

Belisa Tomasoni Speranzini

**DIMENSIONAMENTO DE QUEBRA-MARES *LOW-CRESTED*
COMBINADOS COM ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DE PRAIA
PARA MITIGAÇÃO DA EROSÃO COSTEIRA EM RECIFE - PE**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Engenheiro
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Aurélio
Marques Noronha

Coorientador: Prof. Dr. Rodrigo
Barletta

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

SPERANZINI, BELISA TOMASONI

DIMENSIONAMENTO DE QUEBRA-MARES LOW-CRESTED COMBINADOS
COM ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DE PRAIA PARA MITIGAÇÃO DA
EROSÃO COSTEIRA EM RECIFE - PE / BELISA TOMASONI
SPERANZINI ; orientador, MARCOS AURÉLIO MARQUES NORONHA ;
coorientador, RODRIGO BARLETTA. - Florianópolis, SC, 2014.
123 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico.
Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia Civil. 2. Erosão Costeira. 3.
Dimensionamento de Quebra-Mares. 4. Low-Crested
Breakwaters. I. NORONHA, MARCOS AURÉLIO MARQUES. II.
BARLETTA, RODRIGO. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Belisa Tomasoni Speranzini

**DIMENSIONAMENTO DE QUEBRA-MARES *LOW-CRESTED*
COMBINADOS COM ALIMENTAÇÃO ARTIFICIAL DE PRAIA
PARA MITIGAÇÃO DA EROSÃO COSTEIRA EM RECIFE - PE**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil, e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil.

Florianópolis, 27 de novembro de 2014.

Prof. Dr. Luis Alberto Gómez
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Prof.º Dr.º Marcos Aurélio Marques Noronha
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof.º Dr.º Rodrigo Barletta
Coorientador
CB&I

MSc. Rafael Bonanata
Oceanógrafo

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmão pelo apoio, incentivo e paciência.

À Universidade Federal de Santa Catarina pela excelente formação acadêmica.

Ao meu orientador e coorientador pela oportunidade, disponibilidade e aprendizado.

À banca examinadora por prontamente aceitar o convite e contribuir com este trabalho.

À CB&I por gentilmente disponibilizar os dados e as bibliografias essenciais à realização desse trabalho.

Aos meus amigos oceanógrafos por toda colaboração, esclarecimentos e boa vontade em ensinar.

Aos meus colegas e amigos pela companhia e cooperação durante toda graduação.

“Eu continuo aprendendo.”

(Michelangelo, 1562)

RESUMO

O município de Recife (PE) sofre problemas de erosão costeira resultantes, em grande parte, da intensa ocupação antrópica em sua zona costeira. Diante desse problema, no ano de 2011 a empresa CB&I Brasil realizou um projeto de alimentação artificial de praia combinado à execução de *t-heads* para mitigar a erosão na praia de Boa Viagem, município de Recife, PE. As estruturas rígidas propostas eram de dimensões de maior porte, que interfeririam na paisagem local do ponto de vista estético. O dimensionamento destas estruturas ocorreu em concomitância com o tempo necessário para a execução da obra de aterro hidráulico cuja logística foi relacionada às condições ambientais. Este trabalho revisitou o projeto inicial das estruturas e propõe uma alternativa consistindo na construção de quebra-mares *low-crested*, a ser combinada com o projeto de alimentação artificial de praia já existente feito pela CB&I Brasil. Como resultado foram dimensionadas estruturas com elevações em torno de 0,3 m acima do MSL, cuja característica semi-submersa tem impacto estético menor. As estruturas foram dimensionadas para diminuir a energia das ondas incidentes e que, de acordo com os padrões hidrodinâmicos, de transporte de sedimentos e de mudanças morfológicas do local, ajudem a formar saliências na praia alimentada situada na zona de sombra dos quebra-mares. Considerações sobre a metodologia executiva foram realizadas, todavia o cronograma de execução do projeto original deve ser replanejado.

Palavras-chave: Erosão costeira. Dimensionamento de quebra-mares. *Low-crested breakwaters*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da área de estudo - Recife, PE. Datum WGS 1984, projeção UTM, zona 25 S, coordenadas em metros. Imagem: Google Earth®.....	27
Figura 2 – Deslocamento da linha de costa de Recife - PE.....	29
Figura 3 – Estruturas projetadas para a praia de Boa Viagem - Recife. 30	
Figura 4 – Rosa de ondas em águas rasas em frente à obra na praia de Boa Viagem.....	37
Figura 5 – Diagrama do processo de projeto de estruturas costeiras.....	39
Figura 6 – Seção de quebra-mar <i>low crested</i> típico	42
Figura 7 – Seção transversal típica de quebra-mar e seus parâmetros ..	46
Figura 8 – Parâmetro de permeabilidade (P) para estruturas variadas ..	47
Figura 9 – Validade das equações para cálculo de D_{n50}	51
Figura 10 – Representação esquemática dos parâmetros da equação parabólica de Hsu e Evans	57
Figura 11 – Parâmetros relacionados a quebra-mares e forma de linha de costa	58
Figura 12 – Locação dos quebra-mares.....	60
Figura 13 – Estimativa de variação do nível médio do mar	62
Figura 14 – Análise de linha de costa através do software Mepbay®... 71	
Figura 15 – Pé em berma.....	75
Figura 16 – Preparo da base para locação da estrutura.....	76
Figura 17 – Seção transversal típica da cabeça dos quebra-mares A e D	77
Figura 18 – Seção transversal típica do tronco dos quebra-mares A e D	77
Figura 19 – Seção transversal típica da cabeça dos quebra-mares B e C	78
Figura 20 – Seção transversal típica do tronco dos quebra-mares B e C	78
Figura 21 – Seção transversal típica da cabeça do quebra-mar E.....	79
Figura 22 – Seção transversal típica do tronco do quebra-mar E.....	79
Figura 23 – Seção transversal típica da cabeça do quebra-mar F.....	80
Figura 24 – Seção transversal típica do tronco do quebra-mar F.....	80
Figura 25 – Interface do CRESS	82
Figura 26 – Exemplo de relatório gerado pelo CRESS.....	83

Figura 27 – Início da construção de aterro de conquista.....	85
Figura 28 – Construção de quebra mar por terra.....	86
Figura 29 – Construção de quebra-mar através de guindaste embarcado	87
Figura 30 – Batelão e guindaste atuando em conjunto na construção de quebra-mar	87
Figura 31 – Perfil de zona costeira – ambiente praial	97
Figura 32 – Movimento sazonal de sedimentos na costa.....	98
Figura 33 – Descrição de onda.....	99
Figura 34 – Descrição da trajetória da partícula de água	100
Figura 35 – Processo de interação onda-estrutura.....	101
Figura 36 – Representação de <i>overtopping</i>	102
Figura 37 – Representação de <i>run-up</i> e <i>run-down</i>	102
Figura 38 – <i>Run-up</i> e <i>Run-down</i>	104
Figura 39 – Transmissão de onda em quebra-mar	105
Figura 40 – Dinâmica de uma célula litorânea típica.....	106
Figura 41 – Erosão e deposição de sedimentos em Ocean City, EUA	109
Figura 42 – Erosão costeira em East Riding of Yorkshire, UK	110
Figura 43 – Erosão costeira em decorrência de tempestades	111
Figura 44 – Erosão costeira por conta do furacão Sandy em Neponsit, EUA	112
Figura 45 – Dissipação de energia de onda por quebra-mar	115
Figura 46 – Quebra-mares vistos em planta.....	116
Figura 47 – Formação de tómbolo pela dissipação da energia da onda	117
Figura 48 – Representação de tómbolos e saliência.....	117
Figura 49 – Erosão de área adjacente aos quebra-mares.....	118
Figura 50 – Formação de tómbolo ou saliências por quebra-mares próximos à costa, considerando Y , d_s , L_s e L_g	119
Figura 51 – Praia de Pedregalejo - Málaga, Espanha.....	121
Figura 52 – Visual pouco afetado pelas estruturas costeiras na Praia de Pedregalejo- Málaga, Espanha	121
Figura 53 – Quebra-mar <i>low-crested</i> na praia de Altafulla, Espanha .	122
Figura 54 – Planta e vista frontal do quebra-mar de Altafulla, Espanha	123
Figura 55 – Perfil de quebra-mar	123

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Níveis de maré em Recife, PE.....	32
Quadro 2 – Classificação de estruturas <i>low-crested</i> conforme N_s	41
Quadro 3 – Valores de κ_t com base na forma da rocha e seu posicionamento na estrutura.....	50
Quadro 4 – Nível de dano (N_{od}) para estabilidade do pé da estrutura ...	54
Quadro 5 – Coordenadas de base para projeto dos quebra-mares	61
Quadro 6 – Comprimentos e distâncias aproximadas dos quebra-mares em planta	61
Quadro 7 – Resultados obtidos no dimensionamento do quebra-mar A	63
Quadro 8 – Resultados obtidos no dimensionamento do quebra-mar B	64
Quadro 9 – Resultados obtidos no dimensionamento do quebra-mar C	65
Quadro 10 – Resultados obtidos no dimensionamento do quebra-mar D	66
Quadro 11 – Resultados obtidos no dimensionamento do quebra-mar E	67
Quadro 12 – Resultados obtidos no dimensionamento do quebra-mar F	68
Quadro 13 – Resumo dos resultados obtidos no dimensionamento dos quebra-mares	69
Quadro 14 – Aplicação das relações de Hardway & Gunn (2011) na para a linha de costa obtida no <i>software</i> Mepbay®	72
Quadro 15 – Parâmetros de entrada e resultados obtidos em rotina de cálculo do CRESS	82
Quadro 16 – Comparação de resultados.....	83
Quadro 17 – Volumes estimados de material.....	84
Quadro 18 – Descritivo de materiais	84
Quadro 19 – Resumo de alternativas para mitigar problemas de erosão costeira	113
Quadro 20 – Fatores analisados na definição de soluções para mitigar a erosão costeira.....	114

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Regime geral de agitação ao largo em Recife, PE.....	33
Tabela 2 – Relação de período de pico (T_p) com altura significativa de onda (H_s) ao largo de Recife, PE.....	34
Tabela 3 – Regime geral de agitação no pé das estruturas em frente à praia de Boa Viagem.....	36
Tabela 4 – Relação de regime de pico e altura significativa de onda no pé das estruturas em frente à praia de Boa Viagem.....	36
Tabela 5 – Valores de H_s no ponto de análise para diferentes períodos de retorno para a série reconstruída em águas rasas.....	38
Tabela 6 – Valores de S para estrutura em duas camadas de armadura	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CB&I – Chicago Bridge & Iron Company
CEM – *Coastal Engineering Manual*
CPE – Coastal Planning Engineering
DHN – Diretoria de Hidrografia e Navegação
FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos
IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*
MAI – Monitoramento Ambiental Integrado
MHHW – Média das preamares superiores
MHLW – Média das baixa-mares superiores
MLHW – Média das preamares inferiores
MLLW – Média das baixa-mares inferiores
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MSL – Nível médio de maré
NA – Nível de água
NAS – *National Academy of Sciences*
NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*
ONU – Organização das Nações Unidas
RMR – Região Metropolitana de Recife
UCSD – *University of California, San Diego*
UFPE – Universidade Federal de Pernambuco
USGS – *United States Geological Survey*
UTM – Universal Transversa de Mercator
ZC – Zona Costeira

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	OBJETIVO.....	22
1.1.1	Objetivo Geral.....	22
1.1.2	Objetivos Específicos.....	22
1.2	CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	ÁREA DE ESTUDO.....	25
2.1.1	Histórico.....	25
2.1.2	Histórico em Recife, estudos e projetos propostos pela CB&I .	26
3	METODOLOGIA	39
3.1	CLASSIFICAÇÃO DE ESTRUTURAS <i>LOW-CRESTED</i>	40
3.2	DIMENSIONAMENTO DE UM QUEBRA-MAR EMERSO E ESTATICAMENTE ESTÁVEL.....	42
3.2.1	Cálculo do diâmetro nominal de rocha D_{n50} para quebra-mar convencional segundo Van der Meer (1995).....	42
3.2.2	Cálculo do fator de redução r_D	55
3.3	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA LINHA DE COSTA	56
3.3.1	EQUAÇÃO PARABÓLICA DE HSU & EVANS (1989).....	56
3.3.2	RELAÇÕES EMPÍRICAS DE HARDAWAY & GUNN (2011).	57
4	RESULTADOS.....	59
4.1	PREMISSAS.....	59
4.1.1	Localização das estruturas.....	59
4.1.2	Nível de água ao pé da estrutura	62
4.1.3	Altura significativa de onda	62
4.2	RESULTADOS OBTIDOS NO DIMENSIONAMENTO DOS QUEBRA-MARES	63
4.2.1	Quebra-mar A.....	63
4.2.2	Quebra-mar B.....	64
4.2.3	Quebra-mar C.....	65
4.2.4	Quebra-mar D.....	66
4.2.5	Quebra-mar E.....	67
4.2.6	Quebra-mar F.....	68
4.2.7	Resumo dos resultados	69

4.3	RESULTADO DA ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DE LINHA DE COSTA.....	70
5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	73
5.1	GEOMETRIA DAS ESTRUTURAS	73
5.2	ARMADURA	73
5.3	SUB-CAPA E NÚCLEO	74
5.4	PÉ E ACOMODAÇÃO DA ESTRUTURA	75
5.5	SEÇÕES TRANSVERSAIS TÍPICAS.....	76
5.6	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS	81
5.7	VOLUMES ESTIMADOS DE MATERIAL.....	84
5.8	MÉTODOS CONSTRUTIVOS.....	85
5.9	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA LINHA DE COSTA	88
6	CONCLUSÃO	90
	REFERÊNCIAS.....	92
	APÊNDICE A – REFERENCIAL TEÓRICO.....	96

1 INTRODUÇÃO

A zona costeira da Região Metropolitana de Recife (RMR) compreende 42 km de litoral e possui a maior densidade populacional do estado de Pernambuco (ITEP, 2012). Historicamente, a RMR apresenta problemas de erosão costeira resultantes principalmente da densa ocupação antrópica em seus litorais que conflita com a dinâmica da linha de costa.

O crescente desenvolvimento econômico nessa área atrai número cada vez maior de casas, edifícios, hotéis e projetos industriais, os quais interferem no ciclo natural de abastecimento, deposição e erosão de sedimentos no ambiente praias. Em muitos casos a faixa de praia reduz de forma tão acentuada que se perdem o potencial turístico e áreas de lazer, além de colocar em risco as construções em sua proximidade.

Diante desse cenário, diversas obras de combate à erosão costeira foram construídas ao longo dos anos. No entanto, muitas não trouxeram o resultado esperado do ponto de vista de contenção de erosão, ou apenas deslocaram o problema para áreas adjacentes. Ainda, a grande maioria das estruturas costeiras implantadas interfere substancialmente na paisagem, reduzindo o valor cênico das praias.

Como o problema permanece e tende a se agravar com o crescimento populacional na zona costeira da RMR, faz-se necessário a busca de novas alternativas. O desafio consiste em aliar interesses sociais à viabilidade técnica e econômica dos projetos sugeridos.

Nesse contexto, este trabalho propõe uma alternativa para mitigar os efeitos da erosão costeira na praia de Boa Viagem, no município de Recife. A solução indicada consiste na construção de um campo de quebra-mares *low-crested* combinado a um projeto de alimentação artificial de praia existente, realizado pela CB&I Brasil em 2013. A alimentação artificial de praia visa compensar o *déficit* no suprimento de sedimentos à costa, enquanto a construção de quebra-mares busca prolongar a vida útil desse aterro hidráulico, reduzindo a taxa de perda de sedimentos no local. A característica *low-crested* dos quebra-mares

significa estruturas de elevações bastante próximas ao nível de água, e, portanto, menos invasivas à paisagem.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é dimensionar um campo de seis quebra-mares destacados *low-crested* (semi-submersos, de perfil baixo) em rocha, cujo dimensionamento deve levar em consideração a atuação combinada com a dinâmica costeira para favorecer menores taxas de perda de sedimentos de um projeto existente de alimentação artificial de praia, projetado para regenerar a praia e mitigar os efeitos da erosão costeira em Boa Viagem, Recife, PE.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Estudar e apontar métodos empíricos de dimensionamento de quebra-mares em rocha e *layouts* que, combinados com alimentação artificial de praia promovam aumento da eficiência da obra e a diminuição das taxas de perdas de sedimento pós-obra;
- b) Dimensionar os quebra-mares através do método de dimensionamento escolhido, adotando premissas semelhantes a um *layout* proposto em trabalho desenvolvido pela CPE (2011), atualmente CB&I Brasil;
- c) Analisar o comportamento da linha de costa na zona de sombra dos quebra-mares devido ao posicionamento das estruturas;
- d) Analisar os resultados obtidos;
- e) Tecer considerações sobre o possível método construtivo em relação à dinâmica ambiental existente.

1.2 CONTEÚDO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho encontra-se estruturado em seis etapas:

Capítulo 1 – Introdução

Este capítulo aborda o assunto do trabalho de forma geral, especifica os objetivos e define a estrutura de desenvolvimento do mesmo.

Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

O segundo capítulo discorre sobre o histórico e características da área de estudo, com enfoque no problema de erosão costeira local.

Capítulo 3 – Metodologia

Este capítulo apresenta o método de dimensionamento de quebra-mares adotado pela autora com base na literatura pertinente ao tema. Especificam-se todas as equações, limitações e parâmetros empregados. Apresenta também o método de análise do comportamento de linha de costa frente ao novo *layout* proposto.

Capítulo 4 – Resultados

O quarto capítulo dispõe os resultados obtidos para o dimensionamento da estrutura com base na metodologia exposta no Capítulo 3 e nas características da área estuda apresentadas no Capítulo 2. Expõe ainda a forma de praia obtida com o posicionamento dos quebra-mares.

Capítulo 5 – Discussão dos Resultados

Neste capítulo os resultados obtidos são interpretados, analisados e avaliados. Apresentam-se os *layouts* das estruturas projetadas e a formação de linha de costa.

Capítulo 6 – Conclusão e Recomendações para Trabalhos Futuros

O último capítulo conta com conclusões fundamentadas nos resultados obtidos e propõe aspectos a serem desenvolvidos e estudados em trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ÁREA DE ESTUDO

2.1.1 Histórico

A zona costeira do estado de Pernambuco concentra 44% da população do estado e apresenta densidade populacional superior a 900 hab/km², com tendência de crescimento (COSTA & SOUZA, 2002). A intensa ocupação dessas áreas, com a fixação de moradias muito próximas ao oceano pode ter agravado o problema de erosão costeira. Diante de ameaças à segurança dos moradores e à perda de seu patrimônio, foram realizadas intervenções na tentativa de conter o avanço desse processo.

Em 2009 cerca de 50% dos municípios costeiros da Região Metropolitana de Recife (RMR) apresentavam algum tipo de obra de combate à erosão (MAI, 2009). A maioria destas obras foi feita em regime emergencial, resultando muitas vezes em intervenções onerosas e de resultados insatisfatórios em relação a contenção da erosão costeira. Observam-se ainda, casos em que as intervenções causaram erosão em zonas adjacentes à área tratada, ou seja, o problema não foi solucionado, e sim, transferido de local.

O MAI – Monitoramento Ambiental Integrado (2009) indica outros dois fatores agravantes da erosão local: a mineração de areia e a captação e armazenamento de água nas bacias litorâneas da região, os quais afetam diretamente o suprimento de sedimentos à costa.

Registros de danos causados pela erosão costeira na região datam de 1914, com relatos dos problemas ocasionados pela construção de um molhe em Olinda como elemento integrante da ampliação do Porto de Recife. Mas foi no final do século XX que intensificaram as obras costeiras de proteção com a construção de enrocamentos, espigões, molhes, quebra-mares e muros de contenção ao longo do litoral (ITEP, 2012). Fotos aéreas de diferentes datas registram a intensa modificação ocorrida nas praias, a citar a variação de linha de costa e a formação de

tômbolos e saliências. A zona litorânea sofreu forte desvalorização cênica, uma vez que a paisagem natural foi tomada pelas grandes estruturas.

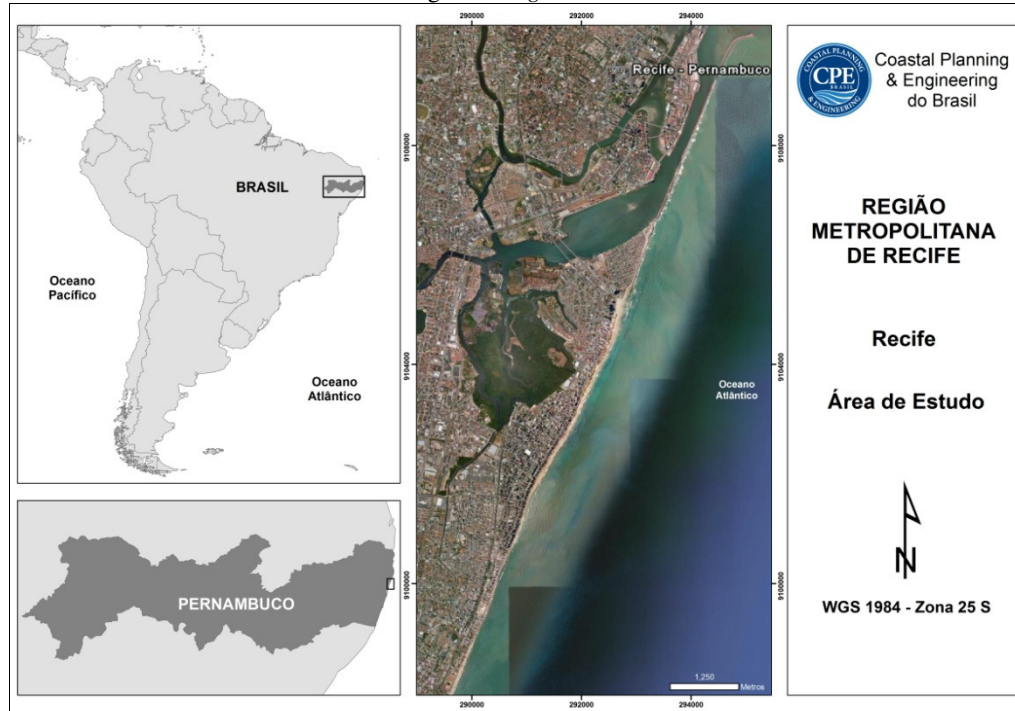
Diante deste cenário, no ano de 2006 teve início o projeto de Monitoramento Ambiental Integrado (MAI) - iniciativa da UFPE e dos governos Estadual e municipais da RMR - com o intuito de mapear o processo erosivo, identificar suas causas e recomendar soluções. O MAI foi concluído em 2009 e é fundamental ferramenta para que gestores públicos tomem decisões no sentido de controle da erosão. É também importante fonte de dados para seleção e desenvolvimento dos projetos de engenharia costeira (MAI, 2009).

2.1.2 Histórico em Recife, estudos e projetos propostos pela CB&I

O município de Recife possui 13.444 m de litoral, composto pelas praias de Boa Viagem, Pina e Brasília Teimosa. Desses, 44,6% são formados de praias arenosas e os demais 55,4% são constituídos de dois trechos, um de enrocamento e outro de arrecifes (MAI, 2009).

Figura 1 – Localização da área de estudo - Recife, PE. Datum WGS 1984, projeção UTM, zona 25 S, coordenadas em metros.

Imagem: *Google Earth®*.

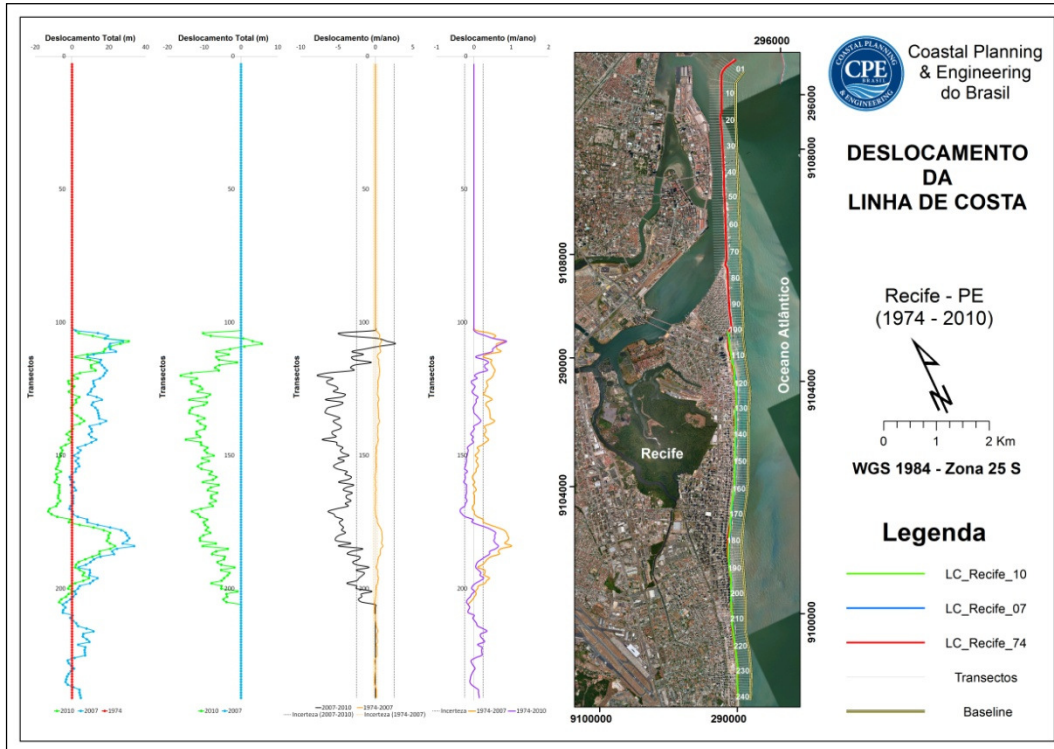


Fonte: CPE (2011).

Em 2011 a Coastal Planning Engineering (CPE), hoje CB&I, realizou análises de variação de linha de costa através da comparação de fotos aéreas do ano de 1974 e imagens de satélite extraídas a partir do *software Google Earth*® dos anos de 2007 e 2010. Observou que entre os anos de 1974 e 2007 os transectos 01 a 174 e 198 a 240 tiveram uma progradação ou permaneceram estáveis.

No entanto a região compreendida entre os transectos 175 e 197 regrediu numa média de 0,55 m/ano \pm 0,26 m/ano. Entre os anos de 2007 e 2010, a regressão nesta região aumentou consideravelmente, com média de 4,00 m/ano \pm 2,50 m/ano (CPE, 2011). Essas variações podem ser visualizadas na Figura 2.

Figura 2 – Deslocamento da linha de costa de Recife - PE



Fonte: CPE (2011).

Os impactos da erosão costeira na região são diversos, incluindo perdas econômicas causadas pela destruição de patrimônios públicos e imóveis privados, prejuízos nas atividades turísticas bem como a alta demanda por investimentos em obras de contenção da erosão. Causam ainda perdas sociais como a redução de áreas de lazer, e perdas ambientais como o desequilíbrio ecológico, a destruição do meio ambiente, a redução de praias e a perda do valor paisagístico (MAI, 2007).

No ano de 2011 a CPE, atual CB&I Brasil, foi contratada para desenvolver projetos de recuperação de praia e combate à erosão costeira para os municípios de Jaboatão dos Guararapes, Recife, Olinda e Paulista. Para o município de Recife, especificamente na praia de Boa Viagem foram apresentadas duas alternativas: alimentação artificial de praia (Alternativa 1) ou alimentação artificial de praia associada à construção de seis *t-heads* (Alternativa 2), vide Figura 3.

Figura 3 – Estruturas projetadas para a praia de Boa Viagem - Recife



Fonte: CPE (2011).

Durante o projeto conceitual foi verificado que o volume restante em relação ao engordamento inicial ao longo dos cinco anos de

simulação para a Alternativa 1 sofreria uma perda de 40% e para a Alternativa 2 uma perda de 30%. Apesar de a alternativa 2 apresentar maior eficácia na retenção dos sedimentos, o cliente optou pela alternativa 1, pois as estruturas rígidas propostas tinham dimensões de porte, emersas e aparentes. Destaca-se que a solução proposta pela CPE (atual CB&I Brasil) levou em consideração o prazo de obra necessário para a realização concomitante do aterro hidráulico. Assim, a logística de aterro e de construção dos *t-heads* sugeridos tiveram cronogramas dependentes do regime de ondas e de marés, sendo uma das soluções identificadas construir estruturas mais elevadas, por conta do método executivo atrelado ao regime de marés.

Uma terceira alternativa seria a construção de estruturas *low-crested* aliadas à alimentação artificial de praia, atendendo às expectativas de menor impacto paisagístico.

2.1.2.1 Características locais

2.1.2.1.1 Batimetria

Dados disponíveis de batimetria para este trabalho consistem no levantamento realizado pela CPE em 2010.

A área de estudo apresenta profundidades entre 2 m e 4 m na região de colocação dos quebra-mares *low-crested*, referenciadas ao nível zero da DHN.

2.1.2.1.2 Marés

Os dados das condições de marés foram extraídos a partir do catálogo de Estações Maregráficas Brasileiras da Fundação de Estudos do Mar (FEMAR), considerando as estações do Porto de Recife, Porto de Suape e Itapessoca (CPE, 2011). Os resultados, referenciados ao zero da DHN, encontram-se no Quadro 1.

Quadro 1 – Níveis de maré em Recife, PE

Média das preamares superiores (MHHW)	2,24m (NR-DHN)
Média das preamares inferiores (MLHW)	1,97m (NR-DHN)
Nível médio de maré (MSL)	1,20m (NR-DHN)
Média das baixa-mares superiores (MHLW)	0,44m (NR-DHN)
Média das baixa-mares superiores (MLLW)	0,16m (NR-DHN)

Fonte: elaborado a partir de dados de CPE (2011).

2.1.2.1.3 Ondas ao largo

A análise do regime geral de agitação ao largo do Recife, PE realizada e apresentada pela CPE (2011), será resumida nesta seção. A referida análise demonstra que a região apresenta clima de ondas mediano, típico da região nordeste brasileira, com mais de 90% das ondulações permanecendo abaixo de 2,5 m. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 1 e na Tabela 2. Estes resultados foram obtidos por análises das saídas do modelo WW3 do NOAA (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica – EUA).

Tabela 1 – Regime geral de agitação ao largo em Recife, PE

Hs (m) \ Dir (°)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
0.5 - 1					0,00	0,06	0,00										0,07
1 - 1.5	1,21	0,58	0,40	0,51	2,15	2,84	0,44	0,36	0,64	0,40	0,10	0,05	0,05	0,03	0,09	0,70	10,55
1.5 - 2	4,80	1,65	0,65	1,02	7,91	20,80	2,51	1,99	4,39	2,79	0,40	0,19	0,15	0,13	0,25	2,10	51,72
2 - 2.5	1,88	0,28	0,07	0,09	1,29	14,81	2,77	1,54	3,66	1,30	0,18	0,04	0,01	0,03	0,04	0,35	28,34
2.5 - 3	0,16	0,02			0,01	3,91	1,44	0,54	1,20	0,21					0,00	0,02	7,52
3 - 3.5					0,02	0,50	0,44	0,13	0,29	0,04							1,42
3.5 - 4						0,09	0,18	0,02	0,05								0,34
4 - 4.5						0,00	0,05										0,05
TOTAL	8,05	2,53	1,12	1,62	11,38	43,02	7,83	4,57	10,23	4,74	0,67	0,28	0,20	0,20	0,38	3,17	100

Fonte: CPE (2011).

Tabela 2 – Relação de período de pico (T_p) com altura significativa de onda (H_s) ao largo de Recife, PE

H_s (m) \ T_p (s)	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20	20 - 22	TOTAL
0 - 0.5												
0.5 - 1		0,01	0,00	0,05								0,07
1 - 1.5		0,00	0,66	4,84	2,02	1,66	0,94	0,35	0,06	0,01	0,01	10,55
1.5 - 2			0,84	25,25	9,73	6,81	6,47	2,19	0,40	0,02		51,72
2 - 2.5			0,07	10,55	9,00	3,19	3,74	1,48	0,29	0,02		28,34
2.5 - 3				1,28	4,03	0,75	0,99	0,41	0,05	0,01		7,52
3 - 3.5				0,07	0,76	0,25	0,23	0,09	0,02			1,42
3.5 - 4				0,00	0,16	0,13	0,03	0,02				0,34
4 - 4.5					0,02	0,03						0,05
TOTAL		0,01	1,58	42,05	25,72	12,81	12,40	4,54	0,82	0,06	0,01	100,00

Fonte: CPE (2011).

Observa-se que:

- a) A direção mais constante de ondas é a ESE;
- b) As maiores alturas significativas de ondas ao largo são provenientes dos setores ESE ao S;
- c) 51,27% das ondas variam entre 1,5 m e 2,0 m;
- d) Alturas significativas de onda iguais ou superiores a 2,0 m ocorrem com frequência de 37,67%;
- e) O período de pico mais frequente é de 8,0 s;
- f) Ondas com períodos entre 10 s e 14 s ocorrem em 25,21% do tempo;
- g) Períodos de ondas superiores a 14,0 s ocorrem com frequência de 5,43% do tempo.

2.1.2.1.4 Ondas em águas rasas

Dados de medição de ondas para caracterizar a zona costeira são inexistentes. Desta forma, a CPE (atual CB&I) realizou em 2011 um estudo de modelagem matemática de transformação de ondas disponíveis em águas profundas para águas rasas.

O ponto escolhido para o estudo está situado ao pé de uma das estruturas. Utilizou-se o modelo matemático Delft 3D, módulo SWAN da Delft Hydraulics. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3, Tabela 4 e Figura 4.

Tabela 3 – Regime geral de agitação no pé das estruturas em frente à praia de Boa Viagem

Hs (m) \ Dir (°)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	TOTAL
0 - 0.5																	
0.5 - 1				1,50	6,51	2,52	1,55										12,08
1 - 1.5				0,04	18,57	58,76	10,54	0,01									87,92
TOTAL				1,54	25,08	61,29	12,09	0,01									100,00

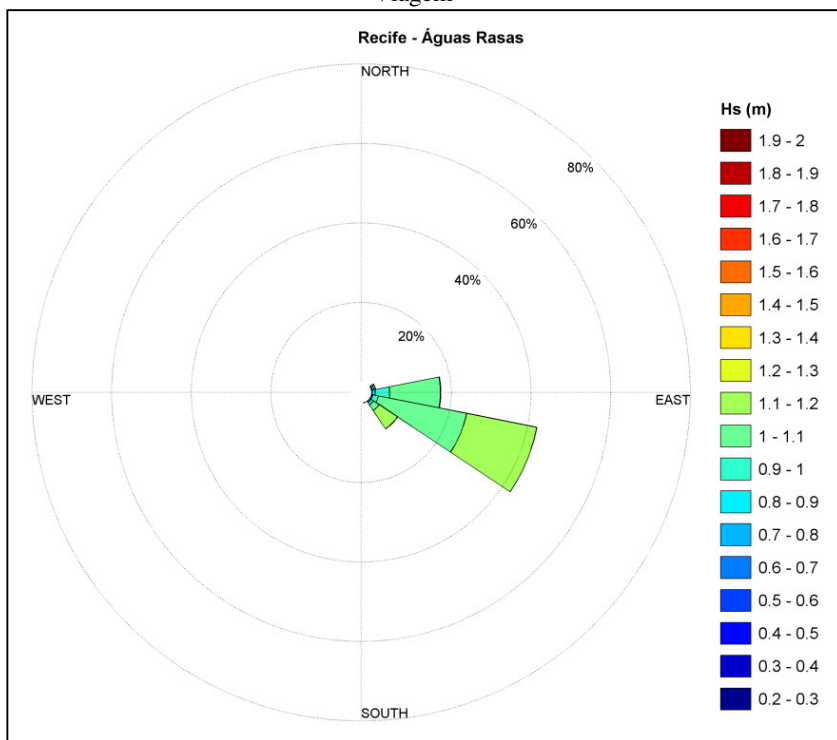
Fonte: CPE (2011).

Tabela 4 – Relação de regime de pico e altura significativa de onda no pé das estruturas em frente à praia de Boa Viagem

Hs (m) \ Tp (s)	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10 - 12	12 - 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20	20 - 22	TOTAL
0 - 0.5												
0.5 - 1		0,01	0,51	7,75	3,09	0,64	0,07	0,00	0,00			12,08
1 - 1.5			1,78	52,79	28,43	3,76	0,95	0,20	0,01			87,92
TOTAL		0,01	2,29	60,54	31,52	4,40	1,02	0,20	0,01			100,00

Fonte: CPE (2011).

Figura 4 – Rosa de ondas em águas rasas em frente à obra na praia de Boa Viagem



Fonte: CPE (2011).

Observa-se que:

- A direção mais constante de ondas é a ESE;
- Alturas significativas de onda iguais ou superiores a 1,0 m ocorrem com frequência de 87,92%;
- Ondas com altura significativa superior a 1,50 m são inexistentes;
- As ondas mais frequentes têm períodos inferiores a 10 s.

Para o dimensionamento de estruturas costeiras um dos dados de entrada é a altura da onda de projeto ao pé das estruturas (H_s). Desta

forma, com base nas séries temporais de dados, valores extremos foram selecionados a partir do método de máximos anuais no pé das estruturas. As distribuições estatísticas foram ajustadas a esses valores resultando em parâmetros de onda para diferentes períodos de retorno (CPE, 2011), os quais se encontram na tabela abaixo.

Tabela 5 – Valores de H_s no ponto de análise para diferentes períodos de retorno para a série reconstruída em águas rasas

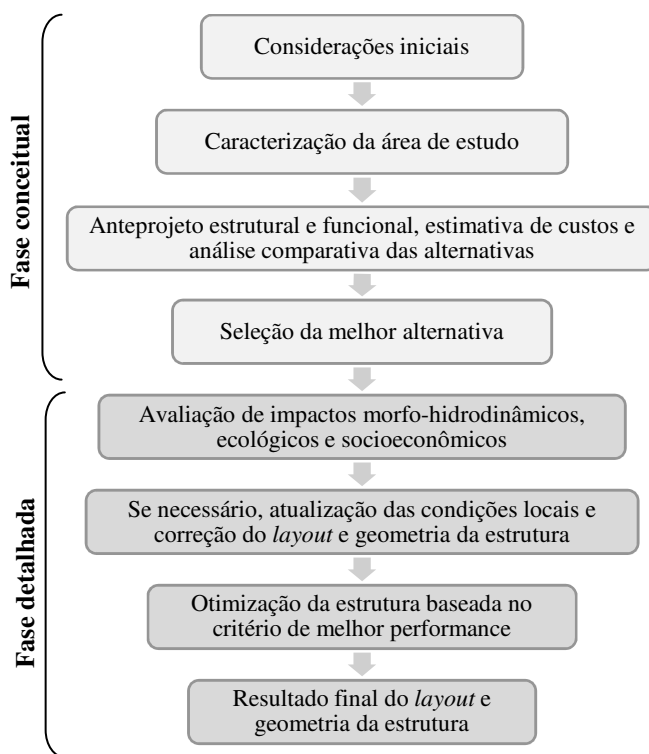
Período de retorno [anos]	H_s [m]
2	1,20
5	1,21
10	1,21
25	1,21
50	1,21
100	1,21
200	1,22

Fonte: adaptado de CPE (2011).

3 METODOLOGIA

De acordo com Burcharth *et al* (2007) o projeto de estruturas costeiras consiste normalmente de duas fases, uma conceitual e outra detalhada. A fase conceitual permite avaliar a viabilidade do projeto em termos econômicos, técnicos, sociais e ambientais - usualmente através da comparação entre diferentes alternativas de projeto. Selecionada a melhor alternativa, essa é analisada mais profundamente e otimizada através de modelagens numéricas e/ou físicas, caracterizando a fase detalhada de projeto.

Figura 5 – Diagrama do processo de projeto de estruturas costeiras



Os subitens a seguir descrevem a metodologia de cálculo adotada para o dimensionamento do campo de quebra-mares *low-crested* e para a análise de formação de linha de costa, cujos resultados estão apresentados no item 4 deste trabalho.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DE ESTRUTURAS *LOW-CRESTED*

Estruturas *low-crested* podem ser emersas, quando sua cota de topo (R_c) encontra-se em nível superior ao nível do mar, ou submersas, quando sua cota de topo encontra-se abaixo da linha de água.

- $R_c > 0$ = estrutura emersa;
- $R_c < 0$ = estrutura submersa.

Outro critério de classificação é baseado na estabilidade da estrutura (Quadro 2), dado pelo parâmetro N_s (VAN DER MEER & DAEMEN, 1994):

$$N_s = H_s / (\Delta D_{n50}) \quad (1)$$

Onde:

H_s = altura significativa de onda [m];

Δ = densidade relativa da rocha [-];

D_{n50} = diâmetro nominal da rocha [m].

Sendo a densidade relativa da rocha:

$$\Delta = \rho_a / \rho_w - 1 \quad (2)$$

Sendo:

ρ_a = massa específica da rocha da armadura [kg / m³];

ρ_w = massa específica da água [kg / m³].

E o diâmetro nominal da rocha (D_{n50}) dado por:

$$D_{n50} = (M_{50} / \rho_a)^{1/3} \quad (3)$$

Onde:

M_{50} = massa média da rocha [kg];

ρ_a = massa específica da rocha da armadura [kg / m³].

Quadro 2 – Classificação de estruturas *low-crested* conforme N_s

N_s	Tipo de estabilidade	Caracterização da estrutura
1 a 4	Estática	Normalmente taludes uniformes de rochas ou blocos artificiais de concreto. São permitidos pequenos danos apenas quando em condições extremas. Podem ser submersas ou não.
> 6	Dinâmica	Permite-se a alteração da forma da estrutura através do reposicionamento de rochas/blocos até atingir o equilíbrio. Normalmente submersas, na forma de recifes artificiais.

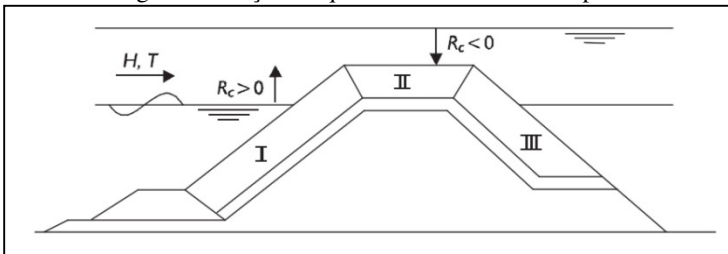
Fonte: elaborado com base em Van der Meer (1994, 1995).

3.2 DIMENSIONAMENTO DE UM QUEBRA-MAR EMERSO E ESTATICAMENTE ESTÁVEL

O dimensionamento de um quebra-mar emerso e estaticamente estável pode ser associado ao dimensionamento de uma estrutura convencional que sofre pouco ou nenhum *overtopping*. Essa relação é dada pela redução do diâmetro nominal da rocha calculada para a estrutura convencional através de um fator de redução (r_D), resultando no diâmetro nominal de rocha recomendado para a estrutura *low crested* (VAN DER MEER & DAEMEN, 1994)

A redução do tamanho de rocha em estruturas *low crested* é permitida em função das solicitações da estrutura serem menores, uma vez que parte da energia da onda passa por cima do quebra-mar devido à ocorrência de *overtopping*. Ainda, por parte da energia da onda atravessar a estrutura, as solicitações são similares tanto na parte anterior (I) quanto posterior (III) da estrutura, o que permite utilizar o mesmo tamanho de rocha em toda a seção (Figura 6).

Figura 6 – Seção de quebra-mar *low crested* típico



Fonte: CIRIA, CUR, CERMEF (2007).

3.2.1 Cálculo do diâmetro nominal de rocha D_{n50} para quebra-mar convencional segundo Van der Meer (1995)

Os parâmetros hidráulicos de *overtopping*, *run-up*, *run-down*, transmissão e reflexão, junto a parâmetros estruturais determinam a

forma e composição do quebra-mar, de maneira que atenda plenamente às solicitações e à vida útil de projeto.

3.2.1.1 Parâmetros de onda

As ondas incidentes são caracterizadas pela sua altura significativa ao pé da estrutura (H_s), período médio (T_m) ou de pico (T_p), ângulo de ataque (β) e altura da coluna de água ao pé da estrutura (h) (VAN DER MEER, 1995).

O empinamento estimado de onda (s) é dado por:

$$s = 2\pi H_s / g T^2 \quad (4)$$

Onde:

H_s = altura significativa de onda [m];

g = aceleração da gravidade [m/s^2];

T = período da onda [s].

Se utilizado o período de pico de onda (T_p) é chamado s_p . Se utilizado o período médio (T_m), é chamado s_m .

O parâmetro mais utilizado para descrever a ação da onda na estrutura ou praia é o número de Iribarren, também denominado parâmetro de quebra de onda (ξ) (VAN DER MEER, 1995):

$$\xi = \tan\alpha / \sqrt{s} \quad (5)$$

Com:

α = inclinação do talude da estrutura [°];

s = empinamento estimado de onda [-].

É chamado ξ_p quando descrito por s_p , e chamado ξ_m quando descrito por s_m .

3.2.1.2 Parâmetros hidráulicos

O parâmetro de *overtopping* (Q) pode ser descrito por:

$$Q = q / \sqrt{(gH_s^3)} \quad (6)$$

Na qual:

q = descarga de *overtopping* por unidade de comprimento da estrutura [l/s por m]

g = aceleração da gravidade [m/s^2];

H_s = altura significativa de onda [m].

A severidade da transmissão de ondas é dada pela relação:

$$C_t = H_t / H_i = \sqrt{(E_t / E_i)} \quad (7)$$

Onde:

C_t = coeficiente de transmissão de ondas [-];

H_t = altura da onda transmitida [m];

H_i = altura da onda incidente [m];

E_t = energia da onda transmitida [N/m²];

E_i = energia da onda incidente [N/m²].

A quantificação da transmissão de ondas é importante para quebra-mares *low-crested* projetados para defender praias ou linhas de costa. Assim, a severidade da reflexão de ondas é dada pela relação:

$$C_r = H_r/H_i = \sqrt{(E_r/E_i)} \quad (8)$$

Onde:

C_r = coeficiente de reflexão de ondas [-];

H_r = altura da onda refletida [m];

H_i = altura da onda incidente [m];

E_r = energia da onda refletida [N/m²];

E_i = energia da onda incidente [N/m²].

3.2.1.3 Parâmetros estruturais

3.2.1.3.1 Relacionados a ondas

O parâmetro estrutural relacionado a ondas mais importante é aquele dado pela equação (1). Arhens (1987, apud VAN DER MEER, 1995) modificou o parâmetro de estabilidade considerando a inclinação de onda local, e não necessariamente, a inclinação de onda em águas profundas:

$$N_s^* = N_s s_p^{-1/3} \quad (9)$$

Onde:

N_s^* = parâmetro de estabilidade espectral [-];

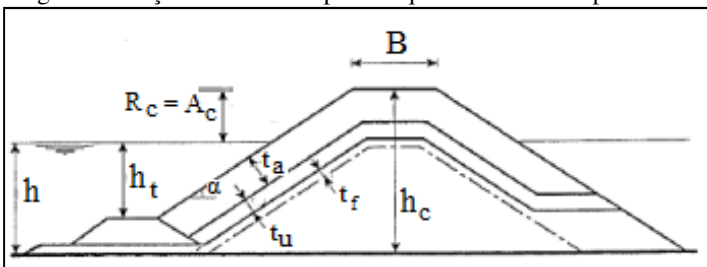
N_s = parâmetro de estabilidade [-];

s_p = empinamento estimado da onda [-].

3.2.1.3.2 Relacionados à seção transversal

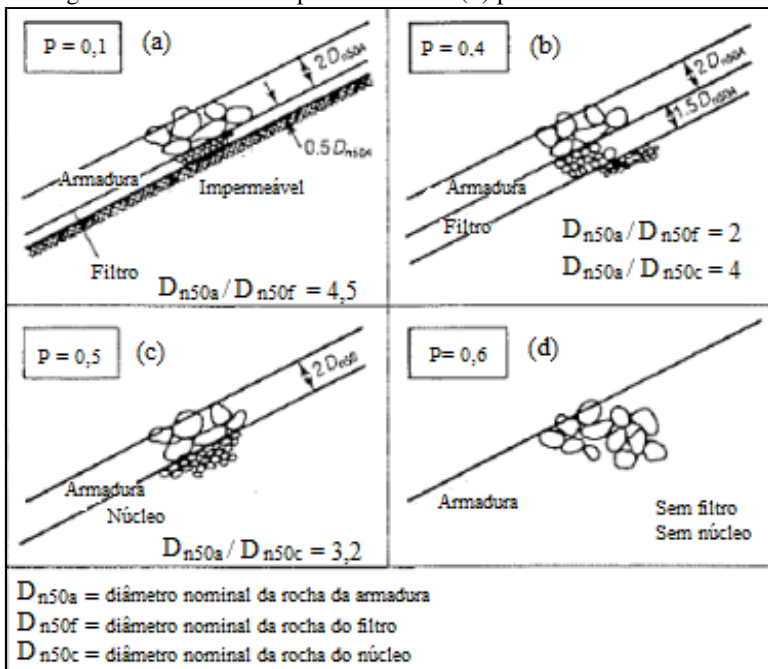
A Figura 7 apresenta alguns dos parâmetros relacionados à seção transversal do quebra-mar. Outro importante parâmetro é o de permeabilidade (P), que está relacionado ao volume de água que penetra na estrutura e, portanto depende da composição da mesma (Figura 8). Pode ser determinado através de simulações físicas e/ou modelos numéricos ou então, ser julgado pelo projetista.

Figura 7 – Seção transversal típica de quebra-mar e seus parâmetros



Fonte: Van der Meer (1995).

Figura 8 – Parâmetro de permeabilidade (P) para estruturas variadas



Fonte: adaptado de Van der Meer (1995).

3.2.1.3.3 Relacionados à reação da estrutura

Estruturas estaticamente estáveis são descritas pelo desenvolvimento do dano, como por exemplo, o deslocamento de rochas ou blocos na estrutura:

$$S = A_e/D_{n50}^2 \quad (10)$$

Onde:

S = nível de dano [-];

A_e = área erodida próxima ao nível d'água [m²];

D_{n50} = diâmetro nominal da rocha [m].

A tabela abaixo apresenta valores de projeto para nível de dano em estruturas com duas camadas de armadura e conforme a inclinação do talude:

Tabela 6 – Valores de S para estrutura em duas camadas de armadura

Talude	Dano inicial	Dano intermediário	Falha
1:1,5	2	3-5	8
1:2	2	4-6	8
1:3	2	6-9	12
1:4	3	8-12	17
1:6	3	8-12	17

Fonte: Van der Meer (1995).

3.2.1.4 Cálculo da largura do coroamento da estrutura (B) com base na transmissão de ondas

A transmissão de ondas pode ser descrita por:

$$C_t = a R_c / D_{n50} + b \quad (11)$$

$$a = 0,031 H_r / D_{n50} - 0,24 \quad (12)$$

$$b = -5,24 s_{op} + 0,0323 H_r / D_{n50} - 0,0017 (B / D_{n50})^{1,84} + 0,51 \quad (13)$$

Sendo:

C_t = coeficiente de transmissão de ondas [-];

a = coeficiente dado pela equação (12) [-];

R_c = cota de coroamento da estrutura em relação ao SWL [m];

D_{n50} = diâmetro nominal da rocha [m];

b = coeficiente dado pela equação (13) [-];

H_i = altura da onda incidente [m];

s_{op} = empinamento estimado de onda [-];

B = largura do coroamento da estrutura [m].

Para quebra-mares convencionais os valores máximo e mínimo do coeficiente de transmissão de ondas são 0,75 e 0,075 respectivamente. E a equação (11) é válida para:

$$1 < H_s/D_{n50} < 6 \text{ e } 0,01 < s_{op} < 0,05 \quad (14)$$

Ainda, a largura mínima do coroamento da estrutura (B_{min}) deve respeitar:

$$B_{min} = (3 \text{ a } 4)D_{n50} \quad (15)$$

Com:

D_{n50} = diâmetro nominal da rocha [m].

3.2.1.5 Cálculo da espessura das camadas de rocha

A espessura das camadas da estrutura é dada por:

$$t_a = t_u = t_f = \eta \kappa_t D_{n50} \quad (16)$$

Sendo:

t_a = espessura da camada de armadura [m];

t_u = espessura da sub-capa [m];

t_f = espessura da camada de filtro [m];

η = número de camadas [-];

κ_t = coeficiente de espessura de camada (Quadro 3) [-];

D_{n50} = diâmetro nominal da rocha [m].

Quadro 3 – Valores de κ_t com base na forma da rocha e seu posicionamento na estrutura

Forma da rocha	Posicionamento na estrutura	κ_t
Irregular	Aleatório	0,75
Irregular	Especial	1,05 – 1,20
Semi-arredondada	Aleatório	0,75
Semi-arredondada	Especial	1,10 – 1,25
Muito arredondada	Aleatório	0,80
Muito arredondada	Especial	1,05-1,20

Fonte: elaborado com base em CIRIA,CUR,CEMEF (2007).

3.2.1.6 Cálculo do diâmetro nominal de rocha D_{n50}

Van der Meer (1995) diferencia o cálculo do diâmetro nominal de rocha para condições de águas profundas e rasas. A

Figura 9 demonstra a validade das equações apresentadas nos subitens a seguir.

Figura 9 – Validade das equações para cálculo de D_{n50}

	Profundidade de água		
	Águas muito rasas	Águas rasas	Águas profundas
Parâmetros:			
$h/H_{s-pé}$	$\approx 1,5$ a ≈ 2	< 3	> 3
$R_H = H_{s-pé}/H_s$	$< 70\%$	$70\% < R_H < 90\%$	$> 90\%$
Eq. de estabilidade			
Eq. (17) e (18)		▶	
Eq (22) e (23)	▶		

Fonte: adaptado de CIRIA, CUR, CERMEF (2007).

3.2.1.6.1 Em condições de águas profundas

$$H_s/\Delta D_{n50} = 6,2P^{0,18}(S/\sqrt{N})^{0,2}\xi_{5m}^{-0,5} \quad (17)$$

$$H_s/\Delta D_{n50} = 1,0P^{-0,13}(S/\sqrt{N})^{0,2}(\sqrt{\cot\alpha})\xi_{5m}^P \quad (18)$$

$$\xi_{5m} = [6,2P^{0,31}\sqrt{\tan\alpha}]^{1/(P+0,5)} \quad (19)$$

Sendo:

H_s = altura significativa de onda [m];

Δ = densidade relativa da rocha [-];

P = parâmetro de permeabilidade da estrutura [-];

S = nível de dano da estrutura [-];

N = número de ondas em evento de tempestade [-];

ξ_{5m} = parâmetro de quebra de onda [-];

α = inclinação do talude da estrutura [°];

$\xi_{5m,c}$ = parâmetro crítico de quebra de onda [-];

D_{n50} = diâmetro nominal da rocha [m].

A equação (17) é utilizada para ondas mergulhantes e a equação (18) para ondas *surging*. A classificação é dada por:

$$\xi_m < \xi_{mc} \Rightarrow \text{ondas mergulhantes} \Rightarrow \text{Equação (17)} \quad (20)$$

$$\xi_m > \xi_{mc} \Rightarrow \text{ondas } \textit{surging} \Rightarrow \text{Equação (18)} \quad (21)$$

Com:

ξ_m = parâmetro de quebra de onda [-];

ξ_{mc} = parâmetro crítico de quebra de onda [-].

O número máximo de ondas em tempestade para validade das equações descritas é de 7500. Após esse número a estrutura praticamente atingiu equilíbrio (VAN DER MEER, 1995).

As equações para águas profundas atendem condições de inclinação fictícia de ondas (s_{om}) entre 0,005 e 0,06.

As massas específicas das rochas ensaiadas compreendem intervalo entre 2.000 kg/m³ e 3.100 kg/m³.

3.2.1.6.2 Em condições de águas rasas

$$H_{2\%}/\Delta D_{n50} = 8,7P^{0,18}(S/\sqrt{N})^{0,2}\xi_m^{-0,5} \quad (22)$$

$$H_{2\%}/\Delta D_{n50} = 1,4P^{-0,13}(S/\sqrt{N})^{0,2}(\sqrt{\tan\alpha})\xi_m^P \quad (23)$$

Onde:

$H_{2\%}$ = altura de onda excedida por 2% das ondas na distribuição de Rayleigh [m];

Δ = densidade relativa da rocha [-];

P = parâmetro de permeabilidade da estrutura [-];

S = nível de dano da estrutura [-];

N = número de ondas em evento de tempestade [-];

ξ_m = parâmetro de quebra de onda [-];

α = inclinação do talude da estrutura [°];

ξ_{mc} = parâmetro crítico de quebra de onda [-].

A equação (22) é utilizada para ondas mergulhantes e a equação (23) para ondas *surging*. A classificação de ondas é dada pelas equações (20) e (21).

Van der Meer (1995) sugere utilizar as equações (17) e (18) substituindo H_s por $H_{2\%}$, obtendo assim, resultados mais conservadores.

Tanto para condições de águas profundas quanto de águas rasas, recomenda-se que a gradação de rochas D_{85}/D_{15} seja mais fechada, inferior a 2,25. Gradações mais abertas podem levar a maiores danos na estrutura.

3.2.1.7 Proteção do pé da estrutura

Se a rocha no pé da estrutura for de mesma dimensão daquela da armadura, o pé será estável (VAN DER MEER, 1995). No entanto, reduções podem ser feitas, garantindo ainda assim a estabilidade.

$$H_s/\Delta D_{n50} = (0,24h_r/h + 1,6)N_{od}^{0,15} \quad (24)$$

Onde:

H_s = altura significativa de onda [m];

Δ = densidade relativa da rocha [-];

h_t = altura da coluna d'água acima do pé da estrutura [m];

h = altura da coluna d'água a partir da base da estrutura [m];

N_{od} = nível de dano (Quadro 4) [-].

Quadro 4 – Nível de dano (N_{od}) para estabilidade do pé da estrutura

N_{od}	Ocorrência
0,5	Início de dano
2,0	Início de achatamento
4,0	Achatamento completo

Fonte: elaborado com base em Van der Meer (1995).

A equação (24) é válida para $0,4 < h_t/h < 0,9$ e $3 < h_t/D_{n50} < 25$.

Para o comprimento do pé da estrutura adota-se:

$$B_{pé} = (2 \text{ a } 3)D_{n50} \quad (25)$$

Na qual:

$B_{pé}$ = comprimento do pé da estrutura [m];

D_{n50} = diâmetro nominal da rocha [m].

A altura do pé da estrutura tem dimensão igual à largura da camada da armadura (t_a).

3.2.1.8 Cabeças do quebra-mar

Segundo Jensen (1984, apud VAN DER MEER 1995) quando a onda é forçada a quebrar na cabeça arredondada do quebra-mar, a estrutura é sujeita a velocidades e energia de ondas bastante fortes. Recomenda-se então utilizar armaduras mais pesadas nessas áreas, a fim de garantir a mesma estabilidade presente ao longo da estrutura.

Não existe regra para o reforço das cabeças do quebra-mar. Normalmente a massa da rocha/bloco pode ser incrementada em 1 a 4 vezes que a massa das unidades da armadura da estrutura. Para rochas usualmente o fator de incremento é próximo a 1.

3.2.1.9 Sub-capa

Se o projetista optar pelo emprego de sub-capas nas estruturas, Van der Meer (1995) recomenda a adoção de rochas com massa nominal entre 1/10 e 1/15 da massa de rocha adotada na armadura, o que confere diâmetros nominais de rocha entre 2,2 e 2,3 menores que o D_{n50} da armadura.

3.2.2 Cálculo do fator de redução r_D

O fator de redução r_D é dado por (VAN DER MEER & PILARCZYK, 1990):

$$r_D = [1,25 - 4,8(R_c/H_s)\sqrt{(s_{op}/2\pi)}]^{-1} \quad (26)$$

Onde:

R_c = cota de coroamento da estrutura em relação ao SWL [m];

H_s = altura significativa de onda [m];

s_{op} = inclinação fictícia de onda [-].

A equação (26) é limitada a $0 < (R_c/H_s)\sqrt{(s_{op}/2\pi)} < 0,52$.

3.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA LINHA DE COSTA

3.3.1 EQUAÇÃO PARABÓLICA DE HSU & EVANS (1989)

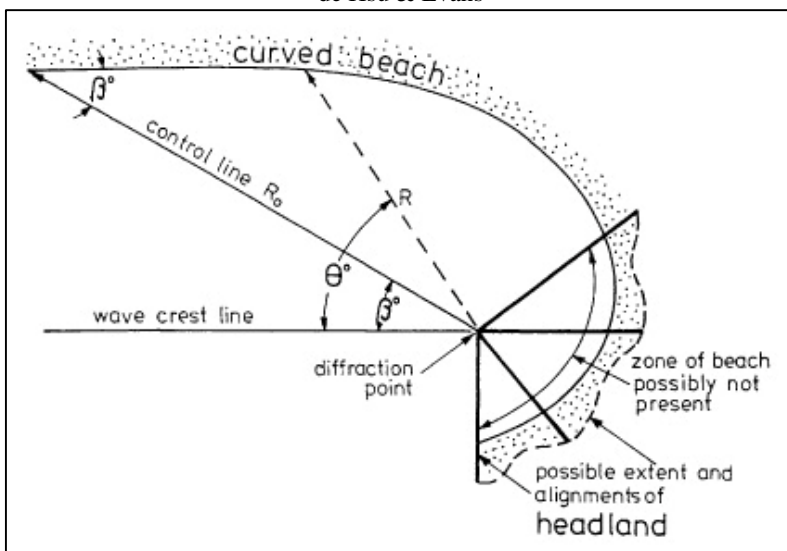
O comportamento da linha de costa frente à implantação das estruturas pode ser verificado através da aplicação da equação parabólica de Hsu & Evans (1989). Trata-se de uma forma simplificada de estimar a forma de praia resultante do uso dos quebra-mares.

Esse modelo empírico representa matematicamente a formação de praias de enseada, incorporando como parâmetros diretos a geometria da costa, a direção de ondas e seu ponto de difração. A equação (27) proposta por Hsu & Evans (1989) tem como principais variáveis o comprimento da linha de controle (R) e o ângulo β formado entre a direção das ondas e a linha de controle (Figura 10).

O ponto de difração consiste no último ponto de interação das ondas que chegam à costa, a partir do qual sofrem difração e propagam-se em direção à praia determinando sua forma. Aplicado a quebra-mares, tem-se como ponto de difração o ponto da estrutura a partir do qual as ondas difratam em direção à costa.

$$R_N/R_0 = C_0 + C_1(\beta/\theta_N) + C_2(\beta/\theta_N)^2 \quad (27)$$

Figura 10 – Representação esquemática dos parâmetros da equação parabólica de Hsu & Evans



Fonte: HSU (2005)

Como esse modelo considera que a direção de ondas é tangente à seção reta da costa, sua aplicação é recomendada para costas de micro-marés dominadas pela ação de ondas (HSU & EVANS, 1989 *apud* SILVEIRA *et al*, 2010). Para realizar esta análise será utilizado o *software* Mepbay®, ferramenta de fins educacionais que permite a aplicação rápida e eficiente da equação parabólica de Hsu & Evans (1989). Nesse *software* o usuário insere uma imagem aérea da área de estudo e define os pontos de controle, obtendo como resultado a parábola que define a linha de costa.

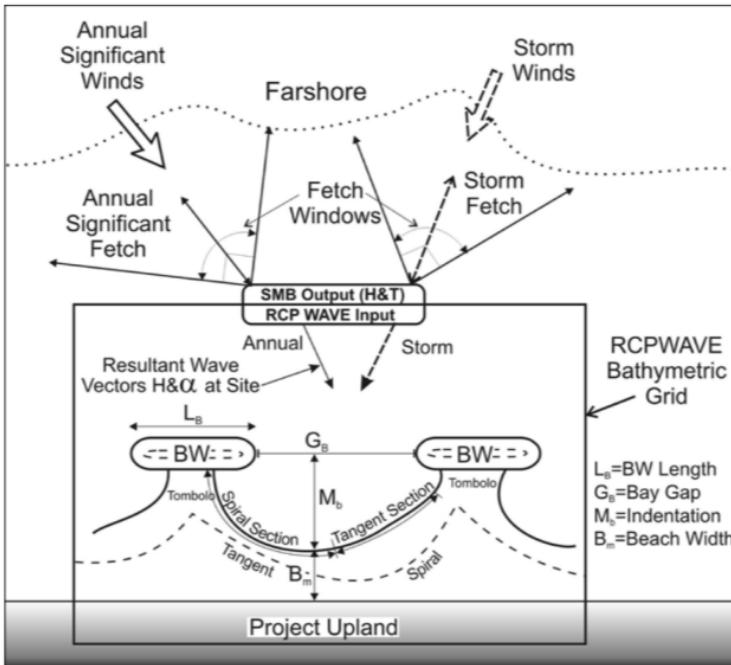
3.3.2 RELAÇÕES EMPÍRICAS DE HARDAWAY & GUNN (2011)

Hardaway & Gunn (2011) propõem relações empíricas entre L_B , G_B e M_b (Figura 11) para o projeto de quebra-mares em condições

específicas de ambiente. Para regime unimodal de ondas, os autores apresentam as seguintes relações:

- $M_b:G_B$ variando entre 1:1,6 e 1:2,5 (média de 1:1,9); e
- $L_B:G_B$ variando entre 1:1,5 e 1:2,0 (média de 1:1,2).

Figura 11 – Parâmetros relacionados a quebra-mares e forma de linha de costa



Fonte: HSU (2005)

4 RESULTADOS

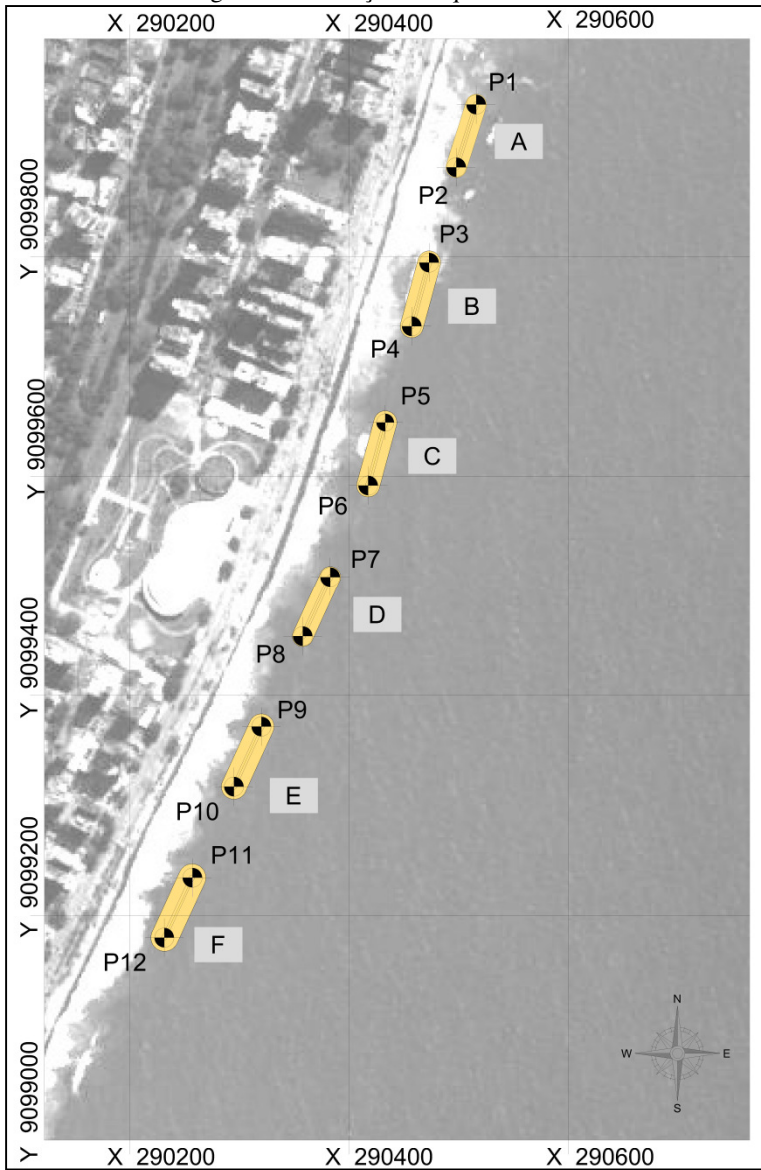
4.1 PREMISSAS

4.1.1 Localização das estruturas

Foi realizado o dimensionamento de seis quebra-mares localizados na praia de Boa Viagem em Recife (PE). A localização e *layout* dos quebra-mares tomaram como base os pontos de referência dos extremos das cabeças dos *t-heads* propostos pela CPE (atual CB&I) em projeto realizado no ano de 2011. As dimensões sofreram alterações por conta da nova inclinação de talude e elevações das estruturas adotadas.

A coordenadas planas dos pontos de base para cada uma das estruturas bem como a profundidade nestes locais encontram-se ilustradas na Figura 12 e listadas no Quadro 5. O Quadro 6 apresenta os comprimentos aproximados das estruturas, o espaço entre elas e a distância perpendicular à costa.

Figura 12 – Localização dos quebra-mares



Quadro 5 – Coordenadas de base para projeto dos quebra-mares

Identificação da estrutura	Ponto de base	Coordenadas		Profundidade média
		E	N	Z
A	P1	290515,6530	9099938,3600	2,0
	P2	290497,5310	9099881,2980	
B	P3	290472,7710	9099794,6270	2,6
	P4	290456,9080	9099736,7110	
C	P5	290432,7900	9099649,1580	2,6
	P6	290417,1830	9099591,8920	
D	P7	290382,6270	9099508,4220	2,0
	P8	290357,5600	9099453,9150	
E	P9	290319,9000	9099371,6440	3,4
	P10	290294,9070	9099317,0190	
F	P11	290256,7570	9099234,2070	3,3
	P12	290231,6470	9099179,7140	

O *datum* vertical adotado é o zero topográfico do IBGE;

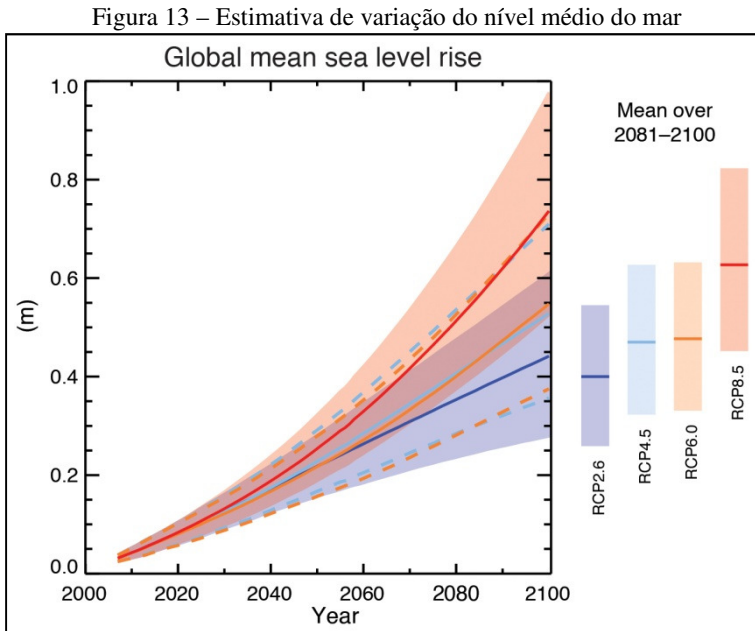
O *datum* horizontal adotado tem sistema de coordenadas UTM, SIRGAS 2000, Zona 25S.

Quadro 6 – Comprimentos e distâncias aproximadas dos quebra-mares em planta

Identificação da estrutura	Comprimento (L_B)	Distância à próxima estrutura (G_B)	Distância perpendicular à costa (até o enrocamento)
A	79 m	70 m	65 m
B	81 m	70 m	69 m
C	80 m	68 m	73 m
D	79 m	69 m	76 m
E	83 m	67 m	74 m
F	85 m	-	76 m

4.1.2 Nível de água ao pé da estrutura

Da mesma maneira proposta pela CPE em 2011, o nível da água (NA) adotado para o projeto foi o MLLW acrescido de 0,25 m devido à estimativa de elevação do nível médio do mar encontrada no gráfico da Figura 13 elaborado pela IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Logo, $NA = 0,16 + 0,25 = 0,41$ m (DHN).



Fonte: IPCC (2013).

4.1.3 Altura significativa de onda

Nota-se na Tabela 5 que as alturas significativas de onda são praticamente iguais para todos os períodos de retorno. Para este projeto adotar-se-á o valor de 1,22 m.

4.2 RESULTADOS OBTIDOS NO DIMENSIONAMENTO DOS QUEBRA-MARES

4.2.1 Quebra-mar A

Quadro 7 – Resultados obtidos no dimensionamento do quebra-mar A

Dados		Resultados		
H_s	1,22 m		$R_c = A_c$	1,1 m
T_p	8,0 s		s_{op}	0,012
T_m	6,0 s		s_{om}	0,022
h	2,41 m		ξ_p	4,52
h_c	3,5 m		ξ_m	3,39
talude	1V:2H		C_t	0,155
B	2,0 m		L	38,75 m
n_a	3		N_s	1,48
k_t	0,75		Δ	1,54
P	0,5		Tronco	D_{n50a}
N	7.500	r_D		0,94
S	2,0	D_{n50} adotado		0,53 m
$N_{od\ pé}$	0,5	M_{n50}		398,66 kg
$h_{pé}$	1,25 m	t_a		1,20 m
h_t	1,2 m	$D_{n50núcleo}$		0,23 m
g	9,81 m/s ²	$M_{n50núcleo}$		31,89 kg
ρ_a	2.600 kg/m ³	Cabeça		D_{n50a}
ρ_w	1.025 kg/m ³		M_{n50}	518,26 kg
			t_a	1,31 m
			$D_{n50núcleo}$	0,25 m
			$M_{n50núcleo}$	41,46 kg
		Pé	D_{n50a}	0,51 m

4.2.2 Quebra-mar B

Quadro 8 – Resultados obtidos no dimensionamento do quebra-mar B

Dados		Resultados			
H_s	1,22 m		$R_c = A_c$	1,0 m	
T_p	8,0 s		S_{op}	0,012	
T_m	6,0 s		S_{om}	0,022	
h	3,0 m		ξ_p	4,52	
h_c	4,0 m		ξ_m	3,39	
talude	1V:2H		C_t	0,184	
B	2,0 m		L	43,21 m	
n_a	3		N_s	1,54	
k_t	0,75		Δ	1,54	
P	0,5		Tronco	D_{n50a}	0,57 m
N	7.500			r_p	0,93
S	2,0			D_{n50} adotado	0,53 m
$N_{od\ pé}$	0,5			M_{n50}	379,73 kg
$h_{pé}$	1,25 m			t_a	1,18 m
h_t	1,3 m	$D_{n50nucleo}$		0,23 m	
g	9,81 m/s ²	$M_{n50nucleo}$		31,89 kg	
ρ_a	2.600 kg/m ³	Cabeça		D_{n50a}	0,57 m
ρ_w	1.025 kg/m ³		M_{n50}	493,60 kg	
			t_a	1,29 m	
			$D_{n50nucleo}$	0,25 m	
			$M_{n50nucleo}$	39,49 kg	
		Pé	D_{n50a}	0,52 m	

4.2.3 Quebra-mar C

Quadro 9 – Resultados obtidos no dimensionamento do quebra-mar C

Dados		Resultados			
H_s	1,22 m		$R_c = A_c$	1,0 m	
T_D	8,0 s		s_{op}	0,012	
T_m	6,0 s		s_{om}	0,022	
h	2,6 m		ξ_p	4,52	
h_c	4,0 m		ξ_m	3,39	
talude	1V:2H		C_t	0,184	
B	2,0 m		L	43,22 m	
n_a	3		N_s	1,51	
k_t	0,75		Δ	1,54	
P	0,5		Tronco	D_{n50a}	0,57 m
N	7.500			r_D	0,93
S	2,0			D_{n50} adotado	0,53 m
$N_{od_pé}$	0,5			M_{n50}	379,73 kg
$h_{pé}$	1,25 m	t_a		1,18 m	
h_t	1,8 m	$D_{n50núcleo}$		0,23 m	
g	9,81 m/s ²	$M_{n50núcleo}$		30,38 kg	
ρ_a	2.600 kg/m ³	Cabeça	D_{n50a}	0,57 m	
ρ_w	1.025 kg/m ³		M_{n50}	493,60 kg	
			t_a	1,29 m	
			$D_{n50núcleo}$	0,25 m	
			$M_{n50núcleo}$	39,49 kg	
		Pé	D_{n50a}	0,52 m	

4.2.4 Quebra-mar D

Quadro 10 – Resultados obtidos no dimensionamento do quebra-mar D

Dados		Resultados			
H_s	1,22 m		$R_c = A_c$	1,2 m	
T_p	8,0 s		S_{op}	0,012	
T_m	6,0 s		S_{om}	0,022	
h	2,4 m		ξ_p	4,52	
h_c	3,5 m		ξ_m	3,40	
talude	1V:2H		C_t	0,079	
B	2,0 m		L	38,75 m	
n_a	3		N_s	1,48	
k_t	0,75		Δ	1,54	
P	0,5		Tronco	D_{n50a}	0,57 m
N	7.500			r_D	0,94
S	2,0			D_{n50} adotado	0,54 m
$N_{od\ pé}$	0,5			M_{n50}	398,66 kg
$h_{pé}$	1,25 m	t_a		1,20 m	
h_t	1,2 m	$D_{n50núcleo}$		0,23 m	
g	9,81 m/s ²	$M_{n50núcleo}$		30,79 kg	
ρ_a	2.600 kg/m ³	Cabeça	D_{n50a}	0,58 m	
ρ_w	1.025 kg/m ³		M_{n50}	518,30 kg	
			t_a	1,31 m	
			$D_{n50núcleo}$	0,25 m	
			$M_{n50núcleo}$	41,46 kg	
		Pé	D_{n50a}	0,51 m	

4.2.5 Quebra-mar E

Quadro 11 – Resultados obtidos no dimensionamento do quebra-mar E

Dados		Resultados			
H_s	1,22 m		$R_c = A_c$	1,2 m	
T_D	8,0 s		s_{op}	0,012	
T_m	6,0 s		s_{om}	0,022	
h	3,4 m		ξ_p	4,52	
h_c	5,0 m		ξ_m	3,39	
talude	1V:2H		C_t	0,121	
B	2,0 m		L	48,45 m	
n_a	3		N_s	1,50	
k_t	0,75		Δ	1,54	
P	0,5		Tronco	D_{n50a}	0,57 m
N	7.500			r_D	0,96
S	2,0			D_{n50} adotado	0,53 m
$N_{od_pé}$	0,5			M_{n50}	384,89 kg
$h_{pé}$	1,25 m			t_a	1,19 m
h_t	2,6 m	$D_{n50núcleo}$		0,23 m	
g	9,81 m/s ²	$M_{n50núcleo}$		30,79 kg	
ρ_a	2.600 kg/m ³	Cabeça	D_{n50a}	0,58 m	
ρ_w	1.025 kg/m ³		M_{n50}	500,36 kg	
			t_a	1,30 m	
			$D_{n50núcleo}$	0,25 m	
			$M_{n50núcleo}$	40,03 kg	
		Pé	D_{n50a}	0,52 m	

4.2.6 Quebra-mar F

Quadro 12 – Resultados obtidos no dimensionamento do quebra-mar F

Dados		Resultados			
H_s	1,22 m		$R_c = A_c$	1,3 m	
T_p	8,0 s		S_{op}	0,012	
T_m	6,0 s		S_{om}	0,022	
h	3,3 m		ξ_p	4,52	
h_c	5,0 m		ξ_m	3,39	
talude	1V:2H		C_t	0,099	
B	2,0 m		L	47,83 m	
n_a	3		N_s	1,43	
k_t	0,75		Δ	1,54	
P	0,5		Tronco	D_{n50a}	0,57 m
N	7.500			r_D	0,97
S	2,0			D_{n50} adotado	0,55 m
$N_{od\ pé}$	0,5			M_{n50}	440,46 kg
$h_{pé}$	1,25 m	t_a		1,24 m	
h_t	3,0 m	$D_{n50núcleo}$		0,24 m	
g	9,81 m/s ²	$M_{n50núcleo}$		35,24 kg	
ρ_a	2.600 kg/m ³	Cabeça		D_{n50a}	0,60 m
ρ_w	1.025 kg/m ³		M_{n50}	572,60 kg	
			t_a	1,36 m	
			$D_{n50núcleo}$	0,26 m	
			$M_{n50núcleo}$	45,81 kg	
		Pé	D_{n50a}	0,53 m	

4.2.7 Resumo dos resultados

Quadro 13 – Resumo dos resultados obtidos no dimensionamento dos quebra-mares

		A	B	C	D	E	F
	Rc [m]	1,1	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3
TRONCO	D_{n50a} [m]	0,54	0,53	0,53	0,54	0,53	0,55
	M_{n50} [kg]	398,7	379,7	379,7	398,7	384,9	440,6
	t_a [m]	1,20	1,18	1,18	1,20	1,19	1,24
	D_{n50a núcleo} [m]	0,23	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24
	M_{n50núcleo} [kg]	31,9	30,4	30,4	31,9	30,8	35,2
CABEÇA	D_{n50a} [m]	0,58	0,57	0,57	0,58	0,58	0,60
	M_{n50} [kg]	518,3	493,7	493,7	518,3	500,4	572,6
	t_a [m]	1,31	1,29	1,29	1,31	1,30	1,36
	D_{n50a núcleo} [m]	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,26
	M_{n50núcleo} [kg]	41,5	39,5	39,5	41,5	40,0	45,81
PÉ	D_{n50a} [m]	0,51	0,52	0,52	0,51	0,52	0,53

4.3 RESULTADO DA ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DE LINHA DE COSTA

A Figura 14 apresenta a formação de linha de costa (linha e pontos azuis na imagem) obtida através do software Mepbay®. Para tal, considerou-se a direção predominante de ondas (ESE), o posicionamento das estruturas (portanto, ponto de difração de ondas) além de considerar como ponto de equilíbrio de praia aquele situado à meia distância da linha de costa aos quebra-mares (cerca de 35 m). Esta distância foi adotada devido a análises de fotos aéreas em outros momentos temporais, onde a costa apresentava-se estável nas proximidades destes pontos (meias distâncias).

Figura 14 – Análise de linha de costa através do software Mepbay®



Para a linha de costa obtida através do *software* Mepbay® (Figura 14) as relações empíricas de Hardaway & Gunn (2011) resultam em:

Quadro 14 – Aplicação das relações de Hardway & Gunn (2011) na para a linha de costa obtida no *software* Mepbay®

Praia de enseada	M_b:G_B	L_B:G_B
1a	1:2,2	1:0,9
1b		1:0,9
2a	1:2,0	1:0,9
2b		1:0,9
3a	1:1,9	1:0,9
3b		1:0,9
4a	1:1,8	1:0,9
4b		1:0,8
5a	1:1,8	1:0,8
5b		1:0,8

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1 GEOMETRIA DAS ESTRUTURAS

Todas as estruturas foram dimensionadas com talude de 1V:2H. Taludes mais inclinados, como por exemplo, de 1V:1,5H, não ofereceram a estabilidade necessária.

A altura da estrutura acima do NA variou entre 1,0 m e 1,2 m. Isso significa que, aproximadamente:

- a) 1 m da altura das estruturas são aparentes em MLLW;
- b) Em MSL apenas 0,30 m da altura da estrutura é aparente;
- c) Em níveis de água superiores ao MHHW as estruturas encontram-se submersas.

Dada a distância das estruturas à costa, para um observador situado na faixa de areia da praia, mesmo quando em níveis de maré inferiores ao MSL, as estruturas são praticamente imperceptíveis, atendendo ao requisito de interferirem o menos possível na paisagem.

Para todos os quebra-mares, a largura de coroamento de 2 m atendeu aos limites de validade da fórmula proposta por Van der Meer & Daemen (1994): $0,075 < C_t < 0,75$ (para quebra-mares convencionais, incluindo *low crested*).

5.2 ARMADURA

Os tamanhos de rocha dimensionados para o tronco de cada um dos quebra-mares apresentaram-se bastante próximos, na média de 430 kg. Portanto, para todos serão admitidas rochas na faixa de 400 a 500 kg, considerando tolerância de cerca de 10% em peso, conforme recomendação do CEM (CERC, 2000).

Para cálculo do tamanho de rocha da armadura da cabeça dos espigões, aplicou-se fator de incremento de 1,3 à massa nominal da rocha da armadura do tronco. Como os tamanhos nominais de rocha

obtidos foram similares entre os seis quebra-mares, serão admitidas rochas entre 450 e 600 kg, com tolerância aproximada de 10% em peso.

A largura da camada de armadura do tronco adotada será a mesma para todas as estruturas: 1,25 m. Essa é de cerca de duas vezes o diâmetro nominal da rocha componente, estando em conforme com o recomendado e metodologia adotada.

Para a cabeça, a largura da camada de armadura será maior em função do maior diâmetro nominal de rocha. Adotar-se-á largura de 1,50 m, ligeiramente mais conservadora que a largura média de 1,31 m calculada. Optou-se por alargar a camada em função da cabeça ser bastante submetida à energia das ondas, requerendo maior resistência, consideração esta conservadora.

5.3 SUB-CAPA E NÚCLEO

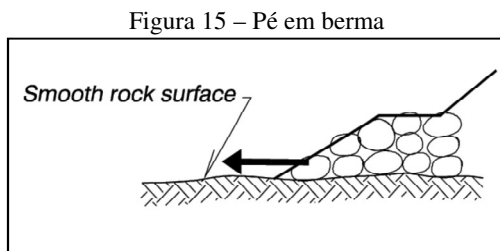
Em acordo à recomendação de Van der Meer (1995) e calculando o tamanho de rocha para a camada inferior à armadura, obtiveram-se rochas de massa de aproximadamente 32 kg para a sub-capa do tronco e 42 kg para a sub-capa da cabeça. Para o núcleo, as rochas seriam de 3 kg para o tronco, e 4 kg para a cabeça.

Na prática, executar tais camadas com tais tamanhos de rocha é bastante complicado, tanto pelo controle do tamanho dessas rochas, quanto pela quantidade de material perdido ao compor o núcleo. Assim, optou-se por incorporar ambos em uma única camada: abaixo da camada armadura, a estrutura será composta de rochas entre 1 kg e 100 kg, tanto para o tronco quanto para a cabeça. Esta decisão teve como base conversa da autora com profissional especialista na área e com vivência em grande número de projetos. A justificativa foi apoiada nas explicações fornecidas pela fonte.

Sub-capas com diâmetros maiores de rocha resultam em camadas mais permeáveis, logo, mais estáveis. Além disso, rochas maiores promovem maior embricamento entre as rochas do núcleo e da armadura, conferindo também maior estabilidade à estrutura.

5.4 PÉ E ACOMODAÇÃO DA ESTRUTURA

A finalidade de adoção de pé em berma na estrutura é suportar a armadura principal e prevenir danos causados pela erosão na base da estrutura. Dados geotécnicos do solo na base da estrutura são desconhecidos, portanto, admitiu-se que o solo tem suporte tal que permita a adoção de pé simples em berma, conforme Figura 15.

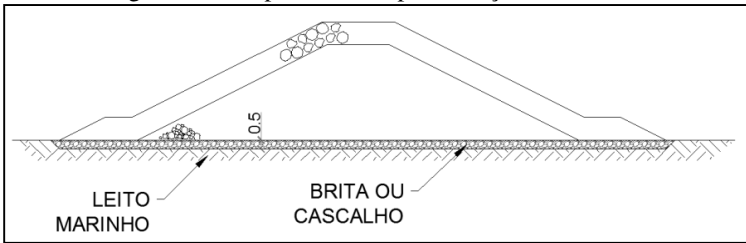


Fonte: CERC (2000).

Para maior facilidade construtiva, o tamanho de rocha adotado será o mesmo da armadura e a altura do pé igual à largura da faixa de armadura. Quanto ao comprimento do pé, admitiram-se comprimentos de 1,50 m em ambos lados da estrutura. Este comprimento respeita o mínimo de duas vezes o D_{n50} da rocha utilizada.

Para melhor acomodação da estrutura no leito marinho pode-se retirar uma camada de solo de cerca de 0,50 m de profundidade nas áreas onde as estruturas estão locadas. Esse espaço é então preenchido com brita ou cascalho (Figura 16).

Figura 16 – Preparo da base para locação da estrutura



Outra opção é a aplicação de manta geotêxtil sobre o leito marinho, dispensando a retirada da camada de solo e sendo de fácil execução. Ressalta-se que se deve atentar na colocação das rochas sobre a manta, evitando que danifiquem o produto.

5.5 SEÇÕES TRANSVERSAIS TÍPICAS

As figuras a seguir apresentam as seções transversais das cabeças e troncos dos seis quebra-mares dimensionados.

Figura 17 – Seção transversal típica da cabeça dos quebra-mares A e D

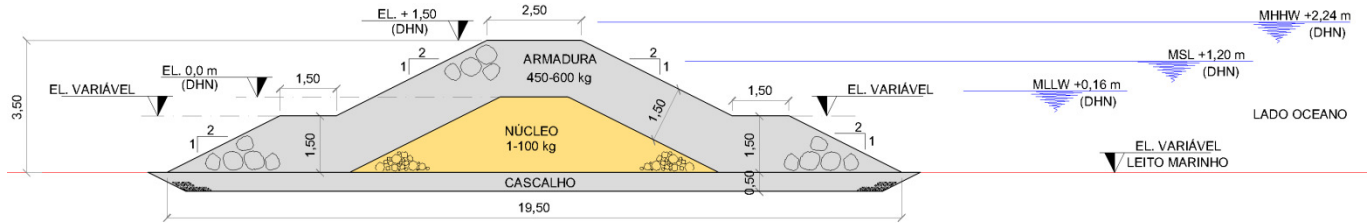


Figura 18 – Seção transversal típica do tronco dos quebra-mares A e D

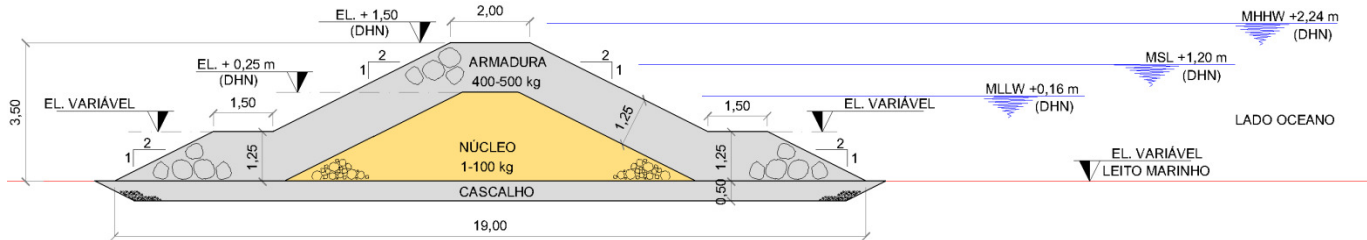


Figura 19 – Seção transversal típica da cabeça dos quebra-mares B e C

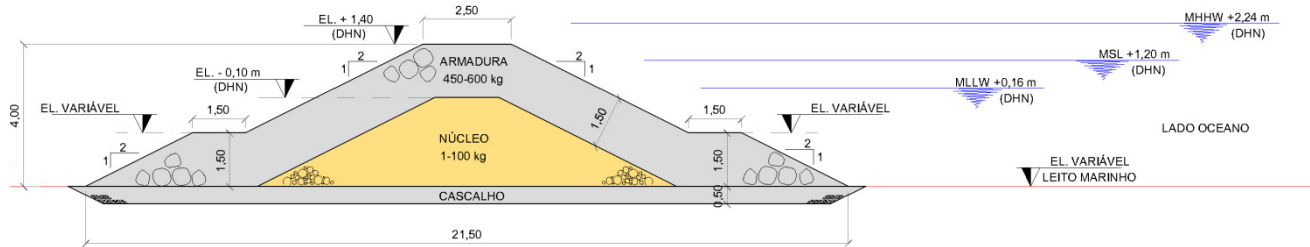


Figura 20 – Seção transversal típica do tronco dos quebra-mares B e C

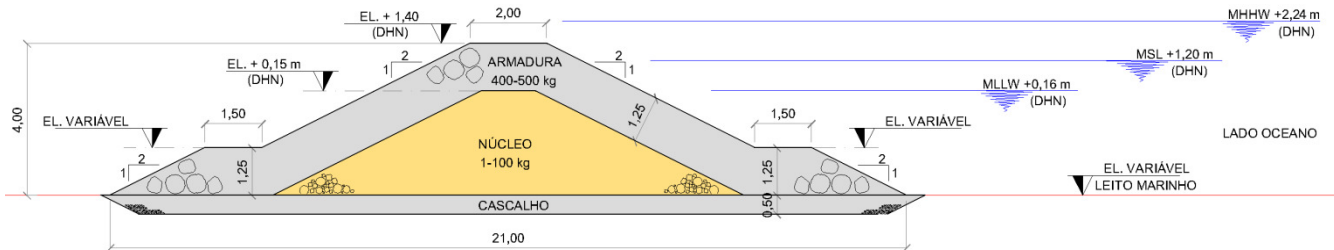


Figura 21 – Seção transversal típica da cabeça do quebra-mar E

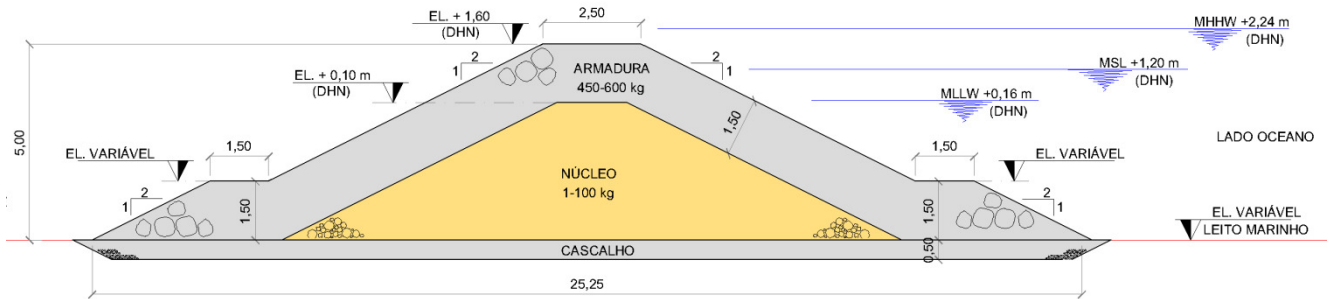


Figura 22 – Seção transversal típica do tronco do quebra-mar E

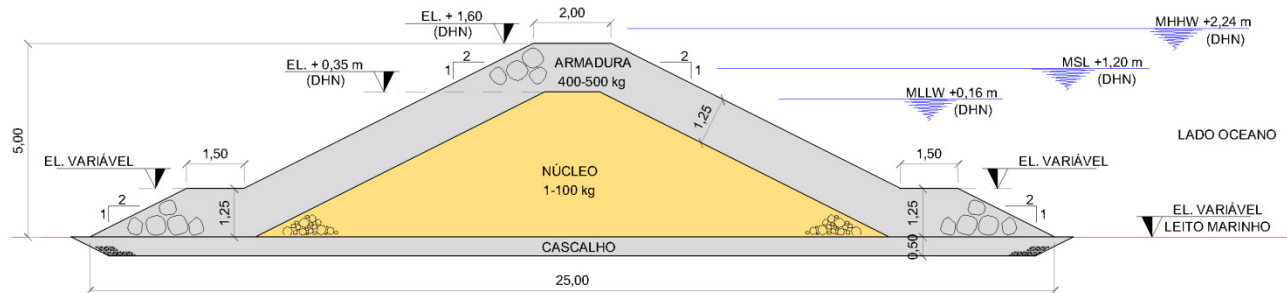


Figura 23 – Seção transversal típica da cabeça do quebra-mar F

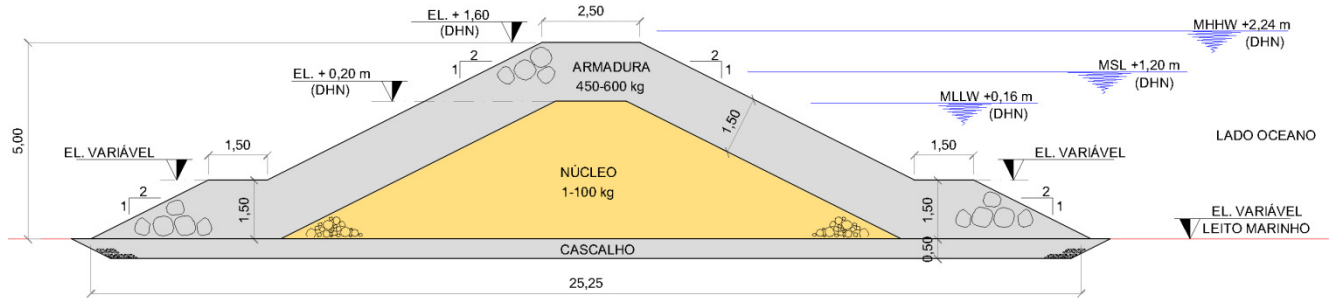
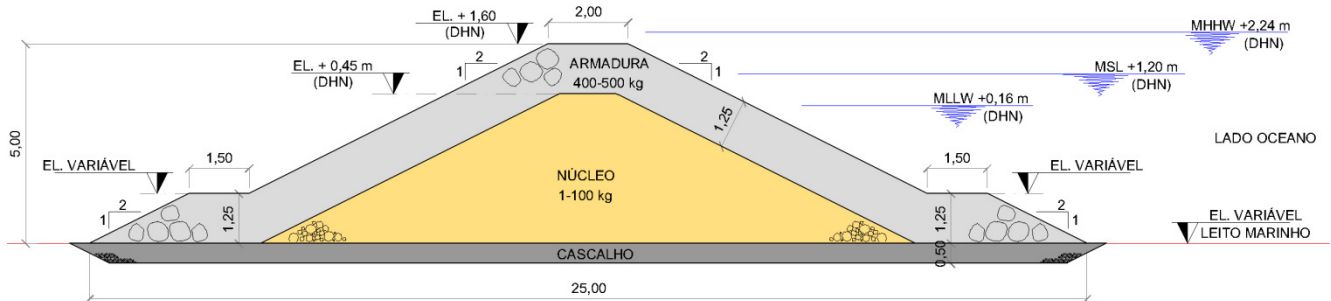


Figura 24 – Seção transversal típica do tronco do quebra-mar F



5.6 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Para comparação dos resultados obtidos para o diâmetro nominal de rocha (D_{n50}), calculou-se o para as estruturas através do *website* CRESS (<<http://www.cress.nl/Regel.aspx>>). Trata-se de uma iniciativa conjunta do Ministério de Infraestrutura e Desenvolvimento dos Países Baixos, da Universidade TU Delft e da UNESCO-IHE e contém rotinas para cálculo de fórmulas importantes para engenharia costeira e fluvial (CRESS, 2014).

A rotina adotada no CRESS foi a “*Submerged structures statically stable*” que engloba também estruturas *low-crested* emersas, uma vez que permite valores de R_c maiores que zero.

Os parâmetros de entrada são:

- a) H_s = altura significativa de onda [m]
- b) ρ_s = massa específica da rocha da armadura [kg / m^3];
- c) ρ_w = massa específica da água [kg / m^3];
- d) R_c = cota de coroamento da estrutura em relação ao SWL [m];
- e) Segmento do quebra-mar.

Como resultado a rotina fornece a massa nominal de rocha (M_{50}), e conseqüentemente, o diâmetro nominal de rocha (D_{n50}).

Foram calculados quatro casos, variando o parâmetro R_c . Os parâmetros de entrada e os resultados obtidos encontram-se no Quadro 15. A Figura 25 apresenta a interface do programa para um dos casos calculados e a Figura 26 apresenta exemplo de relatório emitido pelo CRESS.

Quadro 15 – Parâmetros de entrada e resultados obtidos em rotina de cálculo do CRESS

		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Parâmetros de entrada	H_s	1,22 m			
	ρ_s	2.600 kg/m ³			
	ρ_w	1.025 kg/m ³			
	R_c	1,00 m	1,10 m	1,20 m	1,30 m
	Segmento	<i>Total section</i>			
Resultados	M_{50}	581,1 kg	591 kg	598 kg	601 kg
	D_{n50}	0,61 m	0,61 m	0,61 m	0,61 m

Figura 25 – Interface do CRESS

The screenshot shows the CRESS software interface with the following details:

- Title Bar:** R7.1 Submerged structures statically stable [2.0] Coastal and River Engineering Support System
- Menu Bar:** Parameters, Graphic, Help
- Input Section:**
 - H_s : 1.22 m
 - ρ_s : 2600 kg/m³
 - ρ_w : 1025 kg/m³
 - R_c : 1.00 m
 - Segment breakwater: Total section (dropdown menu)
 - D_{n50} : 0.61 m
- Output Section:**
 - M_{50} : 581.1 kg
- Buttons:** Calculate, Save, Load, Graphic, Report

Figura 26 – Exemplo de relatório gerado pelo CRESS

R7.1 Submerged structures statically stable2.0		
Input		Output
		M_{50} 581.1 kg
H_s	1.22 m	
ρ_s	2600 kg/m ³	
ρ_w	1025 kg/m ³	
R_c	1.00 m	
Segment breakwater	Total section	
D_{n50}	0.61 m	

Em comparação aos resultados obtidos no cálculo através da metodologia indicada no item 3.2 percebe-se que o CRESS forneceu resultados mais conservadores (Quadro 16), próximos aos resultados obtidos antes de reduzir o D_{n50} através do fator r_D e próximos também ao D_{n50} da cabeça dos quebra-mares, que, na metodologia, foram majorados em função de sofrerem maiores solicitações.

Quadro 16 – Comparação de resultados

		Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Metodologia descrita no item 3	D_{n50} tronco antes de aplicar o r_D	0,57 m	0,57 m	0,57 m	0,57 m
	D_{n50} tronco com r_D	0,53 m	0,54 m	0,53 m	0,55 m
	D_{n50} cabeça com r_D	0,57 m	0,58 m	0,58 m	0,60 m
CRESS	M_{50}	581 kg	591 kg	598 kg	601 kg
	D_{n50}	0,61 m	0,61 m	0,61 m	0,61 m

OBS.: Caso 1 \approx quebra-mares B e C, Caso 2 \approx quebra-mares A e D, Caso 3 \approx quebra-mar E e Caso 4 \approx quebra-mar F.

5.7 VOLUMES ESTIMADOS DE MATERIAL

Com base nas seções transversais típicas e comprimentos dos quebra-mares foi possível estimar a quantidade de material necessária a execução da obra. Considerou-se perda em 15% de volume, decorrente das atividades de execução que podem ocasionar em quebra de blocos, não atendendo mais aos requisitos de projeto. O Quadro 17 apresenta os resultados dos cálculos desses volumes.

Quadro 17 – Volumes estimados de material

	VOLUMES [m³]			
	ARMADURA		NÚCLEO	PREPARO DA BASE
	Cabeça	Tronco		
A	471,6	1.320,0	1.926,6	1.501,5
B	590,0	1.488,0	2.880,0	1.696,0
C	590,0	1.488,0	2.880,0	1.696,0
D	471,6	1.320,0	1.926,6	1.501,5
E	796,4	1.818,0	5.256,2	2.070,5
F	868,8	1.818,0	5.384,4	2.121,0
Total	3.788,4	9.252,0	20.253,8	10.586,5
Total considerando perda	4.456,9	10.884,7	23.828,0	12.454,7

Ressaltando que os materiais são:

Quadro 18 – Descritivo de materiais

Armadura	Cabeça	Rochas 450-600kg
	Tronco	Rochas 400-500kg
Núcleo		Rochas 1-100kg
Preparo da base		Brita ou cascalho

5.8 MÉTODOS CONSTRUTIVOS

Quebra-mares *low-crested* podem ser construídos por terra ou por água ou pela combinação entre ambos. Por terra, constroem-se aterros de conquista, partindo do continente até a estrutura, para que equipamentos de terra como caminhões, escavadeiras e guindastes possam circular. Finalizada a construção do quebra-mar, essa estrutura de acesso é removida. Como vantagem tem-se a maior velocidade de execução, uma vez que dependendo da elevação da estrutura, pouco ou nada da execução é influenciada pelos níveis de maré e clima de ondas; e o material que chega da jazida através de caminhões é diretamente levado pelos próprios veículos até a estrutura, não havendo necessidade de embarcar o material. Como desvantagem, têm-se os custos da construção da estrutura temporária e a dificuldade da completa remoção da mesma (quando em rocha), na qual o material remanescente pode causar acidentes a quem frequenta o local.

Outra opção é, em caso de associar estruturas rígidas à alimentação artificial de praia, utilizar o próprio material da alimentação para construir o aterro de conquista. No entanto, nem sempre a alimentação artificial da praia antecede a construção de estruturas rígidas, pois pode haver grande perda de material.

Figura 27 – Início da construção de aterro de conquista



Fonte: disponível em < <http://aniessen.home.xs4all.nl/cien/jpg/crsp/crsp09.jpg>>.

Acesso em: 10 nov. 2014

Figura 28 – Construção de quebra mar por terra



Fonte: disponível em
<http://dc351.4shared.com/doc/52Y51X0e/preview_html_m2363c963.gif>
Acesso em: 10 nov. 2014.

No caso de construção por água, a obra é feita com o auxílio de barcaças e equipamentos embarcados. Esse método é preferível em regiões de águas calmas e de profundidades superiores a 3-4 metros (BURCHARTH *et al*, 2007). Normalmente, a barcaça que traz o material (batelão) é diferente daquela que posiciona o mesmo. Assim, a última permanece no local realizando o trabalho enquanto a outra realiza os ciclos de carga, transporte e descarga do material.

A colocação de materiais como cascalho pode ser feita com auxílio de dragas auto transportadoras de arrasto e sucção, enquanto camadas de materiais intermediários como a do núcleo podem ser executadas com barcaças *hopper*, que despejam o material no devido local. As rochas da armadura são colocadas com o apoio de guindaste embarcado, garantindo o correto posicionamento das rochas e a largura projetada.

Figura 29 – Construção de quebra-mar através de guindaste embarcado



Fonte: disponível em

<<http://www.choctawtrans.com/ag7217c050016/Capping%20the%20last%20of%20the%20East%20Groin.jpg>> Acesso em: 10 nov. 2014.

Figura 30 – Batelão e guindaste atuando em conjunto na construção de quebra-mar



Fonte: disponível em < <http://2.bp.blogspot.com/-AD8hJhVIFw4/Tn8DZPal6OI/AAAAAAAAAEw/9eHKLvolqyo/s1600/break+water+construction.JPG>> Acesso em: 10 nov. 2014.

Para a obra em estudo propõe-se estudar a viabilidade técnica e econômica para realizar a obra por água. Essa alternativa pode evitar a necessidade de ter um canteiro de obra na praia, que pode ser incômodo aos usuários do local. Ainda, reduz a probabilidade de restar materiais em locais indesejados no leito marinho, que poderiam provocar acidentes aos banhistas.

Existe uma pedreira nas proximidades de Jaboatão dos Guararapes (PE). Uma possível sequência executiva seria o fornecimento de rochas por esta pedreira, que seria transportado por caminhões basculantes até um ponto da desembocadura do rio Jaboatão, onde o material seria embarcado em batelões. A partir dali, seria levado, por água, até o local da obra, distante em cerca de 20 km. No local da obra haveria outra embarcação com os equipamentos necessários a cada fase de obra como escavadeiras e guindastes. Ressalta-se que estas atividades devem estar em acordo ao ciclo de marés, para operação segura das atividades.

5.9 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA LINHA DE COSTA

O posicionamento dos quebra-mares na costa e sua interação com as ondas incidentes resultaram na formação de saliências que separam as pequenas praias de enseada formadas entre as estruturas. Não é considerada a formação de tómbolos uma vez que há momentos em que as estruturas encontram-se submersas sofrendo bastante *overtopping*, o que pode não permitir que sedimentos acumulem e a linha de costa atinja as estruturas.

Percebe-se que os trechos mais próximos à linha de costa não atingiram as regiões de ocupação antrópica, resultado em acordo ao desejado, mais especificamente, garantem que a parte central dos embaiamentos indentem até o muro de contenção (*revetment*) existente após a praia entrar em equilíbrio em perfil e em planta.

Em comparação à forma de praia resultante da colocação dos *t-heads*, propostos pela CPE (atual CB&I) em 2011, percebe-se pouca

diferença em planta. Porém, lembra-se que a análise realizada pela CPE (2011) foi mais completa e abrangente que aquela realizada pela autora.

Nota-se que o grau de indentação (M_b) obtido no *software* Mepbay é corroborado pela relação $M_b:G_B$ proposta por Hardaway & Gunn (2011), uma vez que encontra-se dentro de seus limites (1:1,6 e 1:2,5). No entanto, a relação entre os comprimentos dos quebra-mares (L_B) e os espaçamentos entre eles (G_B) mostra-se mais conservadora (menor) que o recomendado pelos autores, i.e., segundo a variação recomendada para $L_B:G_B$, os quebra-mares poderiam estar mais espaçados e/ou ter menor comprimento. Ressalta-se que ajustar L_B e/ou G_B pode influenciar no grau de indentação (M_b), sendo que todos devem ser observados em conjunto.

6 CONCLUSÃO

Em cumprimento aos objetivos deste trabalho, foi estudado e dimensionado um campo de quebra-mares com a finalidade de conter a erosão costeira na Praia de Boa Viagem, em Recife, PE. Essas estruturas são uma entre diversas alternativas possíveis de se abordar os problemas causados pela erosão costeira.

As estruturas foram projetadas com base em manuais e artigos correspondentes ao tema de estudo e a geometria final obtida permite enquadrar todas na categoria de obras costeiras *low-crested*. Trata-se de um projeto de fase conceitual que fornece subsídios a estudos de viabilidade social, técnica e econômica para escolha da solução que melhor se enquadra às necessidades do município.

Análises de comportamento de linha de costa verificaram a formação de tómbolos nas sombras dos quebra-mares, e também a formação de pequenas praias de enseada entre as estruturas. Dessa forma, atenderam ao objetivo de reduzir a perda de sedimentos, e por consequência, a retração da linha de costa. No quesito estrutural, as geometrias obtidas são comprovadas empiricamente estáveis para os critérios de projeto assumidos.

Foram apresentados ainda, de forma sucinta, métodos construtivos para tais estruturas. A execução de obras costeiras varia conforme as particularidades de cada caso e ressalta-se que o sucesso do projeto em cumprir seus objetivos está intrinsecamente associado à qualidade de sua execução.

Dada a importância do tema, os resultados obtidos e a necessidade de contribuições ao trabalho realizado, é pertinente aprofundar e continuar os estudos aqui apresentados. Desta forma, sugere-se em trabalhos futuros:

- a) Revisitar e detalhar o estudo do comportamento da linha de costa frente ao *layout* adotado;
- b) Realizar ensaios de modelagem numérica e/ou física para confirmação e/ou otimização dos resultados obtidos;

- c) Estudar diferentes métodos executivos para as estruturas adequando ao cronograma de execução.

REFERÊNCIAS

BURCHARTH, H. F., HAWKINS, S. J., ZANUTTIGH, B. & LAMBERTI, A.. **Environmental Design Guidelines for Low Crested Coastal Structures**. 1ª ed. Elsevier. 2007.

CERC. **Functional Design of Breakwaters for Shore Protection: Empirical Methods**. Vicksburg, 1990.

CERC. **Coastal Engineering Manual**. Estados Unidos, 2000.

CIRIA, CUR & CERMEF. **The Rock Manual: the use of rock in hydraulic engineering**. 2nd ed. London: C683, CIRIA, London. 2007.

COASTAL MORPHOLOGY GROUP. **Living with coastal change - coastal basics**. 2003. Disponível em http://coastalchange.ucsd.edu/st3_basics/beaches.html Acesso em 24 Out. 2014.

COSTA, M. & SOUZA, S. T.. **A Zona Costeira Pernambucana e o caso especial da Praia de Boa Viagem**. Londrina, 2002.

CPE. **Alternativas de Obras de Proteção Costeira - Projeto Básico de Engenharia para o Município de Recife – PE**. Florianópolis, 2011.

CRESS. **Coastal and River Engineering Support System**. Disponível em: <http://www.cress.nl/About.aspx> Acesso em 24 Nov. 2014.

DAILY MAIL. **Mail Online News**. 2011. Disponível em: <http://www.dailymail.co.uk/news/article-2052475/Entries-years-Environmental-Photographer-Year-Competition.html> Acesso em 26 Out. 2014.

ESCP. **Coastal Flooding & Erosion Risk**. 2014. Disponível em: <http://www.escp.org.uk/coastal-flooding-erosion-risk-management> Acesso em 28 Out. 2014.

MAI. **Monitoramento Ambiental Integrado, PE - Relatório Final, Recife – PE**. FINEP, 2009.

GORE, A. **O Futuro**. 1a ed. São Paulo: HSM Editora.2013.

HARDAWAY, C. S. & GUNN, J. R. **A brief history of headland breakwaters for shore protection in Chesapeake Bay, USA.** *Shore & Beach*, Vol. 78 (4) e Vol. 79 (1). 2011. 26-34 pp.

HINRICHSEN, D. **Coastal Waters of the World: Trends, Threats, and Strategies.** Washington D.C.: Island Press. 1998.

HSU, J. R. C.; BENEDET, L.B.; KLEIN, A. H. F.; RAABE, A. L. A.; TSAI, C. P. & HSU, T. W. **Appreciation of Static Bay Beach Concept for Coastal Management and Protection.** *Journal of Coastal Research*, Vol. 23 (5), United States, 2007.

HSU, J. R. C. **Engineering Applications of Coastal Geomorphology.** Springer. Netherlands, 2005.

HSU, J. R.-C. & EVANS, C. **Parabolic bay shapes and applications.** London, ICE. 1989.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis.** 2013. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/report/graphics/index.php?t=Assessment%20Reports&r=AR5%20-%20WG1&f=Chapter%2013>> Acesso em 2 Nov. 2014.

ITEP. **RIMA - Relatório de Impacto Ambiental - Recuperação da Orla Marítima Municípios de Jaboatão dos Guararapes, Recife e Olinda (Pernambuco).** 2012. Disponível em: http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/rima_recuperacao_orla_maritima.pdf . Acesso em 20 Nov. 2014.

KOERNER, K. F.; OLIVEIRA, U. R.; GONÇALVES, G.. **Efeito de estruturas de contenção à erosão costeira sobre a linha de costa: Balneário Hermenegildo, Rio Grande do Sul, Brasil.** 2013. *Revista da Gestão Costeira Integrada* 13 (4), 457-471 pp.

MAI, C. I. P. **Apresentação: MAI - Erosão Costeira.** MMA. 2007. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/219/_arquivos/populao_zona_costeira.pdf> Acesso em 26 Out. 2014.

MAI. Monitoramento Ambiental Integrado, PE. FINEP/UFPE Relatório Final – Vols. 1, 2 e 3. Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, Recife - PE, Brasil, 2009. 485 pp.

MAPLAC. Mapeamento Sonográfico e batimétrico da Plataforma Continental interna adjacente aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes-PE para a caracterização da dinâmica erosiva da região da região - MCT/UFPE. Relatório Final. Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT, Recife - PE, Brasil, 2010. 32 pp.

NOAA. NOAA's State of the Coast. Disponível em: <<http://stateofthecoast.noaa.gov/population/welcome.html>> Acesso em 26 Out. 2014. 2013

OLIVEIRA, S. M. C.. Evolução Recente da Linha de Costa no Troço Costeiro Forte Novo – Garrão (Algarve). Tese (Mestrado) – Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Lisboa, 2005.

PROCOSTA, Processos Erosivos na Costa dos Municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, Brasil - MCT/UFPE. Relatório Final. Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT, Recife - PE, Brasil, 2010. 153 pp.

SILVEIRA, L. F., KLEIN, A. H. d. F. & TESSLER, M. G. Headland-bay beach planform stability of Santa Catarina State and of the Northern Coast of São Paulo State. Brazilian Journal of Oceanography, 58(2). 2010

Tho, D. Paper Blog. 2013. Disponível em <<http://es.paperblog.com/paseo-por-pedregalejo-2235300/>> Acesso em 28 Out. 2014.

USGS. Coastal Change Hazards: Hurricanes and Extreme Storms. 2014. Disponível em: <<http://coastal.er.usgs.gov/hurricanes/erosionhazards/>> Acesso em 28 Out. 2014.

VAN DER MEER, J. W. **Conceptual design of rubble mound breakwaters**. World Scientific. Advances in Coastal and Ocean Engineering. P. L. F. Liu. 1995. pp. 221-315.

VAN DER MEER, J. W. & DAEMEN, I. **Stability and wave transmission at low crested rubble mound structures**. ASCE, J. of WPC & OE, 120 (Jan/Fev). 1994. pp. 1-19.

VAN DER MEER, J. W. & PILARCZYK, K. W. **Stability of low-crested and reef breakwaters**. Delft, 1990.

WILLIAMS, S. J. **Coastal Erosion and Land Loss Around the United States: Strategies to Manage and Protect Coastal Resources – Examples from Louisiana**. Woods Hole, MA, United States. 2001. USGS, Coastal and Marine Geology Program.

KUANG, C.; HE, L.; GU, J.; PAN, Y.; ZHANG, Y.; QIU, R. & ZHANG, J. **Effects of Submerged Breakwater on Hydrodynamics and Shoreline Change of the East Beach of Beidaihe, Bohai Bay, China**. *Journal of Coastal Research*, Vol. 30 (3), United States, 2014.

APÊNDICE A – REFERENCIAL TEÓRICO

1 ZONA COSTEIRA

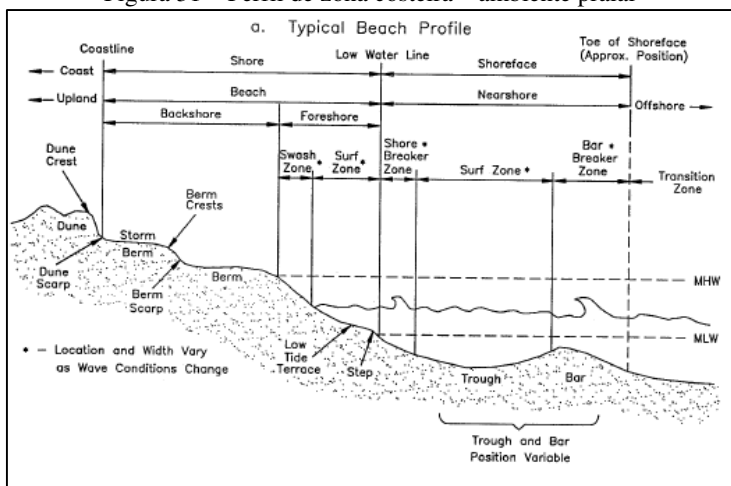
1.1 DEFINIÇÃO E CONCEITOS GERAIS

O *Coastal Engineering Manual* (CERC, 2000) define zona costeira (ZC) como a região de encontro entre terra e água, diretamente influenciada por processos hidrodinâmicos marítimos ou lacustres.

Zonas costeiras são ambientes extremamente diversificados e dinâmicos por conta dos processos físicos, geológicos, biológicos e antropológicos ao quais estão submetidas. Deltas, estuários, praias, dunas, lagunas, planícies de marés, restingas, entre outros, fazem parte das inúmeras feições que compõe a ZC.

A divisão da ZC em subzonas é complexa devido à alta variabilidade sofrida por esse espaço, que mantém seus os limites em constante movimento. Além disso, existem diversas definições e dificultando uma análise abrangente e única. No *Coastal Engineering Manual* (CERC, 2000) está apresentada uma divisão baseada principalmente em critérios geológicos, caracterizando a zona costeira em quatro principais áreas: costa, orla, zona litorânea e plataforma continental. A Figura 31 apresenta essa divisão.

Figura 31 – Perfil de zona costeira – ambiente praiaal



Fonte: CERC (2000).

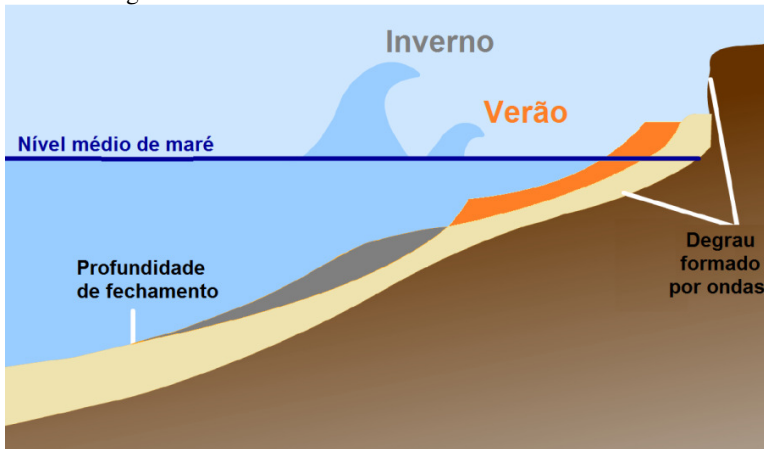
1.1.1 Ondas

Ondas que incidem na costa têm períodos entre 03 e 25 segundos e são geradas pelo vento agindo na interface entre o oceano e a atmosfera (CERC, 2000). Quando passa a sentir o fundo, a energia das ondas suspende e dispersa materiais do fundo marinho em sentido a terra (*onshore*), ao mar (*offshore*) e paralelamente à praia (transporte litorâneo). As ondas são responsáveis também por grande parte das solicitações de força às quais as estruturas costeiras estão submetidas.

O regime de ondas varia sazonalmente, e com ele, o perfil da praia, que busca o equilíbrio em relação às variações do regime hidrodinâmico e hidráulico (Figura 32). Durante o verão o regime de ondas tem menor intensidade de energia, conseqüentemente, o transporte de sedimento passa a ocorrer em direção à praia, e a areia tende a se acumular na parte subaérea do perfil. Durante o inverno, as ondas com maior quantidade de energia, transportam o sedimento em sentido *offshore*, formando bancos de areia submersos e alterando o perfil de praia de verão. Em casos de tempestades de ondas, grandes volumes de areia são retirados da costa e muitas vezes depositados na parte submersa da praia ativa, podendo ter volumes parcialmente

perdidos, ou seja, que não retornam para a parte aérea do perfil (COASTAL MORPHOLOGY GROUP, 2003). A variação do perfil praial devido à ação das ondas tem, como limite *offshore*, a profundidade de fechamento.

Figura 32 – Movimento sazonal de sedimentos na costa

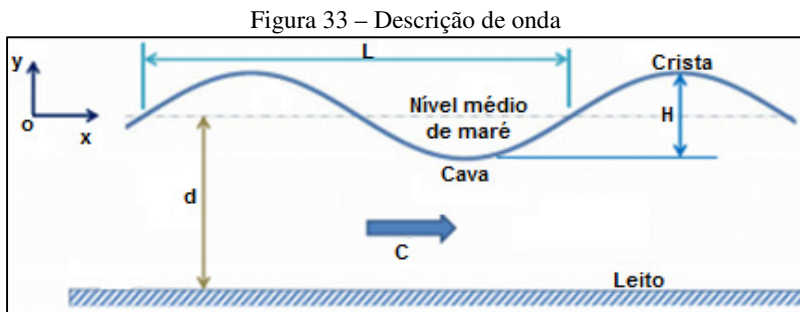


1.1.1.1 Mecânica de Ondas

A mecânica de ondas pode ser descrita por diversas teorias, agrupadas em teorias lineares, como a teoria de Airy, ou não lineares, como a teoria de Stokes e a teoria da onda senoidal. Teorias lineares são aproximações mais simplificadas, porém na prática mostram-se aplicáveis e com resultados satisfatórios, principalmente onde processos não lineares não são muito significativos. Para engenharia costeira, as teorias lineares atendem com aceitável exatidão e fornecem na maioria dos casos estimativas aceitáveis de regime de ondas.

A Figura 33 apresenta uma onda simples em passagem por um dado ponto do oceano, de fundo horizontal e profundidade (d). O ponto mais alto da onda é denominado crista, e o mais baixo, cava. A onda é caracterizada por uma altura (H), medida verticalmente da crista a cava; comprimento (L), medido horizontalmente de crista a crista ou cava a

cava; e período (T), dado pelo tempo de passagem de duas cristas (ou cavas) consecutivas por um mesmo ponto no espaço.

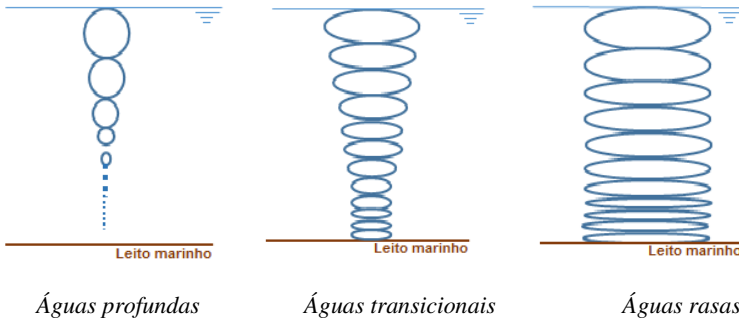


Outro parâmetro associado às ondas é a velocidade individual de onda ou celeridade (C), dada pela relação entre comprimento e período.

Os parâmetros adimensionais “ H/d ”, “ d/L ” e “ H/L ” são comumente utilizados na prática de engenharia costeira para descrever as ondas de projeto. Se multiplicados pelo fator “ 2π ”, as relações “ d/L ” e “ H/d ” podem ser tratadas por k_d e k_a , respectivamente.

As ondas provocam movimento das partículas de água. Em águas profundas, as partículas se movimentam em círculos ao longo da coluna de água, e essa trajetória circular decresce exponencialmente com o aumento da profundidade, sendo praticamente nula próxima ao leito marinho. Conforme a profundidade diminui e a ondulação passa a sentir o fundo, em águas intermediárias, a trajetória circular passa a se tornar elíptica e atinge o fundo, até chegar em águas rasas, onde passa a ter magnitude horizontal constante. A Figura 34 apresenta as trajetórias descritas acima.

Figura 34 – Descrição da trajetória da partícula de água



Fonte: elaborado pela autora.

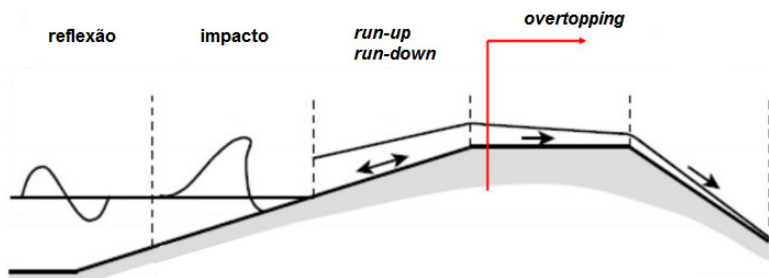
O tipo de movimentação de partículas de água caracteriza o movimento ou não de sedimento do fundo marinho. Em águas rasas, o movimento é bastante intenso devido à quebra de ondas na região, que gera energia e turbulência responsáveis pelo desprendimento e movimentação de grandes porções de sedimento (CERC, 2000). Já em águas profundas, como o movimento de partículas de água no fundo é nulo, não há movimento de sedimento no leito marinho.

Demais influências dos parâmetros de ondas para a engenharia serão discutidas na metodologia de cálculo da estrutura tema desta monografia.

1.1.1.2 Principais parâmetros de ondas para projetos de engenharia costeira e de navegação

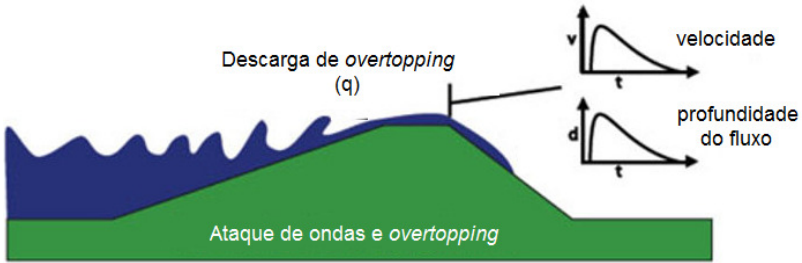
Para projetos de engenharia os parâmetros hidráulicos de maior importância em relação à interação onda-estrutura são: *overtopping*, *run-up*, *run-down*, transmissão e reflexão de ondas. A Figura 35 apresenta o ataque de uma onda à estrutura e os fenômenos relacionados a este evento.

Figura 35 – Processo de interação onda-estrutura



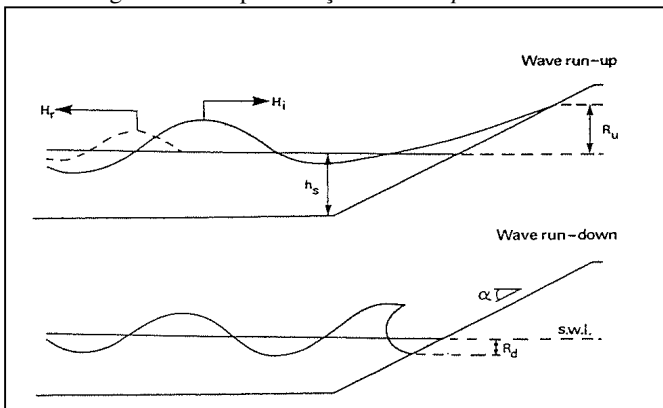
Fonte: adaptado de Van der Meer (2014).

O fenômeno de *overtopping* ocorre quando o nível de *run-up* excede a cota de topo de uma estrutura, ou seja, a onda passa por cima da estrutura. A descarga de *overtopping*, representada por q (m^3/s a cada 1 metro de comprimento) é determinante na definição da cota de topo de muitas estruturas hidráulicas (CIRIA, et al., 2007). A determinação do parâmetro de *overtopping* leva em consideração as características de onda e vento locais e a geometria da estrutura. Os limites aceitáveis de *overtopping* são determinados conforme o nível aceitável de danos, a finalidade de uso da estrutura (ex.: abrigo de marinas, enrocamentos, construções...) e/ou existência de passagem de pedestres e/ou veículos (CIRIA, et al., 2007). Para dimensionamento de estruturas são analisados valores de descarga de *overtopping* em situação normal de serviço e situação de eventos extremos, onde certo nível de dano à estrutura e estruturas adjacentes seja aceito (CERC, 2000). A Figura 36 apresenta a descarga de *overtopping* decorrente do ataque de ondas a uma estrutura.

Figura 36 – Representação de *overtopping*

Fonte: adaptado de Van der Meer (2014)

Segundo o *Coastal Engineering Manual* (CERC, 2000) *run-up* (R_u) é a máxima elevação atingida verticalmente pela onda acima do nível médio do mar e *run-down* (R_d), a mínima (Figura 37), adotando-se o valor mais representativo de cada um deles. Comumente são apresentados na forma adimensional, divididos pela altura significativa de onda (H_s): $R_{un\%}/H_s$ e $R_{dn\%}/H_s$.

Figura 37 – Representação de *run-up* e *run-down*

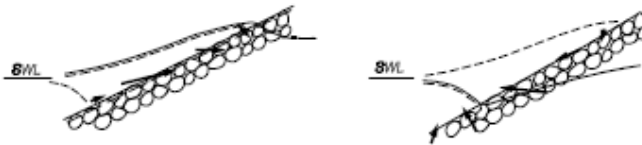
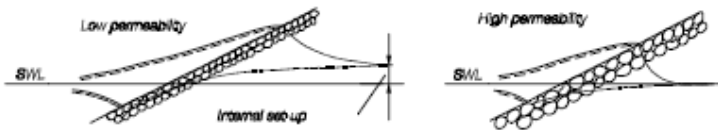
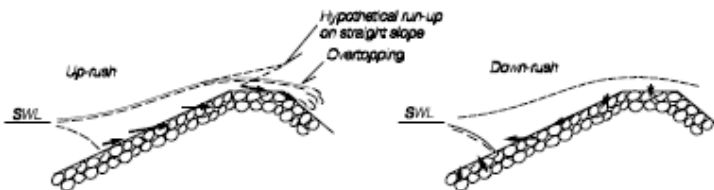
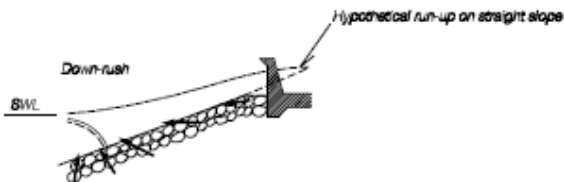
Fonte: Van der Meer (1995).

Esses fatores dependem do estado de agitação do mar, da altura e direção da onda incidente e sua interação com a onda refletida, bem como o ângulo, rugosidade e porosidade da superfície de incidência.

Superfícies mais porosas apresentam menores valores de *run-up* uma vez que grande parte do fluxo incidente é absorvido pela estrutura. A penetração de água nos poros da estrutura leva ao aumento da poropressão, fenômeno que aumenta as forças instabilizantes da armadura. No entanto, essa instabilidade é compensada pela redução do fluxo interno de água, decorrente também da absorção de significativos volumes de água pela estrutura (CERC, 2000).

Por outro lado, superfícies mais impermeáveis estão sujeitas a maiores elevações de *run-up*, devido à menor absorção de água.

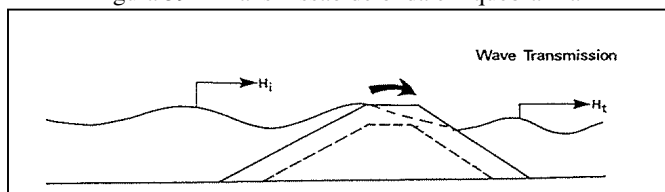
A ocorrência de *overtopping* reduz o *run-down*, uma vez que parte da onda incidente não retorna, reduzindo a instabilidade da estrutura. Tem-se como exemplo estruturas de elevações mais baixas, como quebra-mares *low-crested*, nos quais a cota de topo é menor que a cota de *run-up*, apresentando velocidades de *run-down* bastante reduzidas em função de significativa parcela das ondas incidentes resultarem em *overtopping* (caso representado no item “d” da Figura 38).

Figura 38 – *Run-up e Run-down*a) *Up- and down-rush on impermeable slope*b) *Up- and down-rush on permeable slope*c) *Illustration of variation in internal water table*d) *Reduced down-rush on low-crested breakwaters*e) *Increase in down-rush velocities due to reflection from parapet wall*

Fonte: Burcharth (1993).

A relação entre a altura de onda incidente na estrutura e a altura de onda transmitida após essa interação é dada pelo coeficiente C_t (Figura 39). Esse fator está diretamente relacionado à permeabilidade da estrutura: quanto maior a permeabilidade de uma estrutura, maior a transmissão interna de ondas. Em estruturas de abrigo, como aquelas de proteção a portos (BURCHARTH, et al., 2007), marinas e canais de acesso, níveis excessivos de transmissão de ondas podem prejudicar a navegação e atracação de embarcações.

Figura 39 – Transmissão de onda em quebra-mar



Fonte: Van der Meer (1995).

A reflexão de ondas ocorre em praticamente todas as estruturas. Quanto mais impermeável a estrutura, maior a porção de ondas incidentes refletidas. O nível de reflexão de onda é descrito pelo coeficiente C_r , dado pela relação entre a altura de onda refletida e a altura de onda incidente. Assim como a transmissão de ondas, níveis elevados de reflexão de ondas podem dificultar a navegação e inclusive, ocasionar acúmulo e/ou erosão de sedimento (CERC, 2000).

1.1.2 Praias

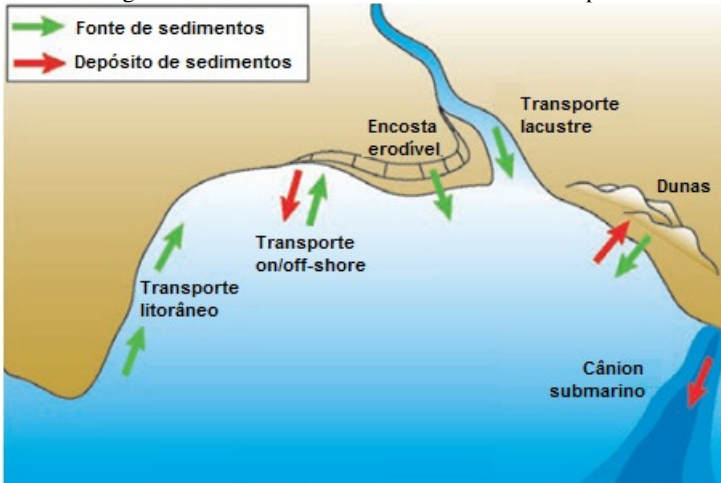
1.1.2.1 Balanço de sedimentos

As zonas costeiras são compostas de células litorâneas, que podem ser compreendidas como compartimentos independentes com suas próprias fontes e depósitos de sedimento (areia). A Figura 40 apresenta o ciclo natural de sedimentação que ocorre uma célula típica. Com a precipitação, os sedimentos são carregados através de rios até

bacias de deposição localizadas no oceano e normalmente não retornam mais ao ambiente praial, ou seja, são retirados permanentemente das células litorâneas.

As ondas e as correntes remobilizam um grande volume de sedimento. Essa remobilização pode ser paralela à costa (transporte litorâneo) ou perpendicular à costa (transporte *onshore-offshore*). Esses processos de erosão e deposição são essenciais à formação e transformação da linha de costa. A obstrução dos caminhos em que ocorrem esses transportes de sedimento com, por exemplo, a construção de barragens e/ou obras costeiras, desequilibra o balanço de sedimento e pode favorecer a erosão das costas, uma vez que as células litorais são fonte de areia para as praias.

Figura 40 – Dinâmica de uma célula litorânea típica



1.1.3 Ocupação de zonas costeiras

As populações costeiras em todo mundo também crescem em ritmo fenomenal. Quase dois terços da população mundial (cerca de 3,6 bilhões de pessoas) vivem a até 160 quilômetros de distância do mar. Estima-se que em três décadas, 6 bilhões de pessoas (ou quase 75% dos moradores do planeta) viverão perto dos

litorais. Em grande parte do mundo em desenvolvimento, as populações costeiras estão explodindo. (NAS, 2009 *apud* GORE A., 2013, p. 309).

Hinrichsen (1998) estima que devido a essa excessiva ocupação do litoral, apenas um décimo das terras do planeta são efetivamente ocupadas. Treze das dezenove maiores cidades do mundo localizam-se na costa.

Xangai, a maior cidade da China e a mais populosa do planeta, apresentava densidade populacional de 9.400 hab/m² em 2013. Sua atividade econômica é baseada principalmente nas atividades industrial e portuária – típicas de zonas costeiras. No Japão, a migração do interior para a costa se deu num espaço de tempo de duas décadas. Já em 1970, mais da metade da população habitava 1,7% das terras do país, prevalecendo na costa pacífica, e em 1997, 80% da população ocupava as zonas costeiras japonesas (HINRICHSEN, 1998).

Em direção ao continente europeu, a região do mar Mediterrâneo contava em 1990 com população costeira estimada de 146 milhões de pessoas, com projeção de crescimento para 176 milhões de habitantes no ano de 2025, e adicional de cerca de 350 milhões de turistas na alta temporada (HINRICHSEN, 1998). Tratando do continente americano, Hinrichsen (1998) aponta que a maioria da população latino-americana vive distante de até 200 km da costa, e a norte-americana, contava com 39% da população residindo nas costas leste e oeste do país em 2010 (NOAA, 2013).

Atualmente foge à regra o continente africano. Seus habitantes ainda concentram-se no interior do continente. Mas cidades costeiras e centros comerciais como Dakar, Mombasa, Acra e Lagos apresentam crescimento anual, atraindo para a costa a população do interior.

Tratando do Brasil, dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA) apontam que em 2000, 23,43% da população brasileira residia em zonas costeiras, num total de 395 municípios (MMA, s.d.). Devido a condicionantes históricas, econômicas e políticas, a região nordeste apresenta o maior percentual de municípios costeiros do país.

Os fatores que atraem a população às zonas costeiras são inúmeros. As condições climáticas, o meio ambiente diverso e as atividades de lazer proporcionadas pelas zonas litorâneas são bastante

agradáveis ao homem, favorecendo seu estabelecimento nesses espaços. Também favorecem o desenvolvimento do turismo, atividade de expressiva participação na economia de muitas localidades.

Historicamente, as ZC apresentam ampla disponibilidade de comida e normalmente são associadas com fonte de água doce, essenciais à sobrevivência humana. Também, há milhares de anos são potenciais centros comerciais – abrigam indústrias e portos, porta de entrada e saída de mercadorias globalmente negociadas. Movimentam imensas quantias de dinheiro, geram empregos, e na maioria das vezes, provêm infraestrutura e desenvolvimento urbano não encontrado em cidades do interior.

1.1.4 Erosão costeira

1.1.4.1 Problemática

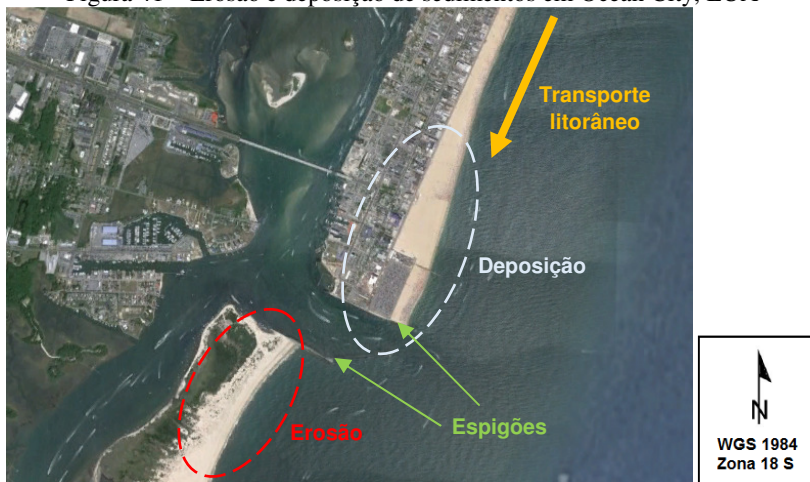
Conforme já visto, a erosão costeira é um processo natural e pode fazer parte da dinâmica costeira. No entanto, esta torna-se um problema quando coloca em risco as atividades antrópicas estabelecidas em zonas de erosão acentuada.

A ocupação humana em zonas costeiras pode intensificar os processos erosivos. Estruturas rígidas perpendiculares à costa dificultam o transporte longitudinal de sedimentos e atividades como construção de barragens, exploração de sedimentos litorâneos e dragagens portuárias promovem a insuficiência no abastecimento de sedimentos e impactam em defesas naturais como dunas e encostas (OLIVEIRA, 2005). Como consequência, a linha de costa retrocede, avançando sobre as construções que não se encontram afastadas o suficiente. Como resultado, em zonas altamente urbanizadas, erosões e inundações provocam danos em residências, hospedagens, estradas, indústrias, resultando em relevantes perdas socioeconômicas (BURCHARTH, et al., 2007).

A Figura 41 apresenta o fenômeno de erosão e deposição ocasionado pela instalação de espigões. Ao norte a largura da faixa de

praia aumenta devido à deposição dos sedimentos que não são transportados para o sul devido à presença do espigão. Enquanto isso, ao sul a faixa de praia diminui, pois os sedimentos erodidos não são repostos, uma vez que ficam acumulados ao norte.

Figura 41 – Erosão e deposição de sedimentos em Ocean City, EUA



Fonte: *Google Earth*® (2014).

Williams (2001) aponta que 90% das costas mundiais sofrem erosão costeira. O autor diz que este fenômeno tende a aumentar por conta da elevação do nível do mar, da maior frequência de tempestades e do crescimento populacional. Já Van der Salm & Unal (2003, *apud* KUANG ET AL, 2014) citam que a erosão de praias arenosas atinge 95% das praias do globo.

O distrito de East Riding of Yorkshire no Reino Unido apresenta a maior taxa de erosão costeira da Europa. Vilarejos seculares foram perdidos devido a este fenômeno (Figura 42). Anualmente, ao longo de 61 km de costa a taxa de erosão da encosta é de 2 m (DAILY MAIL, 2011).

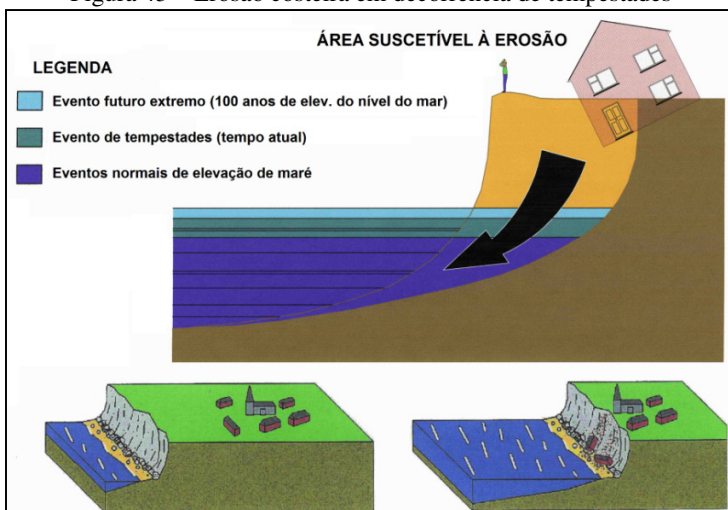
Figura 42 – Erosão costeira em East Riding of Yorkshire, UK



Fonte: Daily Mail (2011)

Eventos pontuais também podem causar alterações dramáticas em zonas costeiras: tempestades tropicais causam elevação dos níveis de marés e maiores alturas de ondas momentâneas. O centro de pesquisas geológicas dos Estados Unidos (USGS) define três ocorrências relacionadas às elevações súbitas do nível de água: colisão, *overwash* e inundação (USGS, 2014). A primeira refere-se ao ataque de ondas à base de dunas e encostas, causando erosão frontal. A segunda se dá quando as dunas ou encostas sofrem *overtopping*, ocasionando erosão, migração das dunas em direção ao continente ou ainda, encobrimento parcial ou total de estradas e construções por sedimentos. E a terceira acontece em casos extremos, e pode erodir severamente praias, dunas e/ou encostas (Figura 43).

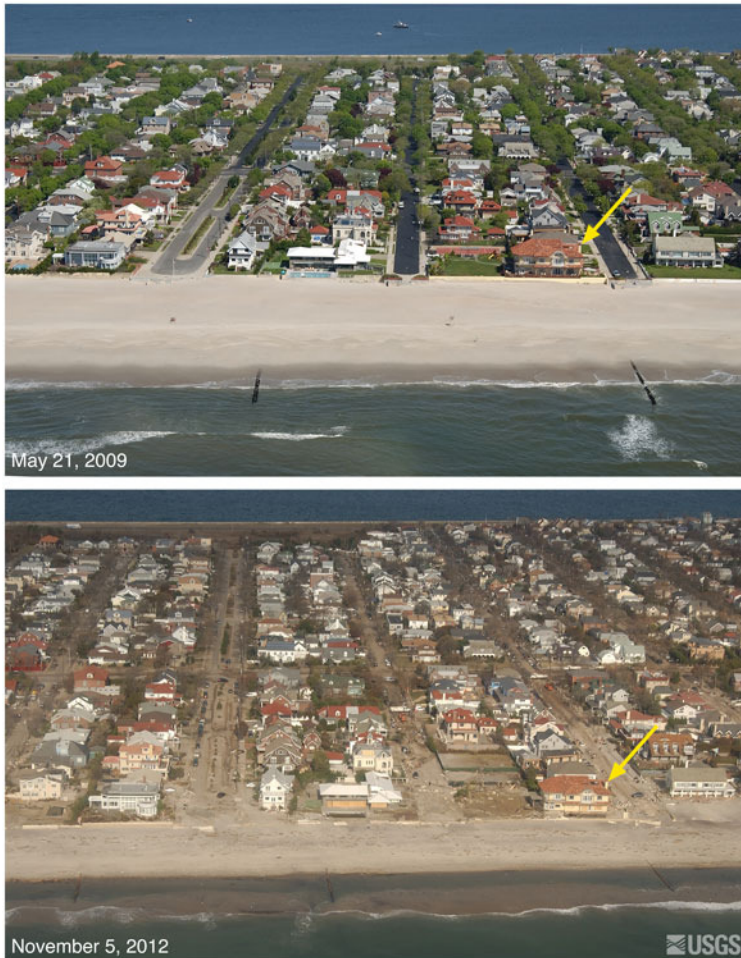
Figura 43 – Erosão costeira em decorrência de tempestades



Fonte: adaptado de ESCP (2014)

Como exemplo, tem-se o furacão Sandy, que atingiu a costa leste dos Estados Unidos em outubro de 2012. Ilhas barreiras foram danificadas e praias e dunas severamente erodidas pelas fortes ondas geradas pelo fenômeno. Na Figura 44 pode-se observar a retração da linha de costa ocasionada principalmente pelo evento. Nota-se que em maio de 2009 a faixa de areia era cerca de duas vezes mais larga que a encontrada em novembro de 2010. As setas em amarelo indicam o mesmo ponto de referência.

Figura 44 – Erosão costeira por conta do furacão Sandy em Neponsit, EUA



Fonte: USGS (2012).

1.1.4.2 Soluções

Devido ao dinamismo das zonas costeiras não existem soluções absolutas para remediar a erosão nesses espaços (CERC, 2000), mas diversas abordagens podem ajudar a mitigar os efeitos e diminuir os

impactos da erosão. Koerner *et al.*, (2013) agrupa as possíveis soluções em duas lógicas distintas: interferência na ocupação antrópica ou interferência na dinâmica marinha e costeira.

A primeira abordagem consiste no recuo da ocupação urbana, deixando livre o espaço de movimentação da linha de costa. A segunda envolve métodos rígidos como construção de quebra-mares, espigões, enrocamentos, muros de proteção e/ou métodos flexíveis e dinâmicos, como a engorda de praia (KOERNER, et al., 2013).

O Quadro 19 apresenta as alternativas de mitigação da erosão costeira agrupadas por distintas classes funcionais, enquanto o Quadro 20 apresenta fatores que devem ser considerados na seleção da melhor alternativa.

Quadro 19 – Resumo de alternativas para mitigar problemas de erosão costeira

Classe funcional	Medidas
Estruturas armadas	Muros de proteção, paredes, enrocamentos.
Estruturas de estabilização de praias e instalações	Quebra-mares destacados, espigões, soleiras de vegetação, drenagem de águas subterrâneas.
Restauração de praias	Engorda de praia, transpasse de areia
Adaptação e acomodação	Zoneamento, recuo, prevenção de inundações.
Combinações	Estrutural e restauração; estrutural, restauração e adaptação.
Não intervir	-

Fonte: adaptado de CERC (2000).

Quadro 20 – Fatores analisados na definição de soluções para mitigar a erosão costeira

Tipo de Projeto	Considerações									
	1. Hidráulicas	2. Sedimentação	3. Estrutura de controle de erosão	4. Manutenção	5. Substituição	6. Fonte de matéria-prima	7. Aspectos legais	8. Econômicas	9. Impactos ambientais	10. Navegação
Estabilização da costa	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Proteção da zona pós-praia	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Proteção de portos	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	
Estabilização de áreas de acesso	✓	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓
Descrição das considerações (análises envolvidas)										
1.	Correntes, marés, tempestades, ondas geradas pelo vento, batimetria...									
2.	Direção de movimento, taxas de transporte de sedimentos, características e classificação dos sedimentos...									
3.	Seleção de estruturas de proteção considerando tipo, aplicação, eficácia, viabilidade, impacto ambiental e paisagístico...									
4.	Frequência, custos, facilidade...									
5.	Custos, facilidade...									
6.	Localização de jazidas, custos, facilidade de aquisição...									
7.	Observância às legislações, normas e regulamentações aplicáveis e políticas vigentes...									
8.	Custos de manutenção e substituição, grau de interesse, amortização de custos iniciais...									
9.	Impacto ao ecossistema local e de áreas adjacentes...									
10.	Embarcações de projeto, número de vias, profundidade, comprimento, largura e alinhamento do canal...									

Fonte: adaptado de CERC (1990).

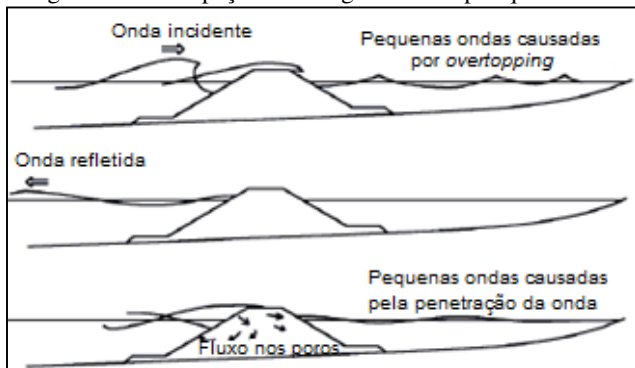
1.1.4.2.1 Quebra-mares

A origem dos quebra-mares é desconhecida. Inman (2001, apud CERC, 2000) relata a construção de quebra-mares no Rio Nilo pelos egípcios em 2500 a.C., enquanto as civilizações fenícia, grega, macedônica e romana aperfeiçoaram essas estruturas (CERC, 2000)

Quebra-mares destacados são definidos pelo como “barreiras à energia das ondas, projetadas para defender relevos ou portos localizados atrás delas” (CERC, 1990). Também podem ter como função reduzir ou prevenir a erosão em praias naturais ou engordadas, ou então, estimular a formação de praia através do acúmulo de sedimentos (BURCHARTH, et al., 2007). São estruturas paralelas ou inclinadas à costa, sem conexão com a mesma.

A redução da energia das ondas que atingem a estrutura é dada por reflexão, difração e/ou dissipação do fluxo de águas através dos poros.

Figura 45 – Dissipação de energia de onda por quebra-mar



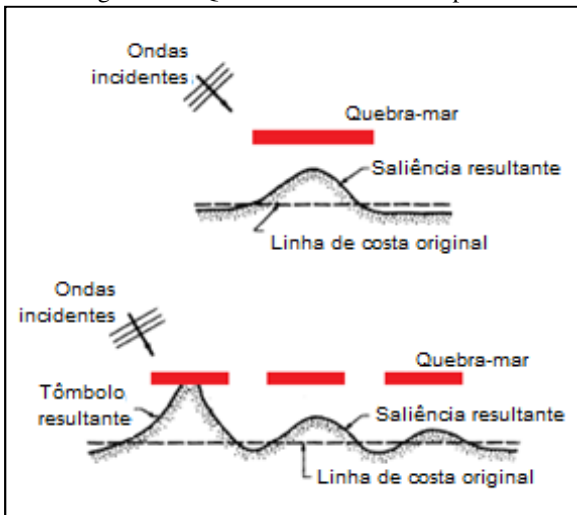
Fonte: adaptado de Burcharth *et al* (2007).

Quebra-mares podem ser construídos como uma estrutura única quando designado a proteger áreas menores, ou como um grupo de

estruturas quando sua área de atuação deverá ser mais extensa, constituindo os chamados “campos de quebra-mares”.

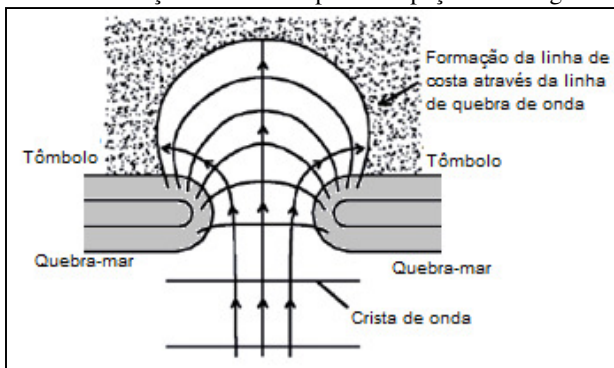
Uma maior ou menor quantidade de sedimentos será acumulada, formando tômbolos ou saliências, dependendo da largura da zona de surfe, da distância dos quebra-mares à linha de costa (Y), do comprimento das estruturas (L_s), do espaçamento entre as elas (L_g), da profundidade da estrutura abaixo do nível médio do mar (d_s), e das características locais (principalmente comprimento e altura de onda).

Figura 46 – Quebra-mares vistos em planta



Fonte: adaptado de USACE (1993).

Figura 47 – Formação de tómbolo pela dissipação da energia da onda

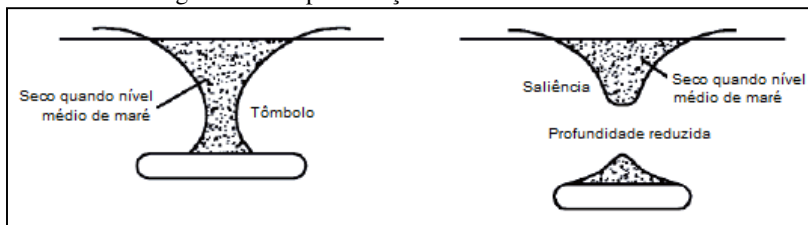


Fonte: adaptado de Burchart *et al* (2007).

Quando o quebra-mar oferece maior abrigo à costa, mais sedimentos ficam acumulados e a linha de costa atinge a estrutura, formando um tómbolo. Normalmente tómbolos ocorrem em casos de quebra-mares mais longos e/ou localizados mais próximos à costa.

Quando o abrigo propiciado pela estrutura é mais moderado, o acúmulo de sedimentos é menos intenso e a linha de costa não atinge a estrutura, formando então uma saliência. Saliências predominam em casos de quebra-mares mais distantes da costa, mais curtos em relação ao comprimento das ondas incidentes e de estruturas mais transmissíveis.

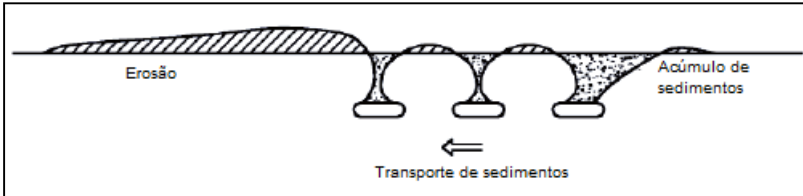
Figura 48 – Representação de tómbolos e saliência



Fonte: adaptado de Burchart *et al* (2007).

Tômbolos, saliências e os próprios quebra-mares interferem no transporte de sedimentos longitudinal à costa, podendo provocar deficiência no abastecimento de áreas adjacentes, resultando em erosão.

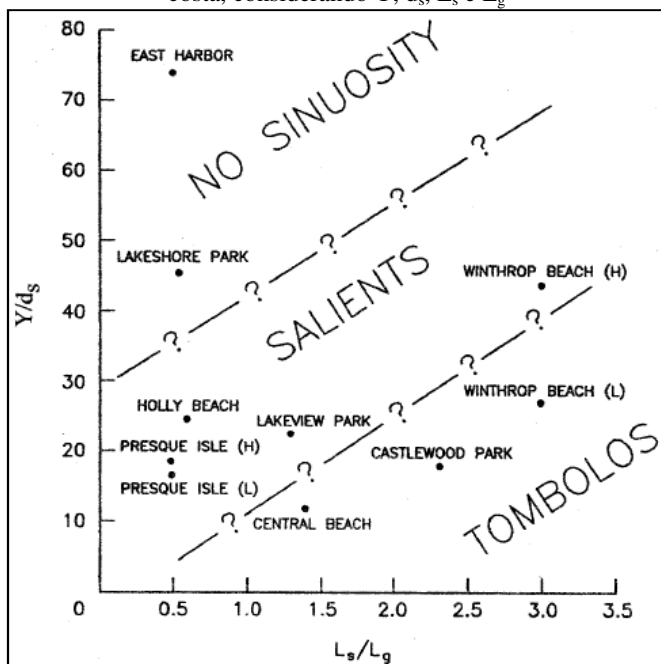
Figura 49 – Erosão de área adjacente aos quebra-mares



Fonte: adaptado de Burchart *et al* (2007).

Diversos autores e publicações discutem a formação de tômbolos ou saliências, considerando principalmente as relações “ L_s/Y ” “ L_s/L_g ” e “ Y/d_s ”. Pope and Dean (1986, *apud* CERC, 2000) relacionam a formação de tômbolos ou saliências às relações Y/d_s e L_s/L_g , conforme o ábaco da Figura 50 .

Figura 50 – Formação de tómbolo ou saliências por quebra-mares próximos à costa, considerando Y , d_s , L_s e L_g



Fonte: Pope & Dean (1986, *apud* CERC 2000).

1.1.4.2.1.1 Quebra-mares *low-crested*

Quebra-mares *low-crested* possuem o coroamento da estrutura em nível inferior ao nível de *run-up*, ou seja, sofrem *overtopping* total ou parcial, o que, como visto anteriormente, reduz as velocidades de *run-down*, e logo, as forças instabilizantes. Normalmente levam à formação de saliências, e não tómbolos, uma vez que a dissipação de energia é menor que aquela em quebra-mares tradicionais.

A construção de quebra-mares *low-crested* está frequentemente associada à engorda de praia, e recentemente têm-se popularizado por protegerem efetivamente a costa e ser esteticamente mais atraentes que quebra-mares tradicionais (KUANG *et al.*, 2014)

As elevações mais modestas dessas estruturas as torna menos visíveis, impactando menos na paisagem. Logo, são bastante convenientes em locais turísticos, históricos e de marcantes paisagens naturais que sofrem com a erosão costeira. No entanto, quando empregados em locais de circulação de embarcações, podem causar danos ou acidentes se não forem devidamente sinalizadas.

Quebra-mares *low-crested* permitem maior circulação de água no espaço entre as estruturas e a costa, o que melhora significativamente a qualidade da água e reduz as taxas de erosão em áreas adjacentes. No entanto, a retenção de sedimento pode ser menor que a obtida quando construídos outros tipos de estruturas.

A praia artificial de Pedregalejo na cidade de Málaga, Espanha é formada por espigões e quebra-mares *low-crested*. Essas estruturas proporcionam largas faixas de areia com pouco impacto visual no horizonte (Figura 51 e Figura 52). Além disso, os tómbolos formados permitem acesso às estruturas, que são atrativos de recreação.

Figura 51 – Praia de Pedregalejo - Málaga, Espanha



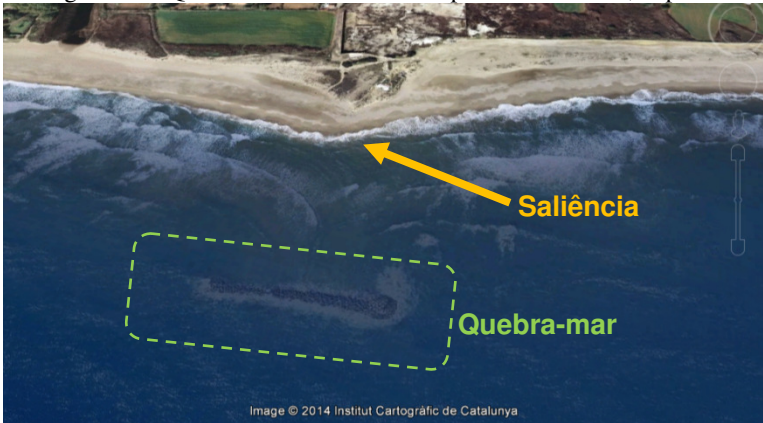
Fonte: *Google Earth* ® (2011)

Figura 52 – Visual pouco afetado pelas estruturas costeiras na Praia de Pedregalejo- Málaga, Espanha



Fonte: Paseo por Pedregalejo (2011)

Figura 53 – Quebra-mar *low-crested* na praia de Altafulla, Espanha

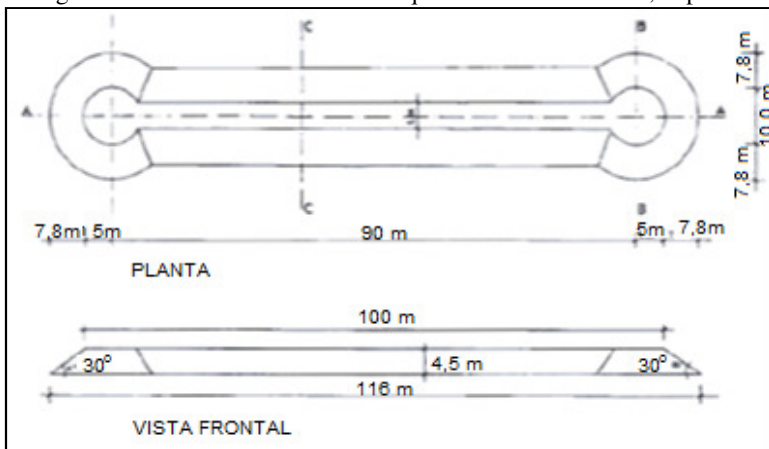


Fonte: *Google Earth* ® (2014)

Na maioria dos casos, quebra-mares *low-crested* são montes constituídos de rochas ou blocos de concreto. Rochas são mais utilizadas por normalmente existirem pedreiras próximas ao local de obra e serem mais viáveis economicamente, além de responderem bem ao ataque de ondas e serem ecologicamente amigáveis (BURCHARTH, et al., 2007). Blocos de concreto como tetrápodes e acrópodes são empregados quando não há rocha disponível ou quando as dimensões encontradas não atendem aos requisitos de projeto. Destaca-se que na grande maioria dos casos, blocos de concreto são adotados em estruturas de defesa mais robustas, como molhes e guias correntes.

A Figura 54 apresenta a planta e a seção longitudinal do quebra-mar da praia de Altafulla, Espanha. A praia é importante local turístico e sofre com a erosão costeira. Para mitigar os efeitos da erosão, em 1991 foi construído um quebra-mar *low-crested*, com cota de topo inferior a 1,0 m em relação ao nível médio do mar. Ainda, foi realizada engorda de praia com 160.000 m³ de areia.

Figura 54 – Planta e vista frontal do quebra-mar de Altafulla, Espanha

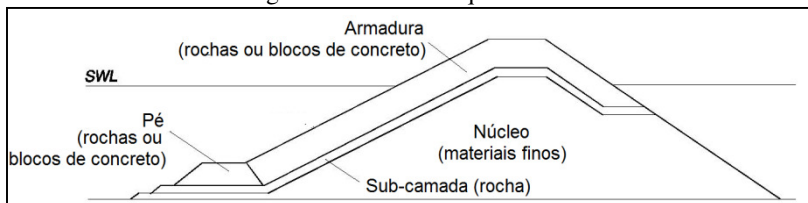


Fonte: adaptado de Burchart *et al* (2007).

Usualmente essas estruturas são constituídas de duas ou mais camadas de gradação apropriada para evitar a entrada ou perda de sedimentos finos nas camadas. Se necessário, podem ser utilizados geotêxteis.

Para garantir a estabilidade estrutural consideram-se o diâmetro nominal das rochas, a inclinação da estrutura em ambos os lados, o tipo de solo e as características de ondas e correntes. Se necessário, a estrutura pode apresentar inclinações graduais e pé de proteção. Pés podem também ter a finalidade de prevenir a erosão na base do quebra-mar.

Figura 55 – Perfil de quebra-mar



Fonte: adaptado de CERC (2000).