, p.53-84, 1991.

GÓMEZ-PINA, G. **Análisis de perfiles de playa en las fachadas cantábrica y atlántica de la costa española y su aplicación a proyectos de regeneración**. 1995. Dpto. De Ciencias y Técnicas del Agua y Medio Ambiente - Universidad de Cantabria, 1995.

GONZÁLEZ, M. **Morfología de Playas en Equilibrio. Planta e Perfil**. 1995. Escuela de Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Tesis Doctoral) – Universidad de Cantabria, 1995.

GONZÁLEZ, M.; MEDINA, R.; LOSADA, M.A. Equilibrium beach profiles: effect of refraction. In: COASTAL DYNAMICS '97, 1997. **Proceedings...** 1997.

HOLMAN, R.A. Extreme value statistics for wave run-up on a natural beach. **Coastal Engineering**, v. 9, p. 527-544, 1986.

HSU, J. R-C.; EVANS, C. Parabolic Bay Shapes and Applications. In: INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS – Part 2, 1989, Londres. **Proceedings...** Londres: Thomas Telford, 1989. p. 557-570.

HUGHES, S.A. Movable Bed Modeling Law for Coastal Dune Erosion. **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, v.109, n.2, p.164-179, 1983.

IH CANTABRIA – MMA. **Sistema de Modelagem Costeira, SMC – Brasil: Documento Temático – Ondas**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2017a.

IH CANTABRIA – MMA. **Sistema de Modelagem Costeira, SMC – Brasil: Documento Temático – Níveis e Cota de Inundação**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2017b.

IH CANTABRIA – MMA. **Sistema de Modelagem Costeira, SMC – Brasil: Documento Temático – Mudanças Climáticas em Praias**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 2017c.

INMAN, D.L.; ELWANY, M.H.S.; JENKINS, S.A. Shorerise and bar-berm profiles on ocean beaches. **Journal of Geophysical Research**, v.98, n.C10, p.18181-18199, 1993.

KOMAR, P.D. **Beach processes and sedimentation**. New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1998.

KRAUS, N. C. The Effects of Seawalls on the Beach: A Literature Review. In: COASTAL SEDIMENTS '87. **Proceedings...** American Society of Civil Engineers, 1987. p. 945-960.

KRIEBEL, D.L.; KRAUS, N.C.; LARSON, M. Engineering methods for predicting beach profile response. In: COASTAL SEDIMENTS '91. **Proceedings...** 1991. p. 557- 571.

KRIEBEL, D.L.; DEAN, R.G. Convolution method for time-dependent beach-profile response. **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, v. 119, n. 2, p. 204-227, 1993.

LARSON, M.; KRAUS, N.C.; HANSON, H. **Analytical solutions of the one-line model of shoreline change**. Technical Report CERC-87-15, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1987.

LARSON, M.; HANSON, H. ; KRAUS, N. C. Analytical solutions of one-line model for shoreline change near coastal structures. **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, v.123, p.180-191, 1997.

LEATHERMAN, S.P. Beach rating: a methodological approach. **Journal of Coastal Research**, v.13, n.1, p.253-258, 1997.

LOSADA, I.J.; REGUERO, B.G.; MÉNDEZ, F.J.; CASTANEDO, S.; ABASCAL, A.J.; MÍNGUEZ, R. Long-term changes in sea-level componentes in Latin America and the Caribbean. **Global and Planetary Change**, v.104, p.34-50, 2013.

MASSELINK, G.; SHORT, A. D. The effect of tide range on beach morphodynamics and morphology – a conceptual beach model. **Journal of Coast Research**, v. 9. p. 785-800, 1993.

MEDINA, R.; BERNABEU, A.M.; VIDAL, C.; GONZÁLEZ, M. Relationships between beach morphodynamics and equilibrium profiles. International Coastal Engineering Conference, 2000. **Proceedings...** American Society of Civil Engineering, 2000. p. 2589-2601.

MMA. **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2006.

MMA. **Uma Proposta de Abordagem para o Estabelecimento de Regime Probabilístico de Área de Inundação Costeira do Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2017.

MOORE, B.D. **Beach Profile Evolution in Response to Changes in Water Level and Wave Height**. 1982. Department of Civil Engineering (Masters Thesis) - University of Delaware, 1982.

MUÑOZ, J.J. Análisis de la morfología y variabilidad de playas apoyadas en lajas rocosas, 1996. (Ph. D. Thesis) - University of Cádiz, 1996.

NELSON, W.G. **Physical and biological guidelines for beach restoration projects**. Report n.76. Gainesville: Florida Sea Grant College, 1985. 66p.

NIELSEN, P.; HANSLOW, D.J. Wave runup distributions on natural beaches. **Journal of Coastal Research**, v.7, n.4, p. 1139-1152, 1991.

NORDSTROM, K.F. **Beaches and Dunes of Developed Coasts**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 356p.

POWELL, K.A. **Predicting short-term profile response for shingle beaches**. Hydraulics Research Report SR219. 1990.

SHORT, A. D.; HOGAN, C. L. Rip Currents and beach hazards: Their Impact on Public Safety and Implications for Coastal Management. **Journal of Coastal Research**, v.12, p.197-209, 1994.

STEIJN, R.C. **Input Filtering Techniques for Complex Morphological Models**. Delft Hydraulics Report, H824.53. 1992

SUNAMURA, T. **Prediction of on/offshore sediment transport rate in the surf zone including swash zone**. In: JAPANESE CONFERENCE OF COASTAL ENGINEERING, 31, 1984. **Proceedings...** 1984. p. 316-320.

SWART, D.H. A Schematization of Onshore- Offshore Transport. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COASTAL ENGINEERING, 14, 1974. **Proceedings...** American Society of Civil Engineers, 1974. p. 884-900.

U.S. Army Corps of Engineers (USACE). **Shore Protection Manual**. Engineer Manual. U.S. Army Corps of Engineers, Washington. D.C., 1984.

WILLIAMS, A.T.; GARDNER, W.; JONES, T.C.; MORGAN, R.; OZHAN, E. A psychological approach to attitudes and perceptions of beach users: Implications for coastal zone management. In: Ozhan, E.

(Ed.), MEDCOAST 93. **Proceedings...** Ankara, Medcoast Secretariat, Middle East Technical University, 1993. p. 218-228.

WRIGHT, L.D.; SHORT, A.D. Morphodynamic variability of beaches and surfzones: A synthesis. **Marine Geology**, v. 56, p. 92-118, 1984.

**ANEXOS**

# Anexo 1

## Nomenclatura

# 1. Nomenclatura

## 1.1. Introdução

Este Anexo centra-se na compilação da nomenclatura e em algumas definições utilizadas no documento. Em relação à definição dos termos empregados, é aceita a nomenclatura do *Coastal Engineering Research Center*, CERC, retirada do *Shore Protection Manual* (USACE, 1984). Em alguns casos não há nenhuma terminologia específica em português. Dada à ampla divulgação da terminologia inglesa, serão apresentados, sempre que possível, os termos em ambos os idiomas, português e inglês, respectivamente.

A **Praia (Beach)** é definida como o acúmulo de sedimento não consolidado (areia, cascalho ou seixos), o qual se situa entre a linha de máximo alcance de onda na maré alta de sizígia e uma profundidade que corresponde à zona onde deixa de produzir um movimento ativo de sedimentos devido à ação das ondas. Fica claro, que a definição de praia não pode ser separada da hidrodinâmica. Esta definição de praia praticamente coincide com a definição de **Zona Litorânea (Litoral Zone)** dada por Komar (1998) na Figura 21. Não confundindo esta definição de morfodinâmica de praia com a definição, mais ampla, dada em termos legais ou de gestão da costa, que inclui à praia toda a Zona Costeira adjacente à mesma, tal como se define a seguir.

As praias fazem parte da **Zona Costeira (Coastal Zone)**, que compreende a área da plataforma continental e da costa em que os processos morfodinâmicos são determinados pela dinâmica marinha. Seu desenvolvimento em direção a terra e em direção ao mar depende, portanto, da tipologia da costa, da plataforma continental e do clima marítimo. Por exemplo, em uma costa baixa e arenosa, submetida a fortes ventos, inclui a área de dunas frontais e interiores da praia, cuja dinâmica depende da capacidade de entrada de areia da praia, por parte das ondas e da ação dos ventos costeiros. Em uma desembocadura, incluirá toda a zona submetida à ação das marés. Pelo lado do mar, seu alcance depende também do clima marítimo nesta zona, incluindo todas as porções da plataforma continental, cuja morfologia depende da ação das ondas ou das correntes provenientes da costa.

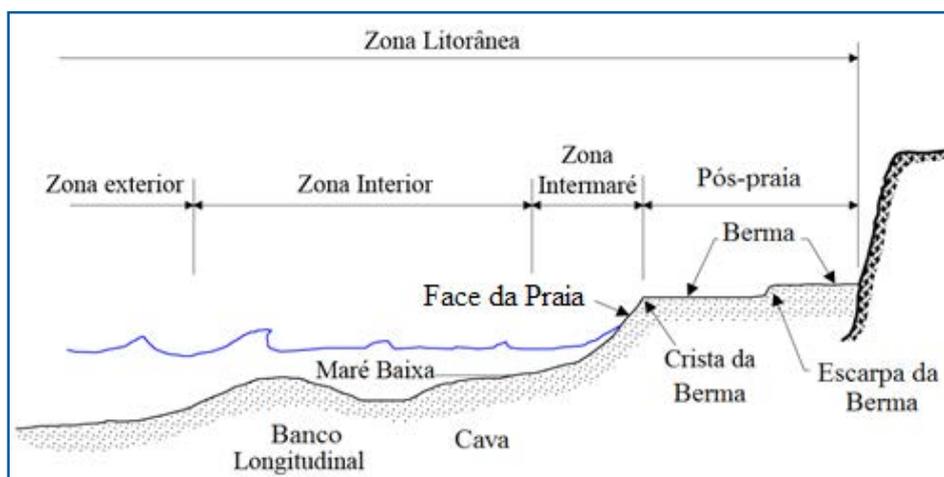


Figura 21: Toponímia do perfil em função da morfologia (adaptado de Komar, 1998)

## 1.2. Perfil das Praias

### 1.2.1. Definições

O **Perfil de Praia (Beach Profile)** é definido como a variação da profundidade da água,  $h$ , com a distância à linha de costa,  $x$ , na direção normal para a mesma. Esta definição assume que a praia é localmente de batimetria reta e paralela, portanto, a **Linha de Costa (Shoreline)** pode ser representada por uma curva de nível qualquer da praia. É bastante comum considerar o nível médio do mar para a definição da linha de costa. Nas praias com maré é conveniente indicar qual nível é empregado na definição da linha de costa. A extensão do perfil de terra até o mar é determinada pelos limites da zona litorânea.

Na Figura 21 estão indicados alguns dos termos relativos às zonas em que o perfil é dividido. Suas definições são as seguintes:

**Pós-praia (Backshore):** Zona do perfil de praia compreendida entre o limite de terra da praia (base da duna ou falésia ou calçadão) e o início da face da praia.

**Berma (Berm):** Zona quase horizontal do pós-praia, formada pela deposição de sedimentos devido à onda. Seu limite pelo lado do mar é a mudança brusca de declividade produzida até a face da praia, denominada **Borda da Berma (Berm Edge)**. Após uma temporada de grande atividade de onda (inverno), ocorre um período de calmaria (verão), uma nova margem, **Berma de Verão** pode ser adicionada à anterior, **Berma de Inverno**, com um nível horizontal inferior (uma vez que a onda é menor). Marcando a separação entre as duas bermas pode haver uma zona de maior declividade, correspondente à face da praia de inverno.

**Escarpa da Praia (Beach Scarp):** Degrau vertical no pós-praia, formado pela erosão da berma produzida por uma tempestade.

**Zona Intermaré (Foreshore):** Zona da praia compreendida entre a borda da berma e o limite de diminuição da onda na maré baixa.

**Face da Praia (Beach Face):** Seção da praia que fica exposta à ação do fluxo ascendente e descendente da onda. No caso de mares com maré, a face da praia fica definida pela zona de subida – descida na maré alta.

**Degrau da Praia (Beach Step):** Zona de maior declividade que aparece ocasionalmente no limite inferior da face da praia. Geralmente contém sedimentos mais grossos que o resto do perfil.

**Terraço de Baixamar (Low Tide Terrace):** Parte da zona intermaré situada entre o limite inferior da face de praia e o limite onde ocorre a diminuição da onda na maré baixa.

**Canal de Baixamar (Runnel):** Depressão no terraço de baixamar que pode aparecer imediatamente abaixo da face da praia. Pode estar associada a cava de um banco crescente muito próxima à face de praia.

**Bancos Longitudinais (*Longshore Bar*):** Acúmulo de areia quase paralela à linha de costa. Pode haver vários bancos no perfil da praia. O banco mais interno pode ficar exposto na maré baixa.

**Crista do banco (*Bar Crest*):** Zona de maior elevação do banco longitudinal.

**Cava do banco (*Longshore Trough*):** Depressão no perfil da praia paralela à linha de costa, associada com o banco. É produzido imediatamente em direção ao interior do banco.

**Praia Submersa (*Submerged Beach*):** Zona da praia compreendida entre o limite onde ocorre a diminuição da onda na maré baixa e o limite exterior do perfil. Na literatura inglesa se divide em (*Inshore*), zona de movimento ativo de sedimentos, compreendida desde o nível de diminuição na maré baixa até a zona exterior do banco e (*Offshore*), na zona exterior.

### 1.2.2. Variações do perfil: Praia dissipativas e refletivas

O perfil das praias se altera constantemente como resposta às mudanças do transporte transversal de sedimentos produzido pela dinâmica marinha, especialmente as ondas. As mudanças mais notórias são as associadas aos deslocamentos dos bancos e ao avanço ou retração da linha de costa. Estas mudanças morfológicas geram uma diversidade das formas de praia. Entre as múltiplas formas possíveis de perfil, existem duas extremas que apresentam uma geometria em planta aproximadamente bidimensional, ou seja, onde o perfil representa aproximadamente a morfologia da praia. Estas duas formas extremas de perfil são denominadas perfil dissipativo e refletivo.

O **perfil dissipativo** (Figuras 22 e 23) é característico de praias com areia fina e níveis de energia elevados. No geral, a face da praia não pode ser diferenciada do terraço de baixamar e a zona intermaré tem uma forma ligeiramente côncava com inclinações baixas e sem formações notáveis. Além disso, não existem bermas que delimitem a zona do pós-praia, então o perfil côncavo inicia praticamente na base da duna frontal ou na escarpa. A praia submersa geralmente apresenta um ou vários bancos longitudinais, com cavas e cristas pouco marcadas.

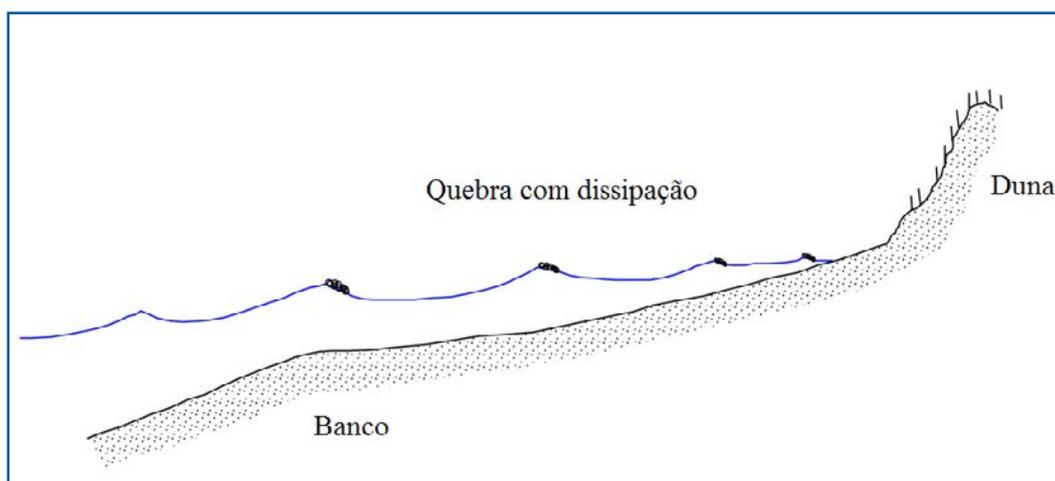


Figura 22: Perfil dissipativo



Figura 23: Quebra de ondas em praia dissipativa.

O **perfil refletivo** (Figuras 24 e 25) ocorre em praias de areias médias a grossas, com níveis de energia baixos. Neste caso, a berma marca claramente o início da face da praia. No pós-praia podem ser apreciados resquícios de bermas e escarpas correspondentes a perfis mais antigos produzidos por condições de ondas mais energéticas. Sobre a face da praia são frequentes os cúspides praias (*beach cusps*) e geralmente existe um degrau na parte inferior da face da praia, composto de materiais mais grossos, sendo que depois desse a declividade do perfil baixa consideravelmente, conservando uma forma côncava. Se a praia é de macro maré, o degrau da base da face praial fica devastado pela ação das ondas e um terraço de baixamar de declividade suave fica exposta na maré baixa. Este fica frequentemente inundado pelo surgimento de lençóis freáticos produzidos na parte inferior da face praial. Na praia submersa não aparecem bancos.

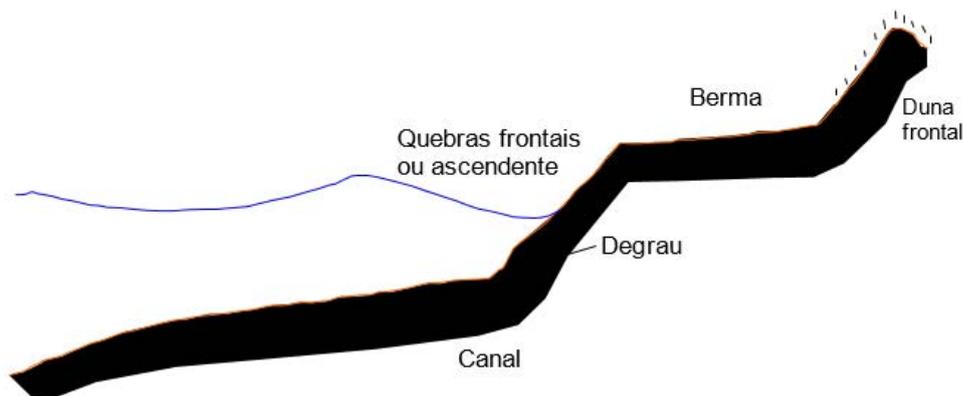


Figura 24: Perfil refletivo

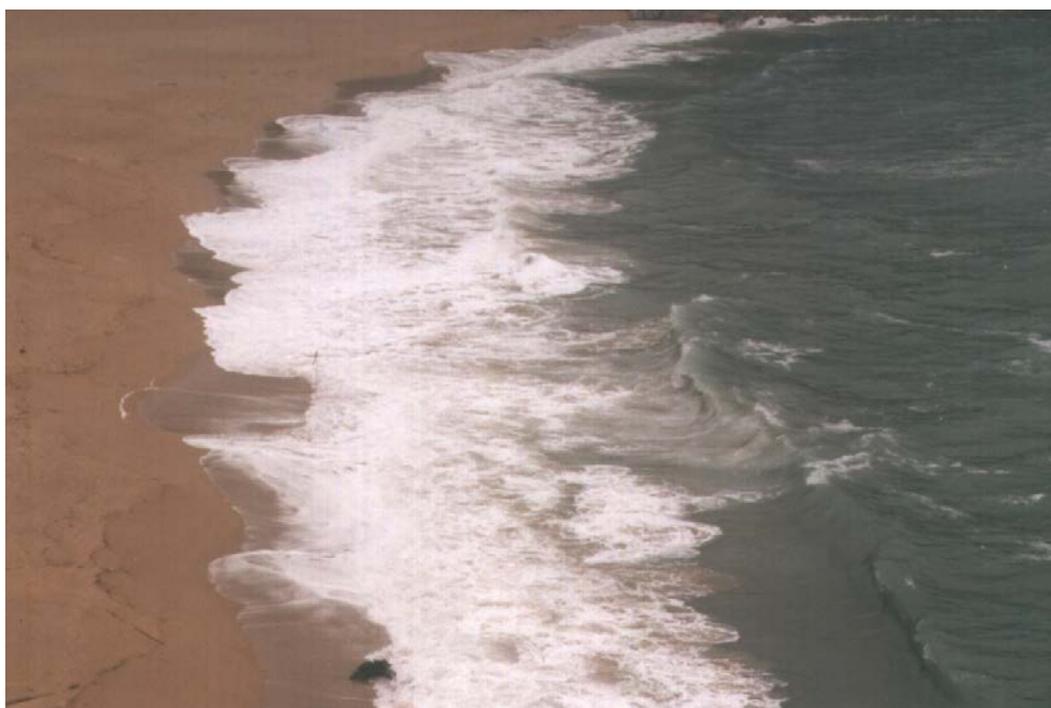


Figura 25: Quebra de ondas em praia refletiva

Entre estes dois tipos extremos de morfologia do perfil são apresentados toda uma gama de estados intermediários. Estes estados de praia não podem ser definidos mediante um só perfil, uma vez que são basicamente tridimensionais e a morfologia está fortemente relacionada com os sistemas circulatórios estabelecidos nas praias.

Algumas praias mostram uma grande variabilidade em seu perfil, respondendo a condições de ondas fortemente variáveis. Nas latitudes temperadas, as praias moderadamente expostas, com tamanhos de grão médio a fino, de 0,2 a 0,3mm, sofrem condições de ondas com fortes variações sazonais. Em geral, o nível médio de energia e os extremos das tempestades são muito superiores nos meses de troca de estação (verão-outono ou inverno-primavera). Depois de uma temporada com repetidos temporais (ressacas), as praias mencionadas alcançam uma posição de quase equilíbrio que se aproxima bastante das praias dissipativas e diz-se que a praia alcançou seu **Perfil de Erosão**. Contrariamente, após longos períodos de calmaria, mais frequentes nos meses de verão, a praia recupera um perfil próximo ao refletivo, indicando que a praia alcançou seu **Perfil de Acreção**. Estes termos de “perfil de Erosão” e “perfil de Acreção” são relativos e podem não corresponder a um momento determinado com a estação do ano em que se encontra o citado perfil, mas sim, com o aspecto que apresenta a praia em um momento específico devido à variação de energia das ondas.

### 1.3. A forma em planta das praias

Conforme indicado na seção anterior, as praias de perfil dissipativo e as refletivas mostram características longitudinais relativamente uniformes na macro escala, ficando assim, bem definidas morfologicamente por seu perfil. As praias intermediárias, no entanto, apresentam grandes variações longitudinais em seu perfil, sendo assim, nestas não se pode falar especificamente em um tipo de perfil.

As formas em planta referidas a seguir são as que aparecem nos estados de praia intermediários entre o dissipativo e o refletivo. Estas formas em planta são o resultado da interação da hidrodinâmica e do sedimento em meso escala e não devem ser confundidos com as formas em grande escala nas plantas das praias, resultantes das condições de contorno, como cabos, canais de maré, estruturas, etc.

### 1.3.1. Definições Morfológicas

No que diz respeito às formas em planta, os termos mais comuns que são empregados são os seguintes:

**Bancos Crescentes (*Crescentic Bars*):** Banco claramente assimétrico, com a encosta do lado da terra muito mais inclinada que a do lado do mar, indicando um deslocamento do banco em direção a terra. Estes bancos costumam estar cortados longitudinalmente por canais de correntes de retorno.

**Canais de Correntes de Retorno (*Rip Channels*):** Zonas de maior profundidade que cortam transversalmente os bancos longitudinais e crescentes. Podem ficar expostos na maré baixa e estão associados à hidrodinâmica das correntes transversais na zona de arrebenção.

**Bancos Transversais (*Trasverse Bars*):** Banco que se estende em direção aproximadamente perpendicular à linha de costa. Frequentemente seu lado de terra fica unido à face da praia. Entre os bancos transversais existem sempre canais de correntes de retorno.

**Cúspides Praiais (*Beach Cusps*):** Formas rítmicas de reentrâncias e saliências paralelas a praia que se formam na face da praia, com comprimento de onda da ordem de dezenas de metros.

**Megacúspides (*Megacusps*):** Formas rítmicas de reentrâncias e saliências paralelas a praias que se formam na face da praia, associadas às sequências longitudinais rítmicas de bancos crescentes ou transversais. As reentrâncias na face da praia geralmente estão relacionadas com os canais de correntes de retorno, enquanto que as saliências, com a zona de avanço do banco em direção à terra. Seu comprimento de onda é da ordem de centenas de metros.

**Micro-ondulações (*Ripples*):** Formas rítmicas do leito das praias, de dimensões horizontais da ordem dos decímetros.

### 1.3.2. Conceitos de equilíbrio em planta

A forma em planta de uma praia depende fundamentalmente de:

1. As fontes de entrada e sumidouros de sedimento que esta tenha;
2. A capacidade de transporte de sedimento da dinâmica marinha local;
3. A geologia da área, quanto a seus contornos de confinamento lateral e transversal pelo fundo. Incluindo dentro destes as ações humanas (espigões, quebramar, etc).

A análise destes três elementos requer a definição da posição da linha de costa. Esta posição é definida em termos da equação de balanço do fluxo de sedimento.

Na Figura 26, é representada uma porção da costa, cuja forma é definida mediante a posição dos pontos ao longo da praia, expressa como distâncias medidas a partir da terra ( $y_0, y_1, y_k, y_t, y_s \dots$ ). Aplicando-se a equação de balanço do fluxo de sedimentos em um setor da praia compreendido entre os perfis ou transectos A e B separados a uma distância  $\Delta x$ , é obtida a seguinte expressão:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = K \frac{\partial q}{\partial x} \quad (10)$$

onde:

$y$  é a posição da linha de costa;

$q$  é o fluxo de sedimento;

$t$  é o tempo;

$K$  é uma constante de proporcionalidade.

Considerando esta equação em termos de diferenças finitas, na célula A-B, é obtido:

$$\frac{y_t - y_{t-1}}{\Delta t} = K \frac{q_B - q_A}{\Delta x} \quad (11)$$

Isolando a posição da costa ( $y_t$ ) em um instante  $t$ , se chega a:

$$y_t = y_{t-1} + (q_B - q_A)K \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (12)$$

Uma expressão que diz a posição da linha de costa,  $y_t$ , na metade do trecho A-B em um instante de tempo  $t$ , depende da posição dessa mesma linha de costa em um tempo anterior,  $y_{t-1}$ , e da diferença entre o fluxo de sedimento que sai pela seção B ( $q_B$ ), em relação ao fluxo de sedimento que entra pela seção A ( $q_A$ ). Em outras palavras: o que se acumula ou se perde entre A e B em um tempo  $\Delta t$ .

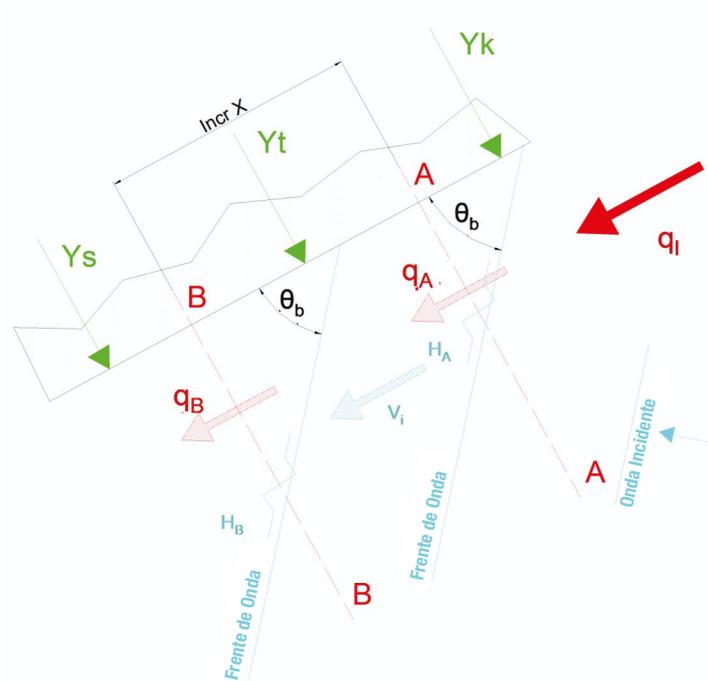


Figura 26: Representação esquemática de um trecho da costa

Os fluxos de sedimento em  $q_A$  ou  $q_B$ , estão associados à corrente de deriva litorânea,  $V_i$ , que por sua vez, depende das ondas incidentes. Mais precisamente o ângulo que forma a frente de onda com a orientação local da costa,  $\theta_b$ , e o gradiente de altura de onda,  $\Delta H$ , entre os pontos A e B:

$$\Delta H = \frac{H_B - H_A}{\Delta x} \quad (13)$$

Os fluxos  $q_A$  e  $q_B$  são a capacidade de transporte de sedimento devido à dinâmica marinha local, o qual não necessariamente corresponde ao transporte litorâneo real que aporta o sistema desde zonas a barlar, neste caso denominadas  $q_l$ .

Tendo em conta as variáveis que definem a forma da linha de costa, anteriormente descrita, podem-se encontrar diferentes tipos de forma em planta:

### Forma em planta em equilíbrio “estático”

Diz-se que uma praia atinge uma forma em planta em equilíbrio “estático” quando a corrente líquida costeira é nula ( $V_i \sim 0$ ), implicando que o transporte costeiro potencial e real seja zero ( $q_l = q_A = q_B = 0$ ). Isto na equação anterior implica:

$$y_i = y_{i-1} \quad (14)$$

que a linha de costa não se altere com o tempo, atingindo uma situação de equilíbrio. Isto acontece em praias de enseadas ou confinadas lateralmente, onde: (1) os elementos em seus extremos são o suficientemente longos para evitar que entre ou saia areia do sistema ( $q_l \sim 0$ ) e (2), nos casos em que não há difração (sem gradientes de altura de onda), a forma em planta da praia é orientada paralela ao fluxo médio de energia das ondas na praia (Figura 27a). No caso das praias

com difração, as correntes que são geradas longitudinalmente por gradientes de altura de onda são compensadas ou anuladas com as correntes geradas pela obliquidade das ondas, razão pela qual  $q_A = q_B = 0$ , (Figura 27b). A forma em planta de equilíbrio estático nestes casos com difração é representado pela parábola de Hsu e Evans (1989).

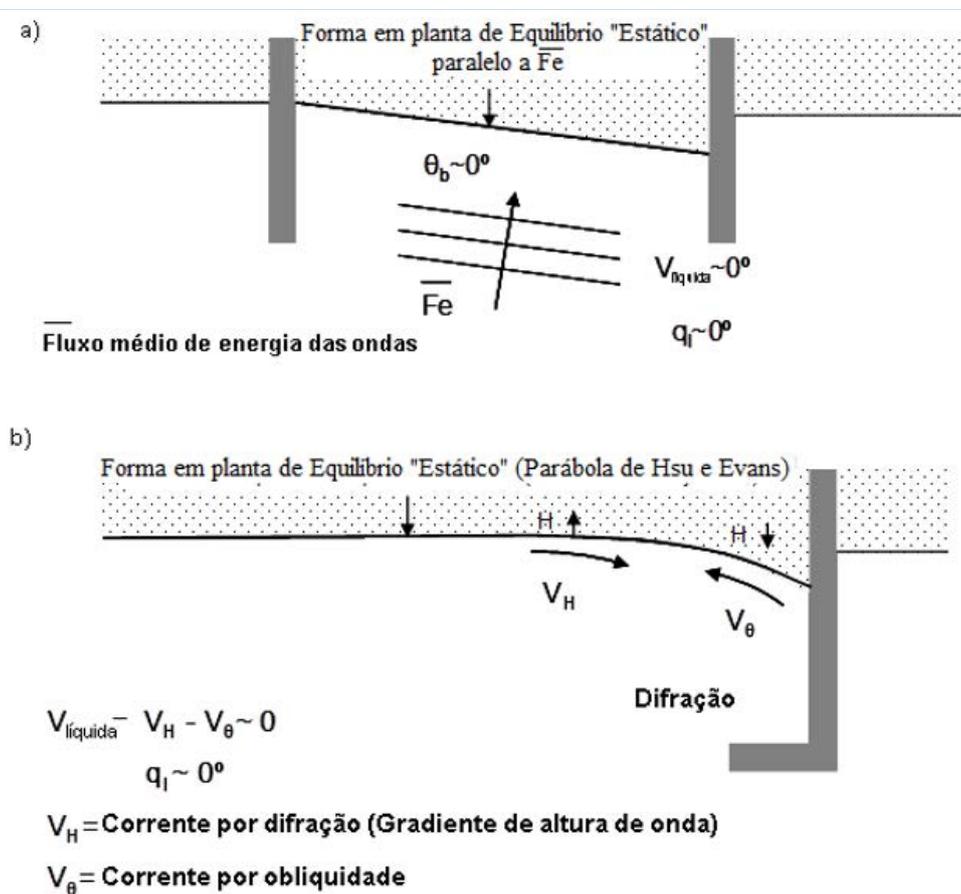


Figura 27: Esquema da forma em planta de equilíbrio "estático" (a) sem difração; e (b) com difração (gradientes de altura de onda).

### Forma em planta em equilíbrio "dinâmico"

Uma praia atinge uma posição de equilíbrio "dinâmico", quando a corrente líquida costeira é distinta de zero ( $V_i \neq 0$ ) e o transporte costeiro real é igual ao potencial nas duas seções ( $q_l = q_A = q_B \neq 0$ ). Nesta situação, a linha de costa permanece em equilíbrio. Por exemplo, (Figura 28), no caso de uma praia reta sem gradientes de altura de onda, a linha de costa toma a orientação que permite formar um ângulo,  $\theta_b$ , entre a frente de ondas (Fluxo Médio de Energia) e esta, gerando um transporte potencial igual ao real da zona ( $q_l$ ).

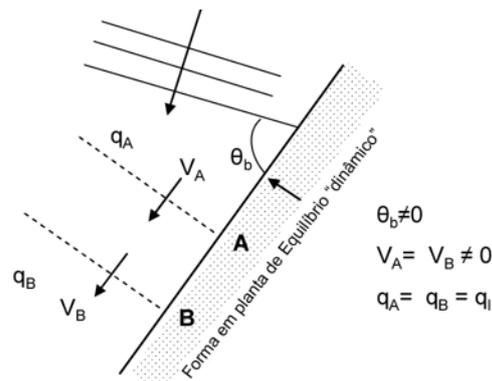


Figura 28: Esquema da forma de planta de equilíbrio “dinâmico”.

### Forma em planta em desequilíbrio transitório

Quando a forma em planta de uma praia que está em equilíbrio “estático” ou “dinâmico” é modificada, seja porque varia um contorno lateral, aporta ou remove sedimento da praia ou modifica a capacidade de transporte (modificações na altura da onda e/ou a obliquidade desta), esta começa um processo de modificação da sua forma em planta, até conseguir novamente com o passar do tempo, uma condição de equilíbrio “estático” ou “dinâmico”.

Na situação em que a capacidade de transporte é modificada, tem-se que  $q_B$  é diferente de  $q_A$  ( $q_B \neq q_A$ ), apresentando duas opções: que  $q_B > q_A$ , neste caso a situação é de erosão no setor A-B (Figura 29). A segunda opção é que  $q_B < q_A$ , neste caso a situação é de acumulação no trecho A-B, e a linha de costa avança na direção do mar.

No caso da construção de uma obra como um quebramar ou um porto, este gera a barlarar um bloqueio do transporte costeiro. Portanto,  $q_B \sim 0$ , enquanto  $q_A$  é similar a  $q_l$ , o qual gera uma situação de acúmulo, modificando a orientação da linha de costa. Essa por sua vez, avança em direção ao mar nas imediações do dique ou do quebramar, chegando a um momento em que o ultrapassa, continuando novamente a passagem de  $q_B$ , até conseguir com o tempo, um equilíbrio “dinâmico” onde  $q_B \sim q_A \sim q_l$ .

Na zona costeira abaixo do quebramar ou porto, ocorre o contrário,  $q_A \sim 0$  e  $q_B \neq 0$ , gerando um processo de erosão, com a complicação que  $q_l \sim 0$  devido à presença do quebramar ou do dique. O problema gerado a sotamar resulta do fato de não ser possível chegar a um equilíbrio “dinâmico” sem restituir  $q_l$ , seja porque o transporte litorâneo supera o quebramar ou o dique do porto, ou de maneira artificial por meio de uma transposição de sedimentos (*bypassing*).

### Forma em planta em desequilíbrio: Erosão líquida

Esta situação ocorre quando a praia, ou um trecho da mesma, não consegue uma situação de equilíbrio “estático” ou “dinâmico”. Este caso ocorre quando a capacidade de transporte é maior que o transporte costeiro existente ( $q_B > q_A$ ), ou porque foi reduzido o transporte costeiro. Um exemplo disso é a redução do aporte dos rios locais ou outras fontes que forneçam sedimentos, ou no caso

de zonas a sotamar de um quebramar ou porto, onde não foi restaurado o transporte costeiro. Nestes casos a praia continuamente vai recuando, uma vez que o sedimento é transportado a sotamar e com a passagem de muitos anos, este processo evolui até o desaparecimento do sedimento existente.

## 1.4. A hidrodinâmica das praias

Esta seção é dedicada a revisar a nomenclatura relativa aos conceitos da hidrodinâmica das praias.

### 1.4.1. Definições

Na Figura 29 são apresentadas as divisões que normalmente são utilizadas para descrever o fluxo de onda sobre as praias. Suas definições são as seguintes:

**Vagalhão ou Onda progressiva (*Bore*):** A origem do termo vagalhão vem da onda de maré que se propaga como um ressalto hidráulico móvel em estuários de pouca profundidade e com grandes variações de maré. Por sua semelhança na forma e na hidrodinâmica, aplica-se também à onda progressiva produzida após a quebra da onda.

**Zona de Arrebentação ou Quebra da Onda (*Breaker Zone*):** É a porção da zona interior onde é produzida a arrebentação ou quebra das ondas. Se a onda fosse regular, se chamaria Linha de Arrebentação e determinaria o limite do lado do mar da zona interior.

**Zona de Surfe (*Surfe Zone*):** Porção da área interior em que são propagados os vagalhões produzidos após a quebra.

**Zona de Espraimento (*Swash Zone*):** Porção da zona interior sobre a qual ocorre a alternância de ascensão e declínio das ondas, ficando o fundo coberto e descoberto alternadamente pelas ondas. Este fluxo de ascensão-declínio somente é notório para as oscilações de onda curta (ondulação) na zona da face praial.

**Praia média ou zona interior (*Nearshore Zone*):** Compreende a zona entre a ascensão máxima das ondas na praia e o limite até o mar da quebra das ondas. Inclui as zonas de espraimento, de arrebentação e de quebra.

Outros termos da hidrodinâmica das ondas que serão empregados são definidos a seguir.

**Ondas de Gravidade (*Gravity Waves*):** São as ondas geradas pelo vento e controladas pela gravidade e pelo atrito. Correspondem à faixa do espectro de energia entre 1 e 25 segundos, aproximadamente.

**Ondas Sub-harmônicas (*Subharmonic Waves*):** Ondas de frequência múltipla da onda principal, produzidas pelo efeito do empinamento não linear de uma onda em profundidades reduzidas. Em geral somente o primeiro sub-harmônico (dupla frequência da onda geradora) é detectável nas praias.

**Ondas de Infragravidade (*Infragravity Waves*):** Ondas de gravidade de período superior aos 30 segundos, geradas pelos grupos de ondas gravitacionais e controladas pela gravidade e o atrito.

**Tensão de Radiação (*Radiation Stress*):** É o fluxo da quantidade de movimento horizontal da onda, em média, referente a um período de ondas e em determinada profundidade.

**Empilhamento (*Setup*):** Ascensão do nível médio que ocorre na zona de arrebentação, com o máximo na intersecção do nível médio em movimento com o perfil de praia.

**Rebaixamento (*Setdown*):** Declínio do nível médio produzido pelos processos de empilhamento simples antes da quebra das ondas, com um mínimo na zona de quebra.

**Corrente Longitudinal (*Longshore Current*):** Corrente produzida principalmente na zona interior, paralela à linha de costa, geralmente produzida pelo processo de quebra da onda.

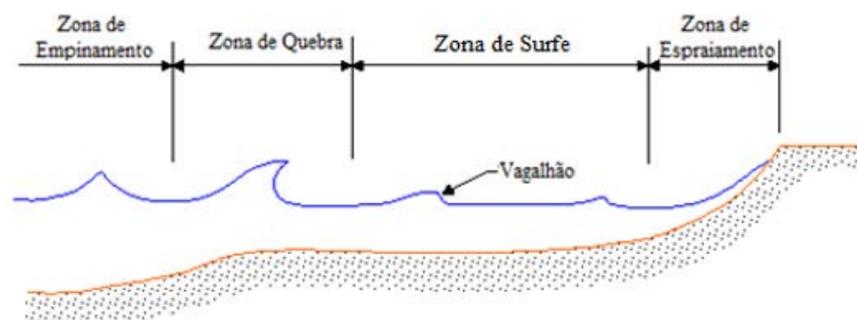


Figura 29: Toponímia do perfil de praia em função da hidrodinâmica.

**Corrente de Retorno (*Rip Current*):** Corrente forte que flui na direção do mar a partir da costa. É mostrada como uma faixa de água agitada, uma vez que, ao fluir sobre um Canal de Corrente de Retorno de maior profundidade que o entorno, a onda incidente rompe com maior dificuldade, porém a corrente provoca o empinhamento da mesma. A corrente de retorno normalmente é dividida em três zonas: 1) **Correntes de Alimentação (*Feeders*)**, que fluem em direção a corrente, paralelamente à costa, 2) **Pescoço da Corrente de Retorno (*Rip Neck*)**, onde as correntes de alimentação convergem em um fluxo estreito e rápido que se move em direção ao mar através da zona de surfe e 3) **Cabeça da Corrente de Retorno (*Rip Head*)**, localizada em direção ao mar (*offshore*) da zona de quebra, onde se expande e dissipa a corrente.

**Surf Beat:** Oscilação de longo período produzida nas praias devido ao empilhamento e amplificação das ondas de infragravidade.

**Corrente de Fundo (*Undertow*):** Corrente em direção ao mar produzida na zona de arrebentação, próximas ao fundo. É uma corrente gravitacional de compensação pelo efeito de bombeamento em direção a terra e empilhamento (*setup*) que provoca a quebra da onda.

## 1.4.2. A quebra das ondas

Quando a onda se propaga em profundidades decrescentes, seu comprimento  $L$  diminui, aumentando a altura  $H$ . Quando atinge uma determinada relação entre a esbeltez ( $H/L$ ), profundidade  $h$  e declividade do fundo, definida por um **Critério de Quebra**, a onda se torna instável e colapsa. Um critério de quebra simples, válido para praias de declividade suave,  $\tan\beta(L/h) \ll 1$  é  $H_b = \gamma h$ , onde  $\gamma$  é chamado de **Índice de Quebra**, e seu valor é aproximadamente 0,8.

O tipo da quebra de onda depende da esbeltez e da declividade do fundo. O Número de Iribarren  $I_r$  (ou *Surf Similarity Parameter*) é um parâmetro amplamente aceito como controlador do tipo de quebra. Se  $\beta$  é a declividade do fundo, o nº de Iribarren é obtido por:

$$I_r = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad (15)$$

Uma vez que em praias, se utiliza com frequência a altura da quebra de onda,  $H_b$ , para a definição da dinâmica, pode-se utilizar o número de Iribarren em quebra,  $I_{rb}$ , definido por:

$$I_{rb} = \frac{\tan \beta}{\sqrt{\frac{H_b}{L_0}}} \quad (16)$$

Será utilizado mais adiante também o parâmetro de escala de arrebentação,  $\varepsilon$ , definido por:

$$\varepsilon = \frac{a_b \omega^2}{g \tan^2 \beta} = \frac{\pi}{I_{rb}^2} \quad (17)$$

Onde  $a_b$  e  $\omega$  são a amplitude e frequência angular da ondulação incidente,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\tan\beta$  a declividade do fundo e  $I_{rb}$  o número de Iribarren.

A Figura 30 mostra várias seções transversais da zona de arrebentação com os distintos tipos de quebra, juntamente com vários valores de  $I_r$ ,  $I_{rb}$  e  $\varepsilon$ , que as delimitam. Estes tipos de quebra estão descritos a seguir:

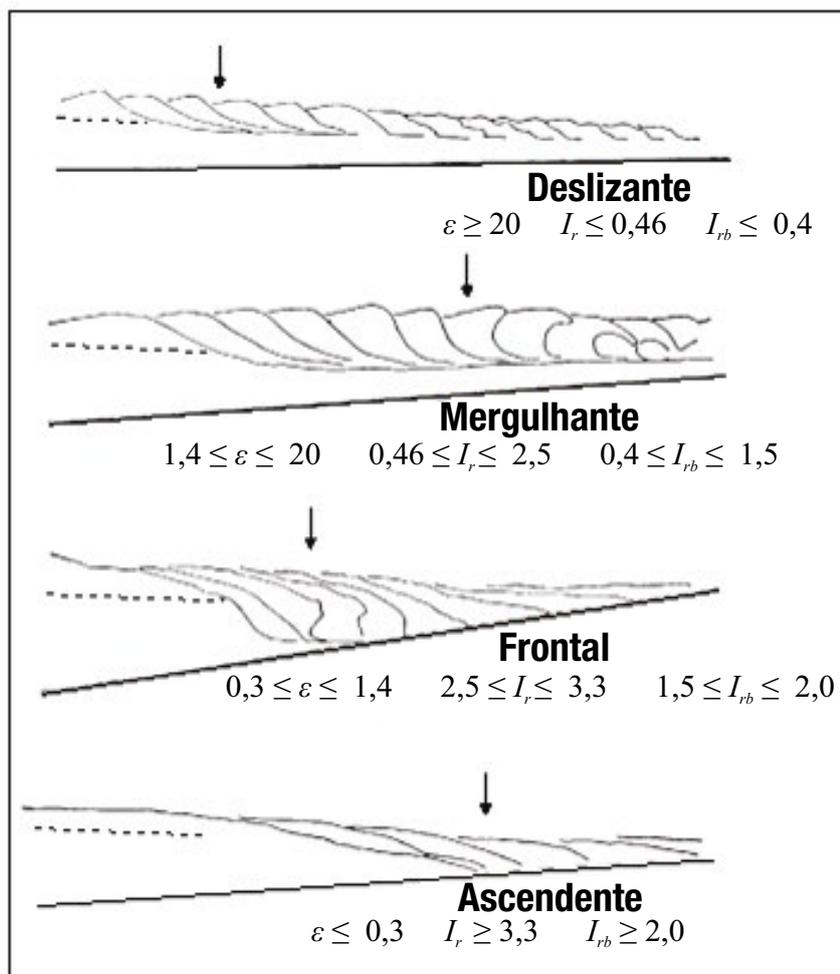


Figura 30: Definição dos tipos de quebra de onda.

**Ascendente (*Surging*):** Quando as ondas sobem e descem pela praia, com um mínimo de ar aprisionado. O período de ascensão – declínio é menor que o período da ondulação e a reflexão é muito elevada. Este tipo de quebra é produzido quando  $I_r \geq 3,3$  ou  $I_{rb} \geq 2$ . Típica de praia refletiva.

**Frontal (*Colapsing*):** À medida que o  $n^\circ$  de Iribarren diminui, a frente da onda se aproxima à vertical. Quando  $I_r$  se aproxima de  $2,5 \leq I_r \leq 3,3$  ou  $1,5 \leq I_{rb} \leq 2$ , a onda começa a desmoronar por sua base e colapsa (Figura 31). O ar fica parcialmente preso, formando espuma. O período de espraiamento coincide com o período de onda e o fluxo sobre a face da praia atinge valores máximos. A reflexão começa a diminuir devido à perda de energia por turbulência. Típica de praia refletiva.



Figura 31: Quebra de onda do tipo frontal.

**Mergulhante (Plunging):** Este tipo de quebra, muito frequente em praias, é produzido em uma faixa de números de Iribarren compreendido entre  $0,46 \leq I_r \leq 2,5$ , ou  $0,40 \leq I_{rb} \leq 1,5$ . A onda que quebra, lança sua crista para frente, quebrando claramente na base da onda, prendendo uma quantidade considerável de ar (Figura 32). O jato que atinge a água penetra violentamente a superfície, levantando outra onda à frente da original e injetando turbulência até o fundo. O 'roller' gerado pela turbulência introduz uma forte rotação no fluxo e o ar preso escapa para a superfície de forma explosiva. O conjunto destes fenômenos dissipa uma quantidade considerável de energia nos primeiros momentos da quebra. Posteriormente, a onda continua quebrando formando um vagalhão ou onda progressiva, até chegar à zona de espraiamento pela face da praia, que é muito menor que nos casos de quebra frontal ou ascendente. O número de ondas na zona de arrebentação oscila desde 1, nas proximidades da quebra, até 3 nas proximidades da dissipação da crista. O coeficiente de reflexão é menor que no caso da frontal. Típica de praia intermediária e refletiva.



Figura 32: Quebra de onda do tipo mergulhante.

**Deslizante (Spilling):** Se o  $I_r$  continua diminuindo abaixo de 0,46 (0,4 para  $I_{rb}$ ), o jato da espiral torna-se progressivamente mais fraco, começando a afetar não somente a parte superior da

onda, permanecendo o resto praticamente inalterado (Figura 33). A dissipação de energia é gradual, mas dada a grande extensão da área de arrebentação (mais de 3 ondas simultaneamente na zona de arrebentação), este tipo de quebra transforma eficientemente a energia do movimento oscilatório. A zona de espraiamento da praia é mínima, mas as variações transversais de nível médio (empilhamento - *setup*) são máximas, pois uma boa parte da quantidade de movimento associado ao movimento oscilatório é empregada na modificação do nível médio (e no caso de incidência oblíqua, para criar correntes longitudinais) e o coeficiente de reflexão é mínimo. Típica de praia dissipativa.



Figura 33: Quebra de onda do tipo deslizante.

Anexo 2  
FORMULAÇÕES

## 2. Formulações

### 2.1. Introdução

No presente anexo são apresentadas, de modo resumido, as formulações propostas no Capítulo 3 deste documento para a análise do cálculo de estabilidade e análise da evolução de uma praia em médio e longo prazo. O objetivo do anexo é que o leitor possa encontrar de uma maneira rápida, as fórmulas e parâmetros necessários para utilizar as formulações. Não é objetivo do anexo, no entanto, a justificativa das mesmas ou a comparação com outras formulações que resolvam o mesmo fenômeno. No que se refere às formulações utilizadas para o cálculo de estabilidade e análise da evolução de uma praia em curto prazo, e uma vez que estas devem ser utilizadas com a ajuda de modelos de computador, este remete o leitor aos manuais de referência dos programas desenvolvidos dentro do Sistema de Modelagem Costeira, SMC.

- Ondas (Oluca)
- Correntes (Copla)
- Erosão-sedimentação da planta da praia (Eros)
- Transporte e evolução do perfil de praia (Petra)

### 2.2. Perfil de equilíbrio (Pré-projeto)

A resposta de um perfil de praia à ação das dinâmicas atuantes é produzida em escalas de tempo de curta duração (horas no caso de uma erosão por uma tempestade, semanas-meses no caso de acúmulo), que podem ser consideradas como instantâneas dentro de um estudo em longo prazo (e quase instantâneas em uma análise em médio prazo).

Consequentemente, dentro de um estudo em longo prazo o aspecto mais relevante de um perfil praial, é seu perfil de equilíbrio, que pode ser definido como o resultado produzido em uma praia com um mesmo tamanho de grão exposto a condições de ondas constantes. É importante destacar que o perfil de equilíbrio não pretende explicar os mecanismos ou processos de transporte em um perfil de praia, e sim, sua forma final.

Note-se que um “perfil de equilíbrio” tal como descrito no parágrafo anterior somente pode ser obtido em laboratório, onde se possa fixar a ondulação incidente. Na natureza, a variação do nível do mar e da ondulação resulta que o perfil de equilíbrio, nunca exista. No entanto, uma vez que as variações dos diferentes agentes (ondulação, nível, etc.) estão delimitadas, também será admitida a variabilidade do perfil, sendo possível entender que a natureza e a existência de uma situação modal ou perfil de equilíbrio médio sofre variações em função da dinâmica atuante.

A definição do perfil de equilíbrio para uma praia envolve a determinação da (Quadro 15):

- Forma do perfil de equilíbrio;
- Profundidade de fechamento do perfil.

## Forma do perfil de equilíbrio

Diversos autores propuseram formulações empíricas para representar o perfil de equilíbrio para uma praia, e de todas elas, a mais comumente utilizada é a proposta inicialmente por Bruun (1954) e posteriormente por Dean (1977). Esta forma de perfil, conhecido como perfil parabólico, adota a expressão:

$$A = kw^{0,44} \quad (18)$$

onde:

$h$  = profundidade da água;

$x$  = distância a partir da costa;

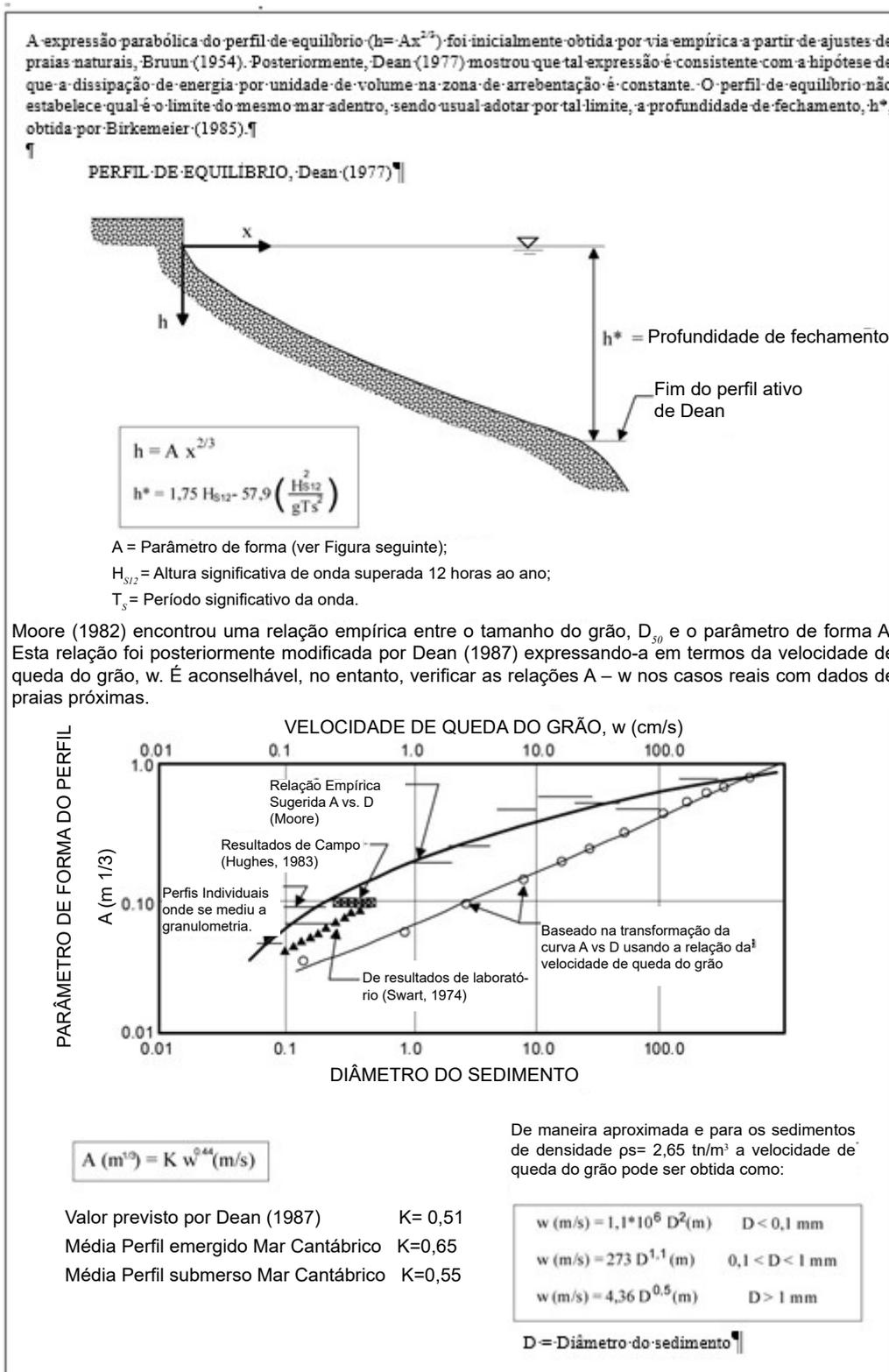
$A$  = parâmetro de forma.

O parâmetro de forma,  $A$ , foi ajustado por Dean (1987) em função da velocidade de queda do grão,  $w$  (m/s).

$$A = kw^{0,44} \quad (19)$$

com  $k = 0,51$  (Quadro 15).

### Quadro 15: Perfil de equilíbrio.



Dean mostrou que os valores de  $A$  variam suavemente ao longo de grandes distâncias em uma mesma costa e que são razoavelmente constantes no tempo. No entanto, o valor de  $A$  (ou de  $k$ ) deve ser, se possível, ajustado em cada projeto de recuperação com dados de praia e/ou praias adjacentes à área a ser recuperada.

## Profundidade de fechamento

De acordo com o modelo teórico do perfil de equilíbrio proposto por Dean, o perfil de equilíbrio somente é válido dentro da zona de quebra de ondas. Isto quer dizer que a extensão do referido perfil, varia ao longo do tempo em função da ondulação existente.

Dentro dos estudos em longo prazo de estabilidade de praias, é comum utilizar a denominação “profundidade de fechamento” como um limite de aplicação do perfil de equilíbrio. Esta profundidade está relacionada ao transporte de sedimentos e se aplica no sentido ao mar adentro, na qual as variações verticais do perfil ao longo do tempo são tão reduzidas que não se distinguem dos erros de medição.

É admissível que possa existir movimento de sedimento em profundidades maiores que a profundidade de fechamento, porém em magnitudes desprezíveis.

Birkemeier (1985) utilizando dados de perfis de praia obteve uma expressão para a profundidade de fechamento,  $h_*$

$$h_* = 1,75 H_{S12} - 57,9 \left( \frac{H_{S12}^2}{g T_S^2} \right) \quad (20)$$

onde:

$H_{S12}$  = altura significativa de onda que é excedida doze horas ao ano, medida na praia a uma profundidade  $h$ , tal que  $h_* < h < 2h_*$ ;

$T_S$  = período de pico.

A expressão anterior foi verificada nas costas espanholas com resultados satisfatórios. Por outro lado, ao adotar um valor médio de  $T_S = 5,7 \sqrt{H_S}$  (ROM 0.0) o valor da profundidade de fechamento pode ser expresso como:

$$h_* \cong 1,57 H_{S12} \quad (21)$$

Um aspecto importante a destacar é que o conceito de profundidade de fechamento é estatístico e define uma condição média anual. Nos períodos de tempo mais curtos, (por exemplo um verão) a profundidade de fechamento pode ser muito menor. Ao contrário, se examinado qual é o valor da profundidade de fechamento com dados de um número elevado de anos, é observado que tal valor aumenta com o número de anos, sendo maior a probabilidade de ocorrência de eventos de temporais/ressacas mais importantes. No entanto, este aumento é lento e assintótico, uma vez que a duração das grandes tempestades chega a ser menor que o tempo de resposta do perfil, não sendo possível estabelecer um perfil de equilíbrio totalmente desenvolvido.

O valor de profundidade de fechamento dado na expressão de Birkemeier (1985) deve ser entendido como valor para o ano e não deve ser utilizado como valor extremo em um cálculo de erosão máxima.

## 2.2.1. Aplicações do perfil de equilíbrio

O conceito de perfil de equilíbrio pode ser utilizado para obter uma resposta rápida e aproximada das modificações às quais será submetido o perfil de praia por efeito de:

- Variação do nível do mar (Quadro 16);
- Adição de areia (Quadro 17).

### **Variação do nível do mar**

Nos casos desenvolvidos a seguir assume-se que a variação do nível do mar permanece constante no tempo, sendo possível aceitar uma nova posição de equilíbrio. Na seção 2.4, é analisado o caso de durações curtas.

#### *a) Maré meteorológica*

Um aumento do nível do mar,  $S$ , por efeito da maré meteorológica provocará um aumento da profundidade de água em qualquer ponto do perfil de praia. Nestas condições o perfil de equilíbrio não estará em “equilíbrio” e sofrerá uma ascensão,  $S$ , para acomodar-se ao novo nível do mar. Como esta ascensão deve ocorrer à custa do sedimento existente no perfil (hipótese de praia bidimensional) será produzido uma retração,  $R$ , geral do perfil.

Impondo como hipótese que:

- No novo nível do mar será estabelecido um perfil de equilíbrio com forma idêntica ao existente antes da ascensão do nível do mar;
- O volume de areia deve ser conservado.

Obtém-se como valor de retração:

$$R = \frac{S \cdot W_*}{h_* + B} \quad (22)$$

onde:

$W_*$  = extensão do perfil;

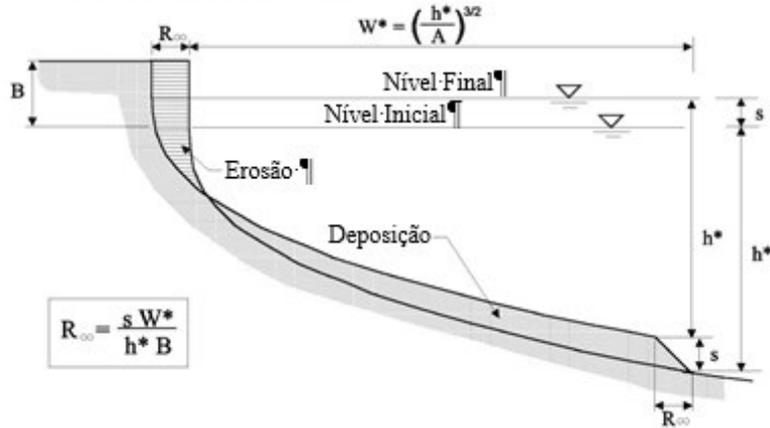
$h_*$  = profundidade de fechamento;

$B$  = altura da berma.

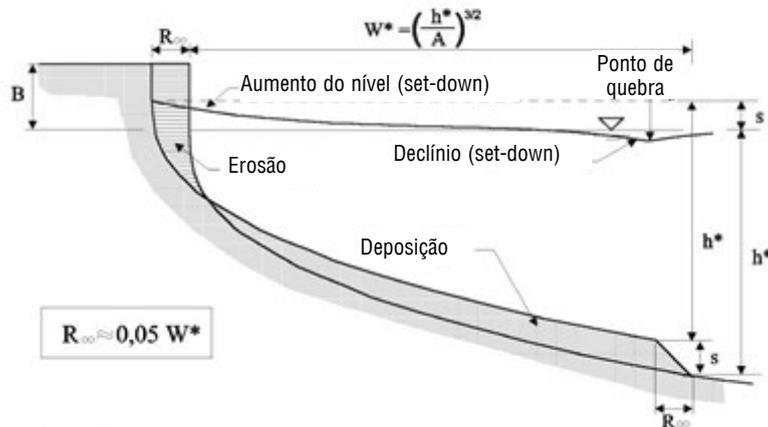
**Quadro 16:** Aplicações do perfil de equilíbrio: Variação do Nível do Mar.

Um aumento do nível do mar gera um déficit de areia no perfil submerso, que deve ser compensado com uma retração do perfil. Se a duração do aumento do nível é suficiente, o perfil adotará uma nova posição de equilíbrio compensando os volumes de areia em erosão e acumulados. Nas figuras abaixo é mostrado a retração de equilíbrio,  $R_{\infty}$ , no caso de aumento por maré meteorológica e aumento por quebra de onda (empilhamento - *setup*). Se a duração do aumento não for suficiente, a retração será menor que  $R_{\infty}$  (ver Quadro 6).

**1. MARÉ METEOROLÓGICA**



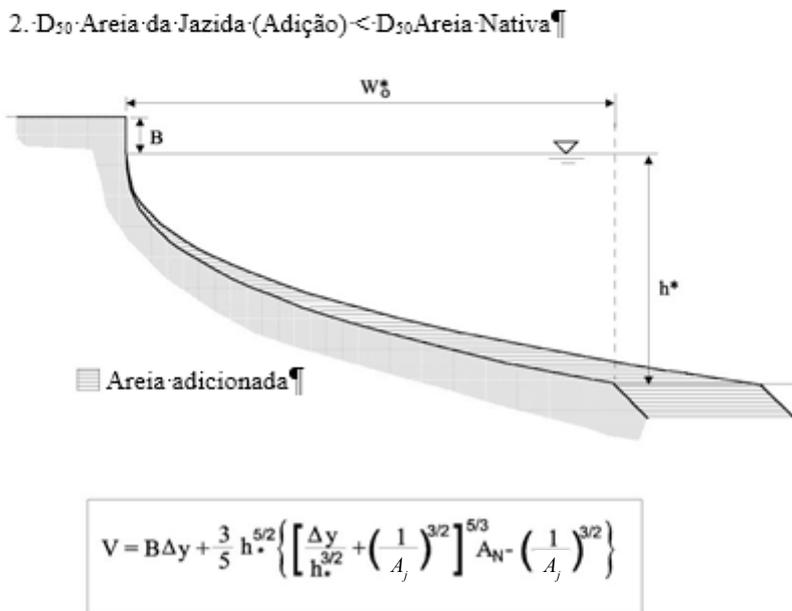
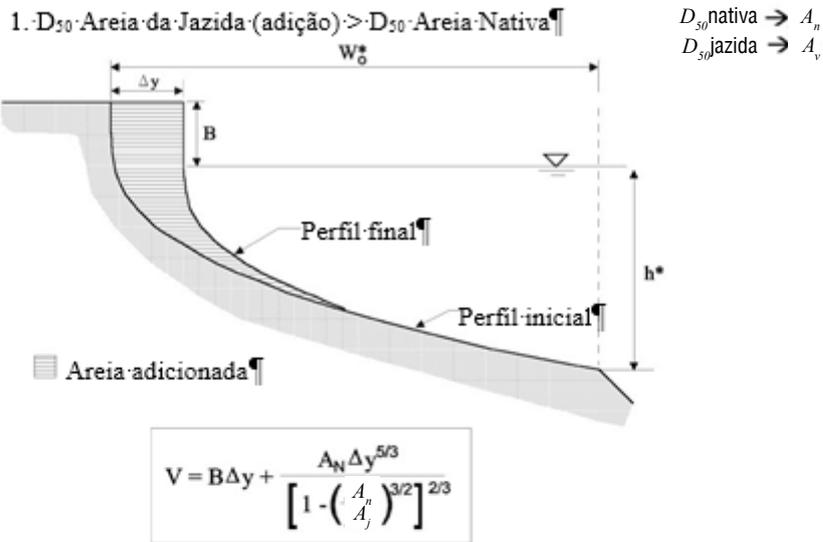
**2. SOBRE ELEVAÇÃO POR ONDAS**



- $R_{\infty}$  = Recuo de equilíbrio;
- $S$  = empilhamento;
- $B$  = Altura berma;
- $h^*$  = Profundidade de fechamento (Quadro 15);
- $W^*$  = Distância horizontal da linha de costa a  $h^*$ ;
- $A$  = Parâmetro de forma do perfil (Quadro 15).

### Quadro 17: Aplicações do perfil de equilíbrio: Adição de Areia.

O conceito de perfil de equilíbrio pode ser utilizado para determinar o avanço da praia,  $\Delta y$ , obtido ao realizar uma adição de areia de  $V$  ( $m^3/m$ ). Dois são os casos possíveis: ¶



**Nota:** No Programa de Computador de Engenharia Costeira (TIC-SMC) é oferecido um programa para a resolução do avanço obtido com uma dada adição e o volume necessário para um dado avanço. ¶

### b) Empilhamento da ondulação

A quebra de ondas gera uma modificação do nível médio do mar (*setup*) que, ao contrário do caso anterior, não é constante ao longo do perfil. Se tal variação de nível médio do mar é incluída na determinação do perfil de equilíbrio, a expressão do novo perfil de equilíbrio:

$$h = \frac{A x^{2/3} - \eta_b - K h_b}{1 - K} \quad (23)$$

onde:

$K$  = constante que depende do índice de quebra ( $K \cong 0,18$ );

$\eta_b$  = descida do nível do mar na zona de quebra.

Observe que a distância  $x$ , que é atingida em  $h = 0$ , isto é, a retração do perfil devido ao empilhamento por quebra é:

$$x = \left( \frac{\eta_b + K h_b}{A} \right)^{3/2} \quad (24)$$

que aproximadamente é:

$$R = x \cong 0,05 W_* \quad (25)$$

### Adição de areia

Quando se adiciona um volume de areia,  $V$ , a um perfil de praia, o engordamento/aterro irá mover-se até conseguir uma posição de equilíbrio. Dependendo dos parâmetros  $A$  do material nativo e de engordamento, que é denominado  $A_N$  e  $A_J$  respectivamente, pode ocorrer a intercepção do engordamento ou a não intercepção do perfil submerso, tal como mostrado no Quadro 17.

Se o material do engordamento/aterro é mais grosso que o nativo, o perfil interceptará o nativo. Caso o material de adição seja igual ou mais fino, não haverá interseção do perfil submerso com o nativo. É importante destacar que mesmo no caso da adição de material mais fino, pode ser obtido um avanço da linha de costa se o volume adicionado for suficiente para tal.

A formulação de perfil de equilíbrio pode ser utilizada para obter uma estimativa do volume de sedimento de entrada necessário para conseguir um aumento da extensão do pós-praia. No Quadro 17 são apresentados vários casos possíveis encontrados em um programa de computador para sua resolução.

É interessante ressaltar que, para um determinado aumento da praia, o fator inicialmente mais influente sobre o volume de entrada necessário, é a relação entre o parâmetro  $A$  do sedimento nativo e do sedimento de adição/jazida  $\left(\frac{A_J}{A_N}\right)$ . No entanto, para valores de  $\left(\frac{A_J}{A_N}\right) > 1,2$  esta dependência diminui. Isto quer dizer que o aumento do pós-praia obtido com um determinado volume de areia é praticamente o mesmo se dispõe-se do sedimento de adição/jazida  $A_J = 2 A_N$  ou areia de adição/jazida  $A_J = 3 A_N$ .

### 2.3. Perfil de equilíbrio modificado (Projeto)

A expressão do perfil de equilíbrio, proposta na seção anterior, leva implicitamente uma série de hipóteses que, embora possam ser aceitáveis no nível de pré-projeto, não são adequadas em níveis superiores de projeto. Entre estas hipóteses tem-se:

- Um perfil completo de areia vai desde a origem até a profundidade de fechamento;

- Todo fluxo de energia de onda que incide sobre o perfil é dissipado por quebra, não existindo nenhuma outra condição externa (reflexão, refração, etc.);
- O nível do mar é constante, isto é, não há maré.

Nos últimos anos foi proposta uma série de modificações no perfil de equilíbrio, a fim de incluir estes efeitos quando fossem relevantes. As expressões obtidas são, em alguns casos, de certa complexidade que reduzem sua utilização a efeitos de pré-projeto, outras, no entanto, não apresentam dificuldade adicional, para que possam continuar sendo utilizadas inclusive em estudos no nível de pré-projeto.

Entre estas formulações de perfil de equilíbrio modificadas encontram-se (Quadro 18 a 25):

- *Perfil com barreira*. Quadro 18;
- *Perfil com laje*. Quadro 19;
- *Perfil com refração-difração*. Quadro 20;
- *Perfil com reflexão*. Quadro 21;
- *Perfil com faixa litorânea linear*. Quadro 22;
- *Perfil composto ou bi-parabólico*. Quadro 23 e 24;
- *Perfil de cascalhos*. Quadro 25.

### **Perfil com barreira**

Inúmeras praias estão limitadas em seu lado de terra por barreiras rígidas verticais, tais como falésias, espigões, calçadões ou muros de defesa. Estes tipos de praias foram objeto de um grande número de estudos, cujo objetivo era determinar se a barreira afetava a erosão que tal perfil apresentava frente a um temporal/ressaca. Os resultados que tais estudos mostram, são as diferenças fundamentais destas praias com relação à ausência da barreira. Quando ocorre temporal, o perfil não pode recuar por trás do obstáculo, então os equilíbrios volumétricos de material devem ser realizados com o sedimento existente na frente desse bloqueio.

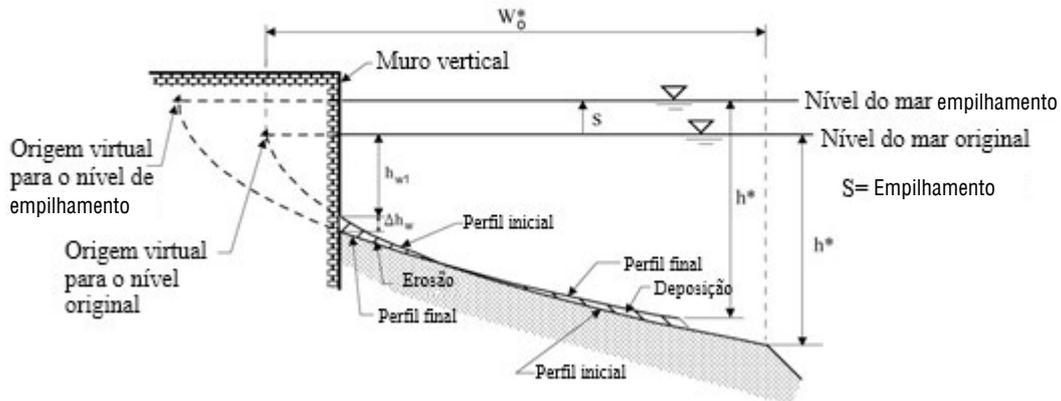
No entanto, muitas vezes se observa neste tipo de praias uma erosão ou perda de material na zona adjacente a barreira. Esta erosão se deve basicamente a dois efeitos: 1) o efeito do transporte de sedimento até o mar para formar o novo perfil de equilíbrio correspondente ao nível do mar empilhado e (2) um fenômeno local da interação entre a barreira e a ondulação (ver Kraus (1987) para uma descrição detalhada do fenômeno).

Para qualquer caso em termos macroscópicos, ou seja, ignorando o efeito local descrito em (2), o perfil de equilíbrio de uma praia localizada em frente a uma barreira pode ser representado por um perfil parabólico, cuja origem (virtual) está localizada na zona de terra como se não houvesse a barreira.

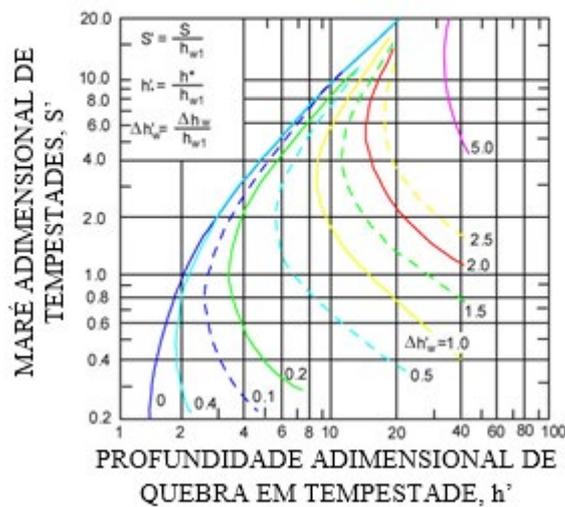
**Quadro 18: Aplicações do Perfil de equilíbrio: Perfil com Barreira.**

O perfil de uma praia situada em frente a uma barreira pode ser representado por um perfil de equilíbrio (ver Quadro 15) que tem origem em um ponto localizado atrás do muro (origem virtual).

Este tipo de perfil responde a um aumento do nível do mar de maneira análoga a um perfil completo (ver Quadro 16) apesar do equilíbrio volumétrico de sedimento, dever ser realizado com o sedimento existente em frente ao muro.



O aumento de profundidade,  $\Delta h$  no sopé da barreira, supondo que o aumento tem uma duração suficiente, pode ser estimado usando a Figura seguinte:



**Perfil com laje**

Com certa frequência as praias não apresentam um perfil completo de areia, estando sua parte submersa apoiada em uma laje rochosa. Se a laje tem dimensão suficiente, as ondas quebrarão sobre ela e a quantidade de energia que a praia receberá, será controlada pela geometria da laje, isto é, por sua profundidade e sua largura.

Uma vez que a dissipação por quebra sobre um fundo rígido horizontal é superior a ocorrida sobre uma praia natural, o resultado final é que a energia atingida na praia após passar pela laje, é menor que a ocorrida em uma praia natural com a mesma profundidade. Uma vez que a energia total a ser dissipada pela praia após a laje é menor que a de uma praia completa, a praia com laje necessitará de um comprimento menor para dissipar a energia, o que se traduz em uma maior declividade. Esta

declividade maior pode modificar o valor do parâmetro de forma,  $A$ , que neste caso, não será função exclusiva do tamanho do sedimento, mas sim das características da laje (Quadro 19).

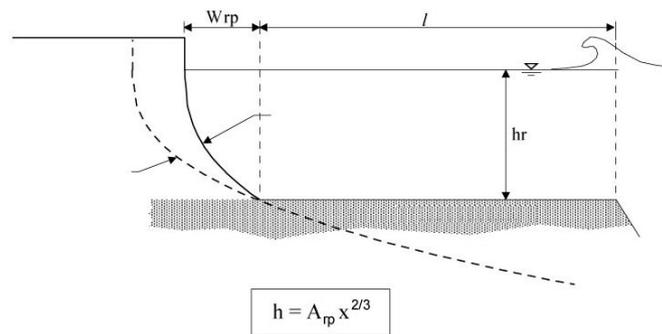
### Perfil com refração-difração

A formulação de perfil de equilíbrio assume que todo o fluxo de energia que atinge a praia é dissipado pela quebra. Na hipótese de praia reta e paralela, todas as seções da praia recebem o mesmo fluxo de energia e o problema pode ser colocado de modo bidimensional, ou seja, por unidade de largura.

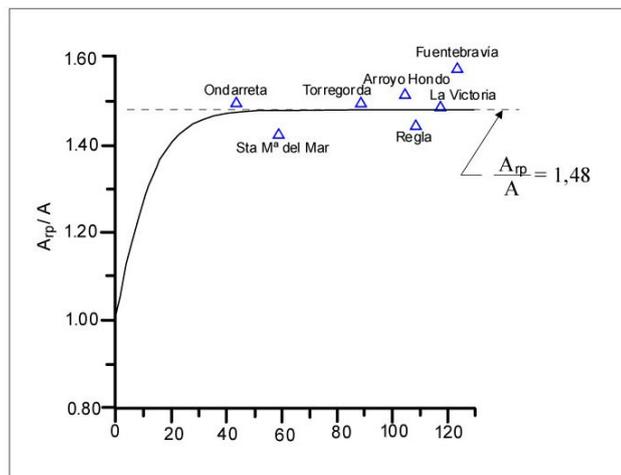
Nas praias onde os efeitos de propagação (refração-difração) são importantes, a hipótese da bidimensionalidade não é aplicável e deve ser considerada a convergência/divergência dos raios dentro da zona de quebra.

Deste modo, se estiver em uma zona de divergência de raios (por exemplo, zonas protegidas), os perfis de praia são mais estáveis que em praias expostas para o mesmo tipo de sedimento, e vice-versa no caso de perfis em zona de convergência de raios (Quadro 20).

Quadro 19: Aplicações do Perfil de Equilíbrio: Perfil apoiado na Laje Rochosa.



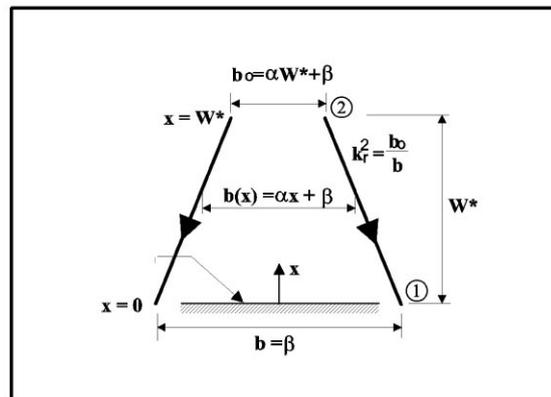
O perfil apoiado em uma laje pode ser representado por um perfil parabólico (ver Quadro 15) com um fator de forma,  $A_{rp}$  maior que o associado ao tamanho do grão,  $A$ . A relação entre  $A_{rp}$  e  $A$  fica refletida na seguinte Figura:



**Nota:** Para que o perfil com a laje possa ser aplicado, deve-se verificar que a largura dessa seja superior à 20-30 m  $h^*$  (profundidade de fechamento).

## Quadro 20: Aplicações do Perfil de Equilíbrio: Perfil com Refração-Difração.

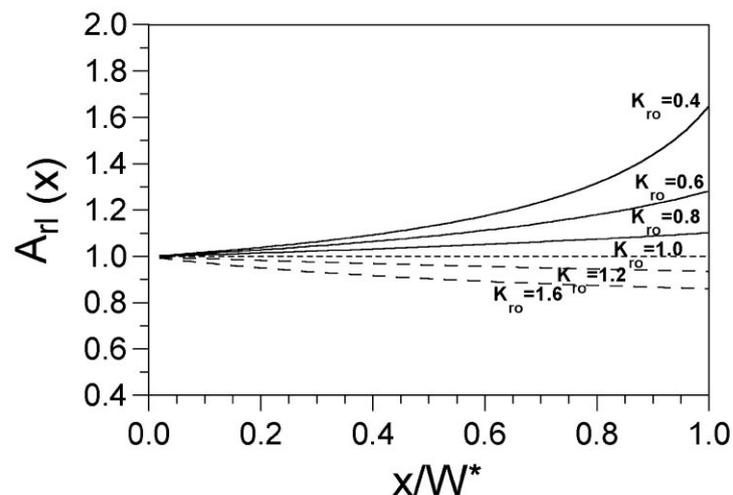
Fazendo uso da hipótese proposta por Dean (1987) segundo a qual a dissipação por unidade de volume é constante na zona de quebra, González *et al.* (1997) obtiveram expressões do perfil de equilíbrio para as praias em que existam zonas de concentração ou expansão de raios. Na Figura abaixo é apresentado o caso de expansão linear dos raios:



Neste tipo de praias, o perfil pode ser representado pela expressão:

$$h = A_r A x^{2/3}$$

onde,  $A$ , é o fator de forma associado ao tamanho do grão (ver Quadro 15) e  $A_r$ , é um parâmetro que depende do coeficiente de refração na zona de quebra,  $K_r$ , (onde  $K_r = (\alpha)$ ). Na Figura seguinte é apresentado o caso de expansão linear,  $A_r$ .



A variação da declividade do perfil pode ser levada em conta, modificando o fator de forma,  $A$ , por meio de um coeficiente  $A_r$  (que é função do coeficiente de refração médio no perfil e da forma que os raios convergem/divergem na zona de quebra). No Quadro 20 são apresentados os valores de  $A_r$  para diferentes formas de convergência/divergência de raios.

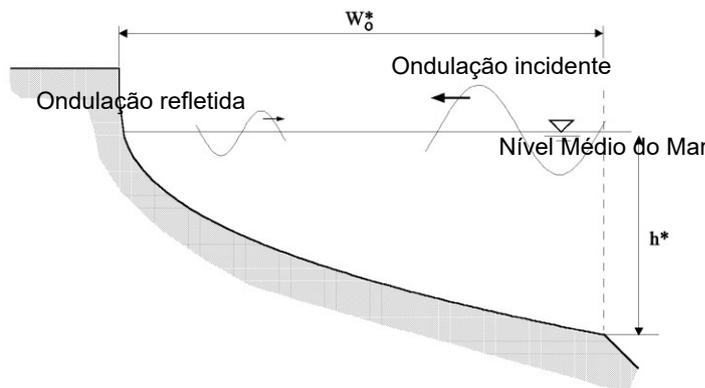
### Perfil com reflexão

Uma das hipóteses básicas da formulação de perfil de equilíbrio é que toda a energia da onda é dissipada por quebra. Esta hipótese é válida para praias dissipativas, mas não é adequada para praias refletivas, onde parte da energia da onda é devolvida ao mar por reflexão da mesma, contra o perfil.

Este último aspecto pode ser contemplado na formulação do perfil de equilíbrio obtendo-se uma expressão para a forma do perfil que inclui a parte da dissipação através do parâmetro de uma forma,  $A$ , e a parte da reflexão, por meio de um novo parâmetro de forma,  $B$ , que depende do nível de reflexão da praia. É importante salientar que os valores do parâmetro  $A$  na formulação do perfil com reflexão diferem dos encontrados por Dean na formulação de perfil parabólico sem reflexão, apresentados no Quadro 15. Isto ocorre porque esses valores referem-se a valores de melhor ajuste, conseqüentemente, ao variar a formulação variam os parâmetros de ajuste. Os valores de  $A$  e  $B$  que foram utilizados na formulação de perfil com reflexão, encontram-se no Quadro 21.

**Quadro 21:** Aplicações do Perfil de Equilíbrio: Perfil com Reflexão.

Em algumas praias, a hipótese de que toda a energia incidente é dissipada por quebra não é adequada, sendo necessário incluir o efeito da reflexão.



González (1995) encontrou que este tipo de perfil de praia pode ser representado pela expressão:

$$x = \left(\frac{h}{A}\right)^{3/2} + \frac{9}{2} B \left(\frac{h}{A}\right)^3$$

onde  $B$  é um parâmetro que mede o nível de reflexão e  $A$  o nível de dissipação. Os ajustes propostos por Bernabeu *et al.* (2003), para tais parâmetros são:

$$B = 32 * 10^{-4} \exp\left[-0,44 * \left(\frac{H}{wT}\right)\right]$$

$$A = k w^{0,44}$$

$$k = 0,47 + 0,68 \exp\left[-0,44 * \left(\frac{H}{wT}\right)\right]$$

Onde  $H$  é a altura de onda,  $w$  é a velocidade de queda do grão e  $T$  é o período da onda

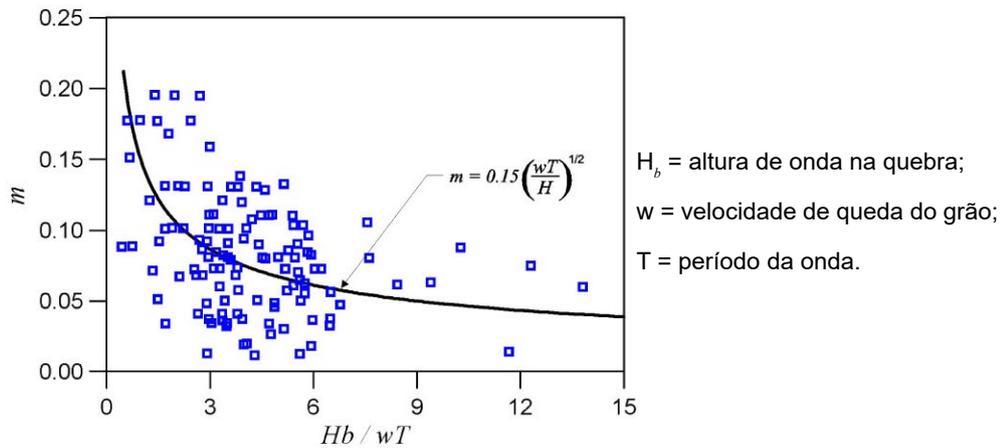
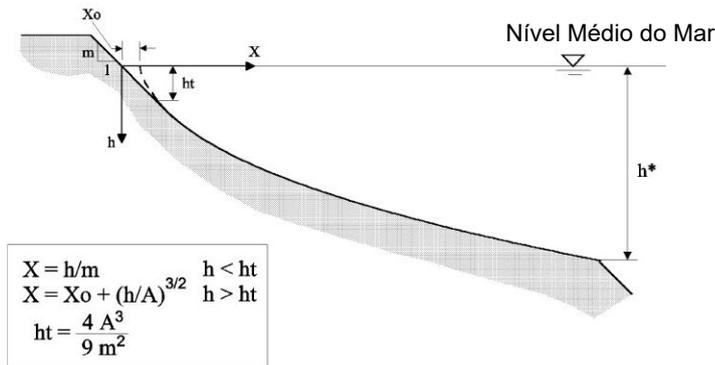
**Perfis com faixa litorânea linear**

A formulação do perfil de equilíbrio parabólico apresentada na seção anterior prevê uma declividade infinita do perfil, isto é, vertical na linha de costa, o que não representa a realidade. A explicação desta discrepância deve ser encontrada, de acordo com Dean (1991), no fato de que a formulação de perfil de equilíbrio assume que o único processo relevante na formulação do perfil é a dissipação por quebra de ondas. Entretanto, na zona próxima a costa, e dado que a altura de onda possui pequena magnitude, outros processos tais como a ação da infragravidade ou do espraiamento da onda na face da praia, devem ser considerados.

A inclusão destes processos resulta em uma forma linear de perfil na zona adjacente da costa tal e como mostrado no Quadro 22. É importante salientar que esta modificação do perfil não é relevante no momento do cálculo do volume de sedimento de adição em uma recuperação, mas sim pode chegar a ser em relação à largura da praia ou retração frente a um temporal/ressaca, uma vez que leva em conta a influência da declividade da face da praia devido às ondas.

**Quadro 22:** Aplicações do Perfil de Equilíbrio: Perfil com Face da Praia Linear.

Como o valor do parâmetro de forma, A, pode ser adotado associado ao tamanho do grão (ver Quadro 15), o valor da declividade da face da praia pode ser obtido de dois trabalhos de campo de Sunamura (1984), mostrados na Figura a seguir:



**Perfil composto ou bi-parabólico**

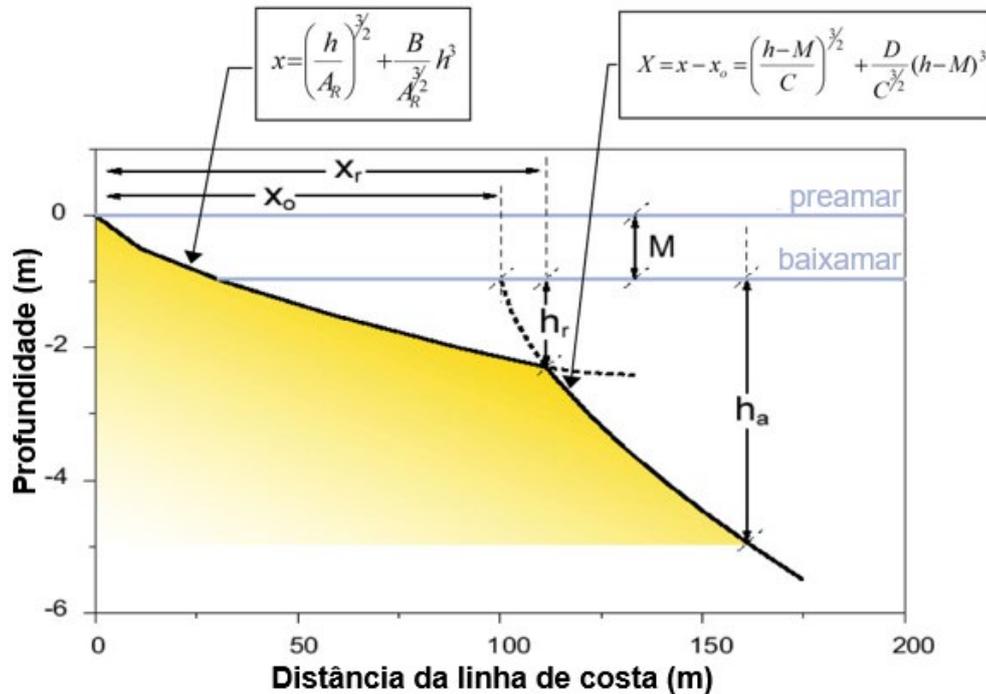
Recentemente diversos autores expressaram que os perfis de praia ficam melhor representados se sua descrição é realizada por meio de dois perfis diferenciados (INMAN *et al.*, 1993; GONZÁLEZ, 1995; BERNABEU, 1999; MEDINA *et al.*, 2000; GÓMEZ-PINA, 1995). O primeiro iria cobrir desde a linha de costa de maré alta até a profundidade de quebra de ondas na maré baixa, denominado perfil de quebra, enquanto que o segundo se estenderia a partir de tal profundidade de quebra até a profundidade de fechamento, denominado perfil de empinamento.

Este tipo de representação de perfil permite a caracterização “mais adequada” dos diferentes processos que compõem os perfis de praia (quebra-empinamento) e, portanto, espera-se deles uma

melhoria substancial nos ajustes de perfis reais. Além disso, a caracterização dos processos na definição do perfil permite a incorporação das modificações descritas nas seções anteriores (reflexão, refração, etc.) e até mesmo a existência de maré, de um modo mais coerente. Por outro lado, se desejar utilizar este tipo de formulações para prever *a priori* a forma de um perfil, é necessário dar valores a um número de parâmetros muito superior ao do caso mono-parabólico. Dado que os valores que hoje existem na literatura para a determinação destes parâmetros estão baseados em um número limitado de ajustes para praias reais, sua utilização deve ser realizada com cautela. As formulações a serem utilizadas para ambos os perfis, bem como os valores dos parâmetros de ajustes estão detalhados no Quadro 23.

Quadro 23: Aplicações do perfil de equilíbrio: Perfil Bi-parabólico.

O perfil de equilíbrio composto pode ser representado por meio de dois perfis parabólicos, um com origem na cota de maré alta, denominado perfil de quebra, e outro, chamado de perfil de empinamento, com origem na cota de maré baixa e deslocado na vertical, de tal forma, que sua intersecção com o perfil de quebra coincide com a profundidade onde a onda quebra/arrebenta (BERNABEU, 1999).



Onde:

$X$  = distância da linha de costa (a linha de costa coincide com a origem do perfil de quebra);

$X_o$  = distância da origem do perfil de quebra à origem do perfil de empinamento.

$$x_o = \left( \frac{h_r + M}{A_R} \right)^{3/2} - \left( \frac{h_r}{C} \right)^{3/2} + \frac{B}{A_R^{3/2}} (h_r + M)^2 - \frac{D}{C^{3/2}} h_r^2$$

$X_r$  = distância da linha de costa ao ponto de quebra da onda;

$h$  = profundidade;

$h_r$  = profundidade de quebra (em relação à maré baixa);

$h_a$  = profundidade final do perfil de empinamento (em relação à maré baixa);

$A_R$  = parâmetro de forma do perfil de quebra (associado à dissipação por quebra);

$B$  = parâmetro de forma do perfil de quebra (associado à reflexão);

$C$  = parâmetro de forma do perfil de empinamento (associado à dissipação por fricção);

$D$  = parâmetro de forma do perfil de empinamento (associado à reflexão);

$M$  = amplitude de maré modal;

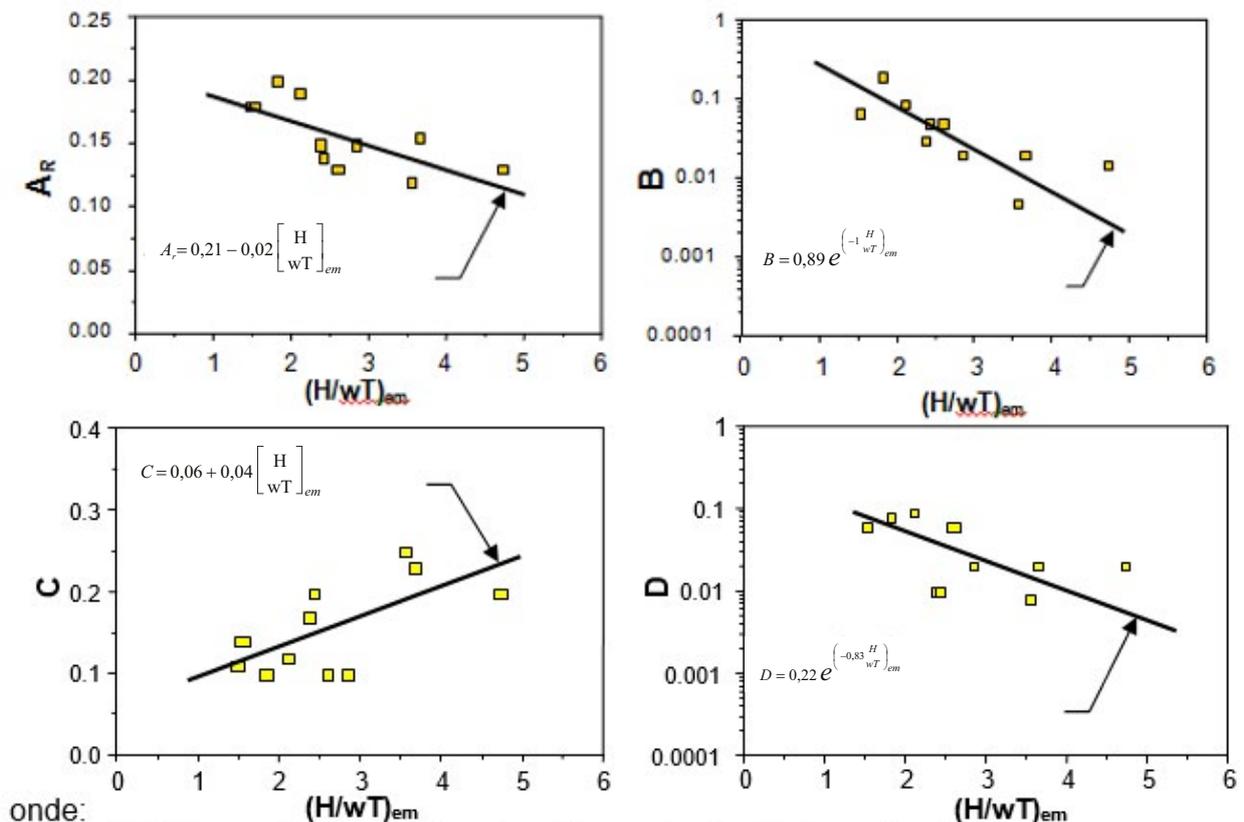
$H$  = altura significativa de onda média mensal à profundidade  $h_a$  em maré baixa.

Quadro 23 (Cont.) - Aplicações Perfil de Equilíbrio: Perfil bi-parabólico.

A amplitude da maré,  $M$ , encontra-se definida pela cota da maré alta modal. Na Tabela a seguir são apresentadas as amplitudes de maré modal características de diferentes praias:

Praia	Amplitude da maré (m)
Fortaleza	2,90
Salvador	2,45
Rio de Janeiro	1,20
Florianópolis	0,90

Os parâmetros que controlam a forma de cada um dos perfis,  $A_R$ ,  $B$ ,  $C$  e  $D$ , foram obtidos ajustando os perfis de praia medidos ao longo de todo o litoral espanhol e estão representados em função da altura de onda, do período de ondulação e da velocidade de queda do grão:



onde:

$(H/wT)_{em}$  = velocidade adimensional de queda do grão do perfil submerso;

$T$  = período de pico da ondulação média mensal;

$w$  = velocidade de queda de grão:

$$w = 1,1 \cdot 10^6 D_{50}^2 \quad \text{para } D_{50} < 0,1 \text{ mm}$$

$$w = 273 D_{50}^{1,1} \quad \text{para } 0,1 < D_{50} < 1 \text{ mm}$$

$$w = 4,36 D_{50}^{0,5} \quad \text{para } D_{50} > 1 \text{ mm}$$

$D_{50}$  = diâmetro médio da areia da praia no perfil submerso (em metros).

### Perfil de cascalhos

Embora o perfil de equilíbrio parabólico tenha sido utilizado com sucesso em um espectro muito amplo de diâmetros de sedimentos (ver a faixa de valores ajustados do parâmetro  $A$  no Quadro

15), diversos autores realizaram testes específicos de laboratório para a determinação do perfil de equilíbrio de uma praia de cascalhos.

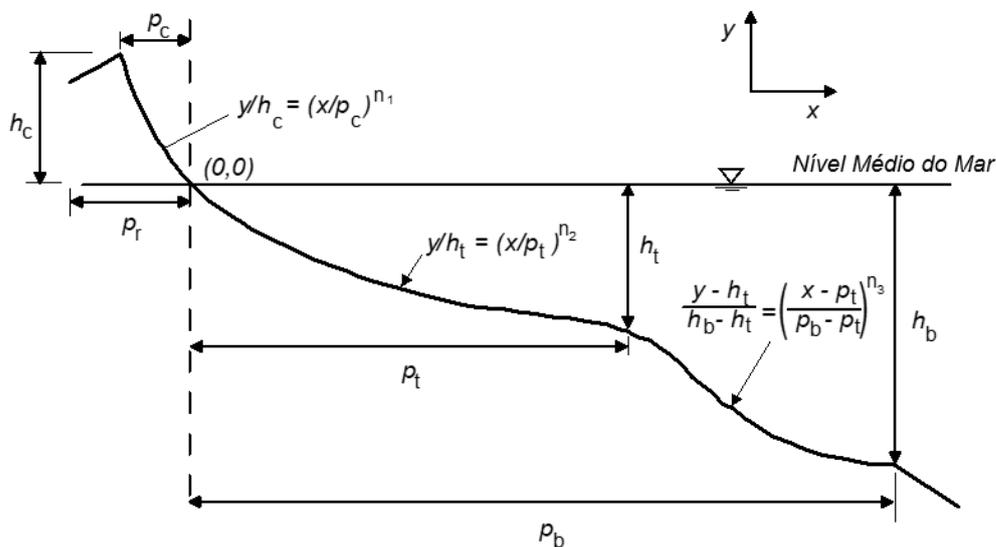
Estas praias apresentam certas características singulares, tais como:

- a. alta permeabilidade;
- b. elevado coeficiente de reflexão;
- c. quebra frontal-ascendente;
- d. zona de espriamento importante

Essas características lhes proporcionam uma forma ligeiramente diferente (POWELL, 1990). É necessário destacar, no entanto, que os modelos paramétricos existentes para este tipo de praia, como o apresentado no Quadro 24 foram obtidos com resultados de laboratório e não estão completamente validados com dados de praias reais (POWELL, 1990).

Quadro 24: Aplicações Perfil de Equilíbrio: Perfil de Cascalhos.

O modelo paramétrico de perfis de cascalho desenvolvido por Powel (1990) foi projetado para simular praias de material grosso como seixos e cascalhos. Um esquema do perfil é mostrado na Figura abaixo e pode ser aplicado na faixa  $20 < H_s / \Delta D_{n50} < 250$ .



O modelo paramétrico é descrito com as equações abaixo, onde as definições dos parâmetros são mostradas na Figura acima. O perfil encontra-se definido pela duração da tempestade e Powel (1990) sugere que a reconfiguração completa do perfil ocorrerá com apenas 500 ondas.

- |  |  |
|--|--|
| 1. Limite do <i>runup</i> , $p_r$                      | $p_r/H_s = 6,38+3,25 \ln(H_s/L_{om})$  |
| 2. Posição da crista, $p_c$                            | $p_c D_{50}/H_s L_{om} = -0,23(H_s T_m g^{1/2}/D_{50}^{3/2})^{-0,588}$   |
| 3. Elevação da crista, $h_c$                           | $h_c/H_s = 2,86-62,69(H_s/L_{om})+443,29(H_s/L_{om})^2$  |
| 4. Posição da transição, $p_t$                         |  |
| Para $H_s/L_{om} < 0,03$ :                             | $p_t D_{50}/H_s L_{om} = 1,73(H_s T_m g^{1/2}/D_{50}^{3/2})^{-0,81}$   |
| Para $H_s/L_{om} \geq 0,03$ :                          | $p_t/D_{50} = 55,26+41,24(H_s^2/L_{om} D_{50})+4,90(H_s^2/L_{om} D_{50})^2$                                      |
| 5. Profundidade da transição, $h_t$                    |  |
| Para $H_s/L_{om} < 0,03$ :                             | $h_t/H_s = -1,12+0,65(H_s^2/L_{om} D_{50})^1-0,11(H_s^2/L_{om} D_{50})^2$  |
| Para $H_s/L_{om} \geq 0,03$ :                          | $h_t/D_{50} = -10,41-0,025(H_s^2/D_{50}^{3/2} L_{om}^{1/2})-7,5^* 10^{-5}(H_s^2/D_{50}^{3/2} L_{om}^{1/2})^2$    |
| 6. Posição da profundidade de fechamento, $p_b$        | $p_b/D_{50} = 28,77(H_s/D_{50})^{0,92}$  |
| 7. Profundidade de fechamento, $h_b$                   | $h_b/L_{om} = -0,87(H_s/L_{om})^{0,64}$  |
| 8. Curva 1, crista no nível médio em repouso           | $\frac{y}{h_c} = \left( \frac{x}{p_t} \right)^{n_1}$   |
| Onde $Y$   | $n_1 = 0,84+23,93 H_s/L_{om} \text{ para } H_s/L_{om} < 0,03$<br>$n_1 = 1,56 \text{ para } H_s/L_{om} \geq 0,03$ |
| 9. Curva 2, nível médio em repouso à transição         | $\frac{y}{h_t} = \left( \frac{x}{p_t} \right)^{n_2}$   |
| Onde   | $n_2 = 0,84-16,49 H_s/L_{om}+290,16 (H_s/L_{om})^2$  |
| 10. Curva 3, da transição à profundidade de fechamento | $\frac{y - h_t}{h_b - h_t} = \left( \frac{x - p_t}{p_b - p_t} \right)^{n_3}$                                     |
| Onde $Y$   | $n_3 = 0,45 \text{ para } H_s/L_{om} < 0,03$<br>$n_3 = 18,6 (H_s/L_{om})-0,1 \text{ para } H_s/L_{om} \geq 0,03$ |

### Posição do Perfil de Praia estimado

A posição do Perfil de Praia proposta no sentido perpendicular à costa pode ser estabelecida ao deslocar o perfil até que exista um equilíbrio de áreas entre as seções inicial e final. Isto implica que o transporte litoral líquido paralelo à costa é nulo.

Observação:

- $H_s$  = altura significativa de onda;
- $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$  = densidade relativa;
- $\rho_s$  = densidade do sedimento;
- $\rho$  = densidade da água;
- $D_{n50}$  = diâmetro nominal médio do sedimento;
- $L_{om}$  = comprimento de onda média em águas profundas;
- $T_m$  = período médio de onda;
- $g$  = aceleração da gravidade;
- $D_{50}$  = diâmetro do sedimento que é excedido em 50% do peso da amostra.

## 2.4. Forma em planta

As hipóteses em que se baseia a análise em longo prazo da forma em planta de uma praia são duas: a já comentada ortogonalidade entre perfil e planta e a diferente escala temporal dos processos perfil-planta. Esta diferente escala temporal dos processos, faz com que nos estudos de forma em planta se assumam que o perfil de praia sempre atinja sua posição de equilíbrio (seja qual for). Deste modo, a evolução em longo prazo da forma em planta de uma praia é realizada mantendo constante a forma do perfil.

Dentro da análise do equilíbrio da forma em planta de uma praia em longo prazo, devem-se distinguir os seguintes casos:

- *Praias em equilíbrio estático (transporte longitudinal nulo)*

Esta situação, típica de praias de enseada, tómbolos e saliências pode ser analisada com modelos empíricos de planta de equilíbrio, onde somente se procura a determinação da forma final de equilíbrio.

- *Praias em equilíbrio dinâmico ou em desequilíbrio (transporte longitudinal não nulo)*

Neste tipo de praia, a variável tempo é importante, sendo necessário o uso de modelos de evolução da linha de costa do tipo de uma linha. Estes modelos poderão ser analíticos para os casos de geometrias simples, ou numéricos para os casos de geometrias complexas.

### 2.4.1. Praias em equilíbrio estático

Entende-se que uma praia atingiu uma forma em planta de equilíbrio se tal forma em planta não varia sob a ação de uma onda incidente constante no tempo. Se além de manter uma forma constante no tempo, o transporte costeiro líquido é nulo, a praia estará em equilíbrio estático.

Observe que para isto, é necessário que as correntes longitudinais existentes se anulem, existindo, portanto, um equilíbrio entre as correntes geradas pelo gradiente de altura de onda e pela incidência oblíqua dessa na zona de arrebentação. Estabelecendo como condição a igualdade entre ambas as correntes, pode-se encontrar a forma em planta da praia requerida para satisfazer a igualdade. Observe que nesta análise somente se busca o estado final de equilíbrio, não sendo de interesse o tempo necessário para que a praia atinja tal equilíbrio. No caso de desejar conhecer o tempo até o equilíbrio, a praia deve ser estudada como uma praia em desequilíbrio.

Se não existe nenhum obstáculo na propagação da onda, não existirão gradientes de altura de onda e, conseqüentemente, a condição de equilíbrio exige que a praia (linha de costa) seja paralela às frentes de onda. Caso existam elementos que gerem gradientes, como por exemplo, barreiras, cabos ou saliências que ocasionem a difração da onda, a forma em planta da praia adotará uma curvatura em forma de “gancho” ou “meio coração” característica, facilmente reconhecível em:

- Praias apoiadas em uma estrutura de difração de ondas ou praias de enseada. Quadro 25;

- Tômbolos e saliências. Quadro 26.

É importante ressaltar que a existência de uma praia em equilíbrio, tal como definido no parágrafo anterior, não é possível na natureza, posto que a onda esteja continuamente mudando. No entanto, a reduzida velocidade de mudança da forma em planta, com relação à velocidade de mudança das características da onda, resulta que a forma em planta não seja capaz de responder instantaneamente às mudanças da onda e tende a localizar-se, como será desenvolvido mais adiante, em disposição do equilíbrio com as características médias energéticas do mesmo.

A praia terá, portanto, uma posição de equilíbrio modal, com oscilações em torno de tal posição média. Estas oscilações são geralmente fracas, a menos que haja uma direcionalidade sazonal marcada das ondas. Para qualquer caso, em análise a longo prazo, deve ser considerada exclusivamente a posição de equilíbrio médio anual, sendo as oscilações objeto da análise a médio prazo.

### **Praias apoiadas em uma estrutura de difração de ondas ou de enseada**

A presença de um cabo ou uma barreira gera uma zona em que os efeitos da difração produzidos por tal obstáculo são observáveis (regiões 2 e 3 do Quadro 25. Além desta zona (região 1), a ondulação não está modificada e, portanto, a praia em equilíbrio na zona não modificada deve ser paralela às frentes das ondas. O limite que separa a zona de influência da difração da zona inalterada (ponto  $P_0$ ) é função da distância pelo comprimento de onda ( $Y/L$ ), que existe entre o ponto de controle ou ponto de difração e a propagação da linha de costa que passa por  $P_0$ , medida de forma perpendicular às frentes de ondas.

Conhecida tal distância ( $Y/L$ ), pode-se determinar o ângulo  $\alpha_{min}$  que forma a normal de todas as frentes que passam pelo ponto de controle e a linha que une o ponto de controle e o ponto  $P_0$ . O valor de  $\alpha_{min}$  foi ajustado em diversas praias do litoral espanhol e fica refletido no Quadro 25. Para o cálculo do comprimento de onda foi utilizada a profundidade existente no ponto de controle e o período refletido no gráfico do Quadro 25 conforme a fachada em estudo.

A forma da linha de costa, ou forma em planta da praia, na zona de sombra (regiões 2 e 3), vem definida pela expressão parabólica:

$$\frac{R}{R_0} = C_0 + C_1 \left( \frac{\beta}{\theta} \right) + C_2 \left( \frac{\beta}{\theta} \right)^2 \quad (26)$$

onde  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$  e  $\beta$  são função de  $\alpha_{min}$  (Quadro 25)

É importante notar que a expressão parabólica destacada anteriormente é válida mesmo no caso da praia não ser completa, ou seja, uma praia de enseada entre duas saliências e onde somente existe parte das regiões 3 e 2. Neste caso será feito o prolongamento fictício da linha de costa até o ponto  $P_0$  e utilizando as mesmas expressões de  $\alpha_{min}$ , ( $Y/L$ ) definidas anteriormente.

Em mares com maré (meso a macromaré), a expressão parabólica é válida tanto para a linha de maré alta como para a de maré baixa (observe que não são linhas paralelas que variam ( $Y/L$ )). Outro aspecto digno de menção é que a forma em planta de equilíbrio estático é independente da granulometria da areia e da altura da onda incidente, sendo os parâmetros que governam a forma em

planta, a direção das frentes na área do ponto de controle e a distância adimensional entre o ponto de controle e a linha de costa ( $Y/L$ ). Em relação a estes parâmetros cabe destacar:

- *Direção das frentes*

Tal como mencionado anteriormente, a forma em planta de uma praia não é capaz de responder imediatamente às mudanças de direção da onda e tende a localizar-se em uma posição em equilíbrio com as condições médias energéticas de onda. Como resultado, a direção das frentes a serem utilizadas no estudo de longo prazo da forma em planta é a definida pelo fluxo médio anual de energia no ponto de controle,  $\vec{F}_p$  :

$$\vec{F}_p = \sum_{i=1}^N H_i^2 \vec{C}_{g_i} \quad (27)$$

onde  $C_g$  é a velocidade de grupo,  $H$  é a altura da onda e  $N$  são todas as ondulações do ano.

Também, deve ser verificada esta direção com a disposição das praias adjacentes.

- *Distância adimensional*

A influência da distância adimensional é especialmente relevante no caso de praias próximas ao ponto de controle. Para valores de ( $Y/L$ ) maiores que 8, a variação de  $\alpha_{min}$  com a distância ( $Y/L$ ) é de escassa magnitude.

Por último, vale destacar que a validade da expressão parabólica da forma em planta requer que:

Os gradientes longitudinais de altura de onda na praia estejam regidos unicamente pelos fenômenos de refração e difração do ponto de controle (não existem obstáculos posteriores ou submersos);

- O sistema de correntes de equilíbrio esteja associado, unicamente, à ondulação (não é válido no caso de correntes de maré, desembocaduras, etc.);
- Somente exista um ponto de difração ou vários, sempre que não interajam mutuamente.



## **Tômbolos e saliências**

Um caso particular de forma em planta de equilíbrio estático é a que se origina na zona de sombra de uma barreira (ex, quebramar) ou uma ilha. Neste caso a formulação apresentada na seção anterior nos permite determinar não somente a forma que adotará a linha de costa, mas outros parâmetros de interesse na fase de projeto, tais como:

- Se será formado tómbolo ou saliência;
- Largura da praia no obstáculo no caso de tómbolo;
- Magnitude da saliência.

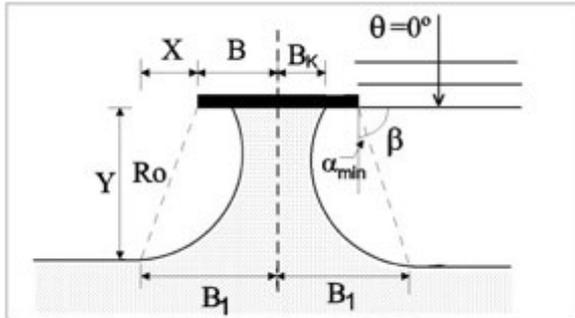
Cabe destacar que no caso da saliência é violada a hipótese de não interação entre dois pontos de difração, pelo qual a magnitude da saliência obtida pela formulação parabólica é aproximada e, por excesso, deve-se utilizar a tabela contida no Quadro 26.

Quadro 26: Tômbolos e Saliências.

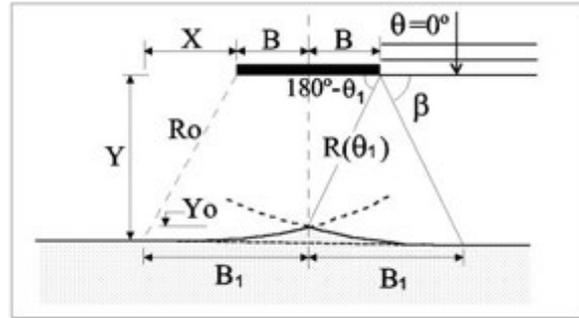
PRAIAS EM EQUILÍBRIO ESTÁTICO (FORMA EM PLANTA)

Gráficos para a determinação da forma em planta de um Tômbolo ou de uma Saliência com uma ou dupla saliência.  $L$  é o comprimento de onda da ondulação incidente, cujas cristas são paralelas à costa. O restante dos parâmetros são identificados nas Figuras abaixo.

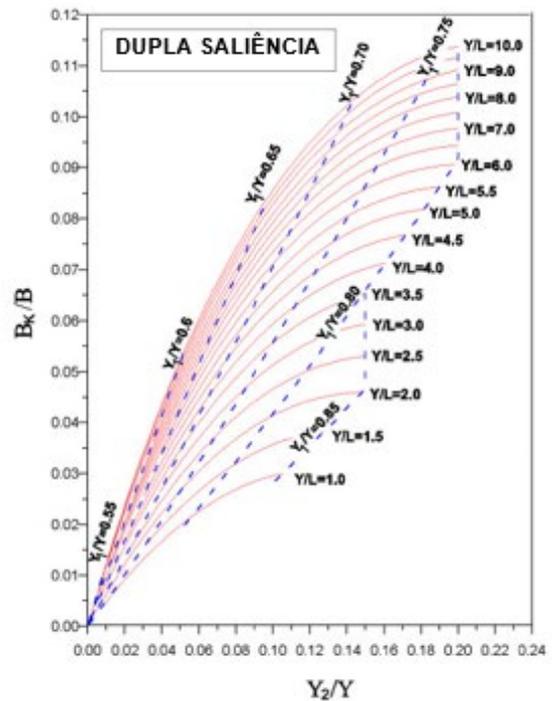
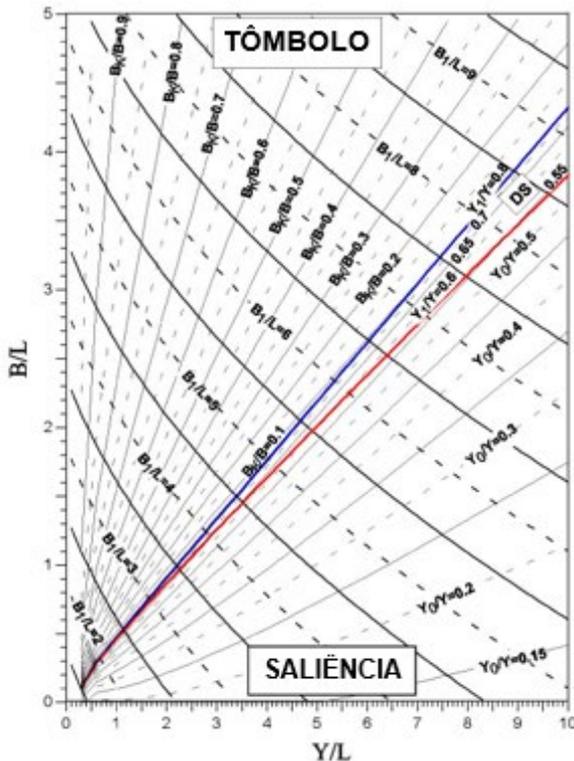
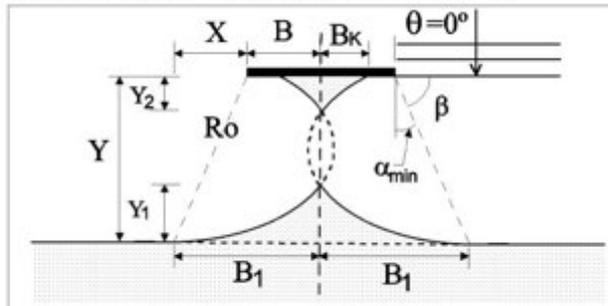
**TÔMBOLO**



**SALIÊNCIA – Uma saliência**



**SALIÊNCIA – Dupla saliência (DS)**



## 2.4.2. Praias em equilíbrio dinâmico ou desequilíbrio

Tal como comentado anteriormente, entende-se que uma praia atingiu uma forma em planta de equilíbrio se tal forma não varia sob a ação de uma ondulação incidente constante no tempo. Este equilíbrio é chamado dinâmico se é estabelecido sob a presença de transporte longitudinal de sedimento, ou seja, existe transporte, mas não gradientes de transporte, o que leva a uma manutenção do volume global de sedimento dentro da unidade fisiográfica.

Em uma praia em desequilíbrio o transporte longitudinal gera gradientes de transporte e, conseqüentemente, são estabelecidas zonas de erosão e de acúmulo que alteram a forma da linha de costa.

Em ambos os casos, o estudo da forma em planta da praia requer a determinação do transporte longitudinal dos sedimentos e das possíveis mudanças na linha de costa que tal transporte gera. Um aspecto importante é que este tipo de análise não somente estabelece a forma final da forma em planta, mas também é objeto de análise da evolução de tal forma em planta ao longo do tempo. Por este motivo, estes tipos de modelos costumam ser chamados: modelos de evolução da linha de costa.

Dentro dos modelos de evolução da linha de costa, o mais simples é o denominado modelo de “uma linha”. Este modelo assume que todas as curvas batimétricas da praia continuam por igual com o movimento da linha de costa, podendo-se descrever a evolução completa sem mais determinar a posição de uma linha: a linha de costa. A forma do perfil de praia é irrelevante dentro desta análise, sempre que seja constante ao longo do tempo, o que, como já comentado, é uma hipótese adequada dentro de um estudo de longo prazo.

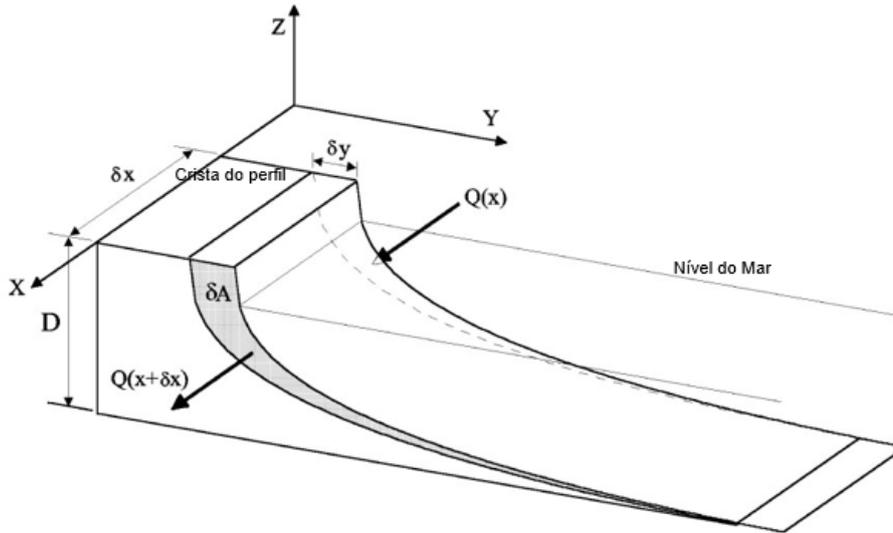
Os modelos de uma linha (Quadro 27) baseiam-se no princípio de conservação do volume de sedimento entre dois perfis de praia. Se a quantidade de material que foi introduzido entre tais perfis é maior que a removida, a linha de costa avança até o mar e vice-versa.

Quadro 27: Fundamentos dos modelos de uma linha.

Se o transporte longitudinal ( $Q$ ) varia ao longo da costa, a seção transversal ( $A$ ) da praia em uma posição dada ( $x$ ) mudará no decorrer do tempo ( $t$ ). Isto pode ser expresso com a seguinte equação de conservação do sedimento da praia:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{\partial A}{\partial t}$$

As mudanças na seção transversal provocarão um avanço ou retração do perfil de praia, no sentido perpendicular à linha de costa.



A mudança na seção transversal ( $A$ ) é igual à mudança na posição dos contornos do perfil ( $y$ ), multiplicado por uma profundidade representativa ( $D$ ). Isto resulta na equação:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + D \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

Na prática, o perfil de praia não avançará ou recuará na mesma proporção em todas as profundidades. Geralmente se considera o movimento de um contorno em particular, o que conduz a uma terminologia do modelo de uma linha. A profundidade  $D$  na equação é conhecida como a profundidade de fechamento.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + D \frac{\partial y}{\partial t} = 0 \quad (28)$$

onde:

$Q$  = transporte longitudinal;

$D$  = profundidade do perfil;

$x, y, t$  = eixos longitudinal, transversal e tempo.

Uma vez especificado o transporte longitudinal,  $Q$ , e as condições de contorno, a equação pode ser solucionada.

Em função da complexidade da expressão de  $Q$  e das condições de contorno a resolução pode ser analítica ou numérica. Normalmente, as condições reais de uma praia não podem ser analisadas de maneira rigorosa por meio de soluções analíticas, uma vez que exigem sérias simplificações, sendo necessária a resolução numérica. No entanto, estas soluções analíticas são adequadas para os estudos de pré-projeto. A seguir serão analisadas:

- Soluções analíticas sem difração (Quadro 28);
- Soluções analíticas com difração (Quadro 29);
- Soluções numéricas (Quadro 30).

### Soluções analíticas sem difração

No caso de não existirem obstáculos ou outros elementos que gerem variações longitudinais na altura da onda, a equação de continuidade do volume de sedimento pode ser expressa como uma equação de difusão:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = G \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (29)$$

onde  $G$  pode ser interpretado como um coeficiente de difusão que mede a escala temporal das mudanças da linha de costa frente a uma perturbação (ação da ondulação). Existem diversas soluções teóricas para a equação anterior, que podem ser encontradas em Larson *et al.* (1987), entre estas destacam-se:

- *Engordamento retangular*

O caso mais simples, que pode ser analisado com a equação da difusão correspondente à evolução de um engordamento retangular de comprimento  $l$ , feito em uma praia reta. Neste caso pode-se demonstrar que, na ausência de erosão de fundo, a fração de material,  $M$ , que permanece no retângulo onde foi depositado depende do parâmetro  $\frac{\sqrt{Gt}}{l}$  (Quadro 28). Para valores de  $M$  entre 1 e 0,5, pode ser utilizada como expressão aproximada:

$$M = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{Gt}}{l} \quad (30)$$

em especial, o tempo transcorrido até que 50% do material tenha desaparecido da zona de engordamento é:

$$t_{50\%} = 0,172 \frac{l^2 (km)}{H_b^{5/2} (m)} \quad (31)$$

No caso de existir uma erosão de fundo constante,  $E$ , pode ser demonstrado que para valores de  $\left(\frac{\sqrt{Gt}}{l}\right) < 0,5$  o tempo necessário para que uma fração  $M$  de material permaneça na área de engordamento seja:

$$t_M \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (32)$$

$$b = \frac{2E(M-1)}{\Delta y_0} - \frac{4G}{Ml^2} \quad (33)$$

$$a = \left( \frac{E}{\Delta y_0} \right)^2 \quad (34)$$

onde  $\Delta y_0$  é a largura do pós-praia.

$$c = (1 - M)^2 \quad (35)$$

- *Barreira litorânea*

Outra suposição que admite solução analítica é a presença de uma barreira litorânea ao transporte (supondo que tal barreira não gere efeitos importantes de reflexão e/ou difração, ex. espigão). A presença desta barreira litorânea gerará um acúmulo de sedimento a barlar da barreira e uma erosão a sotamar.

### **Soluções analíticas com difração**

No caso de existir variação da altura de onda ao longo do eixo longitudinal, a equação de conservação do volume de areia adota a forma:

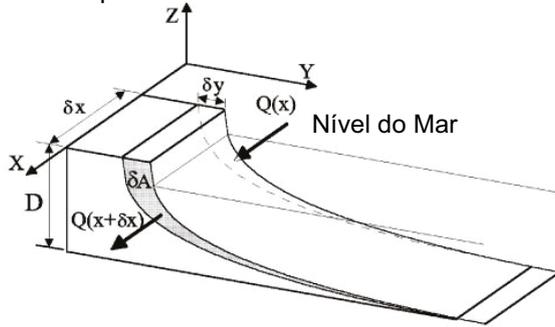
$$\frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = G \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial G}{\partial x} \frac{\delta y}{\delta x} \quad (36)$$

Larson *et al.* (1997) obtiveram diversas soluções de tal equação para os casos de:

- Quebramar;
- Barreira semi-infinita;
- Espigão transversal;

**Quadro 28:** Modelos de uma linha: Soluções Analíticas sem Difração.

Se a magnitude do transporte longitudinal,  $Q$ , e a altura de onda,  $H_{rmsb}$ , são constantes em  $x$  e  $t$ , a equação de conservação do sedimento se transforma em uma equação de difusão do tipo:

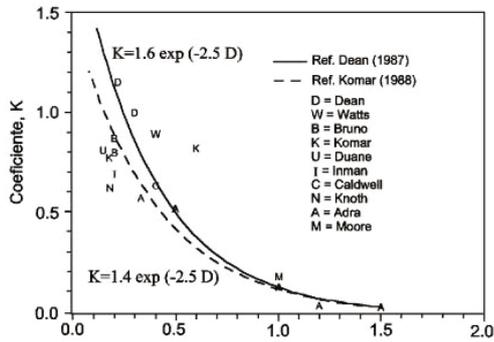


$$\frac{\partial y}{\partial t} = G \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

$$G = \frac{2Q}{D}$$

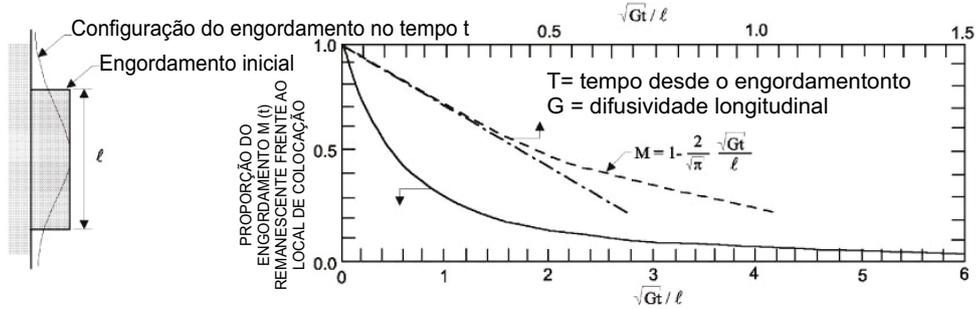
$$Q = \frac{H_{rmsb}^2 * C_{gb} * K}{16(s-1)(1-p)}$$

Onde:  
 $H_{rmsb}$  = altura média quadrática em quebra;  
 $C_{gb}$  = velocidade de grupo em quebra;  
 $s$  = densidade relativa  $\rho_s/\rho$ ;  
 $p$  = porosidade;  
 $K$  = constante (ver Figura);

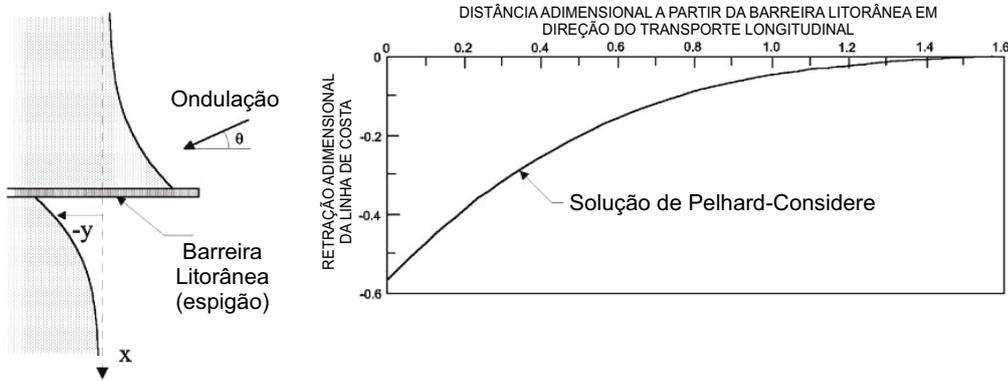


Esta equação pode ser solucionada em uma série de geometrias analíticas, ver Larson, et al (1987). A seguir é apresentada a solução da evolução da linha de costa para dois casos.

**1. ENGORDAMENTO RETANGULAR**



**2. BARREIRA LITORAL**



É importante salientar que as soluções anteriores levam em conta a variação longitudinal do transporte associado à quebra oblíqua da onda, devido às variações na altura dessa e no ângulo de quebra, mas não contemplam o transporte associado aos gradientes de altura de onda que se supõe serem insignificantes.

### **Soluções numéricas**

Quando as condições de geometrias são complexas e geram mudanças das variáveis que afetam o transporte costeiro (por exemplo, obstáculos, cabos, cânions submarinos) é necessário resolver a equação de conservação do volume de sedimento por meio de uma aproximação numérica.

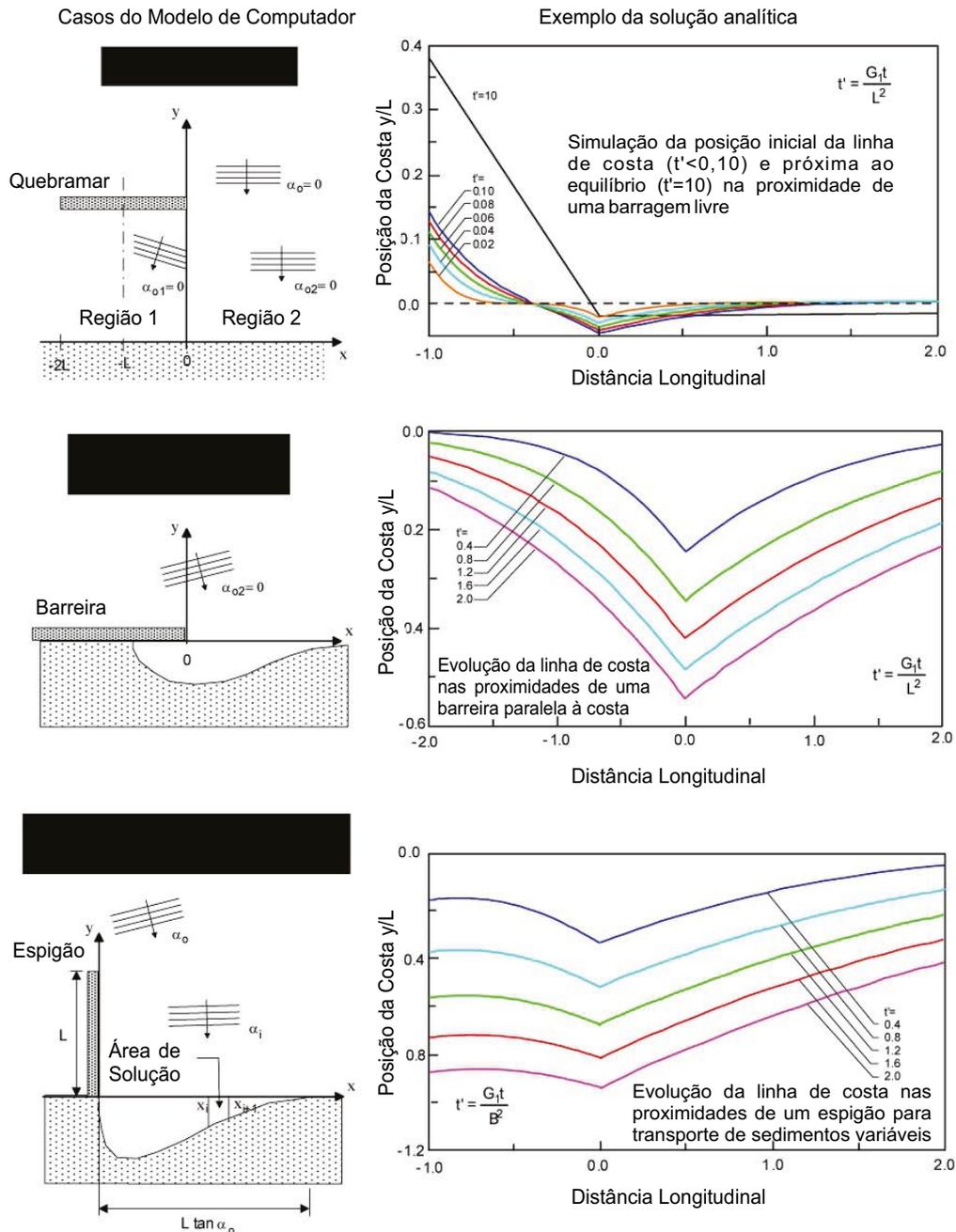
A aproximação numérica divide a praia em pequenos elementos e estabelece as relações de compatibilidade entre eles. Estes tipos de modelos permitem, a princípio, estimar a evolução em planta de uma praia seja qual for sua forma inicial, com quaisquer tipos de estruturas e sob a ação de qualquer ondulação incidente, considerando o transporte longitudinal devido tanto à quebra oblíqua das ondas, como aos gradientes de altura de onda.

Quadro 29: Modelos de uma linha: Soluções Analíticas com Difração.

No caso geral de variação longitudinal do coeficiente de difusão,  $G$ , (ver a definição no Quadro 28), a equação de conservação de sedimento adota a expressão:

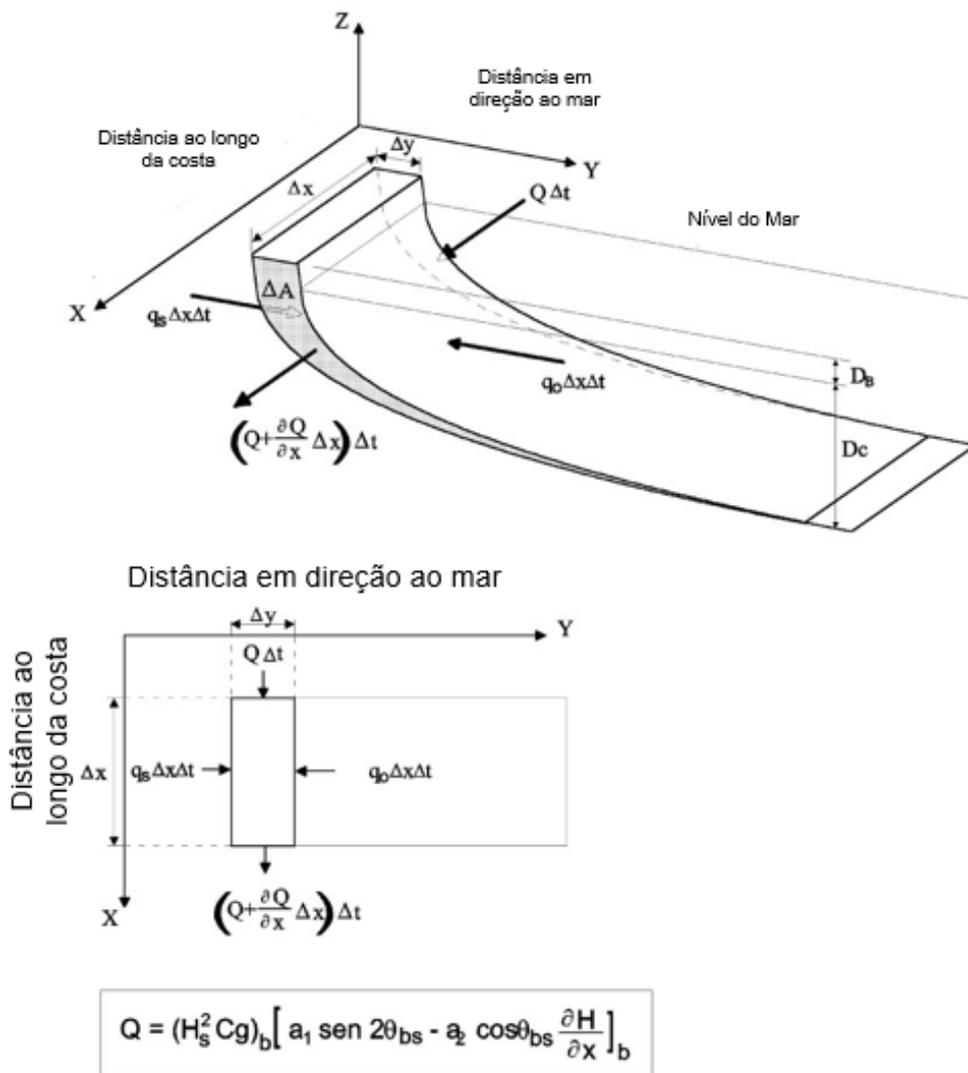
$$\frac{\partial G}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = G \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial G}{\partial x} \frac{\partial y}{\partial x}$$

Esta equação pode ser solucionada para uma série de geometrias analíticas, ver Larson et al. (1997). Nas Figuras a seguir se apresenta a evolução da linha de costa em três suposições:



**Nota:** Os gráficos anteriores correspondem a soluções para valores concretos dos dados de entrada (por exemplo, ângulo de incidência da onda), uma vez que não são válidos para outros valores. Ver a referência em Larson et al. (1997) para mais detalhes.

Quadro 30: Modelos de uma linha: Soluções Numéricas.



Onde:

- $H_s$  = altura significativa de onda;
- $C_g$  = velocidade de grupo;
- $b$  = subíndice que indica a condição de quebra;
- $\theta_{bs}$  = ângulo entre a frente da onda em quebra e a linha de costa;

$$a_1 = \frac{K_1}{16((\rho_s/\rho) - 1)(1-p)(1.416)^{5/2}}$$

$$a_2 = \frac{K_2}{8((\rho_s/\rho) - 1)(1-p) \tan \beta (1.416)^{7/2}}$$

$K_1, K_2$  = coeficientes empíricos, tratados como parâmetros de calibração;  
 $\rho_s$  = densidade do sedimento (2,650 kg / m<sup>3</sup> para sedimento de quartzo);  
 $\rho$  = densidade da água (1,030 kg / m<sup>3</sup>) para a água marinha);  
 $p$  = porosidade do sedimento de fundo (0,35 – 0,4);  
 $\tan \beta$  = declividade média do fundo da linha de costa à profundidade de fechamento.



## APOIO:



## REALIZAÇÃO:

