

## DESEMPENHO DE OBRAS LONGIDUTINAIS ADERENTES NO CONCELHO DE OVAR, PORTUGAL

Telmo CRUZ<sup>1</sup>; Carla A. PEREIRA<sup>2</sup>; Carlos COELHO<sup>2</sup>; Peter C. ROEBELING<sup>3</sup>

### RESUMO

O concelho de Ovar, distrito de Aveiro, Portugal, apresenta uma área territorial de 148km<sup>2</sup> e um litoral com 15km de extensão. Ao longo do tempo, diversas ações antropogénicas têm reduzido o caudal sólido afluente ao litoral, enfraquecendo a alimentação sedimentar das praias e conduzindo ao recorrente recuo da posição da linha de costa. O grau de exposição das frentes costeiras urbanizadas faz com que seja frequente o relato de galgamentos, com inundações e danos em infraestruturas.

A reflexão das ondas incidentes sobre as obras longitudinais aderentes, juntamente com as correntes longitudinais e o facto do sistema costeiro apresentar défice sedimentar, reduzem a quantidade de sedimentos na frente das obras, dando origem a uma tendência de abaixamento do perfil de praia. Consequentemente, maiores profundidades do fundo permitem a incidência direta de ondas mais altas e energéticas, levando a uma maior frequência de galgamentos, agravando o nível de danos causados ao longo do tempo. Tendo em conta que as situações de galgamento ocorrem quando o espraiamento é superior ao coroamento das obras longitudinais aderentes, foi possível estimar a média anual de dias com galgamento em função da profundidade do fundo e do desnível entre o coroamento e a superfície livre da água do mar, antecipando-se o agravamento da frequência de eventos de galgamento.

A avaliação do número de intervenções de defesa costeira e de eventos de dano registados nos últimos 15 anos permitiu estimar os custos anuais de reabilitação de obras aderentes, os encargos relativos à limpeza e arranjo de passeios e infraestruturas, e contabilizar perdas materiais e danos em edifícios, associados à ocorrência de galgamentos. Para mitigar o problema, estabeleceram-se e analisaram-se os custos e benefícios de vários cenários de intervenção: aumento da cota de coroamento da estrutura; construção de patamar intermédio; ou alimentação artificial da praia.

**Palavras-chave:** perfil de praia; espraiamento; galgamentos; eventos de dano; cenários de intervenção; custo-benefício.

---

<sup>1</sup> Department of Civil Engineering, University of Aveiro; 3810-193 Aveiro, Portugal; telmo.cruz@ua.pt

<sup>2</sup> RISCO – Aveiro Research Centre of Risks and Sustainability in Construction; Department of Civil Engineering, University of Aveiro; 3810-193 Aveiro, Portugal; alexandrapereira@ua.pt, ccoelho@ua.pt

<sup>3</sup> CESAM – Centre for Environmental and Marine Studies; Department of Environment and Planning, University of Aveiro; 3810-193 Aveiro, Portugal; peter.roebeling@ua.pt

## 1. INTRODUÇÃO

Verifica-se uma tendência erosiva na generalidade da costa portuguesa, com maior ênfase na costa Noroeste. Ao longo do tempo, diversas ações antropogénicas têm reduzido o caudal sólido afluente ao litoral, enfraquecendo a alimentação sedimentar das praias, o que tem conduzido ao recorrente recuo da posição da linha de costa. Perante este cenário, diferentes alternativas de intervenção de defesa costeira têm sido adotadas, sendo uma das mais frequentes a construção de obras longitudinais aderentes. Estas têm associados elevados custos de reabilitação que são muitas vezes menosprezados e minorados aquando da sua construção e que, devido à falta de monitorização e aos níveis de eficácia variáveis no tempo, têm conduzido a situações frequentes de ocorrência de danos não só na própria estrutura, mas também nas zonas marginais. Este trabalho pretende avaliar o comportamento das obras longitudinais aderentes no concelho de Ovar, estimando o efeito dos galgamentos e do afundamento do perfil de praia em frente à obra, sendo analisadas várias abordagens de intervenção para reduzir a frequência de galgamentos e os impactos negativos que deles advêm.

## 2. CASO DE ESTUDO

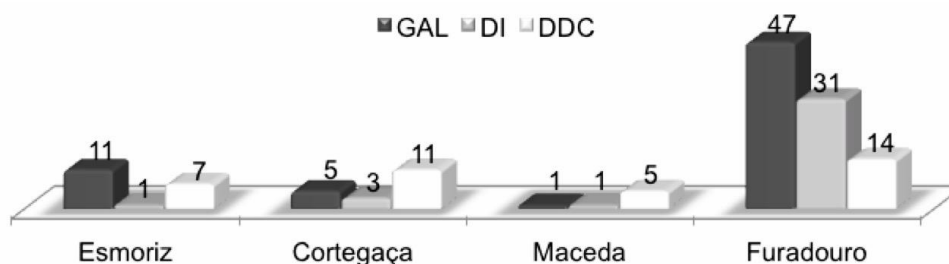
O concelho de Ovar, distrito de Aveiro, Portugal, apresenta uma área territorial de 148km<sup>2</sup>, com mais de 55 mil habitantes (Figura 1). O seu litoral, maioritariamente arenoso, tem uma extensão de cerca de 15km, sendo sujeito a um clima de agitação marítima energético, com rumos de ondulação predominantes de noroeste. Nas praias de Esmoriz, Cortegaça, Maceda e Furadouro existem ao todo 7 obras longitudinais aderentes e 6 esporões, construídos principalmente entre os anos 70 e 80 do século XX. As obras aderentes deste concelho apresentam três diferentes tipologias: em Esmoriz, a cota de coroamento é superior à cota da via pública no tardo; em Cortegaça, a obra aderente tem dois patamares intermédios e uma superestrutura em betão armado; e no Furadouro, não existem patamares intermédios e o coroamento está ao nível da via pública.



Figura 1. Localização da área de estudo.

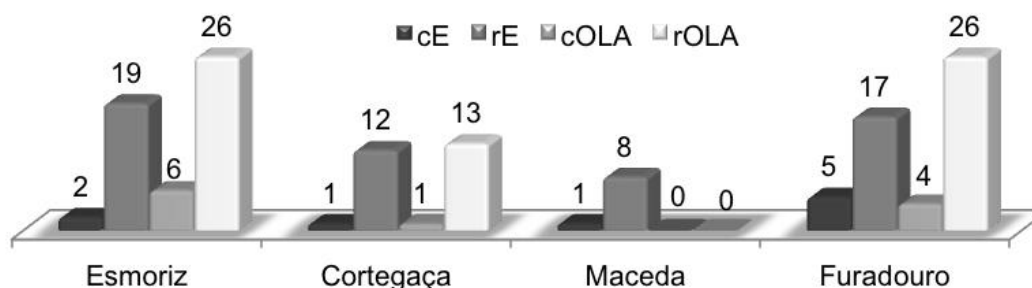
Para complementar a base de dados elaborada por Pereira e Coelho (2011), procedeu-se à recolha exaustiva de registos de ocorrência de danos devido à ação marítima e de intervenções de defesa costeira no trecho Esmoriz-Furadouro, tendo como fontes de informação os meios de comunicação social locais, registos fotográficos da população residente e documentos de entidades responsáveis pela gestão e planeamento no âmbito de defesa costeira (Câmara Municipal de Ovar, Agência Portuguesa do Ambiente, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Centro, entre outros). Na Figura 2

contabilizam-se todas as ocorrências registadas desde 1857 até 2015, seriadas por três tipologias: galgamentos (GAL); danos em infraestruturas (DI); e danos em obras de defesa costeira (DDC).



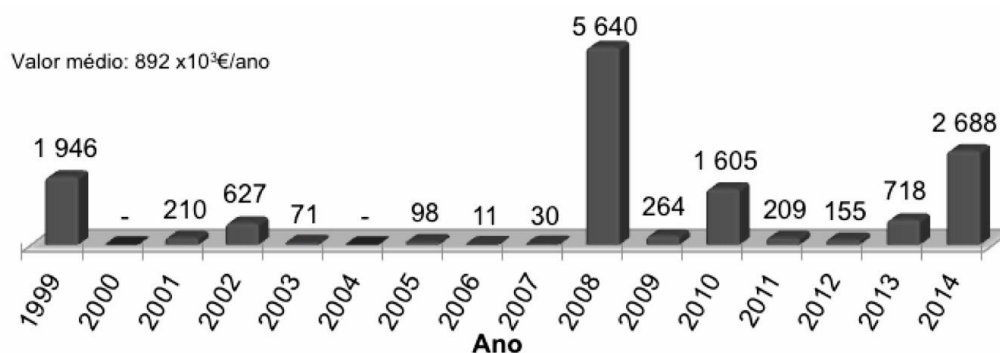
**Figura 2.** Número de ocorrências registadas entre 1857 e 2015, distribuídas por tipologia.

Categorizaram-se as intervenções de defesa costeira em termos de obras de construção (c) e reabilitação (r) de esporões (E) e obras longitudinais aderentes (OLA), cuja enumeração se apresenta na Figura 3.



**Figura 3.** Número de intervenções de defesa costeira realizadas no litoral de Ovar, entre 1958 e 2014, distribuídas por tipo de intervenção.

A Figura 4 explicita os custos anuais de intervenção associados a obras de defesa costeira no concelho de Ovar, considerando os últimos 15 anos de informação recolhida.



**Figura 4.** Custo de intervenções de defesa costeira no concelho de Ovar [x10<sup>3</sup>€].

Os números apresentados na Figura 4 contabilizam todos os custos desde o ano de 1999, relativos à reabilitação de obras longitudinais aderentes e associados a reparações de infraestruturas devido à ocorrência de galgamentos. Com base nesses valores e numa análise criteriosa da descrição das intervenções, estabeleceram-se custos de referência, representativos das obras aderentes de Esmoriz, Cortegaça e Furadouro (Tabela 1).

**Tabela 1.** Custos de reabilitação de obras e reparação de infraestruturas em Esmoriz, Cortegaça e Furadouro, com base nos registos de 1999 a 2014.

		Valores registados:			Valores adotados:	
		Total [€]	[€/ano]	[€/m/ano]	[€/ano]	[€/m/ano]
Custos de reabilitação	Esmoriz	3 051 950,06	190 746,88	119,97	191 000,00	120,00
	Cortegaça	4 170 433,01	260 652,06	434,42	261 000,00	430,00
	Furadouro	4 209 789,28	263 111,83	496,44	263 000,00	500,00
Custos de reparação de infraestruturas	Esmoriz	45 865,44	2 866,59		2 900,00	
	Cortegaça	-	-		-	
	Furadouro	447 423,92	27 964,00		28 000,00	

### 3. METODOLOGIA

Para avaliar o impacto das obras longitudinais aderentes, desenvolveu-se o estudo da frequência de ocorrência de galgamentos, da profundidade de fundo que é atingida em frente às obras e ainda de várias possibilidades de intervenção e reforço das estruturas. A título exemplificativo, as teorias desenvolvidas aplicaram-se concretamente às obras longitudinais aderentes do Furadouro, permitindo realizar uma análise custo-benefício de diversos cenários de intervenção.

#### 3.1. Galgamentos

O fenómeno de galgamento ocorre quando a cota de espraiamento de uma onda é superior à cota de coroamento da obra longitudinal aderente. Com o objetivo de identificar situações de galgamento através da comparação da altura de onda incidente na estrutura aderente com o respetivo nível de espraio máximo, procedeu-se ao cálculo exaustivo das alturas de onda incidentes sobre as obras longitudinais aderentes correspondentes a todos os 71507 registos de agitação marítima da boia ondógrafo de Leixões existentes entre 1981 e 2014. Este processo de cálculo foi efetuado em função das profundidades de fundo à frente da obra aderente ( $d$ ), consideradas até 10m inclusive, admitindo que as ondas assumem comportamento linear sinusoidal. Foram contabilizados dois fenómenos de propagação de onda: empolamento e refração (equação 1), considerando genericamente que a linha de costa e a batimetria regular apresentam uma orientação que descreve um ângulo de 15° com o Norte, no sentido horário.

$$H_i = H_s \cdot k_s \cdot k_r \quad (1)$$

Em que:

$H_i$  – Altura de onda incidente [m]

$H_s$  – Altura de onda significativa ao largo [m]

$k_s$  – Coeficiente de empolamento [ - ]

$k_r$  – Coeficiente de refração [ - ]

O espraiamento de uma onda é o movimento ascendente do volume de água da onda através da face de uma estrutura de defesa costeira. Segundo o Eurotop (2007), designa-se por altura de espraiamento ( $R_{2\%}$ ) a cota medida verticalmente a partir do nível médio da água do mar que é excedida por 2% das ondas incidentes. Esta cota depende da declividade de onda, do nível da superfície da água do mar, da batimetria de fundo e da porosidade, rugosidade, permeabilidade e inclinação do manto resistente da obra de defesa costeira. Teixeira (2014) fez uma análise e categorização exaustiva de 60 formulações

distintas, das quais 23 são aplicáveis a estruturas costeiras, obtendo por regressão linear a expressão que melhor se adequa ao cálculo do espraio máximo em estruturas costeiras ( $R_{m\acute{a}x}$ ) no litoral em estudo (equação 2). Essa equação foi aplicada a todos os registos de agitação, para uma inclinação do manto resistente igual a 3/2 (H/V).

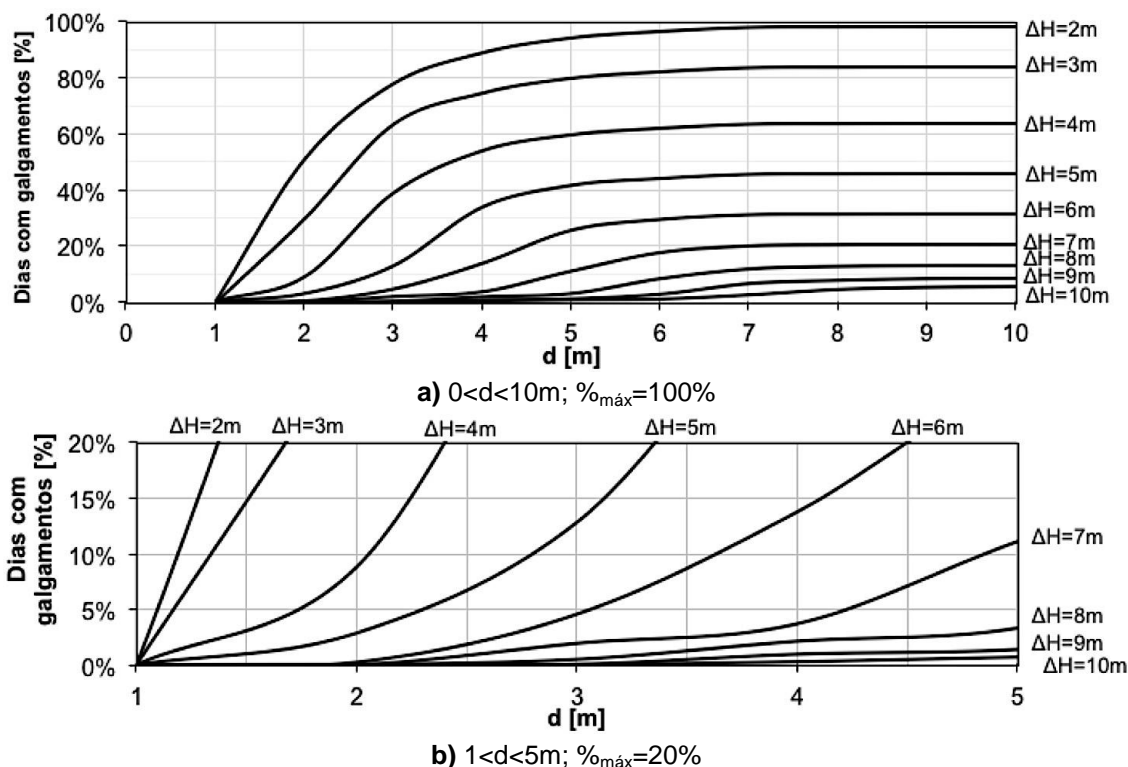
$$R_{m\acute{a}x} = 0,41H_s \cdot \xi \quad (2)$$

Em que  $\xi = \tan(\beta) / \sqrt{H_s/L_0}$ , sendo:

$\xi$  – Número de Iribarren [ - ]

$\beta$  – Inclinação do manto resistente, medida com a horizontal

A contabilização dos registos de agitação que dão origem a galgamento foi feita a partir das seguintes condições: o nível de espraio máximo ( $R_{m\acute{a}x}$ ) deverá ser superior à diferença ( $\Delta H$ ) entre a cota de coroamento da obra aderente e o nível da superfície livre do mar; a altura de onda incidente ( $H_i$ ) deverá ser inferior ou igual à altura de rebentação ( $H_b$ ) correspondente à profundidade em análise. Desta forma, foi possível determinar o número e percentagem de registos de agitação e os dias de cada mês que representam situação de galgamento, no cenário de cada profundidade de fundo à frente da obra longitudinal aderente ( $d$ ) e desnível ( $\Delta H$ ) entre a cota de coroamento da defesa aderente e o nível da superfície livre do mar. De forma a garantir a representatividade dos resultados, foi definido um critério de validação de dados que impõe um mínimo relativo de 75% de registos, o que significa que para um mês ser válido necessita de ter pelo menos 75% dos seus dias com registos de agitação e, analogamente, um ano válido obriga a um mínimo de 9 meses válidos. A partir dos resultados seriados é possível representar a média aritmética da percentagem anual de dias com galgamentos (Figura 5).



**Figura 5.** Curvas para estimativa da percentagem anual de dias com galgamentos, para diferentes cenários de  $d$  e  $\Delta H$ .

Visando o caso de estudo, a estimativa da frequência atual de galgamentos pressupõe o conhecimento das características geométricas das obras aderentes, nomeadamente a profundidade de fundo ( $d$ ) e a relação entre a cota de coroamento da estrutura e o nível médio da superfície da água ( $\Delta H$ ). O procedimento adotado para estimar o valor destas grandezas, representativo nos locais em estudo, consistiu em cruzar os registos mensais de galgamentos da base de dados com o número de dias com galgamentos calculados anteriormente. Desta forma, foram contabilizadas todas as correspondências diretas de cada ano, mês e profundidade de fundo em análise, permitindo determinar o valor de desnível com maior número de correspondências:  $d = 2\text{m}$  e  $\Delta H = 4\text{m}$ . A percentagem anual de dias com galgamentos análoga a essas características é 8,8%.

A análise do impacto dos galgamentos em termos de danos no edificado e perdas de bens materiais nas zonas urbanas inundadas, seguiu o procedimento usado por Roebeling e Rocha (2015), a partir da equação 3.

$$C_g = \sum v_i D_i A_i \quad (3)$$

Em que  $D_i = \alpha H_i - \beta H_i^2$ , sendo:

$C_g$  – Danos no edificado e perdas materiais devido a inundações [€]

$v_i$  – Valor das zonas edificadas [€/ha]

$D_i$  – Percentagem de dano da estrutura ou dos bens materiais, através de curvas DDF (*depth-damage-functions*) [%]

$A_i$  – Áreas inundadas devido aos galgamentos [ha]

$\alpha, \beta$  – Parâmetros adimensionais das curvas DDF

$H_i$  – Altura de inundações [m]

A partir da descrição dos registos de dano, um dia com galgamentos no Furadouro representa, em termos médios, uma área inundada de 0,68ha com uma altura de água de 5cm (afetando maioritariamente a zona da marginal). Fontão (2008) estimou o valor de território da zona edificada, obtendo os valores de 1448€/m<sup>2</sup> na zona da marginal. O valor médio dos bens materiais estima-se em 250€/m<sup>2</sup> (Fidelidade, 2015) e segundo Roebeling e Rocha (2015), os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  tomam os valores de 38,7 e -8,7 para os edifícios e de 51,4 e -10,8 para os bens materiais, respetivamente. Assim, estima-se que o valor médio atual dos danos por inundações da zona urbana do Furadouro seja 210000€/ano, relativo à frequência atual de galgamentos (8,8%).

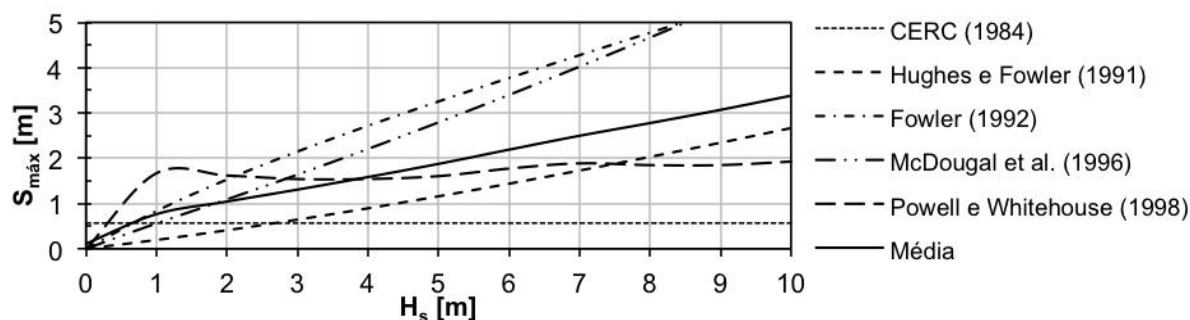
### 3.2. Evolução do perfil de praia

A reflexão das ondas incidentes, cujo refluxo depende da inclinação e permeabilidade do manto resistente, dá origem a transporte sedimentar para maiores profundidades. Este fenómeno, conjugado com o eventual défice sedimentar associado às correntes de deriva longitudinal, reduz a quantidade de sedimentos na zona frontal à obra longitudinal aderente. Assim, estes processos induzem uma tendência para ocorrer o abaixamento do perfil de praia. Consequentemente, o aumento da profundidade do fundo permite a aproximação de ondas de maior altura e a incidência de ondas mais energéticas nas defesas aderentes, originando uma maior frequência de ocorrências e dimensão de galgamentos.

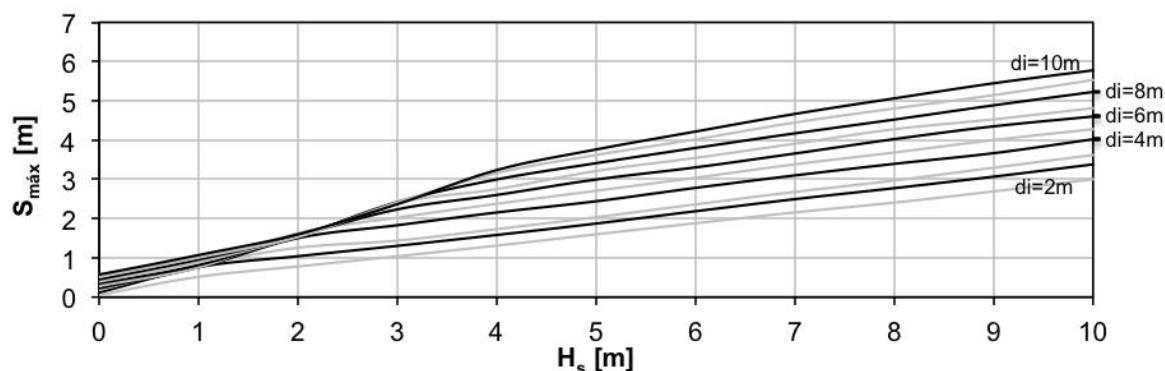
Não existem metodologias consensuais de cálculo da profundidade máxima de erosão no perfil de praia em frente a estruturas aderentes ( $S_{max}$ ), pelo que foram analisadas várias formulações diferentes. Segundo Burcharth e Hughes (2011), como os índices de reflexão



de um muro com paramento vertical são superiores aos de uma obra aderente, a previsão da profundidade erodível pode ser feita de forma conservativa, admitindo que a obra é um muro. Desta forma, deu-se maior relevo a 5 das formulações (Figura 6) cuja aplicabilidade é adequada ao caso de estudo (fundos arenosos; ondas rebentadas e não rebentadas, incidentes perpendicularmente à obra; rebentação progressiva e mergulhante): CERC (1984); Hughes e Fowler (1991); Fowler (1992); McDougal *et al.* (1996); Powel e Whitehouse (1998). As médias de resultados para diferentes profundidades apresentam-se na Figura 7.



**Figura 6.** Profundidade máxima erodível, considerando uma profundidade de fundo inicial ( $d_i$ ) de 2m.



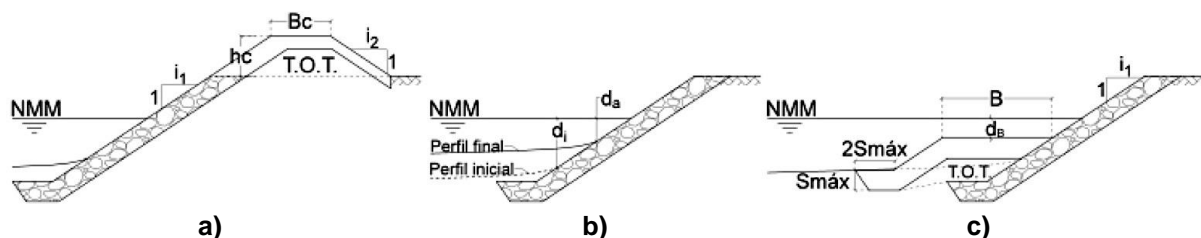
**Figura 7.** Médias da profundidade máxima erodível do perfil de praia, para diferentes profundidades de fundo iniciais ( $d_i$ ).

Assumindo como representativo do comportamento na zona de estudo, uma altura de onda significativa de 3m e partindo da profundidade de fundo de 2m estimada na secção 3.1, antecipa-se um abaixamento máximo do perfil de praia de 1,3m a longo prazo ( $t_e$ ), o que corresponde a um agravamento final anual em termos absolutos de 35% no número de dias com galgamentos, caso não haja nenhuma intervenção.

### 3.3. Soluções de intervenção

Procedeu-se ao estudo de alternativas para a redução da percentagem anual de galgamentos, assumindo três diferentes abordagens de intervenção: o aumento da cota de coroamento da obra aderente; a diminuição da profundidade de fundo, ou seja, alimentar artificialmente o perfil de praia; ou a construção de um patamar intermédio (Figura 8). Cada tipologia de intervenção tem associados diferentes custos e níveis de eficácia, dependendo das características geométricas da obra longitudinal aderente e da agitação marítima a que está sujeita. Os ábacos da Figura 5 permitem determinar diretamente o impacto do aumento da cota de coroamento e da alimentação artificial em termos de frequência de galgamentos.

Caso o perfil de praia já tenha atingido o equilíbrio, não existirá agravamento da frequência de galgamentos após intervenção, uma vez que não existe qualquer perturbação na morfologia e batimetria da praia.



**Figura 8.** Diferentes tipologias de intervenção: a) aumento da cota de coroamento; b) alimentação artificial do perfil de praia; c) construção de um patamar intermédio.

A previsão dos custos de cada intervenção foi feita tendo como base os custos unitários presentes na Tabela 2, obtidos a partir da consulta de orçamentos de construção de obras aderentes e de intervenções de reperfilamento e alimentação artificial de praias presentes na literatura, aplicados à região em estudo (Carpinteiro, 2009; Almeida, 2011).

**Tabela 2.** Custos unitários considerados no cálculo dos custos das intervenções.

Material:	Custo unitário ( $C_u$ ): [€/m <sup>3</sup> ]
Enrocamento granítico	50,00
Areia	5,00

### 3.3.1. Aumento da cota de coroamento

O aumento da cota de coroamento pressupõe apenas um aumento do desnível  $\Delta H$ , não tendo qualquer impacto na profundidade de fundo. De forma simplificada, o custo desta intervenção ( $C_c$ ) por metro linear pode ser estimado a partir da equação 4, assumindo que não existe superestrutura e que o coroamento segue a geometria presente na Figura 8a.

$$C_c = C_u \cdot h_c \left[ B_c + \left( \frac{i_1 + i_2}{2} \right) h_c \right] \quad (4)$$

Sendo:

$h_c$  – Aumento da cota de coroamento [m]

$B_c$  – Largura do coroamento [m]

$i_1, i_2$  – Inclinações do manto resistente à frente e no tardoz do coroamento [H/V]

Aplicado ao caso de estudo, a partir da Figura 5, prevê-se que um coroamento com 2m de altura e 3m de largura, assumindo inclinações do manto resistente iguais a 3/2 (H/V), equivale a uma redução para 0,3% de galgamentos ao ano, com um custo estimado de 600€ por metro linear de obra aderente. O abaixamento de perfil de praia em 1,3m, pressupõe uma percentagem final de 7,6% de dias com galgamentos quando o perfil de praia atingir o equilíbrio.

### 3.3.2. Alimentação artificial do perfil de praia

De forma análoga ao ponto anterior, a partir da Figura 5 pode-se determinar diretamente a diminuição da profundidade de fundo necessária para reduzir uma determinada



percentagem anual de galgamentos, ou seja, define-se qual a altura de areia que é necessário introduzir em frente à obra longitudinal aderente (o desnível  $\Delta H$  é mantido constante). A morfologia da praia é alterada e, portanto, é induzido um estado de desequilíbrio dinâmico no perfil de praia, com tendência para o seu abaixamento até uma nova profundidade máxima erodível, o que obriga a uma certa periodicidade da intervenção. Este período depende do estado inicial de equilíbrio do perfil de praia e da relação entre a profundidade máxima erodível e a altura de areia introduzida na risberma da obra aderente. No entanto, no âmbito deste estudo, esta periodicidade não foi tida em conta, considerando-se apenas uma única intervenção inicial. Admite-se que o perfil de praia assume a forma do perfil de equilíbrio simplificado de Dean (1977), representada pela equação 5.

$$h(x) = Ax^m + d_i \quad (5)$$

Em que  $A = 2,25^3 \sqrt{(\omega_s^2/g)}$ , sendo:

$h$  – Profundidade de fundo ao longo do perfil de praia [m]

$A$  – Parâmetro de escala dos sedimentos [ - ]

$x$  – Distância horizontal à risberma da obra longitudinal aderente [m]

$m$  – Parâmetro de inclinação da praia [ - ]

$d_i$  – Profundidade de fundo inicial à frente da obra longitudinal aderente [m]

$\omega_s$  – Velocidade de queda dos sedimentos [m/s]

Integrando a equação genérica 5, o volume de areia ( $V_a$ ) necessário a introduzir por metro linear de obra aderente pode ser estimado a partir da equação 6. A estimativa de custo ( $C_a$ ) é dada pelo produto do volume de areia e do custo unitário ( $C_u$ ).

$$V_a = \left( \frac{A}{m+1} \right) \left[ \left( \frac{h_c - d_i}{A} \right) \cdot x_c^i - \left( \frac{h_c - d_a}{A} \right) \cdot x_c^a \right] + (h_c - d_a) \cdot x_c^a + (d_i - h_c) \cdot x_c^i \quad (6)$$

Em que  $x_c^i = [(h_c - d_i)/A]^{1/m}$  e  $x_c^a = [(h_c - d_a)/A]^{1/m}$ , sendo:

$h_c$  – Profundidade de fecho [m]

$d_i, d_a$  – Profundidade de fundo inicial e final à frente da obra aderente [m]

$x_c^i, x_c^a$  – Distância horizontal inicial e final entre a risberma da obra aderente e a profundidade de fecho [m]

Foi considerada uma profundidade de fecho de 12m, com base na formulação de Birkemeier (1985) aplicada por Coelho (2005) aos registos de agitação da boia ondógrafo de Leixões entre 1981 e 2003. A velocidade de queda foi determinada a partir da média aritmética das formulações de Hallermeier (1981); Rijn (1984); e Soulsby (1997). Tendo em conta a morfologia típica das praias da costa Noroeste portuguesa (praias dissipativas) e o clima de agitação energético a que estão sujeitas, o parâmetro  $m$  que melhor se adequa é 2/3. Aplicando ao caso de estudo, a partir da Figura 5 prevê-se que o aumento de 1m da altura do perfil de praia junto do pé da obra aderente ( $d_a = 1m$ ) reduza a percentagem de galgamentos para 0%, com um custo estimado de 4371€ por metro linear de obra. Antecipa-se, a partir da Figura 7, um abaixamento do perfil de praia de 1,15m, perfazendo 13,3% de dias com galgamentos quando for atingido o perfil de equilíbrio. No entanto, no caso do perfil de praia estar estabilizado antes da alimentação artificial, o abaixamento ocorre até ao perfil de equilíbrio pré-intervenção.

### 3.3.3. Construção de patamar intermédio

Os patamares intermédios, construídos usualmente a cotas inferiores ao nível médio da superfície do mar, fazem com que as ondas que antes atingiam diretamente a obra aderente, rebentem ao nível do patamar, reduzindo a probabilidade de galgamento da estrutura. Seguindo a metodologia de Waal e van der Meer (1992), o efeito do patamar é contabilizado através de um coeficiente de redução ( $\gamma_b$ ) aplicado à altura de espraiamento ( $R_{m\acute{a}x}$ ), segundo as equações 7, 8 e 9.

$$\gamma_b = 1 - r_B(1 - r_{dB}), \quad 0,6 \leq \gamma_b \leq 1,0 \quad (7)$$

$$r_B = 1 - \frac{\tan \alpha_{eq}}{\tan \alpha} \quad (8)$$

$$r_{dB} = 0,5(d_B/H_p)^2, \quad 0 \leq r_{dB} \leq 1 \quad (9)$$

Sendo:

$d_B$  – Profundidade do patamar, em relação ao nível da superfície livre do mar [m]

$H_p$  – Altura de onda significativa de projeto [ - ]

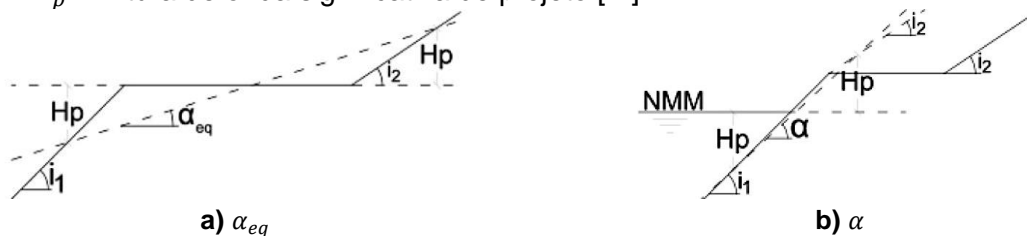


Figura 9. Representação das inclinações da estrutura para cálculo do parâmetro  $r_B$ .

Foi repetido todo o processo de cálculo descrito na secção 3.1, aplicando coeficientes de redução desde 0,6 a 0,9 à equação do espraiamento máximo. Com base nesses resultados, obtiveram-se os valores percentuais absolutos de redução de dias com galgamentos, em função das características geométricas da obra longitudinal aderente ( $d$  e  $\Delta H$ ) e do coeficiente  $\gamma_b$ . A partir do ábaco da Figura 10, determina-se diretamente o coeficiente de redução máximo para reduzir uma determinada percentagem de galgamentos. O cálculo da largura e profundidade do patamar é baseado nas equações 7, 8 e 9, a partir do seu coeficiente de redução.

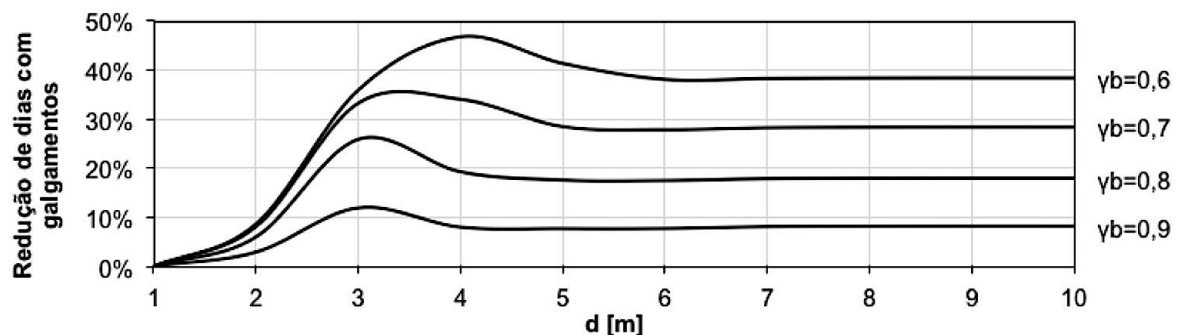


Figura 10. Influência de um patamar intermédio na redução da frequência de galgamentos de uma obra aderente especificamente com um desnível  $\Delta H$  igual a 4m.

O custo associado à construção do patamar ( $C_p$ ) foi estimado a partir da equação 10, partindo dos princípios que o talude do patamar tem a mesma inclinação do manto resistente da obra aderente e que a risberma do patamar apresenta uma profundidade igual

à profundidade máxima erodível ( $S_{m\acute{a}x}$ ) e duas vezes a sua largura (tipologia adequada para praias sujeitas a clima de agitação energético, segundo CIRIA *et al.*, 2007).

$$C_p = C_u \cdot [B_p(d + S_{m\acute{a}x} - d_B) + 2S_{m\acute{a}x}^2] \quad (10)$$

Sendo:  $B_p$  – Largura do patamar intermédio [m]

Aplicando ao caso de estudo, um patamar intermédio com coeficiente de redução igual a 0,7 resulta numa redução para 0,6% do número de dias com galgamentos. O abaixamento do perfil de praia em 1,3m resulta numa redução efetiva de 33,6% de galgamentos devido ao patamar intermédio que, comparando com a percentagem de galgamentos sem qualquer intervenção (43,8%), representa uma percentagem final a longo prazo de 10,2%. Para esse coeficiente de redução, admite-se um patamar intermédio com 5,5m de largura, posicionado 1m abaixo do nível médio da superfície do mar, perfazendo um custo estimado de 818€ por metro linear da obra.

### 3.4. Análise custo-benefício

Todos os valores monetários ( $V$ ) foram transformados em valores atualizados ( $VA$ ) à data de referência (ano de 2015), aplicando uma taxa de desconto ( $r$ ) segundo a equação 11 (Zerbe e Dively, 1994). A taxa de desconto assumiu-se constante e igual a 3%.

$$VA_t = \frac{V_t}{(1+r)^t} \quad (11)$$

Sendo:

$VA_t$  – Valor monetário atualizado à data de referência [€]

$V_t$  – Valor monetário não atualizado [€]

$r$  – Taxa de desconto [%]

Os valores nominais e atuais de custos designam-se por VC e VAC, respetivamente. De forma análoga, os valores nominais e atuais de benefícios designam-se por VB e VAB. A viabilidade económica de cada cenário em análise é avaliada a partir do valor atual líquido (VAL) e do rácio benefício-custo (RBC), calculados segundo as equações 12 e 13. O VAL representa o balanço acumulado entre os benefícios e os custos atuais, pelo que assume valores positivos sempre que a intervenção é economicamente viável, existindo uma predominância dos benefícios em relação aos custos atuais. O RBC de um projeto é a relação entre o somatório dos valores atuais de benefícios e os valores atuais de custos, sendo que a intervenção é rentável em termos económicos quando o RBC é superior a 1.

$$VAL = \sum_{t=0}^T \frac{VB_t}{(1+r)^t} - \sum_{t=0}^T \frac{VC_t}{(1+r)^t} \quad (12)$$

$$RBC = \frac{\sum_{t=0}^T \frac{VB_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{VC_t}{(1+r)^t}} \quad (13)$$

Sendo:

$VB_t$  – Valor nominal de benefícios [€]

$VC_t$  – Valor nominal de custos [€]

A análise custo-benefício das diferentes abordagens de intervenção nas obras aderentes do Furadouro teve em conta todos os custos inerentes à sua reabilitação, bem como todos os encargos consequentes dos galgamentos: limpezas e reparações de infraestruturas (Tabela 1); e danos no edificado e perdas de bens materiais (secção 3.1). Partiu-se do pressuposto

que todos os encargos suprarreferidos são proporcionais à frequência de galgamentos estimada, à exceção dos custos de reabilitação, em que se considerou um valor base permanente de 400€/m (212000€). Assim, os restantes 100€/m correspondem aos danos provocados pelos galgamentos à data de referência, cuja variação é diretamente proporcional aos valores percentuais de dias com galgamentos.

A variação da frequência de galgamentos depende da taxa de abaixamento do perfil de praia, mas o período de abaixamento até se atingir o perfil de equilíbrio (profundidade de fundo máxima) é uma variável de difícil estimativa. Assim, assumiram-se três diferentes tempos de estabilização do perfil de praia ( $t_e$ ): 0 anos (não há abaixamento porque o perfil de praia já atingiu o equilíbrio); 20 anos (o perfil de praia atinge a profundidade máxima erodível em 20 anos e depois mantém-se fixo); 40 anos (a profundidade máxima é atingida ao fim do período de análise). Importa notar que se consideraram taxas de abaixamento constantes, ou seja, a variação da profundidade de fundo e da frequência de galgamentos foi assumida como linear ao longo do tempo.

Cada cenário de intervenção apresenta um custo inicial fixo no momento de intervenção (ano de referência). Os benefícios associados a cada cenário correspondem à diferença de custos em relação ao cenário inicial, onde não é feita qualquer intervenção.

#### 4. CENÁRIOS E RESULTADOS

Foram considerados 4 cenários distintos para um prazo máximo de 40 anos (entre 2015 e 2055): cenário 0, onde não há qualquer intervenção para redução da frequência de galgamentos; cenário 1, que corresponde ao aumento da cota de coroamento (subsecção 3.3.1); cenário 2, de alimentação artificial do perfil de praia (subsecção 3.3.2); cenário 3, correspondendo à construção de um patamar intermédio (subsecção 3.3.3). Todas as intervenções são realizadas no ano inicial (2015) e não se repetem no tempo. A Tabela 3 apresenta os valores atuais de custos do cenário 0. Estes valores servem de referência e comparação à estimativa de benefícios dos restantes cenários de intervenção.

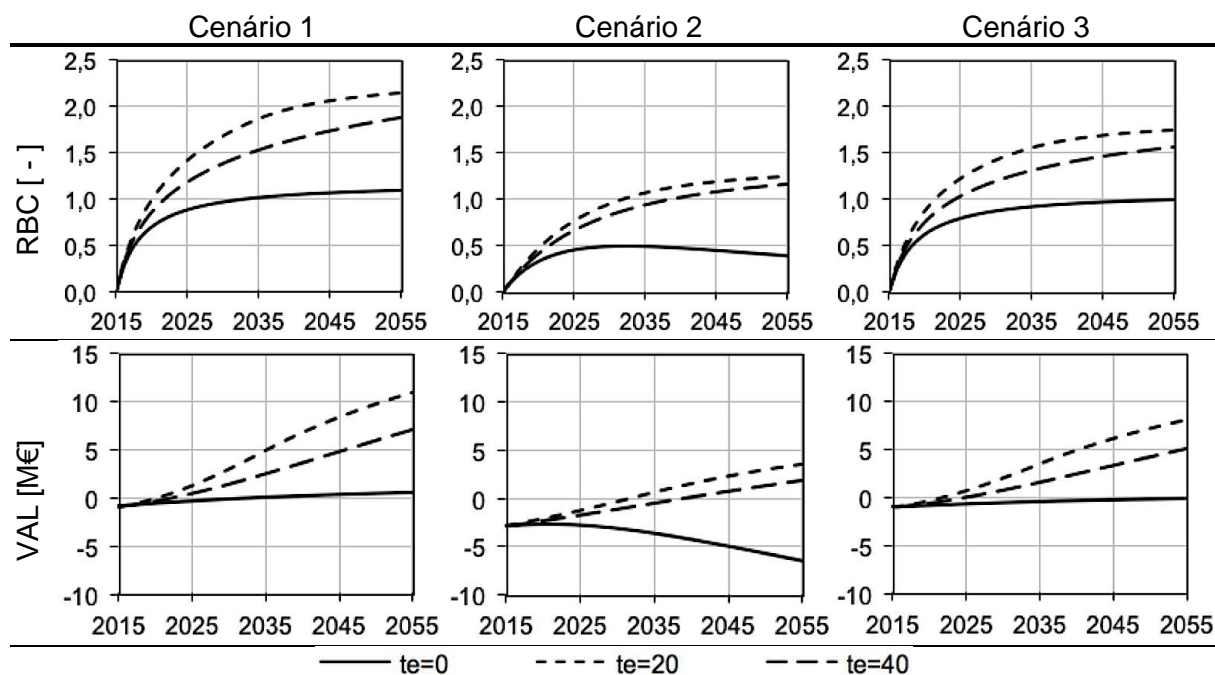
**Tabela 3.** Valores atuais de custos acumulados do cenário 0 [M€].

Ano	$t_e = 0$	$t_e = 20$	$t_e = 40$
2015	0,50	0,50	0,50
2025	4,77	7,35	6,06
2035	7,95	16,11	12,03
2045	10,32	23,91	17,83
2055	12,08	29,71	23,15

A Tabela 4 sumariza os resultados obtidos na análise custo-benefício dos cenários de intervenção considerados, cujos rácios benefício-custo e os valores atuais líquidos são representados na Figura 11, para os três tempos de estabilização do perfil de praia considerados.

**Tabela 4.** Valores da análise custo-benefício dos diferentes cenários de intervenção, por períodos de tempo de 10 anos e para tempos de estabilização do perfil de praia ( $t_e$ ) iguais a 0, 20 e 40 anos.

		$t_e = 0$				$t_e = 20$				$t_e = 40$			
		VAC [M€]	VAB [M€]	VAL [M€]	RBC [-]	VAC [M€]	VAB [M€]	VAL [M€]	RBC [-]	VAC [M€]	VAB [M€]	VAL [M€]	RBC [-]
<b>Cenário 1</b>	2015	0,82	0,00	-0,82	0,00	0,82	0,00	-0,82	0,00	0,82	0,00	-0,82	0,00
	2025	2,70	2,39	-0,31	0,89	3,16	4,51	1,35	1,43	2,92	3,46	0,53	1,18
	2035	4,10	4,17	0,07	1,02	5,71	10,71	5,00	1,88	4,88	7,46	2,58	1,53
	2045	5,14	5,50	0,36	1,07	7,89	16,33	8,44	2,07	6,64	11,51	4,88	1,73
	2055	5,92	6,48	0,57	1,10	9,52	20,51	11,00	2,16	8,16	15,32	7,16	1,88
<b>Cenário 2</b>	2015	2,82	0,00	-2,82	0,00	2,82	0,00	-2,82	0,00	2,82	0,00	-2,82	0,00
	2025	4,90	2,20	-2,70	0,45	5,46	4,21	-1,25	0,77	5,03	3,35	-1,69	0,67
	2035	6,91	3,36	-3,55	0,49	8,89	9,53	0,64	1,07	7,39	6,95	-0,44	0,94
	2045	8,76	3,88	-4,89	0,44	11,96	14,27	2,31	1,19	9,68	10,47	0,79	1,08
	2055	10,40	4,00	-6,40	0,38	14,24	17,79	3,55	1,25	11,77	13,70	1,92	1,16
<b>Cenário 3</b>	2015	0,94	0,00	-0,94	0,00	0,94	0,00	-0,94	0,00	0,94	0,00	-0,94	0,00
	2025	2,91	2,30	-0,60	0,79	3,51	4,28	0,77	1,22	3,20	3,30	0,10	1,03
	2035	4,37	4,02	-0,36	0,92	6,48	10,06	3,57	1,55	5,40	7,06	1,66	1,31
	2045	5,47	5,29	-0,17	0,97	9,07	15,27	6,20	1,68	7,42	10,84	3,42	1,46
	2055	6,28	6,24	-0,04	0,99	10,99	19,15	8,16	1,74	9,21	14,38	5,17	1,56

**Figura 11.** Ráios custo-benefício e valores atuais líquidos ao longo do tempo, para tempos de estabilização do perfil de praia iguais a 0, 20 e 40 anos.

## 5. DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONCLUSÕES

Verifica-se que, caso não haja qualquer tipo de intervenção para reduzir os galgamentos, o total dos custos associados à reabilitação das obras aderentes e aos encargos consequentes das inundações no Furadouro pode, no pior dos cenários, ascender a quase 30 milhões de euros num prazo de 40 anos, o que perfaz uma média de 750 mil euros por ano. Esta estimativa não tem em conta o eventual abandono populacional, nem o impacto

em termos turísticos e no valor imobiliário que advém da perda de areal e dos galgamentos frequentes das obras aderentes.

Em termos económicos, o cenário 2 é o menos favorável, independentemente do tempo de estabilização do perfil de praia. Isto deve-se não só ao facto do custo de intervenção ser bastante avultado (2,3M€), mas também porque a alteração da profundidade de fundo induz instabilidade no perfil de praia, o que faz com que sejam inevitáveis novos abaixamentos, mesmo no cenário em que à partida se considerava o equilíbrio ( $t_e = 0$ ). No entanto, caso o perfil de praia não esteja estável, a alimentação artificial apresenta viabilidade económica (entre 1,9M€ a 3,6M€ em 2055), com um *break-even* entre 7 a 14 anos.

De acordo com as tipologias adotadas, os cenários 1 e 3, correspondentes a intervenções de reforço das obras longitudinais aderentes, são economicamente viáveis qualquer que seja o tempo de estabilização do perfil de praia. Caso haja abaixamento, aumentar a cota de coroamento pode resultar em valores líquidos entre os 7,2M€ e os 11,0M€ num prazo de 40 anos, com um *break-even* imediato entre 3 a 5 anos. A construção de um patamar intermédio também apresenta boa viabilidade económica a curto e a médio prazo, com valores líquidos positivos a partir de 7 a 10 anos após intervenção e com resultados entre os 5,2M€ e 8,2M€ a 40 anos. Verifica-se uma rentabilidade superior no cenário 1, devido ao seu menor custo de intervenção e à sua maior eficiência na redução dos galgamentos. No entanto, não foram tidos em conta os impactes sociais e económicos referentes ao bloqueio visual e paisagístico do aumento da altura de coroamento, pelo que se considera que o cenário 1 possa ser encarado como menos favorável relativamente ao cenário 3.

Conclui-se que, independentemente do tempo de estabilização do perfil de praia, urge intervir em obras longitudinais aderentes que são galgadas frequentemente, principalmente se se antevê um agravamento dessa frequência. A escolha do tipo de intervenção deverá ser bem fundamentada, de forma a garantir a sua eficiência e viabilidade económica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, P. (2011). *Análise Económico-Ambiental de Alimentação Artificial de Praias*. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente. Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro. Aveiro.
- Birkemeier, W.A. (1985). Field Data on Seaward Limit of Profile Change. *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering* 111(3), 598-602.
- Burcharth, H., Hughes, S. (2011). Fundamentals of Design. In *Coastal Engineering Manual*. Chapter 5 of Part VI. Washington D.C., USA.
- Carpinteiro, F. (2009). *Transposição Artificial de Areias na Barra de Aveiro*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro. Aveiro.
- CERC (1984). *Shore Protection Manual*. Ed. IV. Volume 1. Coastal Engineering Research Center, Waterways Experiment Station. USACE. Vicksburg, Mississippi.
- CIRIA, CUR, CETMEF (2007). Design of Marine Structures. In *The Rock Manual, The Use of Rock in Hydraulic Engineering*, Chapter 6. Ed. II. CIRIA. London, United Kingdom.



- Coelho, C. (2005). *Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira*. Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro. Aveiro.
- Dean, R.G. (1977). *Equilibrium Beach Profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts; Department of Civil Engineering*. Ocean Engineering Report n.º 12. University of Delaware. Newark, USA.
- Eurotop (2007). *Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*. 73<sup>rd</sup> Ed. Die Küste. Langen, Germany.
- Fontão, F. (2008). *Intervenções de Defesa em Zonas Costeiras*. Projeto de Final de Mestrado em Engenharia Mecânica. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro. Aveiro.
- Fowler, J. (1992). Scour Problems and Methods for Prediction of Maximum Scour at Vertical Seawalls. Technical report n.º CERC-92-16. Coastal Engineering Research Center, Waterways Experiment Station. USACE. Vicksburg, Mississippi.
- Hallermeier, R.J. (1981). Terminal Settling Velocity of Commonly Occurring Sand Grains. *Sedimentology* 28(6), 859-865.
- Hughes, S., Fowler, J. (1991). Wave-Induced Scour Prediction at Vertical Walls. In *Proceedings of Coastal Sediments '91*, Volume 2. Seattle, Washington D.C. pp. 1886-1900.
- McDougal, W., Kraus, N., Ajiwibowo, H. (1996). The Effects of Seawalls on the Beach: Part 2, Numerical Modelling of Supertank Seawall Tests. *Journal of Coastal Research* 12(3), 702-713.
- Pereira, C., Coelho, C. (2011). *Base de Dados da Ação Marítima Sobre o Litoral: Trechos Esmoriz-Furadouro e Vagueira-Mira*. Relatório técnico no âmbito do projeto ADAPTARia (Não publicado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro. Aveiro.
- Powell, K., Whitehouse, R. (1998). The Occurrence and Prediction of Scour at Coastal and Estuarine Structures. In *33<sup>rd</sup> MAFF Conference of River and Coastal Engineers*. Keele University. United Kingdom. pp. 3.3.1-3.3.13.
- Rijn, L.C. (1984). Sediment Transport: Part I – Bed Load Transport, Part II – Suspended Load Transport, Part III – Bed Forms and Alluvial Roughness. *Journal of Hydraulic Engineering* 110(10), 1431-1456, 110(11), 1613-1641, 110(12) 1733-1754.
- Roebeling, P., Rocha, J. (2015). *Cost-Benefit Analysis of Coastal Erosion Adaptation Pathways along the Barra-Vagueira Coastal Stretch*. BASE Project – Bottom-Up Climate Adaptation Strategies for Europe. University of Aveiro. Aveiro.
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of Marine Sands: a Manual for Practical Applications*. Thomas Telford. London, United Kingdom.
- Teixeira, N.J.S. (2014). *Estudo do Limite de Espreadimento das Ondas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro. Aveiro.
- Waal, J.P., van der Meer, J.W. (1992). Wave Run-Up and Overtopping on Coastal Structures. In *Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Coastal Engineering Conference*. Venice, Italy. pp. 1758-1771.
- Zerbe, R.O., Dively, D.D. (1994). *Benefit-Cost Analysis in Theory and Practice*. Harper Collins College Publishers. New York, USA.