

ANÁLISE PARAMÉTRICA DO TRANSPORTE SEDIMENTAR A BARLAMAR DE UM ESPORÃO: IMPACTO NA EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA

A. GUIMARÃES¹; M. LIMA¹; C. COELHO²; R. SILVA³; F. VELOSO-GOMES⁴

RESUMO

Este trabalho pretende contribuir para a otimização do desempenho do programa de modelação numérica LTC (*Long Term Configuration*), através da análise do comportamento da linha de costa, em função da alteração gradual de determinados parâmetros de entrada. Para tal foi avaliada a influência dos parâmetros e a sensibilidade do modelo num caso de estudo com uma extensão de 10km de praia, a barlamar de um esporão de 145m de comprimento.

Numa primeira análise foi avaliada a influência da definição da largura ativa dos perfis transversais na proximidade a sotamar do esporão. Para efetuar esta avaliação, foi definido um valor de profundidade de fecho igual ao do perfil imediatamente a barlamar, ao longo de diferentes extensões a sotamar, em função do comprimento do esporão.

Numa segunda e terceira análises foi estudado o efeito da alteração dos ângulos de atrito dos sedimentos e da batimetria inicial, respetivamente. A alteração do ângulo de atrito na direção transversal não originou alteração da posição da linha de costa, enquanto o aumento do ângulo de atrito na direção longitudinal originou um avanço da posição da linha de costa. O cenário onde se procedeu à alteração da batimetria inicial foi o que registou maior impacto na posição da linha de costa, com diferenças significativas nos resultados.

Uma última análise consistiu no estudo da influência do coeficiente de transporte sedimentar. A configuração da linha de costa foi calculada para diferentes instantes de cálculo, correspondendo aos tempos de enchimento obtidos para cada valor do coeficiente de transporte e a um tempo de cerca de 40 anos, correspondente a uma situação de equilíbrio da praia. Verifica-se que o valor do coeficiente de transporte apenas afeta a rapidez com que a linha de costa atinge determinada posição.

Palavras-chave: Análise de sensibilidade; Coeficiente de transporte; LTC; Modelo numérico; Posição da linha de costa.

¹ Estudante de Doutoramento; Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Aveiro; Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal; asaguimaraes@ua.pt e marcia.lima@ua.pt.

² Doutor e Professor Auxiliar; Departamento de Engenharia Civil - Universidade de Aveiro; Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal; ccoelho@ua.pt, Telefone: +351 234 370 098.

³ Doutora; Departamento de Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto; Rua Doutor Roberto Frias, 4200-465 Porto; rfsilva@fe.up.pt.

⁴ Doutor e Professor Catedrático; Departamento de Engenharia Civil – Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto; Rua Doutor Roberto Frias, 4200-465 Porto; vgomes@fe.up.pt.

1. INTRODUÇÃO

A modelação numérica assume um papel muito importante no planeamento e dimensionamento de obras de defesa costeira. Segundo Dias (1997), a multiplicidade de parâmetros físicos envolvidos nos processos modeladores, juntamente com a complexidade desses processos e o reduzido número de experiências de campo (em função das difíceis condições de monitorização) tornam a modelação numérica uma ferramenta indispensável. Os modelos numéricos devem ser utilizados com precaução e calibrados, sempre que possível, com dados obtidos em ensaios laboratoriais e/ou dados recolhidos no campo.

São inúmeros os modelos numéricos de evolução de linha de costa existentes e é ainda mais vasta a multiplicidade de parâmetros envolvidos, daí ser muito importante compreender a influência que cada parâmetro tem no desempenho do modelo. Desta forma, este trabalho tem como objetivo fundamental o estudo da influência de determinados parâmetros no transporte sedimentar a barlamar de um esporão, considerando a evolução da linha de costa obtida através do modelo numérico LTC (*Long Term Configuration*).

A análise de sensibilidades realizada avaliou a influência da largura do perfil ativo a sotamar, o ângulo de atrito dos sedimentos, a batimetria inicial e os valores do coeficiente de transporte sedimentar. O efeito da variação de cada um dos parâmetros referidos foi analisado em termos do consequente impacto na posição da linha de costa.

2. MODELO NUMÉRICO LTC

O LTC (Coelho *et al.*, 2004, Coelho, 2005, Coelho *et al.*, 2007, 2009 e 2013) é um exemplo de um modelo numérico, desenvolvido para prever o comportamento da configuração da linha de costa e da morfologia da zona costeira ao longo do tempo. O LTC está preparado para análise de praias arenosas (sedimentos não coesivos), assumindo que o transporte sedimentar longitudinal é controlado pelas ondas, correntes, ventos, níveis de água, natureza dos sedimentos, juntamente com as condições fronteira (extremos da grelha modelada). No modelo LTC procede-se à variação uniforme das cotas dos pontos situados no perfil ativo, realizando-se um ajuste deste perfil com as zonas adjacentes, pelo que, a variação da posição da linha de costa, além de depender da variação vertical da cota dos pontos do perfil ativo (Δz), depende também da batimetria e topografia associada a cada perfil transversal (Coelho, 2005).

Ao contrário de outros modelos de uma linha, como o GENESIS (Hanson e Kraus, 1989, 1991, 2004 e 2011), o LTC elimina o pressuposto de que o perfil transversal se mantém invariável no tempo, permitindo a evolução do perfil em situação de acumulação persistente de sedimentos, como acontece a barlamar de um esporão (Silva, 2010). Assim, entre a ação de cada onda é calculada uma nova forma do perfil transversal, com impacto na propagação das ondas subsequentes. Por necessidade de controlo da forma do perfil, são presentemente admitidas restrições que permitem controlar alguns dos parâmetros que influenciam a sua evolução.

Efetuada a análise ao que acontece na modelação do LTC na envolvente próxima de um esporão, pode visualizar-se um comportamento semelhante ao referido pela teoria de Pelnard-Considère (1956). À medida que se verifica o enchimento a barlar do esporão, existe défice sedimentar a sotamar, com o conseqüente recuo da posição da linha de costa. Ao longo do tempo, o avanço da linha de costa a barlar do esporão permite que se verifique passagem de sedimentos para sotamar, reduzindo a taxa de erosão nesta zona e originando uma configuração da linha de costa em equilíbrio.

3. CASO DE ESTUDO

O cenário modelado neste trabalho consiste num troço de praia que engloba uma estrutura transversal, similar ao trabalho de Silva (2010). A estrutura transversal, um esporão, possui 145m de comprimento e uma cota de coroamento de 10m acima do nível médio da água. As condições de agitação marítima média caracterizam-se por uma altura de onda significativa entre 1m e 2m, um período de pico entre 8s e 12s, e uma direção de incidência da onda ao largo de cerca de 10°. O nível médio da água do mar é de +2m (ZH). Nos casos modelados optou-se por utilizar uma agitação regular para um altura de onda de 2m e um período de 12s, com uma direção de incidência de 10°, junto a base da praia.

O diâmetro mediano (d_{50}) das areias do trecho em análise foi caracterizado através de campanhas quadrimestrais realizadas durante 5 anos (Silva, 2010), definindo um valor de 0.5mm. Foi assumido que o perfil transversal da praia apresenta um declive regular na parte emersa de 0.05. A zona submersa do perfil foi caracterizada pela expressão de Dean (Expressão 1), para um valor do parâmetro A de 0.153 e de m de 2/3. Ambos os valores foram determinados pelas formulações definidas por Dean (1977).

$$z = A y^m \quad (1)$$

Em que, z - coordenada vertical para um determinado valor de y
 A - parâmetro de escala de sedimentos (0.153)
 y - coordenada horizontal perpendicular à linha de costa
 m - parâmetro caracterizador da refletividade da praia (2/3)

A profundidade de fecho do perfil transversal foi determinada com base na expressão de Hallermeier (1978) para as condições de agitação definidas anteriormente (Expressão 2)

$$h_c = 2.28H_s - 68.5 \left(\frac{H_s^2}{gT^2} \right) \quad (2)$$

Em que, h_c - profundidade de fecho (resulta igual a 4.37m)
 H_s - altura de onda significativa (2m)
 T - período da onda (9.34s)
 g - aceleração gravítica (9.81m/s²)

Considera-se a formulação de CERC (1984) para a determinação do causal sólido longitudinal (Expressão 3). Como tal, para definir o coeficiente de transporte (k) foi utilizada a Expressão 4 definida por Valle *et al.* (1993), obtendo-se um valor de 0.401.

$$Q_l = k \left(\frac{\rho \sqrt{g}}{16k_b^2 (\rho_s - \rho) (1-n)} \right)^{\frac{5}{2}} H_b^2 \sin(2\alpha_b) \quad (3)$$

Em que, k - coeficiente de transporte sedimentar (0.401)
 ρ - massa volúmica da água (1027 kg/m³)
 ρ_s - massa volúmica dos sedimentos (2650 kg/m³)
 k_b - coeficiente de rebentação (0.78)
 n - porosidade dos sedimentos (0.4)
 H_b - altura da onda na rebentação (2.76m)
 α_b - orientação da agitação na rebentação (2.65°)

$$k = 1.4e^{-2.5d_{50}} \quad (4)$$

A área modelada corresponde a 5000m na direção transversal à linha de costa e 20000m na direção da linha de costa com pontos da grelha espaçados 12.5x25m², respetivamente, localizando-se o esporão a meio do desenvolvimento da linha de costa. Nas fronteiras admitiu-se que os volumes de sedimentos em transporte eram iguais aos da vizinhança.

4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADES

Como referido, foi feita uma análise da sensibilidade do LTC a vários parâmetros, nomeadamente à largura do perfil ativo a sotamar, aos ângulos de atrito dos sedimentos, à batimetria inicial e aos valores do coeficiente de transporte sedimentar.

Nos cenários avaliados foi considerado um tempo de cálculo de 1.5 anos. Este valor foi selecionado com base no tempo de enchimento do esporão (Expressão 5) definido por Pelnard-Considère (1956), para um valor de k de 0.401. Apenas na avaliação da influência do coeficiente de transporte sedimentar foram considerados diferentes tempos de cálculo, encontrando-se estas considerações discriminadas na secção respetiva.

$$t_f = \frac{Y^2 \pi}{4 \varepsilon \tan^2(\alpha_b)} \quad (5)$$

Em que, t_f - tempo de enchimento do esporão
 Y - comprimento do esporão (145m)
 ε - parâmetro de calibração (expressão 6)

$$\varepsilon = \frac{k H_b^2 C_{gb}}{8} \left(\frac{\rho}{\rho_s - \rho} \right) \left(\frac{1}{1 - n} \right) \left(\frac{1}{B + h_c} \right) \quad (6)$$

Em que, C_{bg} - celeridade da onda na rebentação (5.01 m/s)

B - altura da berma na zona emersa (5.8 m)

4.1 LARGURA DO PERFIL ATIVO A SOTAMAR

A escolha de uma maior largura do perfil ativo a sotamar do esporão, por parte do utilizador, permite atenuar o efeito erosivo na zona a sotamar, distribuindo o défice sedimentar por uma maior largura de perfil transversal. Esta opção ajusta o limite submerso do perfil a sotamar da estrutura em função do limite do perfil a barlar, que se situa à mesma distância do esporão. Na sua utilização define-se, apenas, a extensão longitudinal a sotamar onde se pretende considerar essa largura ativa. Foram definidos 4 cenários de estudo, apresentados na Tabela 1, para os valores de 0, 5, 10 e 50 vezes o comprimento do esporão.

Tabela 1. Cenários de análise para a influência da largura do perfil ativo a sotamar do esporão

Cenários	Extensão da influência da largura ativa (m)
A.1 (0 vezes)	0
A.2 (5 vezes)	725
A.3 (10 vezes)	1450
A.4 (50 vezes)	7250

As diferenças mais significativas, na configuração final da linha de costa, foram registadas entre os cenários A.1 e A.2 (Figura 1), sendo que as configurações finais dos restantes cenários se sobrepõem à do cenário A.2. Comparando os cenários A.1 e A.2 (Figura 2), obtém-se uma diferença média da posição da linha de costa de 1.3m (0.9% do comprimento do esporão), com um valor máximo de 12.5m (8.6% do comprimento do esporão) registada a 600m do esporão, existindo algumas zonas, junto ao limite a barlar do modelo, onde a posição da linha de costa é coincidente. Olhando às diferenças entre os cenários A.2 e A.3, e A.3 e A.4, registam-se diferenças médias inferiores a 0.5mm, bem como, diferenças máximas e mínimas na ordem de grandeza de 1mm. Comparadas com a dimensão do esporão, estas diferenças podem ser consideradas desprezáveis. Assim, conclui-se que, caso exista interesse em se considerar uma maior largura do perfil ativo a sotamar do esporão, não é necessário considerar, para a extensão longitudinal, um valor superior a 725m (5 vezes o comprimento do esporão). Regista-se também que a presença de uma maior largura do perfil ativo a sotamar da estrutura transversal origina uma menor largura de praia a barlar. Apesar de não ser alvo de análise neste trabalho, o impacto deste parâmetro reflete-se de forma mais significativa na posição da linha de costa a sotamar do esporão.

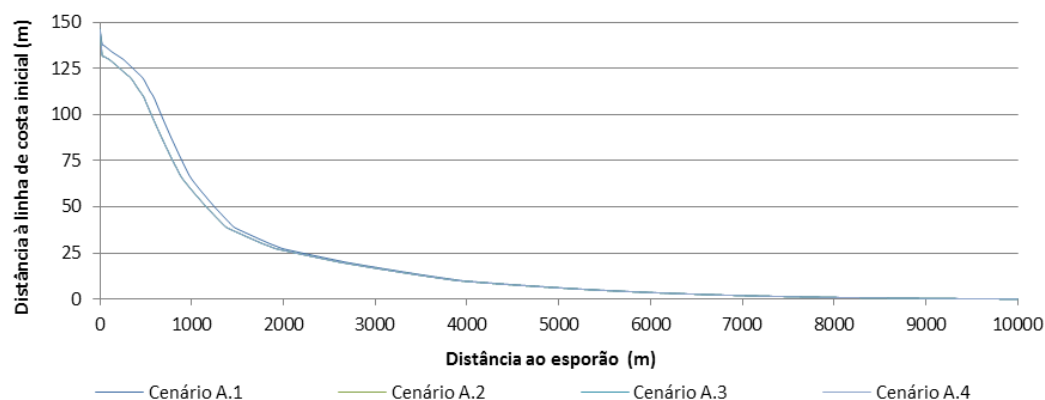


Figura 1. Posição da linha de costa para os cenários de variação da largura ativa a sotamar.

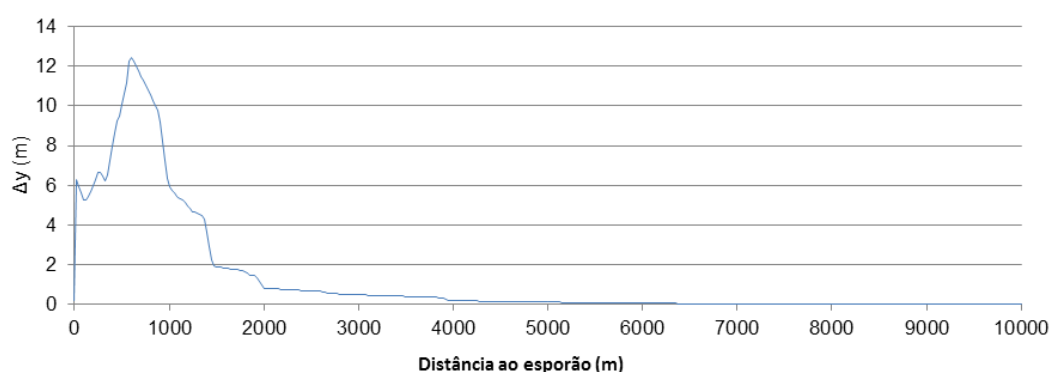


Figura 2. Diferenças na posição da linha de costa ao longo da praia entre os cenários A.1 e A.2.

4.2 ÂNGULOS DE ATRITO DOS SEDIMENTOS

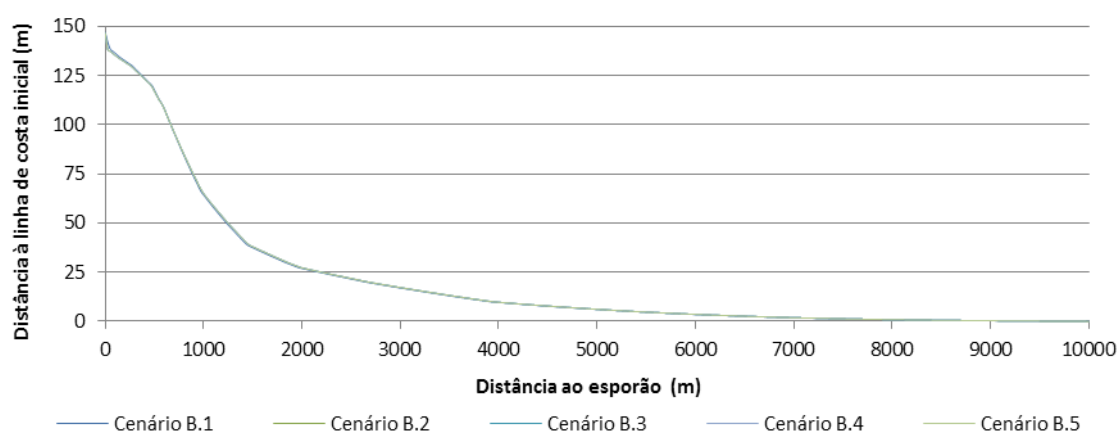
O ângulo de atrito dos sedimentos influencia a configuração dos perfis transversais, através do deslizamento de sedimentos, pois quanto maior for o ângulo, maior será o declive máximo possível do perfil transversal, o que, indiretamente, influencia a posição da linha de costa final. O ângulo de atrito (na direção longitudinal) pode tomar um valor diferente e tem como função controlar variações bruscas de cotas na direção longitudinal, funcionando como um filtro. Desta forma, este ângulo não deve ser nem demasiado pequeno, para não condicionar o resultado do balanço sedimentar por efeito do transporte sólido, nem muito grande para não se tornar insensível às variações longitudinais de cotas.

Para a análise da influência do ângulo de atrito nas direções transversal e longitudinal, foram definidos 6 casos de estudo, representados na Tabela 2.

Resumidamente, ao fim do tempo de simulação, os cenários B.1 e B.2 possuem a mesma configuração da linha de costa, que difere ligeiramente da posição obtida nos cenários B.3, B.4, B.5 e B.6, que também são iguais entre si (Figura 3). Apenas a alteração do ângulo de atrito longitudinal de 5° para 10° originou diferenças com significado na posição de linha de costa.

Tabela 2. Cenários de análise para a influência da definição dos ângulos de atrito dos sedimentos.

Cenários	\varnothing ($^{\circ}$)	$\varnothing_{\text{longitudinal}}$ ($^{\circ}$)
B.1	15	5
B.2	20	5
B.3	20	10
B.4	25	10
B.5	25	15
B.6	30	15

**Figura 3.** Posição da linha de costa para os cenários de variação dos ângulos de atrito.

Entre os cenários B.1/B.2 e B.3/B.6 observou-se uma diferença média absoluta de 0.1m na posição da linha de costa. A maior diferença absoluta registada é de 3.7m (2.6% do comprimento do esporão) no perfil mais próximo do esporão ($x=25m$). No entanto, a diferença da largura de praia no perfil adjacente ($x=50m$) é de 1.2m ocorrendo uma redução de cerca de 67.6% relativamente à diferença máxima. Este valor máximo registado nas proximidades do esporão é devido a fatores relacionados com a definição e discretização da grelha numérica do LTC, bem como, com o facto da linha de costa estar condicionada a passar na cabeça do esporão, independentemente do tempo de cálculo. Desprezando este valor da posição da linha de costa para $x=25m$ obtém-se uma diferença média absoluta de 0.1m. Na realidade o cenário B.3 possui um maior avanço da posição da linha de costa do que o cenário B.2, mas o cenário B.2 possui um maior avanço até uma extensão de 650m a barlar do esporão.

Apesar de ligeiras (inferiores a 1m), as diferenças mais significativas entre os cenários B.1/B.2 e B.3/B.6 ocorrem numa extensão de cerca de 1975m a barlar do esporão, aproximadamente 13.62 vezes o comprimento do esporão (Figura 4). Conclui-se que o

aumento dos ângulos de atrito dos sedimentos poderá levar a um ligeiro avanço na posição da linha de costa.

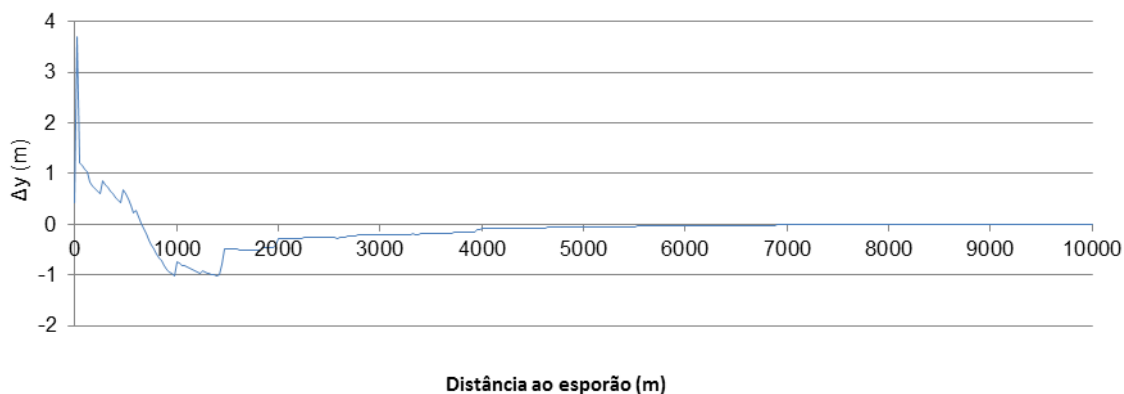


Figura 4. Diferenças na posição da linha de costa ao longo da praia entre os cenários B.2 e B.3.

4.3 BATIMETRIA INICIAL

Foram analisadas 3 configurações iniciais da zona submersa dos perfis. Os 3 perfis iniciais foram definidos com base no perfil de Dean (1977) sendo o parâmetro m comum aos três, com um valor de $2/3$. Fez-se variar o parâmetro A como se encontra indicado no Tabela 3.

Tabela 3. Cenários de análise para a influência da definição da batimetria inicial.

Cenários	A
C.1	0.153
C.2	0.170
C.3	0.184

O valor de A para o cenário C.1 foi obtido pela Expressão 5 (Dean, 1997), para o cenário C.2 utilizou-se a Expressão 6 (Hanson e Kraus, 1989) e para o cenário C.3 utilizou-se a Expressão 7 (Kriebel *et al.*, 1991), representadas abaixo.

$$A=0.067\omega_s^{0.44} \quad (7)$$

$$A=0.23d_{50}^{0.32} \quad (8)$$

$$A=2.25\left(\frac{\omega_s^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

Em que, ω_s - velocidade de queda dos sedimentos (0.062 m/s)

Observa-se na Figura 5 que quanto maior for o valor de A, menor será o avanço da posição da linha de costa nas proximidades do esporão, pois quanto maior for o parâmetro A maior será a profundidade dos pontos constituintes dos perfis transversais.

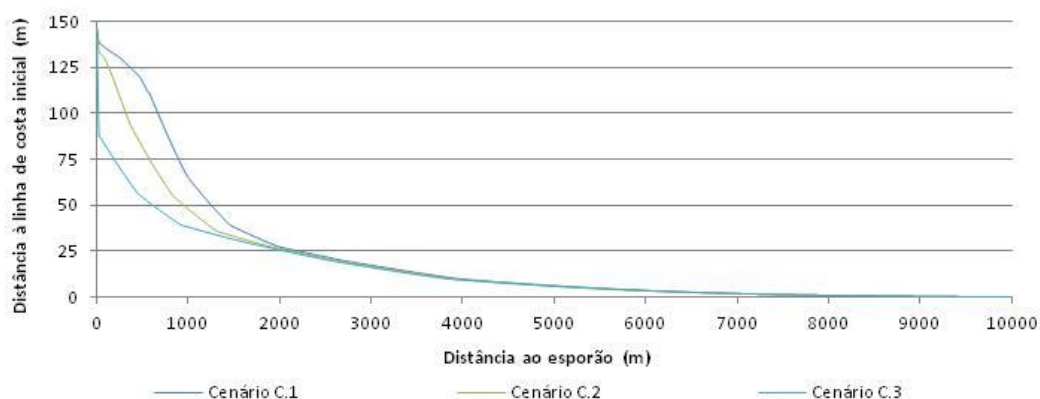


Figura 5. Posição da linha de costa para os cenários de variação da batimetria inicial.

Comparando os cenários C.1 e C.2 com o cenário C.3, identifica-se que as diferenças máximas se registam nos 500m de praia a barlamar do esporão. Entre os cenários C.1 e C.3 a diferença máxima registada foi de 64.5m (44.1% do comprimento do esporão) a 450m a barlamar do esporão e uma diferença média de 6.4m (Figura 6). Entre os cenários C.2 e C.3 registou-se uma diferença máxima de 46.5m (32.1% do comprimento do esporão, 72.1% do valor da diferença máxima registada entre os cenários C.1 e C.3) localizada a 75m do esporão e uma diferença média de 3.1m (Figura 6).

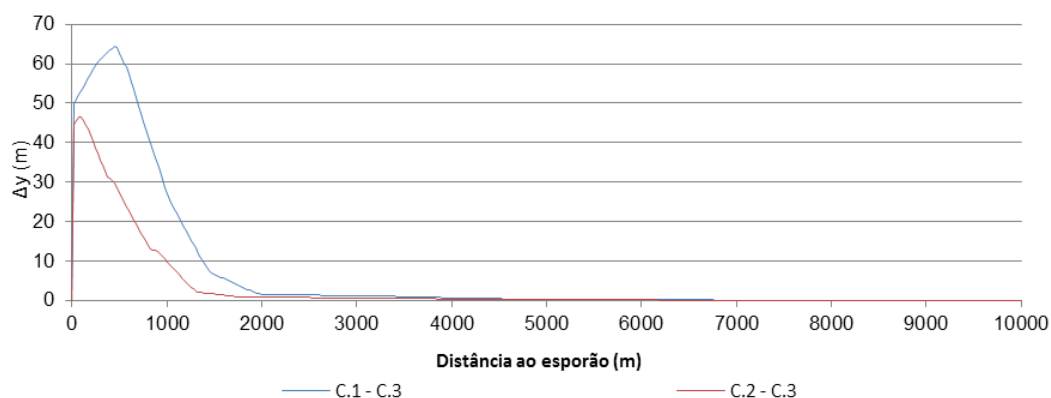


Figura 6. Diferenças na posição da linha de costa ao longo da praia, nos cenários C.

Diferenças significativas entre os cenários C.1 e C.3 registam-se numa extensão de 1150m a barlamar do esporão. Entre os cenários C.2 e C.3 estas diferenças registam-se numa extensão de 800m a barlamar do esporão, correspondendo a um valor de 7.9 e 5.5 vezes o comprimento do esporão, respetivamente.

Observa-se que com o aumento do valor de A existe um aprofundamento das cotas dos perfis o que origina um menor avanço na posição da linha de costa. Isto poderá também ser influenciado pelo facto de a alteração da geometria inicial dos perfis influenciar a propagação da agitação.

4.4 COEFICIENTE DE TRANSPORTE

Foi realizada uma análise para dois valores do coeficiente de transporte (k) e uma combinação dos respetivos tempos de enchimento associados a cada valor. O tempo de enchimento correspondente a $k=0.401$ é 1.5 anos e o tempo de enchimento correspondente a $k=0.183$ é 3.28 anos. Os cenários definidos encontram-se apresentados na Tabela 4.

Os valores dos coeficientes de transporte sedimentar foram definidos com base nas formulações de Valle *et al.* (1993) e Bailard (1981), representadas nas Expressões 10 e 11, respetivamente. O tempo de enchimento associado foi determinado com base na Expressão 5, correspondente à formulação de Pelnard-Considère (1956).

$$k = 1.4e^{-2.5d_{50}} \quad (10)$$

$$k = 0.05 + 2.6\sin^2(2\alpha_b) + 0.007 \frac{u_{mb}}{\omega_s} \quad (11)$$

Em que, u_{mb} - velocidade orbital da agitação

$$u_{mb} = \frac{k_{kv}}{2} \sqrt{g d_b} \quad (12)$$

Em que, k_{kv} - constante de von Kármán (0.41)

d_b - profundidade de rebentação

Tabela 4. Cenários de análise para a influência do coeficiente de transporte sedimentar.

Cenários	k	Tempo de cálculo (anos)
D.1	0.401	1.50
D.2	0.401	3.28
D.3	0.183	1.50
D.4	0.183	3.28

De acordo com a Figura 7, observa-se que independentemente do valor de k , a posição da linha de costa, para o instante de enchimento é aproximadamente igual. Isto leva a concluir que o coeficiente de transporte não tem impacto sobre a configuração geométrica da posição da linha de costa, e apenas influencia a rapidez com que se dá o avanço da posição. Quanto maior for o valor de k , mais rapidamente a linha de costa tende para uma nova posição.

Existe, quase, uma sobreposição entre os cenários D.1 e D.4, onde o cenário D.1 possui maior acreção, tendo-se registado uma diferença média na posição da linha de costa de cerca de 0.3m (0.2% do comprimento do esporão). A maior diferença registada foi de 1.3m (0.9% do comprimento do esporão), a uma distância de 925m da estrutura transversal.

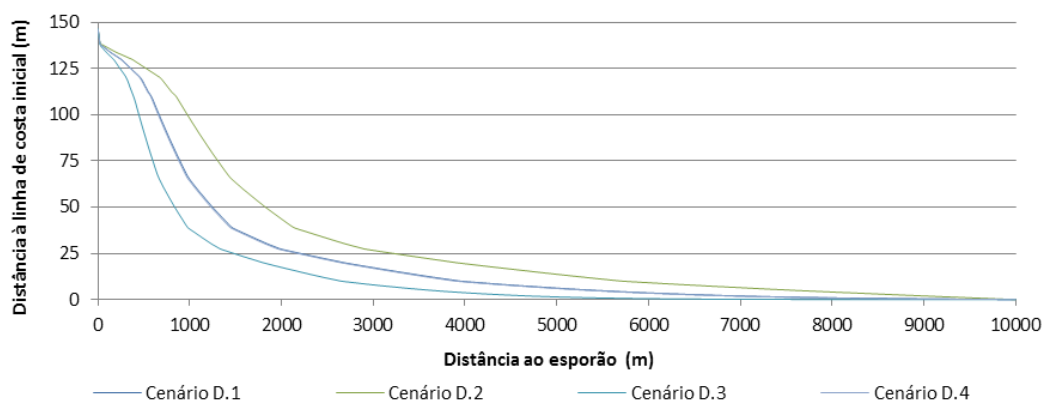


Figura 7. Posição da linha de costa para os cenários das combinações dos coeficientes de transporte e os tempos de enchimento.

Como se observa na Figura 8, para o mesmo valor de k (0.401) entre os dois tempos de enchimento (comparação dos cenários D.1 e D.2) registou-se uma diferença média absoluta de 8.6m (6% do comprimento do esporão) e um valor máximo absoluto de 33.1m (22.8% do comprimento do esporão) a 975m do esporão, sendo a acumulação de sedimentos superior para o cenário calculado para o maior intervalo de tempo (cenário D.2). Diferenças significativas são observadas até a uma distância de cerca de 2775m a barlamar do esporão, correspondendo a uma distância de 19.1 vezes o comprimento do esporão.

Comparando os cenários D.3 e D.4, registou-se uma diferença média absoluta na posição da linha de costa de 6.4m (4.4% do comprimento do esporão) e um valor máximo absoluto de 33.6m (23.2% do comprimento do esporão) a 650m a barlamar do esporão. A maior diferença registada para $k=0.183$ é próxima da registada para $k=0.401$. Novamente, quanto maior o tempo de enchimento maior será a acumulação de sedimentos (cenário D.4). Numa extensão de 1875m a barlamar do esporão, cerca de 12.9 vezes o seu comprimento, registam-se diferenças iguais ou superiores a 30% da diferença máxima.

Na Figura 8, observa-se um comportamento semelhante na variação das diferenças da posição da linha de costa. As maiores diferenças médias registam-se para o maior valor de k , enquanto que a maior diferença máxima registada se observa para o menor valor de k . A diferença máxima regista-se mais próxima do esporão para o menor valor de k . No entanto, para o maior valor de k a extensão onde se observam as diferenças mais significativas é bastante superior.

Para o mesmo tempo de cálculo de 1.50 e 3.28 anos, entre ambos os valores de k adotados, obteve-se um maior avanço da linha de costa para $k=0.401$. Entre os cenários D.1 e D.3 registou-se uma diferença média de 6.7m (4.6% do comprimento do esporão) e um valor máximo de 34.6m (23.9% do comprimento do esporão) a 650m a barlamar do esporão (Figura 9). As diferenças mais significativas foram registadas numa extensão de 1900m a barlamar do esporão, ou seja, numa extensão equivalente a 13.1 vezes o comprimento do esporão. Na comparação dos cenários D.2 e D.4 registou-se uma diferença média de 8.9m (6.1% do comprimento do esporão) sendo o maior avanço para $k=0.401$, com um valor de diferença máxima de 34.2m (23.6% do comprimento do esporão) a cerca de 975m a barlamar do esporão. Para o maior tempo de cálculo ($t=3.28$ anos) registaram-se diferenças

significativas numa maior extensão de praia, cerca de 2750m, 19 vezes o comprimento do esporão.

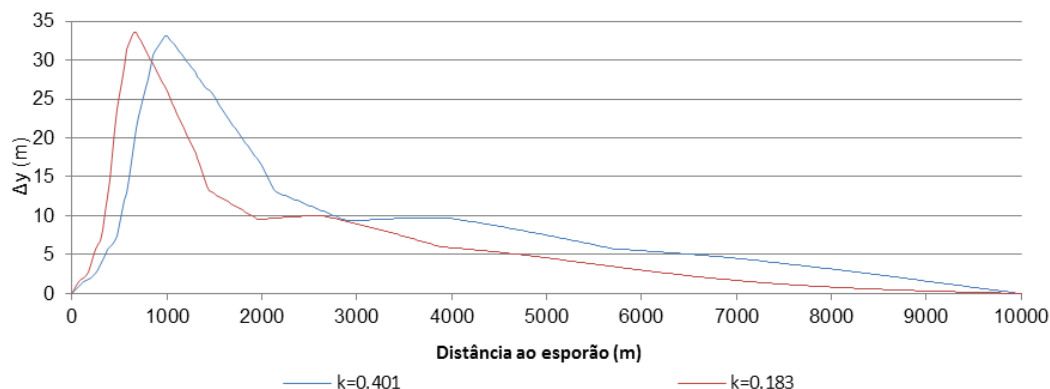


Figura 8. Diferenças na posição da linha de costa registadas entre dois instantes de cálculo diferentes ($t_1=1.50$ e $t_2=3.28$).

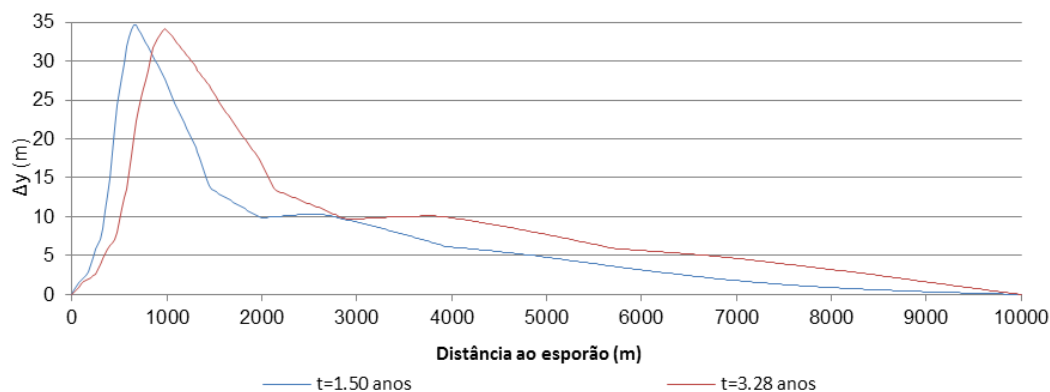


Figura 9. Diferenças na posição da linha de costa entre dois valores de k ($k=0.401$ e $k=0.183$).

Aumentando o tempo de cálculo, observa-se que menor será o valor da diferença máxima registada, mas o valor médio da diferença entre as posições da linha de costa aumenta.

Na tentativa de alcançar uma configuração de equilíbrio da linha de costa para as condições definidas, aumentou-se o tempo de cálculo para dois cenários com os valores do coeficiente de transporte anteriormente estimados. Obteve-se um tempo de cálculo necessário para alcançar o equilíbrio, para ambos os valores do coeficiente de transporte, de 350000 horas, a que corresponde um valor de cerca de 40 anos (Figura 10). No equilíbrio considerou-se que a diferença média entre posições finais da linha de costa, entre cenários e entre tempos de cálculo consecutivos, fosse inferior a 0.1% do comprimento do esporão. A diferença máxima entre linhas foi de cerca de 0.5m a 2200m do esporão. Conclui-se que o valor do coeficiente de transporte sedimentar não afeta a configuração da posição da linha de costa no equilíbrio segundo o modelo numérico LTC, influenciando a rapidez com que a linha de costa atinge a configuração de equilíbrio.

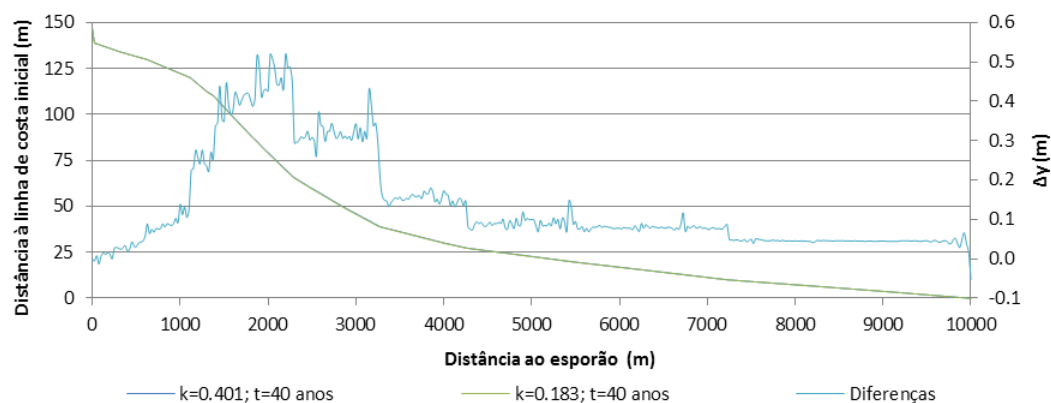


Figura 10. Posições da linha de costa em equilíbrio e respetivas diferenças, para dois valores de k .

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

De uma forma geral, os parâmetros com maior impacto nos resultados são a batimetria do perfil e o coeficiente de transporte (se a análise for desenvolvida para uma situação anterior ao equilíbrio). Os fatores com menor impacto na posição da linha de costa são o ângulo de atrito e o coeficiente de transporte sedimentar (se a análise for desenvolvida para a posição de equilíbrio). Entre todos os parâmetros avaliados, registam-se diferenças máximas até 44.1% do comprimento do esporão, com a presença das diferenças mais significativas até a uma extensão de praia de 13.6 vezes o comprimento do esporão.

Para os cenários A, onde se fez variar a largura ativa a sotamar entre 0 a 50 vezes o comprimento do esporão, registou-se uma diferença máxima entre todos os cenários de 12.5m (8.6% do comprimento do esporão), uma diferença média de 1.3m e uma extensão de 1400m (9.7 vezes o comprimento do esporão) onde se registam as diferenças mais significativas. Observa-se, também, que ao definir um valor da extensão longitudinal, onde se pretende alterar o valor da largura ativa do perfil a sotamar, superior a 725m, ou seja, 5 vezes o comprimento do esporão, não se observa um impacto significativo. A utilização deste parâmetro no cálculo numérico traduz-se numa diminuição da largura de praia a barlar do esporão.

Nos cenários de alteração do ângulo de atrito, observa-se que nem sempre um aumento do valor dos ângulos de atrito dos sedimentos se traduz num avanço da posição da linha de costa. As únicas diferenças registaram-se entre os cenários B.1/B.2 e os cenários B.3 a B.6, onde se aumentou o ângulo de atrito segundo a direção longitudinal em 5°. A maior diferença absoluta registada foi de 3.7m, para um valor de diferença média de 0.1m, onde o cenário B.3 (maior ângulo de atrito) possui um maior avanço médio da linha de costa. No entanto, o cenário B.2 possui uma maior acreção numa extensão de 650m a barlar do esporão. As diferenças mais significativas ocorreram até a uma extensão de 1975m a barlar do esporão (13.6 vezes o comprimento do esporão).

Procedeu-se também à análise impacto inicial da geometria da zona submersa dos perfis transversais (cenários C), com base na alteração do parâmetro A. Observa-se que quanto maior o valor de A, menor será o avanço da linha de costa na proximidade do esporão (a barlar), pois com o aumento do valor de A existe um aumento da profundidade dos

pontos constituintes dos perfis transversais, afetando os fenómenos de propagação da onda e aumentando o volume de sedimentos necessário para que os pontos alcancem uma determinada cota. Este facto foi também verificado por Coelho (2005) numa fase inicial das análises de sensibilidade do modelo à batimetria inicial. Das três expressões utilizadas no cálculo do parâmetro A , a de Kriebel *et al.* (1991) é a que apresenta um maior valor, tendo em conta o diâmetro mediano dos sedimentos adotado, como tal, o cenário C3 é o que apresenta maiores profundidades iniciais e conseqüentemente um menor avanço da linha de costa. As maiores diferenças (médias e máximas) registaram-se entre os cenários C.1 e C.3, onde as diferenças médias assumem um valor de 6.4m e a diferença máxima registada 64.5m (44.1% do comprimento do esporão) a 500m a barlamar do esporão. As diferenças mais significativas registaram-se numa extensão até 1150m (7.9 vezes o comprimento do esporão) a barlamar do esporão.

Observa-se que a configuração geométrica da linha de costa é indiferente às variações do coeficiente de transporte. O valor de k apenas afeta a rapidez com que a linha de costa alcança determinada posição. Para os cenários estudados, observou-se que as diferenças médias, entre linhas de costa, para os dois tempos de cálculo definidos, aumentam com o aumento do valor de k , enquanto as diferenças máximas diminuem ligeiramente, pelo menos para tempos de cálculo iguais ou inferiores a 3.28 anos. O aumento das diferenças médias deixa de ser observado à medida que a linha de costa se aproxima da configuração de equilíbrio.

Para um determinado instante de tempo e diferentes valores de k , quanto maior for o tempo de cálculo, maiores serão as diferenças médias e ligeiramente mais pequenas serão as diferenças máximas, novamente, pelo menos para tempos de cálculo iguais ou inferiores a 3.28 anos, visto que, à medida que a praia se aproxima de uma situação de equilíbrio, as diferenças médias e máximas tendem a diminuir.

O trabalho desenvolvido evidencia a importância da calibração de diversos parâmetros utilizados na modelação numérica. São diversos os fatores que são utilizados para reproduzir os fenómenos que ocorrem durante o processo de enchimento de um esporão, e diferentes considerações sobre os parâmetros resultam em diferenças de resultados, apesar do comportamento geral ser mantido. Por este motivo, num processo inicial de modelação o teste de sensibilidades é importante e deve ser ponderada a obtenção de uma gama de resultados em função das diferentes considerações adotadas.

AGRADECIMENTOS

André Guimarães e Márcia Lima são financiados pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (bolsas: SFRH/BD/103694/2014 e SFRH/BD/79868/2011, respetivamente).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bailard, J.A. (1981). "An energetics total load sediment transport model for a plane sloping beach"; *Journal of Geophysical Research*, Vol. 86 No. CII., pp. 10938–10954 (citado em Coelho, 2005 e Silva, 2010).

CERC (1984). "Shore Protection Manual"; Washington DC: U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering and Research center, U.S. Government Printing office.

- Coelho, C. Taveira-Pinto, F., Veloso-Gomes, F. (2004).** "Coastal evolution and coastal works in the southern part of Aveiro lagoon inlet, Portugal"; Proceedings of the 29th International Conference on Coastal Engineering, Lisboa, Portugal, pp. 3914-3926.
- Coelho, C. (2005).** "Riscos de Exposição de Frentes urbanas para diferentes Intervenções de Defesa costeira"; Tese de Doutoramento. Universidade de Aveiro, Portugal, 405p.
- Coelho, C., Veloso Gomes, F., Silva, R. (2007).** "Shoreline Coastal Evolution Model: Two Portuguese Case Studies"; Proceedings of the 30th International Conference, 4, San Diego, California, USA, pp. 3430-3441
- Coelho, C., Silva, R., Veloso-Gomes, F., Taveira-Pinto, F. (2009).** "Potential impacts of climate change on NW Portuguese coastal zones"; ICES Journal of Marine Science, Vol. 66, 1497–1507.
- Coelho, C., Lima, M., Veloso-Gomes, F. (2013).** "Relationship between cross-shore active profile and one-line shoreline evolution models performance"; Journal of Coastal Research, Special Issue No. 65, pp. 2107-2112.
- Dean, R. G. (1977).** "Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts"; Department of Civil Engineering, Ocean Engineering Report No. 12, University of Delaware, Newark, Delaware, 45. p.
- Dias, J. M. A. (1997).** "Gestão costeira e conhecimento científico - Uma perspetiva integrada"; Colectânea de ideias sobre a zona costeira de Portugal, Associação Eurocoast-Portugal, Instituto de água, pp. 231-232.
- Hallermeier, R. J. (1978).** "Uses for a Calculated Limit Depth to Beach Erosion"; Proceedings of 16th Coastal Engineering Conference, ASCE, Germany, pp. 1493-1512.
- Hanson, H., Kraus, N. C. (1989).** "GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change"; Report 1, Technical Reference, U.S. Army Corps of Engineers, 247 p.
- Hanson, H., Kraus, N. C. (1991).** "GENESIS - generalized model for simulating shoreline change"; Reference Manual and Users Guide, vol. 2, US Army Corps of Engineers, 431 pp.
- Hanson, H., Kraus, C. (2004).** "Advancements in One-Line Modeling of T-Head Groins: (Genesis-T)"; Journal of Coastal Research, Special Issue No. 33, pp. 315-323.
- Hanson, H., Kraus, N. C. (2011).** "Long-Term Evolution of a Long-Term Evolution model"; Journal of Coastal Research, Special Issue No. 59, pp 118-129.
- Kriebel, D. L., Kraus, N. C., Larson, M. (1991).** "Engineering Methods for Predicting Beach Profile Response"; Proceedings of Conference on Coastal Sediments '91, ASCE, pp. 557-571.
- Pelnard-Considére, R. (1956).** "Essai de Theorie de l'Evolution des Forms de Rivages en Plage de Sable et de Galets"; Fourth Journees de l'Hydraulique, les Energies de la Mer, Question III, Rapport n. 1, pp. 289-298.
- Silva, R. (2010).** "Avaliação Experimental e Numérica de Parâmetros Associados a Modelos de Evolução da Linha de Costa"; Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 397 p.
- Valle, R.; Medina, R., Losada, M. A. (1993).** "Dependence of the coefficient K on the grain size"; Technical Note N. 3062, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 119, No. 5, pp. 568–574 (citado em Coelho, 2005).