

DIMENSIONAMENTO OPTIMIZADO DE QUEBRAMARES DE TALUDES Optimized Design of Rubble Mound Breakwaters

FRANCISCO TAVEIRA PINTO ⁽¹⁾ e PAULO CUNHA ⁽²⁾

⁽¹⁾ Prof. Catedrático, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

⁽²⁾ Eng. Civil, FEUP,
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, ec01163@fe.up.pt

Resumo

O dimensionamento de quebramares de taludes obedece a critérios hidráulicos e estruturais que, relacionados com o grau de segurança que exigem face às condições de agitação, tornam o dimensionamento bastante delicado.

Esse dimensionamento resulta num custo de construção que, naturalmente, será tanto maior quanto maior for o grau de segurança pretendido.

Para além disso, durante a sua vida útil, estas estruturas têm em geral, reparações que são condicionadas pelo dimensionamento inicial, que, por vezes, podem atingir custos bastante elevados.

Assim, pretende-se analisar a relação entre os custos de construção de quebramares de taludes com os custos das reparações ao longo do período de vida útil e obter o dimensionamento óptimo.

Será efectuado um Estudo Económico para o caso do Quebramar Norte do Porto de Leixões, analisando a relação entre os custos de construção e os custos de reparação, resultando num dimensionamento óptimo.

Palavras-chave: Quebramares de taludes; porto de Leixões; dimensionamento optimizado.

Abstract

The design of rubble mound breakwaters obeys to hydraulic and structural criteria, that in addition to the degree of safety required in face of the conditions of agitation, make the design a very delicate issue.

This design reflects in high construction costs that, naturally, will be greater the higher the degree of security desired.

In addition, during their lifetime, these structures have, in general, repairs that are conditioned by the initial design, which sometimes can reach very high costs.

Thus, we intend to analyze the relationship between the costs of building the rubble mound breakwaters with repair costs over the life cycle period and achieve the optimal design

Economic Studies will made for the case of the North breakwater of the Leixões harbor, analyzing the relationship between construction costs and repair costs, resulting in optimal scaling.

Keywords: Rubble mound breakwaters; Leixões harbor; optimized design.

1. Introdução

Os quebramares são estruturas de protecção portuária que possuem limites de resistência.

Nos quebramares a questão da resistência não é abordada da mesma forma que noutras estruturas mais comuns da engenharia. Os quebramares não são projectados para resistirem sem estragos a todas as acções às quais estão sujeitos ao longo do período de vida útil. A principal razão prende-se com as características da acção do mar. A acção da agitação marítima consegue atingir níveis que não se comparam com a maior parte das acções que se consideram noutras estruturas. Um quebramar que resistisse a todas as acções previstas ao longo do seu período de vida útil sem quaisquer estragos teria dimensões e custos incompontáveis.

Ao largo de Portugal, os estados de agitação marítima atingem, com alguma frequência, valores bastante elevados. Isto leva a que na maioria das estruturas se verifiquem estragos e a necessidade de reparações com uma periodicidade inferior à desejada. Esses problemas têm um custo que, com o aumento do período de vida útil da obra, se torna mais grave.

O custo de construção aumenta em função da capacidade resistente da estrutura, enquanto o custo das reparações se reduz, não seguindo, uma função específica.

O aumento da resistência da estrutura implica um aumento da secção do quebramar que não se consegue construir sem se recorrer a processos de construção alternativos que invariavelmente têm custos superiores aos dos processos convencionais.

No presente trabalho pretende-se apresentar a relação entre os custos de construção dos quebramares de taludes com os custos das reparações ao longo do período de vida útil e obter as condições de dimensionamento óptimo.

Será efectuada uma aplicação do Estudo Económico optimizado ao quebramar Norte do Porto de Leixões, com obtenção da altura de onda de projecto que conduz ao dimensionamento óptimo.

O dimensionamento de um quebramar é condicionado pela tempestade de projecto à qual se espera que a estrutura, nomeadamente o manto resistente, resista.

Quanto maior for a altura de onda associada a esta tempestade, mais reforçado terá que ser o manto resistente. O "Coastal Engineering Manual" (CEM, 2006) recomenda a utilização, como altura de onda de projecto para quebramares de taludes, de valores entre $\bar{H}_{1/3}$ e $\bar{H}_{1/10}$.

Desde que surgiram os primeiros quebramares que a questão da manutenção adquiriu uma grande importância.

Não há estruturas que consigam resistir indefinidamente à ondulação sem sofrerem estragos e na maior parte dos casos, esses estragos representam custos significativos. A partir do momento em que se começaram a construir Portos de maior dimensão começou, também, a verificar-se uma maior necessidade de operações de manutenção.

2. Dimensionamento Optimizado de Quebramares de Taludes

2.1. Introdução

Quando uma secção de um quebramar de taludes é dimensionada para uma dada altura de onda, significa que essa secção resistirá, em princípio, a todas as acções do mar, desde que inferiores à tempestade de projecto, definida no processo de dimensionamento.

Contudo, a qualquer instante podem ocorrer tempestades superiores à de projecto e consequentemente destruir a obra ou provocar danos parciais. Uma possível solução seria o dimensionamento do quebramar de taludes de modo a que resistisse a todas as tempestades.

No entanto, a viabilidade dessa solução perde-se no momento do orçamento! Tendo em conta esta situação, como poderá o projectista fixar um valor aceitável para a tempestade de projecto?

Um conjunto de registos de alturas de onda de agitação marítima, obtido ao longo de vários anos, permite obter a probabilidade de excedência de uma altura de onda, associada a uma dada intensidade de uma tempestade e, simultaneamente, o correspondente período de retorno - definido como o intervalo de tempo médio entre duas tempestades cujas intensidades excedam um determinado valor.

Um registo de agitação não indica a altura de onda significativa de cálculo que deverá ser considerada para o dimensionamento do quebramar.

Apenas, apresenta a probabilidade de excedência das características de uma determinada tempestade (altura de onda) num determinado período de tempo.

Surge então uma dúvida: Qual a tempestade de projecto a adoptar ou, o que representa o mesmo, que período de retorno se deve considerar para a tempestade de projecto.

Estas questões foram estudadas ao longo das últimas décadas por vários autores. Os dois critérios mais utilizados para a resolução deste problema são o critério do risco (não abordado neste estudo) e o dimensionamento optimizado de um quebramar, Van Kreeke e Paape 1964, conhecido como "estudo económico da secção-tipo".

2.2. Estudo económico da secção-tipo

O dimensionamento de um quebramar de taludes é considerado óptimo quando dele resulta uma estrutura para a qual o investimento total realizado durante o seu período de vida útil previsível é mínimo, Figura 1. Entende-se por investimento total a soma do custo de construção do quebramar, mais o valor das perdas económicas devidas à manutenção da obra. Estas perdas económicas incluem, além das devidas à reparação ou construção do quebramar, os danos provocados aos bens defendidos, as perdas devidas a uma possível paralisação do porto, etc.

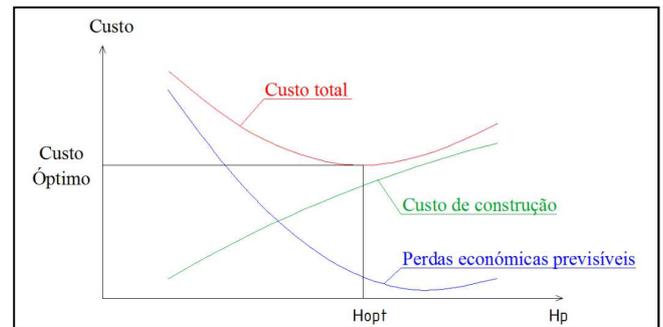


Figura 1. Curva de custos.

Seja C_T , Figura 2, a curva de custos totais em função da altura de cálculo baseada nos dados disponíveis. O mínimo desta curva é o ponto O_T ao qual corresponde um custo total C_{OT} e uma altura de onda de cálculo H_{OT} . De acordo com esta abordagem, a estrutura será dimensionada para uma altura de onda H_{OT} .

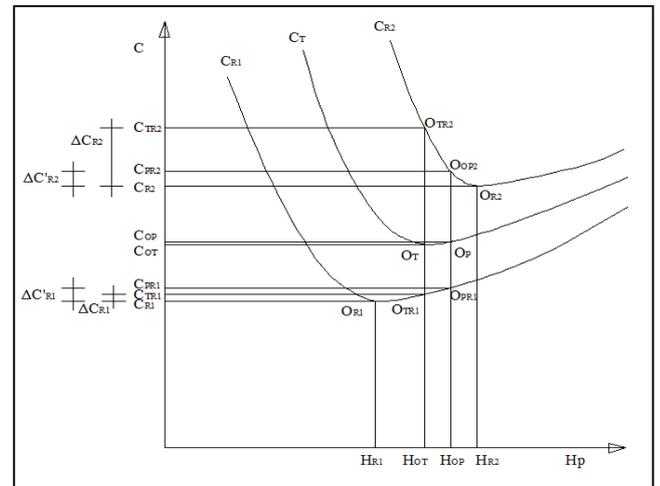


Figura 2. Curvas de custos totais.

Supondo que os dados não estão correctos e que na realidade a situação é mais favorável, obtém-se a curva de variação de custos totais reais C_{R1} , cujo mínimo está em O_{R1} com um custo total de C_{R1} .

Como a estrutura foi dimensionada para H_{OT} , o seu custo total será C_{TR1} , o que supõe um incremento do respectivo custo mínimo, cujo valor é ΔC_{R1} . Normalmente, este incremento é relativamente pequeno, uma vez que à direita do mínimo a variação da curva de custos é suavemente ascendente.

No entanto, se considerarmos agora que a situação real é mais desfavorável e seja a curva real igual a C_{R2} , cujo mínimo está em O_{R2} com um custo C_{R2} , tal como no caso anterior, já que a estrutura foi dimensionada para H_{OT} , o seu custo total será C_{TR2} , com um incremento de custo sobre o mínimo de valor ΔC_{R2} mas neste caso o incremento tem um valor considerável e, mais grave ainda, é devido a um aumento dos danos previsíveis, uma vez que há um deslocamento para a esquerda do mínimo.

2.2.1. Registos de agitação

O regime de tempestades a considerar permite determinar a probabilidade da altura de onda significativa ser igual ou superior a um determinado valo, H_{S0} . Essa probabilidade, também designada de probabilidade de excedência é calculada pela seguinte expressão:

$$P(H_s > H_{S0}) = 1 - P(H_s < H_{S0}) \quad [1]$$

Importa referir que estimativas obtidas a partir de um mesmo registo de agitação, usando métodos de extrapolação diferentes, podem dar resultados distintos. Cada zona costeira apresenta as suas características próprias de agitação que podem ser quantificadas por determinadas curvas de distribuição que podem não se aplicar noutras zonas. É fundamental saber previamente que tipo de distribuição se deve utilizar.

2.2.2. Altura de onda significativa de projecto

A altura de onda de projecto pode ser a altura de onda significativa, ou seja a média do terço superior das alturas de onda mais altas de um temporal. Sendo certo que as ondas atingirão alturas superiores, será sempre obrigatório que o quebramar dimensionado resista a todas as tempestades, incluindo as ondas com altura superior à altura de onda de projecto que caracteriza essa tempestade. Em todo o caso a altura de onda de projecto nunca deverá exceder a altura de onda significativa máxima condicionada pela profundidade da água na zona de implantação da estação.

2.2.3. Custos de construção

O custo de construção foi estimado de duas maneiras: uma estimativa que admite um incremento progressivo dos custos dos materiais à medida que a altura de onda de projecto aumenta e uma segunda estimativa considera que, para além dos custos anteriores (dos materiais), serão de considerar também os custos reais de construção relativos ao equipamento de construção necessário para a colocação dos mesmos materiais na obra.

A diferença entre estas estimativas, a partir de determinada altura de onda de projecto pode dever-se ao aumento dos custos associados à necessidade de se utilizar meios mecânicos de trabalho extra para a execução e colocação dos blocos que constituem o manto resistente.

2.2.4. Avaliação dos estragos

No estudo económico de um quebramar de taludes é importante determinar a relação entre os danos provocados por uma tempestade e a altura de onda significativa associada, relativamente à H_s de projecto. Esta curva pode ser determinada por ensaios em modelo reduzido ou adoptar-se uma curva geral de estragos como a que foi proposta por Iribarren em 1965. A curva de estragos é geral para a maioria das secções. Em abcissas, Figura 3, encontra-se a relação adimensional entre a altura de onda significativa de projecto e uma altura de onda significativa de valor superior e em ordenadas encontram-se as percentagens de danos do manto resistente.

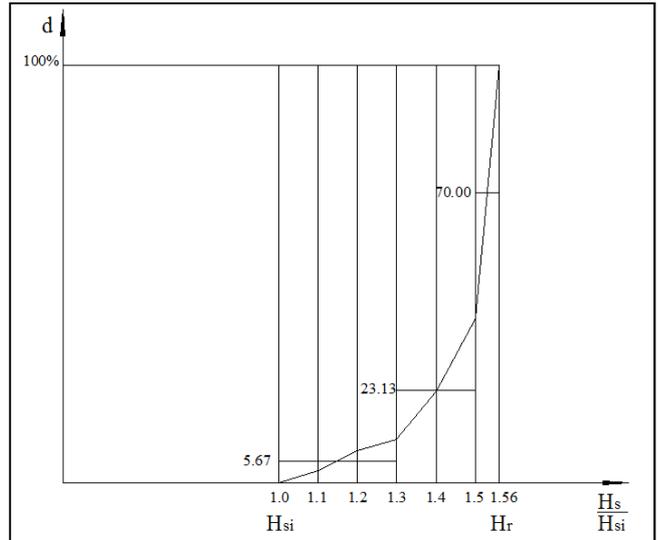


Figura 3. Curva de estragos proposta por Iribarren, Carro e Celda, 1978.

A curva de Iribarren contabiliza apenas os estragos no manto activo. É necessário calcular a percentagem que o manto activo representa em relação ao manto resistente total para posteriormente se obter a percentagem de estragos em relação à totalidade da secção. O manto activo é a zona mais solicitada da primeira fiada de blocos do manto resistente, Figura 4.

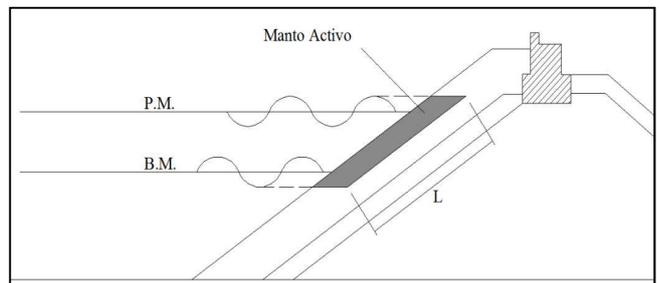


Figura 4. Localização do manto activo na secção do quebramar.

O comprimento aproximado do manto activo, L , é determinado através da seguinte expressão:

$$L=6 (W / \gamma)^{1/3} \quad [2]$$

em que W corresponde ao peso do bloco utilizado no manto activo e γ , o peso volúmico do material do bloco.

Considera-se que ocorre destruição total (100% de danos) quando todos os elementos da primeira camada do manto activo são deslocados da sua posição.

Quando este ponto é atingido admite-se, segundo Iribarren, que os estragos se processam muito rapidamente até se destruir totalmente o quebramar. Iribarren considerava que, até se atingir a destruição total, os danos apenas se manifestam no manto activo e que apenas a partir da destruição total é que os custos relativos aos equipamentos e infra-estruturas deveriam ser considerados.

O método utilizado por Iribarren consistia no aumento progressivo da altura de onda e observação dos estragos registados. Portanto, se a secção tiver sido dimensionada para um temporal com $H_s=7m$, e for construído um modelo reduzido da secção, simulando os efeitos de tempestades com $H_s=8m$, $H_s=9m$, $H_s=10m$, ..., pode medir-se a percentagem de estragos da secção, tal como Iribarren fez. A tempestade de rotura será, então, a que estiver associada a $H_r=1,56 \times 7=10,92m$.

Assim,

- Para tempestades com alturas de onda significativas inferiores a 7m, a estrutura resistirá sem estragos;
- Para tempestades com alturas de onda superiores a 10,92m, a estrutura colapsará;
- Para tempestades com alturas de onda significativas intermédias a estrutura terá danos correspondentes aos observados na curva de Iribarren.

Para facilitar os cálculos dos custos dos estragos na fase anterior à fase de destruição total (fase de danos parciais) adoptaram-se os três seguintes intervalos de alturas, $[H_s \text{ a } 1,3 \times H_s]$, $[1,3 \times H_s \text{ a } 1,5 \times H_s]$ e $[1,5 \times H_s \text{ a } 1,56 \times H_s]$, aos quais correspondem as percentagens médias de estragos de 5,67%, 23,13% e 70%, respectivamente, Figura 3.

A probabilidade de H_s estar num determinado intervalo é calculada da seguinte forma:

$$P_r(H_{s1} \leq H_s \leq H_{s2}) = P_r(H_s \geq H_{s1}) - P_r(H_s \geq H_{s2}) \quad [3]$$

2.2.5. Avaliação dos custos associados aos estragos em infra-estruturas

A correcta avaliação dos custos devidos aos estragos nas infra-estruturas resguardadas pelo quebramar é tão importante quanto difícil de conseguir.

A sua importância num estudo económico é tal que exige uma abordagem delicada. Neste tipo de avaliação devem considerar-se dois tipos de prejuízos:

- Directos:

- No quebramar propriamente dito (superestrutura, etc.);
- No equipamento terrestre;
- Nos navios protegidos pelo porto.

- Indirectos como consequência menos imediata da rotura ou inoperacionalidade do quebramar:

- Paralisação do terminal devido à rotura do quebramar e consequentes prejuízos devidos a desvios de navios para outros portos;
- Paralisação do terminal durante as obras de reconstrução e consequentes prejuízos;
- Possível paralisação de indústrias dependentes do porto.

2.2.6. Período de vida útil da obra

Pela influência que tem no resultado final, a avaliação do período de vida útil previsível da obra requer uma análise do papel que a parcela em estudo desempenhará no porto ao longo do tempo e da sua importância económica. Em geral é superior a 50 anos.

2.2.7. Aplicação do estudo económico

Terminada a fase de selecção de dados e passando para o estudo económico propriamente dito, pode-se considerar, ainda, a introdução de um coeficiente de majoração dos custos, β , igual a:

- $\beta=2$, para reparações correspondentes às secções de menor altura de onda significativa e para as reconstruções totais da estrutura.
- $\beta=3$, para reparações correspondentes às secções dimensionadas para as maiores alturas de onda significativas, considerando-se que a movimentação de meios mecânicos será mais complexa.

3. Aplicação do Estudo Económico ao Quebramar Norte do Porto de Leixões

3.1. Introdução

A metodologia apresentada no capítulo anterior será aplicada a uma secção do quebramar Norte do Porto de Leixões, Figura 5.



Figura 5. Localização do posto A (Fonte: APDL).

O Quadro 1 apresenta o número de tetrápodes que foram colocados nas últimas décadas. Mesmo depois da construção do quebramar destacado, que reduziu o número de reposições, o número total de tetrápodes colocados seria já suficiente para construir um novo manto resistente!

Quadro 1. Número de tetrápodes colocados no quebramar nas últimas décadas.

Anos	Tetrápodes Colocados	Anos	Tetrápodes Colocados
1966/69	2868	1987/88	371
1971/1972	1000	1990/91	366
1973	1010	1996/97	250
1978/79	907	2000/01	350
1979/1980	1298	2003	450
1984/85	310	2008/09	1200
		Total	10380

3.2. Aplicação do estudo económico ao quebramar Norte do porto de Leixões

3.2.1. Configuração existente

Com a fundação à cota -17m (ZH) e cota de coroamento a +15m, o quebramar Norte, Figura 6, constitui a maior estrutura de defesa portuária do Porto de leixões.

A secção apresenta várias camadas e uma configuração complexa, porém, para o trabalho em questão irá apenas ser analisada a parte referente ao talude do qual fazem parte o manto resistente e as subcamadas, admitindo que se pretende apenas otimizar esta parte da estrutura. Um resumo das características principais do talude é apresentado no Quadro 2.

Tendo em conta estes valores foi efectuada uma tentativa de determinação da altura de onda de projecto utilizada para o dimensionamento do manto resistente.

A fórmula usada, não existente na década de 60, foi a de Hudson, tendo sido considerados ainda os dados apresentados no Quadro 3.

Para estes valores e para um peso de 400 kN dos tetrápodes constatou-se que a altura de onda de dimensionamento para o quebramar Norte terá sido de 6,83 m - caso K_D fosse igual a 7 este valor passaria para 7,63 m.

Este valor servirá para comparação com os valores determinados pelo estudo económico.

3.2.2. Valores extremos dos registos de agitação marítima

Considerando uma amplitude de maré ao largo de Leixões de 4 m que somada com a profundidade que se verifica a barlamar do quebramar de 17 m, origina a profundidade máxima de 21 m, ou seja,

$$d = 17 + 4 = 21 \text{ m} \tag{4}$$

obtém-se uma altura de onda máxima, de acordo com a teoria de onda solitária de $H_{m\acute{a}x}=d \times 0,78=21 \times 0,78=16,4 \text{ m}$. A altura de onda máxima a ser considerada no estudo económico seria de 16,4 m. Uma vez que a altura de onda de projecto estimada para o quebramar é de 6,83 m, optou-se por se considerar como valor mínimo de altura de onda para o estudo económico um valor um pouco inferior, igual a 5 m. Como valor-limite superior foi considerada uma altura de 9 m, pois acima deste valor a solução encontrada não era exequível. Ainda assim, foram considerados, em alguns momentos do cálculo, valores de alturas de onda de projecto superiores para se obter uma maior gama de resultados e consequentemente determinar-se com melhor precisão gráfica a altura de onda de projecto óptima. No caso de Leixões, os registos existentes foram avaliados pela distribuição de Gumbel, obtendo-se a seguinte equação,

$$P(H_s < H_{s0}) = e^{-e^{\frac{H_s - 6.635184}{0.629644}}} \tag{5}$$

O tipo de distribuição utilizado poderá ter alguma influência no resultado final dos custos obtidos no estudo económico.

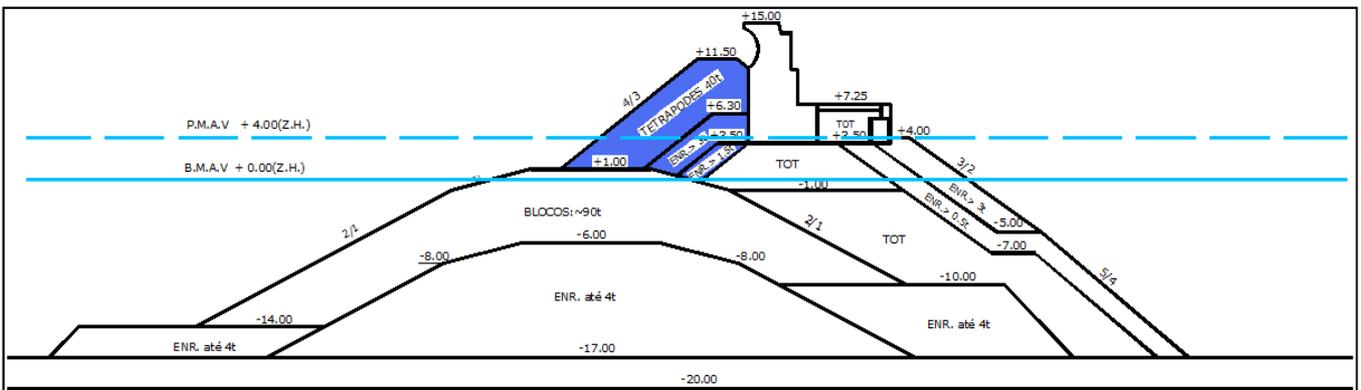


Figura 6. Secção transversal do quebramar, tal como foi projectada na década de 60 com o manto resistente e as subcamadas.

Quadro 2. Características do talude.

	Inclinação	Tipo de Blocos	Peso dos Blocos (kN)	Espessura das Camadas (m)
Manto Resistente	4/3	Tetrápodes	400	5.2
1ª Subcamada	4/3	Enrocamento	>30	2.6
2ª Subcamada	4/3	Enrocamento	>15	1.9

Quadro 3. Características do manto resistente.

Geral		Manto Resistente			Subcamadas	
Yágua (kN/m³)	Cotg θ	Ybetão (kN/m³)	K _D	K _Δ	Yenrocamento (kN/m³)	K _Δ
10.25	4/3	25	5	1.04	26.5	1.15

Daí que se tenha optado por fazer uma análise de extremos para se obter também a distribuição de Weibull, para o mesmo registo. A equação correspondente à distribuição de Weibull, para a agitação ao largo de Leixões, é dada por,

$$P(H_s < H_{s0}) = 1 - e^{-\left(\frac{H_s - 6,145}{0,901}\right)^6} \quad [6]$$

3.2.3. Dimensionamento das diversas soluções

O procedimento incluirá o dimensionamento de várias secções para valores de H_s superiores a 5. Na Figura 7 pode-se ver o tipo de variação da secção que se pretende produzir com o estudo. O dimensionamento foi efectuado considerando as características já enunciadas nos Quadros 2 e 3.

Em todas as soluções, o manto resistente será constituído por tetrápodes e as subcamadas por enrocamento.

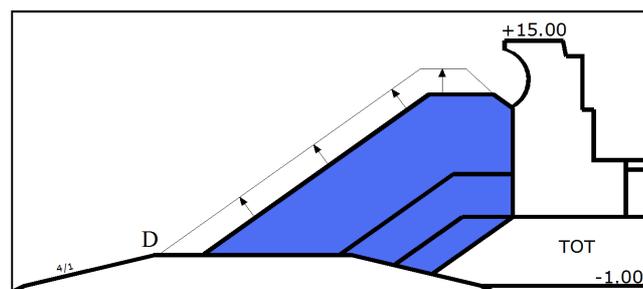


Figura 7. Secção do manto resistente que poderá ser alterada.

O procedimento adoptado foi o preconizado pelo CEM através do qual se determinaram as características dos blocos a adoptar para cada uma das alturas de onda significativas de projecto.

Os Quadros 4 a 6 apresentam o resumo do dimensionamento para as diferentes hipóteses.

Quadro 4. Características do manto resistente.

Altura da onda de projecto (m)	W (kN)o	Espessura de cada camada de tetrápodes (m)	N.º de camadas	Espessura total do manto resistente (m)
5	157	1.9	2	3.8
6	272	2.3	2	4.6
7	432	2.7	2	5.4
8	644	3.1	2	6.1
9	917	3.5	2	6.9
10	1258	3.8	2	7.7

Quadro 5. Características da 1ª Subcamada.

Altura da onda de projecto (m)	W_{eq} (kN)o	W_1 (kN)o	$0.7 \times W_1$	$1.3 \times W_1$	Espessura de cada camada de enrocamento (m)	N.º de camadas	Espessura total da 1ª camada (m)
5	167	16.7	11.7	21.7	0.99	2	1.97
6	288	28.8	20.2	37.5	1.18	2	2.37
7	458	45.8	32.0	59.5	1.38	2	2.76
8	683	68.3	47.8	88.8	1.58	2	3.15
9	972	97.2	68.12	126.4	1.77	2	3.55

Quadro 6. Características da 2ª Subcamada.

Altura da onda de projecto (m)	W_2 (kN)o	$0.5 \times W_2$	$1.5 \times W_2$	Espessura de cada camada de enrocamento (m)	N.º de camadas	Espessura total da 1ª camada (m)
5	0.83	0.42	1.25	0.36	3	1.09
6	1.44	0.72	2.16	0.44	3	1.31
7	2.29	1.14	3.43	0.51	3	1.52
8	3.41	1.71	5.12	0.58	3	1.74
9	4.86	2.43	7.29	0.65	3	1.96
10	6.67	3.33	10.00	0.73	3	2.18

3.2.4. Custos de construção

A avaliação dos custos foi dividida em: Estaleiro; Remoção de elementos soltos; Custo do manto resistente; Custo total do quebramar; Inflação.

Os preços unitários foram, na sua maioria considerados referentes a 2003, *Veloso-Gomes et al., 2004* e posteriormente actualizados.

No caso de Leixões a zona que tem sido mais afectada é o talude a barlamar do quebramar na zona do Posto A e é especificamente essa a zona que este estudo considera poder ser alvo de correcções.

Estando o comprimento definido - 100 m - pode efectuar-se o estudo económico para a totalidade do troço do quebramar.

3.2.4.1. Custo do manto resistente

O custo do manto resistente resulta da soma das parcelas dos custos do estaleiro e dos custos de remoção de elementos soltos com os custos de fabrico, transporte e colocação dos tetrápodes no talude. No Quadro 7, apresenta-se um resumo dos referidos custos.

Quadro 7. Custos totais do manto resistente.

H _{sp} (m)	C _{estaleiro} (€)	C _{remoção} (€)	C _{fabrico} (€)	C _{colocação} (€)	C _{MR} (€)
5	120000	12815	412548	137632	682995
6	120000	12815	554262	107008	794085
7	120000	12815	712224	93441	938480
8	120000	12815	890276	116801	1139892
9	120000	12815	1144532	150159	1427506
10	120000	12815	1375863	180508	1689186
11	120000	12815	1617812	212251	1962878
12	120000	12815	1896158	248769	2277742

3.2.4.2. Custo total do quebramar

Posto isto, pode-se determinar os custos totais das diversas secções. Os custos totais serão, então, a soma dos custos do manto resistente e das subcamadas. Até ao momento, os preços foram os considerados numa empreitada de 2003, que serão depois actualizados.

Quadro 9. Dimensões do manto activo e relação entre o seu volume e o do manto resistente.

H _s	Comprimento do manto activo em perfil transversal (m)	Espessura de cada camada (m)	Comprimento em perfil longitudinal (m)	Volume total do manto activo (m ³)	Volume total do manto resistente (m ³)	Relação (%)
5	6.54	1.92	100	541	2460	22.0%
6	7.65	2.30	100	761	3305	23.0%
7	8.75	2.69	100	1019	4247	24.0%
8	9.86	3.07	100	1314	5309	24.8%
9	10.97	3.46	100	1651	6825	24.2%
10	12.08	3.84	100	2013	8205	24.5%
11	13.18	4.22	100	2412	9648	25.0%

O valor médio da taxa de inflação para esse período foi de 2,5%. Os preços actualizados para o manto resistente e para a secção do quebramar Norte passam, então, a ser os indicados no Quadro 8.

Quadro 8. Custos totais da secção actualizados.

H _{sp} (m)	C _{total} (€)	H _s (m)	C _{total} (€)
5	920748	9	1834411
6	1082852	10	2207330
7	1286094	11	2560351
8	1557970	12	2963080

3.2.5. Custos de paragem do Posto A

Os custos devidos aos estragos nas infra-estruturas resguardadas pelo quebramar Norte de Leixões resultam de dois tipos de prejuízos: directos e indirectos.

Determinou-se que o custo que o Posto A representa anualmente para a APDL em termos médios até 2006, é de €4376085.

3.2.6. Avaliação dos estragos segundo a curva de Iribarren

A parte crucial do estudo económico está relacionada com a interligação da curva de estragos de Iribarren com as funções de distribuição de probabilidades e com os custos de construção de toda a secção do talude.

Para tal, é fundamental que todos os custos estejam em função da altura de onda de projecto H_{sp}. Os processos de determinação dos custos de construção são em função do peso, W, e do número de blocos, N_{tetrápodes}, que por sua vez são em função de H_{sp}, logo, temos esta condição assegurada.

3.2.6.1. Manto activo

As percentagens de estragos atrás referidas são referentes ao manto activo, que corresponde a uma parte da 1ª fiada de blocos do manto resistente que recebe a acção da maior parte da agitação. Deverá, então, ser determinada a parte do manto resistente que corresponde ao manto activo. Determinaram-se os volumes dos mantos activos e a relação entre estes volumes e os volumes do manto resistente apresentados no Quadro 9.

3.2.6.2. Exemplo de avaliação dos custos segundo a curva de Iribarren

Como foi referido anteriormente, a avaliação dos custos segundo Iribarren consiste na interligação da curva de estragos de Iribarren com as funções de distribuição de probabilidades e com os custos de construção de toda a secção do talude, parâmetros que já foram determinados. No Quadro 10 apresenta-se um exemplo explicativo deste processo com os seguintes dados de base:

- Altura de onda de projecto igual a 5 m;
- 50 anos de período de vida útil;
- Preço total do tramo de 100 m em estudo e apenas do manto resistente de €920748 e €792065 (valor actualizado), respectivamente;
- Custos de paragem do Posto A de €4376085;
- $\beta=1$;

Quadro 10. Exemplo de cálculo do custo dos estragos prováveis.

Estragos parciais									Estragos totais		Custo dos estragos prováveis em 2009
$H_{si} < H_s \leq 1,3 H_{si}$			$1,3 H_{si} < H_s \leq 1,5 H_{si}$			$1,5 H_{si} < H_s \leq 1,5 H_{si} = H_r$			$H_s > H_r = 1,56 H_{si}$		
ΔP_r	$d\%$	$\Delta P \Delta W$ (€)	ΔP_r	$d\%$	$\Delta P \Delta W$ (€)	ΔP_r	$d\%$	$\Delta P \Delta W$ (€)	$P_r(H_s < H_r)$	$\Delta P \Delta W$ (€)	$L \Sigma \Delta P \Delta W$ (€)
0.291	1.25	2876	0.486	5.09	19583	0.078	15.40	9504	0.14498	767952	39995727

Quadro 11. Resultados obtidos para os dados de base anteriores.

Hipótese	L (anos)	Com 2ª Subcamada	β	Inflação (%)	H_p , óptima	C (€)
1	15	Sim	A	3	7.3	1523563
2	15	Sim	A	4	7.3	1537220
3	15	Sim	C	3	7.8	1686892
4	15	Sim	C	4	7.8	1703034
5	15	Não	A	3	7.3	1523563
6	15	Não	A	4	7.3	1537220
7	15	Não	C	3	7.8	1686892
8	15	Não	C	4	7.8	1703034
9	50	Sim	A	3	8.3	1847411
10	50	Sim	A	4	8.5	1909786
11	50	Sim	C	3	9.0	2060150
12	50	Sim	C	4	9.2	2128082
13	50	Não	A	3	8.3	1847411
14	50	Não	A	4	8.5	1909786
15	50	Não	C	3	9.1	2033762
16	50	Não	C	4	9.2	2095264

- Função de distribuição de Gumbel para os valores extremos.

O custo de €39995727 corresponde ao custo provável dos estragos que o quebramar terá ao longo da vida útil (excluindo os custos de construção), avaliado na actualidade.

A questão da avaliação dos custos na actualidade ou no ano horizonte é de uma relevância considerável. O custo óptimo avaliado no ano zero ou no ano horizonte resulta em alturas de onda de projecto diferentes.

3.2.7. Determinação de custos óptimos

Com base na informação recolhida é possível então determinar os custos totais e, finalmente, os custos óptimos. Para se poder fazer uma melhor análise dos resultados foram consideradas várias hipóteses, Quadro 11.

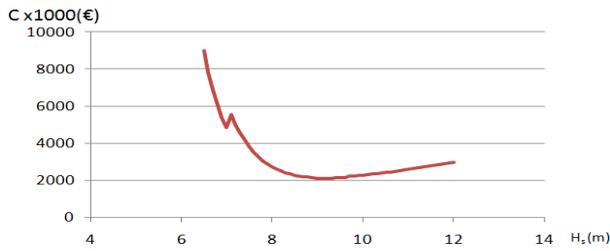


Figura 8. Variação dos custos totais para a hipótese 16.

4. Análise de Resultados e Conclusões

O estudo económico resume-se à determinação da altura de onda significativa de projecto óptima que minimiza o custo da construção e manutenção ao longo da vida útil da obra.

O estudo económico de uma secção é útil para se ter uma noção aproximada da dimensão final óptima da secção. Contudo, a essa altura de onda óptima está associado um determinado risco, pelo é aconselhável uma análise de risco para definir também essa solução final.

A determinação das alturas de onda significativas de projecto “óptimas” e dos custos totais prováveis no ano horizonte permitiram a obtenção de várias conclusões.

Fazendo uma análise de sensibilidade das variáveis foi possível averiguar quais as que mais influenciaram o resultado final.

A análise de sensibilidade foi feita através da avaliação da influência que cada parâmetro teve nos valores da altura de onda de projecto óptima e do custo total provável.

Constatou-se que o factor que mais influência teve na determinação da altura de onda de projecto óptima foi inquestionavelmente o período de vida útil da obra. Quanto maior o período de vida útil mais cara fica a obra e mais exigente deverá ser o seu dimensionamento.

No caso de Leixões, admitindo que o quebramar não sofrerá uma alteração significativa na sua secção nos próximos 50 anos, pode-se afirmar que os custos totais no fim do período de vida útil do quebramar serão, no mínimo, 79,4% superiores aos que seriam de esperar caso tivesse sido dimensionado para a altura de onda de projecto óptima. Esse prejuízo pode ser superior a 100% se o período de vida útil for superior a 50 anos.

Convém salientar que numa abordagem mais aprofundada, a avaliação das várias hipóteses deve ser efectuada com dados mais concretos, cuja dificuldade de obtenção mostrou ser um grande obstáculo ao desenvolvimento deste estudo.

Referências

- Coastal Engineering Manual. US Army Corps of Engineers, Jun. 2006.
- Kreeke, J., Paape, A. - *On Optimum Breakwater Design*. 9th Coastal Conference, 1964.
- Veloso-Gomes, F., Mota-Oliveira, I., Taveira-Pinto, F., Lopes, H., Pais-Barbosa, J., Gomes, N., Avilez-Valente, P., Trigo-Teixeira, A. - *Estudo sobre as Condições de Operacionalidade no Terminal Petroleiro do Porto de Leixões*; Relatório de Síntese; IHRH; 2004; 76pp.