



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE  
Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Proc. 0604/11/16262

## MODELAÇÃO NUMÉRICA DE PRAIAS ENCAIXADAS

Estudo integrado no Projecto Morfodinâmica de Praias  
do Plano de Investigação Programada (PIP) do LNEC para  
2005-2008

Lisboa • Janeiro de 2009

**I&D** HIDRÁULICA E AMBIENTE

**RELATÓRIO 15/2009 – NEC**



# **MODELAÇÃO NUMÉRICA DE PRAIAS ENCAIXADAS**

## **RESUMO**

O objectivo do presente trabalho é o melhoramento da simulação do equilíbrio de praias encaixadas através da adaptação de um modelo de evolução de linhas de costa. Foram aperfeiçoadas as componentes do modelo que simulam a difracção em saliências fixas e os seus efeitos sobre a movimentação das areias e morfologia da praia.

Com vista a aferir as melhorias obtidas recorreu-se à comparação dos resultados da modelação com a formulação semi-empírica de previsão da morfologia de praias parabólicas e com casos reais de praias encaixadas da costa portuguesa.

## **NUMERICAL MODELLING OF EMBAYED BEACHES**

### **ABSTRACT**

The objective of this work is to improve the capacity to simulate the equilibrium of embayed (or pocket) beaches by adapting an existing coastline evolution model. This reflected in refining the model components of wave diffraction around fixed salients and its effect on sediment transport and beach morphology.

In order to assess the model enhancements, we compare the model results with those from the semi-empirical formula for planform-parabolic beaches and with the observed planforms of few headland-bay beaches along the Portuguese coast.



# MODELAÇÃO NUMÉRICA DE PRAIAS ENCAIXADAS

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	CARACTERÍSTICAS GERAIS DO MODELO LITMOD .....	2
3	DINÂMICA E MORFOLOGIA DAS PRAIAS ENCAIXADAS .....	3
	3.1 Considerações gerais .....	3
	3.2 Propagação das ondas .....	4
	3.2.1 Considerações gerais .....	4
	3.2.2 Refracção .....	4
	3.2.3 Difraccção .....	6
	3.3 Transporte sólido litoral .....	9
	3.4 Morfologia .....	13
4	APERFEIÇOAMENTO DA MODELAÇÃO .....	15
5	AFERIÇÃO DO MODELO .....	18
	5.1 Considerações gerais .....	18
	5.2 Comparação com uma formulação semi-empírica .....	18
	5.3 Comparação com casos reais .....	24
6	CONCLUSÕES .....	29
	BIBLIOGRAFIA .....	31

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Fig.1 – Praia encaixada
- Fig. 2 - Esquema de difracção.
- Fig. 3 – Gráficos de difracção de Hanson.
- Fig. 4 - Esquema comparativo da incidência das ondas numa praia aberta e numa praia encaixada.
- Fig. 5 – Simulação da estabilidade da linha de água da praia de Albufeira.
- Fig. 6 – Simulação da linha de água de equilíbrio da praia de Albufeira, a partir de uma configuração inicial rectificada.
- Fig. 7 – Esquema de aplicação do método das praias parabólicas.
- Fig. 8 – Testes de simulação do efeito de um quebra-mar destacado para diferentes valores do coeficiente  $K_H$ , com incidência frontal,  $T=9s$  e  $H=2m$ .
- Fig. 9 – Testes de simulação do efeito de um quebra-mar destacado para diferentes valores do coeficiente  $K_H$ , com incidência  $\alpha=-5^\circ$ ,  $T=9s$  e  $H=2m$ .
- Fig. 10 – Testes de simulação do efeito de um quebra-mar destacado para diferentes valores do coeficiente  $K_H$ , com incidência  $\alpha=+5^\circ$ ,  $T=9s$  e  $H=2m$ .
- Fig. 11 – Comparação das curvas de Silvester com os resultados do modelo para diferentes valores do coeficiente  $K_H$ , e incidências frontal e oblíquas.
- Fig. 12 – Simulação da estabilidade da linha de água da praia do Cabedelo (Viana do Castelo).
- Fig. 13 – Simulação da linha de água de equilíbrio da praia do Cabedelo (Viana do Castelo), a partir de uma configuração inicial rectificada.
- Fig. 14 – Simulação da estabilidade da linha de água da praia da Árvore (Vila do Conde).
- Fig. 15 – Simulação da linha de água de equilíbrio da praia da Árvore (Vila do Conde), a partir de uma configuração inicial rectificada.

# MODELAÇÃO NUMÉRICA DE PRAIAS ENCAIXADAS

## 1 INTRODUÇÃO

As praias encaixadas, frequentes na natureza, caracterizam-se por apresentarem nos seus extremos saliências fixas, suficientemente desenvolvidas para impedirem trocas de areias com os trechos de costa adjacentes.

Essas saliências, que podem ser formações rochosas naturais ou obras costeiras como molhes, esporões ou quebra-mares, induzem modificações da propagação das ondas nas suas proximidades, com atenuação local da energia. Resultam alterações morfológicas traduzidas num maior ou menor encurvamento da linha de água nos extremos da praia (Fig. 1).



Fig.1 – Praia encaixada

A previsão das formas de equilíbrio destas praias tem sido objecto de diversos estudos de investigação (Silvester, 1970 e 1974; Komar, 1976; Silvester and Hsu, 1993; Barreiro e Oliveira, 2005).

É este também o objectivo do presente trabalho, o qual se insere no melhoramento do modelo de evolução de linhas de costa Litmod, modelo que tem vindo a ser aplicado pelo LNEC no estudo de problemas de dinâmica costeira. Visa-se aperfeiçoar a sua componente de modelação numérica que simula a difracção de ondas nas saliências fixas e os seus efeitos sobre a movimentação das areias e morfologia da praia.

## **2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO MODELO LITMOD**

Este modelo permite tratar trechos de costa de grande comprimento, da ordem das dezenas de quilómetros, e simular evoluções de longo prazo, até algumas dezenas de anos. Apresenta grande flexibilidade de utilização, admitindo a adaptação dos módulos de cálculo às particularidades de cada situação concreta (Vicente, 1991; Vicente e Clímaco, 2003; Clímaco e Vicente, 2007).

Trata-se de um modelo unidimensional em que a evolução da costa é representada pelas variações de posição da linha de água. O seu funcionamento baseia-se no cálculo do transporte litoral, efectuado a partir das características das ondas na rebentação, e na aplicação da equação da continuidade aos volumes de areia movimentados.

A variação da posição da linha de água é calculada, em cada célula em que se divide o trecho de costa, a partir das diferenças de caudal sólido que nela penetram e a abandonam num curto intervalo de tempo. Admite-se que o perfil transversal no seu avanço ou recuo se desloca paralelamente a si próprio, sem alteração de forma.

São elementos de base no cálculo dos caudais sólidos as alturas, os períodos e os ângulos das ondas na rebentação. A posição da rebentação, e consequentemente os valores desses parâmetros, são afectados pela evolução da posição da linha de água, pelo que as características da onda na rebentação são objecto de um cálculo iterativo que tem em conta as profundidades que a determinam.

O modelo é aplicável a simulações da evolução de uma linha de costa onde coexistam praias e trechos rochosos, em condições naturais ou com obras e intervenções de alimentação artificial. No caso de evoluções naturais, poderá permitir compreender a dinâmica e a configuração de uma costa sem obras mas onde possam existir fontes aluvionares, saliências rochosas que produzam retenção de sedimentos ou efeitos de difracção, e prever alterações decorrentes das oscilações naturais da alimentação de areias ou das taxas de transporte. Pode também simular os ganhos e perdas aluvionares provenientes: de cursos de água que debitem para a costa; da erosão de falésias; e de actividades de extracção de areias. Pode ainda ter em conta os efeitos de diversos tipos de obras que afectam o equilíbrio de uma costa: molhes, esporões, defesas frontais e quebra-mares destacados, estando esta última componente ainda em fase de aperfeiçoamento. Pode tratar não só obras isoladas como combinações de vários tipos, associadas ou não a alimentação artificial.

### **3 DINÂMICA E MORFOLOGIA DAS PRAIAS ENCAIXADAS**

#### **3.1 Considerações gerais**

As ondas são o factor determinante da movimentação e equilíbrio das areias das praias. As suas alturas e ângulos na rebentação condicionam o valor e sentido do transporte sólido litoral. Desta forma é indispensável, para interpretar a dinâmica e morfologia de uma praia, caracterizar previamente a

propagação das diferentes ondas do regime de agitação marítima, entre o largo e a rebentação.

Quando existem saliências acentuadas na costa ocorrem efeitos de difracção que não podem ser ignorados na análise da propagação. Resultam, desses efeitos, variações significativas da altura das ondas ao longo do desenvolvimento da praia que se repercutem na sua configuração de equilíbrio.

## **3.2 Propagação das ondas**

### **3.2.1 Considerações gerais**

Na faixa compreendida entre o largo e a costa, a diminuição de profundidades e eventual existência de obstáculos induz alterações das características das ondas, segundo os fenómenos de refracção e difracção.

Entre o largo e uma profundidade de aproximação  $d_a$ , em que a evolução da praia se não faz ainda sentir, o estudo da variação dos parâmetros das ondas não é feito pelo Litmod. Recorre-se para esse efeito a um modelo numérico de propagação que simule a refracção e a difracção das ondas.

Entre a batimétrica de aproximação e a costa, zona sujeita a evoluções morfológicas, a propagação é simulada pelo próprio Litmod.

### **3.2.2 Refracção**

O Litmod calcula por iterações, a partir das características da onda na profundidade de aproximação, e supondo a batimetria paralela, as profundidades a que se dará a rebentação e as alturas e ângulos das ondas nesse ponto.

Na refracção sobre batimetria paralela utilizam-se as expressões da teoria da onda de pequena amplitude. A relação entre as alturas das ondas na rebentação e na batimétrica de aproximação é obtida pela expressão:

$$\frac{H_b}{H_a} = K_e \cdot K_r$$

em que  $K_e$  é o coeficiente de empolamento entre as duas posições e  $K_r$  o coeficiente de refração.

As expressões destes coeficientes são, por seu lado:

$$K_e = \sqrt{n_a \cdot \frac{L_a}{L_b}}$$

com

$$n_a = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\frac{4\pi d_a}{L_a}}{\sinh \frac{4\pi d_a}{L_a}} \right]$$

e

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \alpha_a}{\cos \alpha_b}}$$

em que  $d$  é a profundidade,  $L$  o comprimento de onda e  $\alpha$  o ângulo da onda com a costa, dizendo os índices  $a$  e  $b$  respeito à batimétrica de aproximação e à rebentação, respectivamente.

Utiliza-se um critério de rebentação que poderá ser o que se traduz pela relação:

$$H_b = 0.78d_b$$

A determinação do ângulo na rebentação é feita pela aplicação da lei de Snell:

$$\frac{C_a}{C_b} = \frac{\sin \alpha_a}{\sin \alpha_b}$$

Em que  $H$  é a altura da onda e  $C$  é a sua celeridade.

O cálculo das características da onda na rebentação é feito por aproximações sucessivas. Começa-se por calcular o produto  $K_e \cdot K_r$  admitindo, em primeira aproximação, que  $H_b = H_a$ . Com esse produto determina-se novo valor, mais correcto, de  $H_b$ , repetindo-se o cálculo até que a variação seja inferior a

determinada percentagem que se considere corresponder a uma aproximação satisfatória.

Com o último valor de  $H_b$ , fica a dispor-se também do correspondente  $\alpha_b$ , que foi necessário para o seu cálculo.

Refere-se ainda que os valores dos comprimentos de onda em função das profundidades e do período,  $T$ , necessários neste processo de cálculo, se obtêm também por iterações, a partir da expressão:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \cdot \tanh \frac{2\pi d}{L}$$

### 3.2.3 Difraccção

No caso de existirem acentuadas saliências fixas, naturais ou artificiais, não podem ser ignorados os efeitos de difracção entre a batimétrica de aproximação e a costa. Para considerar esses efeitos sobre os ângulos e as alturas das ondas na rebentação pode utilizar-se o método referido por Horikawa (1988), em que as zonas iluminadas e de sombra apresentam processos de cálculo diferentes (Fig. 2).

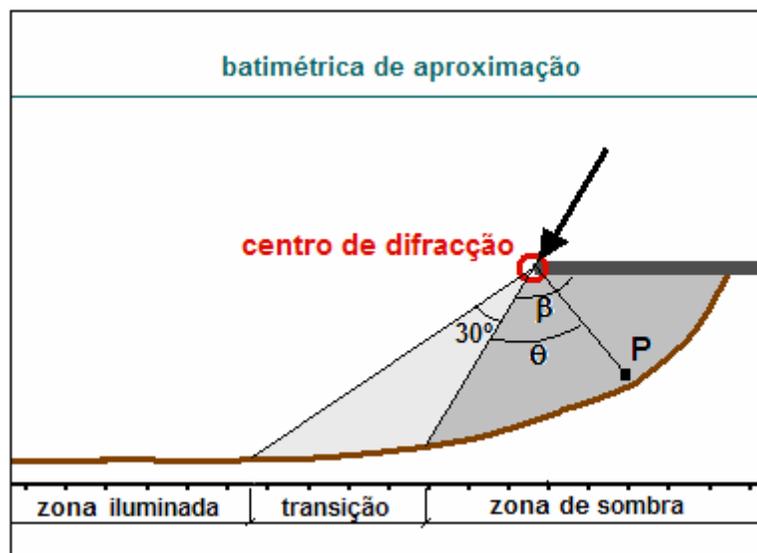


Fig. 2 - Esquema de difracção

## Zonas iluminada e de transição

Os cálculos de  $H_b$  e  $\alpha_b$  para um ponto  $P$  localizado nestas zonas são efectuados, basicamente, segundo um processo de reprodução da propagação da onda sobre batimetria paralela, a partir de uma batimétrica de aproximação, onde são conhecidos os diferentes parâmetros da onda.

O processo só é, no entanto, igual ao anteriormente referido, na parte da zona iluminada que não é afectada pela difracção. Já na zona de transição, onde se começa a sentir o efeito de difracção, o procedimento é ligeiramente diferente. No cálculo da altura da rebentação,  $H_{br}$ , é tido em conta o coeficiente local de difracção, vindo assim ligeiramente alterado  $H_b$  e consequentemente a profundidade de rebentação,  $d_{br}$ , e o ângulo na rebentação  $\alpha_b$ .

## Zona de sombra

Nos cálculos localizados nesta zona sobrepõem-se os efeitos de difracção e de refracção. Procede-se da forma seguinte:

- Considera-se, numa primeira aproximação, que a posição do ponto  $P$  onde se verifica a rebentação, coincide com a linha de água. Calcula-se o coeficiente de difracção nesse ponto por meio de um processo simplificado de cálculo da difracção. Utilizam-se as curvas de Hanson (1987) que a seguir se apresentam (Fig. 3), em que o coeficiente de difracção é função de  $\theta$  e do parâmetro de concentração  $S_{max}$ . Este dependerá da profundidade relativa na extremidade da obra, parâmetro designado por  $D_{TP}/L_0$ , e do grau de irregularidade da agitação.
- Calculado o coeficiente de difracção,  $K_d$ , determina-se em primeira aproximação o valor da altura na rebentação, a partir da altura da onda no centro de difracção,  $H_{CD}$ :

$$H_b = H_{CD} \cdot K_d$$

e a profundidade de rebentação correspondente.

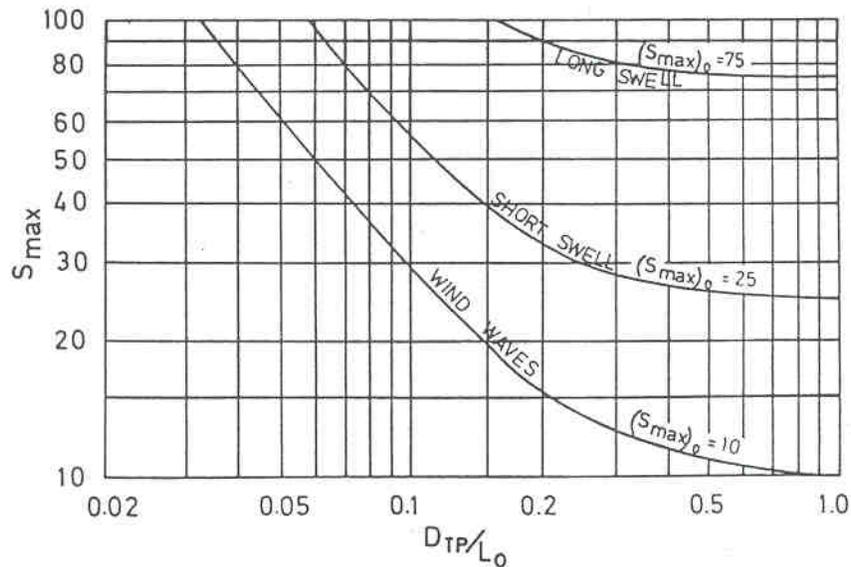
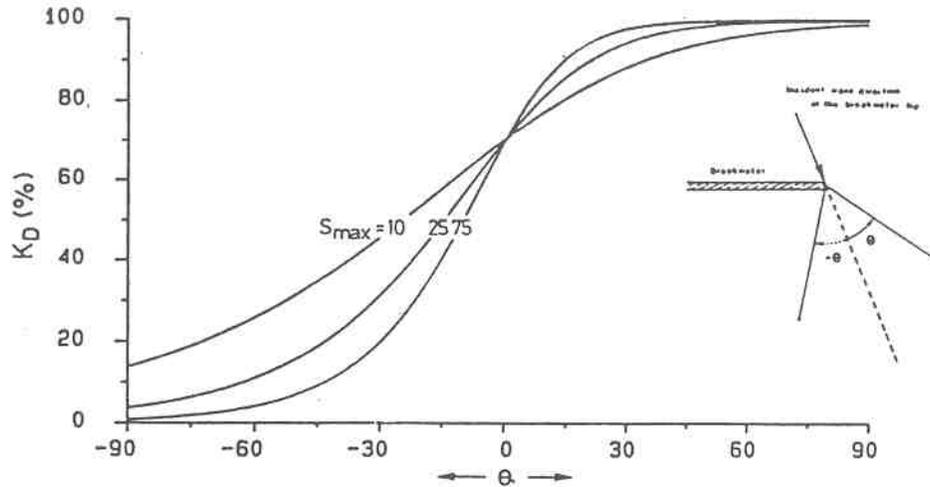


Fig. 3 – Gráficos de difracção de Hanson  
[Extraídos de Hanson (1987)]

- Conhecida esta, é calculada a ordenada,  $y$ , do ponto de rebentação, tendo em conta a função que define o perfil da praia.
- É então feito um primeiro cálculo de refração considerando a batimetria paralela à orientação da costa, na célula em causa. É também calculado o coeficiente de empolamento,  $K_e$ , o qual é função do comprimento da onda e das profundidades no obstáculo e no ponto de rebentação.

- Calcula-se um novo valor de altura na rebentação:

$$H_b = H_{CD} \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_r$$

- Repete-se o cálculo da refracção até ser obtido um valor de  $H_b$ , cuja diferença em relação ao anterior seja aceitável.

Ficam a conhecer-se, terminado o cálculo, os valores de  $H_b$ ,  $\alpha_b$  e  $L_b$  na célula do modelo onde se localiza o ponto  $P$ , parâmetros indispensáveis à avaliação do transporte litoral pela fórmula do CERC. A variação de altura nas células vizinhas permitirá acrescentar uma parcela devida ao gradiente das alturas das ondas na rebentação.

### 3.3 Transporte sólido litoral

As formulações mais utilizadas para o cálculo do transporte sólido litoral continuam ainda a basear-se na correlação entre o fluxo longitudinal da energia da onda na rebentação e o fluxo da massa de sedimentos. As fórmulas do tipo indicado, como a do Coastal Engineering Research Center (1975 e 1984) e a de Inman e Bagnold em 1963 (Komar, 1981 e 1988), são as mais utilizadas. A correlação que estabelecem é do tipo:

$$Q = KP_l$$

em que é:

$Q$  transporte sólido litoral

$P_l$  componente segundo a direcção da costa, e por unidade de comprimento desta, da potência dissipada pela onda na rebentação

$K$  constante de correlação obtida de medições na natureza.

Verifica-se que são idênticos os valores de  $K$  nas fórmulas do CERC e de Inman. De facto, segundo a apresentação feita pelo CERC,  $K$  é igual a 7500,

com  $Q$  expresso em jardas cúbicas por ano e  $P_I$  em pés x libra por segundo e por pé de praia.

Transferindo as unidades para  $m^3/dia$  e  $kg/s$ , vem

$$Q (m^3/dia) = 34,6 P_I (Kg/s)$$

A fórmula de Inman é homogénea, sendo  $Q$  o caudal sólido em peso submerso e, portanto, em unidades de força por unidades de tempo, tal como a grandeza  $P_I$ . O valor atribuído por Inman a  $K$  foi 0.77, sendo um coeficiente adimensional.

Considerando na fórmula de Inman um peso específico para a areia submersa de  $1600 Kg/m^3$ , um índice de vazios de 0.4 e efectuando a mesma transferência de unidades, obtém-se:

$$Q (m^3/dia) = 69.3 P_I (Kg/s)$$

A aparente diferença entre os valores de  $K$  resulta do facto de a potência longitudinal na fórmula do CERC ser calculada com a altura significativa,  $H_S$ , enquanto que na de Inman se calcula com a raiz quadrada da média das alturas quadráticas,  $H_{rms}$ . Aplicando a relação:

$$H_S = 1.42 H_{rms}$$

e tendo em atenção que a altura da onda contribui com o seu valor elevado ao quadrado para o cálculo da potência longitudinal, verifica-se que as duas constantes são praticamente iguais.

Embora isso aconteça nas duas expressões mais usadas e a constante seja a mais ajustada aos conjuntos de dados experimentais dos numerosos investigadores que abordaram o tema, não se pode esquecer que existe uma apreciável dispersão nesses conjuntos. Este facto explica que alguns autores de modelos de linha de costa considerem  $K$  como um parâmetro de calibração dos seus modelos.

### Expressão de $P_l$

O fluxo de energia de uma onda, por unidade de comprimento da crista, é traduzido pelo produto:

$$E \cdot C_g$$

em que é:

$E$  densidade de energia

$C_g$  celeridade de grupo.

Estes parâmetros têm as expressões, na teoria das ondas de pequena amplitude:

$$E = \frac{\gamma H^2}{8}$$

e

$$C_g = n \cdot C = \frac{1}{2} \left[ 1 + \frac{\frac{4\pi d}{L}}{\sinh \frac{4\pi d}{L}} \right] \cdot \frac{L}{T}$$

em que é:

$H$  altura de onda

$C=L/T$  celeridade, sendo  $L$  o comprimento e  $T$  o período

$\gamma$  peso específico da água

$d$  profundidade.

Como na rebentação é  $n \simeq 1$ , a expressão do fluxo de energia por unidade tempo (potência) e de comprimento de costa é:

$$P = \frac{\gamma H_b^2 L_b}{8T} \cdot \cos \alpha_b$$

e a componente segundo a linha de costa e por unidade desta:

$$P_l = \frac{\gamma H_b^2 L_b}{8T} \cdot \text{sen} \alpha_b \cdot \cos \alpha_b$$

em que  $\alpha_b$  é o ângulo da onda com a costa, na rebentação.

Resulta

$$Q \text{ (m}^3\text{/dia)} = 34,6 \cdot \frac{\gamma H_b^2 L_b}{8T} \cdot \text{sen} \alpha_b \cdot \text{cos} \alpha_b$$

Quando o gradiente da altura de onda ao longo da praia não é desprezável, como sucede nas zonas de difracção, é importante usar fórmulas de cálculo do transporte sólido litoral que tenham em conta esse efeito. Este foi o procedimento adoptado no modelo Genesis, tendo-se Hanson apoiado nas análises de Kraus *et al.* (1981) e Kraus e Harikai (1983).

Segundo esta formulação é adicionada à expressão tradicional, baseada no fluxo de energia, uma segunda parcela que introduz os efeitos da variação de altura.

No modelo Litmod segue-se essa mesma orientação, tendo-se adoptado uma expressão com a seguinte estrutura:

$$Q_t = Q + Q_H$$

Em que são:

$Q_t$  o caudal total

$Q$  o caudal devido à componente longitudinal do fluxo de energia

$Q_H$  o caudal devido à variação da altura de onda ao longo da praia

Segundo os autores citados a componente  $Q_H$  cresce com o gradiente da altura da onda e com a potência dissipada na rebentação, sofrendo ainda algum efeito do declive do perfil da praia,  $m$ . É proposta a seguinte expressão:

$$Q_H = K_H \cdot P \cdot 1/m \cdot dH/dx = K_H \cdot \frac{\gamma H_b^2 L_b}{8T} \cdot \text{cos} \alpha_b \cdot 1/m \cdot dH/dx$$

em que  $K_H$  é um coeficiente de correlação.

### **3.4 Morfologia**

As areias de uma praia estão em constante movimento, determinado pela dissipação da energia das ondas na rebentação. A intensidade e sentido dos volumes deslocados dependem do valor e sentido da projecção, sobre a linha de água, do vector que representa a potência dissipada na rebentação de cada onda.

Numa praia sem fontes aluvionares significativas nem trocas sedimentares com os trechos de costa adjacentes deverá ser nulo, em cada ponto e a longo prazo, o saldo dessas movimentações. Consequentemente, a resultante dos vectores da potência dissipada por todas as ondas desse período de tempo será aproximadamente perpendicular à linha de água.

Uma praia encaixada distingue-se de uma praia em costa aberta pelo encurvamento da sua batimetria na vizinhança das saliências que a limitam. A propagação da onda entre a base da praia e a rebentação explica essas diferenças de morfologia (Fig. 4).

Numa praia aberta não se verificam diferenças significativas dos parâmetros da onda na rebentação ao longo do seu desenvolvimento longitudinal, dada a uniformidade da propagação. Pelo contrário, numa praia encaixada, ocorrem interferências das saliências na propagação. Essas interferências crescem do centro para os extremos da praia, e traduzem-se na intercepção dos rumos mais oblíquos e na atenuação de alturas e rotação das cristas por efeito da difracção.

Como se representa esquematicamente na figura, dá-se uma rotação progressiva da resultante da potência dissipada, o que implica o encurvamento da linha de água para se manter aproximadamente perpendicular a esse vector.

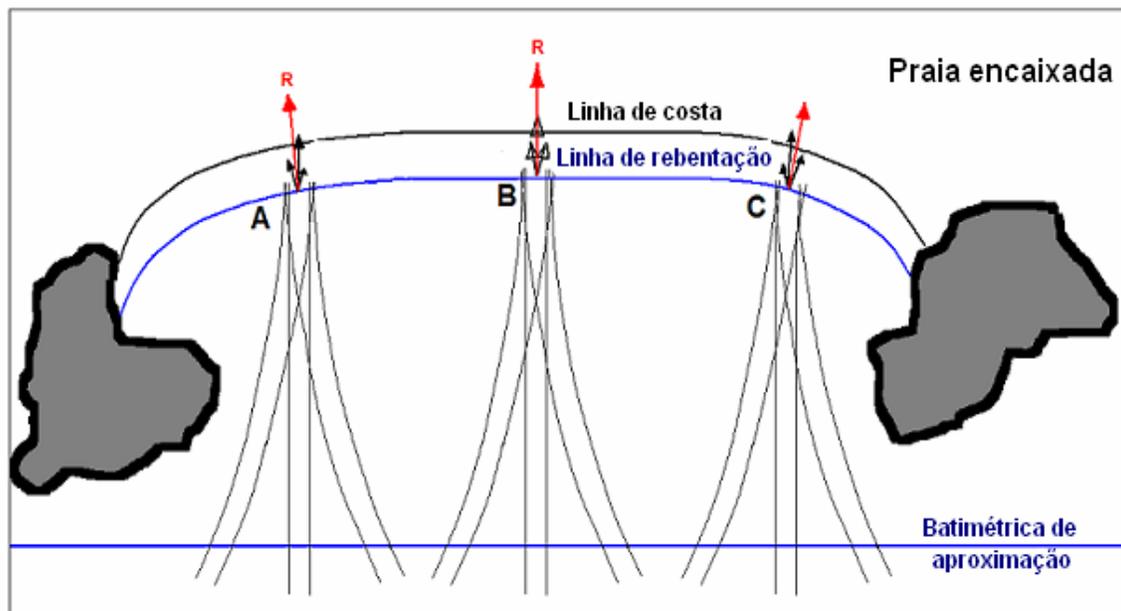
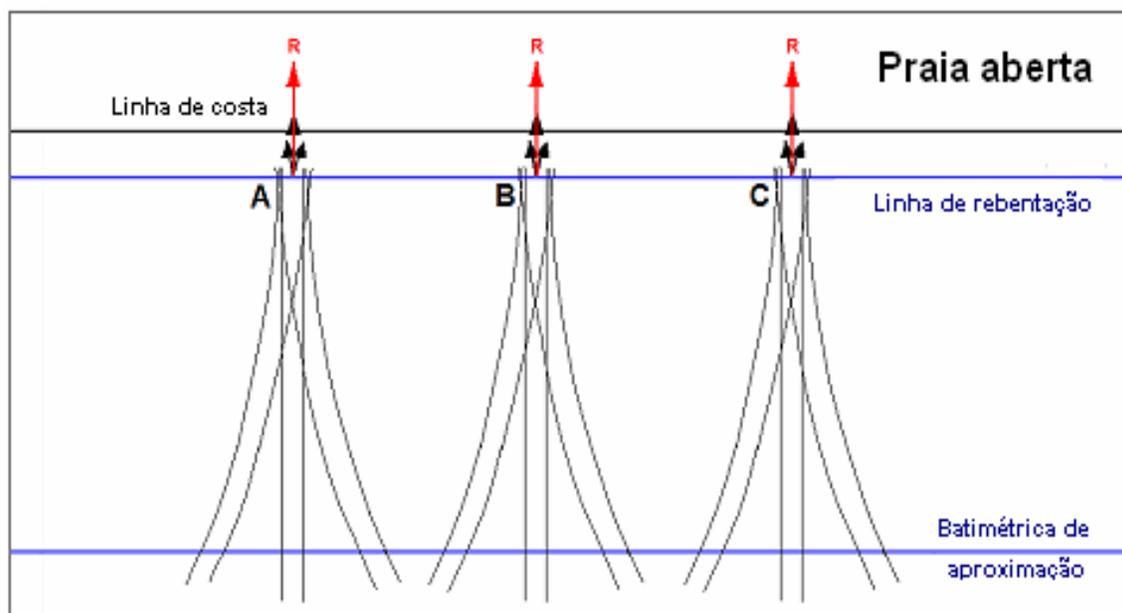


Fig. 4 - Esquema comparativo da incidência das ondas numa praia aberta e numa praia encaixada.

## 4 APERFEIÇOAMENTO DA MODELAÇÃO

Como foi referido, estava em causa o melhoramento da simulação da difracção, aspecto importante no estudo de praias encaixadas.

Na versão anterior do modelo a simulação dos efeitos de difracção numa saliência rochosa era conseguida através da implantação de um esporão virtual nesse extremo. Apresenta-se um caso de aplicação em que esta solução deu resultados satisfatórios. Trata-se da praia de Albufeira em que foi possível simular a configuração da linha de água de equilíbrio da praia sob acção do regime de agitação desse trecho da costa do Algarve (Fig. 5). Para confirmação da capacidade de simulação do modelo repetiram-se os cálculos, partindo de uma linha de água inicial bastante rectificada em relação à situação de equilíbrio, de forma a verificar se era reproduzido o encurvamento dos extremos da praia (Fig. 6).

Os resultados eram, no entanto, pouco satisfatórios quando o centro de difracção estava associado a reentrâncias acentuadas da costa e da linha de água, o que obrigava a ajustamentos dos regimes de agitação nessas zonas, a sentimento, para conseguir a calibração local da linha de água. A nova versão procura ultrapassar essas limitações através de uma mais completa modelação da difracção e dos seus efeitos sobre o transporte.

Este melhoramento da versão anterior consistiu na programação do funcionamento de um quebra-mar enraizado, o qual permite simular o efeito de difracção quer deste tipo de obras quer de uma saliência rochosa natural.

As modificações introduzidas no modelo traduziram-se em:

- **Novos dados**

- Número de centros de difracção e respectivas coordenadas.
- Perfis da praia onde se localizam os centros de difracção.
- Coeficiente de calibração da parcela da fórmula de transporte sólido litoral que introduz o efeito da variação longitudinal da altura de onda.



Fig. 5 – Simulação da estabilidade da linha de água da praia de Albufeira.

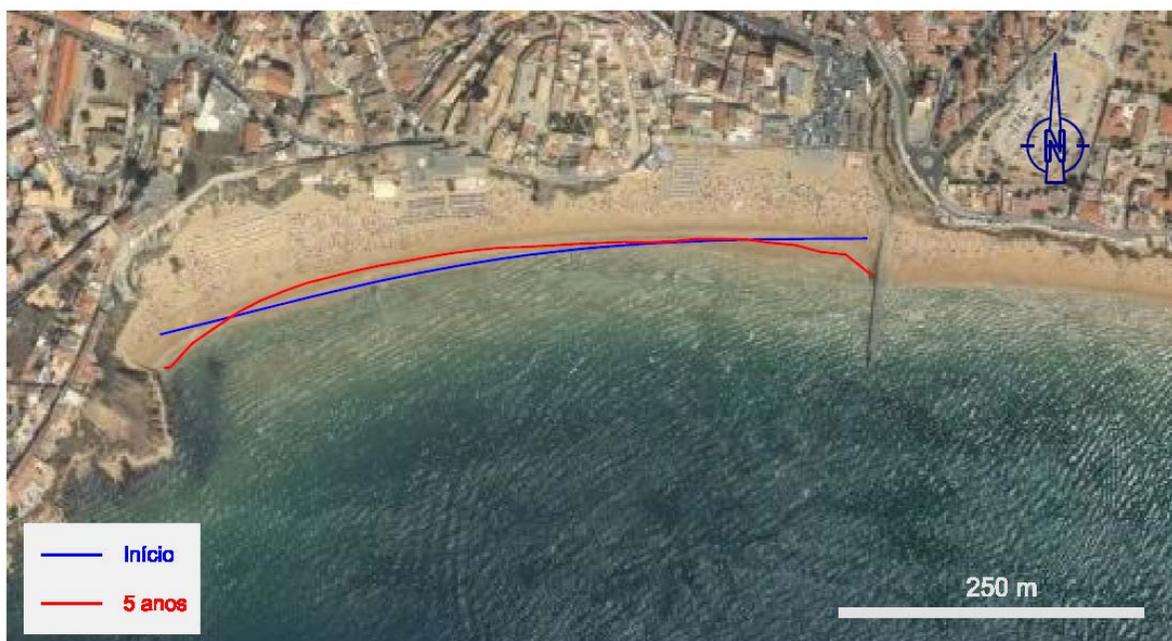


Fig. 6 – Simulação da linha de água de equilíbrio da praia de Albufeira, a partir de uma configuração inicial rectificadada.

- **Alteração do procedimento geral de cálculo**

- Após um primeiro varrimento de todas as células para cálculo dos parâmetros da onda na rebentação, ainda sem considerar os efeitos de difracção, novo varrimento para introdução dos efeitos dos centros de difracção existentes.

- **Alteração do cálculo das ondas**

- Determinação dos parâmetros da onda nos centros de difracção. Considera-se propagação sobre batimetria paralela, entre a batimétrica de aproximação e os centros de difracção.

- Delimitação da zona de sombra, a partir do conhecimento da direcção da onda incidente no centro de difracção.

- Definição da zona de transição, ainda influenciada pela difracção, a qual foi estendida a um sector de 30° adjacente à zona de sombra.

- Determinação dos parâmetros da onda na rebentação, nas zonas de sombra e de transição, de acordo com o procedimento anteriormente referido, interpolando os valores dos parâmetros tabelados das curvas de Hanson.

- Substituição dos parâmetros da onda, nas zonas de sombra e de transição, pelos novos valores que incluem os efeitos da difracção. Após esta substituição o modelo fica a dispor dos parâmetros da agitação marítima em todas as células e pode prosseguir o cálculo dos transportes e balanços aluvionares.

- **Alteração do cálculo do transporte**

São tidos em conta os efeitos da acentuada variação da altura da onda ao longo da praia, característicos da difracção, utilizando a expressão de cálculo acima indicada.

## 5 AFERIÇÃO DO MODELO

### 5.1 Considerações gerais

Para aferir a capacidade da nova versão do modelo simular o comportamento de praias encaixadas, recorreu-se à comparação dos seus resultados com a formulação semi-empírica de previsão da morfologia de praias parabólicas e com casos reais.

### 5.2 Comparação com uma formulação semi-empírica

Uma das formulações mais usadas na previsão da morfologia de equilíbrio de praias encaixadas é a correspondente às praias parabólicas (Silvester, R. and Hsu, J., 1993; Hsu and Evans, 1989).

Trata-se de uma abordagem semi-empírica que associa interpretações dos efeitos de difracção e transporte a dados de morfologia de praias reais e de resultados de ensaios em modelo reduzido (Fig. 7).

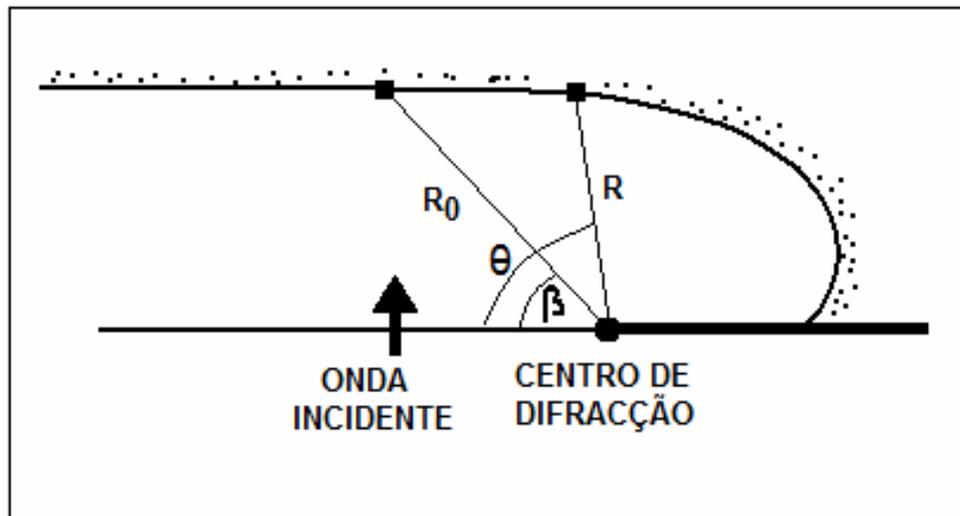


Fig. 7– Esquema de aplicação do método das praias parabólicas

Considera este método que a linha de água de uma praia encaixada pode ser descrita por uma parábola, cujo traçado deve ser iniciado num ponto da praia distante do obstáculo que produz a difracção, onde o efeito deste fenómeno físico se não faça ainda sentir.

Estabelece-se uma direcção para a onda dominante, com incidência no centro de difracção. Esta onda seria uma onda única que só por si condicionaria a morfologia de equilíbrio da praia. Deve ter-se ainda em conta que numa zona suficientemente afastada da saliência que induz a difracção, estando a praia em equilíbrio com saldo nulo, a direcção da linha de água e da batimetria local deverá coincidir com a da onda incidente dominante. A sua direcção pode ainda ser estimada através de cálculos de propagação da agitação marítima.

Medidos  $R_0$  e o ângulo  $\beta$ , calculam-se para os diferentes ângulos  $\theta$  os valores de previsão de  $R$ , pela expressão da parábola:

$$R / R_0 = C_0 + C_1 \cdot (\beta / \theta) + C_2 \cdot (\beta / \theta)^2$$

Os valores das constantes  $C_0$ ,  $C_1$  e  $C_2$  são função de  $\beta$  e foram aferidos pelos autores a partir de numerosos casos de praias reais e de ensaios em modelo reduzido.

Para comparar os resultados do modelo Litmod com os que se obtêm com esta fórmula, procedeu-se da seguinte forma:

- Para um extremo de uma praia encaixada sujeito a difracção, simularam-se evoluções no modelo até à estabilização da linha de água, com incidências frontais e ligeiramente oblíquas, fazendo-se variar o coeficiente  $K_H$ . Este coeficiente entra na parte da fórmula de cálculo do transporte que traduz o efeito da variação longitudinal da altura da onda e pode ser usado como parâmetro de calibração para ajustamento do grau de curvatura da linha de água (Figs. 8 a 10).
- As linhas de água estabilizadas para os diferentes valores de  $K$  foram comparadas com os resultados da fórmula semi-empírica.

As simulações mostram que a consideração da variação da altura das ondas na fórmula de transporte intensifica o encurvamento da linha de água. Verificou-se que o melhor ajustamento aos resultados da formulação semi-empírica se dá para valores de  $K_H$  entre 0,6 e 0,8 (Fig.11).

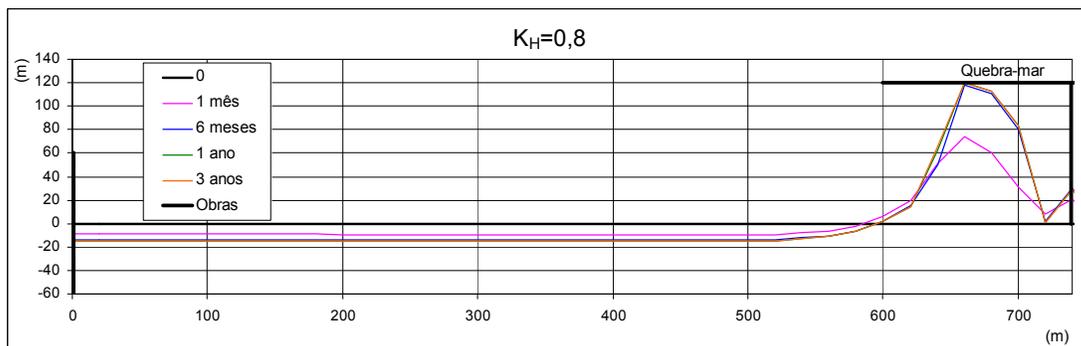
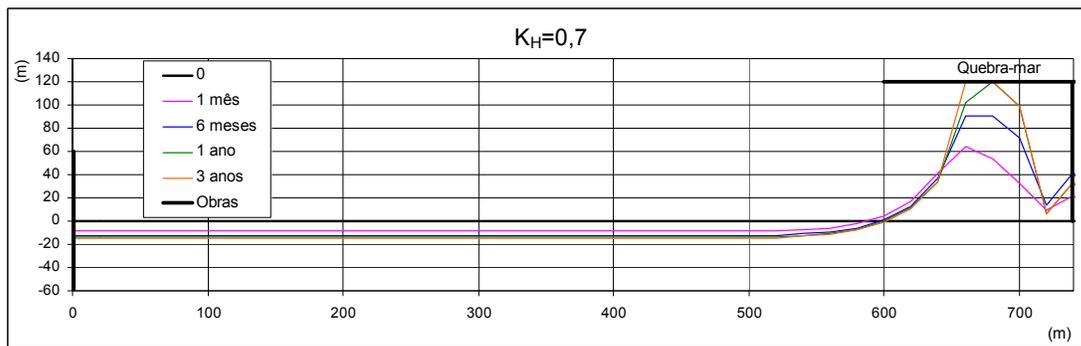
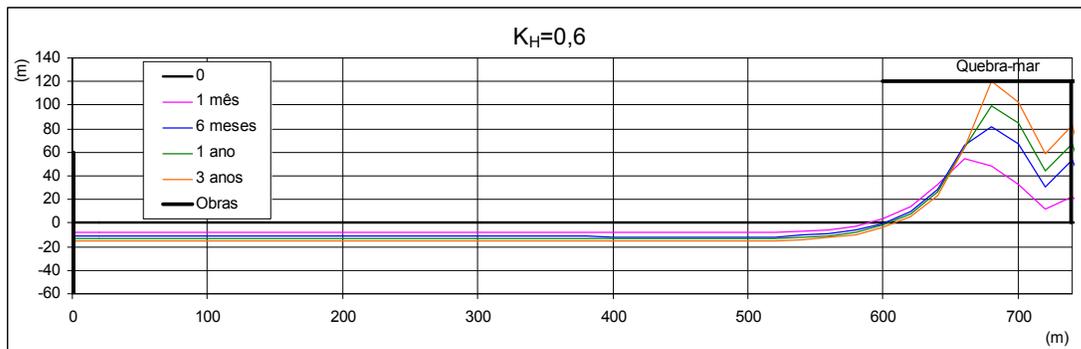
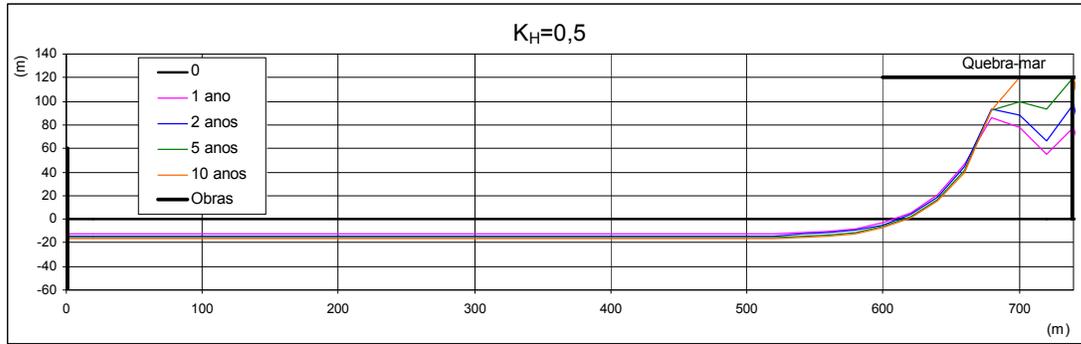


Fig. 8 – Testes de simulação do efeito de um quebra-mar destacado para diferentes valores do coeficiente  $K_H$ , com incidência frontal,  $T=9s$  e  $H=2m$ .

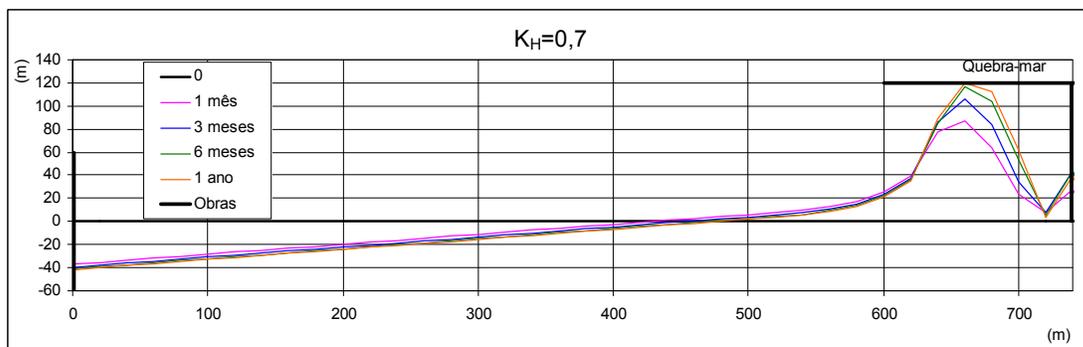
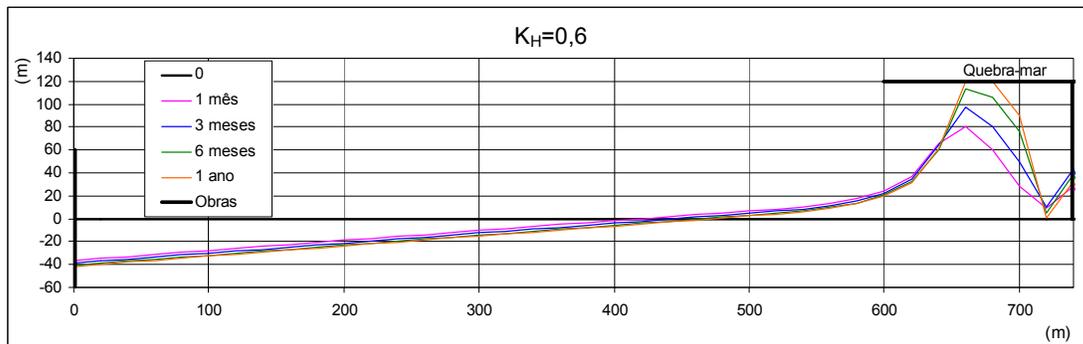
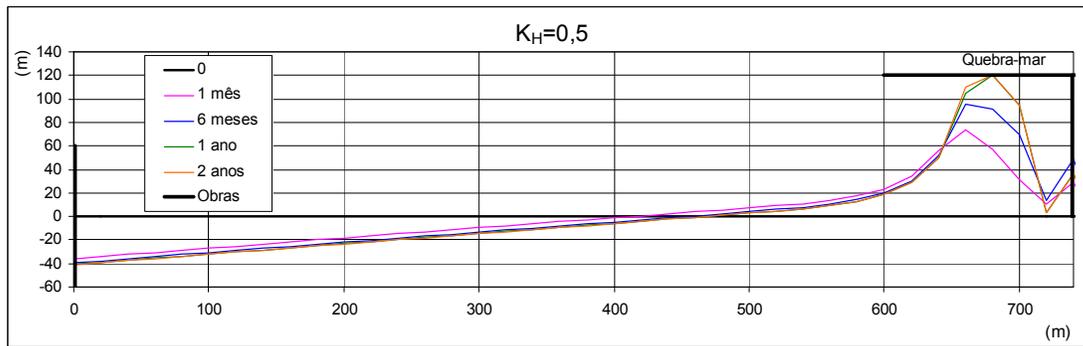
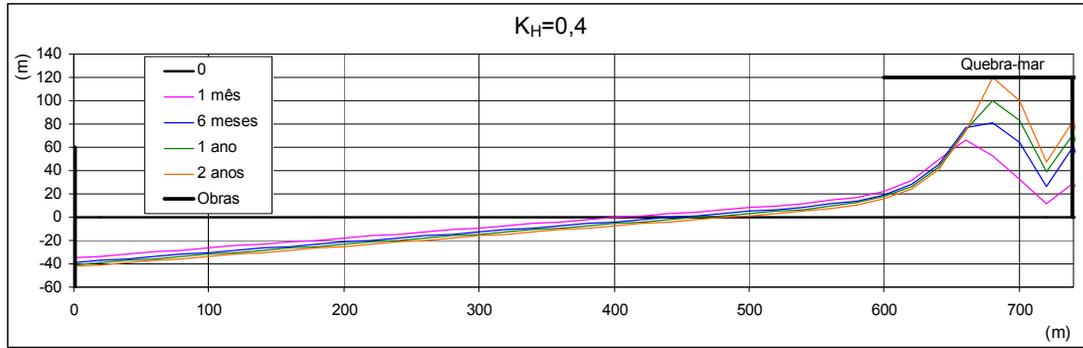


Fig. 9 – Testes de simulação do efeito de um quebra-mar destacado para diferentes valores do coeficiente  $K_H$ , com incidência  $\alpha=-5^\circ$ ,  $T=9s$  e  $H=2m$ .

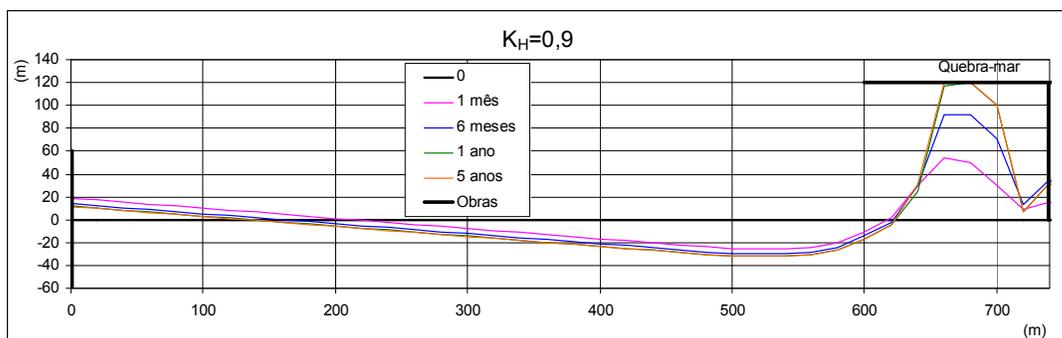
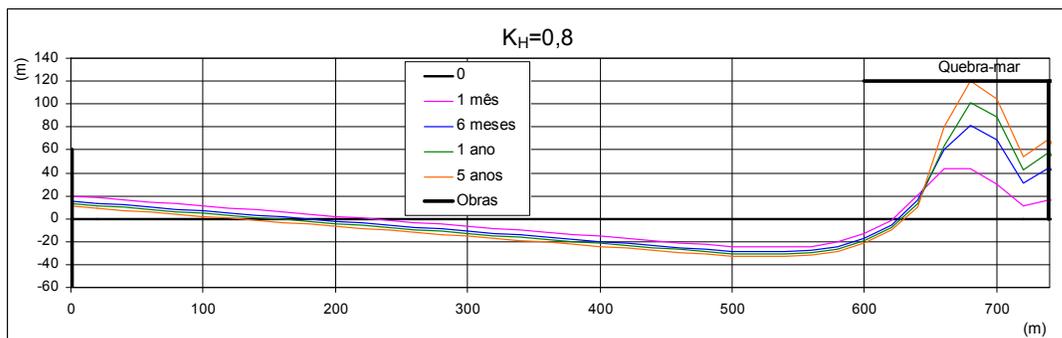
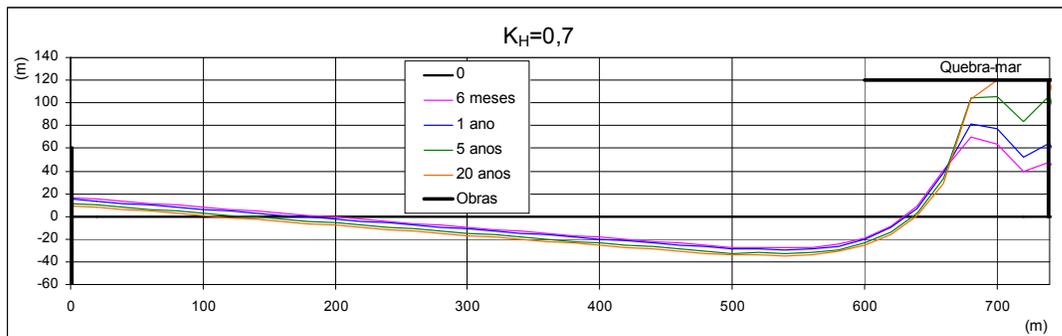
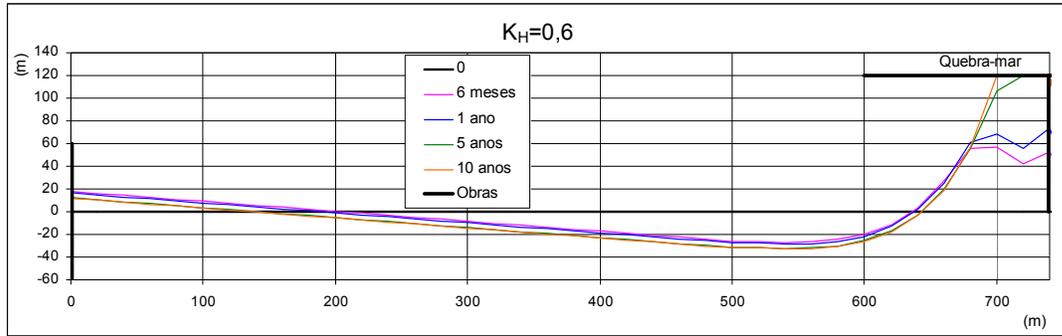


Fig. 10 – Testes de simulação do efeito de um quebra-mar destacado para diferentes valores do coeficiente  $K_H$ , com incidência  $\alpha = +5^\circ$ ,  $T = 9s$  e  $H = 2m$ .

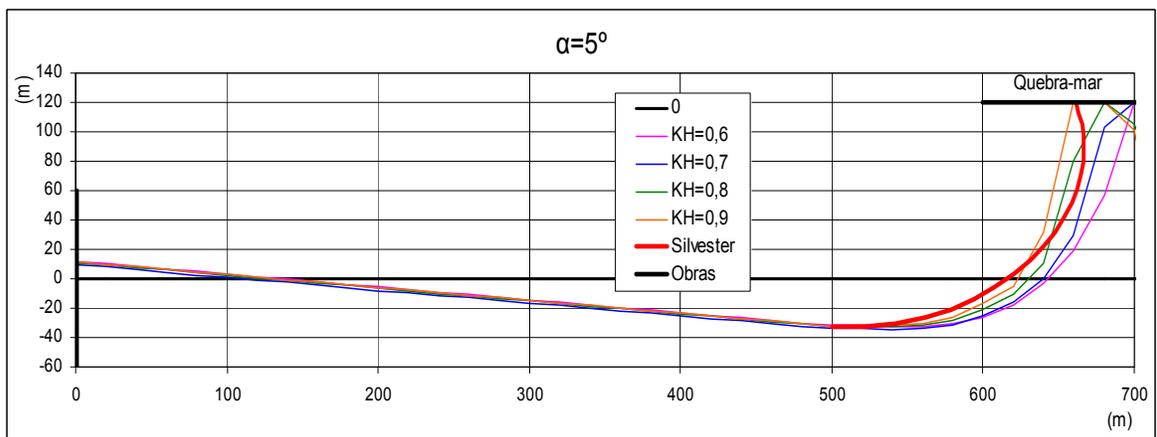
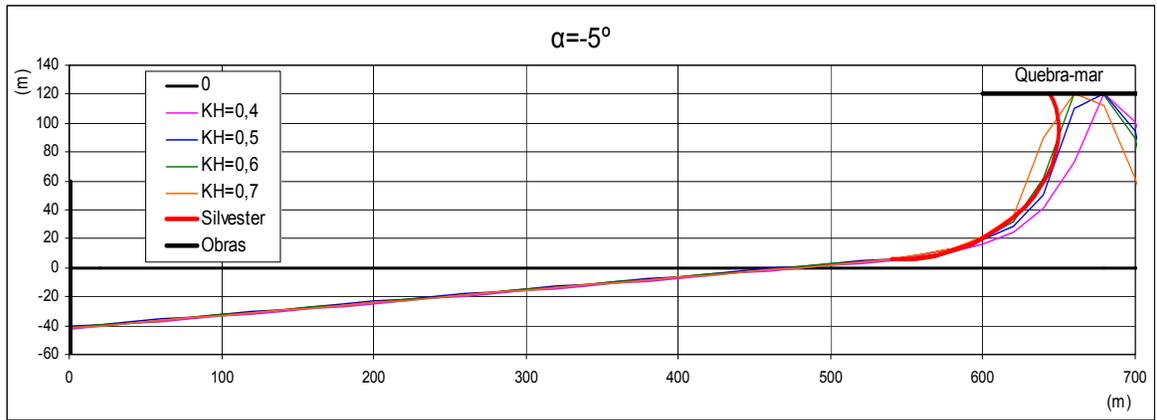
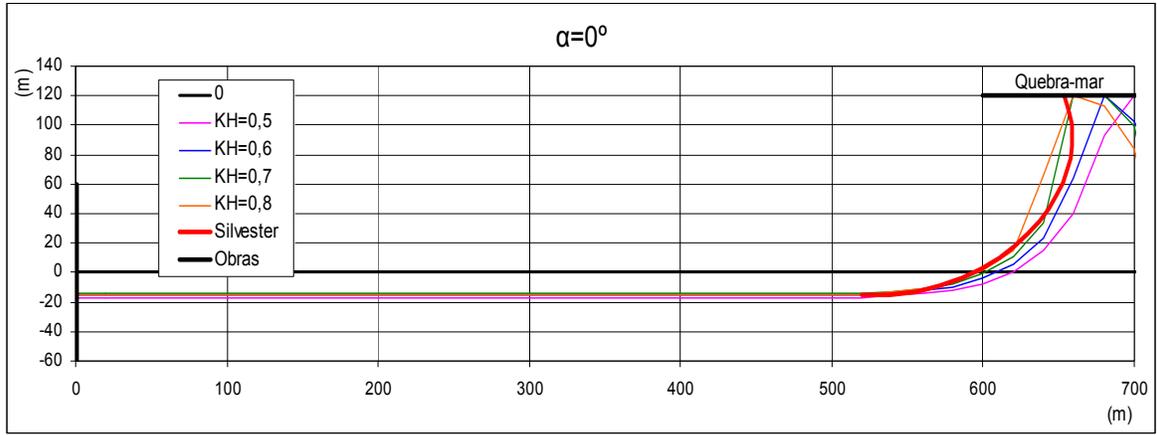


Fig. 11 – Comparação das curvas de Silvester com os resultados do modelo para diferentes valores do coeficiente  $K_H$ , e incidências frontal e oblíquas.

### 5.3 Comparação com casos reais

Analisadas as praias encaixadas da costa portuguesa, seleccionaram-se dois casos com acentuados efeitos de difracção, devidos a obras costeiras: Praia do Cabedelo, em Viana do Castelo, e Praia da Árvore, em Vila do Conde.

Efectuaram-se duas simulações para cada uma das praias: uma primeira em que se partiu da situação de equilíbrio existente e se verificou a sua permanência ao longo do período de simulação (4 anos); repetiu-se depois a simulação partindo de uma configuração da linha de água menos arqueada do que a real, para verificar se o modelo evoluía para a forma de equilíbrio existente.

Os dados de agitação marítima utilizados provinham do modelo MAR3G do Instituto de Meteorologia e correspondiam aos anos de 2002 a 2005. Eram valores numa zona próxima, Vila Praia de Âncora, determinados em estudo anterior (Oliveira *et al.*; 2006). Nas simulações usaram-se séries cronológicas dos parâmetros de agitação marítima na batimétrica 10, obtidos através da transferência a partir de grandes profundidades.

- **Praia do Cabedelo**

Os resultados da simulação mostram que o modelo reproduz satisfatoriamente o equilíbrio da praia, com adequadas curvaturas no seu extremo norte quer se parta da situação real existente quer de uma linha de água rectificadada (Figs. 12 e 13).

- **Praia da Árvore**

O modelo reproduz também o equilíbrio da praia, com adequadas curvaturas no seu extremo norte, quer se parta da situação real existente quer de uma linha de água rectificadada (Figs. 14 e 15).



Fig. 12 – Simulação da estabilidade da linha de água da praia do Cabedelo (Viana do Castelo).



Fig. 13 – Simulação da linha de água de equilíbrio da praia do Cabedelo (Viana do Castelo), a partir de uma configuração inicial rectificada.



Fig. 14 – Simulação da estabilidade da linha de água da praia da Árvore (Vila do Conde).



Fig. 15 – Simulação da linha de água de equilíbrio da praia da Árvore (Vila do Conde), a partir de uma configuração inicial rectificada.

## 6 CONCLUSÕES

O objectivo do presente trabalho é o melhoramento da simulação do equilíbrio de praias encaixadas através da adaptação de um modelo de evolução de linhas de costa. Foram aperfeiçoadas as componentes do modelo que simulam a difracção de ondas em saliências fixas e os seus efeitos sobre a movimentação das areias e morfologia da praia.

Na versão anterior do modelo a simulação dos efeitos de difracção nos limites da praia era conseguida através da implantação de esporões nesses extremos. Verificava-se, no entanto, uma importante limitação na simulação quando o centro de difracção estava associado a acentuadas reentrâncias da costa e da linha de água, situações em que não se conseguia uma reprodução satisfatória da morfologia de equilíbrio.

Para ultrapassar essa limitação representaram-se as saliências naturais ou artificiais por quebra-mares enraizados fictícios e introduziu-se o efeito da variação da altura de onda na fórmula de transporte.

Com vista a aferir as melhorias obtidas recorreu-se à comparação dos resultados da modelação com a formulação semi-empírica de previsão da morfologia de praias parabólicas e com casos reais de praias encaixadas da costa portuguesa.

Relativamente ao efeito da variação da altura da onda, verificou-se que o melhor ajustamento aos resultados da formulação semi-empírica se dá para valores de  $K_H$  entre 0,6 e 0,8 (Fig. 11). As simulações mostram que a consideração da difracção na zona de sombra de saliências naturais ou de obras, conjugada com a introdução dos efeitos da variação da altura das ondas na fórmula de transporte, intensifica o encurvamento da linha de água, conduzindo a formas de equilíbrio semelhantes às previstas com o referido método.

Os resultados da comparação com casos reais evidenciou que o modelo reproduz satisfatoriamente o equilíbrio de duas praias encaixadas da costa portuguesa e as suas curvaturas, quer se parta da situação real existente quer de uma linha de água rectificadas (Figs. 12 a 15).

Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Janeiro de 2009.

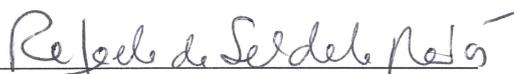
**VISTOS**

O Chefe do Núcleo de  
Estuários e Zonas Costeiras



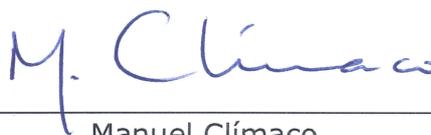
André B. Fortunato

A Directora do Departamento de  
Hidráulica e Ambiente



Raíafaela de Saldanha Matos

**AUTORIAS**



Manuel Clímaco  
Engº Civil, Inv. Principal



Claudino Martins Vicente  
Engº Civil, Inv. Coordenador



Vitor Pisco  
Técnico Especialista Principal

## BIBLIOGRAFIA

- Barreiro, O. M; Oliveira, F. S. B. F. (2005) – Modelação Matemática da Forma Plana de Praias Encaixadas e Semi-encaixadas. Rel. 205/05-NEC, Maio, LNEC, Lisboa.
- Clímaco, M.; Vicente, C. (2007) – Metodologia de Aplicação de um Modelo de Evolução de Linhas de Costa. Rel. 283/07-NEC, Setembro, LNEC, Lisboa.
- Coastal Engineering Research Center (1975) – Shore Protection Manual.
- Coastal Engineering Research Center (1984) – Shore Protection Manual.
- Goda, Y.; Takayama, T.; Suzuki, Y. (1978) - Diffraction Diagrams for Directional Random Waves. 16<sup>th</sup> Conference on Coastal Engineering, Hamburgo.
- Hanson, H. (1987) – Genesis - A Generalized Shoreline Change Numerical Model for Engineering Use. Lund University, Sweden.
- Horikawa, K. (1988) - Nearshore Dynamics and Coastal Processes - Theory, Measurements and Predictive Models. University of Tokyo Press.
- Komar, P. D. (1988) – Environment Controls on Littoral Sand Transport. 21<sup>st</sup> *Conference on Coastal Engineering*. Málaga, Spain.
- Komar, P.D. (1981) – Handbook of Coastal Processes and Erosion.
- Komar, P. D. (1976) – Beach Processes and Sedimentation. Prentice Hall. Englewood Cliffs, New Jersey.
- Hsu, J. and Evans, C. (1989) – Parabolic Bay Shapes and Applications. Proc. Institution of Civil Engineers, London, England, vol. 87 (Part 2), pp. 556-570.
- Kraus, N. and Harikai, S. (1983) – Numerical Model of the Shoreline Change at Oarai Beach. Coastal Engineering Vol. 7, February. Elsevier Publishing Company.

- Kraus, N.; Harikai, S.; and Kubota, S. (1981) – A Numerical Simulation of Shoreline Evolution at Oarai Beach. *28<sup>th</sup> Japanese Conference on Coastal Engineering*. Japanese Society of Civil Engineers. pp. 632-645.
- Kraus, N.; Harikai, S.; Kubota, S. (1981) – A Numerical Simulation of Shoreline Evolution at Oarai Beach. Proc. 28<sup>th</sup> Japanese Conference on Coastal Engineering, Japanese Society of Civil Engineers, pp. 632-645.
- Moreno, L. and Kraus, N. (1999) – Equilibrium Shape of Headland-Bay Beaches for Engineerin Design. Proc. Coastal Sediments`99, ASCE, pp. 860-875.
- Oliveira, F.S.B.F., Freire, P.M.S, Clímaco, M. (2006) - Alternativas de intervenção para melhoramento da acessibilidade ao porto de pesca de Vila Praia de Âncora. Relatório 356/06 – NEC, LNEC, 2006.
- Silvester, R. (1970) – Development of Crenulated Shaped Bays to Equilibrium. J. Waterways and Harbour Division, ASCE 96 (WW2), pp. 275-287.
- Silvester, R. (1974) – Coastal Engineering. Elsevier Publishing Company.
- Silvester, R. and Hsu, J. (1993) – Coatal Stabilization. Innovative Concepts. Prentice Hall. Englewood Cliffs, pp. 199-271
- Vicente, C.; Clímaco, M.; Pisco, V. (2009) – Modelação Numérica de Quebra-mares Destacados. Rel./09-NEC, Janeiro, LNEC, Lisboa..
- Vicente, C.; Clímaco, M. (2003) - Evolução de Linhas de Costa. Desenvolvimento e Aplicação de Um Modelo Numérico. ICT-ITH 42. LNEC, Lisboa.
- Vicente, C. (1991) - Aperfeiçoamento de Métodos de Modelação Matemática e Física Aplicáveis a Problemas de Dinâmica Costeira. LNEC, Lisboa.

