



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE
Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Proc. 0604/011/17744

ESTABILIDADE DE PRAIAS ARTIFICIAIS

Estudo Integrado no Projeto Dinâmica Hidrossedimentar
do Litoral a Curto e Médio Prazo do Plano de Investigação
Programada (PIP) do LNEC para 2009-2012

Lisboa • abril de 2012

I&D HIDRÁULICA E AMBIENTE

RELATÓRIO 122/2012 – DHA/NEC

ESTABILIDADE DE PRAIAS ARTIFICIAIS

RESUMO

O desenvolvimento de actividades balneares, associadas ao turismo e lazer, tem conduzido a inúmeras intervenções para melhoramento e expansão de praias existentes. Mais raramente tem sido encarada a criação de praias artificiais, em costas rochosas, sendo escassa a informação existente sobre a elaboração deste tipo de projectos.

No sentido de contribuir para preencher esta lacuna, desenvolve-se uma metodologia estruturada que contempla a análise dos aspectos e problemas determinantes da estabilidade de praias artificiais.

ARTIFICIAL BEACH STABILITY

ABSTRACT

The development of beach recreational activities, associated to tourism and leisure, has led to countless works towards improving and expanding existing beaches. Rarely, however, engineers have opted for the creation of an artificial beach in rocky coasts, thus being scarce the present information on these projects.

Aiming at filling in this gap of knowledge, a structured methodology is developed herein that considers the analysis of the main issues and problems related to the stability of artificial bay beaches.

ESTABILIDADE DE PRAIAS ARTIFICIAIS

Índice de Texto

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	VOLUME DE ENCHIMENTO.....	4
3.	ESTABILIDADE LONGITUDINAL.....	7
	3.1 CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE.....	7
	3.2 MELHORAMENTO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE.....	7
4.	ESTABILIDADE TRANSVERSAL.....	9
	4.1 CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE.....	9
	4.2 MELHORAMENTO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE.....	11
	4.2.1 Condições Gerais.....	11
	4.2.2 Atenuação por Difraccção.....	12
	4.2.3 Atenuação por Dissipação de Energia.....	15
	4.2.4 Atenuação por Acção Conjunta de Difraccção e de Dissipação de Energia.....	18
5.	MODELAÇÃO FÍSICA COMPLEMENTAR.....	19
6.	CONCLUSÕES.....	21
	BIBLIOGRAFIA	25

Índice de Figuras

- Fig. 1 – Praia das Teresitas na ilha de Tenerife, nas Canárias.
- Fig. 2 – Praias de Marselha, na costa sul de França.
- Fig. 3 – Praia da Calheta, na costa sul da Ilha da Madeira.
- Fig. 4 – Praia do Machico, na costa sul da Ilha da Madeira.
- Fig. 5 - Perfil parabólico de praia.
- Fig. 6 - Variação do parâmetro A com o diâmetro D.
- Fig. 7 – Perfis de equilíbrio da praia em função da granulometria dos sedimentos.
- Fig. 8 - Simulação da evolução do enchimento sem e com obras complementares de contenção.
- Fig. 9 – Plataforma rochosa e perfis de praias de areia, seixo e calhau.
- Fig. 10 – Condições de equilíbrio do enchimento na zona abrigada pelo quebra-mar.
- Fig. 11 – Compatibilidade entre os perfis transversais de equilíbrio e o firme rochoso.
- Fig. 12 - Praia de difracção de areia basáltica na baía do Funchal.
- Fig. 13 - Condições de equilíbrio longitudinal com dois quebra-mares.
- Fig. 14 – Esquema com as variáveis relacionadas com a transmissão de energia da onda.
- Fig. 15 – Relação entre o coeficiente de transmissão (K_t) e a folga do coroamento relativa à altura da onda incidente (R_c/H_i).
- Fig. 16 - Condições de equilíbrio longitudinal com um quebra-mar submerso.
- Fig. 17 – Condições de equilíbrio transversal com um quebra-mar submerso.
- Fig. 18 – Estabilidade do enchimento pela conjugação de efeitos de difracção e dissipação de energia.

Índice de Tabelas

- Tab. 1 – Valores de A ($m^{1/3}$) em função de D (mm).
- Tab. 2 – Valores de profundidade de fecho.
- Tab. 3 – Profundidades de fecho e larguras da praia submersa.

ESTABILIDADE DE PRAIAS ARTIFICIAIS

1. INTRODUÇÃO

Uma praia marítima é uma acumulação costeira de sedimentos não coesivos que embora sujeita a uma movimentação permanente sob acção das ondas, tende a manter uma morfologia estável a longo prazo.

Para que uma praia exista é necessário: haver disponibilidade local de significativos volumes de areias ou sedimentos mais grosseiros, como seixos ou calhaus; e que da actuação das ondas sobre esses sedimentos resultem, a longo prazo, condições de estabilidade morfológica longitudinal e transversal da acumulação de sedimentos.

Existem numerosos trechos de costas marítimas que se encontram desprovidos de praias por não satisfazerem estas condições.

O desenvolvimento de actividades balneares, associadas ao turismo e lazer, tem conduzido a inúmeras intervenções para melhoramento e expansão de praias existentes. Mais raramente tem sido encarada a criação de algumas praias artificiais, referindo-se os casos seguintes: praia das Teresitas na ilha de Tenerife, praias da Croisette e Marselha, em França, praia do Larvotto no Mónaco e praias da Calheta e do Machico na ilha da Madeira (Figs. 1 a 4).

O projecto de praias artificiais pode beneficiar da larga experiência de anteriores estudos de dinâmica costeira, e do desenvolvimento das técnicas de modelação matemática e física que têm vindo a ser utilizadas no âmbito da análise e correcção de problemas de erosão e de melhoramento e alargamento de praias.

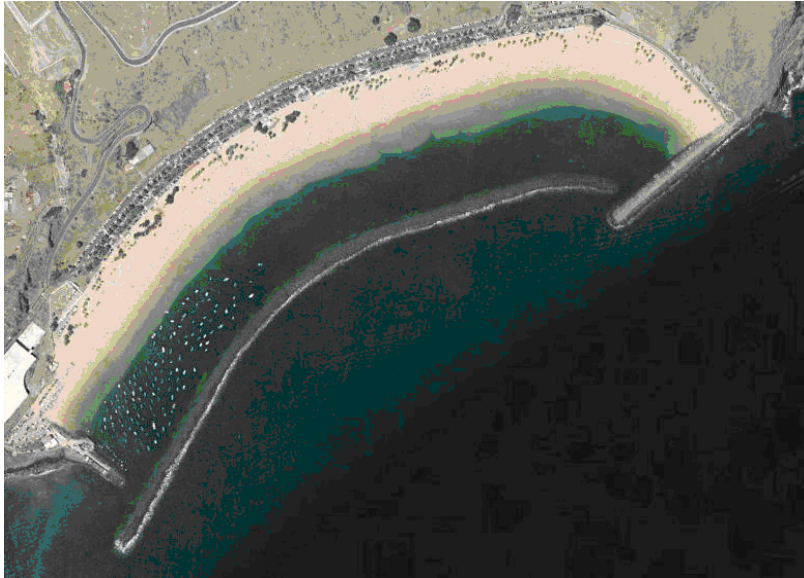


Fig. 1 – Praia das Teresitas na ilha de Tenerife, nas Canárias.



Fig. 2 – Praias de Marselha, na costa sul de França.

Relativamente à criação de praias artificiais, em costas rochosas, é muito escassa a informação existente sobre a elaboração deste tipo de projectos. No sentido de contribuir para preencher esta lacuna, desenvolve-se neste trabalho uma metodologia estruturada que contempla a análise dos aspectos e problemas determinantes da sua estabilidade.



Fig. 3 – Praia da Calheta, na costa sul da Ilha da Madeira.



Fig. 4 – Praia do Machico, na costa sul da Ilha da Madeira.

No projecto de uma praia artificial destaca-se a avaliação dos aspectos que a seguir se desenvolvem: volume de sedimentos necessário e estabilidade das componentes longitudinal e transversal do enchimento.

2. VOLUME DE ENCHIMENTO

O volume de enchimento para obtenção de uma praia artificial depende de três factores: implantação da linha de água; forma do perfil transversal de equilíbrio da futura praia; e configuração e cotas do firme rochoso onde vai assentar o enchimento.

Implantação da linha de água

A implantação da linha de água, nos seus aspectos de orientação e encurvamento, depende do equilíbrio sedimentar que se estabelece pela actuação da agitação marítima sobre o enchimento. A previsão dessa forma de equilíbrio pode ser obtida pela aplicação de um modelo de evolução da linha de costa, assunto que será tratado no capítulo seguinte.

Perfil transversal

Existem diferentes fórmulas para previsão do perfil transversal de equilíbrio de uma praia, cujos resultados deverão ser comparados num caso real de aplicação. Esse aprofundamento da previsão não se justificava na presente análise, tendo-se recorrido apenas à expressão de Bruun (1954), elaborada a partir de dados de praias da Dinamarca e da Califórnia. Esta formulação considera uma configuração parabólica do perfil, com declives que se atenuam gradualmente com a profundidade, segundo a equação:

$$(y - y_c) = \left(\frac{d}{A}\right)^{1.5}$$

em que A é o coeficiente da parábola que descreve o perfil (Fig. 5).

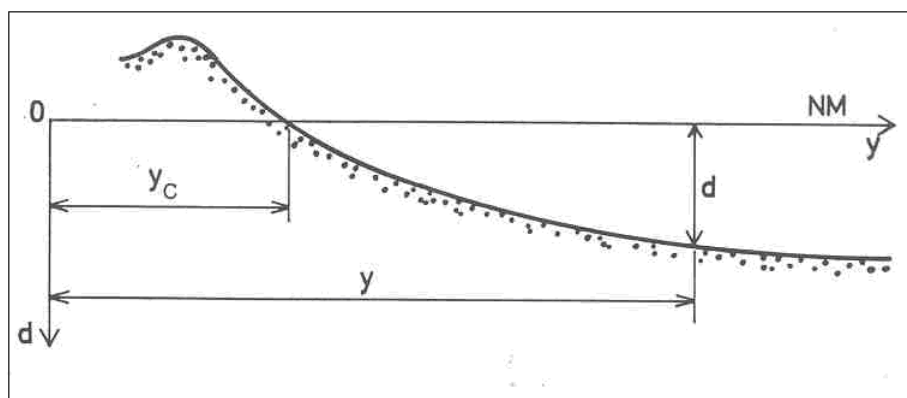


Fig. 5 - Perfil parabólico de praia.

Em Dean (1977), mostra-se que a expressão é consistente com a dissipação de energia na zona de rebentação, segundo a teoria linear. Em 1987, este autor propôs uma correlação do parâmetro A com o diâmetro dos sedimentos, baseada em dados de modelo e da natureza (Fig. 6 e Tabela 1), apresentados em Moore (1982).

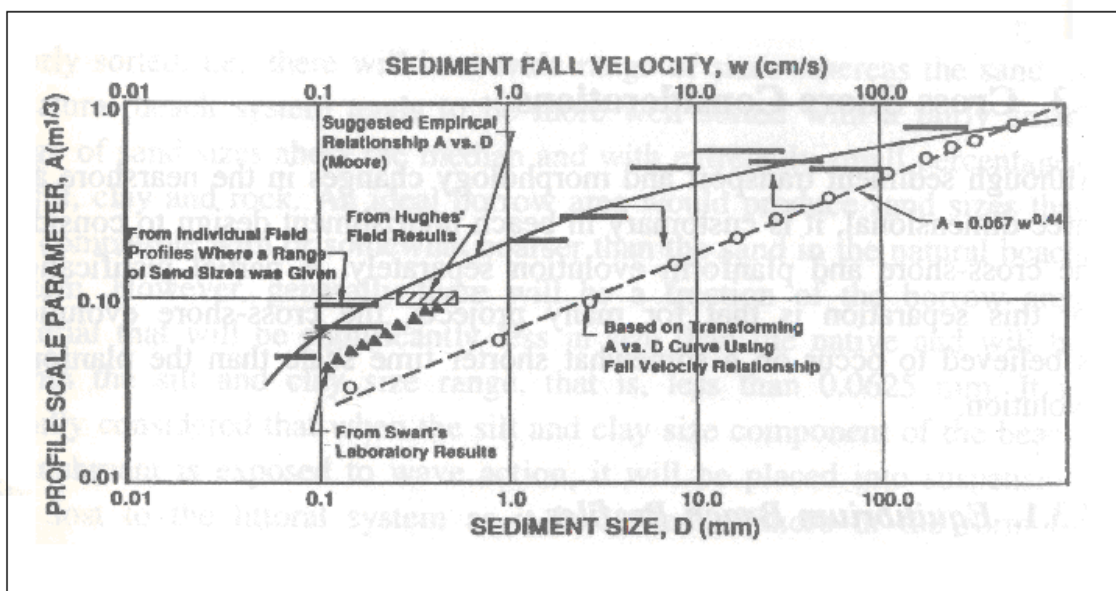


Fig. 6 - Variação do parâmetro A com o diâmetro D.

D (mm)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
A (m ^{1/3})	0,063	0,100	0,125	0,145	0,161	0,173	0,185	0,194	0,202	0,210

Tab. 1 – Valores de A (m^{1/3}) em função de D (mm).

Segundo esta formulação o perfil dependerá essencialmente da granulometria dos sedimentos da praia e será tanto mais declivoso quanto maiores forem os seus diâmetros (Fig. 7).

Configuração dos fundos

A batimetria do firme rochoso existente no local da futura praia deverá ser previamente definida por um levantamento topo-hidrográfico.

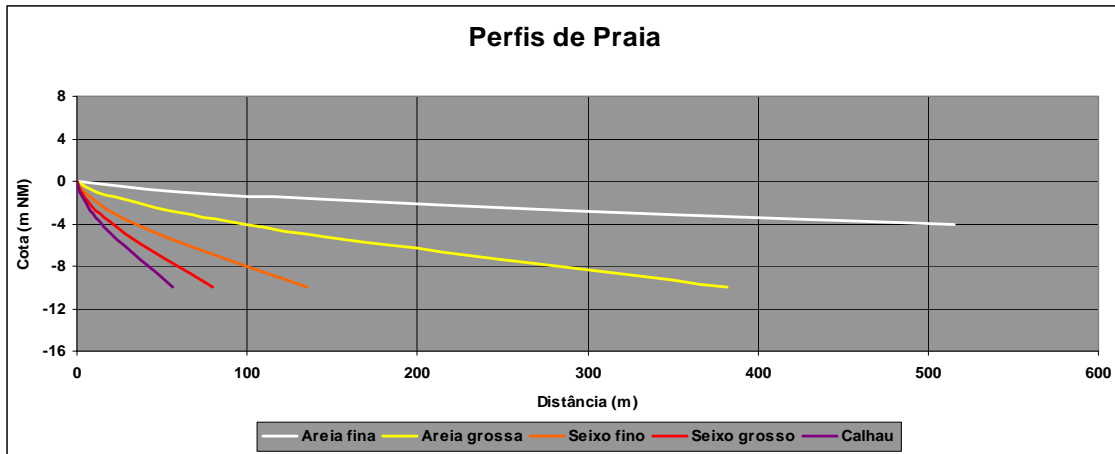


Fig. 7 – Perfis de equilíbrio da praia em função da granulometria dos sedimentos.

Com base na configuração da linha de água, no perfil transversal de equilíbrio e no levantamento topo-hidrográfico dos fundos onde a praia vai assentar, calculam-se os volumes de enchimento nos diferentes perfis e o somatório de volumes para a totalidade da praia.

3. ESTABILIDADE LONGITUDINAL

3.1 CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE

Os sedimentos das praias estão sujeitos a movimentação constante num e noutro sentido do seu desenvolvimento. Essa movimentação decorre da acção das ondas e processa-se no âmbito do transporte sólido litoral. Para que haja estabilidade global da praia é necessário que o fluxo longitudinal que a abandona seja compensado pela entrada de um volume igual de sedimentos. Os modelos de evolução de linhas de costa são uma ferramenta de eficácia comprovada no cálculo desses transportes (Vicente e Clímaco, 2003 e 2009).

No âmbito da presente análise, aplicou-se com fins exemplificativos, o modelo de evolução Litmod à previsão do equilíbrio longitudinal, num caso fictício de enchimento para criação de uma praia artificial. Considerou-se um depósito de areia com um volume da ordem de 1 100 000 m³, inserido numa reentrância de uma costa rochosa e a sua actuação por 10 anos de agitação marítima (2001 a 2010). Usou-se um regime de ondas de que se dispunha para a frente costeira da lagoa de Óbidos, anteriormente calculado por hindcast.

Apresentam-se, na Fig. 8, resultados da simulação dos transportes, verificando-se que:

- A linha de água sofre oscilações decorrentes das variações inter- anuais do regime de agitação marítima.
- Ocorrem perdas de areia pelos extremos norte e sul da baía, com valores acumulados de 190 000 e 70 000 m³.

3.2 MELHORAMENTO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE

As perdas avaliadas pela simulação anterior podem ser atenuadas ou eliminadas mediante a construção de obras transversais para reforço da capacidade de contenção das saliências rochosas que delimitam a praia. A construção de esporões nos extremos da baía permitiu reduzir para valores não significativos a fuga das areias de enchimento (Fig. 8). Refere-se que a modelação apresentava capacidade para simular estas obras e os seus efeitos de difracção, retenção e transposição (Vicente e Clímaco, 2007).

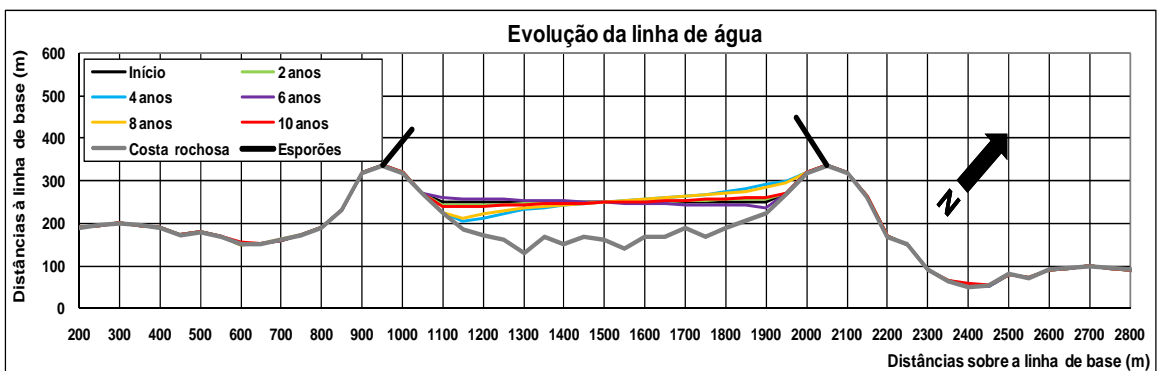
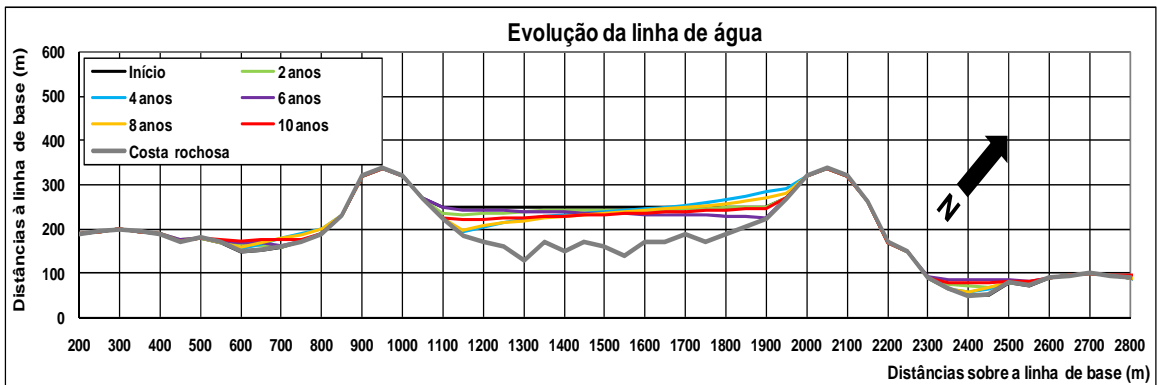


Fig. 8 - Simulação da evolução do enchimento sem e com obras complementares de contenção.

Dada a possibilidade de construção de obras complementares de reforço da contenção, mais ou menos desenvolvidas conforme as necessidades de retenção, pode concluir-se que a estabilidade longitudinal não é uma condicionante impeditiva da criação de uma praia artificial.

4. ESTABILIDADE TRANSVERSAL

4.1 CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE

Os sedimentos estão também sujeitos a movimentação transversal permanente, ao longo do perfil da praia. Os correspondentes transportes podem anular-se ou podem ocorrer saldos no sentido da costa ou do largo. São características as morfologias de Verão e de Inverno: no período de Verão com a acumulação de sedimentos na praia emersa, sob acção de ondas mais suaves; e no Inverno, em que os sedimentos são deslocados para o largo por ondas de maior energia.

A intensidade de movimentação dos sedimentos no perfil de uma praia em equilíbrio decresce no sentido do largo, verificando-se que as alterações morfológicas dos fundos se vão atenuando e perdem significado prático a partir de uma certa profundidade, designada por profundidade de fecho, Pf.

Trata-se de um parâmetro que depende essencialmente da agitação marítima e pode ser calculado para um regime de ondas incidentes a partir da expressão de Birkemeier (1985):

$$Pf = 1,75 H - 57,9 (H_s^2 / g T_s^2)$$

em que é:

Pf profundidade de fecho

H_s e T_s altura e período significativos da maior onda que ocorre em média 12 horas por ano.

g aceleração da gravidade.

Apresentam-se na Tabela 2 os valores de profundidades de fecho, calculados para diferentes alturas e períodos de onda.

H_s (m)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T_s (s)	13	13	13	13	13	14	15	16	17	18
Pf (m NM)	1,7	3,4	4,9	6,4	7,9	9,4	11	12,5	14,1	15,7

Tab. 2 – Valores de profundidade de fecho.

A expressão de Birkemeier foi proposta para praias de areia. Parece poder aplicar-se com acréscimo de segurança a praias de seixo e calhau. A sua aplicabilidade a estes sedimentos mais grosseiros pode ser confirmada recorrendo a ensaios em modelo físico como se refere mais à frente.

A estabilidade transversal de uma praia natural ou artificial dependerá da conjugação de três factores: perfil de equilíbrio característico da granulometria do sedimento de enchimento; declive da plataforma do firme rochoso em que a praia se vai apoiar; e profundidade de fecho.

Nas costas W e S de Portugal continental o declive suave da plataforma costeira favorece essa estabilidade e a existência de praias de areia. O mesmo se passa na costa S da ilha de Porto Santo.

Quando essa plataforma apresenta um declive acentuado, o volume disponível de sedimentos é normalmente insuficiente para desenvolver o perfil de equilíbrio até à profundidade de fecho e a praia não encontra condições de apoio no firme rochoso, ocorrendo uma constante perda de sedimentos para as maiores profundidades. Esta é uma situação frequente em ilhas vulcânicas, em que rareiam as condições para o aparecimento de praias de areia, sendo no entanto frequentes as praias de seixo e calhau (Fig. 9).

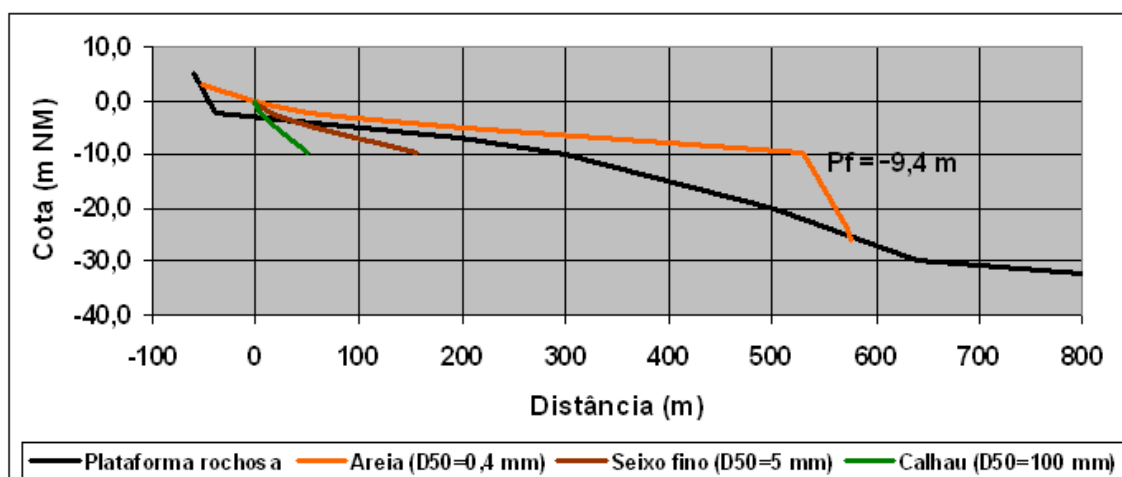


Fig. 9 – Plataforma rochosa e perfis de praias de areia, seixo e calhau.

Considerou-se neste caso uma costa com ondas máximas anuais de 6 m de altura significativa, a que corresponde uma profundidade de fecho -9,4 m. Verifica-se, nestas condições, que uma praia artificial de areia média para

conseguir um apoio estável na plataforma rochosa exigiria um volume de enchimento inoportável. Já seriam viáveis praias de seixo ou de calhau que encontrariam um fácil apoio no firme rochoso.

4.2 MELHORAMENTO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE

4.2.1 Condições Gerais

No entanto, mesmo em condições desfavoráveis de estabilidade transversal, pode haver interesse em criar praias artificiais de areia. Para o conseguir torna-se necessário melhorar as condições de apoio do perfil na plataforma rochosa.

Estas condições dependem da morfologia dessa plataforma, do perfil de equilíbrio da praia e da profundidade de fecho. Não é possível actuar sobre o declive e morfologia da plataforma costeira. Relativamente ao perfil de equilíbrio, a estabilidade poderá ser melhorada utilizando areias de maior granulometria, embora esta alternativa se encontre limitada pela dificuldade de obter grandes volumes de areias grosseiras.

A solução mais viável parece consistir na redução significativa da profundidade de fecho, a qual depende da altura significativa da onda máxima anual que atingirá a praia artificial.

Considerando o exemplo acima indicado, se a altura máxima anual diminuir de 6 para 3 m, a profundidade de fecho desce de 9,4 para cerca de 5 m. Esta alteração reduziria para menos de 1/3 o volume de enchimento necessário no exemplo da figura 9.

A redução da altura da onda que incide na praia pode ser conseguida através de obras fixas que promovam a difracção ou a dissipação da energia das ondas incidentes no trecho de costa. Essas obras podem ser quebra-mares enraizados ou destacados com cotas de coroamento mais ou menos elevadas. Com cotas de coroamento elevadas impede-se o galgamento, e a penetração da energia das ondas na zona abrigada ocorre apenas por efeito de difracção. Com cotas de coroamento baixas, próximas do nível médio ou da baixa-mar, situação de menor impacto visual, verifica-se uma redução

da energia da onda ao galgar a estrutura o que se traduz numa diminuição significativa da sua altura.

4.2.2 Atenuação por Difracção

Se num trecho de costa onde incidem ondas significativas máximas anuais da ordem de 6 m construirmos um quebra-mar, reduz-se fortemente a altura das ondas que rebentam na zona abrigada pela obra.

Modelou-se esta situação com o modelo Litmod, simulando a evolução da linha de água de um enchimento de areia média depositado na zona abrigada. Fez-se incidir um período de três anos de agitação marítima na batimétrica -10, retirado dos dados já anteriormente utilizados, cujas ondas atingiam valores máximos de 6 m de altura significativa (Fig. 10).

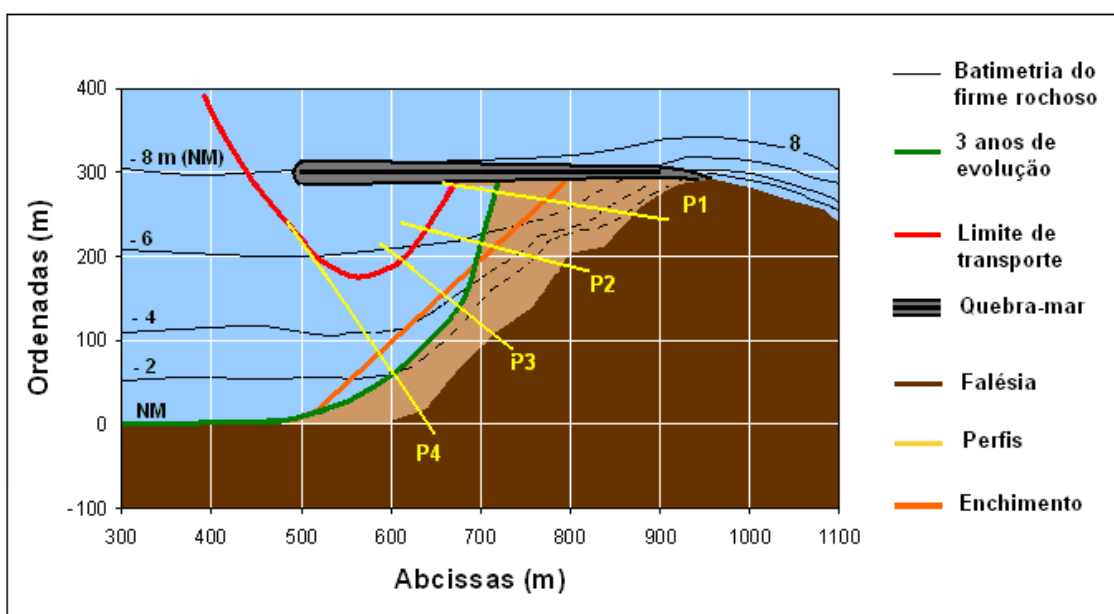


Fig. 10 – Condições de equilíbrio do enchimento na zona abrigada pelo quebra-mar.

Esta figura apresenta as formas de equilíbrio longitudinal características do efeito deste tipo de obras. Mas, como se referiu, é insuficiente considerar apenas esta componente do equilíbrio, sendo indispensável analisar as condições de equilíbrio transversal.

Para efectuar esta última análise consideraram-se 4 perfis de praia na zona abrigada pelo molhe, e procedeu-se do seguinte modo:

- Dos resultados do modelo numérico utilizado, Litmod, que aplica a formulação de Wiegel (1964) para a simulação da difracção, foram extraídos os valores máximos das alturas das ondas difractadas que atingiam os diferentes trechos do contorno da linha de água, H_s .
- A partir dos valores de H_s , foram determinadas as correspondentes profundidades de fecho, P_f , e as larguras de praia submersa, L (Tab. 3). Estas larguras são definidas no perfil de equilíbrio pelas distâncias entre a linha de água e a linha de profundidades de fecho (linha limite de transporte).
- Verificou-se existir estabilidade transversal na zona abrigada pelo quebra-mar, dada a compatibilidade entre os trechos dos perfis de praia sujeitos a movimentação significativa e o desenvolvimento do firme rochoso (Fig. 11).

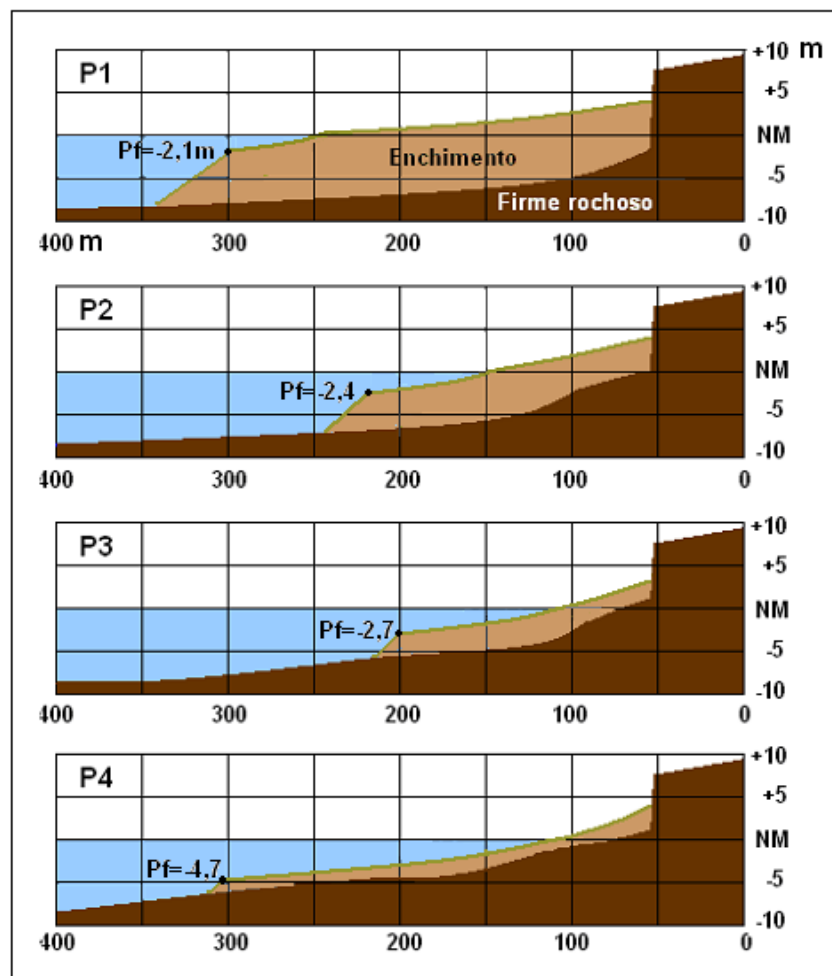


Fig. 11 – Compatibilidade entre os perfis transversais de equilíbrio e o firme rochoso.

PERFIL	Hs (m)	Pf (m NM)	L (m)
P1	1,3	-2,1	57
P2	1,4	-2,4	70
P3	1,6	-2,7	81
P4	2,8	-4,7	185

Tab. 3 – Profundidades de fecho e larguras da praia submersa.

É possível encontrar casos reais de praias de areia em condições de estabilidade transversal em costas com acentuado declive do firme rochoso, devido ao efeito favorável da difracção promovida por obras fixas. É o caso da pequena praia adjacente à marina do Funchal (Fig. 12).



Fig. 12 - Praia de difracção de areia basáltica na baía do Funchal.

No caso de dois quebra-mares enraizados nos extremos de uma baía, a simulação numérica para as mesmas condições fornece a linha de água de equilíbrio longitudinal que se apresenta na Fig. 13. Existirá também estabilidade transversal dado que as condições de estabilidade dos perfis são idênticas às obtidas no anterior caso de um único quebra-mar.

Note-se que a configuração obtida é semelhante à que ocorre na praia da Calheta, na costa sul da Madeira (Fig. 3).

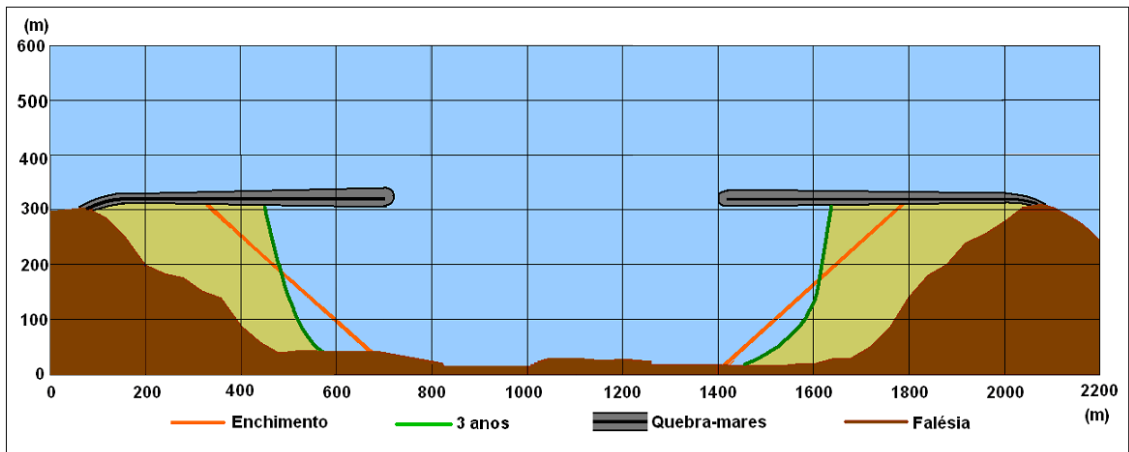


Fig. 13 - Condições de equilíbrio longitudinal com dois quebra-mares.

4.2.3 Atenuação por Dissipação de Energia

Recorrendo a um quebra-mar paralelo à costa, com cotas de coroamento próximas do nível médio ou da baixa-mar, a agitação marítima incidente galga a estrutura dissipando parte da sua energia. A ondulação refaz-se do lado interior, com menor altura, continuando a propagar-se até à praia.

Este fenómeno de transmissão e dissipação de energia na incidência da onda sobre quebra-mares com diferentes cotas de coroamento, acima ou abaixo da linha de água, tem sido tratado por diversos investigadores. Van der Meer e Daemen (1994) sintetizaram e complementaram os resultados principais de anteriores autores, e apresentam uma correlação entre a energia transmitida e as condições de coroamento da estrutura (Figs. 14 e 15).

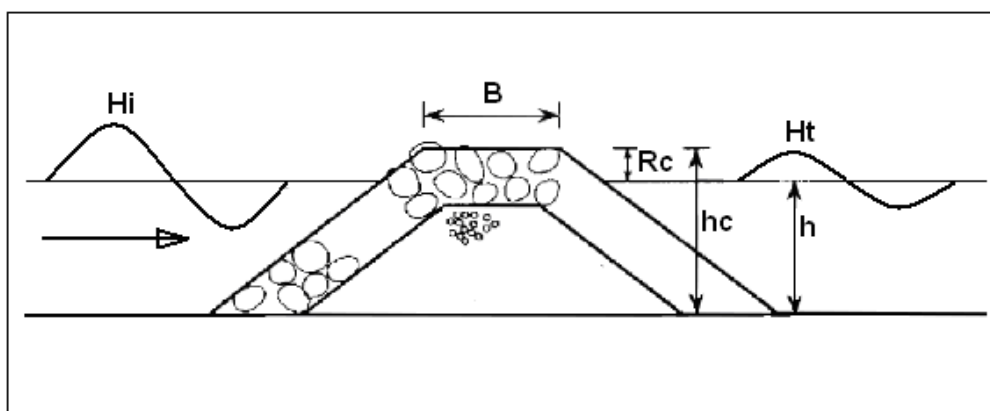


Fig. 14 – Esquema com as variáveis relacionadas com a transmissão de energia da onda.

Segundo este esquema é:

H_i altura da onda incidente

H_t altura da onda que se refaz após a passagem da obra

$K_t = H_t/H_i$ coeficiente de transmissão

h_c altura da estrutura

h profundidade da água junto da estrutura

$R_c = h_c - h$ folga do coroamento relativamente ao nível de água, valor positivo se o coroamento está acima do nível de água e negativo se está baixo.

B largura do coroamento

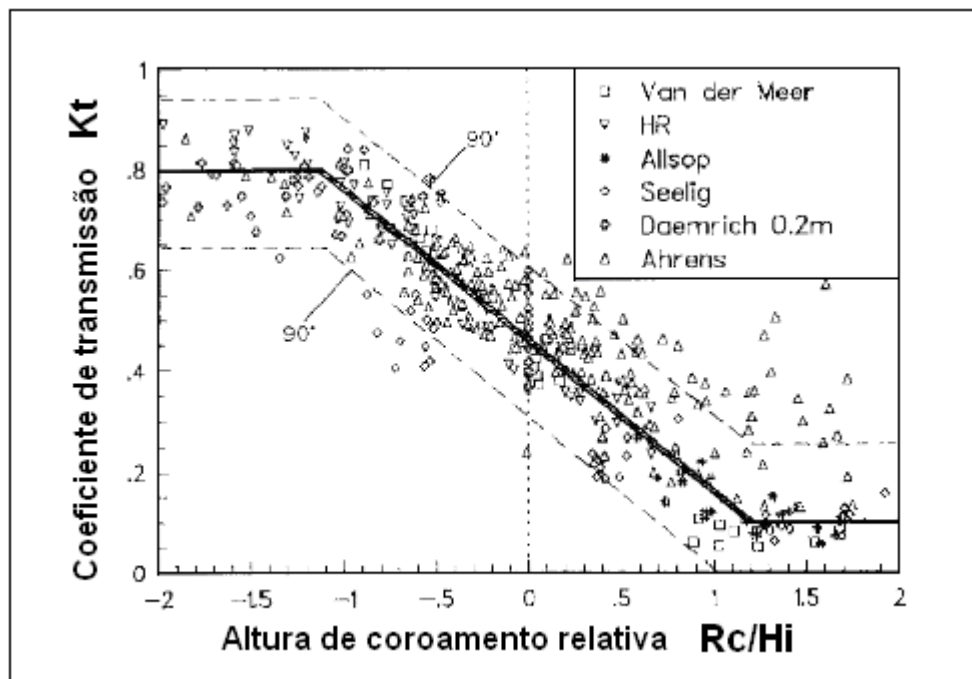


Fig. 15 – Relação entre o coeficiente de transmissão (K_t) e a folga do coroamento relativa à altura da onda incidente (R_c/H_i).

(Extraído de Van der Meer e Daemen, 1994).

Segundo a Fig. 15, se o coroamento da obra aflorar o nível de água, o coeficiente de transmissão tem o valor de 0,45. Se a estrutura for submersa, com o coroamento rebaixado relativamente ao nível de água de 20% da altura da onda incidente, o coeficiente de transmissão é ainda da ordem dos 0,5.

Modelou-se esta situação de dissipação de energia, considerando um quebra-mar paralelo à costa, com cotas de coroamento ao nível médio e com as condições de perfil de plataforma, agitação marítima incidente e granulometria da areia anteriormente referidas (Figs. 16 e 17).

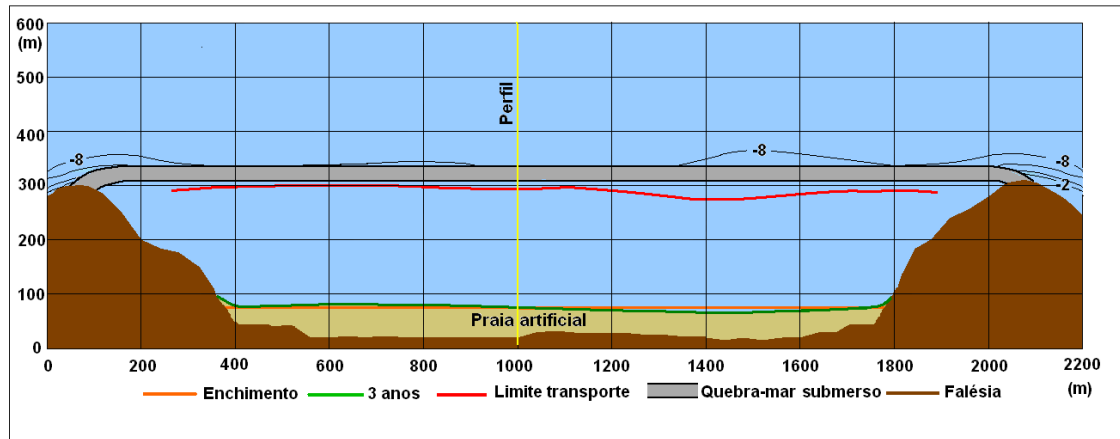


Fig. 16 - Condições de equilíbrio longitudinal com um quebra-mar submerso.

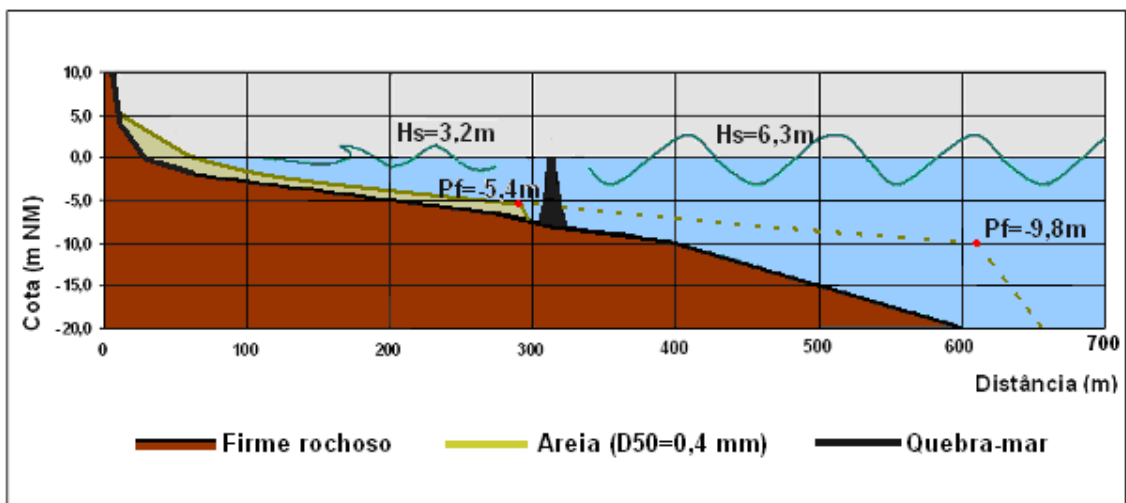


Fig. 17 - Condições de equilíbrio transversal com um quebra-mar submerso.

A dissipação de energia no galgamento da obra reduz para cerca de metade a altura da onda máxima anual e permite o apoio da praia artificial no firme rochoso, dada a transferência da profundidade de fecho para o interior da zona protegida.

4.2.4 Atenuação por Acção Conjunta de Difracção e de Dissipação de Energia

Consegue-se tirar partido destes dois efeitos conjugando quebra-mares de coroamento elevado com quebra-mares galgáveis pelas ondas.

Repetiu-se com o modelo Litmod a simulação da evolução da linha de água de um enchimento de areia média, depositado agora em todo o contorno da baía abrigada pelas obras fixas. Estas eram constituídas por dois quebra-mares emersos, complementados por um trecho de quebra-mar galgável que unia as suas extremidades. Este último quebra-mar apresentava características idênticas ao anteriormente simulado, com uma cota de coroamento igual ao nível médio (Fig. 18).

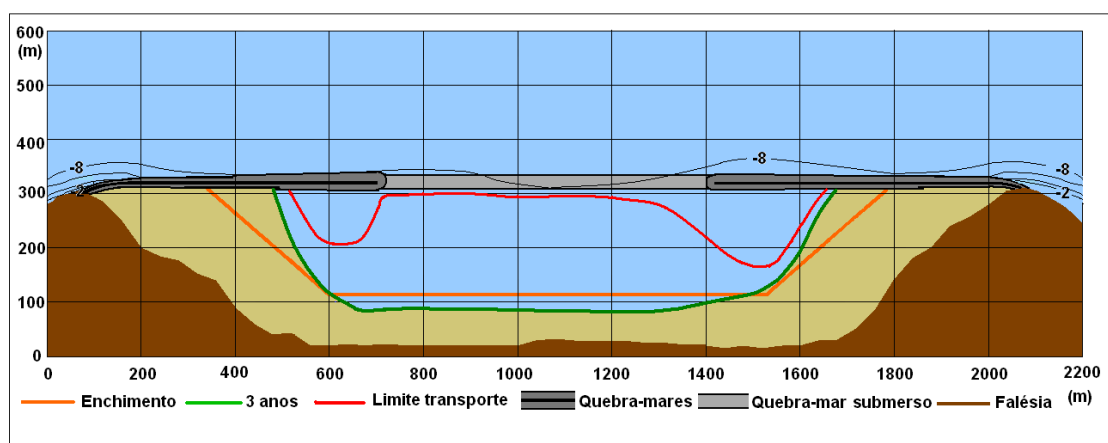


Fig. 18 – Estabilidade do enchimento pela conjugação de efeitos de difracção e dissipação de energia.

A solução apresentava igualmente condições favoráveis de estabilidade transversal. Nas zonas abrangidas pela difracção dos quebra-mares desenvolviam-se zonas de acumulação de areia o que aumentava sensivelmente a área de praia emersa.

5. MODELAÇÃO FÍSICA COMPLEMENTAR

Quando está em causa unicamente a estabilidade longitudinal é dispensável o recurso à modelação física. Um modelo numérico de evolução da linha de costa será suficiente para caracterizar a morfologia de equilíbrio da praia e sua estabilidade longitudinal.

Como se referiu, as condições de estabilidade transversal e o seu melhoramento podem apresentar algumas dificuldades de análise, sendo vantajoso, por vezes, recorrer à modelação física para uma maior segurança nos resultados da intervenção.

Estando em causa a estabilidade e morfologia do perfil, a modelação poderá ser feita em canal de ondas. A modelação física apresenta aspectos de compatibilização de escalas com alguma complexidade, sendo importante uma prévia análise dos diferentes critérios existentes. Recomendam-se a seguir os critérios de semelhança que se afiguram, à partida, mais adequados à simulação do equilíbrio transversal de praias de seixo e de areia.

Modelação de uma praia de seixo

Na simulação do perfil de uma praia de seixo está indicado o critério de semelhança física de Kamphuis (1975) designado por "Melhor Modelo". Segundo a análise dimensional efectuada pelo autor, verifica-se neste critério a invariância dos parâmetros adimensionais intervenientes, com excepção de R_* , N° de Reynolds do Grão. É ainda considerado que o modelo não deve ser distorcido e que a hidrodinâmica deve ser modelada respeitando o N° de Froude, ou seja, com alturas de onda reproduzidas à escala geométrica do modelo e períodos reproduzidos segundo a raiz quadrada dessa escala.

Este critério exige a utilização de um material móvel com a mesma densidade do sedimento, mas muito mais fino, apresentando uma escala de diâmetros igual à escala geométrica do modelo. O seixo a usar na nova praia será reproduzido no modelo por uma areia que obedeça a essa condição.

Os resultados principais a obter pela simulação serão a profundidade limite de transporte e a morfologia do perfil de equilíbrio, para confirmação das análises teóricas prévias.

Modelação de uma praia de areia

O fenómeno mais importante na simulação do perfil de uma praia de areia é a reprodução, à escala do modelo, da movimentação do sedimento em suspensão sob a acção das ondas. Isso permitirá simular a morfologia do perfil e a eficácia dos quebra-mares de baixa cota de coroamento na contenção dos sedimentos que se movimentam em suspensão na sua vizinhança.

É usual, nestas condições a utilização do critério de Dean que tem por base a invariância do parâmetro adimensional

$$[W] / [gT]$$

Em que é:

W a velocidade de queda do grão do sedimento

g a aceleração da gravidade

T o período da onda

Com este critério pretende-se que um grão posto em suspensão no seio da massa líquida na passagem de uma onda apresente no modelo uma trajectória de queda homóloga à do protótipo.

Como a expressão acima indicada impõe escalas iguais para a velocidade de queda e período da onda, será normalmente necessário, dadas as limitações das instalações experimentais, reproduzir a areia do protótipo por um material de mais baixa densidade para diminuir a sua velocidade de queda.

Considera-se também que a hidrodinâmica deve ser modelada respeitando o N^o de Froude, ou seja, com alturas de onda reproduzidas à escala geométrica do modelo e períodos reproduzidos segundo a raiz quadrada dessa escala.

6. CONCLUSÕES

O desenvolvimento de actividades balneares, associadas ao turismo e lazer, tem levado a encarar a possibilidade de criação de praias artificiais.

Quando o firme rochoso onde se pretende localizar a nova praia apresenta um declive suave, está garantida a sua estabilidade transversal não ocorrendo perdas significativas de areia para o largo. É, neste caso, necessário analisar apenas a sua morfologia de equilíbrio sob acção do regime local de agitação marítima e a eventual fuga de areia pelos extremos da zona alimentada, para garantir a estabilidade longitudinal. No caso das perdas do enchimento serem significativas deverão ser dimensionadas obras de contenção adequadas. Dada a eficácia deste tipo de obras, pode concluir-se que a estabilidade longitudinal não é normalmente uma condicionante impeditiva da criação de uma praia artificial.

Nestas condições favoráveis de declive da plataforma rochosa de apoio, os modelos numéricos de evolução da linha de costa, que simulam os transportes e balanços longitudinais, serão normalmente suficientes para analisar a estabilidade e morfologia da futura praia (Fig. 8). Para aplicação destes modelos é necessário o prévio estudo do regime de agitação marítima ao largo e a simulação da sua propagação até ao local da obra.

Quando a plataforma apresenta um declive acentuado levantam-se problemas de estabilidade transversal, pois a praia não encontra condições de apoio no firme rochoso, ocorrendo uma constante perda de sedimentos para as maiores profundidades (Fig. 9). Esta é a situação mais difícil de resolver na criação de praias artificiais.

Nestas circunstâncias, torna-se necessário melhorar as condições de apoio do perfil no firme rochoso. Estas condições dependem da morfologia da plataforma rochosa, do perfil de equilíbrio da praia e da profundidade de fecho. Normalmente não é viável actuar sobre o declive e morfologia da plataforma costeira. Relativamente ao perfil de equilíbrio, a estabilidade poderá ser melhorada utilizando areias de maior granulometria, embora esta alternativa se encontre limitada pela dificuldade de obter grandes volumes de areias grossas.

A solução mais viável consiste na redução significativa da profundidade de fecho, a qual depende da altura significativa da onda máxima anual que atinge a praia. Esta redução pode ser conseguida através de obras fixas que promovam a difracção ou a dissipação da energia das ondas incidentes. Essas obras podem ser quebra-mares enraizados ou destacados, com cotas de coroamento mais ou menos elevadas. No caso das cotas de coroamento serem elevadas impede-se o galgamento, e a penetração da energia das ondas na zona abrigada ocorre apenas por efeito de difracção. Com cotas de coroamento próximas do nível médio ou da baixa-mar, situação de menor impacto visual, não se impede a progressão da agitação marítima, mas ocorre uma redução da energia da onda no galgamento da estrutura, o que se traduz numa diminuição significativa da sua altura (Figs. 14 a 18).

Nestes casos continuam a utilizar-se os já referidos modelos de evolução de linhas de costa, para avaliação da estabilidade longitudinal, complementados com formulações: de previsão da configuração do perfil de equilíbrio; da profundidade de fecho do transporte de areias; e de determinação de coeficientes de transmissão de energia no galgamento de obras.

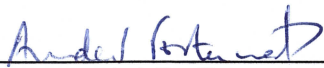
Poder-se-á ainda recorrer a modelação física sedimentar, em canal de ondas, para uma maior segurança de análise das condições de estabilidade transversal. Este tipo de ensaios permitirá também aferir os coeficientes de transmissão de energia no galgamento de quebra-mares.

Colaborou nas simulações em modelo matemático o Técnico Vitor Pisco do Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras (NEC) do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do LNEC.

Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Abril de 2012.

VISTOS

O Chefe do Núcleo de
Estuários e Zonas Costeiras



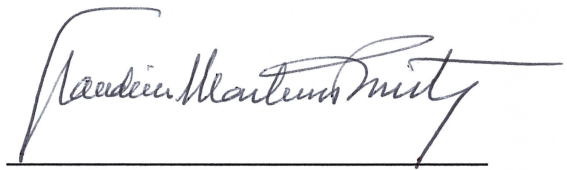
André B. Fortunato

A Directora do Departamento de
Hidráulica e Ambiente

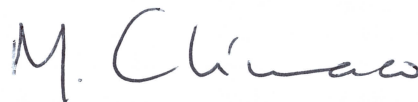


Rafaela de Saldanha Matos

AUTORIAS



Claudino M. Vicente
Engº Civil, Especialista em Hidráulica
Marítima



Manuel Clímaco
Engº Civil, Inv. Principal

BIBLIOGRAFIA

- Birkemeier, W. (1985) - Field Data on Seaward Limit of Profile Changes. Journal of Waterways Ports, Coastal and Ocean Engineering, Vol. II, n° 3, p. 598-602. ASCE.
- Bruun, P. (1954) – Coast Erosion and the Development of Beach Profiles. Technical Memorandum No. 44, Beach Erosion Board.
- Dean, R. G. (1987) - Coastal Sediment Processes: Toward Engineering Solutions. Proceedings, Coastal Sediments, ASCE, pp. 1-24.
- Dean, R. G. (1977) - Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. Ocean Engineering Technical Report No, 12, Department of Civil Engineering and College of Marine Studies, University of Delaware, Newark, DE.
- Kamphuis, J. (1975) – The Coastal Mobile Bed Model. Queen’s University, Kingston, Ontario. Research Report n.º75. Kingston.
- Moore, B. (1982) - Beach Profile Evolution in Response to Changes in Water Level and Wave Heights. M.S. Thesis, University of Delaware. Newark, DE.
- Oliveira, F. S. B. F.; Freire, P.; Vicente, C. M.; Clímaco, M. (2011) – Rehabilitation and Protection of Colwyn Beach: A Case Study. Comunicação apresentada no ICS 2011. Maio, Polónia.
- Van der Meer, J. W.; Daemen, F.R. (1994) – Stability and Wave Transmission at Low-crested Rubble-mound Structures. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. Vol.120, No. 1, January/February. ASCE.
- Vicente, C.; Clímaco, M. (2011) – Modelação Numérica de Praias Encaixadas. Comunicação apresentada na Conferência sobre Morfodinâmica Estuarina e Costeira - MEC2011. LNEC, Fevereiro, Lisboa.
- Vicente, C.; Clímaco, M. (2009) – Metodologia de Aplicação de um Modelo de Evolução de Linhas de Costa a Estudos de Praias. Comunicação apresentada às 6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. PIANC, Outubro, Funchal.

- Vicente, C.; Clímaco, M.; Pisco, V. (2009) – Modelação Numérica de Quebra-Mares Destacados. Rel. 22/09-NEC, Janeiro, LNEC, Lisboa.
- Vicente, C.; Clímaco, M. (2007) – Dimensionamento Hidráulico e Funcionamento de Esporões. Comunicação apresentada no IV Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Língua Oficial Portuguesa. APRH. Out. Madeira.
- Vicente, C. M.; Clímaco, M. (2003) – Evolução de Linhas de Costas. Desenvolvimento e Aplicação de Um Modelo Numérico. ICT/ITH-42.
- Vicente, C.; Clímaco, M. (2002) – Marina do lugar de Baixo (Ilha da Madeira). Estudo de Viabilidade da Nova Praia. Rel 116/02 - NET, LNEC, Lisboa, Maio.
- Wiegel, R. (1964) - Oceanographical Engineering.