

O efeito do coeficiente de transmissão na modelação a longo-termo da evolução da linha de costa

Canelas, S. T. (1); Sancho, F. (2); Pinheiro, L. (2); Trigo-Teixeira, A. (1)

- (1) CERIS, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001 LISBOA, Portugal.
soraia.teixeira@tecnico.ulisboa.pt
- (2) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil 101, 1700-066 LISBOA, Portugal.

Resumo: Os quebra-mares destacados submersos (QMS) são utilizados para induzir a rebentação das ondas, reduzindo a energia que chega à costa. Para compreender a influência de um QMS na Vagueira na evolução da linha de costa (LC) afetada pela estrutura, foi utilizado modelo de evolução da LC Litmod utilizando um coeficiente de transmissão (k_t) constante. Os valores de k_t foram calculados através de fórmulas empíricas e com base em resultados do modelo numérico de propagação de ondas DREAMS. LC obtidos para algumas geometrias de QMS possíveis (com diferente distância à costa e comprimento), sugerem que a formulação de k_t mais adequada às características oceanográficas da Vagueira é a de Seabrook e Hall (1998). A evolução da LC para cada geometria de QMS depende fortemente do valor de k_t . Para menores k_t desenvolvem-se maiores salientes, com aumento da erosão a sul. Os vários métodos de obtenção de k_t resultam em variações da LC, em certos casos, maiores do que as alterações ao design do QMS.

Palavras-chave: coeficiente de transmissão, modelação da evolução da linha de costa, quebra-mar submerso, praia da Vagueira.

1. INTRODUÇÃO

Os quebra-mares destacados submersos (QMS) são estruturas que têm sido estudadas nos últimos anos para defesa costeira contra erosão e galgamentos na costa portuguesa. Os QMS induzem a rebentação das ondas, que por sua vez reduz a energia que chega à costa. A presença de um QMS altera também o transporte sedimentar, reduzindo-o na zona de sombra do quebra-mar, contribuindo assim para a acumulação de sedimentos.

O grau de influência a longo prazo de um QMS na linha de costa (LC) pode ser simulado por modelos de evolução da LC de complexidade reduzida como são os modelos de uma-linha. Estes modelos, como por exemplo o Litmod (Vicente, 1991) têm duas hipóteses principais: 1) o perfil de praia mantém a sua geometria, sendo que o movimento da LC se traduz através da deslocação do perfil; 2) a deriva litoral deve ser a ação dominante que modela a costa em estudo. Para a simulação da evolução da LC na presença de um QMS o Litmod inclui um módulo de propagação da agitação marítima que usa a lei de Snell, admitindo uma batimetria paralela à costa. Nos trechos onde existe um QMS a agitação é influenciada por um coeficiente de difração (k_d), determinado intrinsecamente, e um de transmissão (k_t), dado pelo utilizador. Ambos os coeficientes dependem das condições de agitação marítima (altura, período e rumo da onda incidente) e das características do QMS (largura e comprimento da crista, declive do talude, cota de coroamento, entre outros parâmetros).

Apesar dos modelos de uma linha já terem sido amplamente utilizados para simulação a longo prazo

de evolução da linha de costa na presença de QMS (e.g., Fernandes, 2017), há oportunidade para melhorar o modelo, de forma a que os resultados sejam mais próximos da realidade. Uma das melhorias que podem ser procuradas em modelos de uma linha é o cálculo do coeficiente de transmissão k_t .

Existem várias fórmulas empíricas para cálculo do k_t , bem como modelos numéricos.

Neste artigo analisam-se três fórmulas empíricas para o cálculo do k_t , nomeadamente, as de Seabrook e Hall (1998), D' Angremond *et al.* (1996) e Van der Meer *et al.* (2004), e comparam-se os resultados das simulações da evolução da LC com os resultados obtidos com o k_t calculado através do modelo de refração-difração DREAMS (Fortes, 1993), que tem em consideração o efeito da geometria tri-dimensional do QMS nas ondas difratadas e transmitidas sobre a estrutura.

2. DADOS E MÉTODOS

2.1. Praia da Vagueira

A Praia da Vagueira situa-se no centro-norte da costa oeste portuguesa pertencendo ao concelho de Vagos. Esta praia tem problemas crónicos de erosão devidos ao défice sedimentar motivado pela redução de caudal das fontes sedimentares e da dificuldade de transposição da embocadura da Ria de Aveiro. Associado ao problema erosivo, a amplitude de marés-vivas (com cerca de três metros) e fundo arenoso tornam esta praia complexa do ponto de vista de gestão e mitigação da erosão costeira. A Vagueira conta algumas intervenções para a sua proteção, incluindo a construção de estruturas (uma de defesa

aderente e um esporão) e algumas alimentações artificiais (Sancho *et al.*, 2019). Devido aos graves problemas erosivos e de galgamento, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA) contratou um estudo ao Consórcio LNEC, UAVEIRO e IST para o estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira com três principais objetivos: 1) diminuição do risco de galgamentos, 2) promoção do acréscimo do areal para diminuição da erosão e inundação costeira, aumentando também o seu potencial balnear 3) melhoramento das condições para a prática de surf. (Sancho *et al.*, 2019). Este trabalho baseia-se numa abordagem a longo prazo (20 anos) focando essencialmente na mitigação do problema erosivo para um troço de 2 km frente à Vagueira. Numa primeira abordagem, foi fixado o valor do bordo livre do quebra-mar (0.5m na baixa-mar de águas vivas), que equivale a uma cota de coroamento de (+0.34m ZH), a orientação do eixo paralela à defesa frontal existente no local, largura do coroamento de 10m, cota de fundação variável de (-3 a -7m ZH) e inclinação de taludes no extradorso de (1:10) e intradorso de (1:2), forma linear, construído com manto de enrocamento ($D_{50}=1.5m$) (Sancho *et al.*, 2019).

Os parâmetros são a distância da estrutura à costa e o comprimento do QMS (Fig. 1). Foi utilizada uma série de agitação obtida por *hindcast*, horária, propagada até à cota de -12m ZH, compreendida entre o período de 1979 a 2018. As características médias do clima de agitação estão apresentadas na Tabela I.

Tabela I: Características médias no período 1979-2018, adaptado de Sancho *et al.*, (2019).

	Ao largo	-12m ZH
Altura significativa H_s (m)	2	1.9
Direção da onda ($^\circ$)	292	296
Período de pico da onda T_p (s)	10.8	

A LC inicial foi extraída do ortofotomapa disponibilizado na plataforma COSMO (APA, 2019) com data de levantamento de 31/08/2018.

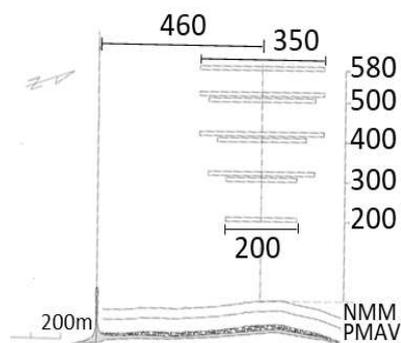


Fig 1. Esquema ilustrativo com várias das localizações e comprimentos de QMS, a testar em modelo matemático (Sancho *et al.*, 2019).

2.2. Modelos Litmod e DREAMS

O modelo Litmod (Vicente, 1991) modela quebra-mares submersos na versão de 2018 (Vicente e Clímaco, 2018). Para simular o comportamento do

quebra-mar submerso, os autores juntaram à ação das ondas difratadas, o fenómeno de transmissão. Foi realizada a simulação do trecho desde a embocadura da Ria de Aveiro (à esquerda do gráfico) até à praia do Areão (à direita do gráfico) tendo sido utilizado como condições de fronteira laterais a posição fixa da linha de costa.

O modelo DREAMS (Fortes, 1993) simula a propagação e deformação de ondas monocromáticas em regiões de profundidades variáveis. Utiliza a equação de declive suave de Berkhoff (1972) na sua versão elíptica, incluindo a ação combinada da refração e difração das ondas sobre fundos pouco profundos e irregulares. Este modelo reproduz o comportamento e as interações lineares das ondas em zonas costeiras e abrigadas. Como input, é necessário a informação batimétrica sobre uma malha de elementos finitos triangulares da zona a simular, bem como a agitação na fronteira de entrada do modelo e as condições de reflexão/absorção nas fronteiras de saída. Os resultados obtidos são: velocidades orbitais e as características das ondas em qualquer ponto do domínio. Embora o modelo não contempla rebentação da onda devido à profundidade, este efeito foi tido em conta no cálculo do k_t utilizando a limitação da altura de onda a 78% da profundidade.

2.3. Coeficiente de transmissão k_t

O coeficiente de transmissão (k_t) de uma estrutura do tipo quebra-mar relaciona a altura da onda incidente na estrutura com a altura da onda no seu intradorso. É importante para compreender como é que o QMS afeta a propagação da onda e consequentemente o transporte sedimentar e a evolução da LC. Existem várias equações empíricas para o cálculo do k_t como por exemplo D'Angremond *et al.*, (1996), Seabrook e Hall (1998) e Van der Meer *et al.*, (2004).

D'Angremond *et al.*, (1996) analisaram dados de laboratório de transmissão de ondas (no total cinco base de dados), obtendo a Eq. 1 para o cálculo do coeficiente de transmissão:

$$K_t = 0.4 \frac{h_s}{H_i} + \left(\frac{B}{H_i}\right)^{-0.31} a(1 - e^{-0.5\xi}) \quad \text{Eq. 1}$$

onde h_s é altura da crista do QMS, H_i é a altura da onda incidente, B é a largura da crista do quebra-mar, a é um parâmetro de calibração com o valor 0,64 para quebra-mares submersos permeáveis e 0,8 para quebra-mares submersos impermeáveis, e ξ é o número de Iribarren ($\xi = \text{Declive de praia} / \sqrt{H_i/L_0}$) sendo L_0 o comprimento da onda ao largo .

Seabrook e Hall (1998) também desenvolveram uma fórmula para o cálculo de k_t incluindo também o diâmetro do enrocamento (D_{50}) considerando cinco bases de dados (Eq. 2). Esta fórmula é válida para $0 \leq h_s/D_{50} \cdot H_i/B \leq 2.14$ e $0 \leq h_s/D_{50} \cdot H_i/L_0 \leq 7.08$.

$$K_t = 1 - \left(e^{-0.56 \left(\frac{h_s}{H_i} \right) - 1.09 \frac{H_i}{B}} + 0.047 \left(\frac{h_s}{D_{50}} \cdot \frac{B}{L_0} \right) - 0.067 \left(\frac{h_s}{D_{50}} \cdot \frac{H_i}{B} \right) \right) \quad \text{Eq. 2}$$

Van der Meer *et al.*, (2004) utilizaram sete bases de dados (incluindo modelos de larga escala, e de quebra-mares de elevada permeabilidade) para desenvolver a fórmula presente na Eq. 3:

$$K_t = \begin{cases} 0.3 \frac{h_s}{H_i} + 0.75 (1 - e^{-0.5\xi}) & \text{para } \xi < 3 \\ 0.3 \frac{h_s}{H_i} + \left(\frac{B}{H_i} \right)^{0.31} 0.75 (1 - e^{-0.5\xi}) & \text{para } \xi \geq 3 \end{cases}$$

para $0.075 \leq K_t \leq 0.8$ Eq. 3

Estas fórmulas já foram validadas inúmeras vezes e são utilizadas consoante as características morfológicas e oceanográficas do local em estudo. Contudo, para a costa oeste portuguesa ainda não existe consenso sobre a fórmula que melhores resultados produz.

Para o cálculo de k_t a utilizar nas simulações de evolução de LC foi utilizado o clima de agitação propagado até à profundidade de -12m ZH em frente à praia da Vagueira. Esta série foi utilizada para o cálculo empírico dos valores de k_t com as fórmulas referidas e como input do modelo DREAMS para a obtenção das características das ondas na zona abrigada, de forma ser possível inferir o k_t de cada onda.

Com as características das ondas na zona abrigada é possível calcular o efeito do QMS (difração e transmissão) comparando as ondas à profundidade de 12m com as ondas na zona imediatamente após a estrutura.

3. RESULTADOS

3.1. Coeficiente de transmissão k_t

Os resultados obtidos através da aplicação das fórmulas empíricas para cálculo do k_t estão apresentados na Tabela II, bem como os parâmetros considerados em cada fórmula. Nesta, os valores apresentados correspondem à média de todos os k_t obtidos, para cada condição de agitação marítima e nível de maré, da série de 20 anos.

Tabela II: Valores de k_t e os parâmetros considerados nas fórmulas empíricas).

	k_t	H_i	L_0	h_s	B	ξ	D_{50}
D'Agremond <i>et al.</i> , (1996)	0.48	✓	✗	✓	✓	✓	✗
Seabrook e Hall (1998)	0.63	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Van der Mer <i>et al.</i> , (2004, 2005)	0.48	✓	✗	✓	✓	✓	✗

Os valores de Seabrook e Hall são próximos dos valores de Van der Mer, porém os únicos parâmetros em comum são a largura e a altura da crista e a altura da onda incidente.

Os resultados do k_t provenientes do modelo DREAMS determinam-se através da razão entre a altura da onda antes do QMS e logo após a sua transposição. Nos casos em que ocorre rebentação da onda sobre o quebra-mar, foi aplicada a redução da altura de onda correspondente *a posteriori*. Para cada configuração foi calculado um k_t médio (representado na Fig. 3) resultante de simulações de condições de agitação correspondentes a 39 anos de dados de agitação local, cujos resultados são apresentados na Fig. 3.

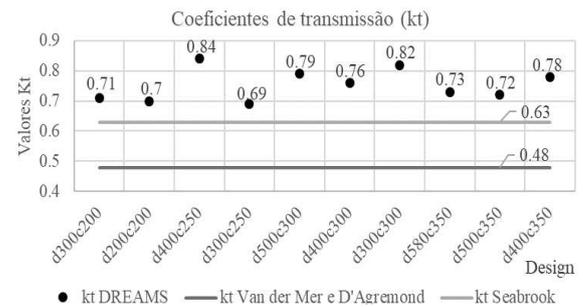
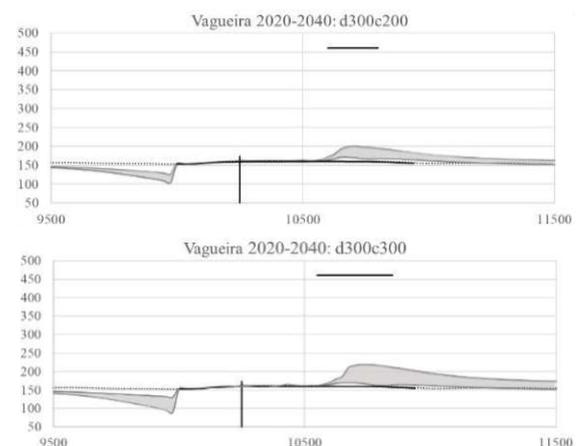


Fig. 3. Coeficientes de transmissão calculados para cada design de QMS (d: distância à costa e c: comprimento do QMS, ambos em metros).

Não existe uma relação evidente entre o valor de k_t do DREAMS e a configuração do QMS, nem se observa nenhuma relação do k_t com a distância a costa ou com o comprimento do QMS quando analisados em separado.

3.2. Linhas de costa

Para cada configuração foi simulada a evolução da LC para o período de 2020 a 2040. Verificou-se uma grande variabilidade da resposta da LC à variação do parâmetro k_t para a mesma geometria do QMS (Fig.4). Para cada geometria foi considerada uma linha média e o seu valor máximo, mínimo e desvio padrão, de forma a demonstrar a variabilidade



associada à variação do k_t .

Fig. 4. Simulação da evolução da LC para QMS com design d300c200 e d300c300. Zona a sombreado cinzento representa a variação da posição da linha de costa, considerando todos os k_t estudados (d: distância à costa e c: comprimento do QMS, ambos em metros).

Para a mesma distância, a variabilidade da LC pode ser diferente para cada comprimento de QMS.

Apresentam-se também a erosão máxima e acreção máxima associado a cada design utilizando o k_t calculado pelo modelo DREAMS (Tabela III). O comprimento do saliente foi determinado pela distância entre células, à esquerda e à direita do ápice do saliente, que apresentavam um crescimento de 20% do valor de acreção máxima (no ápice).

Tabela III: Valores de acreção e erosão máxima e comprimento do saliente de todos os designs do QMS para k_t variável (DREAMS).

Design	Acreção máxima (m)	Erosão máxima Labrego (m)	Erosão máxima a sul (m)	Comprimento do saliente (m)
d300c200	26.40	-40.07	-50.37	633
d200c200	37.83	-49.90	-54.07	917
d400c250	23.87	-37.73	-50.27	717
d300c250	34.23	-47.43	-55.00	992
d500c300	22.87	-34.50	-50.43	933
d400c300	30.40	-41.87	-54.60	1058
d300c300	36.73	-48.03	-57.90	1125
d580c350	23.83	-31.07	-52.33	1150
d500c350	30.10	-36.90	-54.87	1142
d400c350	35.23	-45.60	-58.23	1225

Os resultados da acreção máxima confirmam o melhor desempenho para os casos d200c200, d300c250, d300c300, d400c300, d400c350 e d500c350. Em todos eles, o valor médio da acreção máxima associada ao saliente foi da ordem de 30 a 35 m.

Como esperado, os QMS que apresentam uma maior acreção encontram-se mais junto a costa e provocam uma maior erosão na praia do Labrego (a sul do esporão da Vagueira). Para todas as configurações do QMS, a erosão máxima varia entre -30 e -50 m, ao fim de 20 anos. Ou seja, a taxa de erosão máxima varia, grosso-modo, entre -1,5 e -2,5 m/ano.

O comprimento do saliente está diretamente relacionado com o comprimento do QMS, sendo que para o mesmo comprimento da estrutura, distâncias à costa maiores levam a um aumento do comprimento do saliente.

4. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Os k_t mais elevados podem ser considerados mais conservadores, reproduzindo uma LC que retrata uma influência do QMS mais reduzida na evolução da LC. Os valores calculados pelo modelo DREAMS são muito próximos ao valor dado pela fórmula empírica de Seabrook e Hall (1998).

Para cada configuração do QMS, a evolução da LC e os resultados dos parâmetros dependem do método usado para o cálculo do coeficiente de transmissão. Como esperado, nos casos em que o k_t é menor (Van der Mer e D'Agremond), os resultados são mais favoráveis ao crescimento do saliente, com consequente maior erosão a sul do esporão da Vagueira.

Em todos os parâmetros a variabilidade associada ao método de cálculo do k_t (é muitas vezes superior à variabilidade que resulta da configuração do QMS).

Para a mesma distância à costa, a variabilidade da LC pode ser diferente, dependendo do comprimento do QMS.

Agradecimentos

Este artigo foi financiado pela Fundação da Ciência e Tecnologia, no âmbito da bolsa de Doutoramento da autora Soraia Teixeira (PD/BD/128510/2017). Agradeço gentilmente à Agência portuguesa do Ambiente e ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil pela cedência dos dados.

REFERÊNCIAS

- APA (2019). COSMO: Programa de Monitorização da Faixa Costeira de Portugal Continental, acessível em: <https://cosmo.apambiente.pt/>
- Berkhoff, J. (1972). Computation of combined refraction — Diffraction. Coastal Engineering 1972.
- D'Angremond, K., Van Der Meer, J. W., & De Jong, R. J. (1996). Wave transmission at low-crested structures. Coastal Engineering 1996.
- Fernandes, C.E.R.S.C. (2017). Análise do desempenho de obras longitudinais aderentes e quebra-mares destacados. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 129 pp.
- Fortes, J. C. (1993.). Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas (análise pelo método dos elementos finitos) (Tese de mestrado). IST, Lisboa, Portugal.
- Sancho, F., Neves, M. G., Fortes, C. J., & Capitão, R. (2019). Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à praia da vagueira. Estudos em modelo matemático: Memória descritiva, Relatório 4. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.
- Seabrook, S. R., & Hall, K. R. (1998). Wave transmission at submerged Rubblemound breakwaters. Coastal Engineering 1998.
- Van Der Meer, J. W., Briganti, R., Wang, B., & Zanuttigh, B. (2004). Wave transmission at low-crested structures, including oblique wave attack. Coastal Engineering 2004.
- Vicente, C. (1991). Aperfeiçoamento de métodos de modelação matemática e física aplicáveis a problemas de erosão costeira. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I. P.
- Vicente, C., & Clímaco, M. (2003). Evolução de linhas de costa: desenvolvimento e aplicação de um modelo numérico. Lisboa, LNEC.
- Vicente, C., & Clímaco, M. (2018). Programação do galgamento de Quebra-mares. Lisboa: LNEC.