



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE
Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras

Proc. 0604/011/17744

AVALIAÇÃO DO MODELO DE EROÇÃO DE PRAIAS E DUNAS XBEACH

Lisboa • Outubro de 2011

I&D HIDRÁULICA E AMBIENTE

RELATÓRIO 326/2011 – NEC

**AVALIAÇÃO DO MODELO DE EROSÃO DE PRAIAS E DUNAS
XBEACH**

**EVALUATION OF THE BEACH AND DUNE EROSION MODEL
XBEACH**

**ÉVALUATION DU MODELE D'ÉROSION DE PLAGES ET
DUNES XBEACH**

AVALIAÇÃO DO MODELO DE EROÇÃO DE PRAIAS E DUNAS XBEACH

RESUMO

Este estudo enquadra-se na área da investigação científica da dinâmica litoral e visa melhorar a avaliação e previsão da vulnerabilidade/resiliência de sistemas dunares, que constituem a mais importante defesa natural costeira na interface terra-mar, à acção das ondas em condições de tempestade marítima caracterizadas por fortes ventos, baixas pressões atmosféricas e curta duração (horas a dias). O objectivo do estudo foi avaliar o desempenho do modelo XBeach, com elevado potencial para erosão de praias e dunas, relativamente a um dos modelos mais eficazes nesta área, vastamente aplicado a nível mundial em projectos de investigação e consultoria, o modelo Litprof (DHI, 2008) do sistema de modelação Litpack. A avaliação do desempenho dos modelos foi feita com base na comparação da evolução morfológica e em indicadores de desempenho e erro. Apresentam-se e discutem-se os parâmetros de calibração por defeito (*standard set of parameter settings*) em ambos os modelos com os quais se reproduziu o desenvolvimento de um perfil de erosão do tipo barra-fossa obtido em canal de grande escala de laboratório. Com base nas conclusões da avaliação de desempenho dos dois modelos para estas condições (parâmetros por defeito), recomenda-se que, apesar do indicador de erro utilizado (BSS) apontar para um melhor desempenho do modelo XBeach, seja o modelo Litprof a aplicar num problema de engenharia uma vez que a geometria do perfil é a que mais se aproxima do perfil observado e a erosão da face de praia é sobrestimada, estando assim do lado da segurança. Realizou-se um conjunto de testes aos parâmetros de calibração para os dois modelos e concluiu-se que os parâmetros mais influentes na evolução morfológica foram *break*, *gammax*, *facua* e *lws*, no caso do modelo XBeach, e γ_2 e α_{scale} , no caso do modelo Litprof. Os parâmetros *facua* e *lws* do modelo XBeach foram aqueles que conferiram ao perfil final uma geometria mais próxima da configuração barra-fossa observada. Dos testes aos parâmetros de calibração realizados concluiu-se que ambos os modelos reproduzem o desenvolvimento da barra submersa característico do perfil de erosão, mas foi o modelo Litprof que apresentou o melhor desempenho.

Palavras-chave: Erosão Costeira, Modelação Morfodinâmica, XBeach, Litprof.

AVALIAÇÃO DO MODELO DE EROÇÃO DE PRAIAS E DUNAS XBEACH

Índice

Índice	V
Índice de figuras	VI
Índice de tabelas	VIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO, MOTIVAÇÃO E OBJECTIVOS	1
1.2 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	2
2. ABORDAGEM METODOLÓGICA	3
3. FORMULAÇÃO DO MODELO	6
4. RESULTADOS	10
4.1 CASO DE VERIFICAÇÃO	10
4.2 AVALIAÇÃO COM PARÂMETROS POR DEFEITO	10
4.2.1 <i>Modelo XBeach</i>	11
4.2.2 <i>Modelo Litprof</i>	12
4.2.3 <i>Comparação</i>	14
4.3 CALIBRAÇÃO	16
4.3.1 <i>Modelo XBeach</i>	16
4.3.2 <i>Modelo Litprof</i>	19
4.3.3 <i>Comparação</i>	21
5. SUMÁRIO, CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	23
6. REFERÊNCIAS	25

AVALIAÇÃO DO MODELO DE EROÇÃO DE PRAIAS E DUNAS XBEACH

Índice de figuras

Figura 1– Definição da zona de estudo na interface mar-terra: desde o limite da zona de rebentação das ondas até ao topo de praia ou duna que fica ao alcance da acção das ondas em condições extremas de agitação marítima e nível do mar.....	3
Figura 2 - Evolução do perfil para o caso de verificação (observação experimental).....	10
Figura 3 - Resultados numéricos dos modelos XBeach com parâmetros por defeito à escala laboratorial: envelope da evolução.....	12
Figura 4 - Resultados numéricos do modelo Litprof (para as teorias de onda a) D&B e b) Stokes5) com parâmetros por defeito à escala laboratorial: envelope da evolução.....	13
Figura 5 - Resultados numéricos dos modelos XBeach e Litprof (para as teorias de onda D&B e Stokes5) com parâmetros por defeitos, à escala laboratorial, ao final de 1,4,8 e 11 horas. A linha azul representa a previsão XBeach, a linha amarelo representa a previsão Litprof-Stokes5, a linha verde representa a previsão Litprof-D&B, a linha vermelha representa o perfil experimental e a linha preta representa o perfil inicial.....	15
Figura 6 – Indicadores de impacto para os modelos XBeach e Litprof (para as teorias de onda D&B e Stokes5) com parâmetros por defeito: a) Volume de erosão e b) Recuo de praia.....	16
Figura 7 – Indicador de erro BSS para os modelos XBeach e Litprof (para as teorias de onda D&B e Stokes5) com parâmetros por defeito.	16
Figura 8 - Resultados numéricos do modelo XBeach, à escala laboratorial, ao final 11 horas. Teste aos parâmetros de calibração a) <i>beta</i> , b) <i>break</i> , c) <i>facsl</i> , d) <i>facua</i> , e) <i>gammamax</i> , f) <i>hmin</i> , g) <i>hswitch</i> , h) <i>lws</i> , i) <i>turb</i> e j) <i>wetslp</i>	18
Figura 9 - Indicador de erro BSS para os testes de calibração do modelo XBeach.....	18
Figura 10 - Resultados numéricos do modelo Litprof (para as teorias de onda D&B e Stokes5), à escala laboratorial, ao final 11 horas. Teste aos parâmetros de calibração a) γ_1 , b) γ_2 , c) α_{scale} e d) <i>Maximum Angle of Bed Slope</i>	20
Figura 11 - Indicador de erro BSS para os testes de calibração do modelo Litprof-Stokes5. Parâmetros de calibração: a) γ_1 , b) γ_2 , c) α_{scale} e d) <i>Maximum Angle of Bed Slope</i>	21
Figura 12 - Resultados numéricos dos modelos XBeach e Litprof (para a teoria de onda Stokes5) com parâmetros por defeitos e após calibração, à escala laboratorial. As linhas verde e amarela representam	

as previsões do XBeach com parâmetros por defeito e calibrado, respectivamente; as linhas azul e rosa representam as previsões do Litprof (Stokes5) com parâmetros por defeito e calibrado, respectivamente; a linha vermelha representa o perfil experimental; e a linha preta representa o perfil inicial.22

Figura 13 – Indicadores de impacto para os modelos XBeach e Litprof (para a teoria de onda Stokes5) com parâmetros por defeito e após calibração: a) Volume de erosão e b) Recuo de praia.....22

Figura 14 - Indicador de erro BSS para os modelos XBeach e Litprof (para a teoria de onda Stokes5) com parâmetros por defeito e após calibração.22

AVALIAÇÃO DO MODELO DE EROSÃO DE PRAIAS E DUNAS XBEACH

Índice de tabelas

Tabela 1- Classificação proposta por van Rijn et al. (2003) e Sutherland et al. (2004).	5
Tabela 2 - Parâmetros por defeito no modelo XBeach.	11
Tabela 3 – Parâmetros por defeito no modelo Litprof.	12

AVALIAÇÃO DO MODELO DE EROSÃO DE PRAIAS E DUNAS XBEACH

1. Introdução

1.1 Enquadramento, motivação e objectivos

O estudo que aqui se descreve enquadra-se no âmbito do projecto “Dinâmica hidro-sedimentar do litoral a curto e médio prazo” do Plano de Investigação Programada (PIP) do LNEC para 2009-2012. Trata-se de um estudo na área de investigação científica da dinâmica litoral e visa melhorar a avaliação e previsão da vulnerabilidade/resiliência de sistemas dunares, que constituem a mais importante defesa natural costeira na interface terra-mar, à acção das ondas em condições de tempestade marítima caracterizadas por fortes ventos, baixas pressões atmosféricas e curta duração (horas a dias). A sua motivação é diminuir a incerteza que existe associada à modelação numérica da evolução morfológica durante estes eventos extremos, com elevado risco no que respeita a perda de território, degradação ambiental, destruição de património e até perda de vidas humanas.

Dada a complexidade dos processos costeiros que governam a dinâmica sedimentar na interface mar-terra, desde o limite da zona de rebentação das ondas até ao topo de praia ou duna que fica ao alcance da acção das ondas em condições extremas de agitação marítima e nível do mar, ainda não existe um modelo matemático capaz de reproduzir com boa precisão a morfodinâmica de todas as subzonas (zona de rebentação, zona de espraiamento, topo de praia e sistema dunar) deste domínio espacial de forma contínua e simultaneamente robusto para problemas de engenharia. Na linha de investigação que visa preencher esta lacuna, está em desenvolvimento e disponível à comunidade científica (em <https://publicwiki.deltares.nl/display/XBEACH/Home>) o modelo XBeach (eXtreme Beach behaviour) (Roelvink et al., 2009), que aqui se testa. O objectivo do estudo foi avaliar o desempenho do modelo XBeach relativamente a um dos modelos mais eficazes nesta área, vastamente aplicado a nível mundial em projectos de investigação e consultoria, o modelo Litprof (DHI, 2008) do sistema de modelação Litpack.

Os modelos numéricos de erosão de dunas são geralmente verificados numa primeira fase com experiências laboratoriais, em canais de grande escala, uma vez que estas permitem um maior controlo dos processos envolvidos, quer nas condições iniciais de forçamento quer na monitorização da evolução, e consequentemente garantem maior confiança nos resultados. As condições em canal equivalem a uma praia uniforme ao longo da componente longitudinal. Só posteriormente, após uma satisfatória simulação numérica da componente transversal, faz sentido desenvolver estes modelos na dimensão longitudinal e nesta fase aplica-los em casos de campo. O modelo XBeach já se encontra desenvolvido na componente longitudinal, no entanto, a complexidade dos processos na faixa costeira onde se aplica é particularmente tão elevada, que continua a ser necessário melhorar a sua abordagem transversal. Saliencia-se que a importância do investimento científico no desenvolvimento da componente transversal deste tipo de modelos é tão grande que, na Holanda, onde os modelos de verificação da segurança dos sistemas dunares são de extrema importância para a gestão costeira, aplica-se o modelo empírico DUROS, um modelo transversal desenvolvido para zonas costeiras uniformes com base em resultados de testes laboratoriais (Vellinga, 1986). O estudo aqui apresentado enquadra-se na primeira fase, em que o modelo é testado com experiências laboratoriais, em canais de

grande escala. Pretendeu-se simular um caso de erosão de uma praia experimental (escala 1:6) previamente realizado em laboratório no âmbito de um projecto de investigação.

A aplicação do modelo XBeach requer a introdução de um elevado número de parâmetros relativos aos processos físicos costeiros. Em projectos de engenharia, onde é de grande utilidade a aplicação deste tipo de modelos, acontece muitas vezes ser inviável a medição de alguns destes parâmetros. Para ultrapassar esta dificuldade, os autores do modelo recomendam a utilização de alguns valores por defeito (standard set of parameter settings). Neste artigo, apresentam-se os resultados do modelo para o conjunto dos parâmetros por defeito recomendados e sugerem-se e testam-se parâmetros de calibração do modelo. Este mesmo procedimento é executado e descrito também para o modelo Litprof. É com base na comparação dos dois conjuntos de resultados numéricos e dos resultados observados que se faz a avaliação do desempenho do modelo XBeach.

1.2 Organização do relatório

Para além da presente introdução onde se descreve o enquadramento, a motivação e os objectivos do estudo, este relatório divide-se em mais quatro capítulos e uma lista de referências. No capítulo seguinte, capítulo 2, descreve-se a abordagem metodológica utilizada no estudo. No capítulo 3 descreve-se a formulação do modelo que se pretende avaliar no âmbito do estudo. No capítulo 4 apresentam-se e discutem-se os resultados. No capítulo 5 faz-se um sumário do estudo, retiram-se as principais conclusões e aponta-se o trabalho futuro.

2. Abordagem metodológica

A erosão da zona costeira praia-duna resulta de uma acção de duas forças, a resistência da praia-duna decorrente das propriedades da mecânica de solos e a acção hidráulica decorrente da capacidade de transporte das ondas e correntes. A simulação matemática do fenómeno é bastante complexa pois exige a resolução precisa dos processos de hidrodinâmica, transporte sedimentar e morfodinâmica, em simultâneo ao longo das zonas de rebentação, espraçamento, topo de praia e duna (Figura 1).

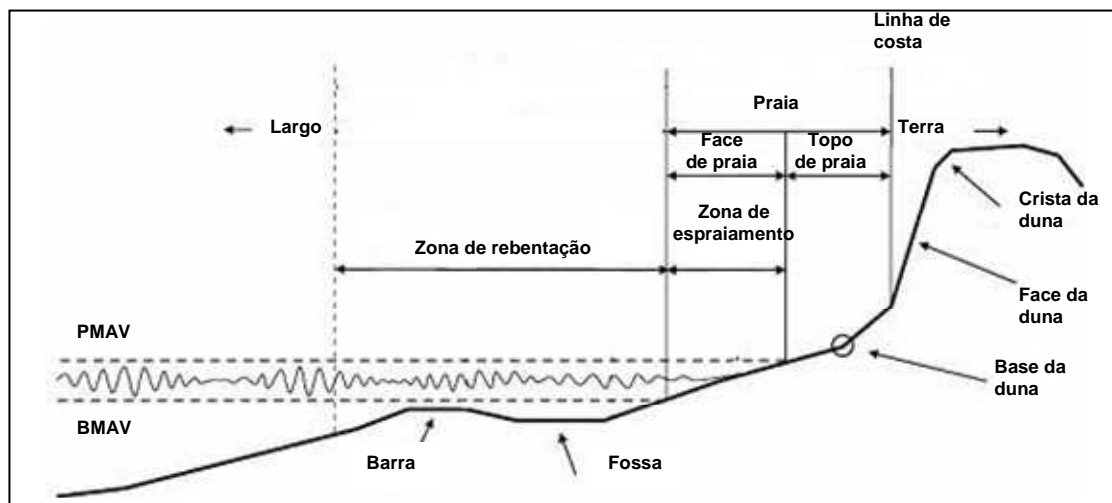


Figura 1– Definição da zona de estudo na interface mar-terra: desde o limite da zona de rebentação das ondas até ao topo de praia ou duna que fica ao alcance da acção das ondas em condições extremas de agitação marítima e nível do mar.

À semelhança do que acontece com outros processos físicos, a modelação numérica da erosão praia-duna pode caracterizar-se em três tipos de modelos conceptuais: empíricos, semi-empíricos e determinísticos ou baseados em processos. Do primeiro tipo, modelos empíricos, são os modelos onde existe uma relação explícita entre a erosão da praia-duna e importantes parâmetros físicos, que não são quantificados de forma individual mas sim através das consequências, ou seja, volume erodido e recuo da duna. O modelo DUROS (Vellinga, 1986) aplicado na Holanda para verificação da segurança dos sistemas dunares é um exemplo deste tipo. Do segundo tipo, modelos semi-empíricos, são os modelos em que os principais processos físicos são individualmente descritos através de formulações matemáticas. O modelo SBeach (Larson e Kraus, 1989) é um exemplo deste tipo. Finalmente os modelos determinísticos, também vulgarmente designados por modelos baseados em processos, são os modelos em que os processos físicos são modelados individualmente. Os modelos numéricos aplicados neste estudo, o modelo XBeach e o modelo Litprof, são ambos deste tipo.

O modelo XBeach trata-se de um modelo bi-dimensional-horizontal constituído por vários sub-modelos dos processos costeiros propagação de ondas infra-gravíticas e grupos de ondas gravíticas, espraçamento, erosão e galgamento de dunas, avalanche (fornecimento de sedimento da face da duna) transporte sedimentar e evolução do fundo (Roelvink et al., 2010). O objectivo do XBeach é modelar estes processos nos quatro regimes de impacto de tempestade marítima definidos por Sallanger (2000): regime de espraçamento, regime de colisão, regime de galgamento e regime de inundação. Neste estudo em particular, apenas ocorrem os regimes de espraçamento e colisão, cuja abordagem metodológica se descreve abaixo.

Para além da contribuição das ondas curtas ou gravíticas, o escoamento da zona de espraçamento é em grande parte devido a ondas infragravíticas (que resultam de interacções harmónicas não lineares de grupos de ondas curtas) (Tucker, 1954). Guza e Thornton (1982) mostraram que a altura de onda da

banda espectral correspondente às ondas infragravíticas aumenta linearmente com a altura significativa de onda ao largo, enquanto a energia correspondente às ondas curtas da banda espectral atinge um limite devido à dissipação ao longo da zona de rebentação. Com base nesta constatação, Raubenheimer e Guza (1996) mostraram que em condições de tempestade a componente devida às ondas infragravíticas é dominante no espraiamento. No modelo XBeach a dinâmica da zona de espraiamento é resolvida com base na acção bi-dimensional-horizontal de ondas de grupo e resultantes ondas infra-gravíticas sobre a batimetria. O forçamento das ondas de grupo resulta da variação no tempo da acção da onda (Phillips, 1977) combinada com um modelo de dissipação para grupos de onda (Roelvink, 1993). É usado um modelo de turbulência (Svendsen, 1984; Nairn et al., 1990; Stive e Vriend, 1994) para representar o momento associado à turbulência superficial gerada pela rebentação que se desloca em direcção à costa.

As interacções harmónicas não lineares de grupos de ondas gravíticas geram ondas infragravíticas e correntes longitudinais e transversais à costa. A interacção onda-corrente na camada limite gera um aumento das tensões de radiação geradas pelas ondas e correntes (Soulsby et al., 1993). A aleatoriedade das ondas incidentes é considerada com base na descrição de Feddersen et al. (2000), cuja aplicação (Ruessink et al., 2001) evidenciou uma boa estimativa das correntes longitudinais para um coeficiente de inércia constante.

Durante o regime de espraiamento e colisão o fluxo de massa transportado pelas ondas e turbulência superficial gerada pela rebentação retorna em direcção ao mar como escoamento de retorno. Este escoamento é responsável pelo processo de erosão, uma vez que é sob a sua acção que a areia é removida da face da duna em desmoronamento. Apesar de existirem várias propostas para o perfil vertical da corrente neste escoamento (Reniers et al., 2004b) a variação vertical da corrente em condições de tempestade não é muito grande, e por esse motivo ainda não foi introduzida no modelo XBeach.

Os processos de transporte de areia nas zonas de rebentação e espraiamento são bastante complexos pois resultam da combinação do movimento orbital de ondas curtas e longas, de correntes e da turbulência superficial gerada pela rebentação. O transporte sedimentar induzido pela assimetria vertical e horizontal das ondas, que se estima inferior à contribuição dada pelas ondas longas e corrente média (van Thiel de Vries et al., 2008), é considerado através da formulação proposta por Soulsby (1997) num modelo que resolve os processos na zona de rebentação para ondas curtas propagadas em grupo. Esta formulação foi aplicada com sucesso na geração de correntes de retorno (Damgard et al., 2002; Reniers et al., 2004a) e rotura de ilhas barreira (Roelvink et al., 2003).

Neste estudo utilizaram-se dois tipos de indicadores para avaliar o desempenho dos modelos: indicadores de impacto e de erro. Os indicadores de impacto foram o volume de erosão e o recuo, da praia ou da duna, definidos por

$$\text{Volume de erosão} = \int_{z_1}^{z_2} (\text{perfil inicial} - \text{perfil pós-tempestade}) dz \quad (1)$$

e

$$\text{Recuo} = |x_0 - x_t| \quad (2)$$

sendo z_1 e z_2 o nível da sobrelevação e a cota do topo da duna, ou a profundidade do ponto inicial do perfil e a cota do topo da escarpa de erosão, respectivamente, no caso de erosão da duna ou praia; e x_0 e x_t as coordenadas horizontais, a um determinado nível de referência (sobrelevação ou nível médio do mar) da duna frontal ou da face de praia no perfil inicial e no perfil pós-tempestade, respectivamente, no caso de recuo de duna ou recuo de praia.

Sutherland et al. (2004) analisou diferentes métodos de medição de erro para avaliar o desempenho de modelos morfodinâmicos. Neste estudo a avaliação do desempenho dos modelos foi feita com base em três critérios, o erro sistemático ou tendenciosidade (bias), a precisão e a capacidade (skill) do modelo. O método aplicado foi o *Brier Skill Score* (BSS) de van Rijn et al. (2003), que compara previsões ($z_{b,c}$)

e medições de perfil ($z_{b,m}$) com o perfil inicial ($z_{b,0}$) e tem em conta o erro de medição ∂ (que aqui se assumiu nulo). Define-se por

$$BSS = 1 - \frac{\langle (|z_{b,c} - z_{b,m}| - \partial)^2 \rangle}{\langle (z_{b,0} - z_{b,m})^2 \rangle} \quad (3)$$

onde os parêntesis angulares denotam a média.

Apresenta-se na Tabela 1 a classificação do desempenho de modelos morfodinâmicos proposta por van Rijn et al. (2003) e Sutherland et al. (2004).

Tabela 1- Classificação proposta por van Rijn et al. (2003) e Sutherland et al. (2004).

	BSS (van Rijn et al., 2003)	BSS (Sutherland et al., 2004)
Excelente	1.0 - 0.8	1.0 - 0.5
Bom	0.8 - 0.6	0.5 - 0.2
Razoável	0.6 - 0.3	0.2 - 0.1
Fraco	0.3 - 0.0	0.1 - 0.0
Mau	< 0.0	< 0.0

3. Formulação do modelo

O modelo resolve de forma acoplada as equações bi-dimensionais-horizontais de propagação de ondas, de escoamento, de transporte de sedimentos e de actualização do fundo (da continuidade), para condições de fronteira de espectro de ondas e escoamento não estacionárias. É utilizada uma malha estruturada alternada (*staggered grid*), rectilínea e não equidistante, implementada num sistema de coordenadas no qual o eixo-x está orientado em direcção à costa, i.e., perpendicular à linha de costa, e o eixo-y está orientado ao longo da costa.

Uma vez que as escalas de comprimento são pequenas, frequentemente ocorre escoamento super-crítico ($Fr > 1$, sendo Fr o número de Froude) e se dá prioridade à estabilidade numérica, os esquemas de discretização numérica predominantes são de primeira ordem a montante (*first order upwind*), por forma a resolver os elevados gradientes da hidrodinâmica e morfodinâmica na zona de rebentação e espraiamento minimizando oscilações numéricas. São utilizados esquemas explícitos com passo de cálculo automático baseado no critério de Courant. Estes esquemas implementados numa malha estruturada alternada (*staggered grid*) garantem a robustez do modelo. Seguidamente descrevem-se de as principais equações governantes do modelo XBeach.

A equação da acção da onda é dada por

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial c_x A}{\partial x} + \frac{\partial c_y A}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta A}{\partial \theta} = -\frac{D_w}{\sigma} \quad (3)$$

onde

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)} \quad (4)$$

$$c_x(x, y, t, \theta) = c_g \cos(\theta) + u^L \quad (5)$$

$$c_y(x, y, t, \theta) = c_g \sin(\theta) + v^L \quad (6)$$

$$c_\theta(x, y, t, \theta) = \frac{\sigma}{\sinh 2kh} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right) + \cos \theta \left(\sin \theta \frac{\partial u}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \sin \theta \left(\sin \theta \frac{\partial u}{\partial x} - \cos \theta \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (7)$$

sendo θ o ângulo de incidência relativamente ao eixo-x, $A(x, y, t, \theta)$ a acção da onda, S_w a densidade de energia da onda em cada componente direcciona, σ a frequência intrínseca da onda obtida pela relação de dispersão linear, $c_x(x, y, t, \theta)$ e $c_y(x, y, t, \theta)$ as velocidades de propagação da acção da onda nas direcções x e y, respectivamente, c_g a velocidade de grupo obtida pela teoria linear da onda, u^L e v^L as velocidades Lagrangianas médias em profundidade nas direcções transversal e longitudinal, respectivamente, $c_\theta(x, y, t, \theta)$ a velocidade de propagação no espaço- θ , k o número de onda obtido pelas equações eikonel, ω a frequência absoluta da onda, e D_w a energia dissipada devido à rebentação, que se descreve abaixo.

A equação de dissipação da energia total, integrada no espectro direcciona, devida à rebentação, é dada por

$$\bar{D}_w = \frac{\alpha}{\pi} Q_b \sigma E_w \quad (8)$$

onde

$$Q_b = 1 - \exp\left(-\left(\frac{H_{rms}}{H_{max}}\right)^n\right) \quad (9)$$

$$E_w(x, y, t) = \int_0^{2\pi} S_w(x, y, t, \theta) d\theta$$

sendo $\alpha = O(1)$, $H = \sqrt{\frac{8E_w}{\rho g}}$, H_{rms} a energia quadrática média, $H_{max} = \frac{\gamma \tanh kh}{k}$, ρ a densidade da água, γ o índice de rebentação (parâmetro empírico) e $E_w(x, y, t)$ a energia total. No modelo assume-se que a energia total dissipada, \overline{D}_w , é distribuída proporcionalmente pelas componentes direccionais, sendo por isso

$$D_w(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{E_w(x, y, t)} \overline{D}_w(x, y, t). \quad (10)$$

Estimada a distribuição espacial da acção da onda e energia da onda, são calculadas as tensões de radiação, com base na teoria linear, da seguinte forma:

$$S_{xx,w}(x, y, t) = \int \left(\frac{c_g}{c} (1 + \cos^2 \theta) - \frac{1}{2} \right) S_w d\theta \quad (11)$$

$$S_{xy,w}(x, y, t) = S_{yx,w}(x, y, t) = \int \text{sen } \theta \cos \theta \left(\frac{c_g}{c} S_w \right) d\theta \quad (12)$$

$$S_{yy,w}(x, y, t) = \int \left(\frac{c_g}{c} (1 + \sin^2 \theta) - \frac{1}{2} \right) S_w d\theta. \quad (13)$$

A equação da energia de turbulência superficial gerada pela rebentação é acoplada à equação da acção/energia da onda na qual o termo de dissipação de energia da onda na rebentação é usado como fonte para turbulência superficial. Tal como para a acção da onda, é considerada a distribuição direccional da turbulência superficial mas o espectro de frequência é representado por uma única frequência média. A equação da turbulência superficial é dada por

$$\frac{\partial S_r}{\partial t} + \frac{\partial c_x S_r}{\partial x} + \frac{\partial c_y S_r}{\partial y} + \frac{\partial c_\theta S_r}{\partial \theta} = -D_r + D_w \quad (14)$$

onde

$$c_x(x, y, t, \theta) = c \cos(\theta) + u^L \quad (15)$$

$$c_y(x, y, t, \theta) = c \text{sen}(\theta) + v^L \quad (16)$$

sendo $S_r(x, y, t, \theta)$ a componente direccional da energia de turbulência superficial, $c_x(x, y, t, \theta)$ e $c_y(x, y, t, \theta)$ as velocidades de propagação da energia de turbulência superficial nas direcções x e y, respectivamente, e a velocidade de propagação no espaço- θ , $c_\theta(x, y, t, \theta)$, semelhante à expressão (7), assumindo assim que as ondas e a turbulência superficial se propagam na mesma direcção. A velocidade de fase, $c = \sigma/k$, é obtida através da teoria linear da onda. A dissipação da turbulência superficial por componente direccional da onda, $D_r(x, y, t, \theta)$, resulta da distribuição da dissipação total da turbulência superficial proporcionalmente pelas componentes direccionais da onda, sendo por isso

$$D_r(x, y, t, \theta) = \frac{S_r(x, y, t, \theta)}{E_r(x, y, t)} \overline{D}_r(x, y, t) \quad (17)$$

onde

$$\overline{D}_r = \frac{2g\beta_r E_r}{c}. \quad (18)$$

A contribuição da turbulência superficial para as tensões de radiação é dada por

$$S_{xx,r}(x, y, t) = \int \cos^2 \theta S_r d\theta \quad (19)$$

$$S_{xy,r}(x, y, t) = S_{yx,r}(x, y, t) = \int \sin \theta \cos \theta S_r d\theta \quad (20)$$

$$S_{yy,r}(x, y, t) = \int \sin^2 \theta S_r d\theta. \quad (21)$$

Esta contribuição é adicionada às tensões calculadas em (11), (12) e (13). O resultante tensor das tensões de radiação é

$$F_x(x, y, t) = - \left(\frac{\partial S_{xx,w} + \partial S_{xx,r}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy,w} + \partial S_{xy,r}}{\partial y} \right) \quad (22)$$

$$F_y(x, y, t) = - \left(\frac{\partial S_{xy,w} + \partial S_{xy,r}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy,w} + \partial S_{yy,r}}{\partial y} \right). \quad (23)$$

O sistema de equações para o escoamento para águas pouco profundas é dado por

$$\frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - fv^L - v_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} \quad (24)$$

$$\frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} + fu^L - v_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) = \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} \quad (25)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial hu^L}{\partial x} + \frac{\partial hv^L}{\partial y} = 0 \quad (26)$$

onde as equações do momento e continuidade são formuladas em termos de velocidade Lagrangiana (definida como a distância a que uma partícula de água se desloca num período de onda, dividida por esse período). Esta velocidade relaciona-se com a velocidade Euleriana (a velocidade média da onda curta num ponto fixo) da seguinte forma

$$u^L = u^E + u^S \text{ e } v^L = v^E + v^S \quad (27)$$

sendo u^S e v^S as velocidades de Stokes nas direcções x e y, respectivamente, dadas por

$$u^S = \frac{E_w \cos \theta}{\rho h c} \text{ e } v^S = \frac{E_w \sin \theta}{\rho h c}. \quad (28)$$

Os parâmetros τ_{sx} e τ_{sy} são as tensões devidas ao vento, τ_{bx}^E e τ_{by}^E são as tensões de atrito no fundo (calculadas com velocidades Eulerianas), η é o nível da água, h é a profundidade, v_h é a viscosidade horizontal, f é o coeficiente de Coriolis e F_x e F_y são as tensões induzidas pelas ondas.

A equação de advecção difusão para transporte de sedimentos é dada por

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hCu^E}{\partial x} + \frac{\partial hCv^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right) = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s} \quad (29)$$

onde

$$C_{eq} = \frac{A_{sb} + A_{ss}}{h} \left(\left(|u^E|^2 + 0.018 \frac{u_{rms}^2}{C_d} \right)^{0.5} - u_{cr} \right)^{2.4} (1 - \alpha_b m) \quad (30)$$

sendo C a concentração de sedimentos média em profundidade, que varia na escala temporal do grupo de onda, D_h o coeficiente de difusão de sedimentos, T_s o tempo de mobilização dos sedimentos definido como $T_s = \max(0,05 \frac{h}{w_s}, 0,2) s$, w_s a velocidade de queda, C_{eq} a concentração de equilíbrio

de sedimentos, u_{cr} a velocidade crítica, C_d o coeficiente de inércia apenas devido ao escoamento (sem considerar o efeito das ondas curtas), α_b o parâmetro de calibração e A_{sb} e A_{ss} os coeficientes

de transporte de fundo e em suspensão, respectivamente, que são dependentes do tamanho e densidade do sedimento e da profundidade.

A equação de avalanche utilizada é dada pela expressão

$$\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| > m_{cr} \quad (31)$$

onde m_{cr} é o declive crítico. O processo de avalanche é accionado quando o declive entre as duas últimas células molhadas por uma elevada altura de onda infragravítica é superior ao declive crítico. Nessa altura, dá-se a passagem de um volume de sedimentos de uma célula para a outra de forma a satisfazer a condição de declive crítico entre essas duas células.

A equação da actualização do fundo (da continuidade) é dada por

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{f_{mor}}{(1-p)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (32)$$

onde

$$q_x(x, y, t) = \left(\frac{\partial h C u^E}{\partial x} \right) + \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right) \right] \quad (33)$$

$$q_y(x, y, t) = \left(\frac{\partial h C v^E}{\partial y} \right) + \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right) \right] \quad (34)$$

Sendo p a porosidade, f_{mor} um factor de aceleração morfológica de $O(1-10)$, e q_x e q_y as taxas de transporte sedimentar nas direcções x e y, respectivamente.

4. Resultados

4.1 Caso de verificação

Este caso de teste do modelo, descrito em Freire et al. (2008), diz respeito a um perfil da praia de Buarcos, localizada na costa central oeste Portuguesa, vastamente estudada e caracterizada (Oliveira, 2002; Larangeiro et al., 2003; Freire et al., 2004). Trata-se de um perfil com declive 1:20 e $D50=0.4$ mm em modelo reduzido à escala 1:6. O topo de praia é limitado por uma defesa longitudinal aderente. As condições de onda incidente foram um espectro de Jonswap com $H_s=0.37$ m, $T_p=3.27$ s e duração 12 horas. Para efeitos de simulação numérica considerou-se o perfil inicial o perfil observado ao fim da primeira hora, sendo por isso o período de simulação numérica 11 horas. Da acção das ondas resultou um perfil do tipo barra-fossa, com uma fossa pouco pronunciada (a tender para plataforma), sem que tenha havido interacção da água com a estrutura (Figura 2).

Numa primeira fase testou-se o modelo XBeach com os parâmetros por defeito. Numa segunda fase calibrou-se o modelo, ajustando os parâmetros de forma a melhorar o seu desempenho, i.e., a similaridade com os resultados observados. Com vista à comparação do modelo XBeach com o modelo Litprof, procedeu-se da mesma forma com o modelo Litprof, e posteriormente compararam-se os resultados de ambos os modelos em ambas as fases, sempre com base nos dados observados durante a evolução do perfil de praia.

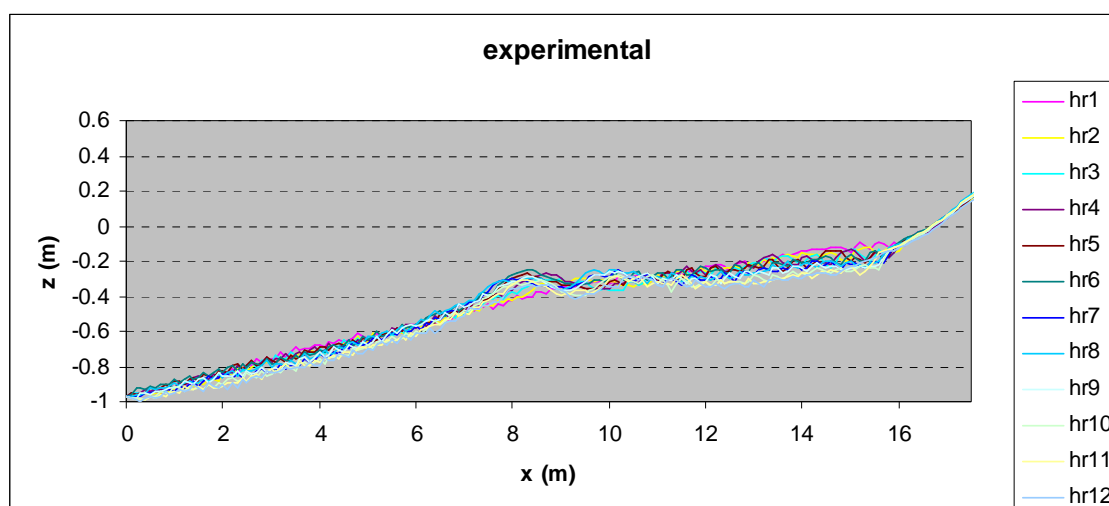


Figura 2 - Evolução do perfil para o caso de verificação (envelope da observação experimental).

4.2 Avaliação com parâmetros por defeito

A aplicação de modelos de morfodinâmica requer a introdução de um elevado número de parâmetros relativos aos processos físicos costeiros. Em projectos de engenharia, onde é de grande utilidade a aplicação deste tipo de modelos, acontece muitas vezes ser inviável a medição de alguns destes parâmetros. Para ultrapassar esta dificuldade, os autores dos modelos recomendam a utilização de alguns valores por defeito, encontrados com base da execução de um elevado número de testes submetidos à mais vasta gama de condições possível. Contudo, no modelo XBeach existe um elevado número de possíveis parâmetros de calibração, o que faz com que o modelo tenha um elevado potencial para reproduzir correctamente os processos envolvidos mas também seja bastante exaustivo o procedimento de teste que conduz à sua correcta aplicação. Seguidamente descrevem-se as aplicações dos modelos XBeach e Litprof com os parâmetros por defeito e faz-se a sua comparação.

4.2.1 Modelo XBeach

Após análise dos dois conjuntos de valores dos parâmetros por defeito sugeridos pelos autores em Roelvink et al. (2009) e Roelvink et al. (2010), optou-se para este caso de estudo por atribuir um novo conjunto de valores aos parâmetros por defeito. Fez-se constituir esse conjunto por: para os parâmetros com valor igual em ambos os conjuntos, por esse valor; e para os restantes parâmetros, pelo valor atribuído para os casos teste Lip11d-2E, Deltaflume_2005_T04, Zelt, Delilah e Zwin (Roelvink et al., 2009), sendo os dois primeiros testes laboratoriais e os restantes três testes de campo (Zelt e Delilah nos USA, Zwin na Europa). Apresentam-se na Tabela 2 os valores de alguns dos parâmetros por defeito atribuídos neste estudo onde se usou uma malha de espaçamento horizontal de 0.1 m.

Tabela 2 - Parâmetros por defeito no modelo XBeach.

	Parâmetro¹	Descrição [unidades]	Valor por defeito
Condições de onda	break	Opção formulação rebentação (3="Roelvink2") [-]	3
	wci	Opção interação onda corrente [-]	0
	roller	Opção modelo de turbulência superficial [-]	1
	beta	Coefficiente do declive do rolo no modelo de turbulência superficial (>0.05 e < 0.3) [-]	0.1
	gamma	Parâmetro de rebentação na formulação de Baldock ou Roelvink [-]	0.55
	gammax	Razão máxima altura onda/profundidade (Hrms/hmax) [-]	2
	alpha	Coefficiente de dissipação da onda [-]	1
	delta	Fracção da altura de onda a adicionar à profundidade [-]	0
	n	Potencia no modelo de dissipação de Roelvink [-]	10
	scheme	Opção esquema numérico para equação acção da onda (1=Upwind; 2=Lax Wendroff) [-]	2
	lws	Opção ondas infragravíticas (0=não;1=sim) [-]	0
instat	Grupos de onda gerados com parâmetros espectrais [-]	4	
Condições de escoamento	C	Coefficiente de Chezy [$m^{1/2}/s$]	65
	nuh	Viscosidade horizontal [m^2/s]	0.1
	nuhfac	Coefficiente de calibração da viscosidade horizontal do modelo de Battjes [-]	1
	eps	Profundidade mínima para inundação [m]	0.001
	hmin	Profundidade mínima para cálculo da velocidade da corrente de retorno [m]	0.05
Condições de transporte e morfodinâmica	hswitch	Profundidade mínima (na interface de wetslp para dryslp) [m]	0.1
	wetslp	Declive crítico de avalanche submersa [-]	0.3
	dryslp	Declive crítico de avalanche emersa [-]	1
	morfac	Factor morfológico [-]	1
	dico	Coefficiente de dispersão horizontal [m^2/s]	1
	facsl	Factor declive na formulação do transporte de sedimentos [-]	1.6
	turb	Opção cálculo concentração sedimentar de equilíbrio [-]	2
	facua	Opção de assimetria de ondas curtas [-]	0
Condições numéricas	CFL	Máximo número de Courant para estimar o passo de cálculo automaticamente [-]	0.9
Condições fronteira	order	Geração de ondas (1=1ª ordem; 2=2ª ordem) [-]	1
	front	Condição fronteira lado mar (0=condição geração-absorção, em 1D) [-]	0
	back	Condição fronteira lado terra (2=condição geração-absorção, em 2D) [-]	2
	left	Condição fronteira lateral esquerda (0=Newmann) [-]	0
	right	Condição fronteira lateral direita (0=Newmann) [-]	0

¹ designação de acordo com as variáveis introduzidas no modelo

Os resultados (Figura 3) mostram que o modelo XBeach com os parâmetros por defeito não simula o perfil barra-fossa resultante da acção erosiva. O pequeno volume de areia erodido da zona da linha de água (intersecção do nível da água com o perfil) é transportado em direcção a maiores profundidades mas acaba por depositar-se na proximidade da base da face de praia.

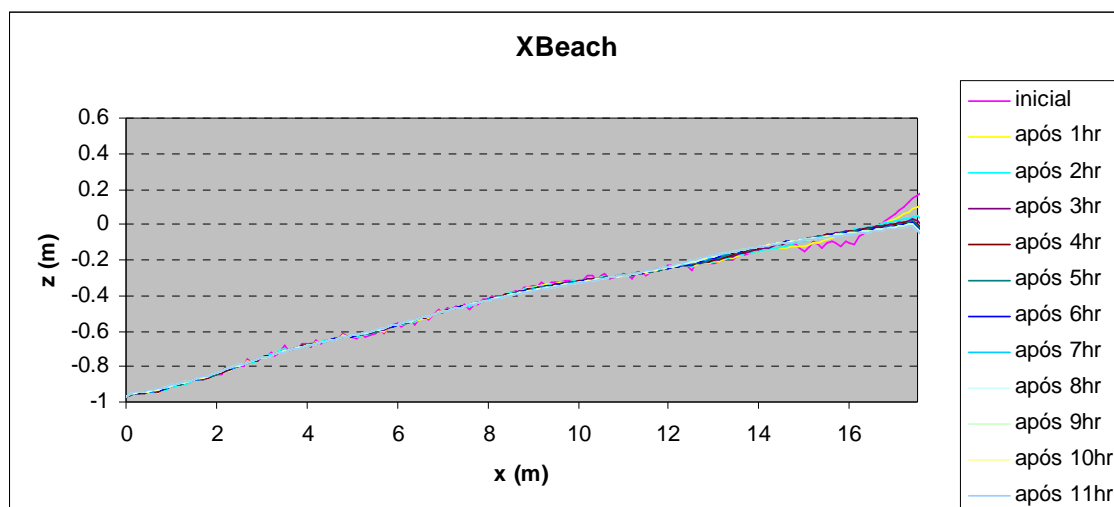


Figura 3 - Resultados numéricos dos modelos XBeach com parâmetros por defeito à escala laboratorial: envelope da evolução.

4.2.2 Modelo Litprof

Aplicou-se o modelo Litprof com os parâmetros por defeito recomendados pelos autores. Descrevem-se na Tabela 3 os parâmetros de calibração atribuídos. Testaram-se duas teorias de onda, a teoria de Doering e Bowen (1995) (B&D) e a teoria de 5ª ordem de Stokes (Fenton, 1985) (Stokes5).

Tabela 3 – Parâmetros por defeito no modelo Litprof.

	Parâmetro¹	Descrição [unidades]	Valor por defeito
Condições de transporte (Módulo PRFTABL)	C1	Parâmetro de descrição das rugas de fundo [-]	0.1
	C2	Parâmetro de descrição das rugas de fundo [-]	2
	C3	Parâmetro de descrição das rugas de fundo [-]	16
	C4	Parâmetro de descrição das rugas de fundo [-]	3
	θ_c	Parâmetro crítico de Shields [-]	0.045
	Convective terms	Opção inclusão da corrente de fundo (<i>streaming</i>) [-]	included
	C_b	Opção de cálculo da concentração de fundo (modelo determinístico de Engelund and Fredsøe (1976) ou empírico de Zyserman e Fredsøe (1994)) [-]	deterministic
Condições de onda	γ_1	Máxima razão entre a altura e o comprimento de onda (H/L) [-]	0.88
	γ_2	Máxima razão entre a altura de onda e a profundidade (H/h) [-]	0.6
	β	Parâmetro empírico do modelo de turbulência superficial de Dally e Brown (1995) (>0.1 e <0.2) [-]	0.15
Condições de morfodinâmica	Maximum Morphological Timestep	Limite máximo do intervalo de tempo entre actualizações da batimetria, sendo o passo de cálculo do estimado automaticamente [s]	1800
	Maximum Angle of Bed	Máximo declive de fundo antes de avalanche submersa [°]	30

Slope			
α_{scale} or scale parameter	or	Factor de transferência de momento transversal (afecta a forma da barra submersa) [-]	1
Clay layer		Opção de inclusão de um fundo rígido abaixo de determinado nível (ao qual pode ocorrer acumulação mas não erosão) [-]	exclude
Energy loss due to bed friction		Opção de inclusão de dissipação de energia por atrito de fundo segundo o modelo de Fredsøe e Deigaard (1992) [-]	include

¹ designação de acordo com a nomenclatura das variáveis na interface do modelo

Os resultados (Figura 4a-b) mostram que o modelo Litprof com os parâmetros por defeito, para ambas as teorias de onda consideradas, tem capacidade de simular o perfil barra-fossa. Comparando os resultados numéricos com os experimentais, observa-se que modelo Litprof sobrestima a erosão na face de praia, principalmente considerando a teoria de onda D&B (Figuras 3 e 4a-b).

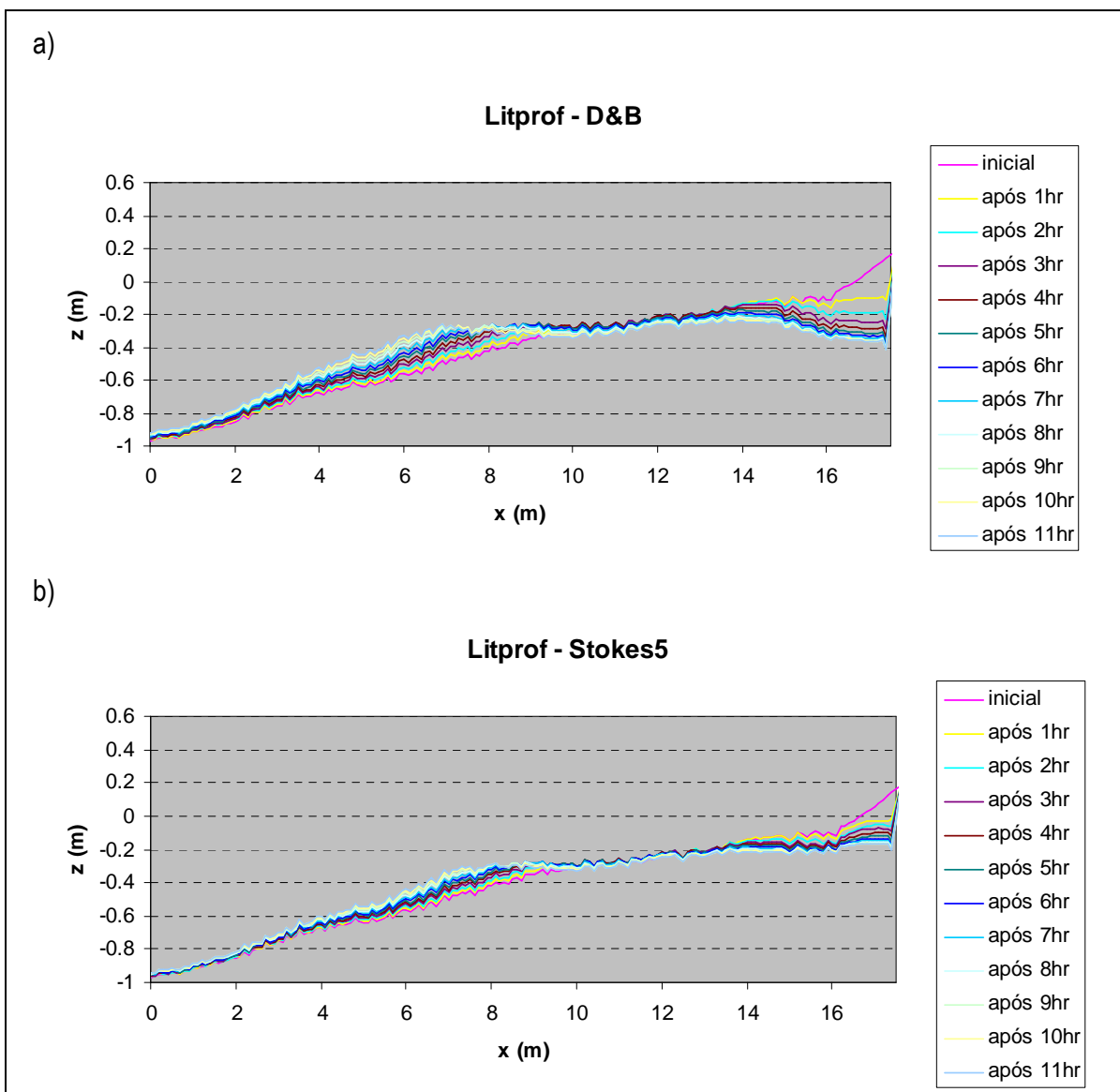
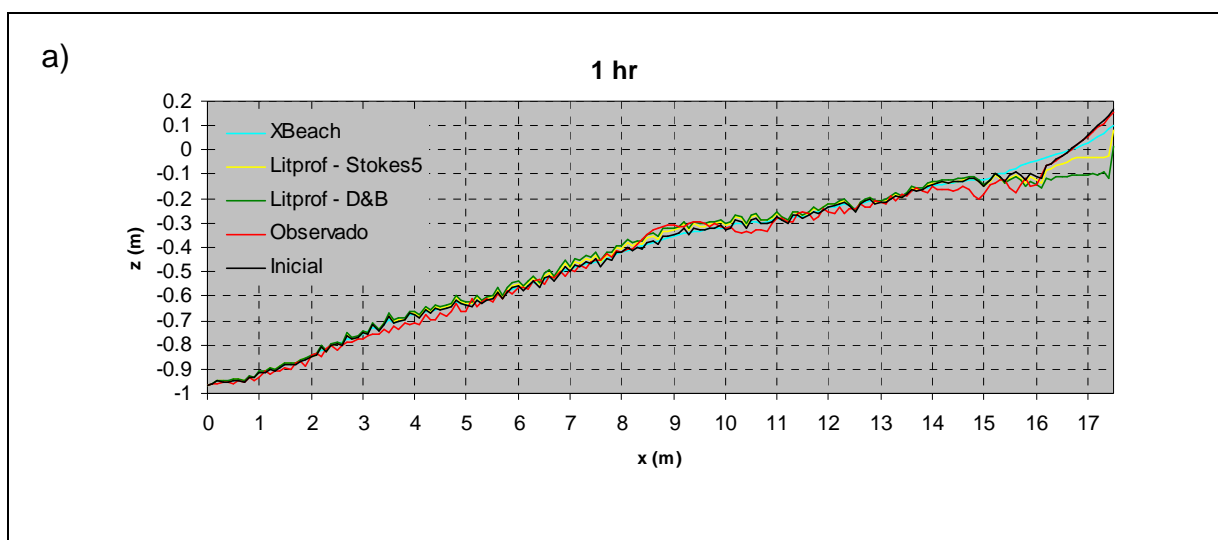


Figura 4 - Resultados numéricos do modelo Litprof (para as teorias de onda a) D&B e b) Stokes5) com parâmetros por defeito à escala laboratorial: envelope da evolução.

4.2.3 Comparação

Compararam-se os modelos XBeach e Litprof, ambos com os parâmetros por defeito, com base nos resultados laboratoriais. As Figuras 5a-d, 6a-d e 7 mostram, respectivamente, os perfis após 1, 4, 8 e 11 horas de simulação (à escala laboratorial), os indicadores de impacto para avaliação do desempenho dos modelos, volume de erosão e recuo de praia, e o indicador de erro para avaliação do desempenho dos modelos, BSS. Os resultados de evolução do perfil indicam que nenhum dos modelos reproduziu a permanência do declive da face de praia que se observou durante a experiência e que todos eles sobrestimaram a erosão junto à linha de água. Para esta zona, a melhor simulação foi obtida com o modelo XBeach, seguida do Litprof-Stokes5 e por último o Litprof-D&B (Figuras 5a-d). Quanto ao desenvolvimento da barra submersa, cujo modelo XBeach não reproduziu, ela é reproduzida pelo modelo Litprof (em ambas as versões, Stokes5 e D&B) com uma extensão superior à observada no sentido mar, que resulta do facto de ter sido extraído e transportado em direcção ao mar um correspondente maior volume de areia (Figuras 5a-d).

O volume de erosão é significativamente sobrestimado pelo modelo Litprof-D&B e subestimado pelo modelo XBeach (Figura 6a). A evolução temporal do indicador de impacto volume de erosão indica que até ao final das primeiras 8 horas o volume total de erosão obtido com o modelo Litprof (Stokes5) é semelhante ao experimental e que a partir desta hora o volume de erosão aumenta significativamente (Figura 6a). Provavelmente tal deve-se em parte ao facto de terem ocorrido fugas de sedimento do perfil para o canal (fora da zona de monitorização) durante a experiência laboratorial. De facto, comparando o perfil observado após 8 e 11 horas (Figuras 5c e 5d) constata-se que ocorreu erosão relativamente ao perfil inicial nos primeiros 7 m do perfil. O indicador de impacto recuo (da face) de praia não é reproduzido correctamente por nenhum dos modelos (Figura 6b). Observa-se que os modelos simulam indevidamente o processo de avalanche na zona da face de praia (zona da linha de água), onde se observa um aparente declive de equilíbrio, aproximadamente 2:10, que se formou ao fim de uma hora de ensaio e manteve estável durante toda a experiência. Apesar do mau desempenho, o modelo XBeach reproduz um recuo de praia mais lento do que o modelo Litprof. O indicador de erro BSS aponta para um melhor desempenho do modelo XBeach, seguido do modelo Litprof-Stokes5 e depois do modelo Litprof-D&B (Figura 7). No entanto, admitindo que se pretendia aplicar o modelo com melhor desempenho num problema de engenharia, o modelo a aplicar nestas condições, i.e. com os parâmetros por defeito, seria o modelo Litprof-Stokes5, uma vez que a geometria do perfil é a que mais se aproxima do perfil observado e a erosão da face de praia é sobrestimada, estando assim do lado da segurança.



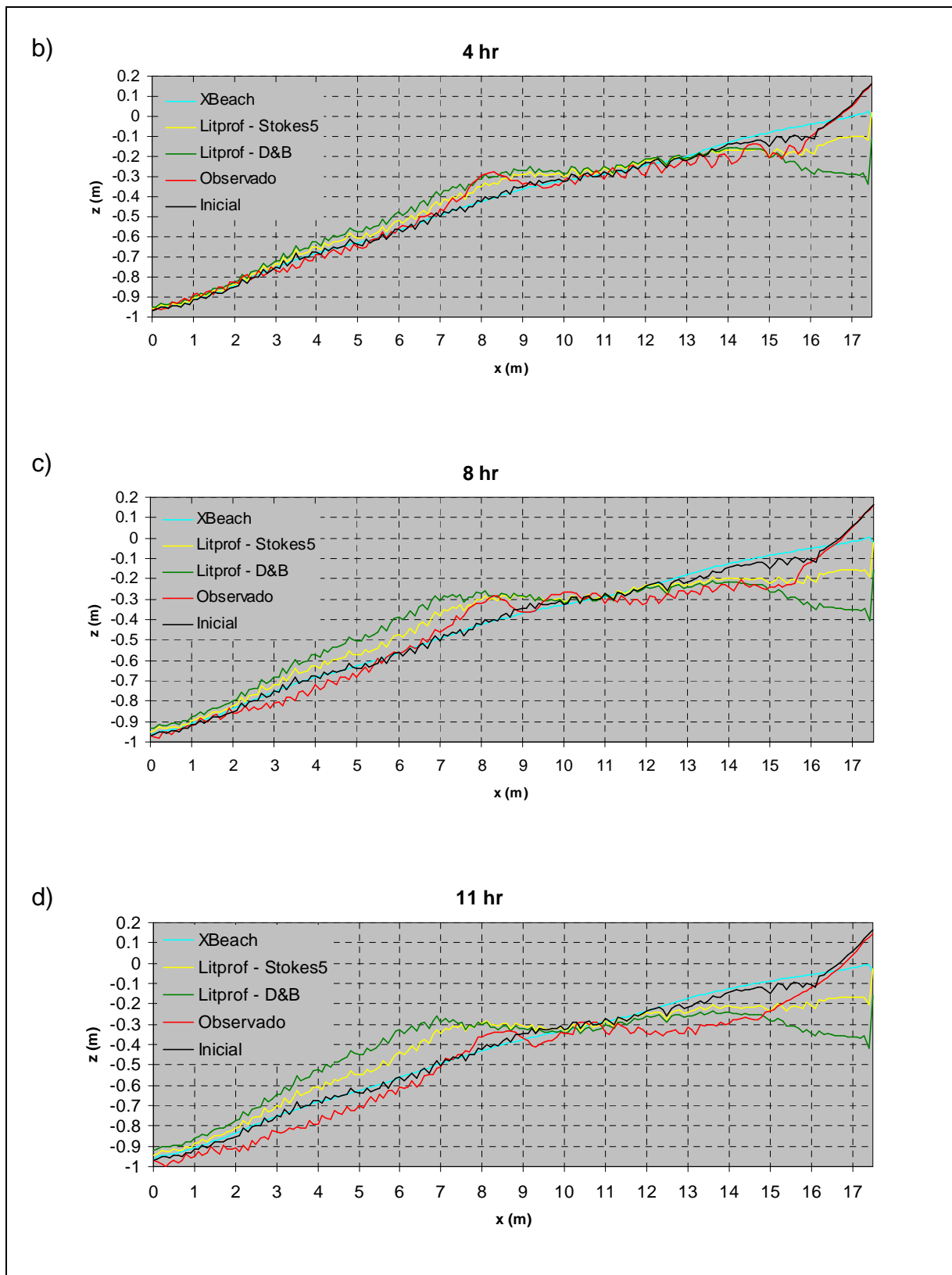


Figura 5 - Resultados numéricos dos modelos XBeach e Litprof (para as teorias de onda D&B e Stokes5) com parâmetros por defeitos, à escala laboratorial, ao final de 1,4,8 e 11 horas. A linha a azul representa a previsão XBeach, a linha amarelo representa a previsão Litprof-Stokes5, a linha verde representa a previsão Litprof-D&B, a linha vermelha representa o perfil experimental e a linha preta representa o perfil inicial.

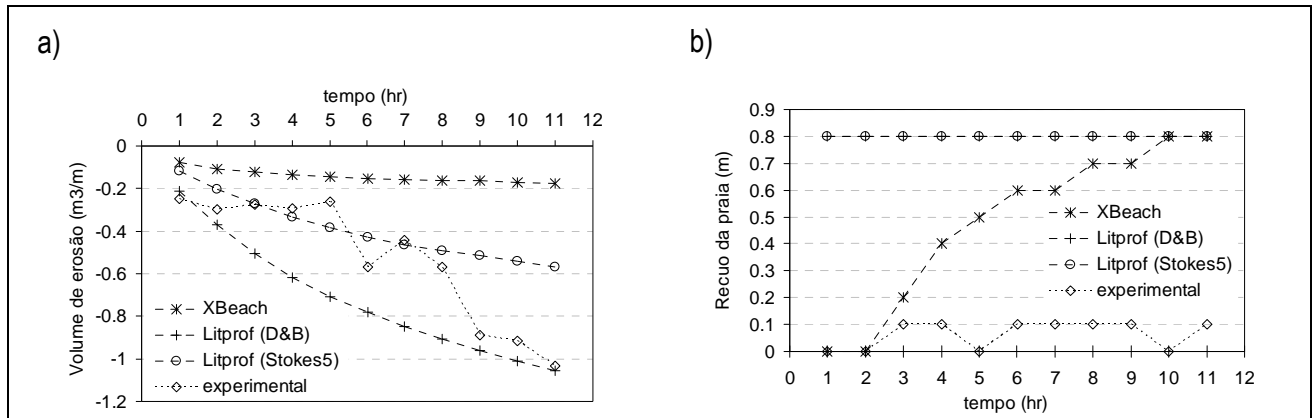


Figura 6 – Indicadores de impacto para os modelos XBeach e Litprof (para as teorias de onda D&B e Stokes5) com parâmetros por defeito: a) Volume de erosão e b) Recuo de praia.

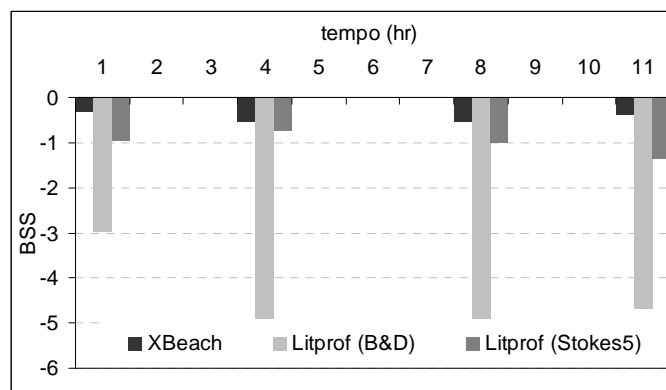


Figura 7 – Indicador de erro BSS para os modelos XBeach e Litprof (para as teorias de onda D&B e Stokes5) com parâmetros por defeito.

4.3 Calibração

Testaram-se os parâmetros de calibração para cada um dos modelos, tendo como base os parâmetros por defeito. Neste processo, fez-se variar um parâmetro de cada vez mantendo os outros constantes. Apresentam-se os resultados dos testes efectuados. Posteriormente faz-se a avaliação do desempenho do modelo XBeach com base na comparação dos dois modelos para os melhores resultados obtidos após calibração.

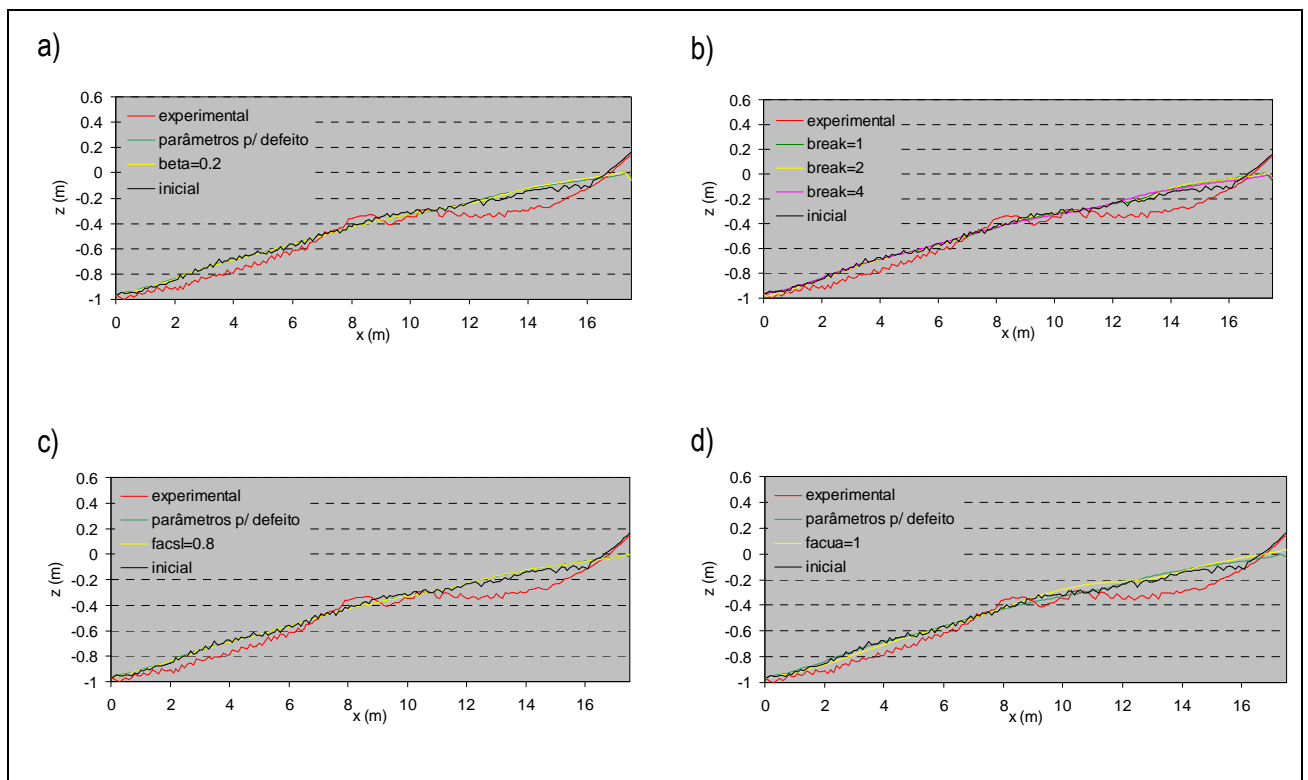
4.3.1 Modelo XBeach

A identificação dos parâmetros de calibração no modelo XBeach é um tema bastante importante, do qual depende o desempenho do modelo. No entanto, verifica-se que ainda não existe suficiente experiência sobre a aplicação do modelo de forma a apontar com clareza quais os parâmetros, de entre um grande número, a testar. Também por isso, a realização deste estudo é de grande importância. Para identificar os parâmetros de calibração procurou-se numa primeira fase seleccionar os parâmetros considerados em casos anteriores de aplicação do modelo. Roelvink et al. (2009) relatam o maior

número de casos de aplicação do modelo conhecidos, no entanto, não esclarecem sobre o processo de calibração. Das aplicações do modelo publicadas, a que descreve uma análise sobre alguns dos parâmetros de calibração utilizados é a de Voudoukas et al (2011), para um caso real de praia reflectiva. Os autores salientam que os parâmetros com maior resposta morfológica foram *lws*, *facua* e *wetslp*. Numa outra aplicação, Branderburg (2010), sem detalhar sobre o processo de calibração, recomenda parâmetros de calibração do modelo XBeach quando aplicado em modelos experimentais de pequena escala. O autor recomenda o teste aos parâmetros *hmin*, *eps*, *turb*, *morfac*, *wetslp*, *hswitch*, *dzmax* e *Tsmin*. Num caso de erosão dunar (testado pela autora, mas não publicado), o modelo mostrou-se sensível aos parâmetros *dryslp*, *lws* e *hswitch*.

Neste estudo, tendo em conta os trabalhos acima mencionados e após analisada pormenorizadamente a formulação do modelo e respectivos parâmetros (recomenda-se a análise de Roelvink et al., 2010), testaram-se os parâmetros: *beta*, *break*, *facsl*, *facua*, *gammax*, *hmin*, *hswitch*, *lws*, *turb* e *wetslp*. Testou-se o modelo para os valores: 0.2 de *beta*, 1, 2 e 4 de *break*, 0.8 de *facsl*, 1 de *facua*, 0.5 de *gammax*, 0.001 de *hmin*, 0.01 de *hswitch*, 1 de *lws*, 0 e 1 de *turb* e 0.6 de *wetslp*. Fez-se variar cada um destes parâmetros de cada vez relativamente à situação *default* (com os parâmetros por defeito).

Os resultados numéricos ao final de 11 horas (Figuras 8a-j) mostram que os parâmetros mais influentes na evolução morfológica para este caso de estudo são *break*, *gammax*, *facua* e *lws*. O parâmetro *gammax* foi o único que permitiu a preservação do declive da face de praia (Figura 8e). Os parâmetros *facua* e *lws* foram aqueles que conferiram ao perfil final uma geometria mais próxima da configuração barra-fossa observada (Figuras 8d e 8h, respectivamente). Os resultados obtidos para o indicador de erro BSS (Figura 9) evidenciam que o melhor desempenho foi obtido com alteração do parâmetro *gammax* de 2 (por defeito) para 0.5. No entanto, este resultado foi obtido não à custa da diminuição do erro entre os valores calculados e medidos mas à custa da pequena modificação do perfil inicial. Considera-se por isso, que o melhor desempenho do modelo XBeach foi obtido com o parâmetro *lws* igual a 1, que tendo obtido o segundo melhor lugar na avaliação de desempenho com base no indicador de erro BSS (Figura 9), foi o que melhor reproduziu a configuração da barra submersa.



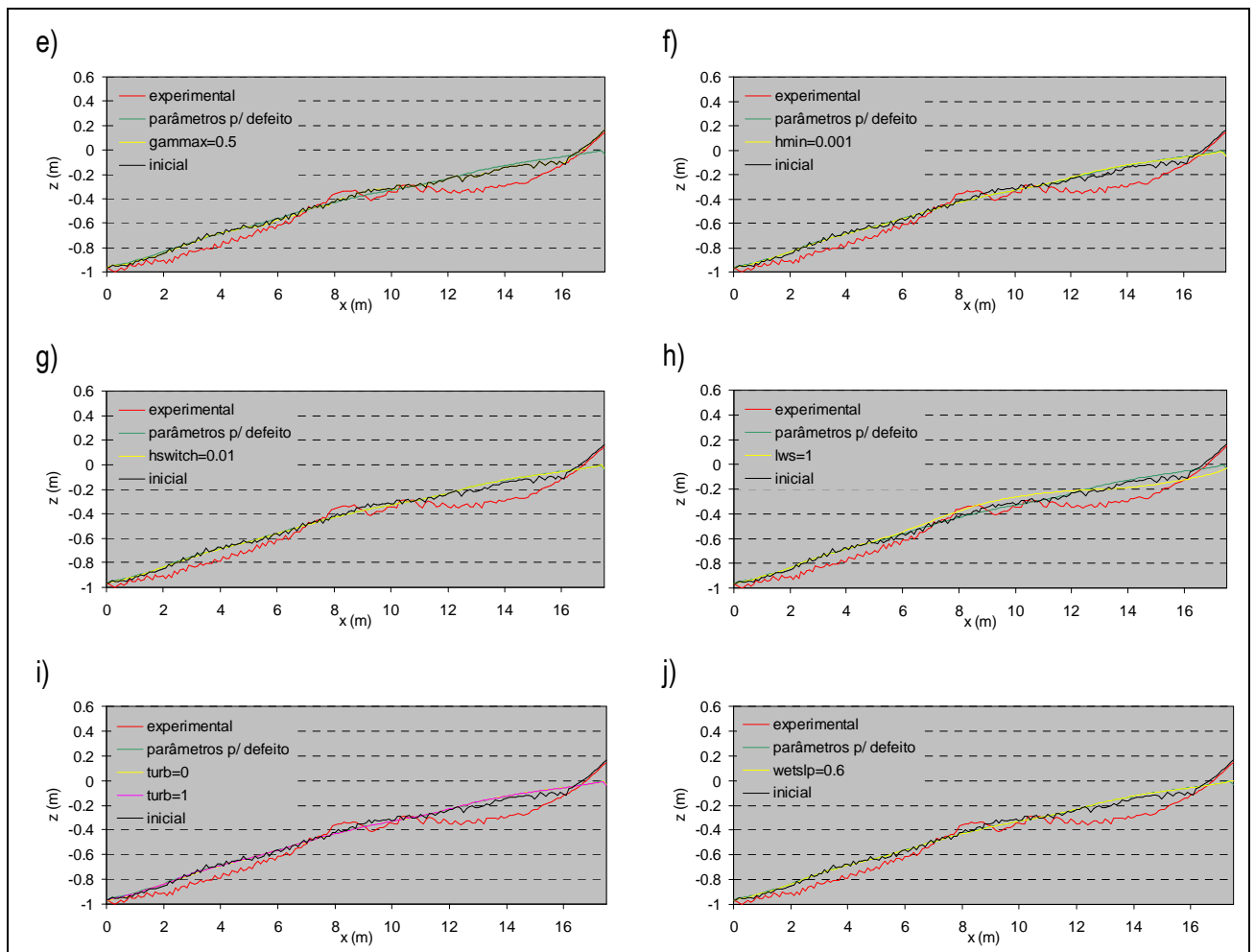


Figura 8 - Resultados numéricos do modelo XBeach, à escala laboratorial, ao final 11 horas. Teste aos parâmetros de calibração a) *beta*, b) *break*, c) *facsl*, d) *facua*, e) *gammax*, f) *hmin*, g) *hswitch*, h) *lws*, i) *turb* e j) *wetslp*.

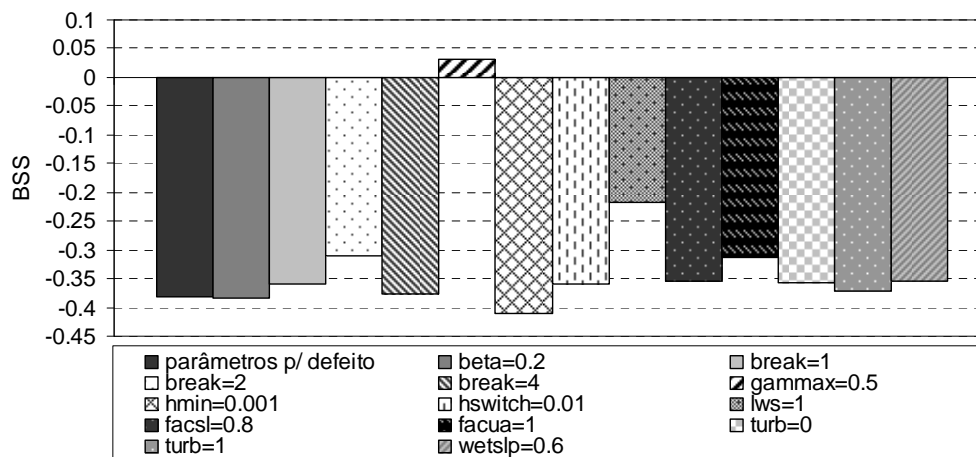


Figura 9 - Indicador de erro BSS para os testes de calibração do modelo XBeach.

4.3.2 Modelo Litprof

Neste modelo, os principais parâmetros de calibração são os parâmetros de rebentação da onda e o parâmetro de escala. Da comparação dos parâmetros por defeito comuns aos dois modelos, verificou-se que o modelo XBeach é menos tolerante no que respeita ao máximo declive de fundo para cálculo da avalanche submersa. XBeach considera o declive crítico de avalanche submersa ($wets/p$) 0.3 (Tabela 1) e o modelo Litprof considera o máximo ângulo de fundo submerso 30° (Tabela 2), que corresponde ao valor 0.6 do parâmetro $wets/p$ do modelo XBeach. Assim testaram-se: os parâmetro de rebentação γ_1 e γ_2 , o parâmetro de escala α_{scale} e o máximo ângulo de fundo submerso estável (*Maximum Angle of Bed Slope*). Os parâmetros γ_1 e γ_2 são considerados na estimativa da máxima altura de onda, H_{max} , que por sua vez é necessária para estimar a energia dissipada segundo Battjes e Janssen (1978). Eles são considerados na formulação seguinte

$$H_{max} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \tanh\left(\frac{\gamma_2 kh}{\gamma_1}\right) \quad (35)$$

onde k é o número de onda e h a profundidade. O parâmetro de rebentação γ_1 descreve a máxima declividade da onda, H/L . O parâmetro de rebentação γ_2 é, segundo Battjes e Stive (1984) calculado da seguinte forma

$$\gamma_2 = 0.5 + 0.4 \tanh(33s_0) \quad (36)$$

onde s_0 é o declive de onda ao largo, H/L_0 , onde L_0 é o comprimento de onda ao largo. O parâmetro α_{scale} é um coeficiente de difusão horizontal que afecta a forma de desenvolvimento das barras (DHI, 2008). Fez-se variar cada um destes parâmetros de cada vez relativamente à situação *default* (com os parâmetros por defeito). Testou-se o modelo para os valores: 0.95 e 0.8 de γ_1 , 0.5 e 0.75 de γ_2 , 0.8 e 1.2 de α_{scale} , e 15° e 20° de *Maximum Angle of Bed Slope*.

Os resultados numéricos ao final de 11 horas mostram que a variação do parâmetro γ_1 na gama dos valores testados, que são adequados para a declividade máxima da onda uma vez que se trata de um fundo suave (declive 1:20), não causa variação relevante na evolução morfológica para ambas as teorias de onda (D&B e Stokes5) (Figuras 10a-b). No entanto, o parâmetro γ_2 é bastante influente na erosão da face de praia e em particular no desenvolvimento da barra submersa. Os resultados evidenciam que o aumento de γ_2 causa uma barra com geometria melhor definida e mais extensa, ou seja, que se prolonga até maiores profundidades. No caso da teoria de Stokes5, os resultados obtidos com γ_2 igual a 0.5 são bastante bons (Figura 10c). Inclusivamente, é conservado o declive da face de praia, o que não se verificou em nenhum dos outros testes, quer com os parâmetros por defeito quer nos restantes testes de calibração. Os testes ao parâmetro de escala, α_{scale} , mostram que este tem o efeito de alterar a extensão da barra submersa, mas de forma muito pouco significativa para ambas as teorias de onda (Figuras 10e-f). A diminuição do máximo ângulo de fundo antes de avalanche submersa (*Maximum Angle of Bed Slope*) faz com que a erosão na face de praia seja menor, uma vez que permitindo maiores declives de fundo é mais lento o processo erosivo. Contudo, a afectação da variação deste parâmetro nos resultados finais é muito pouco significativa (Figuras 10g-h). Os resultados obtidos para o indicador de erro BSS (Figuras 11a-d) evidenciam que os parâmetros γ_2 e α_{scale} são os mais influentes na variação morfológica, i.e., a sua variação causa as maiores alterações do perfil de praia. Considera-se que o melhor desempenho do modelo Litprof foi obtido com o parâmetro γ_2 igual a 0.5 para o caso da teoria de Stokes 5 (Figura 11b).

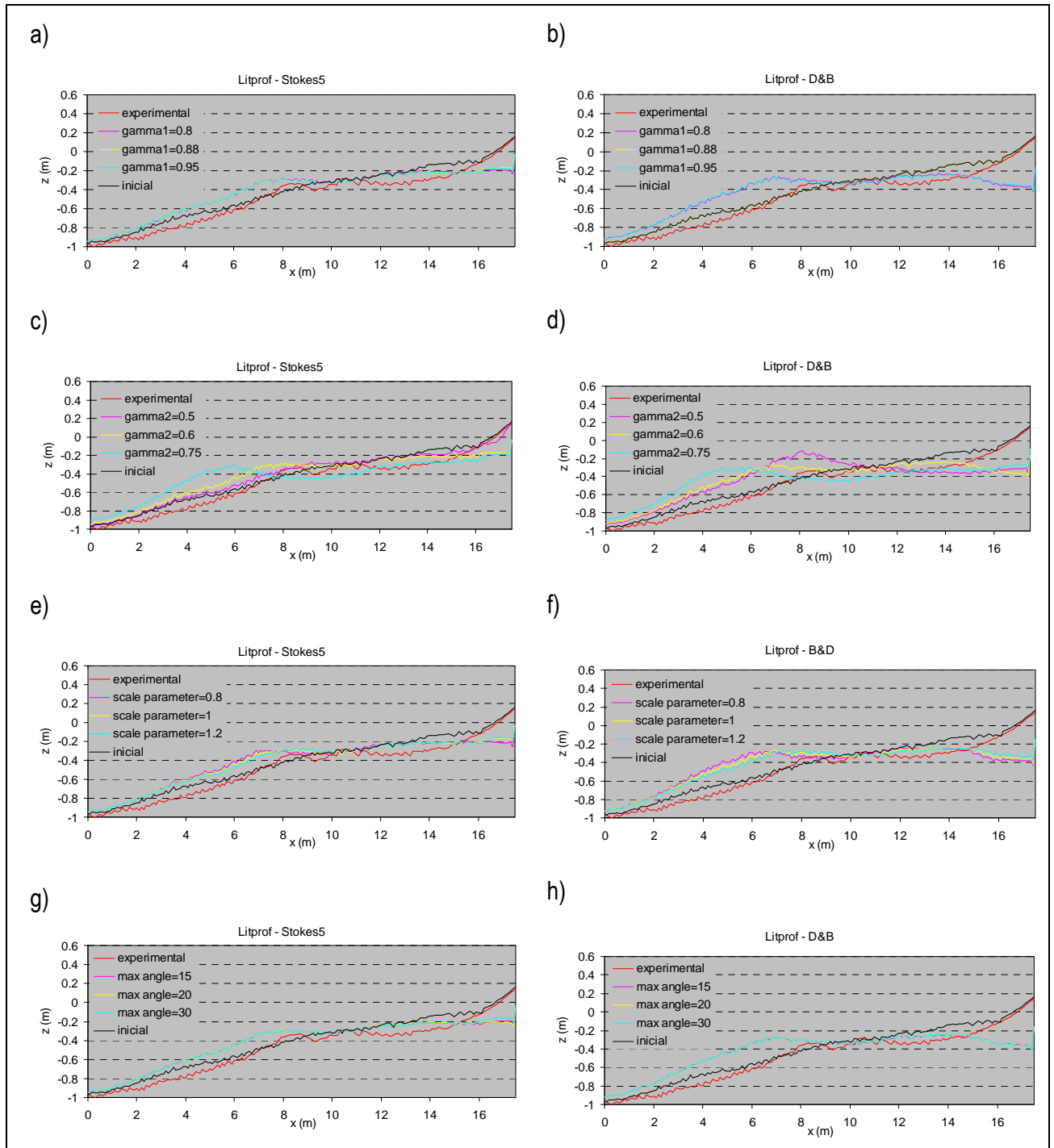


Figura 10 - Resultados numéricos do modelo Litprof (para as teorias de onda D&B e Stokes5), à escala laboratorial, ao final 11horas. Teste aos parâmetros de calibração a) γ_1 , b) γ_2 , c) α_{scale} e d) *Maximum Angle of Bed Slope*.

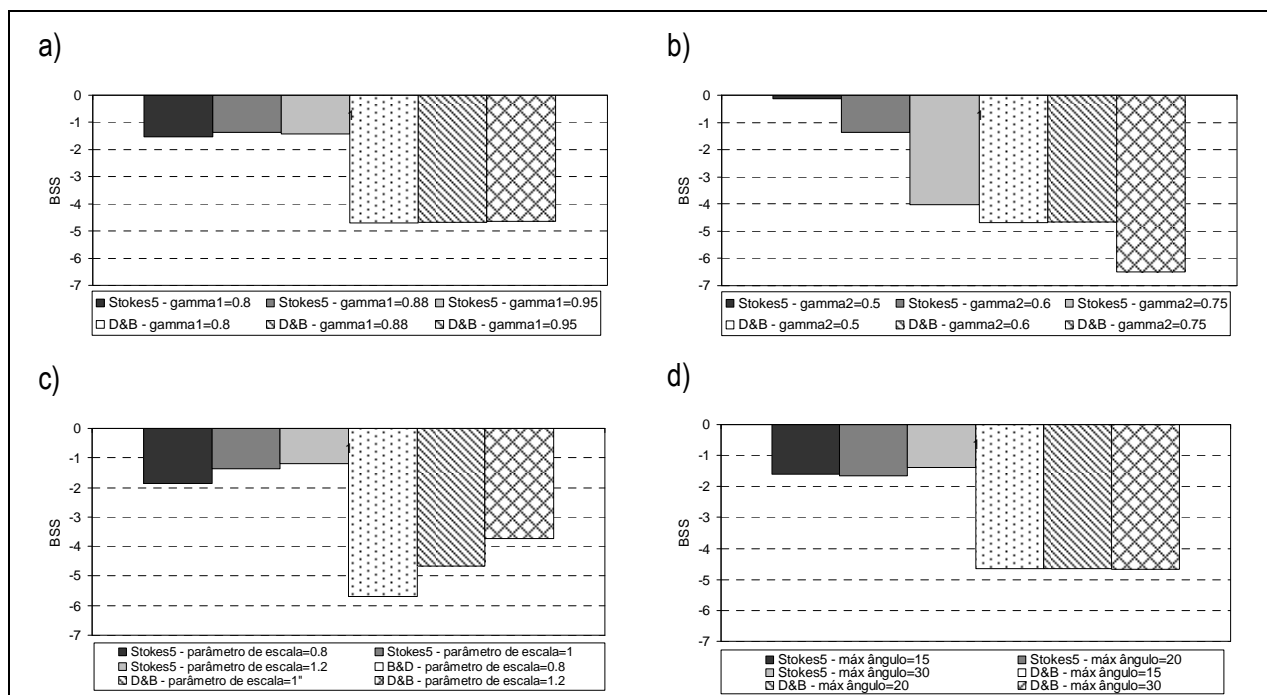


Figura 11 - Indicador de erro BSS para os testes de calibração do modelo Litprof-Stokes5. Parâmetros de calibração: a) γ_1 , b) γ_2 , c) α_{scale} e d) *Maximum Angle of Bed Slope*.

4.3.3 Comparação

Compararam-se as simulações do modelo XBeach e Litprof-Stokes5 após calibração (e também com os parâmetros por defeito). Para cada um dos modelos considerou-se a aplicação com a qual se obteve o melhor desempenho do modelo, i.e., o modelo XBeach com o parâmetro lws igual a 1 e o modelo Litprof-Stokes5 com o parâmetro γ_2 igual a 0.5.

Os resultados numéricos obtidos ao final de 11 horas (à escala laboratorial) mostram que ambos os modelos calibrados foram capazes de reproduzir o desenvolvimento da barra submersa característico do perfil de erosão, sendo o modelo Litprof-Stokes 5 o que melhor simulou o fenómeno (Figura 12). O indicador de impacto volume de erosão indica que os modelos calibrados apresentam um volume de erosão semelhante e bastante inferior ao experimental (Figura 13a). Conforme já mencionado, tal deve-se ao facto de terem ocorrido fugas de sedimento da zona de monitorização do perfil para o interior do canal durante a experiência laboratorial. O indicador de impacto recuo de praia mostra que o modelo com melhor desempenho, i.e, aquele com o qual se obteve um recuo de praia mais próximo do experimental, foi o modelo Litprof-Stokes5 (Figura 13b). O indicador de erro BSS, em concordância com a análise dos resultados de evolução do perfil, aponta para o melhor desempenho do modelo Litprof-Stokes5 (Figura 14).

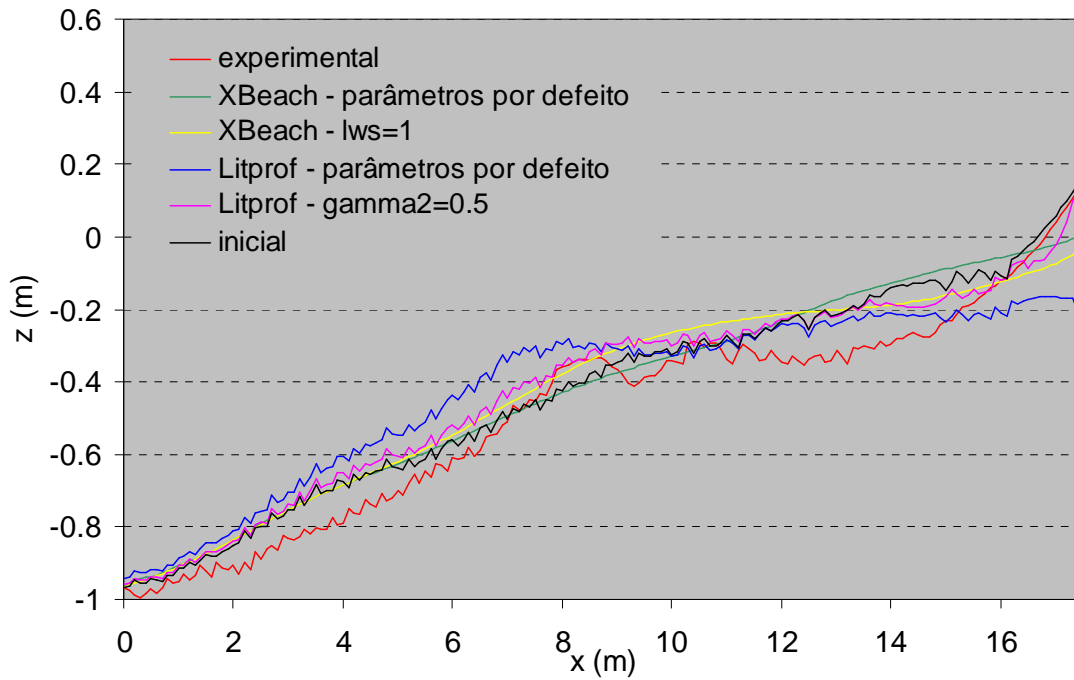


Figura 12 - Resultados numéricos dos modelos XBeach e Litprof (para a teoria de onda Stokes5) com parâmetros por defeitos e após calibração, à escala laboratorial. As linhas verde e amarela representam as previsões do XBeach com parâmetros por defeito e calibrado, respectivamente; as linhas azul e rosa representam as previsões do Litprof (Stokes5) com parâmetros por defeito e calibrado, respectivamente; a linha vermelha representa o perfil experimental; e a linha preta representa o perfil inicial.

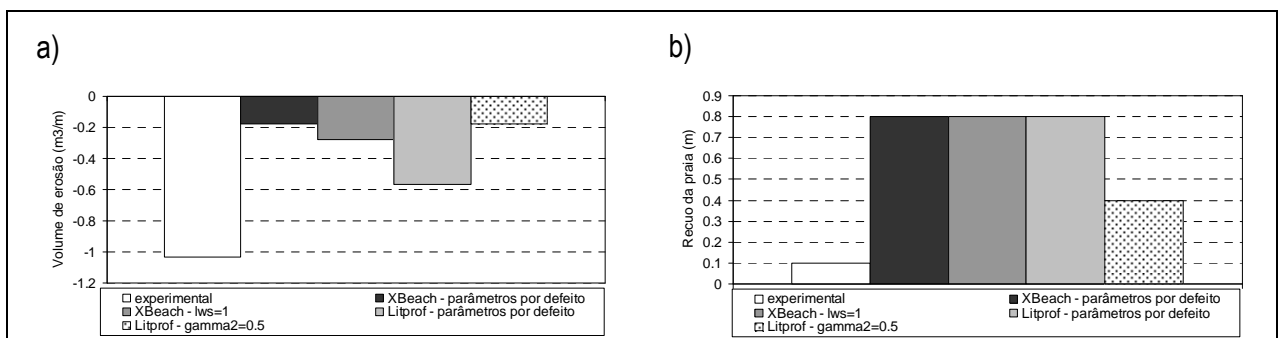


Figura 13 – Indicadores de impacto para os modelos XBeach e Litprof (para a teoria de onda Stokes5) com parâmetros por defeito e após calibração: a) Volume de erosão e b) Recuo de praia.

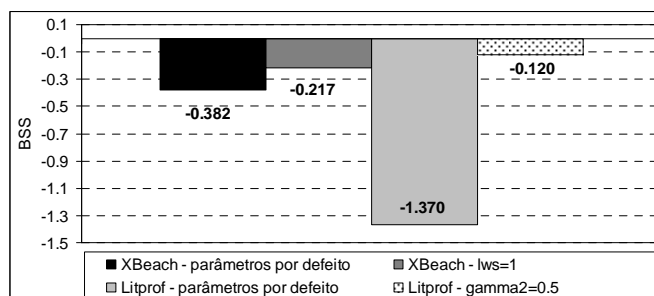


Figura 14 - Indicador de erro BSS para os modelos XBeach e Litprof (para a teoria de onda Stokes5) com parâmetros por defeito e após calibração.

5. Sumário, conclusões e trabalho futuro

Testou-se o modelo XBeach no desenvolvimento de um perfil de erosão do tipo barra-fossa obtido em canal de grande escala de laboratório. Numa primeira fase testou-se o modelo XBeach com os parâmetros por defeito. Numa segunda fase calibrou-se o modelo, ajustando os parâmetros de forma a melhorar o seu desempenho, i.e., a similaridade com os resultados observados. Com vista à comparação do modelo XBeach com o modelo Litprof, procedeu-se da mesma forma com o modelo Litprof, e posteriormente compararam-se os resultados de ambos os modelos em ambas as fases, sempre com base nos dados observados durante a evolução do perfil de praia.

A aplicação do modelo XBeach com os parâmetros por defeito mostrou que: i) o modelo simulou alterações morfológicas do perfil numa secção menos extensa do que a observada, ou seja, que o modelo subestimou a extensão das alterações morfológicas ocorridas, ii) o modelo subestimou a grandeza das alterações morfológicas ocorridas; e iii) que o modelo não conseguiu reproduzir o desenvolvimento da barra submersa. Na aplicação do modelo XBeach com os parâmetros por defeito o indicador de erro BSS apontou para um melhor desempenho do modelo XBeach, seguido do modelo Litprof (Stokes5) e depois do modelo Litprof (D&B). No entanto, admitindo que se pretendia aplicar um dos modelos com os parâmetros por defeito (*standard set of parameter settings*) num problema de engenharia, recomenda-se a aplicação do modelo Litprof (Stokes5), uma vez que a geometria do perfil é a que mais se aproxima do perfil observado e a erosão da face de praia é sobrestimada, estando assim do lado da segurança.

Testaram-se dez parâmetros de calibração do modelo XBeach, que foram: *beta*, *break*, *facsl*, *facua*, *gammax*, *hmin*, *hswitch*, *lws*, *turb* e *wetslp*. Fez-se variar cada um destes parâmetros de cada vez relativamente à situação *default* (com os parâmetros por defeito) e concluiu-se que os parâmetros mais influentes na evolução morfológica para este caso de estudo foram *break*, *gammax*, *facua* e *lws*. O indicador de erro BSS evidenciou que o melhor desempenho foi obtido com alteração do parâmetro *gammax* de 2 (por defeito) para 0.5. No entanto, este resultado foi obtido não à custa da diminuição do erro entre os valores calculados e medidos mas à custa da pequena modificação do perfil inicial. Considera-se por isso, que o melhor desempenho do modelo XBeach foi obtido com o parâmetro *lws* igual a 1, que tendo obtido o segundo melhor lugar na avaliação de desempenho com base no indicador de erro BSS, foi o que melhor reproduziu a configuração da barra submersa. Este resultado é bastante importante porque apesar de ser unânime entre a comunidade científica o reconhecimento do elevado potencial do modelo XBeach e da sua elevada capacidade em simular a erosão de dunas, já não existe a mesma unanimidade na avaliação da capacidade do modelo em simular o desenvolvimento das barras submersas características de um perfil de erosão.

Testaram-se quatro parâmetros de calibração do modelo Litprof para cada teoria de onda, que foram: os parâmetros de rebentação γ_1 e γ_2 , o parâmetro de escala α_{scale} e o máximo ângulo de fundo submerso (*Maximum Angle of Bed Slope*). Fez-se variar cada um destes parâmetros de cada vez relativamente à situação *default* (com os parâmetros por defeito) e concluiu-se que os parâmetros mais influentes na evolução morfológica para este caso de estudo foram γ_2 e α_{scale} . O melhor desempenho do modelo Litprof foi obtido com o parâmetro γ_2 igual a 0.5 para o caso da teoria de Stokes 5. Neste teste obteve-se uma boa reprodução do perfil de erosão quer na zona da face de praia quer na zona da barra submersa. Da comparação dos modelos XBeach e Litprof calibrados concluiu-se que ambos reproduzem o desenvolvimento da barra submersa característico do perfil de erosão, mas foi o modelo Litprof que apresentou o melhor desempenho.

A execução deste estudo foi muito importante para se conhecer a capacidade do modelo XBeach na previsão do desenvolvimento da barra submersa num perfil típico de erosão barra-fossa. É de grande interesse realizar no futuro o teste ao desempenho do modelo XBeach para erosão de dunas relativamente ao modelo Litprof com a mesma metodologia de abordagem aqui aplicada.

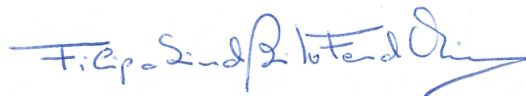
Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P., Outubro 2011.

VISTOS



André Fortunato
Chefe do Núcleo de
Estuários e Zonas Costeiras

AUTORIA



Filipa S. B. F. Oliveira
Investigadora Auxiliar



Rafaela de Saldanha Matos
Directora do Departamento de
Hidráulica e Ambiente

6. Referências

- Battjes, J.A. and Stive, M.J.F., 1984. Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves, *Coastal Eng.* pp. 649-660.
- Battjes, J.A., and Janssen, J.P.F.M., 1978. Energy Loss and Set-Up due to Breaking of Random Waves. *Proc. of the 16th Int. Conf. on Coastal Eng.* pp. 569-587, Hamburg.
- Dally, W.R. and Brown, C.A., 1995. A modeling investigation of the breaking wave roller with application to cross-shore currents. *J. of Geophys. Researc*, Vol. 100, No. C12, pp. 24.873-24.883.
- Damgaard, J., Dodd, N., Hall, L., Chesher, T., 2002. Morphodynamic modelling of rip channel growth. *Coastal Engineering*, 45, 199-221.
- DHI, 2008. Profile development. LITPROF user guide. Danish Hydraulic Institute.
- Doering, J.C. and Bowen, A.J., 1995. Parametrization of orbital velocity asymmetries of shoaling and breaking waves using bispectral analysis. *Coastal Engineering*, Vol. 26, pp. 15-33.
- Engelund, F. and Fredsøe, J., 1976. A sediment transport model for straight alluvial channels, *Nordic Hydrology*, 7, pp. 296-306.
- Feddersen, F., Guza, R.T., Elgar, S., Herbers, T.C., 2000. Velocity moments in alongshore bottom shear stress parameterizations. *Journal of Geophysical Research*, 105, 8673-8688.
- Fenton, J., 1985. A fifth-order Stokes theory for steady waves. *J. Coastal, Port. Waterway and Ocean Eng.*, ASCE, Vol. 111, pp. 216-234.
- Fredsøe, J. and Deigaard, R., 1992. *Mechanics of Coastal Sediment Transport*. Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 3, World Scientific.
- Freire, P., Oliveira, F.S.B.F., Capitão, R., Fortes, C. and Costa, M., 2004, Cross-shore evolution of Buarcos beach, Portugal. 29th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Lisboa, Portugal, pp. 2314-2326.
- Freire, P., Sancho, F. and Oliveira, F.S.B.F., 2008. Composite modelling of sediment dynamics for propagating waves reaching coastal defences. Second International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection (Coastlab08), Bari, Italy, pp. 87-90.
- Guza, R.T., Thornton, E.B., 1982. Swash oscillations on a natural beach. *Journal of Geophysical Research* 86 (C5), 4133-4137.
- Larson, M. and Kraus, N.C., 1989. SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced change. Report 1. Empirical formulation and model development. Technical report CERC-89-9, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS.
- Nairn, R.B., Roelvink, J.A., Southgate, H.N., 1990. Transition zone width and implications for modelling surfzone hydrodynamics. In: Edge, B.L. (Ed.) *Coastal Engineering Conference, 1990: Proceedings of the International Conference: American Society of Civil Engineering*, Reston, Va, pp. 68-81.
- Larangeiro, S.H.C.D., Oliveira, F.S.B.F. and Freire, P.M.S., 2003. Longshore sediment transport along a sandy coast with hard rock outcrops, *Shore and Beach*, Vol.71, No.2, pp. 20-24.
- Oliveira, F.S.B.F., 2002. Effect of the sea level variation in the offshore limit of the surf zone of Buarcos, Portugal. *Littoral 2002, The changing coast*. EUROCOAST/EUCC, Porto, Portugal, pp. 363-368.
- Phillips, O.M., 1977. *The dynamics of the upper ocean*. 2nd ed. Cambridge University Press, New York, 336 pp.
- Raubenheimer, B., Guza, R.T., 1996. Observations and predictions of run-up. *Journal of Geophysical Research*, 101 (C10) 25575-25587.
- Reniers, A.J.H.M., Roelvink, J.A., Thornton, E.B., 2004a. Morphodynamic modelling of an embayed beach under wave group forcing. *Journal of Geophysical Research*, 109, C01030. doi: 10.1029/202JC001586.
- Reniers, A.J.H.M., Thornton, E.B., Stanton, T., Roelvink, J.A., 2004b. Vertical flow structure during Sandy Duck: observations and modelling. *Coastal Engineering*, 51 (3), 237-260.
- Roelvink, J.A., 1993. Dissipation in random wave groups incident on a beach. *Coastal Engineering* 19, 127-150.

- Roelvink, J.A., van Kessel, T., Alfageme, S., Canizares, R., 2003. Modelling of barrier island response to storms. Proc. Coastal Sediments '03, Clearwater, Florida.
- Roelvink, D., Reniers, A., Dongeren, A., Vries, J.T., McCall, R. and Lescinski, J., 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. Coastal Engineering, 56, 1133-1152.
- Roelvink, D., Reniers, A., Dongeren, A., Vries, J.T., Lescinski, J. and McCall, R., 2010. XBeach model description and manual. Report. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology.
- Ruessink, B.G., Miles, J.R., Feddersen, F., Guza, R.T., Elgar, S., 2001. Modeling the alongshore current in barred beaches. Journal of Geophysical Research, 106, 22451-22463.
- Sallanger, A.H., 2000. Storm impact scale for barrier islands. Journal of Coastal Research, 16 (3), 890-895.
- Soulsby, R.L., Hamm, L., Klopman, G., Myrhaug, D., Simons, R.R., Thomas, G.P., 1993. Wave-current interaction within and outside the bottom boundary layer. Coastal Engineering, 21, 41-69.
- Soulsby, R.L., 1997. Dynamics of Marine Sands. Thomas Telford, London.
- Stive, M.J.F. and Vriend, H.J., 1994. Shear stresses and mean flow in shoaling and breaking waves. In: Edge, B.L. (Ed.) Proceedings of the 24th International Conference: American Society of Civil Engineering, Reston, Va, pp. 594-608.
- Sutherland, J., Peet, A.H., Soulsby, R.L., 2004. Evaluating the performance of morphological models. Coastal Engineering, 51, pp. 917-939.
- Svendsen, I.A., 1984. Wave heights and set-up in a surf zone. Coastal Engineering, 8, 303-329.
- Van Rijn, L.C., Walstra, D.J.R., Grasmeyer, B., Sutherland, J., Pan, S., Sierra, J.P., 2003. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. Coastal Engineering, 47, pp. 295-327.
- Van Thiel de Vries, J.S.M., van Gent, M.R.A., Walstra, D.J.R., Reniers, A.J.H.M., 2008. Analysis of dune erosion processes in large-scale flume experiments. Coastal Engineering, 55 (12).
- Tucker, M.J., 1954. Surfbeats: sea waves of 1 to 5 minutes' period. Proc. R. Soc. London, Ser. A 202, 565-573.
- Vellinga, P., 1986. Beach and dune erosion during storm surges. Ph.D. thesis Delft University of Technology.
- Zyserman, J. e Fredsøe, J., 1994. Data analysis of bed concentration of suspended sediment. J. Hydr. Eng., ASCE, Vol 120, No 9.