

COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE OBRAS LONGITUDINAIS ADERENTES E QUEBRAMARES DESTACADOS SUBMERSOS

Carlos Fernandes¹; Carlos Coelho^{1,2} e Márcia Lima^{1,2}

¹Dep. de Engenharia Civil e ²RISCO, Universidade de Aveiro, 3810-193, Aveiro, Portugal.
sousacastro@ua.pt, marcia.lima@ua.pt, ccoelho@ua.pt.

RESUMO

Os problemas de erosão costeira ao longo do litoral português têm aumentado a exposição das obras longitudinais aderentes à ação direta da agitação marítima, sendo cada vez mais comum os relatos de galgamentos e inundações costeiras. Em alternativa a estas obras, são referidos com frequência os quebramares destacados, capazes de dissipar a energia da onda em zonas mais afastadas da linha de costa. Os impactos destas obras e os custos que lhes estão associados são de difícil avaliação, gerando discussão na comunidade técnica e científica. Neste trabalho procede-se à avaliação do grau de dissipação da energia da agitação marítima, através do espriamento das ondas no talude das obras longitudinais aderentes, ou do coeficiente de transmissão nos quebramares destacados. Desta forma, comparam-se a eficácia de diferentes soluções na redução da frequência de galgamentos. Procede-se também à avaliação do impacto destas estruturas na evolução da linha de costa, com recurso ao modelo numérico de evolução da linha de costa GENESIS. Verifica-se que a dimensão das obras necessária para que as estruturas limitem a ocorrência de galgamentos depende do clima de agitação incidente, pelo que a melhor solução para um determinado cenário, pode não representar a melhor solução para outro cenário de agitação incidente. Da mesma maneira, a dimensão e localização das obras condiciona a evolução da linha de costa na vizinhança da estrutura, com impacto na adoção da solução que mais mitiga a erosão.

Palavras-Chave: Espriamento, galgamento, perfil transversal, posição da linha de costa, modelação numérica.

1. INTRODUÇÃO

As zonas do litoral enfrentam cada vez mais problemas de erosão costeira associados ao balanço sedimentar negativo e ao recuo da linha de costa. Face a estes problemas, tem-se optado pela adoção de uma política de proteção, de modo a evitar a exposição dos aglomerados urbanos que se encontram em risco de sofrer a ação direta da agitação marítima. Com a construção de obras de defesa costeira, as zonas diretamente intervencionadas são protegidas, mas as zonas vizinhas podem ser afetadas com a antecipação ou agravamento da situação de erosão. É por isso essencial realizar um balanço abrangente das vantagens e desvantagens das diferentes estratégias de proteção costeira. Este trabalho discute alguns dos impactos da proteção costeira com recurso a obras longitudinais aderentes e a quebramares destacados submersos.

A decisão de construir uma estrutura costeira deve basear-se numa análise da evolução da linha de costa registada no passado, e da evolução estimada para o futuro. Os processos físicos que causam a erosão devem ser devidamente identificados (Rijn, 2013). As alternativas de intervenção de defesa costeira assumem vantagens e desvantagens. As obras longitudinais aderentes, para além de terem como função principal fixar a linha de costa com o alinhamento pretendido, previnem/atenuam galgamentos e inundações. Os quebramares destacados são capazes de dissipar a energia da onda em zonas mais afastadas da linha de costa, interferindo com a propagação da agitação e a dinâmica sedimentar. Por serem estruturas construídas em

zonas afastadas da linha de costa, os impactos e os custos que lhes estão associados são de mais difícil avaliação, gerando discussão na comunidade técnica e científica.

O principal objetivo deste estudo foi avaliar o comportamento das estruturas e a sua resposta, tanto no sentido de dissipação de energia à ação direta das ondas (comportamento avaliado no perfil transversal), como no impacto na evolução da linha de costa na vizinhança da intervenção, a curto/médio prazo (comportamento avaliado em planta). Na perspetiva de dar resposta aos objetivos apresentados, procedeu-se à estimativa do espraçamento num perfil de praia tipificado e em obras longitudinais aderentes com diferentes configurações, modificando fatores como a inclinação do talude da obra, a cota de coroamento e a altura de onda incidente. No estudo dos quebra-mares destacados, avaliou-se o coeficiente de transmissão da onda que resulta das diferentes configurações físicas que os quebra-mares poderão assumir. A evolução da linha de costa após a construção das estruturas de defesa costeira (obras longitudinais aderentes e quebra-mares destacados submersos) foi avaliada para um clima de agitação específico num horizonte temporal de 5 anos. Foram testadas diferentes configurações de obras, com recurso ao modelo numérico GENESIS (*Generalized Model for Simulating Shoreline Change*) (Hanson e Kraus, 1989). Os principais resultados e conclusões são apresentados no final deste documento.

2. PERFIL TRANSVERSAL (ESPRAIAMENTO)

As ondas ao longo da sua propagação sofrem vários processos de transformação. O último destes processos corresponde ao espraçamento após a rebentação da onda. O espraçamento define a cota máxima atingida, em relação ao nível de repouso, por uma onda marítima, na interação com o talude de uma praia ou estrutura costeira. O fenómeno de espraçamento é dependente da reflexão das ondas e dos efeitos tridimensionais da batimetria, bem como da porosidade, rugosidade, permeabilidade e do nível freático (Coelho, 2005), apresentando por isso um comportamento diferente, dependendo do tipo de fronteira sólida onde ocorre. A estimativa da altura de espraçamento pode ser realizada através de diferentes formulações e parâmetros (Teixeira, 2014).

Ocorre galgamento sempre que a cota de espraçamento de uma onda é superior à cota de coroamento da fronteira sólida onde a onda incide. Geralmente, os galgamentos ocorrem no decurso de temporais, com a sobre-elevação do nível do mar, o aumento da altura das ondas e a amplificação da força dos ventos, que favorecem a invasão da faixa costeira. Com o objetivo de identificar situações de galgamento através da comparação da altura de onda incidente na estrutura com o respetivo nível de espraço máximo, pretendeu-se testar diferentes cenários de agitação, tanto para praias naturais como para praias protegidas com obras longitudinais aderentes ou quebra-mares destacados.

2.1 Praia Natural

Procedeu-se inicialmente à definição da forma de um perfil de praia tipificado, para a análise genérica dos galgamentos nas estruturas de defesa costeira. Segundo Dean (1977), a forma do perfil transversal da praia é o produto de um complexo sistema de forças e processos, incluindo o suprimento de sedimentos e a hidrodinâmica. Se o sistema de forças se puder manter constante, o perfil de praia tenderá para um equilíbrio tridimensional, de mais fácil previsão. A Equação 1, Dean (1977), expressa a profundidade (h) de um ponto a uma distância horizontal do início do perfil proposto (y), a partir de um parâmetro que depende do diâmetro mediano do sedimento (A). Este modelo sugere uma declividade média para representar todo o perfil de praia.

$$h = A * y^{2/3} \quad (1)$$

Neste estudo foi considerado o valor de $A=0,127$, correspondendo a um diâmetro mediano dos sedimentos de aproximadamente 0,3mm. O resultado da aplicação da Equação 1 corresponde à parte submersa do perfil total de praia genérico avaliado ao longo deste estudo. Para a parcela emersa do perfil foi definido um talude com declive constante de 8% (4,57°) até à cota

que define o limite da praia. O limite vertical admitido para o galgamento foi definido 5m acima do nível médio do mar (N.M.M.). Supôs-se a superfície do nível do mar à cota +2m e a cota máxima do perfil de praia de +7m, o que corresponde a uma extensão de praia emersa (entre as cotas +2m e +7m) de 62.55m. Desta forma, o perfil genérico adotado para a praia natural corresponde na parte submersa ao perfil de Dean, para $A=0.127$, e para cotas superiores a 0m corresponde a um talude com inclinação constante de 8% (Figura 1).

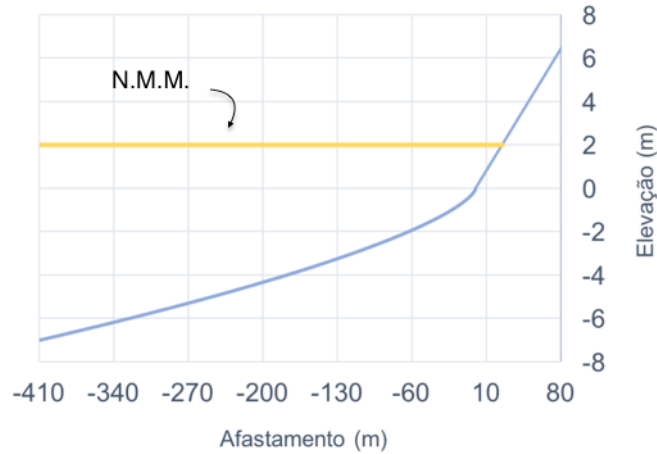


Figura 1 - Perfil transversal adotado

Teixeira (2014) testou várias formulações de estimativa do espraçamento, tanto de praias naturais como praias protegidas com obras longitudinais aderentes, no sentido de caracterizar e generalizar uma equação para representar o comportamento do espraçamento ao longo do litoral noroeste Português. Na Equação 2, $R_{máx}$ traduz o espraçamento máximo numa praia natural, sem obras de defesa costeira.

$$R_{máx} = 2.90 * H_s * \xi \quad (2)$$

Esta estimativa de espraçamento depende da altura de onda significativa (H_s) e do número de Iribarren (ξ), estimado através da Equação 3. A altura significativa da onda corresponde à média do terço de ondas mais altas, e pode ser considerada ao largo ou na zona de rebentação. Esta diferenciação local do conceito de altura significativa da onda produz resultados que podem variar entre 10% a 15%, quando utilizada para uma mesma formulação (Eurotop, 2016).

$$\xi = \frac{\tan(\beta)}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \quad (3)$$

Na Equação 3, L representa o comprimento de onda e β o declive do talude da praia. No número de Iribarren está também indiretamente presente o período de onda, T , através da definição do comprimento de onda ao largo (Equação 4).

$$L = \frac{g * T^2}{2\pi} \quad (4)$$

Na equação 4, g representa a aceleração da gravidade.

O espraçamento máximo de uma onda numa praia natural é sensível à alteração dos parâmetros que caracterizam a onda, bem como à inclinação da própria praia. Para testar variados tipos de solução e de combinações de agitação fez-se variar a altura de onda significativa entre 4m e 12m. Para cada altura de onda foi admitida a combinação com três valores de período de onda, 8, 10 e 12 segundos. Para a mesma altura de onda, verifica-se um aumento do espraçamento com o aumento do período de onda (Figura 2). No caso extremo ($H_s=12m$), para os períodos de 8 e 12s obtém-se uma diferença de 4m no espraçamento.

Assumindo o perfil de praia apresentado na Figura 1, em apenas uma das combinações de climas de agitação avaliados não sucede galgamento do limite da praia (cenário de altura de onda de 4m e período de 8s), obtendo-se um valor de espraçamento de 4,63m (abaixo dos 5m considerados como limite para ocorrência de galgamentos).

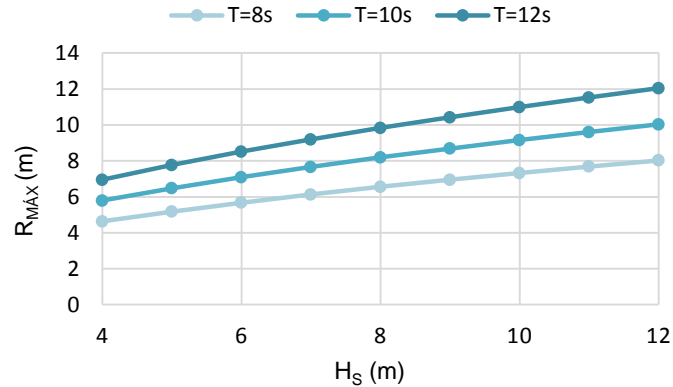


Figura 2 - Espraçamento máximo em função de H_s, para diferentes valores de T

Nos cenários com espraçamento a exceder os 5m optou-se pela implementação de estruturas rígidas (obras longitudinais aderentes e quebramares destacados) como forma de reduzir o espraçamento e consequentemente, os respetivos galgamentos. De seguida apresenta-se o estudo da eficácia das obras longitudinais aderentes e dos quebramares destacados, considerando as características já adotadas para a praia e cenários de climas de agitação.

2.2 Obra Longitudinal Aderente

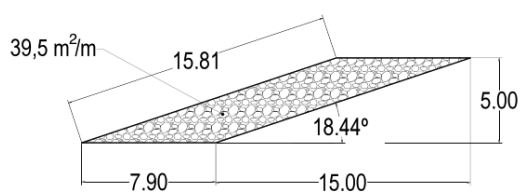
Esta solução estrutural consiste na colocação de enrocamento (ou blocos de betão) ao longo de uma face da duna ou num talude inclinado do perfil da praia, reduzindo a ação das ondas, por absorção da energia nas faces e espaços vazios dos blocos de enrocamento (Coelho, 2005). Ao projetar uma obra longitudinal aderente, a elevação da cota de coroamento deve ser suficientemente alta para evitar galgamentos em caso de tempestades, e a profundidade da berma inferior deve ser baixa o suficiente para evitar o desmoronamento por ação de escorregamento. De especial preocupação deve ser a construção de uma obra longitudinal aderente numa zona costeira que experimenta uma tendência de erosão, pois haverá tendência para a redução da extensão do areal em frente à obra (Dean e Dalrymple, 2001).

Na Figura 3 apresenta-se o perfil tipo utilizado para testar diferentes soluções de obras longitudinais aderentes. A cota de coroamento foi fixada nos 7m, considerando que o N.M.M. corresponde aos 2m. Das dimensões apresentadas no perfil tipo, apenas a inclinação do talude foi testada, assumindo quatro inclinações geralmente utilizadas neste tipo de solução (V/H = 1/3, 1/2, 2/3 e 1/1). Com a alteração da inclinação do talude alteram-se as dimensões da estrutura, nomeadamente a área da seção transversal. As soluções com o talude mais inclinado são as que correspondem a uma menor área de seção transversal.

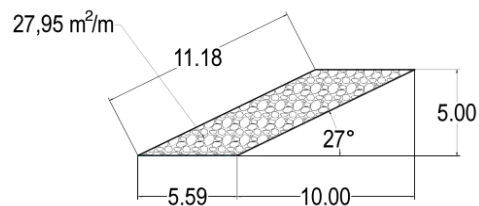
Para o cálculo do espraçamento sobre a obra longitudinal aderente adotou-se a proposta de Teixeira (2014), de acordo com a Equação 5.

$$R_{m\acute{a}x} = 0.41 * H_s * \xi \quad (5)$$

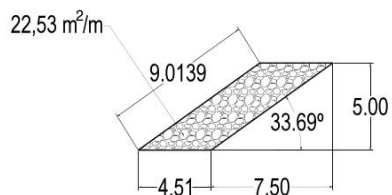
Esta equação considera os parâmetros já referidos na Equação 2, alterando apenas o coeficiente empírico para um valor aproximadamente 7 vezes menor, para as mesmas condições de agitação. O resultado do espraçamento depende do número de Iribarren (Equação 3) e consequentemente da inclinação do talude. Na Figura 4 apresentam-se os resultados da estimativa do espraçamento para as 4 situações de inclinação do talude da estrutura testadas.



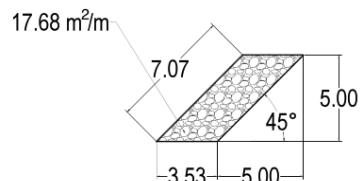
a) Talude de 1/3 (V/H)



b) Talude de 1/2 (V/H)



c) Talude de 2/3 (V/H)



d) Talude de 1/1 (V/H)

Figura 3 - Perfil transversal das obras longitudinais aderentes testadas, com indicação das respectivas dimensões (expressas em metros) e áreas da seção transversal

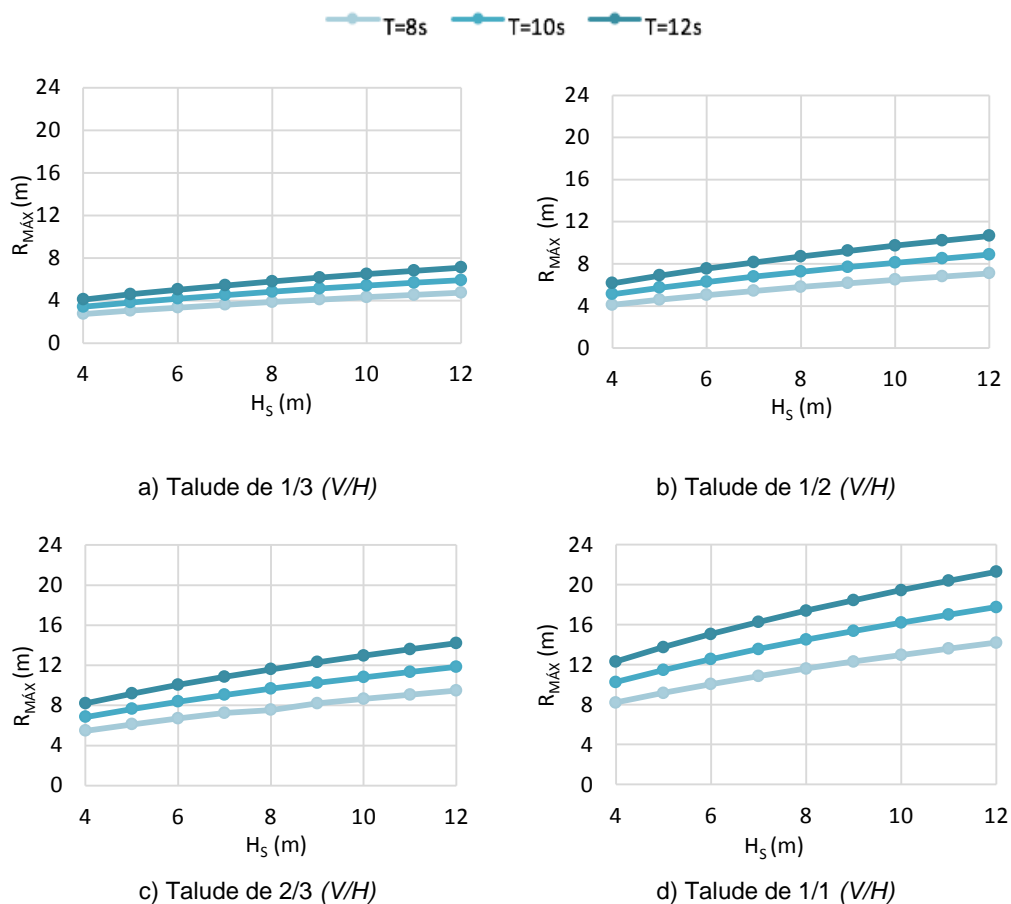


Figura 4 - Espraioamento sobre a obra longitudinal aderente, para diferentes inclinações do talude

Novamente, a diferença entre os valores de espraimento máximo para a mesma altura de onda, considerando períodos de onda diferentes, aumenta para maiores valores de onda incidente. A maior inclinação do talude da obra conduz a um aumento da altura de espraimento. Quando analisados os resultados por inclinação, nota-se que a solução com uma inclinação de 1/3 (V/H) é a mais mitigadora de galgamentos, já que deixam de se verificar galgamentos em aproximadamente 60% das combinações de agitação testadas, sendo eficaz sempre que se considera o período de onda de 8s. Na solução com uma inclinação de talude de 1/2 (V/H), o espraimento máximo é menor que 5m apenas para duas das combinações de agitação, a onda de 4m e de 5m de altura, ambas com um período de 8s. Em todas as restantes situações, a altura de espraimento é superior à cota de coroamento da estrutura.

2.3 Quebramar Destacado

Os quebramares destacados (emersos ou submersos) também permitem mitigar a ocorrência de galgamentos ao longo da linha de costa. No caso em estudo foram apenas avaliadas soluções em que a cota de coroamento da estrutura não ultrapassa o N.M.M. Na proximidade destas estruturas, os processos físicos de transformação da onda incluem o empolamento, a refração, a difração, a dissipação de energia devido ao atrito de fundo, a rebentação, a interação entre ondas e correntes, a reflexão, a transmissão através e sobre a estrutura e a alteração espectral devido à interação entre ondas (Huang *et al*, 2004; Nunes, 2012).

A reflexão e a difração das ondas devido à presença do quebramar destacado foi abordada com auxílio de campos de onda direcionais, em que os espectros direcionais estimados na frente de um quebramar destacado podem ser separados em duas partes no domínio espacial. Destes estudos resultou que se pode obter uma estimativa dos coeficientes de reflexão e de transmissão da onda incidente sobre o quebramar (Huang *et al*, 2004). Neste estudo pretendeu-se apenas calcular o coeficiente de transmissão (K_t) associado a diferentes perfis de quebramares destacados, de forma a estimar as características de onda a sotamar do quebramar e por fim, o espraimento máximo esperado sobre a praia. Na Figura 5 ilustra-se o perfil tipo adotado para a estrutura.

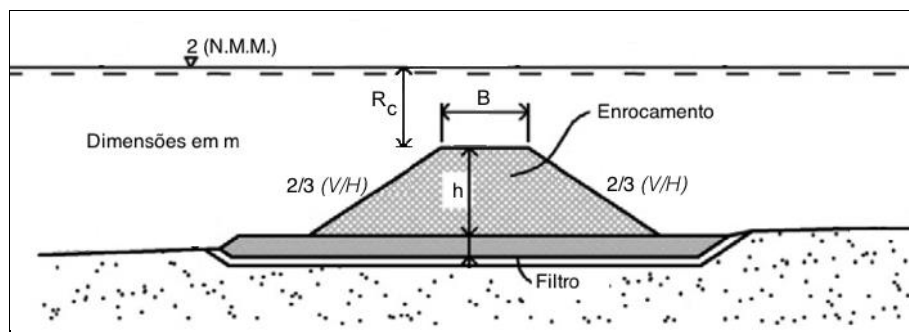


Figura 5 - Perfil tipo de quebramar destacado submerso (adaptado de Burcharth *et al*, 2007)

Nos cenários avaliados manteve-se sempre submersa a cota de coroamento do quebramar. Desta forma, R_c , correspondente à cota de coroamento da estrutura, assumiu valores entre +1m e -4m (distâncias entre a superfície livre da água e o coroamento do quebramar submerso entre 1 e 6m). A altura da estrutura (h) variou desde um mínimo de 1m até ao máximo de 6m, já que a posição da estrutura foi fixada a 3 diferentes profundidades (3, 5 e 7m), consideração importante também na análise do comportamento em planta. Relativamente à largura de coroamento (B), assumiram-se valores de 5, 10 e 15m. A escolha dos materiais para a construção de obras de defesa costeira influencia significativamente a longevidade de um projeto. A aplicação de vários materiais em diferentes condições de agitação permitiu que, ao longo dos anos, se adquirisse conhecimentos nesta área (Pereira, 2008). Os quebramares destacados são frequentemente materializados em enrocamento, com aplicação em simultâneo ou não de geotêxteis, não excluindo a possibilidade de serem utilizados blocos de betão.

Variantes como a altura de onda incidente (H_i), largura do coroamento do quebramar (B), a

profundidade de coroamento (R_c) e o tamanho dos blocos utilizados nas camadas de manto resiste (D_m) alteram o coeficiente de transmissão da estrutura e desta forma a sua eficiência (Debski e Loveless, 1997; Nunes, 2012). O cálculo do coeficiente de transmissão, K_t , pode seguir diferentes formulações propostas na bibliografia. Nem todas as formulações dependem das mesmas variáveis e apresentam o mesmo tipo de resultados, evidenciando a complexidade dos fenómenos envolvidos na caracterização da hidrodinâmica envolvente a um quebramar destacado submerso. Foi realizada uma análise de sensibilidade aos resultados do coeficiente de transmissão em função de diferentes formulações e parâmetros. A Figura 6 representa a compilação dos valores obtidos para K_t com base nas equações propostas por van der Meer e Daemen (1994), Allsop (adaptado por Taveira-Pinto, 2001), Goda *et al.* (1967), d'Angremond *et al.* (1996), Buccino e Calabrese (2007), designadas respetivamente por F1, F3, F4, F5 e F6, permitindo a perceção do comportamento entre formulações, em função do aumento da profundidade R_c .

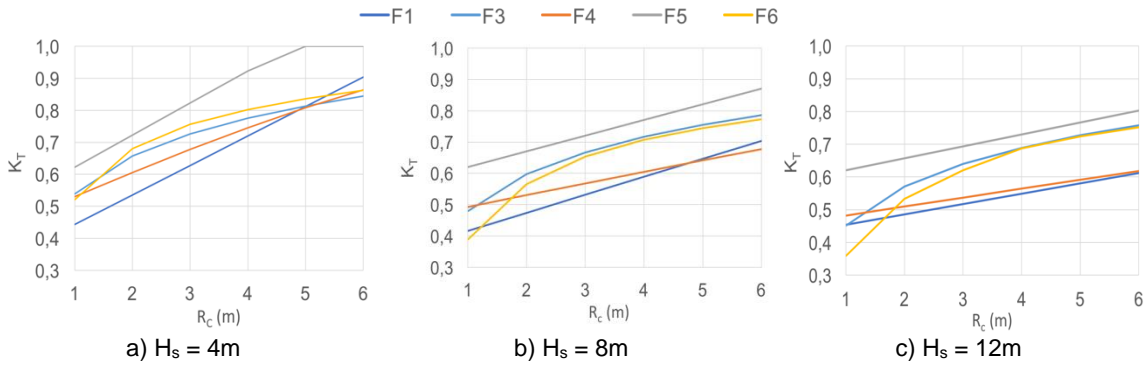


Figura 6 - Relação entre K_t e R_c , com base em diferentes formulações

A eficiência da estrutura é superior nas maiores alturas de onda, originando valores de K_t menores. Após a análise de resultados entre formulações, optou-se pela aplicação da equação F4, proposta por Goda *et al.* (1967), com base empírica e comportamento regular e com resultados intermédios entre as formulações avaliadas (Equação 6). A formulação apresenta dois parâmetros empíricos (α e β), tendo-se considerado os valores sugeridos pelos autores, respetivamente 2,6 e 0,15, associados a uma inclinação dos taludes do quebramar de 2/3 (V/H).

$$K_t = 0,5 \left(1 - \sin \left(\frac{\pi}{2\alpha} \left(\frac{R_c}{H_i} + \beta \right) \right) \right) \quad (6)$$

Considerando os cenários de agitação em estudo e assumindo as características da agitação após o atravessamento do quebramar, avaliou-se o espreamento da onda transmitida, sobre o perfil da praia sem obra longitudinal aderente junto à linha de costa (Equação 2). No estudo dos cenários avaliados foi assumido que o período de onda associado à onda transmitida se mantém igual ao da onda incidente e não é alterado pela estrutura.

Os resultados obtidos são apresentados na Figura 7, sendo perceptível que a diferença entre alturas de espreamento aumenta de forma uniforme com o aumento do período de onda. Aumentando a profundidade do coroamento do quebramar destacado (R_c) também aumenta o $R_{máx}$, sendo este comportamento mais evidente para casos com maior R_c . Assim, a eficácia da estrutura diminui com o aumento da profundidade de coroamento, R_c , e pelo contrário, se o coroamento do quebramar destacado se aproximar do nível da superfície livre da água do mar, a redução da altura de espreamento é mais efetiva.

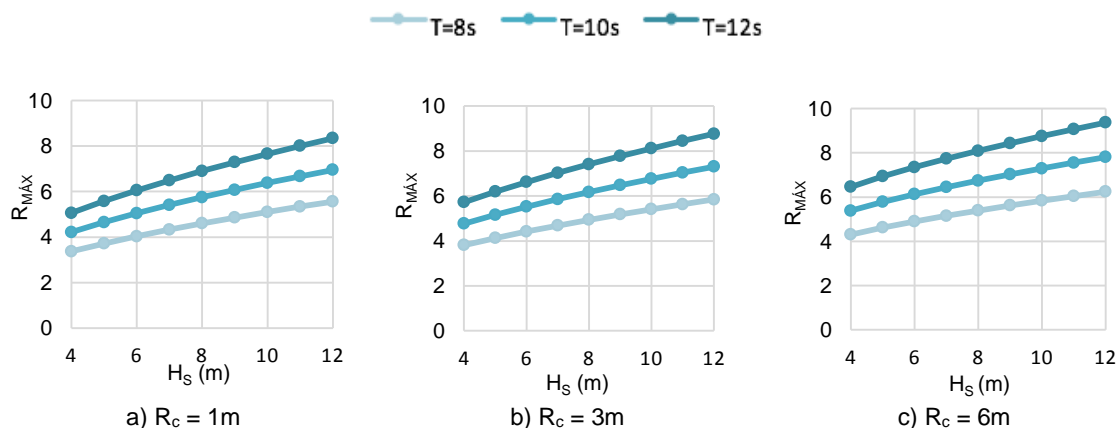


Figura 7 - Espreadimento em função da altura e do período de onda, para diferentes cotas de coroamento

3 MODELAÇÃO DA LINHA DE COSTA

A faixa costeira entendida como uma área de interface entre os subsistemas terra-mar, constitui uma região dotada de grande dinâmica, muitas vezes em conflito com a presença humana por efeito da erosão e do recuo da linha de costa, fenómeno que tem vindo a resultar na perda de áreas de valor ecológico-ambiental e económico (Pedrosa, 2012). Silvester (1974) menciona que se efetuaram testes que indicam que as praias em frente às obras de defesa costeira recuarão ao ponto de serem inexistentes, devido à ação de ondas estacionárias resultantes da reflexão. Desta maneira, é necessário o estudo dos recuos da linha de costa diretamente relacionados com a implementação de obras rígidas de defesa costeira, nomeadamente as obras longitudinais aderentes e os quebramares destacados submersos.

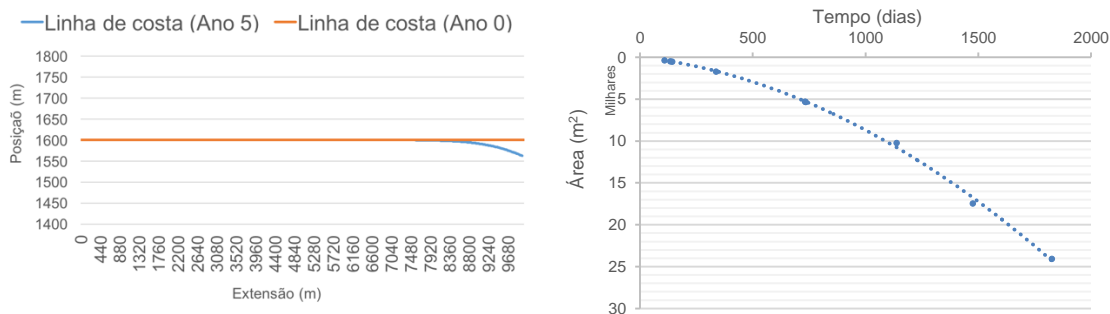
3.1 Considerações Iniciais

Para modelação numérica de cenários de evolução da linha de costa utilizou-se o modelo NEMOS, que contém uma série de programas específicos, em particular o GENESIS, *GENERALized model for Simulating Shoreline change*, que foi desenvolvido pelo U.S. Army's Corps of Engineers (Hanson e Kraus, 1989). Este modelo simula as alterações da posição da linha de costa de uma determinada região (um a dez quilómetros de extensão) durante um longo período, de meses a anos, causadas principalmente pela ação das ondas e pela presença de estruturas. Por efeito da rebentação das ondas incidentes com uma dada orientação com a linha de costa é gerado transporte longitudinal e os gradientes entre os volumes que entram e saem num determinado trecho costeiro fazem avançar ou regredir a linha de costa. O sistema é generalizado, no sentido em que o modelo pode ser usado para simular as alterações no litoral com uma grande variedade de configurações de praia e de estruturas na costa. Nos pressupostos de cálculo, o modelo assume que a forma do perfil transversal se mantém constante, existindo apenas movimentos de translação da posição da linha de costa para terra ou para o mar (Coelho, 2005; Simões, 2013).

Os testes relativos ao comportamento da linha de costa sob o efeito de diferentes cenários de obras longitudinais aderentes e quebramares destacados foram efetuados com recurso ao modelo GENESIS, considerando diferentes cenários de posição das obras e da sua dimensão. A modelação desenvolvida teve por base a representação de uma linha de costa linear numa extensão de 10km, com batimetria e topografia regular, de acordo com o perfil transversal da Figura 1. A agitação ao largo foi considerada constante, com um ângulo de proveniência de 10° em relação à linha de costa. Os cenários avaliados assumiram um horizonte temporal de 5 anos de análise.

Para referência, procedeu-se à simulação da evolução da linha de costa num cenário que não considera nenhuma estrutura de defesa costeira. Neste cenário, a condição fronteira na extremidade direita da área modelada assumiu um recuo à velocidade de 0.02m/s. A Figura 8

apresenta os resultados no cenário de referência, sem intervenções de defesa costeira. Verifica-se que ao fim dos 5 anos de simulação a erosão se estende até cerca de 2,3km da fronteira da área de estudo com uma área total de recuo de aproximadamente 24 051m² e um recuo máximo de 1562m. As obras de defesa costeira consideradas nos restantes cenários apresentam o eixo principal a 2km da extremidade direita da área modelada.



a) Posição da linha de costa ao fim de 5 anos

b) Área perdida ao longo do tempo

Figura 8 - Resultados da simulação do cenário de referência

3.2 Obra longitudinal aderente

A Figura 9 ilustra a resposta tipo esperada a sotamar de uma obra longitudinal aderente, onde existe uma maior erosão antecipada pela presença da estrutura. Com base no conhecimento do comportamento esperado após a implementação de uma obra longitudinal aderente, definiram-se três cenários considerando o comprimento da estrutura (100, 200 e 400m). O eixo de implementação da estrutura foi definido no mesmo alinhamento dos cenários com quebra-mares destacados, 2km afastado da extremidade direita da área de estudo, mas também se testaram os mesmos cenários de comprimento de obra, com a localização da estrutura centrada no eixo a 1km de distância da extremidade direita da fronteira da área de estudo.

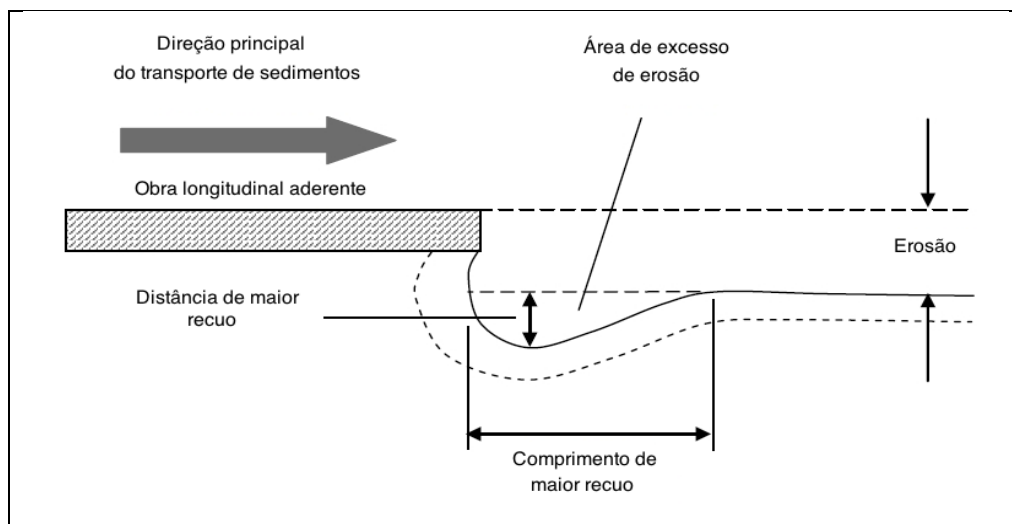


Figura 9 - Resposta da linha de costa à presença de uma obra longitudinal aderente

3.3 Quebramar Destacado

A relação entre o comprimento e a distância do quebramar destacado à linha de costa, depende das características do plano de difração gerado. De facto, esta relação é bastante relevante nos quebra-mares destacados. Se o comprimento da estrutura for excessivo poderá verificar-se difração extensa em torno das duas extremidades da estrutura, originando a

deposição de areias e a formação do tómbolo em grandezas não pretendidas, que corresponde à retenção de uma parcela significativa do transporte sólido. Pelo contrário, se o comprimento do quebramar for pequeno relativamente à distância à linha de costa, a variação da altura de onda ao longo da praia será reduzida e as correntes de difração poderão não ser suficientes para se opor às correntes longitudinais, no caso da agitação marítima ser oblíqua (Taveira-Pinto, 2001). A Figura 10 representa as considerações iniciais assumidas para os cenários com quebramares destacados, bem como a tendência de alteração da posição da linha de costa num caso genérico de solução com dois quebramares. O comprimento do quebramar, L_s , variou entre 100, 200 e 400m. A distância à linha de costa, d , depende da profundidade a que se localiza a obra (3, 5 e 7m), resultando em distâncias de 115, 247 e 410m à linha de costa. Conjugaram-se ainda estes valores com 3 diferentes K_t , relacionados com diferentes cotas de coroamento da estrutura, resultando em 27 cenários simulados.

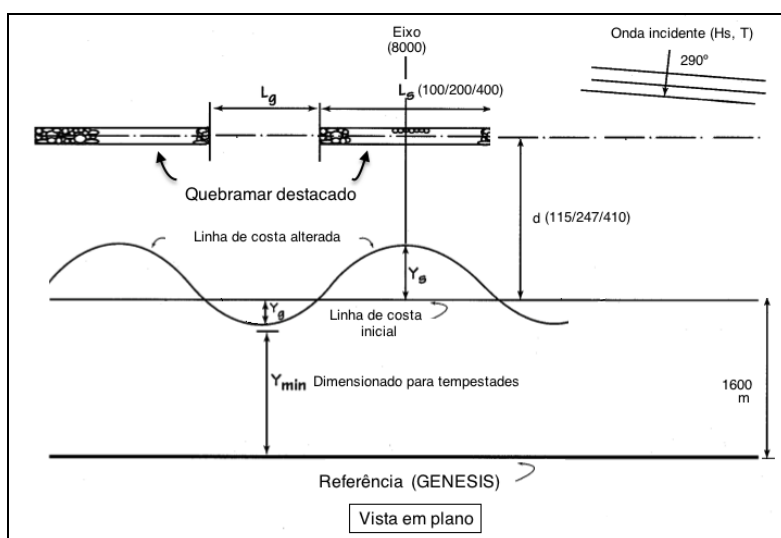


Figura 10 - Considerações na simulação de quebramares destacados submersos (adaptado de David, 2006)

Ainda na Figura 10, L_g é a distância entre quebramares, Y_{min} é a distância mínima final admitida entre a linha de costa alterada e um referencial costeiro, Y_g é o recuo da linha de costa e Y_s o avanço da mesma. As duas últimas variáveis referidas não são diretamente manipuladas, já que resultam da alteração das restantes. Como referido, estabeleceu-se uma direção fixa de proveniência da agitação, com as características físicas da onda dependentes do K_t modelado, em função da geometria transversal do quebramar em estudo e da sua localização no perfil transversal.

Dentro dos valores do K_t que se apuraram na fase anterior do corrente estudo (seção 2.3), optou-se por adotar 3 cenários que representassem as várias gamas de valores do K_t , associados à cota de coroamento (R_c). Os valores assumidos para a variação do d resultam na definição do afastamento à linha de costa (profundidades de 3, 5 e 7m e distâncias de 115, 247 e 410m, respetivamente). Na análise de quebramares destacados resultam assim 27 cenários, que conjugam 3 cotas de coroamento (R_c), com 3 distâncias à linha de costa (d) e 3 comprimentos de quebramares (L).

3.4 Resultados

Em primeiro lugar apresentam-se os resultados dos 27 cenários de quebramar destacado isolado. Os valores que se apresentam correspondem à área de erosão ou acreção. Nos diversos cenários, as variações registadas na posição da linha de costa assumem todas o mesmo comportamento, mas com diferentes magnitudes, permitindo definir 3 zonas distintas. Quantificam-se as áreas de erosão junto à fronteira da área modelada e a sotamar da obra e de acreção na zona de sombra da obra, onde ocorre a formação de um tómbolo. Estas áreas foram designadas respetivamente por A_1 , A_2 e A_3 , como se indica na Figura 11.

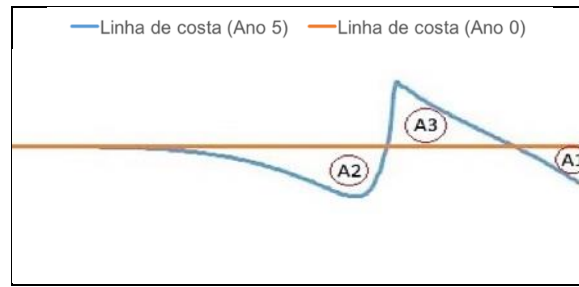


Figura 11 - Identificação das zonas de erosão (A_1 e A_2) e acreção (A_3)

A Figura 12 apresenta os resultados da análise de sensibilidade de cada parâmetro, com o intuito de representar a resposta da posição da linha de costa ao fim de 5 anos, com cada uma das características físicas da estrutura analisadas.

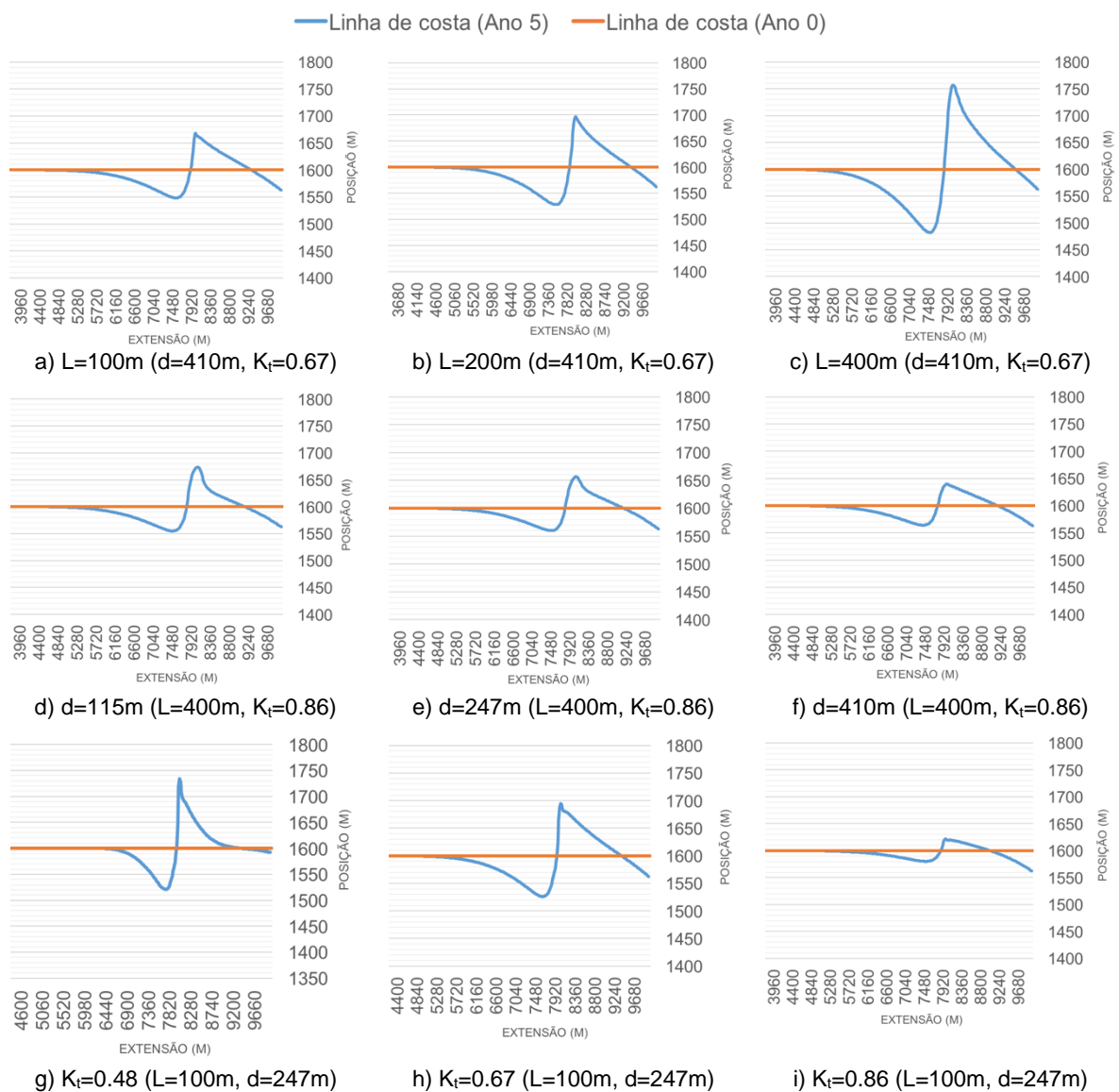


Figura 12 - Posição da linha de costa ao fim de 5 anos de simulação, variando as características físicas da estrutura, respetivamente L (a, b, c), d (d, e, f) e K_t (g, h, i)

Os resultados indicam que, com o aumento do comprimento da estrutura existe um proporcional aumento da área de formação do tombolo, bem como da distância Y_g , com efeito direto nas áreas A_3 e A_2 , respetivamente. A zona A_1 tende a não ser afetada pela extensão do quebramar. A maior distância da estrutura à linha de costa transmite um menor impacto na resposta da linha de costa. O aumento da distância provoca uma pequena diminuição das áreas de erosão e acreção. A variação do coeficiente de transmissão, K_t , tem uma influência significativa na posição da linha de costa ao fim de 5 anos de simulação. Com o aumento dos valores deste parâmetro existe uma diminuição das áreas A_2 e A_3 . Esta variação não é proporcional aos valores de K_t , pois aumenta progressivamente com o aumento do K_t (diferença entre Figuras 12h e 12i é mais evidente que entre Figuras 12g e 12h). Neste processo, a área A_1 é a única zona que tende a aumentar, verificando-se a diminuição das restantes.

Na análise dos efeitos dos quebramares destacados também se avaliou uma solução com dois quebramares. O novo quebramar foi implantado à esquerda do inicial, com uma dimensão igual à do quebramar inicial, admitindo uma distância (L_g) igual ao dobro do comprimento dos quebramares ($2L$). Os resultados associados a este cenário apresentam-se na Figura 13.

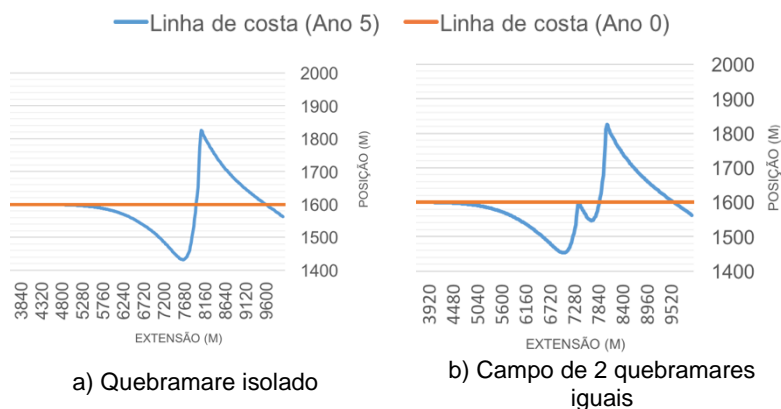


Figura 13 - Comparação da posição na linha de costa em cenários com um e dois quebramares ($L=200m$, $d=410m$, $K_t=0.48$)

O cenário com 2 quebramares revela que a área A_2 apresenta uma configuração diferente, já que a presença do segundo quebramar promove a formação de outro tombolo. No entanto, a soma total das áreas que resultam do efeito das estruturas aumenta apenas cerca de 3%.

Foram testados menos cenários de obras longitudinais aderentes, variando apenas o comprimento da estrutura e o eixo de implementação da obra (distância à fronteira de 2000m e de 1000m). Na Figura 14 apresentam-se os resultados obtidos.

Nos cenários analisados, a variação do comprimento das obras longitudinais aderentes não resulta em diferenças significativas na posição da linha de costa ao fim de 5 anos, nem consequentemente nas áreas de erosão ou acreção. Na análise realizada percebe-se que a estrutura antecipa um recuo da linha de costa no lado esquerdo da estrutura, na ordem dos 2 a 3m. Ao deslocar 1km a posição da estrutura no sentido da zona que se encontra em erosão e se pretende defender, a área de A_2 aumenta. Com esta alteração, verifica-se também um ligeiro avanço da linha de costa na frente da estrutura, que vai aumentando de forma bastante ligeira com o aumento do comprimento da obra longitudinal aderente.

Foi estudado um último cenário, que conjuga a existência em simultâneo de uma obra longitudinal aderente e de um quebramar destacado ($L=200m$, $d=410m$ e $K_t=0.48$). A obra longitudinal aderente foi localizada onde se observava o ponto de Y_g , para fixar a posição da linha de costa e reduzir a erosão a sotamar do quebramar destacado. Foram testadas soluções com 100, 200 e 400m de comprimento (Figura 15). Com o aumento das dimensões das obras aumentam de forma proporcional as áreas A_2 e A_3 .

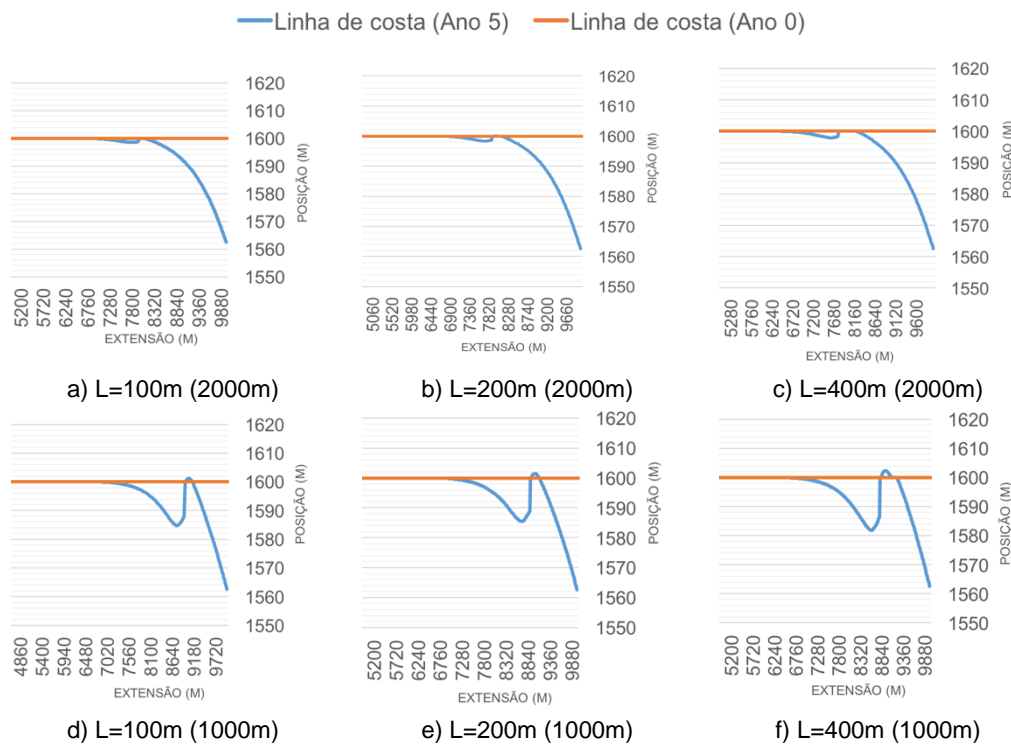


Figura 14 - Variação do comprimento da estrutura com os diferentes eixos de implementação

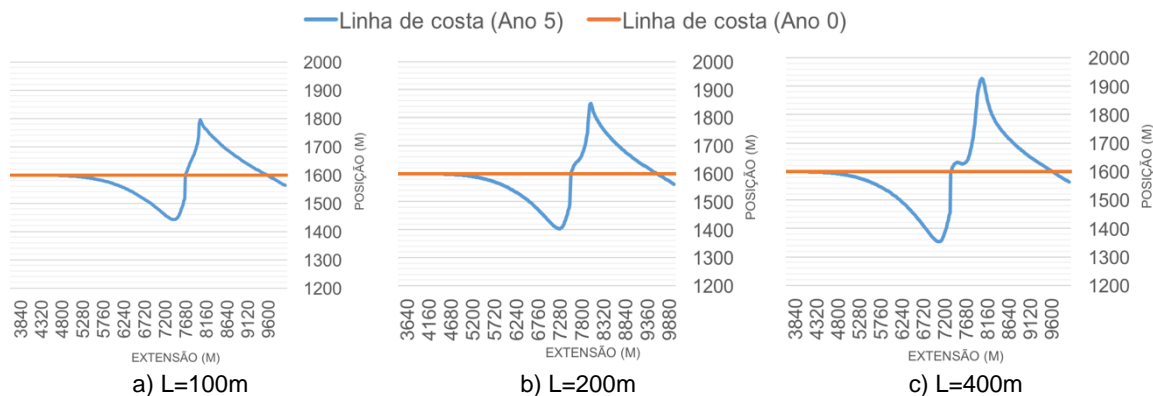


Figura 15 - Posição da linha de costa nos cenários que conjugam um quebramar destacado ($L=200m$, $d=410m$ e $K_t=0.48$) e uma obra longitudinal aderente de comprimento L igual

4. DISCUSSÃO

Em função dos resultados obtidos, apresenta-se uma análise do desempenho das estruturas em função das suas dimensões. Relativamente ao comportamento transversal, relacionou-se a altura de espraio acima da cota de coroamento de cada estrutura (ΔH) com a área transversal (A_t) que a própria estrutura apresenta (Figura 16).

Para os cenários avaliados, as obras longitudinais aderentes revelam-se menos eficazes, registando maiores alturas de espraio acima da cota de coroamento (ΔH), que aumentam para soluções com maior inclinação (menor área da seção transversal da estrutura). Apenas as soluções com $V/H=1/3$ e $V/H=1/2$ apresentam valores na mesma ordem de grandeza dos resultados dos quebramares destacados. Os resultados na Figura 16b correspondem às alturas de água que espraia acima da cota +7m no perfil de praia, após a onda ser transmitida depois da passagem pelo quebramar destacado submerso.

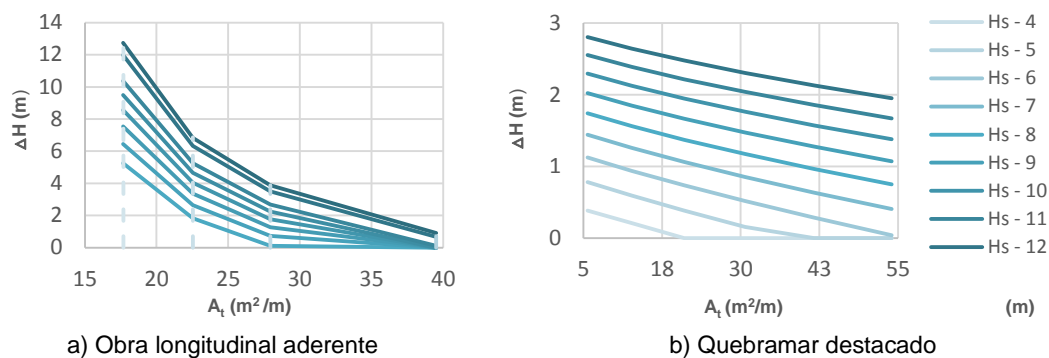


Figura 16 - Relação entre o nível de galgamento da estrutura e a sua área transversal

Se se fizer uma comparação entre os dois tipos de estruturas para a mesma área de seção transversal (por exemplo, $27,95\text{m}^2/\text{m}$), verifica-se que para ocorrer o mesmo galgamento no quebramar destacado a altura de onda a considerar tem que ser significativamente maior. Neste caso, no quebramar destacado, um ΔH de aproximadamente $2,5\text{m}$ corresponde a um H_s de 12m , e na obra longitudinal aderente, esse mesmo ΔH é resultado de uma onda com H_s de 8m . Note-se que o desempenho dos quebramares destacados é melhor nos cenários analisados, quando comparadas as áreas de seção transversal da estrutura. No entanto, nesta análise não se englobam os custos de realização e manutenção das obras, que naturalmente serão superiores em estruturas construídas ao largo e não junto à costa.

Para perceber a dimensão necessária das estruturas de forma a mitigar completamente os galgamentos, assumiu-se que a obra longitudinal aderente poderia ser elevada até à máxima cota de espreadamento. Assim, acrescentou-se a diferença de altura galgada à altura de coroamento da obra, assumindo um declive de talude de $2/3$ (V/H). No caso dos quebramares destacados foi considerada a seção transversal mais alta ($R_c=1\text{m}$) e se necessário, foi associada uma obra longitudinal aderente no perfil de praia. A Figura 17 representa a relação entre a área transversal mínima necessária para mitigar por completo os galgamentos e a altura de onda incidente. Os resultados apresentam-se por período de onda, revelando algumas diferenças de comportamento.

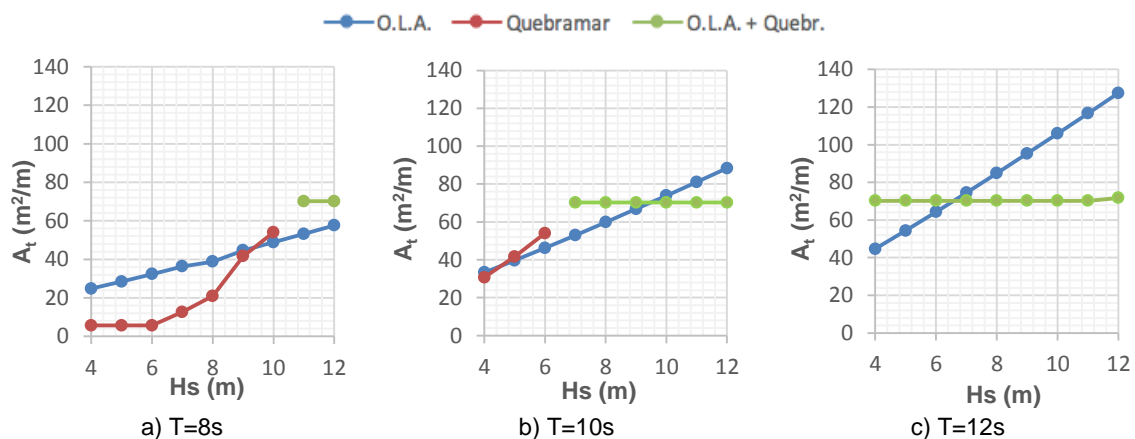


Figura 17 - Área transversal necessária para mitigar totalmente os galgamentos

De forma geral, para ondas de menor altura incidente e menor período de onda a solução que requer menor área de seção transversal é o quebramar destacado. Num plano intermédio, para ondas incidentes de altura média e período de onda de 10s , a obra longitudinal aderente apresenta menores áreas de seção transversal para evitar os galgamentos. Por último, em circunstâncias de um clima de agitação mais energético, com maiores períodos de onda associados, a solução que conjuga os quebramares destacados submersos e a obra longitudinal aderente é a que apresenta os melhores resultados. Note-se que para todos os cenários avaliados, o quebramar destacado conjugado com a obra longitudinal aderente de

menor dimensão é suficiente para mitigar os galgamentos, mesmo no cenário de agitação mais desfavorável (onda de 12m com um período de 12s).

Na análise do comportamento em planta, adotou-se também a mesma geometria das seções transversais das estruturas. Desta forma, a Figura 18 reflete a resposta da linha de costa à construção de estruturas longitudinais aderentes ou destacadas, por comparação com o cenário de referência (onde não se construiu qualquer obra), num horizonte temporal de 5 anos de simulação. Na Figura 18a, relaciona-se a área de erosão por efeito da construção dos quebra-mares destacados (ΔA) com as dimensões da estrutura normalizadas à relação entre o comprimento da estrutura (L) e o afastamento da mesma à linha de costa inicial (d). A Figura 18b relaciona a mesma área ΔA com o volume de material necessário associado a cada solução.

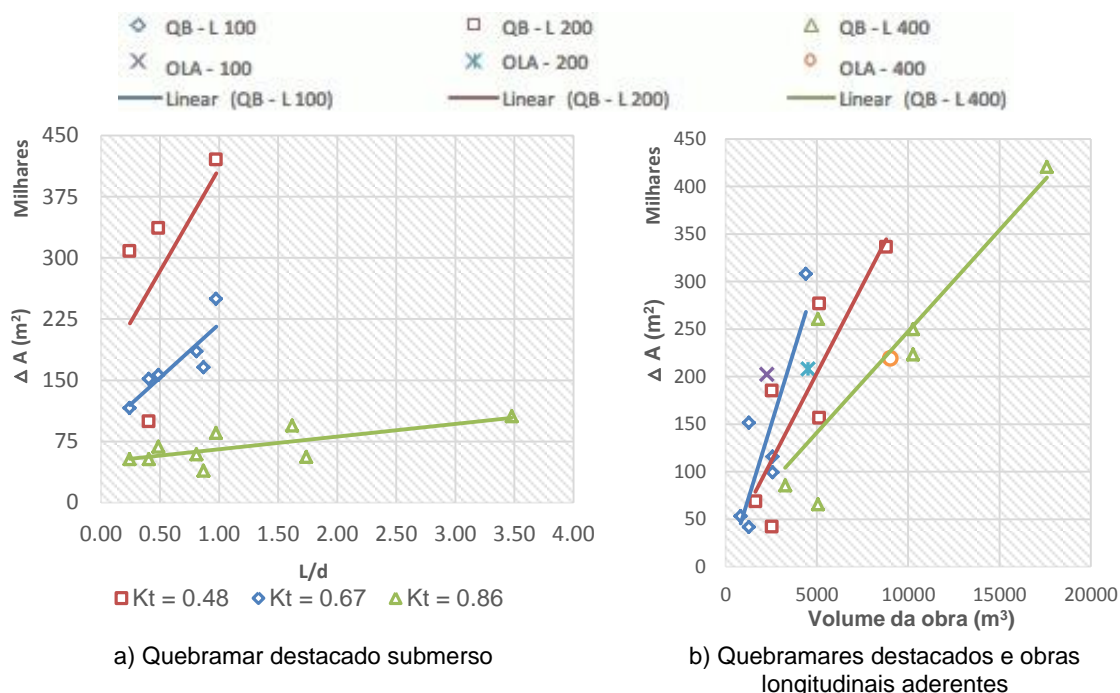


Figura 18 - Variação da área de território na presença das estruturas de defesa costeira (QB: quebra-mar destacado submerso; OLA: obra longitudinal aderente)

Na Figura 18a verifica-se que com o aumento da proporção L/d aumenta também a área de erosão. Esta tendência é superior para valores de K_t menores, pelo que as estruturas maiores, que são mais eficazes na redução da altura de onda, geram no entanto um aumento da área perdida ao longo dos 5 anos de simulação. Na Figura 18b é perceptível o comportamento obtido das estruturas com o aumento do seu comprimento. A resposta obtida quando se comparam os dois tipos de obra é semelhante se for observada a linha de tendência linear traçada para os quebra-mares destacados e o resultado obtido para as obras longitudinais aderentes.

5. CONCLUSÕES

O combate à erosão com recurso a estruturas de defesa costeira apresenta vantagens, mas também consequências negativas. Por isso, foi objetivo deste trabalho analisar o comportamento transversal e em planta das obras longitudinais aderentes e dos quebra-mares destacados submersos. Num contexto geral, estudou-se o comportamento transversal através do espriamento e do galgamento das estruturas em função de diferentes condições de agitação. Para maiores alturas e períodos de onda incidente, independentemente do tipo de estrutura, verifica-se um aumento no número de galgamentos previstos. Constatou-se que, ao relacionar as áreas das diferentes seções transversais das estruturas que eliminam os galgamentos na sua totalidade com o aumento da altura de onda incidente, a melhor opção

estrutural para ondas mais energéticas não é a mesma que para ondas intermédias. Este comportamento também é verificado para o período de onda, já que para períodos de onda menores a melhor solução no comportamento transversal é em geral o quebramar destacado, e para períodos de onda superiores já depende bastante da altura da onda incidente.

Ainda relacionado com o comportamento transversal das estruturas, a geometria da estrutura foi avaliada, nomeadamente a inclinação do talude nas obras longitudinais aderentes, e a cota de coroamento, nos quebramares destacados submersos. Nas obras longitudinais aderentes, com o aumento da inclinação do talude reduz-se a eficácia da estrutura, apesar da diminuição da área transversal da seção da estrutura. Nos quebramares destacados submersos, o aumento da profundidade da cota de coroamento diminui a capacidade de redução do espraçamento, diretamente relacionado com aumento do coeficiente de transmissão da estrutura. A eficácia dos quebramares destacados submersos quando comparada com a das obras longitudinais aderente é superior no que refere à redução de galgamentos, já que para as mesmas áreas de seção transversal (quantidade de material) se obtêm menores espraçamentos e consequentemente menores percentagens de galgamentos.

Para a análise em planta, o primeiro fator de decisão relaciona-se com o eixo de implementação, diretamente relacionado com a variação da posição da linha de costa resultante da construção da estrutura. O aumento do afastamento da estrutura ao local de maior erosão revela uma menor tendência para a variação da posição da linha de costa e uma menor perda da zona A_2 com o implícito aumento da zona A_1 . A resposta da linha de costa ao aumento do comprimento das estruturas também é afetada pela localização escolhida, pois se as obras são implementadas em zonas de menor erosão são também menos afetadas pela dimensão da estrutura. Assim, esta distância afeta o comportamento esperado da linha de costa, pois para maiores afastamentos à zona de erosão haverá menores recuos a sotamar da estrutura, mas também não se verifica a fixação da linha de costa em zonas de maior intensidade de erosão.

Nos quebramares destacados submersos, para valores de K_t mais baixos, o aumento do comprimento da estrutura associa-se a um mais rápido assoreamento, enquanto para valores intermédios a resposta é oposta. Ainda na análise dos quebramares relacionaram-se diversos parâmetros, fazendo uma proporção L/d e analisando depois por K_t a evolução da linha de costa. Considerando o mesmo K_t , para valores superiores na relação L/d , resultam maiores variações da posição da linha de costa, com maior mitigação do problema de erosão costeira.

Em planta, as estruturas estudadas refletem o mesmo comportamento para semelhantes dimensões, onde se obteve uma média de impacto nas áreas de erosão por comparação com a posição da linha de costa ao fim de 5 anos de perto dos 200 000m². Devido ao quebramares destacados apresentarem mais variantes, é possível conjugar parâmetros e obter soluções que se adequem mais à zona de implementação, com menores cotas de coroamento, o que resulta em menos material utilizado sem alterar o comprimento da estrutura.

No estudo desenvolvido não foram avaliadas as eventuais condicionantes económicas e técnicas para execução de qualquer das obras, nomeadamente os quebramares destacados submersos, que por serem estruturas construídas ao largo, apresentam características técnicas muito específicas.

Bibliografia

Buccino, M., Calabrese, M. (2007). "Conceptual approach for prediction of wave transmission at low-crested breakwaters", *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 133(3), 213-224 p.

Burcharth, H., Hawkins, S., Zanuttigh, B., Lamberti, A. (2007). "Environmental Design Guidelines for Low crested Coastal Structures, Londres: Elsevier.

Coelho, C. (2005). "Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira"; Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 404 p.

David, B. (2006). "Shore Protection Projects:", Departamento de Engenharia Civil, Old Dominion University, Norfolk, Virginia, 109 p.

Dean, R. (1977). "Equilibrium beach profiles", U.S. Atlantic and Gulf coasts, Ocean Engineering Report, Nº 12, Department of Civil Engineering, University of Delaware, Newark, Delaware.

d'Angremond, K., Van der Meer, J., Jong, R. (1996). "Wave transmission at low crested structures", ASCE, Proc. ICCE, Orlando, Florida, 3305-3318.

Dean, R., Dalrymple, R. (2001). "Coastal processes with Engineering Applications", Cambridge University Press, United Kingdom, 464 p.

Debski, D., Loveless, J. (1997). "Wave transmission and set-up at detached breakwaters", Capítulo "Effects of coastal structures", "Coastal dynamics", edited by Edward B. Thornton, pp. 674-783.

Eurotop (2016). "Wave overtopping of sea defences and related structures-assessment manual"; UK: Allsop N.; Pullen T.; Bruce T.; NL: van der Meer; DE: Schuttrumpf, H.; Kortenhaus A.

Goda, Y., Takada, N., Monya, Y. (1967). "Laboratory Investigation of Wave Transmission over Breakwaters", Report of the Port and Harbour Research Institute, No. 13, 38 p.

Hanson, H., Kraus, N. (1989). "GENESIS: Generalized Model for Simulating Shoreline Change"; Report 1, Technical Reference, U.S. Army Corps of Engineers, 247 p.

Huang, W., Chou, C., Yim, J. (2004). "On Reflection and Diffraction due to a Detached Breakwater", Ocean Engineering 32 1762-1779, Elsevier, 18 p.

Nunes, B. (2012). "Comportamento de Quebramares Destacados no Litoral Noroeste Português", tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Portugal, 67 p.

Pedrosa, A. (2012). "Risco de erosão no litoral Norte de Portugal: uma questão de ordenamento do território", Fac. de Letras da Universidade do Porto, CEGOT, Portugal.

Pereira, G. (2008). "Projeto de um Quebramar Destacado de Proteção para a Frente Marítima de Espinho", Tese de Mestrado, Especialização em Hidráulica Recursos Hídricos e Ambiente, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 222 p.

Rijn, L. (2013). "Design of hard coastal structures against erosion", obtido de: www.leovanrijn-sediment.com, última consulta a 19/11/2016.

Simões, S. (2013). "Associação de Quebramares Submersos com Diferentes Configurações: Análises de Eficiência", tese de mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal, 70 p.

Silverter, R. (1974). "Coastal engineering II, Sedimentation, estuaries, tides, effluents and modelling", department of civil engineering, University of Western Australia, Nedlands, 311 p.

Taveira-Pinto, F. (2001). "Análise das oscilações e dos campos de velocidades nas proximidades de quebramares submersos sob a ação da agitação marítima", tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 300 p.

Teixeira, N. (2014). "Estudo do limite de espraçamento das ondas", tese de mestrado, Universidade de Aveiro, Portugal, 103 p.

Van der Meer, J., Daemen I. (1994). "Stability and wave transmission at low crested rubble mound structures", J. of WPC&OE, ASCE.